UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y TÉCNICAS DE EXPRESIÓN GRÁFICA



TESIS DOCTORAL

Contraste metodológico e instrumental en el control geométrico de puentes por empuje de tablero durante su construcción.

Autor:

PEDRO MANUEL SIERRA GARCÍA

Director:

JULIO MANUEL DE LUIS RUIZ

Santander, Enero de 2016

AGRADECIMIENTOS

Cuando era un niño de no más de diez años y asomado a la ventana del balcón de mis abuelos, se veía desde allí la Escuela de Caminos y siempre decía, no se muy bien por qué, que estudiaría allí cuando fuera mayor.

Y así fue, y no hay nada más agraciado que tener la oportunidad de estudiar lo que siempre has querido y por eso, quiero dedicar estas primeras palabras a mis padres, que gracias a su esfuerzo y ejemplo, pude hacer realidad el sueño siempre pretendido.

El día que acabé la carrera, después de seis años intensos, fructíferos e inolvidables, quería hacer realidad todos los conocimientos adquiridos sin dejar de lado la fuente del conocimiento, por eso quiero acordarme del Departamento de Ingeniería Geográfica y Técnicas de Expresión Gráfica y muy personalmente de Rafa, que hizo posible seguir en contacto en la distancia y del que aprendí que las cosas con trabajo incesante casi siempre salen.

Paralelamente tuve la suerte de iniciar y pasar gran parte de mi vida profesional en la empresa que siempre quise, Dragados y Construcciones S.A., la que me permitió paso a paso poner en práctica mucho de lo aprendido en la Escuela y además poder realizar los laboratorios de toma de datos de esta tesis, ante lo que siempre estaré agradecido. Ahora bien, las empresas las hacen las personas y la lista de personas y sobre todo amigos a quien dar las gracias sería tan larga que me olvidaría de muchos, aunque todos ellos al leer estas líneas saben quien son.

Las distancias, gracias a poner en práctica lo que la Escuela nos ha enseñado cada vez son más cortas, pero a veces muy largas, por eso, quiero acordarme de mi amigo y director de tesis, J. Manuel de Luis, que no dudó desde esa lejanía en poner en marcha este proyecto a pesar de esas dificultades adicionales y quien con su paciencia, dedicación, conocimiento, orientaciones, correcciones permanentes sin escatimar tiempo y apoyo, ha sido el verdadero artífice de que se materialice este documento.

Tampoco podía faltar, mi amigo Alejandro Castillo, autor del Viaducto de la Miel y artífice verdadero de la finalización del nuevo Puente de la Bahía Cádiz, por sus aportaciones magistrales, haciendo siempre fácil lo difícil. De él siempre digo que desde que le conocí nunca he puesto en obra un metro cúbico de hormigón que no haya revisado, y lo revisa, y siempre con mejoras.

Por último, con el documento acabado, sólo puedo acordarme de mi mujer y mis hijos, ya que han sido los grandes sufridores del mismo pues el tiempo que no he podido dedicarles ya no va a volver y por eso merecen un agradecimiento especial. De Irene por su infinita comprensión y apoyo para poder finalizar este proyecto y para Pedro y Luis, que van a extrañar no verme redactando el mismo pues han nacido con ello, que les sirva de ejemplo cada vez que lean estas palabras y vean el documento.

"Las cosas no se dicen, se hacen, porque al hacerlas se dicen solas"

INDICE DEL DOCUMENTO.

1.-INDICE TEMÁTICO.

CAPÍTULO I.- PLANTEAMIENTO GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN.

1.- MARCO REFERENCIAL DE LA TESIS DOCTORAL. 3

1.1.- CONCEPCIÓN Y EVOLUCIÓN DE LOS PUENTES Y VIADUCTOS. 3

1.1.1.- Introducción. 3

1.1.2.- Las estructuras en Ingeniería. 3

1.1.2.1.- Introducción. 3

1.1.2.2.- Análisis de los factores intervinientes en el diseño de estructuras. 4

1.1.2.3.- La elección del tipo de puente y su proceso constructivo. 19

1.2.- LA CONSTRUCCIÓN DE TABLEROS DE PUENTES Y VIADUCTOS EMPUJADOS. 20

1.2.1.- Introducción. 20

1.2.2.- Principios generales. 20

1.2.3.- Condicionantes estructurales asociadas al proceso constructivo. 21

1.2.4.- Fundamentos del empuje. 23

1.2.5.- Tableros empujados de hormigón. 25

1.2.5.1.- Los tableros de hormigón. 25

1.2.5.2.- Sistemas de empuje aplicables a los tableros de hormigón. 26

1.2.5.3.- Aspectos a considerar en el empuje de un tablero de hormigón. 26

1.2.5.4.- El parque de empuje. 27

1.2.6.- Tableros mixtos empujados. 27

1.2.6.1.- Los tableros mixtos. 27

1.2.6.2.- Sistemas de empuje aplicables a los tableros mixtos. 27

1.2.6.3.- Aspectos a considerar en el empuje de un tablero mixto. 27

1.2.6.4.- El parque de empuje. 27

1.2.7.- El proyecto de empuje. 28

1.2.7.1.- Introducción. 28

1.2.7.2.- Contenido habitual del proyecto de empuje. 28

1.3.- EL CONTROL GEOMÉTRICO DE ESTRUCTURAS Y SU EVOLUCIÓN. 28

1.3.1.- Introducción. 28

1.3.2.- Esquema de control. 29

1.3.3.- Instrumentación y control geométrico del empuje. 30

1.4.- DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN. 31

1.5.- MOTIVACIÓN Y OBJETIVO DE LA TESIS. 31

2.- LA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA EN LOS CONTROLES GEOMÉTRICOS EN LA INGENIERÍA. 33

2.1.- Introducción a los conceptos fundamentales de la investigación. 33

2.1.1.- El conocimiento científico: Ciencia e Investigación. 33

2.1.2.- El conocimiento: clasificación de los conocimientos. 33

2.1.2.1.- Obtención de conocimientos particulares. 33

2.1.2.2.- Formulación de leyes experimentales. 34

2.1.2.3.- Construcción de modelos experimentales. 34

2.1.2.4.- Propuestas de teorías marco. 34
2.1.2.5.- Construcción de sistemas teóricos. 34
2.1.3.- La investigación científica. 34
2.1.3.1.- Etapas de la investigación. 34
2.1.3.2.- Tipos de investigación científica. 35
2.1.4.- La innovación tecnológica. 35
2.2.- El control geométrico de puentes y viaductos. 36
2.2.1.- Introducción. 36
2.2.2.- Los datos. 37
2.2.3.- El control geométrico. 37
2.2.4.- Sensores y/o instrumental de auscultación. 39
2.2.5.- La auscultación geodésica. 39
2.2.5.1.- Marco referencial. 39
2.2.5.2.- Auscultaciones geodésicas planimétricas. 40
2.2.5.3.- Auscultaciones geodésicas altimétricas. 40
2.2.5.4.- Aportación de la investigación a las auscultaciones geodésicas. 41
3.- MARCO INVESTIGADOR APLICADO AL DESARROLLO DE LA TESIS. 42
3.1.- Justificación y objeto. 42
3.2.- El problema de investigación. 42
3.3.- Exposición, planteamiento y representación del problema de investigación. 43
3.3.1.- Concepto. 43
3.3.2.- Presentación del problema de investigación. 43
3.3.3.- Argumentación del trabajo de investigación. 43
3.4.- Delimitación teórica a través del estado del arte. 43
3.5.- exposición de la Hipótesis. 44
3.6.- Metodología de la investigación. 44
3.6.1.- Introducción. 44
3.6.2.- Método lógico-deductivo. 45
3.6.3.- Método Inductivo. 45
3.6.4.- Método hipotético-deductivo. 45
3.6.5.- Método experimental. 46
3.6.6.- Otros métodos. 46
3.7.- Universo, población y muestra. 47
3.7.1.- Introducción. 47
3.7.2.- Requisitos de una muestra adecuada. 47
3.8.- Variables. 47
3.9.- Toma de datos. Instrumentos de medición. 47
3.9.1.- Etapa inicial. 48
3.9.2.- Compilación y verificación bibliográfica. 48
3.9.3.- Compilación de datos e instrumental. 49
3.10.- Procesado de la información. 49

3.10.1.- Análisis del objeto del trabajo tras el resumen y las conclusiones. 50
3.10.2.- Relación de los aspectos más importantes. 50
3.10.3.- Las técnicas actuales aplicadas a la información disponible. 50
3.11.- POSTULADO DE SOLUCIONES. 51
3.11.1.- Aspectos fundamentales. 51
3.11.2.- Programación de los medios a emplear. 51
3.11.3.- Los resultados, la discusión. 51
3.12.- VERIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA. 52
3.12.1.- La preparación y articulación del trabajo. 52
3.12.2.- Programa de trabajos. 52
3.12.3.- El investigador. 53
3.12.3.1.- Responsabilidades del investigador. 53
3.12.3.2.- Cualidades del investigador. 53
3.12.4.- El diario del investigador. 53
3.12.4.1.- Propósito del diario. 53
3.12.4.2.- Contenido del diario. 54
3.12.4.3.- Cuerpo estructural del diario. 54
3.12.5.- Análisis y discusión de los resultados. 54
3.13.- PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS. 55
4.- LA TESIS, ELABORACIÓN Y CONTENIDO. 56
4.1.- La elección del tema. 56
4.1.1.- La importancia de la elección del tema y título de la tesis. 56
4.1.2.- Condiciones del tema de la tesis. 56
4.1.3.- Elección del tema y objeto de la tesis. 57
4.1.4.- Bosquejo del tema de la tesis o del problema de investigación. 57
4.2.- Proceso de elaboración de la tesis. 58
4.3.- La tesis y su contenido. 58
4.3.1.- Introducción. 58
4.3.2.- El contenido de la tesis. 59
4.3.2.1.- Parte principal. 60
4.3.2.2.- Parte complementaria. 61

CAPÍTULO II.- MARCO REFERENCIAL Y ESTADO DEL CONOCIMIENTO EN LAS AUSCULTACIONES GEODÉSICAS CLÁSICAS.

1.- INTRODUCCIÓN 65
2.- GENERALIDADES SOBRE EL CONTROL DEFORMACIONAL. 66
2.1.- RASGOS FUNDAMENTALES DEL CONTROL DEFORMACIONAL. 66
2.1.1.- Marco referencial. 66
2.1.2.- Objeto general del control deformacional. 66

2.2.- ELEMENTOS PARTICIPANTES EN EL PROCESO DE AUSCULTACIÓN. 67
2.2.1.- Introducción. 67
2.2.2.- Elementos participantes en una auscultación planimétrica. 67
2.2.2.1.- La red de pilares de auscultación. 67
2.2.2.2.- La malla de las dianas de puntería. 69
2.2.2.3.- La red de puntos de seguridad. 70
2.2.2.4.- Polares. 70
2.2.2.5.- Instrumental topográfico. 71
2.2.3.- Elementos participantes en una auscultación altimétrica. 71
2.2.3.1.- El origen de cotas. 71
2.2.3.2.- Red de clavos de nivelación. 72
2.2.3.3.- Instrumental. 73
2.2.3.4.- Otros. 73
2.3.- CARACTERIZACIÓN DE MOVIMIENTOS. 74
2.3.1.- Introducción. 74
2.3.2.- Proceso de auscultación planimétrica. 74
2.3.3.- Proceso de auscultación altimétrica. 75
2.3.4.- Proceso de auscultación combinado. 76
3.- LA OBSERVACIÓN ANGULAR. 78
3.1.- INTRODUCCIÓN. 78
3.2.- IMPORTANCIA DEL DISEÑO DE LAS DIFERENTES REDES. 78
3.3.- METODOLOGÍAS INTERVINIENTES. 78
3.3.1.- Fundamentos teóricos de la intersección directa angular. 78
3.3.2.- Fundamentos teóricos de la intersección inversa angular. 81
3.4.- LA OBSERVACIÓN DE ÁNGULOS EN CAMPO. 84
3.4.1.- Método de observación. 84
3.4.2.- Controles a realizar en una observación angular. 85
3.4.2.1.- Controles previos a la observación angular. 85
3.4.2.2.- Controles durante la observación angular. 85
4.- RESOLUCIÓN DE AUSCULTACIONES PLANIMÉTRICAS MEDIANTE LA OBSERVACIÓN DE ÁNGULOS. 86
4.1.- INTRODUCCIÓN. 86
4.2.- AJUSTE DE LA RED. 86
4.3.- RESOLUCIÓN DE INTERSECCIONES DIRECTAS ANGULARES. 90
4.3.1.- Resolución de intersecciones directas, método numérico. 90
4.3.2.- Resolución de intersecciones directas, método gráfico. 93
4.3.3.- Resolución de intersecciones directas, variación de coordenadas. 96
4.4.- RESOLUCIÓN DE INTERSECCIONES INVERSAS ANGULARES. 99
4.4.1.- Introducción. 99
4.4.2.- Resolución de intersecciones inversas, variación de coordenadas. 99
4.5.- DISEÑO DE LAS REDES IMPLICADAS. 101

5.- LA OBSERVACIÓN DISTANCIOMÉTRICA. 102

5.1.- INTRODUCCIÓN. 102

5.1.1.- Intersección de distancias. 102

5.1.2.- Problemática de la observación. 103

5.2.- INSTRUMENTAL TOPOGRÁFICO. 104

5.3.- MÉTODO DE OBSERVACIÓN. 104

5.3.1.- Control de observaciones distanciométricas. 104

5.3.1.1.- Corrección atmosférica. 104

5.3.1.2.- La constante de equipo. 109

5.3.2.- Errores en la medida de distancias. 110

5.3.2.1.- Error de desfase. 110

5.3.2.2.- Error de escala. 110

6.- RESOLUCIÓN DE AUSCULTACIONES PLANIMÉTRICAS MEDIANTE LA OBSERVACIÓN DE DISTANCIAS. 111

6.1.- INTRODUCCIÓN. 111

6.2.- RESOLUCIÓN DE INTERSECCIONES DIRECTAS DISTANCIOMÉTRICAS. 111

6.2.1.- Resolución de intersecciones directas, método numérico. 111

6.2.2.- Resolución de intersecciones directas, método gráfico. 115

6.2.3.- Resolución de intersecciones directas, variación de coordenadas. 117

6.3.- RESOLUCIÓN DE INTERSECCIONES INVERSAS DISTANCIOMÉTRICAS. 118

6.3.1.- Introducción. 118

6.3.2.- Resolución de intersecciones inversas, variación de coordenadas. 118

7.- LA OBSERVACIÓN ALTIMÉTRICA. 120

7.1.- INTRODUCCIÓN. 120

7.2.- NIVELACIÓN GEOMÉTRICA. 120

7.2.1.- Instrumental. 120

7.2.2.- Metodología de observación. 121

7.2.3.- Metodología de resolución. 124

7.2.4.- La tolerancia. 125

7.2.5.- Compensación por mínimos cuadrados. 127

7.3.- NIVELACIÓN TRIGONOMÉTRICA. 128

7.3.1.- Instrumental. 128

7.3.2.- Metodología y cálculo de observables. 128

8.- MEDIDA DE ACELERACIONES: VIBRACIONES E IMPACTOS. 130

8.1.- INTRODUCCIÓN 130

8.2.- LAS VIBRACIONES. 131

8.2.1.- Caracterización de las vibraciones 131

8.2.2.- Tipos de vibraciones. 131

8.2.2.1.- Clasificación de las vibraciones según la producción del movimiento. 131

8.2.2.2.- Clasificación de las vibraciones desde su definición matemática. 131

8.2.3.- Tipos de movimiento 131

8.2.3.1.- Movimiento periódico 131
8.2.3.2.- Movimiento no periódico 132
8.3.- LA MEDIDA DE LAS VIBRACIONES. 132
8.4.- INSTRUMENTACIÓN. 135
8.4.1.- Transductor de desplazamiento. 136
8.4.2.- Transductor de velocidad. 136
8.4.3.- Acelerómetro con banda extensométrica. 137
8.4.4.- Acelerómetro piezoeléctrico. 138
8.4.5.- Acelerómetro de balance de fuerza (servoacelerómetro). 140

CAPÍTULO III.- LOS SISTEMAS GPS EN EL MARCO DEL CONTROL GEOMÉTRICO DE ESTRUCTURAS.

1.- INTRODUCCIÓN 145
2.- LA GEODESIA ESPACIAL. 146
2.1.- INTRODUCCIÓN. 146
2.1.1.- Origen de la geodesia espacial. 146
2.1.2.- Antecedentes a los sistemas actuales de posicionamiento espacial. 148
2.1.2.1.- Sistema láser por satélite (SLR). 148
2.1.2.2.- Interferometría de bases de gran longitud (VLBI). 149
2.1.2.3.- Sistema TRANSIT. 150
2.2.- FUNDAMENTOS DE LOS SISTEMAS DE REFERENCIA GEODÉSICOS. 151
2.2.1.- Sistemas de referencia terrestres. 152
2.2.1.1.- Sistema de referencia astronómico local (AL). 152
2.2.1.2.- Sistema de referencia global (C.T.) 153
2.2.1.3.- Sistema de referencia elipsoidal. 155
2.2.2.- Sistemas de referencia convencional terrestre. 159
2.2.2.1.- La precisión necesaria en un sistema de referencia geodésico. 159
2.2.2.2.- El movimiento del polo. 159
2.2.2.3.- Sistema de referencia terrestre convencional medio (CTRS). 160
2.2.3.- Sistemas de referencia espaciales. 161
2.2.3.1.- Sistema de referencia espacial de coordenadas ecuatoriales absolutas. 161
2.2.3.2.- Sistema de referencia espacial de coordenadas eclípticas. 163
2.2.3.3.- Transformación se coordenadas ecuatoriales absolutas a coordenadas eclípticas. 164
2.2.3.4.- Transformación del coordenadas geodésicas la sistema convencional terrestre. 164
2.2.3.5.- Transformación del coordenadas geográficas en coordenadas geodésicas. 165
2.2.3.6.- Cambio de Datum. 167
2.2.4.- Sistemas de referencia temporales. 171
2.2.4.1.- Clasificación del concepto de tiempo en geodesia espacial. 171
2.2.4.2.- Tiempo GPS. 173

2.2.5.- Movimiento orbital de un satélite. 174
2.2.5.1.- Introducción. 174
2.2.5.2.- Movimiento kepleriano. 175
2.2.5.3.- Posición del satélite. 179
2.2.5.4.- Movimiento perturbado de los satélites. 182
2.3.- PROBLEMÁTICA DE LA PROPAGACIÓN DE ONDAS A TRAVÉS DE LA ATMÓSFERA. 187
2.3.1.- El conocimiento de la atmósfera. 187
2.3.2.- La transmisión de la señal de los satélites. 189
2.3.2.1.- Estructura de la señal. 189
2.3.2.2.- Procesado de la señal. 190
2.3.3.- El camino de las ondas electromagnéticas a través de la atmósfera. 190
2.3.3.1.- El efecto troposférico. 191
2.3.3.2.- El efecto ionósférico. 194
3.- FUNDAMENTOS DE LA OBSERVACIÓN MEDIANTE GPS. 201
3.1.- INTRODUCCIÓN. 201
3.2.- LA ESTRUCTURA DEL SISTEMA GPS. 201
3.2.1.- El segmento espacial. 201
3.2.2.- El segmento control. 204
3.2.3.- El segmento usuario. 204
3.3.- OBSERVABLES GPS. 204
3.3.2.- La cuenta Doppler. 204
3.3.3.- Método de medida de pseudodistancias. 205
3.3.4.- Método de la medida de fase. 206
3.4.- MÉTODOS DE POSICIONAMIENTO CON GPS. 208
3.4.1.- Introducción. 208
3.4.2.- Ecuaciones de las observaciones GPS. 209
3.4.2.1.- Fundamentos para el cálculo del posicionamiento absoluto. 209
3.4.2.2.- Fundamentos para el cálculo del posicionamiento diferencial. 213
3.5.- CÁLCULO DE LA POSICIÓN, RESOLUCIÓN DE AMBIGÜEDADES. 217
3.5.1.- Datos almacenados por el receptor. 217
3.5.2.- Consideraciones adicionales sobre el tiempo real. 217
3.5.3.- Cálculo de la posición GPS. 219
3.5.3.1.- Detección y reparación de las pérdidas de ciclo. 220
3.5.3.2.- Técnicas de resolución de ambigüedades. 224
3.6.- PRECISIÓN DE LAS OBSERVACIONES GPS. 231
3.6.1.- Aspectos generales. 231
3.6.2.- Errores debidos a la componente espacial. 231
3.6.2.1.- Errores de reloj. 231
3.6.2.2.- Errores en la órbita. 231
3.6.2.3.- Errores por la configuración geométrica de los satélites. 232
3.6.3.- Errores debidos al efecto multicamino. 233

3.6.4.- Efectos del centrado de la antena. 234

3.6.5.- Influencia de los efectos relativistas. 235

3.6.5.1.- Influencia en las órbitas de los satélites. 235

3.6.5.2.- Influencia en la señal emitida por el satélite. 235

3.6.5.3.- Influencia en el reloj del satélite. 235

3.6.5.4.- Influencia en la frecuencia del reloj del receptor. 235

4. ANÁLISIS MODAL OPERACIONAL PARA ESTRUCTURAS EVOLUTIVAS EN FASE DE CONSTRUCCIÓN. 236

4.1.- ESTADO DEL ARTE Y MOTIVACIÓN EN EL AVANCE EN LA INVESTIGACIÓN. 236

4.2.- ANALISIS MODAL OPERACIONAL. 238

4.2.1.- Acercamiento al análisis modal operacional. 238

4.2.2.- Fundamento de la Vibrometría para el análisis modal operacional. 239

4.2.3.- Análisis modal operacional en estructuras evolutivas. 241

4.3.- ANALISIS DINÁMICO DE ESTRUCTURAS, METODOS Y CONCLUSIONES DE APLICACIÓN EN ESTRUCTURAS EVOLUTIVAS. 241

4.3.1.- Introducción. 241

4.3.2.- Conceptos básicos de los sistemas dinámicos. 241

4.3.3.- Análisis dinámico a partir del sistema estático. 242

4.3.4.- Determinación de la respuesta dinámica. 243

4.3.5.- Relación entre la toma de datos, el cálculo dinámico y el OMA. 245

4.4.- EL ANÁLISIS DINÁMICO DE LAS ESTRUCTURAS A TRAVÉS SU ANÁLISIS ESPECTRAL. EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA. 246

4.4.1.- Introducción. 246

4.4.2.- Las funciones periódicas a través de la serie de Fourier. 247

4.4.2.1.- Las funciones periódicas y los polinomios trigonométricos. 247

4.4.2.2.- La serie de Fourier. 248

4.4.2.3.- La representación exponencial compleja de la serie de Fourier. 249

4.4.2.4.- El espectro de la señal, significado. 250

4.4.3.- La transformada de Fourier de señales periódicas. 251

4.4.3.1.- Transformación de la serie de Fourier en la Integral de Fourier para señales periódicas. 251

4.4.3.2.- La transformada de Fourier para funciones no periódicas en un intervalo (a,b). 252

4.4.3.3.- La integral de convolución. 252

4.4.3.4.- El teorema de convolución. 252

4.4.4.- La transformada discreta de Fourier. 253

4.4.4.1.- Análisis espectral de registros discretos. 253

4.4.4.2.- El espectro de energía en las series discretas, 255

4.4.4.3.- El fenómeno de Gibbs, la frecuencia de Nyquist y el Aliasing. 257

4.4.5.- La transformada rápida de Fourier. 258

4.4.5.1.- Representación matricial. 258

4.4.5.2.- Desarrollo de la transformada rápida de Fourier. 259

CAPÍTULO IV.- CONTRASTE METODOLÓGICO E INSTRUMENTAL PARA LA RESOLUCIÓN DE CONTROLES GEOMÉTRICOS.

1.- INTRODUCCIÓN 263

2.- EL CONTROL GEOMÉTRICO DURANTE LA FASE DE EMPUJE. 264

2.1.- INTRODUCCIÓN. 264

2.2.- ENCUADRE Y DESCRIPCIÓN DEL VIADUCTO DE LA MIEL. 264

2.2.1.- Descripción general 264

2.2.2.- Descripción de la estructura. 265

2.2.3.- Normativa empleada en el cálculo. 266

2.2.4.- Materiales empleados en su construcción. 266

2.2.4.1.- Hormigones. 266

2.2.4.2.- Aceros. 267

2.2.5.- Geometría del tablero a empujar. 267

2.2.6.- Proceso constructivo general del viaducto. 269

2.2.7.- El proyecto de empuje de la Miel. 270

2.2.7.1.- Objeto. 270

2.2.7.2.- Descripción del proceso. 270

2.2.7.3.- Particularidades del empuje del viaducto de la Miel. 271

2.2.7.4.- Zonas y elementos estructurales intervinientes en el empuje. 71

2.2.7.5.- Sistema de atirantamiento provisional. 277

2.2.7.6.- Operaciones de lanzamiento. 279

2.2.7.7.- Sistema de atirantamiento. 280

2.2.7.8.- Operaciones finales. 281

2.2.7.9.- Inspecciones a realizar durante el empuje. 281

2.3.- MODELO TEÓRICO DEL LANZAMIENTO. 281

2.3.1.- Introducción. 281

2.3.2.- Bases de cálculo. 282

2.3.3.- Materiales, recubrimientos y coeficientes de ponderación. 282

2.3.4.- Acciones. 282

2.3.4.1.- Valores característicos de las acciones. 282

2.3.4.2.- Combinación de acciones. 284

2.3.5.- Envolventes finales de esfuerzos de los modelos. 284

2.3.6.- Desplazamientos en punta esperados. 285

2.4.- EL CONTROL TOPOGRAFICO DURANTE EL EMPUJE DEL VIADUCTO DE LA MIEL 88

2.4.1.- Controles topográficos previos. 289

2.4.1.1.- Control topográfico de la playa de montaje. 289

2.4.1.2.- El control topográfico en el montaje de la estructura. 290

2.4.2.- El control topográfico en el lanzamiento del tablero. 291

2.4.2.1.- El control topográfico en planta durante el lanzamiento. 291

2.4.2.2.- El control topográfico en alzado de la punta del lanzamiento. 292

2.5.- CONTROL GEOMÉTRICO POR TÉCNICAS CLÁSICAS DURANTE EL EMPUJE. 292

2.5.1.- Introducción. 292

2.5.2.- Elementos participantes. 293

2.5.2.1.- Red de pilares. 293

2.5.2.2.- Prisma reflector 294

2.5.2.3.- Estación Topográfica 296

2.5.3.- Observables, métodos de resolución y coordenadas. 296

2.6.- CONTROL GEOMÉTRICO MEDIANTE GPS DURANTE EL EMPUJE. 300

2.6.1.- Introducción. 300

2.6.2.- Elementos participantes. 300

2.6.2.1.- Red de pilares. 300

2.6.2.2.- Antena receptora. 301

2.6.2.3.- Instrumental. 302

2.6.3.- Observables, métodos de resolución y coordenadas. 305

2.7.- CONTRASTE DE RESULTADOS. 310

2.7.1.- Introducción. 310

2.7.2.- Variaciones entre la deformada teórica y la Estación Topográfica. 310

2.7.2.1.- Análisis gráfico entre la deformada teórica y la Estación Topográfica. 311

2.7.2.2.- Análisis numérico entre la deformada teórica y la Estación Topográfica. 313

2.7.2.3.- Conclusiones del análisis entre la deformada teórica y la Estación Topográfica. 314

2.7.3.- Variaciones entre la deformada teórica y GPS. 314

2.7.3.1.- Análisis gráfico entre la deformada teórica y GPS. 315

2.7.3.2.- Análisis numérico entre la deformada teórica y GPS. 317

2.7.3.3.- Conclusiones del análisis entre la deformada teórica y GPS. 318

2.7.4.- Contraste entre resultados de la Estación Topográfica y GPS. 318

2.8.- NUEVA LÍNEA DE INVESTIGACIÓN. 323

3.- CONTROLES GEOMÉTRICOS DINÁMICOS. 325

3.1.- INTRODUCCIÓN. 325

3.2.- ENCUADRE Y DESCRIPCIÓN GENERAL DEL NUEVO PUENTE SOBRE LA BAHÍA DE CADIZ. 325

3.2.1.- Descripción general. 326

3.2.2.- Descripción de la estructura. 326

3.2.3.- Descripción del Viaducto sobre la Bahía. 327

3.2.3.1.- Pilas y cimientos. 328

3.2.3.2.- Tablero. 330

3.2.3.3.- Tramo de acceso a Cádiz. 331

3.2.3.4.- Tramo desmontable. 331

3.2.3.5.- Tramo atirantado. 332

3.2.3.6.- Tramo de hormigón final. 334

3.2.3.7.- Resumen de las cifras más significativas de la obra. 334

3.3.- EL CONTROL GEOMÉTRICO CLÁSICO DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL NUEVO PUENTE SOBRE LA BAHÍA DE CADIZ. TRAMO ATIRANTADO. 334

3.3.1.- Antecedentes y objeto. 334

3.3.2.- Variables a considerar. 335

3.3.2.1.- Efectos térmicos. 336

3.3.2.2.- Sobrecargas en el tablero 336

3.3.3.- Procedimientos de control. 336

3.3.3.1.- Montaje de la dovela 337

3.3.3.2.- Control geométrico del ciclo 338

3.3.3.3.- Tesado de tirantes 339

3.4.- LA INSTRUMENTACIÓN ADICIONAL DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DEL NUEVO PUENTE SOBRE LA BAHÍA DE CADIZ. TRAMO ATIRANTADO. 340

3.4.1.- Introducción. 340

3.4.2.- Instrumentación para la obtención de valores estáticos. 340

3.4.3.- Instrumentación para la obtención de valores dinámicos. 342

3.4.4.- Conclusiones a partir de la instrumentación. 343

3.5.- EL CONTROL GEOMÉTRICO POR TECNICAS CLÁSICAS DURANTE EL IZADO. 344

3.5.1.- Introducción. 344

3.5.2.- Elementos participantes. 344

3.5.2.1.- Red de pilares y bases. 344

3.5.2.2.- Estación Topográfica. 345

3.5.2.3.- Prisma reflector 346

3.5.2.4.- Maniobra topográfica. 346

3.6.- AUSCULTACIÓN GEODÉSICA MEDIANTE TECNICAS GPS EN EL NUEVO LABORATORIO. 48

3.6.1.- Introducción. 348

3.6.2.- Elementos participantes. 350

3.6.2.1.- Red de pilares. 350

3.6.2.2.- Antena receptora. 350

3.6.2.3.- Instrumental 351

3.6.3.- Observables, coordenadas y métodos de resolución. 352

3.7.- CONTRASTE DE RESULTADOS. 354

3.7.1.- Introducción. 354

3.7.2.- Datos esperados. 355

3.7.3.- Procesado de los datos de campo en el dominio del tiempo. 356

3.7.3.1.- Análisis en el dominio del tiempo de la Zona 1. 357

3.7.3.2.- Análisis en el dominio del tiempo de la Zona 3. 360

3.7.3.3.- Análisis en el dominio del tiempo de la Zona 3 361

3.7.4.- Transformación de los datos al dominio de la frecuencia. 362

3.7.4.1.- Introducción. 362

3.7.4.2.- Análisis espectral de las series de datos discretas obtenidas. 362

3.7.4.3.- La transformada de Fourier con Microsoft Excel. 364

3.7.4.4.- Procesado de los datos de campo en el dominio de la frecuencia. 367

3.7.5.- Datos modales extraídos del modelo de elementos finitos. 384

3.7.5.1.- Introducción. 384
3.7.5.2.- Datos modales extraídos del modelo de elementos finitos. 384
3.8.- VARIACIONES ENTRE EL MODELO TEÓRICO Y EL GPS 386

CAPÍTULO V.- CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.

1.- INTRODUCCIÓN 393
2.- CONCLUSIONES 395
2.1.- CONTROLES GEOMÉTRICOS CLÁSICOS 395
2.2.- CONTROLES GEOMÉTRICOS CON GPS 396
2.3.- CONTROLES GEOMÉTRICOS DINÁMICOS CON GPS 398
3.- FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN 402
3.1.- LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN CENTRADAS EN LOS SISTEMAS GPS 402
3.2.- LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN CENTRADAS EN EL CONTROL GEOMÉTRICO 402

FUENTES DE INFORMACIÓN.

1.- LIBROS 407
2.- ARTÍCULOS 412
3.- CONGRESOS 414
4.- CURSOS Y SEMINARIOS 417
5.- TESIS DOCTORALES 418

2.-INDICE DE FIGURAS.

CAPÍTULO I.- PLANTEAMIENTO GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN.

Figura I.1.- Puente viga de sección transversal constante. 5
Figura I.2.- Puente viga de sección transversal de canto variable. 5
Figura I.3.- Comparativa de ley de flectores en función del tipo de apoyo. 5
Figura I.4.- Clasificación de los puentes pórtico. 6
Figura I.5.- Clasificación de los puentes arco. 7
Figura I.6.- Disposición longitudinal de cables en puentes atirantados. 8
Figura I.7.- Disposición transversal de cables en puentes atirantados. 9
Figura I.8.- Evolución de los esfuerzos de peso propio según se realice el hormigonado de la losa superior. 12
Figura I.9.- Evolución de los esfuerzos de peso propio con el hormigonado por fases de la losa superior con el uso de puntales provisionales. 13
Figura I.10.- Evolución de la ley de momentos de peso propio bajo la construcción por vanos sucesivos, y comparación con la ejecución en una sola fase. 13
Figura I.11.- Ley de esfuerzos en el tablero derivados de la construcción por voladizos sucesivos, comparada con la obtenida con cimbrado completo. 14
Figura I.12.- Esquema de un cimbrado completo, cimbra aporticada en el primer tramo y cimbra cuajada en los dos últimos vanos. 14
Figura I.13.- Esquema de la ejecución de viaducto mediante voladizos sucesivos. 16
Figura I.14.- Esquema general de la construcción de un puente empujado. 21
Figura I.15.- Esquema general de la deformada durante el empuje. 22
Figura I.16.- Secuencia de trabajo en el empuje de un gato de fricción. 23
Figura I.17.- Secuencia de trabajo en el empuje de un gato hueco de tiro. 23
Figura I.18.- Sistemas de empuje en tableros de hormigón (Dragados y Construcciones S.A.) 26

CAPÍTULO II.- MARCO REFERENCIAL Y ESTADO DEL CONOCIMIENTO EN LAS AUSCULTACIONES GEODÉSICAS CLÁSICAS.

Figura II.1.- Red de clavos de nivelación en un viaducto tipo. 72
Figura II.2.- Caracterización del movimiento o deformación planimétrico. 75
Figura II.3.- Esquema general de los elementos participantes en una auscultación planimétrica. 75
Figura II.4.- Caracterización del movimiento o deformación altimétrico. 76
Figura II.5.- Esquema general de los elementos participantes en una auscultación altimétrica. 76
Figura II.6.- Caracterización del movimiento o deformación combinado. 77
Figura II.7.- Esquema genérico de las observaciones de una intersección directa angular. 79
Figura II.8.- Esquema genérico de la intersección directa angular. 79
Figura II.9.- Resolución numérica de la intersección directa angular. 80
Figura II.10.- El arco capaz y su tangente. 82
Figura II.11.- Observación en campo de una intersección inversa simple. 82
Figura II.12.- Esquema conceptual de la intersección inversa simple. 83
Figura II.13.- Conjunto de intersecciones directas de una diana de puntería. 90
Figura II.14.- Afección del error angular en las intersecciones directas. 91
Figura II.15.- Elipse de error en las intersecciones directas angulares. 91
Figura II.16.- Valor del diámetro conjugado de la elipse. 92
Figura II.17.- Conocimiento de las coordenadas de cálculo. 94
Figura II.18.- Fundamento de cálculo de la variación angular. 95
Figura II.19.- Representación de la nueva ubicación de la diana a lo largo de la paralela. 96
Figura II.20.- Resolución del desplazamiento de una diana por el método gráfico. 96
Figura II.21.- Desplazamientos lineales debidos a variaciones angulares. 97
Figura II.22.- Establecimiento de la elipse de error en variación de coordenadas. 99
Figura II.23.- Establecimiento de los ángulos de una intersección inversa múltiple. 100
Figura II.24.- Variación de coordenadas aplicada a las intersecciones inversas. 100
Figura II.25.- Esquema genérico de la trilateración. 102
Figura II.26.- La distancia en la intersección inversa múltiple. 103
Figura II.27.- Problemática de las observaciones de campo. 103
Figura II.28.- Efecto de la refracción en la medida de distancias. 105
Figura II.29.- Concepto geométrico de la constante de equipo. 109

Figura II.30.- Intersecciones distanciométricas de una de las dianas de putería. 111
Figura II.31.- Afección del error distanciométrico en las intersecciones directas. 112
Figura II.32.- Zona de incertidumbre considerando visuales perpendiculares. 112
Figura II.33.- Elipse de error en las intersecciones directas distanciométricas. 113
Figura II.34.- Valor del diámetro conjugado de la elipse. 113
Figura II.35.- Lugar geométrico en el que se ubica la nueva posición de la diana. 116
Figura II.36.- Resolución del desplazamiento de una diana por el método gráfico. 116
Figura II.37.- Intersección inversa múltiple de distancias. 118
Figura II.38.- Fundamento de la nivelación geométrica. 121
Figura II.39.- Método de nivelación geométrica del punto medio. 122
Figura II.40.- Método de nivelación geométrica del punto extremo. 122
Figura II.41.- Método de nivelación geométrica de estaciones exteriores. 123
Figura II.42.- Método de nivelación geométrica de estaciones equidistantes. 124
Figura II.43.- Fundamento de la nivelación trigonométrica. 128
Figura II.44.- Fundamento del Transductor Sísmico. 133
Figura II.45.- Acelerómetro con banda extensométrica en una ménsula. 137
Figura II.46.- Acelerómetro piezoeléctrico. 138
Figura II.47.- Servoacelerómetro. 140

CAPÍTULO III.- LOS SISTEMAS GPS EN EL MARCO DEL CONTROL GEOMÉTRICO DE ESTRUCTURAS.

Figura III.1.- Método de medida de arco de Eratóstenes. 146
Figura III.2.- Fundamento del mecanismo de observación con SLR. 148
Figura III.3.- Fundamento del mecanismo de observación con VLBI. 149
Figura III.4.- Fundamento del posicionamiento mediante observaciones con VLBI. 150
Figura III.5.- Fundamento del posicionamiento mediante cuenta Doppler. 151
Figura III.6.- Consideraciones sobre los sistemas de referencia. 152
Figura III.7.- Sistema astronómico local. 152
Figura III.8.- Sistema de referencia convencional terrestre o sistema astronómico global. 154
Figura III.9.- Sistema de referencia elipsoidal. 156
Figura III.10.- Caracterización de la tangente y de la gran normal. 156
Figura III.11.- Discrepancias del polo. 159
Figura III.12.- Movimientos de precesión y nutación. 160
Figura III.13.- Sistemas de referencia convencional terrestre. 161
Figura III.14.- Sistema de coordenadas ecuatoriales absolutas. 162
Figura III.15.- Relación entre sistemas cartesianos definidos por el polo CEP. 163
Figura III.16.- Sistema de coordenadas eclípticas. 164
Figura III.17.- Transformación de coordenadas geodésicas al sistema convencional terrestre. 165
Figura III.18.- Relación entre los sistemas GL – G – CT - AL. 166
Figura III.19.- Cambio de Datum. 168
Figura III.20.- Movimiento cinético de los satélites. 175
Figura III.21.- Detalle de la velocidad aerolar constante. 175
Figura III.22.- Plano orbital en el sistema inercial convencional. 176
Figura III.23.- Sistema de coordenadas en el plano orbital. 177
Figura III.24.- Determinación del área del triángulo. 178
Figura III.25.- Sistema de coordenadas geocéntrico: Acimut y Altura. 181
Figura III.26.- Sistema topocéntrico y geocéntrico de coordenadas. 182
Figura III.27.- Precesión nodal causada por el achatamiento de la tierra. 184
Figura III.28.- Atracción gravitatoria ejercida sobre el satélite por el sol y la luna. 185
Figura III.29.- Distribución de los satélites en las orbitas. 202
Figura III.30.- Correlación entre las señales del satélite y del receptor. 205
Figura III.31.- Evaluación de la distancia a través de la medida de fase. 207
Figura III.32.- Variación de la fase en el tiempo. 212
*Figura III.33.- Simples dife**r**encias.* 213
Figura III.34.- Dobles diferencias. 215
Figura III.35.- Triples diferencias. 216
Figura III.36.- Representación gráfica de una pérdida de ciclo. 221

Figura III.37.- Técnicas de búsqueda. 227
Figura III.38.- Técnicas de búsqueda. 228
Figura III.39.- Efecto multicamino. 233
Figura III.40.- Relación entre la edad de los puentes y sus necesidades de mantenimiento (SAMCO). 238
Figura III.41.- Parámetros fundamentales del movimiento periódico. 242
Figura III.42.- Esquema de una carga dependiente del tiempo en una estructura atirantada.. 243
Figura III.43.- Viga bajo carga temporal distribuida y equilibrio dinámico en la rebanada elemental. 244
Figura III.44.- Significado del dominio temporal y la frecuencia. 247
Figura III.45.- En la derecha se representa el módulo de los hn de la función n(t) de la izquierda 255
Figura III.46.- Tren de ondas producido por superposición de ondas lineales. 256
Figura III.47.- Diagrama de amplitud del tren de ondas de la figura anterior. 257
Figura III.48.- Error de Aliasing. 257
Figura III.49.- Mecanismo de obtención de la FFT. 260

CAPÍTULO IV.- CONTRASTE METODOLÓGICO E INSTRUMENTAL PARA LA RESOLUCIÓN DE CONTROLES GEOMÉTRICOS.

Figura IV.1.- Definición geométrica del trazado en planta del viaducto de la Miel. 267
Figura IV.2.- Definición geométrica del trazado en alzado del viaducto de la Miel.(Banda izquierda). 268
Figura IV.3.- Sección transversal de la autovía en el viaducto de la Miel.. 268
Figura IV.4.- Sección transversal del tablero. 269
Figura IV.5.- Elementos necesarios para el guiado. 272
Figura IV.6.- Sistema de tiro en el estribo E1. 273
Figura IV.7.- Elementos necesarios en el estribo E1. 273
Figura IV.8.- Elementos necesarios sobre la cabeza de las pilas. 273
Figura IV.9.- Secuencia de trabajo del tiro con barra. 274
Figura IV.10.- Placas de apoyo y balancines deslizantes. 275
Figura IV.11.- Distribución de momentos durante el lanzamiento. 277
Figura IV.12.- Sistema de atirantamiento provisional. 277
Figura IV.13.- Gráfico de envolventes de flectores del lanzamiento. 284
Figura IV.14.- Gráfico de envolventes de cortantes del lanzamiento. 285
Figura IV.15.- Trayectoria del mamparo derecho durante la fase de empuje. 288
Figura IV.16.- Trayectoria del mamparo izquierdo durante la fase de empuje. 288
Figura IV.17.- Zona encofrado inferior. 289
Figura IV.18.- Posición relativa de los elementos participantes en el control geométrico. 293
Figura IV19.- Ubicación de los pilares de auscultación en el Viaducto de la Miel. 294
Figura IV.20.- Sección estructural del tablero con indicación de la posición del prisma. 295
Figura IV.21.- Caracterización geométrica en planta de los observables. 296
Figura IV.22.- Caracterización geométrica en alzado de los observables. 296
Figura IV.23.- Trayectoria planimétrica de la punta de tablero durante el empuje (ET). 299
Figura IV.24.- Trayectoria altimétrica de la punta de tablero durante el empuje (ET). 299
Figura IV.25.- Trayectoria tridimensional de la punta de tablero durante el empuje (ET). 299
Figura IV.26.- Posición relativa de los elementos participantes en el control geométrico. 300
Figura IV.27.- Sección estructural del tablero con indicación de la posición de la antena. 302
Figura IV.28.- Relación entre coordenadas y Punto Kilométrico. 307
Figura IV.28.- Trayectoria planimétrica de la punta de tablero durante el empuje (GPS). 309
Figura IV.29.- Trayectoria altimétrica de la punta de tablero durante el empuje (GPS). 309
Figura IV.30.- Trayectoria tridimensional de la punta de tablero durante el empuje (GPS). 309
Figura IV.31.- Trayectorias teórica y Estación Topográfica planimétricas. 312
Figura IV.32.- Trayectorias teórica y Estación Topográfica altimétricas. 312
Figura IV.33.- Trayectorias teórica y Estación Topográfica 3D. 312
Figura IV.34.- Trayectorias teórica y GPS planimétricas. 316
Figura IV.35.- Trayectorias teórica y GPS altimétricas. 316
Figura IV.36.- Trayectorias teórica y GPS 3D. 316
Figura IV.37.- Perfil longitudinal de los puntos determinados con GPS. 324
Figura IV.38: Croquis del montaje de la dovela 337
Figura IV.39: Distribución de sensores en la Pila 13. (ACL) 341
Figura IV.40: Resumen de sensores instalados para la obtención de valores dinámicos. 343

Figura IV.41.- Esquema GPS utilizado durante la construcción del Puente de Cádiz. 349
Figura IV.42.- Situación del GPS en carro de izado. 351
Figura IV.43.- Movimiento esperado en la punta de avance. 355
Figura IV.44.- Cota relativa de la punta de lanzamiento a lo largo del tiempo. 356
Figura IV.45.- Serie temporal desde las 10:33:18 hasta las 10:51:02 del día 24/09/14. 358
Figura IV.46.- Serie temporal desde las 10:48:41 hasta las 10:51:02 del día 24/09/14. 358
Figura IV.47.- Serie temporal desde las 10:53:27 hasta las 10:55:49 del día 24/09/14. 359
Figura IV.48.- Serie temporal desde las 10:55:50 hasta las 10:58:10 del día 24/09/14. 359
Figura IV.49.- Serie temporal desde las 10:58:12 hasta las 11:00:33 del día 24/09/14. 359
Figura IV.50.- Serie temporal desde las 11:00:34 hasta las 11:05:59 del día 24/09/14. 360
Figura IV.51.- Serie temporal desde las 10:26:29 hasta las 11:29:06 del día 24/09/14. 361
Figura IV.52.- Serie temporal desde las 12:18:24 hasta las 12:21:03 del día 24/09/14. 361
Figura IV.53.- Serie temporal desde las 12:13:01 hasta las 12:15:40 del día 24/09/14. 361
Figura IV.54.- Significado del dominio temporal y la frecuencia. 362
Figura IV.55.- Esquema del proceso general para obtención de la frecuencia. 366
Figura IV.56.- Gráfico de dispersión del periodo en la zona 1. 378
Figura IV.57.- Gráfico de dispersión del periodo en la zona 1. 380
Figura IV.58.- Gráfico de dispersión del periodo en la zona 5. 382
Figura IV.59.- P 12 Forma modal Flexión de la torre; f=0,075 Hz. 385
Figura IV.60.- P 12 Forma modal Torsión de la torre; f=0,090 Hz. 385

3.-INDICE DE IMAGENES.

CAPÍTULO I.- PLANTEAMIENTO GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN.

Imagen I.1.- Puente arco en autovía A-7. Tramo: Nerja-Almuñécar. 7
Imagen I.2.- Puente atirantado, Pasarela de La Marina (Ceuta). 9
Imagen I.3.- Cimbra cuajada y aporticada en la construcción de la pasarela de La Marina (Ceuta). 15
Imagen I.4.- Ejecución del Viaducto de Pradoluengo (A-6) mediante autocimbra. 15
Imagen I.5.- Ejecución de Viaducto por voladizos sucesivos, dovelas in situ, (Dragados S.A.). 16
Imagen I.6.- Ejecución del Viaducto de La Miel (A-7), empujado. 16
Imagen I.7.- Ejecución del Viaducto de Tremor (A-6). 17
Imagen I.8.- Ejecución de pasarela de Fuengirola mediante Izado con grúas. 18
Imagen I.9.- Ejecución de pasarela de la Barqueta, mediante medios flotantes. Dragados S.A. 18
Imagen I.10.- Parque de empuje del Viaducto de la Miel. 23
Imagen I.11.- Torre de atirantamiento del Viaducto de la Miel. 24

CAPÍTULO II.- MARCO REFERENCIAL Y ESTADO DEL CONOCIMIENTO EN LAS AUSCULTACIONES GEODÉSICAS CLÁSICAS.

Imagen II.1.- Pilar de auscultación en el Viaducto de Montabliz (Cantabria). 67
Imagen II.2.- Ubicación de los pilares de auscultación existentes en el Viaducto de la Miel. 68
Imagen II.3.- Diana de puntería recomendada en auscultaciones geodésicas angulares. 69
Imagen II.4.- Diana de puntería recomendada en auscultaciones geod. distanciométricas (Leica). 69
Imagen II.5.- Detalle constructivo de los puntos de seguridad. 70
Imagen II.6.- Estación Topográfica, marca Leica, modelo TC2003. 71
Imagen II.7.- Señalización tipo para el origen de cotas. 72
Imagen II.8.- Efecto de la cabeza esférica del clavo. 72
Imagen II.9.- Nivel electrónico, marca Leica, modelo DNA03. 73
Imagen II.10.- Estadía vertical en disposición de realizar observación. 73
Imagen II.11.- Pilar de auscultación planimétrica utilizado para altimetría. 74
Imagen II.12.- Caracterización del movimiento o deformación combinado en un puente empujado. 77
Imagen II.13.- Estación meteorológica de uso topográfico. 104
Imagen II.14.- Ábaco de corrección atmosférica. 106
Imagen II.15.- Psicómetro de uso topográfico. 108
Imagen II.16.- Esquema de un próximetro (Izqda.) - proxímetro en un cojinete (Dcha.).[Sinais Ing.) 136
Imagen II.17.- Transductor sísmico de desplazamiento. [Sinais Ingeniería] 136
Imagen II.18.- Transductor sísmico de velocidad. [Sinais Ingeniería] 137
Imagen II.19.- Transductor piezoeléctrico (Izqda.) – Acelerómetro piezoeléctrico (Dcha.). [Sinais Ingen.] 139
Imagen II.20.- Servoacelerómetro, aspecto externo.[Sensorex] 141

CAPÍTULO III.- LOS SISTEMAS GPS EN EL MARCO DEL CONTROL GEOMÉTRICO DE ESTRUCTURAS.

Imagen III.1.- Satélite LAGEOS 2. 148
Imagen III.2.- Real Instituto y Observatorio de la Armada (San Fernando-Cádiz). 149
Imagen III.3.- Radiotelescopio del Centro Astronómico de Yebes. 150
Imagen III.4.- Recorrido de las ondas desde el satélite hasta la superficie terrestre. 191
Imagen III.5.- Aspecto exterior de un satélite. 203

CAPÍTULO IV.- CONTRASTE METODOLÓGICO E INSTRUMENTAL PARA LA RESOLUCIÓN DE CONTROLES GEOMÉTRICOS.

Imagen IV.1.- Situación general del viaducto. 265
Imagen IV.2.- Viaducto de la Miel. 266
Imagen IV.3.- Pilas del viaducto de la Miel. 270
Imagen IV.4.- Llegada de un transporte especial a la playa de montaje. 272
Imagen IV.5.- Playa de montaje en el estribo E1. 272

Imagen IV.6.- Gato hueco utilizado en el empuje del Viaducto de la Miel. 274
Imagen IV.7.- Guía latera y balancín deslizante en el estribo. 275
Imagen IV.8.- Puntales de tiro o tesado. 276
Imagen IV.9.- Sistema de enganche a plataforma y barra de alta resistencia. 276
Imagen IV.10.- Bogies utilizados para lanzar el tablero. 277
Imagen IV.11.- Ubicación de la torre de atirantamiento en el estribo. 278
Imagen IV.12.- Torre de atirantamiento. 278
Imagen IV.13.- Anclaje de la torre de atirantamiento en el estribo. 279
Imagen IV.14.- Anclaje de la torre de atirantamiento en la punta del tablero. 279
Imagen IV.15.- Vista general durante el lanzamiento. 292
Imagen IV.16.- Ubicación del prisma reflector en la punta del tablero. 294
Imagen IV.17.- Estación Topográfica utilizada en el control geométrico. 295
Imagen IV.18.- Equipo GPS estacionado en el pilar II, referencia del Viaducto de la Miel. 301
Imagen IV.19.- Ubicación de la antena receptora en la punta del tablero. 301
Imagen IV.20.- Equipo GPS móvil del Viaducto de la Miel. 302
Imagen IV.21.- Tratamiento estadístico de las variaciones de coordenada X. 321
Imagen IV.22.- Tratamiento estadístico de las variaciones de coordenada Y. 321
Imagen IV.23.- Tratamiento estadístico de las variaciones de coordenada Z. 322
Imagen IV.24.- Tratamiento estadístico de las diferencias planimétricas. 322
Imagen IV.25.- Tablero empujado con control mediante Estación Topográfica y GPS. 323
Imagen IV.26.- Situación general del puente de Cádiz. 326
Imagen IV.27.-Vista aérea del nuevo puente de Cádiz finalizado (ACL) 326
Imagen IV.28.- Estructuras encuadradas en la obra (ACL Diseño y Cálculo de Estructuras). 327
Imagen IV.29.- Pilono principal en construcción (ACL Diseño y Cálculo de Estructuras). 328
Imagen IV.30.- Estructura metálica de soporte del encofrado fustes inclinados en pila 13 (ACL). 328
Imagen IV.31.- Ejecución de pilotes en mar (ACL Diseño y Cálculo de Estructuras). 329
Imagen IV.32.- Traslado del recinto estanco de la pila 12 (ACL Diseño y Cálculo de Estructuras) 330
Imagen IV.33.- Excavación del encepado de la pila 13 (ACL Diseño y Cálculo de Estructuras) 330
Imagen IV.34.- Empuje del tramo de acceso a Cádiz (ACL Diseño y Cálculo de Estructuras) 331
Imagen IV.35.- Ejecución del primer avance en voladizo en pila 13 (ACL) 332
Imagen IV.36.- Izado de dovelas con carros (ACL Diseño y Cálculo de Estructuras) 333
Imagen IV.37.- Tramo atirantado en plena ejecución (ACL Diseño y Cálculo de Estructuras) 333
Imagen IV.38.- Leica TS I 1” 346
Imagen IV.39.- Prisma de Leica GRZ1222 de 360º 346
Imagen IV.40.- Equipo GPS de referencia situado en la oficina de obra. 350
Imagen IV.41.- Situación del prisma en el avance del tablero. 350
Imagen IV.42.- Leica GMX900 y antena Leica AS10 352
Imagen IV.43.- Selección del Análisis de Fourier en Excel. 365
Imagen IV.44.- Selección del rango de entrada y salida para análisis de Fourier en Excel. 365

4.-INDICE DE TABLAS.

CAPÍTULO I.- PLANTEAMIENTO GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN.

Tabla I.1.- Características del Hormigón. 4
Tabla I.2.- Características del acero utilizado en chapas, perfiles y tubos. 4
Tabla I.3.- Procedimiento constructivo de tableros de puentes. 11
Tabla I.4.- Tipología de las diferentes geometrías empujables. 17
Tabla I.5.- Tipologías constructivas en función de la longitud del puente. 19
Tabla I.6.- Resumen de los sistemas de control geométrico durante la construcción de puentes. 29
Tabla I.7.- Tipología de los controles geométricos en puentes después de su construcción. 29
Tabla I.8.- Calificación del control geométrico necesario durante proyecto, const. y explot. de puentes. 30
Tabla I.9.- Connotaciones de la investigación cuantitativa y cualitativa. 45

CAPÍTULO II.- MARCO REFERENCIAL Y ESTADO DEL CONOCIMIENTO EN LAS AUSCULTACIONES GEODÉSICAS CLÁSICAS.

Tabla II.1.- Temperaturas y presiones del vapor de agua. 108
Tabla II.2- Orden de magnitud en la precisión de los diferentes métodos de nivelación. 120

CAPÍTULO III.- LOS SISTEMAS GPS EN EL MARCO DEL CONTROL GEOMÉTRICO DE ESTRUCTURAS.

Tabla III.1.- Características de los principales osciladores. 174
Tabla III.2.- Corrección del término B para el modelo de Saastamoinen refinado. 193
Tabla III.3.- Corrección del término δR para el modelo de Saastamoinen refinado. 193
Tabla III.4.- Características fundamentales de los satélites. 202
Tabla III.5.- Valores de test habituales. 221
Tabla III.6.- Variaciones en función de la fase observada. 222
Tabla III.7.- Efecto de pérdidas de ciclo en las ecuaciones con simples diferencias. 222
Tabla III.8.- Efecto de pérdidas de ciclo en las ecuaciones con dobles diferencias. 222
Tabla III.9.- Efecto de pérdidas de ciclo en las ecuaciones con triples diferencias. 222
Tabla III.10.- Elementos a controlar en una prueba de carga estática. 237

CAPÍTULO IV.- CONTRASTE METODOLÓGICO E INSTRUMENTAL PARA LA RESOLUCIÓN DE CONTROLES GEOMÉTRICOS.

Tabla IV.1.- Programa de puntos de inspección durante el lanzamiento. 281
Tabla IV.2.- Coeficientes de aplicación al valor característico de las diferentes acciones. 284
Tabla IV.3.- Resultados de la deformada teórica en el mamparo derecho durante el empuje. 286
Tabla IV.4.- Resultados de la deformada teórica en el mamparo izquierdo durante el empuje. 287
Tabla IV.5.- Coordenadas de la red de pilares existente en el entorno del viaducto de la Miel. 294
Tabla IV.6.- Observables, cálculos y resultados de las observaciones con ET durante el empuje. 298
Tabla IV.7.- Especificaciones técnicas Topcon Hiper, tipo de receptor y rastreo. 303
Tabla IV.8.- Especificaciones técnicas Topcon Hiper, radio módem y bluetooth. 303
Tabla IV.9.- Especificaciones técnicas Topcon Hiper, precisiones. 303
Tabla IV.10.- Especificaciones técnicas Topcon Hiper, NMEA y DGPS. 304
Tabla IV.11.- Especificaciones técnicas Topcon Hiper, funciones de rastreo. 304
Tabla IV.12.- Especificaciones técnicas Topcon Hiper, RTK. 304
Tabla IV.13.- Especificaciones técnicas Topcon Hiper, memoria y energía. 305
Tabla IV.14.- Especificaciones técnicas Topcon Hiper, tecnología. 305
Tabla IV.15.- Observables GPS simplificados. 306
Tabla IV.16.- Observables, cálculos y resultados de las observaciones GPS durante el empuje. 308
Tabla IV.17.- Coordenadas de la deformada teórica del mamparo derecho y Estación Topográfica. 311
Tabla IV.18.- Variación de coordenadas de la deformada y Estación Topográfica. 313
Tabla IV.19.- Coordenadas de la deformada teórica del mamparo izquierdo y GPS. 315
Tabla IV.20.- Variación de coordenadas de la deformada y GPS. 317

Tabla IV.21.- Variaciones de las deformadas con Estación Topográfica y GPS respectivamente. 319
Tabla IV.22.- Variaciones de las deformadas de la Estación Topográfica y GPS. 320
Tabla IV.23.- Zonificación del Nuevo Puente sobre la Bahía de Cádiz (ACL) 331
Tabla IV.24.- Cifras más significativas de la obra. 334
Tabla IV.25.- Resumen de sensores instalados para la obtención de valores estáticos. 342
Tabla IV.26.- Resumen de sensores instalados para la obtención de valores dinámicos. 343
Tabla IV.27.- Coordenadas de la red de pilares y bases en el sistema ED50. 345
Tabla IV.28.- Puntos de control de la dovela 0 en la pila 13. Fase 1. 347
Tabla IV.29.- Puntos de control de la dovela 0 en la pila 13. Fase 2. 347
Tabla IV.30.- Puntos de control de la dovela 0 en la pila 13. Fase 3. 347
Tabla IV.31.- Puntos de control de la dovela 0 en la pila 13. Fase 4. 348
Tabla IV.32.- Puntos de control de la dovela 0 en la pila 13. Fase 5. 348
Tabla IV.33.- Puntos de control de la dovela 0 en la pila 13. Fase 6. 348
Tabla IV.34.- Puntos de control de la dovela 0 en la pila 13. Fase 7 348
Tabla IV.35.- Coordenadas del GPS de referencia. 350
Tabla IV.36.- Especificaciones técnicas Leica GMX900. 351
Tabla IV.37.- Coordenadas UTM y altitud en la dovela P-12 (losa 11D). 353
Tabla IV.38.- Epoca y cota GPS para análisis dinámico. 354
Tabla IV.39.- Zonificación de observables discretos GPS. 357
Tabla IV.40.- Subzonificación de Zona 1 de observables discretos GPS . 358
Tabla IV.41.- Subzonificación de Zona 3 de observables discretos GPS . 360
Tabla IV.42.- Subzonificación de Zona 5 de observables discretos GPS . 361
Tabla IV.43.- Datos obtenidos al aplicar la transformada de Fourier con Excel. 365
Tabla IV.44.- Determinación del módulo del número complejo obtenido. 366
Tabla IV.45.- Determinación de la frecuencia. 366
Tabla IV.46.- Zonas homogéneas de estudio. 367
Tabla IV.47.- Parámetros dinámicos obtenidos en la zona 1 378
Tabla IV.48.- Parámetros dinámicos obtenidos en la zona 3. 380
Tabla IV.49.- Parámetros dinámicos obtenidos en la zona 5. 382
Tabla IV.50.- Datos obtenidos del análisis frecuencial en la Zona 1 con 128 observaciones. 386
Tabla IV.51.- Datos obtenidos del análisis frecuencial en la Zona 1-1 con 512 observaciones. 386
Tabla IV.52.- Datos obtenidos del análisis frecuencial en la Zona 3 con 128 observaciones. 387
Tabla IV.53.- Datos obtenidos del análisis frecuencial en la Zona 3-3 con 512 observaciones. 387
Tabla IV.54.- Datos obtenidos del análisis frecuencial en la Zona 5-1 con 128 observaciones. 387
Tabla IV.55.- Datos obtenidos del análisis frecuencial en la Zona 5-1 con 256 observaciones. 387

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN.

1.- MARCO REFERENCIAL DE LA TESIS DOCTORAL.

1.1.- CONCEPCIÓN Y EVOLUCIÓN DE LOS PUENTES Y VIADUCTOS.

1.1.1.- Introducción.

La Ingeniería Civil es una área de conocimiento compleja y muy antigua, que abarca actividades muy diversas y en muy diferentes ámbitos. Una técnica que consiste en el esfuerzo para ahorrar el esfuerzo o, dicho en otra forma, es lo que hacemos para evitar por completo, o en parte, los quehaceres que la circunstancia primariamente nos impone [...] obligándola a adoptar formas nuevas que favorecen al hombre [ORTEG-64].

Las grandes civilizaciones antiguas progresaron acompañadas del dominio de una técnica cuyo testimonio indeleble quedó reflejado en las grandes obras de Ingeniería Civil, desde las grandes pirámides egipcias hasta las maravillas romanas; calzadas, puentes o acueductos. De forma singular, fueron las infraestructuras de transportes, proyectadas con una precisión técnica que aún hoy sigue sorprendiendo, las que facultaron y aún hoy lo siguen haciendo, el desarrollo comercial, social, económico y cultural de la humanidad.

Uno de los primeros ingenieros de nuestro país y autor del Puente de Alcántara, plasmó en el arco la siguiente inscripción: *"Pontem Perpetui Mansurum in saecula"* (Dejo un puente que permanecerá por los siglos) [HERRE-12]. De esta manera, la Ingeniería Civil lleva siglos sirviendo a la sociedad a la que se debe, construyendo lazos de unión permanentes.

1.1.2.- Las estructuras en Ingeniería.

1.1.2.1.- Introducción.

Las estructuras son el puntal físico de todas las infraestructuras que han servido al desarrollo de la sociedad. Estas estructuras, esqueletos resistentes en sí, no se construyen para que resistan, sino para cumplir una finalidad concreta, dando por hecho que tienen que mantener a lo largo del tiempo su forma y condiciones. Para ello parece adecuada la clasificación que al respecto realiza [TORRO-08]:

Las finalidades funcionales primarias pueden agruparse de la siguiente forma:

> 1.- Aislar un determinado volumen del exterior. O sea, defender ese volumen de los agentes naturales exteriores: viento, lluvia, nieve, ruidos, temperaturas, vistas de otras personas, etc. Desde el punto de vista estructural suelen distinguirse, en este grupo, los muros de cierre y las cubiertas.
>
> 2.- Sostener cargas fijas o móviles. Es decir, pontear o establecer una plataforma que permita el paso de personas, vehículos, etc. Son, de una parte, los pisos de los edificios, y de otra, los puentes, viaductos, pasarelas, etc.
>
> 3.- Contener empujes horizontales o establecer un paramento que soporte los empujes de tierras, aguas u otros materiales líquidos, áridos o materias análogas. Son las presas, paredes de depósitos y silos, muros de contención, diques de abrigo, etc.

Aparte de los grupos de construcciones establecidos, existen otros de menos generalidad, como pueden ser tuberías, revestimientos de túneles, mástiles, chimeneas, canales, muros de cerca, etc., y que son más difíciles de clasificar rígidamente.

Así, en el diseño, construcción y control de las estructuras (entendiendo como tal el esqueleto resistente) intervienen diferentes factores, que hay que tener en cuenta de forma conjunta para el éxito global de la misma, pudiéndose expresar de forma "matemática" conforme a la siguiente expresión:

$$Estrucutura = f(a,b,c,d,e) = \begin{cases} a. Materiales \\ b. Tipología\ estructural \\ c. Forma\ y\ dimensiones \\ d. Proceso\ constructivo \\ e. Condiciones\ económicas \end{cases}$$

1.1.2.2.- Análisis de los factores intervinientes en el diseño de estructuras.

El diseño de una estructura viene motivado por la adecuación técnica de la misma a través, inicial y fundamentalmente, del proyecto, que hay que analizar pormenorizadamente para proponer las soluciones más adecuadas para la construcción del mismo, en función de los condicionantes externos así como de los medios de los que se dispongan en cada caso.

Conviene incidir en la importancia del proceso constructivo elegido, ya que un cambio con respecto al previsto inicialmente puede implicar un redimensionamiento de la estructura.

A.- Los materiales.

En la actualidad, el hormigón y el acero son los materiales más utilizados. La combinación de ambos, en sus diferentes características, ofrece un abanico muy amplio de posibilidades para el proyectista.

El hormigón puede ser armado o pretensado con diferentes características:

TIPO DE HORMIGON	RESISTENCIA
Normal	< 50 MPa
Alta Resistencia	60 – 100 MPa
Aligerado	30 – 40 MPa

Tabla I.1.- Características del Hormigón.

El acero, por su parte se puede presentar como:

- Barras para armar utilizadas embebidas en el hormigón, B400SD o B500SD, para conformar el hormigón armado de los puentes.
- Barras, hilos o torones utilizados en los tirantes de los puentes.
- Chapas, perfiles y tubos utilizados en puentes metálicos y mixtos.

TIPO	f_Y	f_u
S235	>235 MPa	>360 MPa
S275	>275 MPa	>430 MPa
S355	>355 MPa	>510 MPa
S460	>460 MPa	>565 MPa

Tabla I.2.- Características del acero utilizado en chapas, perfiles y tubos.

Hay materiales que previsiblemente se podrán utilizar en un futuro próximo y que hoy se encuentran en fase de pruebas, como pueden ser las fibras de alta resistencia de materiales sintéticos (kevlar) que podrían llegar a sustituir a las armaduras del hormigón, dado que se puede hablar de $f_y > 2.800\ Mpa$ y $f_u > 130.000\ Mpa$, otras podrían ser las fibras de carbono y las fibras de vidrio que, junto con las anteriores, resolverán el problema de conservación que tienen los hormigones armados actuales.

B.- La tipología estructural aplicada a los puentes.

La clasificación de los puentes se puede realizar atendiendo a diferentes aspectos, si bien el que dentro del esquema que se está siguiendo mejor puede caracterizar su tipología es el funcionamiento estructural del mismo. Así desde esta concepción estructural, se puede hacer la siguiente clasificación:

B.1.- Los puentes viga.

Los puentes viga son los más extendidos, pudiéndose subdividir a su vez en las siguientes tipologías estructurales atendiendo a su sección longitudinal:

- Puentes viga con uno o varios vanos, isostáticos.
- Puentes viga con losa continua.
- Puentes viga con voladizos enlazados con tramos articulados.
- Puentes viga continuos.

Lo puentes viga continuos tienen la gran ventaja en puentes largos de no tener juntas a lo largo de su rodadura, juntas que son siempre molestas para el conductor, ahora bien requieren juntas mucho mayores en los extremos y por tanto bastante más caras.

Por otro lado, atendiendo a la sección transversal que deben adoptar, lo más normal en este tipo de puentes es una sección transversal de sección constante, máxime cuando la longitud de todos los vanos es similar.

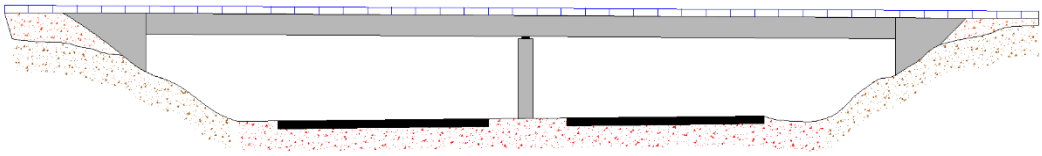


Figura I.1.- Puente viga de sección transversal constante.

Sin embargo es usual, sobre todo cuando hay que salvar ríos u obstáculos similares, que la luz del vano central sea mayor que la de los extremos, siendo normal que la sección transversal sea de canto variable, de forma que se optimice el área en función de los esfuerzos a absorber.

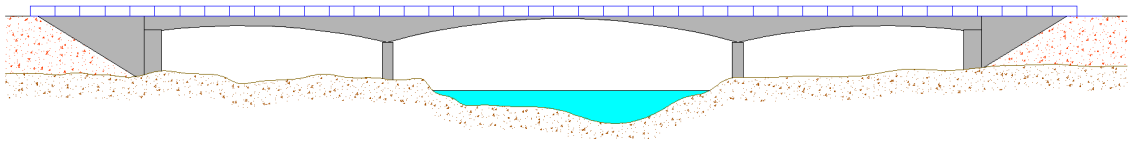


Figura I.2.- Puente viga de sección transversal de canto variable.

B.2.- Los puentes pórtico.

El fundamento estructural de estos puentes reside en el empotramiento realizado entre un tablero tipo viga con sus estribos y/o pilas. Con esta estructura hiperestática se consigue una reducción del momento isostático a costa de los nuevos momentos negativos producidos en estos nudos.

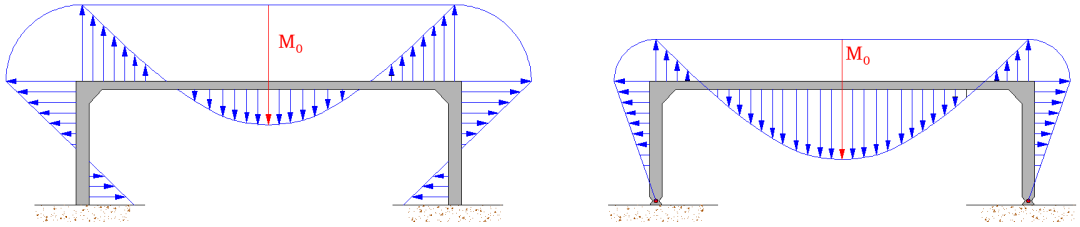


Figura I.3.- Comparativa de ley de flectores en función del tipo de apoyo.

De este modo, la tipología de puentes pórtico se pueden a su vez clasificar estructuralmente según el siguiente listado gráfico:

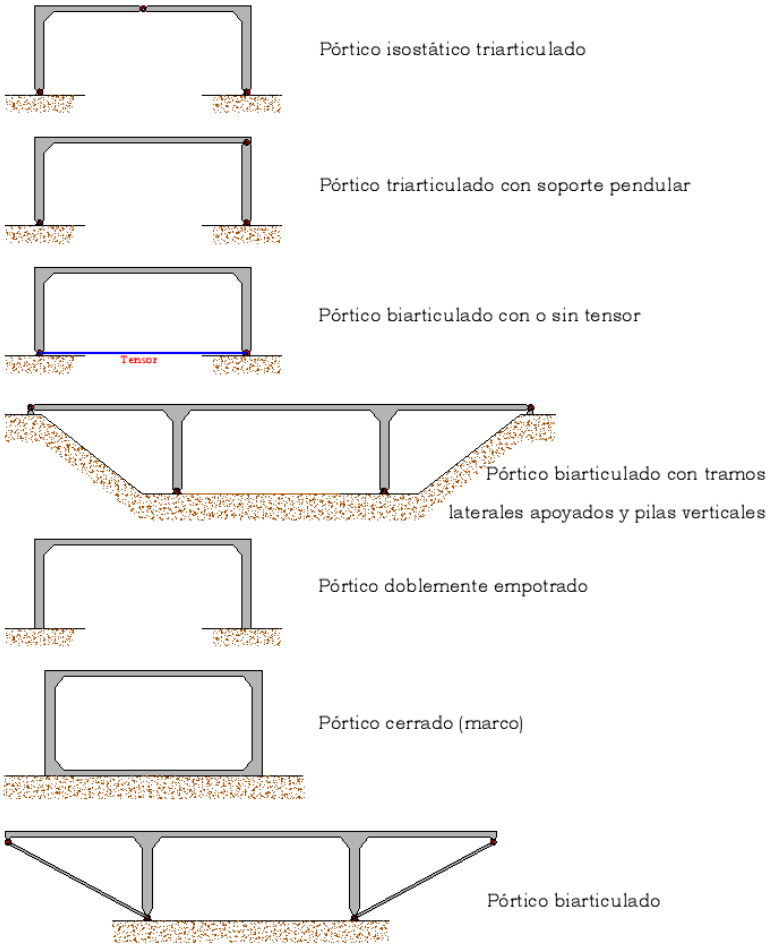


Figura I.4.- Clasificación de los puentes pórtico.

Por otro lado, atendiendo a la sección transversal lo más normal es elegir los puentes pórtico si se pretende un tablero de canto mínimo en el centro del vano.

B.3.- Los puentes arco.

El fundamento estructural de estos puentes reside en la resistencia a través de la forma del propio arco ya que sigue la forma de la línea de presiones de las cargas por peso propio, y por tanto se necesitan materiales con alta resistencia a compresión, siendo los más adecuados el hormigón o la piedra utilizada históricamente, hoy en desuso. Esto debe estar acompañado por terrenos de cimentación muy competentes y estables, que sean capaces de resistir estas compresiones transmitidas.

Esta conjunción de elementos y factores, lleva a conseguir estructuras extremadamente duraderas, muy adecuadas para el cruce de valles de zonas montañosas con laderas rocosas. De este modo, los puentes arco son muy competitivos cuando las luces a salvar superan los ochenta metros, ya que para luces inferiores no les hacen competitivos frente a otras tipologías que en este documento se analizarán posteriormente, debido fundamentalmente a la aparición de nuevos procesos constructivos muy adaptados a este rango de luces.

La clasificación de los puentes arco según su sección longitudinal se puede resumir en la siguiente listado tipológico:

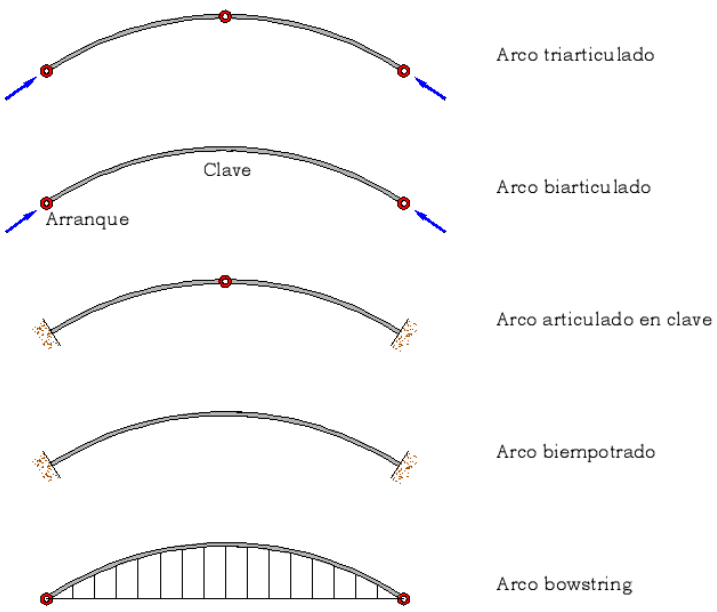


Figura I.5.- Clasificación de los puentes arco.

Actualmente este tipo de puentes se construyen en hormigón, siendo importante tener en cuenta las deformaciones por retracción, fluencia y la temperatura, al tener influencia directa sobre la forma del arco y tener que realizar juntas.

De este modo, si se utiliza hormigón en masa se deben construir arcos triarticulados isostáticos ya que admiten deformaciones, sin restricciones, provocadas por el descenso en la clave. Esto lleva a que el más utilizado sea el de hormigón armado pudiendo ser el tablero de hormigón pretensado.



Imagen I.1.- Puente arco en autovía A-7. Tramo: Nerja-Almuñécar.

B.4.- Los puentes atirantados.

El fundamento estructural de estos puentes reside en el soporte elástico del tablero mediante tirantes a lo largo del mismo, con lo que se consiguen grandes esbelteces del tablero, llegando en la actualidad a $\frac{1}{400}$. De este modo los elementos principales de este tipo de puentes son, los cables, el tablero y el pilono, y los tres contribuyen de forma concluyente en su comportamiento estructural. A partir de uno de ellos, el cable y su configuración longitudinal, se puede determinar la tipología del puente, pudiendo hacer la siguiente clasificación:

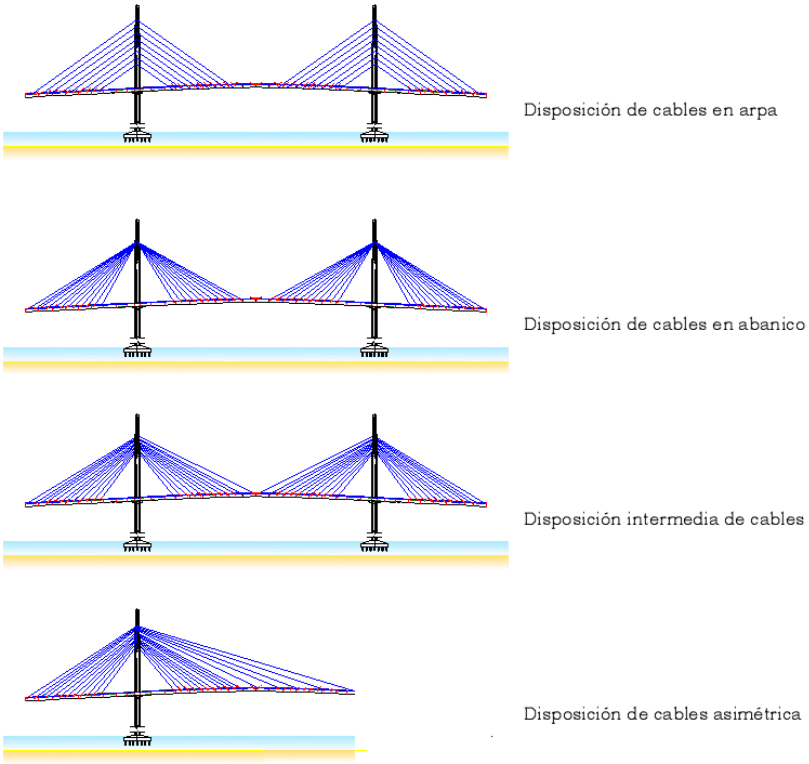


Figura I.6.- Disposición longitudinal de cables en puentes atirantados.

En el caso de disposición de los cables en arpa, cuando está cargado sólo el vano central, requiere una rigidez muy grande de la pila o de los vanos laterales, lo que conlleva a un mayor coste del puente, sin embargo se construye en numerosas ocasiones debido al alto valor estético que produce. El gran espesor que alcanza la pila se acrecenta debido al paralelismo que deben mantener los tirantes, si bien es cierto, que se minimiza el problema de anclajes de los tirantes en dicha pila.

Desde el punto de vista estructural, la más eficaz es la de la disposición de cables en abanico. La inclinación media de los tirantes es mayor y por tanto los axiles de compresión introducidos al tablero son menores. Con esta disposición de cables, se pueden conseguir pilas y tableros muy esbeltos debido al efecto rigidizador de los cables. El problema en esta disposición es la resolución de una forma adecuada estéticamente ya que todos los tirantes parten de un mismo punto en la pila.

Así, la lógica lleva a una solución intermedia entre las dos anteriores, pues tiene las ventajas de cada una de ellas; un pila suficientemente rígida y sin los problemas constructivos debido a la concentración puntual de cables.

Por otro lado, se puede analizar la disposición transversal, pudiendo ser lateral o central. La disposición transversal central constituye un único plano vertical coincidente con el eje del puente, de forma que los tirantes compensan exclusivamente los cortantes y las flexiones longitudinales, y de esta manera el tablero es el que debe absorber las torsiones, originadas por las cargas excéntricas de uso así como de viento o provocadas por la curvatura en planta.

La disposición de atirantamiento lateral se organiza con los tirantes en dos planos verticales en los bordes del tablero, de forma que son capaces de absorber esfuerzos longitudinales en el dintel así como los transversales de las cargas excéntricas no siendo necesaria tanta rigidez torsional en el tablero. La solicitación más importante a la que el tablero está sometido es por tanto la flexión transversal entre planos de atirantamiento cuando el puente tiene una anchura grande.

Este último aspecto, se podría minimizar mediante un atirantamiento triple, visto únicamente en tableros con una anchura muy elevada.

Una variante del atirantamiento lateral, propuesto por [WALTH-99], es la de converger los planos de los tirantes en la cabeza del pilono con una buena rigidez a torsión y eficaz estructuralmente.

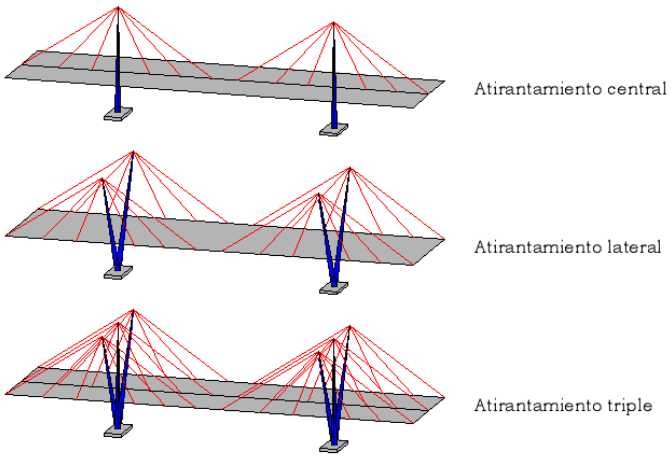


Figura I.7.- Disposición transversal de cables en puentes atirantados.

Por su parte, el tablero en los puentes atirantados tiene que ser capaz de resistir las acciones verticales debidas a cargas permanentes y a sobrecargas de uso así como las producidas por el viento.

Las cargas permanentes tienen un efecto sobre el tablero que depende de la distancia existente entre tirantes así como un fuerte axil de compresión que se produce en el tablero, que hace que las secciones se tengan que reforzar en las zonas de encuentro con las pilas así como la flexión transversal importante en tableros de gran anchura.

En lo relativo a las sobrecargas de uso, provocan flexiones en sentido longitudinal, acusadas en el centro del vano central más largo y en los extremos de los laterales, que es donde los tirantes tienen una mayor flexibilidad. En sentido transversal su efecto es el torsional ya comentado.

Las acciones debidas al viento, producen una flexión transversal y torsión que no es problemática de soportar, aunque siempre hay que tener en cuenta los efectos producidos por la inestabilidad aerolástica.

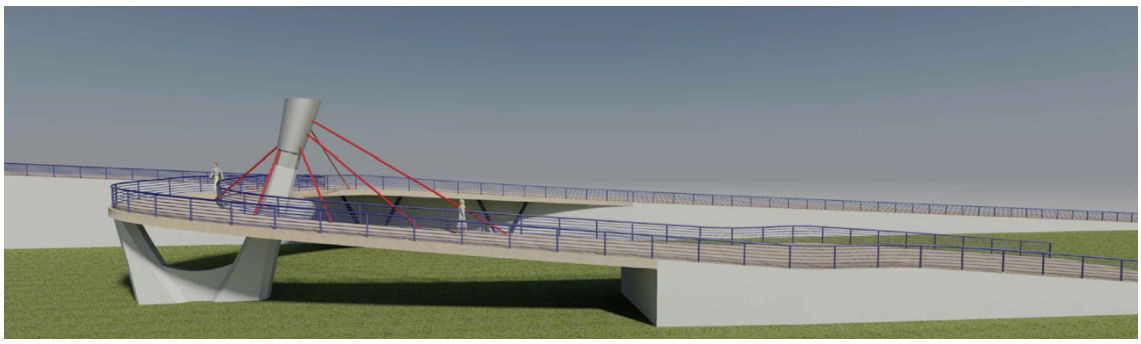


Imagen I.2.- Puente atirantado, Pasarela de La Marina (Ceuta).

En cuanto al pilono, tercer icono en esta tipología, es el único elemento rígido en la terna, siendo además una parte fundamental dentro de la estética global del puente. Una relación comúnmente adoptada entre la altura del pilono y la luz principal del tablero es de $\frac{h}{l} = 0{,}4$ para puentes atirantados desde un solo extremo y de $\frac{h}{l} = 0{,}2$ para

puentes de tres vanos, siendo el material de los mismos en la actualidad el hormigón de manera mayoritaria.

B.5.- Los puentes colgantes.

Se utilizan para salvar grande luces, del orden de 700 a 1.400 metros normalmente y de forma general están compuestos por tres tramos, el central suspendido y los dos laterales. Su elemento fundamental son los cables que pasando por los pilonos se anclan en macizos en los extremos del puente.

La suspensión del tablero se realiza igualmente por cables, tablero que trabaja básicamente a flexión y sin apenas compresiones.

Los pilonos por su parte están muy solicitados debido a las cargas verticales y al desequilibrio de los cables portantes dada la baja rigidez del conjunto cables-tablero. En estos puentes es fundamental un estudio aeroelástico de forma que no exista riesgo de que esté afectado en algún momento por el fenómeno de resonancia. Para ello existe una regla práctica que relaciona la frecuencia natural de torsión y la de flexión longitudinal. Si la relación entre ambas se acerca a la unidad, las dos oscilaciones anteriores se acoplan y el tablero del puente entra en resonancia.

Estos puentes por tanto están compuestos por:

- Dos cables portantes tomando forma de parábola.
- Tirantes que parten de éstos de forma paralela hasta el tablero.
- Tablero metálico espacial triangular con viga de rigidez.
- Pilonos, habitualmente metálicos.

C.- Las tipologías estructurales aplicada a los tableros de puentes, formas y dimensiones.

Las partes básicas de un puente son el tablero, las pilas, los estribos y la cimentación. Exponer las tipologías existentes de cada uno de ellos se saldría del objeto de este documento, si bien, es conveniente desarrollar la parte correspondiente a la tipología de los tableros, ya que la tesis se desarrolla en torno al control geométrico de puentes que se construyen mediante el empuje del tablero.

El tablero de un puente es un elemento generalmente lineal, apoyado sobre los estribos y las pilas o suspendido de cables en su caso. Dentro de la variabilidad existente en cuanto a los tableros, la elección de la tipología idónea en cada caso será la que la haga viable el sumando del coste de los materiales necesarios y los elementos auxiliares para su construcción, por tanto, es importante tener un conocimiento profundo de los materiales desde el punto de vista del dimensionamiento así como de los diferentes procedimientos de construcción para cada uno de ellos.

Si se trata de puentes con tablero tipo viga y en los tipo pórtico, lo adecuado es disponer de estructuras parciales estables sin elementos auxiliares para finalmente lograr la continuidad de todo el tablero.

En los puentes arco, el objetivo es cerrar el mismo, ya que mientras no lo esté no funcionará como tal y por tanto, hasta llegar a ese momento habrá que disponer de elementos auxiliares que den forma y sustenten el arco final.

En los puentes atirantados, el tablero ha de construirse al mismo tiempo que se van colocando los tirantes, ya que ambos forman parte de la estructura resistente final y el proceso vendrá condicionado por la forma de puesta en obra de éstos.

Por último, en los puentes colgantes, la mayor dificultad para la composición final del tablero, es el tendido del cable portante ya que una vez situado éste en su posición, el resto de elementos, incluido el tablero, se van colgando de él.

Con esta breve exposición del tablero, la tipología a elegir durante el diseño del puente, debe partir del conocimiento de diferentes aspectos que de una forma u otra determinan

su elección, tanto para la sección transversal como la longitudinal, como son: la longitud del vano para salvar el objetivo, el gálibo disponible, el proceso constructivo que se desee o se pueda aplicar, la esbeltez que se desea para el tablero así como la relación sobrecarga/peso propio, pudiendo realizar la siguiente clasificación [TARQU-05]:

PROCEDIMENTO CONSTRUCTIVO DE TABLEROS DE PUENTES				
Tipología			**Rango luces (m)**	
Losa in situ de canto constante	Maciza	Armada	15	20
		Pretensada	20	25
	Aligerada	Pretensada	25	35
Tableros de vigas	Prefabricadas	Armada	10	20
	Dobles T	Pretensadas	15	45
	Artesas	Pretensadas	15	45
	Metálicas	Dobles T	40	50
Losa in situ de canto variable	Aligerada	Pretensada	35	50
Sección Pi in situ	Canto constante	Pretensada	35	45
Cajón in situ	Canto constante	Pretensado	35	60
Mixtos	Canto constante	Alma llena	60	100
		Celosía	60	150
	Canto variable	Alma llena	80	150
		Celosía	60	200
Dovelas Cajón	Canto constante	Vano a vano	40	55
		Empujado	35	50
		Voladizos	70	100
	Canto variable	Voladizos	70	150
Voladizos in situ	Canto constante	Sección Cajón	70	100
	Canto variable	Sección Cajón	70	300
Puentes arco	Tablero Superior		100	500
	Tablero Inferior		100	500
	Tablero Intermedio		100	500
Atirantados			100	1.000
Colgantes			1.000	2.000

Tabla I.3.- Procedimiento constructivo de tableros de puentes.

D.- El proceso constructivo.

En la Edad Media, los puentes se ejecutaban con un cimbrado total del mismo. De esta forma, si el tablero se cimbraba completamente, los esfuerzos de peso propio actuaban una vez producido el descimbrado y según el esquema estructural definitivo de la estructura.

El proceso constructivo, [ALVAR-05], es un aspecto que debe ser tenido en cuenta de forma fundamental desde el momento en el que se está realizando el proyecto del mismo, de la misma manera que se tienen en cuenta otros factores tales como integración paisajística, aspectos funcionales del mismo, la geotecnia del terreno, disponibilidad económica para poder realizar la inversión, la conveniencia de realizarla desde el punto de vista social, etc.

La evolución técnica de los puentes viene marcada principalmente por el avance de sus procesos constructivos y de la aparición de nuevos materiales, avance que lleva a retos cada vez más significativos, sobre todo en lo relativo a las luces que se es capaz de salvar.

Estos retos hay que hacerlos compatibles, como se verá en el apartado siguiente, con una construcción sostenible desde el punto de vista económico, teniendo por tanto que tener en cuenta al menos estos dos aspectos:

- Para conseguir una disminución de coste en los elementos auxiliares para la construcción del puente se hace necesario hacer partícipe del proceso constructivo la capacidad resistente de secciones en fases previas, de forma que soporte cargas de fases posteriores.
- El aumento de luces conlleva en la mayoría de los casos a un aumento exponencial sobre la altura de cauces, valles, etc., y por tanto, a parte de los temas económicos que inviabilizarían el proyecto, se hace necesario independizar la construcción del tablero del terreno a salvar, dando lugar a nuevos sistemas constructivos.

Para una comprensión adecuada de los procesos constructivos hay que tener en cuenta por tanto la evolución de los esfuerzos generados sobre el tablero en las diferentes fases, o dicho de otro modo, conocer la evolución que sufren los esquemas estáticos longitudinales a lo largo de todo el proceso constructivo y no sólo el esquema estático final con las sobrecargas de servicio.

De esta forma, la elección de un proceso constructivo u otro, determina los esfuerzos que se generan debidos al peso propio, de forma que se producen determinados estados intermedios que hay que considerar en la fase de proyecto para dimensionar adecuadamente la estructura.

En el caso de construcción de puentes con vigas, éstas se colocan para posteriormente hormigonar sobre ellas la losa de compresión. Esto obliga a que las propias vigas deban soportar el peso total de la losa, compuesto por las prelosas, la ferralla, el hormigón y elementos auxiliares, hecho que condiciona las luces máximas que se pueden conseguir con este proceso. De esta forma, una vez hormigonada la losa sobre las vigas, será el conjunto vigas-losa, el que ha de ser capaz de resistir las cargas de peso propio más las sobrecargas de uso y climáticas.

El objetivo por tanto, desde el punto de vista constructivo en los puentes de vigas es reducir los esfuerzos sobre las vigas en fase de hormigonado, reducción que se puede realizar de dos formas:

La primera realizando un cuidadoso proceso de hormigonado, de forma que los esfuerzos generados por el hormigón fresco actúe sobre secciones con una capacidad resistente mayor, ya que dependiendo como se ejecute se pueden reducir los esfuerzos de forma considerable tal y como se puede ver en la figura siguiente [ALVAR-05].

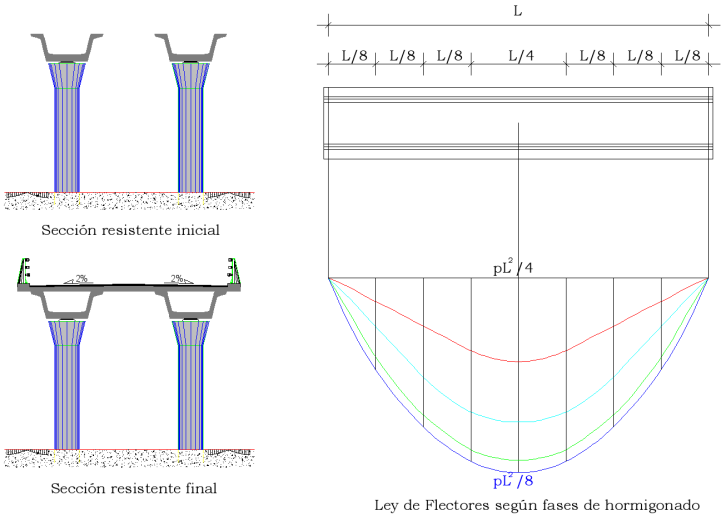


Figura I.8.- Evolución de los esfuerzos de peso propio según se realice el hormigonado de la losa superior.

Y la segunda forma de disminuir los esfuerzos consiste en el uso de puntales intermedios, válido para el caso de vigas metálicas, que darán por tanto lugar a secciones mixtas. El esquema estático en este caso se podría representar según se puede ver en la siguiente figura.

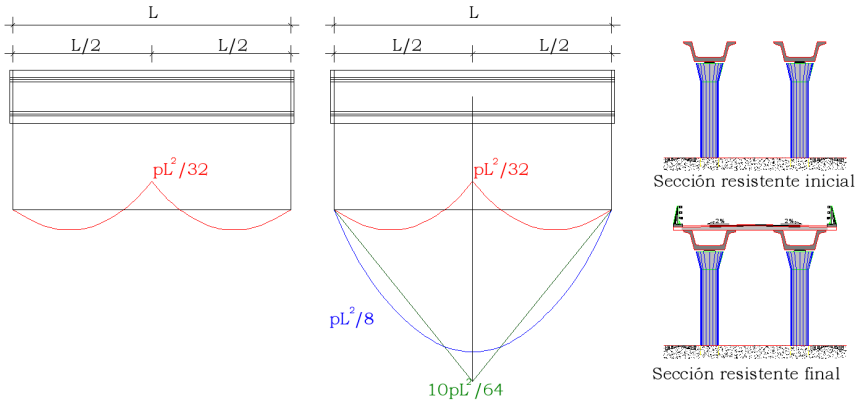


Figura I.9.- Evolución de los esfuerzos de peso propio con el hormigonado por fases de la losa superior con el uso de puntales provisionales.

Para la construcción de puentes de luces mayores, por encima de los cien metros, debido a las razones previamente expuestas, se hace necesario recurrir a la construcción por vanos de forma consecutiva, a parte de ser esta la forma de hacer el pretensado efectivo y que sus pérdidas por rozamiento no lo hagan inviable. De esta forma, se consigue que el peso propio del tramo en construcción actúe sobre tramos previamente construidos siendo por tanto el sistema estático de esfuerzos evolutivo en cada fase. En tableros continuos, se suele hacer la junta entre el cuarto y el quinto de la luz, siendo el esquema estático similar al que se muestra en la siguiente figura [ALVAR-05].

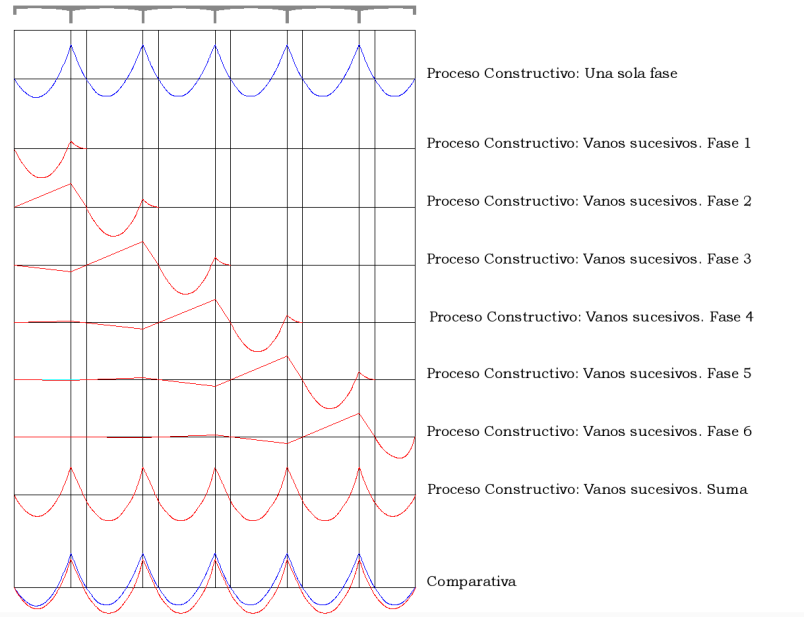


Figura I.10.- Evolución de la ley de momentos de peso propio bajo la construcción por vanos sucesivos, y comparación con la ejecución en una sola fase.

Si el proceso elegido es el de empujar tramos de puente construidos en un extremo a lo largo de una directriz, hace que las secciones se vean sometidas a diferentes esfuerzos en cada fase de empuje hasta su posición definitiva, esfuerzos que deben estar previstos en el proyecto, incluso pudiendo dar lugar a pretensados provisionales no adecuados en su posición definitiva.

Por último, si el proceso se realiza por construcción de voladizos sucesivos, se va configurando fase a fase de forma simétrica desde el centro, de forma autoequilibrada y coincidente con una pila. De este modo hasta el cierre en clave, el puente trabajará como una ménsula y por tanto con necesidad de empotramiento en la pila de partida. En la figura se puede ver la ley de esfuerzos durante la construcción [ALVAR-05].

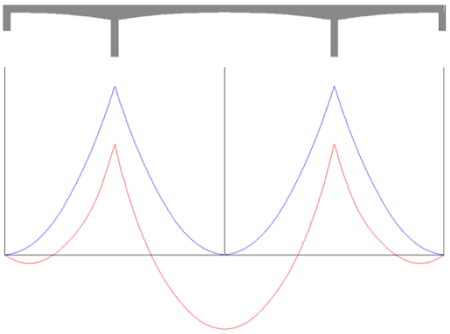


Figura I.11.- Ley de esfuerzos en el tablero derivados de la construcción por voladizos sucesivos, comparada con la obtenida con cimbrado completo.

Los tableros de puente son elementos lineales que toman su posición definitiva en la estructura a través del proceso constructivo utilizado. Los procesos más utilizados son los que se desarrollan a continuación.

D1.- Cimbra convencional.

La cimbra se utiliza cuando el tablero es de hormigón y se ejecuta in situ en su posición definitiva. La cimbra es una estructura provisional y portadora de los encofrados del tablero.

Hay dos tipos de cimbras, utilizadas en función de las afecciones existentes bajo el tablero así como alturas excesivas en zonas localizadas. La primera es la cimbra cuajada que se coloca en forma de malla tridimensional tupida desde el tablero hasta la zona de apoyo de la cimbra, y la segunda en el caso de existir afecciones o una altura excesiva, la cimbra aporticada.

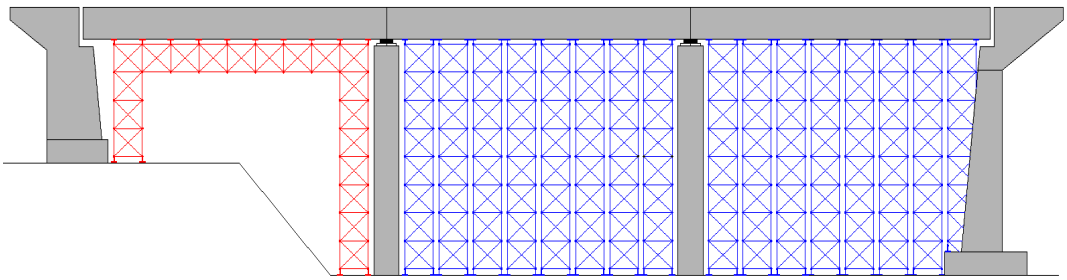


Figura I.12.- Esquema de un cimbrado completo, cimbra aporticada en el primer tramo y cimbra cuajada en los dos últimos vanos.

La secuencia constructiva es la siguiente:

- Replanteo de los elementos estructurales, apoyos, encofrados, etc.
- Colocación de la cimbra en su situación teniendo en cuenta las contraflechas.
- Encofrado y posterior ferrallado del tablero.
- Hormigonado del tablero.
- Curado del hormigón.
- En el caso de tableros de hormigón pretensado, tesado de torones.
- Descimbrado del tablero y retirada de material.



Imagen I.3.- Cimbra cuajada y aporticada en la construcción de la pasarela de La Marina (Ceuta).

D2.- Autocimbra.

La autocimbra se define como una cimbra que es "autoportante" y que se "autolanza", basada en una estructura metálica capaz de soportar, estando biapoyada, el peso total del tablero en construcción (hormigón fresco, encofrados y elementos auxiliares) más el propio de la autocimbra. Además es capaz de desplazarse hasta la nueva posición a ejecutar, apoyándose en los tramos traseros ya ejecutados y en los posteriores que servirán de apoyo al tablero definitivo, las pilas. La principal ventaja sobre la cimbra clásica es que no depende del terreno bajo el tablero y por tanto su campo de uso es mucho más extenso.

La secuencia constructiva es la siguiente:

- Avance de la cimbra de una fase a la siguiente.
- Ferrallado del tramo del tablero que incluye cuatro quintos del vano anterior y un quinto del vano siguiente.
- Hormigonado.
- Tesado desde el extremo frontal de la fase ejecutada, en el caso de tableros pretensados.



Imagen I.4.- Ejecución del Viaducto de Pradoluengo (A-6) mediante autocimbra.

D3.- Voladizos sucesivos mediante carros de avance o dovelas izadas.

Este proceso constructivo se puede aplicar tanto en tableros de hormigón como metálicos, aunque siempre con sección cajón, pudiendo realizarse en hormigón incluso con cajones prefabricados. El tablero nace en un elemento rígido, una de las pilas, y avanza de forma simétrica a ambos lados de la misma mediante pequeñas porciones de tablero: dovelas. Generalmente se utiliza en tableros de canto variable, aunque también puede extenderse a los tableros de canto constante.

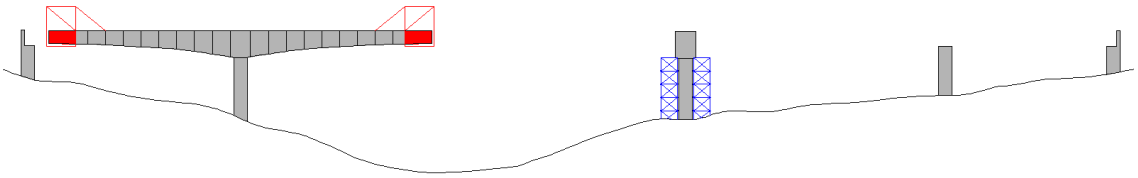


Figura I.13.- Esquema de la ejecución de viaducto mediante voladizos sucesivos.



Imagen I.5.- Ejecución de Viaducto por voladizos sucesivos, dovelas in situ, (Dragados y Construcciones S.A.).

D4.- Empujados.

Este proceso constructivo, que se desarrollará ampliamente en los siguientes capítulos de esta tesis, se basa en la construcción o ensamblaje del tablero en el taller de fabricación situado normalmente en uno de los extremos. Desde este extremo se van ensamblando piezas consecutivas del tablero de forma que mediante gatos se va dirigiendo el puente por una directriz previamente establecida y pasando por encima de los apoyos, pilas, definitivos del puente.

Dado que hay una parte del tablero que se encuentra en voladizo se necesita recurrir a un corrector de la flecha con un doble objetivo, por un lado limitar los esfuerzos en las secciones más solicitadas al encontrarse el tablero en voladizo y por otro lado lograr que pueda pasar por encima de los apoyos intermedios situados en la cota previamente establecida. Para este doble objetivo, se recurre bien a atirantamientos desde torres dispuestas en el propio tablero o a “picos de pato” o pescantes.

El empuje tiene la gran ventaja de que se independiza del terreno existente bajo el puente, por lo que resulta adecuado cuando los accesos son complicados, existen obstáculos al pie del mismo, cuando las pilas son muy altas o cuando es un puente de gran longitud.



Imagen I.6.- Ejecución del Viaducto de La Miel (A-7), empujado.

Este proceso constructivo mediante tablero empujado, está limitado por ciertas geometrías del trazado en planta y alzado, así, para que sea un empujable, debe cumplir las condiciones marcadas en las siguiente tabla [ALVAR-05].

GEOMETRÍAS EMPUJABLES		
Geometría	**Trazado en planta**	**Trazado en alzado**
Recta en el espacio	Recta	Recta
Circunferencia en plano vertical	Recta	Circular
Hélice de paso constante	Circular	Recta
Curva circular sobre un plano inclinado	Elipse	Curva Senoidal
	Clotoide	Circular

Tabla I.4.- Tipología de las diferentes geometrías empujables.

El empuje de tableros de hormigón se realiza con dovelas construidas en uno de los estribos del puente y está limitado a las geometrías de la tabla I.4. La sección normal de estos tableros de hormigón, es un cajón con luces de vanos entre 35 y 70 metros empujando siempre desde un lado.

El empuje de tableros metálicos para constituir puentes mixtos, se realiza con el tablero inacabado, sólo la parte metálica. La sección normalmente empujada son las secciones cajón, doble T o celosías, consiguiendo luces de hasta 120 metros, pudiendo empujar desde un lado o desde ambos estribos.

D5.- Viga de lanzamiento.

La viga de lanzamiento es una estructura similar a la autocimbra en cuanto a su tipología y forma de apoyo, capaz de manejar grandes cargas, por lo que se puede utilizar para colocar vigas prefabricadas o para colocar dovelas prefabricadas, conformando en ambos casos el tablero.

El dimensionamiento de la viga de lanzamiento se realiza en función por un lado de la carga máxima prevista que se va a manejar y por otro lado de la situación de los apoyos y por tanto la luz entre pilas.



Imagen I.7.- Ejecución del Viaducto de Tremor (A-6).

D6.- Mediante maquinaria de izado.

Este proceso se utiliza cuando el tablero se compone de elementos prefabricados que se pueden situar en su posición definitiva mediante el uso de grúas o elementos similares de izado. Para ello es necesario un acceso adecuado para la grúa y que los radios de alcance estén dentro de los márgenes de la grúa.



Imagen I.8.- Ejecución de pasarela de Fuengirola mediante Izado con grúas.

D7.- Ripado transversal.

Se trata de un procedimiento que se utiliza en aquellos casos en que haya que reponer una estructura cortando el tráfico inferior durante un número limitado de horas, caso típico en el transporte ferroviario. Para ello se construye una estructura adyacente a la existente, sustentada en unas líneas de apoyo dispuestas en la prolongación de las existentes. Una vez retirada la estructura a sustituir, se procede al empuje acompasado desde ambas líneas de apoyo, de forma que la estructura nueva pase a ocupar la posición de la estructura sustituida.

Puede tener otras aplicaciones, siempre vinculadas a problemas geométricos y de explotación. Este método también se utiliza en ocasiones combinado con el uso de grúas para minimizar la capacidad de éstas en el montaje de vigas sobre cabeceros.

D8.- Medios flotantes.

Se trata de un sistema constructivo que permite ejecutar la estructura completa, o parcialmente, en una zona en seco para posicionarla en su lugar definitivo utilizando un medio flotante.



Imagen I.9.- Ejecución de pasarela de la Barqueta, mediante medios flotantes. Dragados y Construcciones S.A.

E.- Los condicionantes económicos.

Las obras en general y en concreto las estructuras, casi siempre (por no decir siempre) a lo largo de la historia han tenido condicionantes y limitaciones de tipo económico que han hecho que la obra se haya considerado ejecutable.

Así en el coste total de la obra, hay que tener en cuenta los materiales, la mano de obra, los gastos generales y beneficio industrial, así como el proceso constructivo y los costes de conservación (que pueden variar sustancialmente en función del material elegido así como la tipología), y los beneficios, directos o indirectos, medibles o imponderables, que de la obra se esperan.

Por eso, el presupuesto global de la ejecución de una estructura debe ir más allá, y tener en cuenta que en ella influyen aspectos como el clima, la superficie y densidad de población, la facilidad del transporte, la industrialización del país, la cualificación de la mano de obra, el volumen de elementos análogos en obras simultáneas, debiendo hacer con todo ellos un estudio financiero que permita demostrar a priori la viabilidad económica de la misma.

1.1.2.3.- La elección del tipo de puente y su proceso constructivo.

Como se ha visto, los procesos constructivos de puentes están en un continuo desarrollo con el objetivo de conseguir nuevos retos ya sea sobre las tipologías existentes o sobre nuevas, creando a su vez procesos más competitivos en cuanto a coste y plazos de ejecución y a su vez más seguros para los trabajadores.

Abordando este asunto, capital en una sociedad que busca cada vez procesos más competitivos, en la construcción de puentes por métodos tradicionales el coste de la mano de obra supera sin dificultad el cincuenta por ciento del coste de la estructura, factor por tanto con más incidencia global cuanto mayor longitud tiene el puente; es por ello por lo que cada vez más, se buscan procesos industrializados y prefabricados que puedan disminuir esta carga horaria de mano de obra

No es objeto de esta tesis abordar y explicar todos y cada uno de los procesos constructivos existente para puentes ni tampoco detallar las tipologías, ahora bien, para comprender los apartados siguientes de este capítulo, sí conviene mostrar la siguiente tabla resumen, que muestra por un lado las tipologías utilizadas en estos momentos en función de la luz que se desea salvar así como el proceso constructivo adecuado a dicha tipología [TARQU-05]:

PROCEDIMENTO CONSTRUCTIVO DE TABLEROS DE PUENTES

Tipología			Rango luces (m)		Cimbra	Cimbra Autoportante	Grúas con o sin apeos	Viga de lanzamiento	Empujado	Carros con cabestrante	Carros avance
Losa in situ de canto constante	Maciza	Armada	15	20	X						
		Pretensada	20	25	X						
	Aligerada	Pretensada	25	35	X	X					
Tableros de vigas	Prefabifcadas	Armada	10	20			X				
	Dobles T	Pretensadas	15	45			X	X			
	Artesas	Pretensadas	15	45			X	X			
	Metálicas	Dobles T	40	50			X				
Losa in situ de canto variable	Aligerada	Pretensada	35	50	X						
Sección Pi in situ	Canto constante	Pretensada	35	45		X					
Cajón in situ	Canto constante	Pretensado	35	60	X	X			X		
Mixtos	Canto constante	Alma llena	60	100			X		X		
		Celosía	60	150					X		
	Canto variable	Alma llena	80	150			X		X	X	
		Celosía	60	200			X		X	X	
Dovelas Cajón	Canto constante	Vano a vano	40	55				X			
		Empujado	35	50					X		
		Voladizos	70	100			X	X		X	
	Canto variable	Voladizos	70	150			X	X		X	
Voladizos in situ	Canto constante	Sección	70	100							X
	Canto variable	Sección	70	300							X
Puentes arco	Tablero Superior		100	500	Estudio Específico del Proceso Constructivo						
	Tablero Inferior		100	500	Estudio Específico del Proceso Constructivo						
	Tablero		100	500	Estudio Específico del Proceso Constructivo						
Atirantados			100	1.000	Estudio Específico del Proceso Constructivo						
Colgantes			1.000	2.000	Estudio Específico del Proceso Constructivo						

Tabla I.5.- Tipologías constructivas en función de la longitud del puente.

La elección de un determinado procedimiento de construcción, el empleo de unos medios auxiliares u otros, o los plazos previstos para la ejecución, son aspectos que, por sí solos, condicionan el proyecto de un puente.

Por tanto, es necesario definir antes del desarrollo del proyecto de construcción todos los aspectos relacionados con la ejecución de la estructura. No es suficiente como se ha explicado en párrafos anteriores con comprobar la estructura en su esquema estático final y con las cargas de servicio. Habrá que contemplar los distintos esquemas estáticos por los que va pasando la estructura y las cargas que se van introduciendo en cada uno de estos estados, para definir una estructura que soporte la envolvente de sus situaciones intermedias y final. De esta forma, se podrá garantizar la integridad de la misma, no sólo en la fase de servicio, sino también en las etapas parciales por las que va pasando a lo largo del periodo de construcción.

1.2.- LA CONSTRUCCIÓN DE TABLEROS DE PUENTES Y VIADUCTOS EMPUJADOS.

1.2.1.- Introducción.

En la construcción de puentes es fundamental conocer el comportamiento resistente de la obra realizada, pero no lo es menos la elección de la tipología más adecuada a cada lugar así como el proceso constructivo que haga viable la tipología y diseño elegido. Aspectos ambos estrechamente interrelacionados.

Así, la estética de un puente va a depender del proyectista aunque cada persona que lo vea tendrá una opinión al respecto, y por lo tanto no será objetivamente valorable una u otra, o más idónea ésta o aquella.

Dejando de lado la estética del mismo, la tipología más adecuada en un puente será la que minimice el coste de los materiales básicos para su construcción junto a los elementos auxiliares necesarios para su puesta en obra, sin embargo, el proceso constructivo más apropiado, será el que en base a los anteriores minimice el exceso de materiales y medios auxiliares adicionales aprovechando por lo tanto al máximo la capacidad resistente de los materiales de la estructura objeto.

Asimismo hay ocasiones en las que la tipología elegida lleva a que el proceso constructivo deba independizarse del entorno donde se construye el puente, como ocurre en valles amplios y profundos, ríos de gran anchura, etc. Estos casos implican normalmente tipologías con grandes luces; no olvidando que el objetivo final del puente, obviando el resistente, es que la geometría final conseguida tras la construcción sea la proyectada; así, es fundamental en estas tipologías, que la definición previa de la geometría del puente en cada fase así como el control durante la obra se encuentre dentro de los márgenes de previstos, de forma que no se produzcan deformaciones y esfuerzos indeseables que comprometan la vida útil del mismo.

En toda ejecución de puentes prevalecen tres puntos básicos:

1.- La elección de la tipología más idónea en función de los múltiples condicionantes existentes de tipo funcional, constructivo, estructural, estético o económico.

2.- La elección del proceso constructivo a seguir, con el objeto de hacer viable su ejecución.

3.- El cálculo propiamente dicho en sus aspectos de análisis de esfuerzos y dimensionamiento estructural.

1.2.2.- Principios generales.

El esquema general de un puente empujado se plasma en la siguiente figura de [GÖHLE-92]:

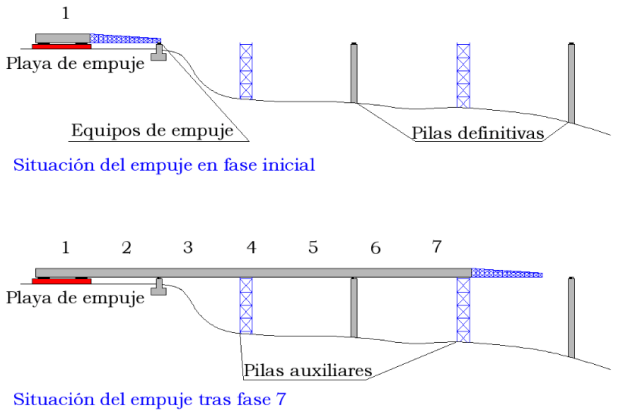


Figura I.14.- Esquema general de la construcción de un puente empujado.

Todo empieza con el parque de prefabricación, donde cada dovela se coloca a continuación de la que ya está dispuesta en posición de ser lanzada, lanzándose esta mediante gatos hidráulicos de forma que o bien se empuje la pieza o se tire de ella. Para hacer posible el lanzamiento hay que minimizar el rozamiento en la parte rodadura, lo cual se consigue mediante apoyos con placas de teflón normalmente.

Para determinar el tamaño de la dovela, en el caso de empujes de tableros de hormigón, la ideal es la que con ella se consiga un ciclo de una semana, de forma que durante el fin de semana sea el tiempo en el que fragua toda la pieza y pueda ser desmoldada el primer día del ciclo y poder llegar de nuevo al fin de semana con todo finalizado para un nuevo hormigonado.

Este proceso de construcción de puentes tiene múltiples ventajas, como son, [TARQU-05]:

- Disminución de costes: Para que este procedimiento de construcción de tableros sea viable, el coste de realización de la explanada de prefabricación, que normalmente no debe incidir ya que suele estar dentro de la traza, más el coste de los elementos de empuje, debe ser menor a la construcción tradicional en la que hay que contar las cimbras que ya no son necesarias pero sobre todo la longitud que se trate de salvar con el puente ya que esta es proporcional al número de pilas necesarias y por lo tanto al número de accesos a ellas y explanadas de izado. De esta manera, se podría decir que la longitud mínima de puente para que este proceso sea viable ronda los 250 metros y que no vaya, en principio, más allá de los 600-700 metros donde otros procedimientos son más competitivos, aunque esto no deja de ser relativo, y cada ubicación requiere, aunque valga la experiencia y éstas pautas generales, un estudio específico para ver la tipología y procedimiento constructivo más adecuado desde el punto meramente económico.
- Independencia del tráfico: Este proceso constructivo, tiene la ventaja adicional de poder trabajar sin desvíos de tráfico debajo de él y por tanto independizar prácticamente la construcción de la actividad que pueda haber debajo de la estructura.
- Aspectos medioambientales: Al disminuir o minimizar el número de pilas se disminuye todas las excavaciones o terraplenes necesarios para acceder a todas ellas reduciendo considerablemente el impacto ambiental que estos accesos producen.

1.2.3.- Condicionantes estructurales asociadas al proceso constructivo.

Durante el proceso de empuje del tablero de un puente se dan una serie de condicionantes estructurales inherentes al proceso que hay que tener en cuenta, [ALVAR-05]:

A.- Ley de momentos flectores en el tablero.

A medida que se va empujando el tablero, éste se encuentra con una mayor longitud en voladizo y por lo tanto con un momento flector que es directamente proporcional al peso y al cuadrado de la luz divido entre dos.

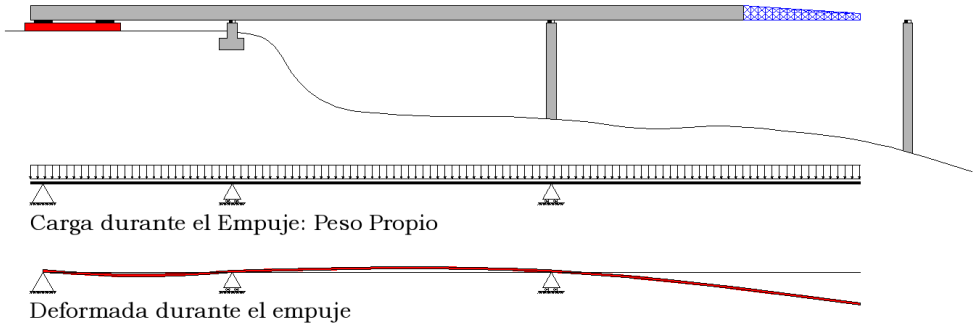


Figura I.15.- Esquema general de la deformada durante el empuje.

Esta ley genera unos esfuerzos tales que hace inviable en todos los casos este proceso constructivo; por ello para hacerle viable hay que proceder a minimizar estos esfuerzos ya sea mediante un voladizo de avance o mediante un atirantamiento provisional.

- Voladizo de avance, fundamentado en la colocación de una "nariz" o "pico de pato" en la parte delantera del tablero, de forma que se disminuya la luz libre de tablero en voladizo. Como orden de magnitud en puentes carreteros es normal pensar en que la longitud de la nariz sea sobre el 60% del vano disminuyendo a un 50% en puentes para ferrocarril.
- Atirantamiento variable provisional en la fase de lanzamiento. Se basa en meter tensión contraria a la predicha ley de flectores mediante tirantes en la punta de lanzamiento.

Otra forma de minimizar el flector, es actuando sobre el otro término de la ecuación, el peso propio, siendo habitual empujar la sección central del tablero sin voladizos.

Ya se ha explicado que en la elección del tipo de puente hay que tener en cuenta el binomio [coste de materiales – coste de elementos auxiliares], pues bien, de forma general, en los puentes empujados con luces grandes y pocos apoyos, el coste de los elementos auxiliares de este proceso mediante atirantamiento es bastante más barato que el de la "nariz" y por lo tanto mucho más tendente a ser utilizado (la nariz queda reservada a luces moderadas con puentes de mucha longitud), si bien conlleva a unas consideraciones adicionales a tener en cuenta:

- El control de ejecución es más severo cuando el proceso se realiza con atirantamiento, con la necesidad de un control continuo de los gatos, marcado por la comparación con las flechas estimadas en el proyecto de empuje, condicionadas de forma directa por la longitud libre en cada momento del tablero e indirectamente por la temperatura alcanzada a lo largo del día debido al sol, tanto en los tirantes, como en la torre y en el tablero.
- El atirantamiento induce una reacción vertical sobre las pilas del puente así como una reacción horizontal en fase de empuje, que debe ser considerada para el "sobredimensionamiento" de pilas debido a este proceso.
- El empuje lleva a pasar a todas y cada uno de las secciones por estadios de momento flector positivo y momento flector negativo, independientemente de la solicitud que tenga una sección cualquiera en su estado definitivo. Esto conlleva a una envolvente de momentos flectores que las secciones han de ser capaces de resistir y por lo tanto en algunos casos un sobredimensionamiento que debe ser considerado desde todos los puntos de vista.

- Igualmente, en línea con lo anterior, hay que tener en cuenta que todas y cada una de las secciones en algún momento son secciones de apoyo en pila con las tensiones localizadas que esto produce.
- En el caso de que la planta sea circular, aparecerán esfuerzos horizontales de contención en las pilas, que habrá que soportar normalmente mediante carriles con la consiguiente transmisión de esfuerzos adicionales a las pilas.

B.- Tipología constructiva del tablero.

En numerosas ocasiones la construcción in situ de un puente es compleja, llevando asociado un alto coste, normalmente por la dificultad de accesos ya sea para la construcción de pilas definitivas o provisionales.

En estos casos, cuando se trata de cubrir longitudes medias, que atendiendo a lo expresado en la tabla I-5, serían luces de tablero entre los 35 – 200 metros, [TARQU-05], una solución adecuada puede ser la de construir el tablero en una zona accesible para posteriormente trasladarlo a su ubicación definitiva mediante el procedimiento de empuje.

El origen de dicho proceso constructivo data de finales del siglo XIX y principios del siglo XX para los puentes metálicos, no aplicándose a tableros de hormigón hasta la década de 1960 de la mano de Fritz Leonhardt y Willi Baur en el puente sobre el río Caroní en Venezuela.

Las tipologías de tableros que se empujan en la actualidad son dos, los tableros de hormigón normalmente en sección cajón con luces que varían entre los 35 y 70 metros, realizando el empuje únicamente desde uno de los lados y los tableros metálicos y mixtos, con más variabilidad en su sección, cajón, celosías, doble T, etc. con mayor rango de empujabilidad llegando hasta los 120 metros de luz pudiéndose realizar el empuje desde uno o dos lados.

Este proceso constructivo por tanto, es adecuado cuando existen obstáculos debajo del puente (vías de comunicación, ríos, …), cuando se tienen pilas de gran altura, cuando los accesos son muy complicados o costosos de realizar o cuando el puente tiene gran longitud, ahora bien, hay que tener en cuenta que para que un tablero sea empujable debe tener una geometría adecuada al efecto (las citadas en la tabla I.4), que sea de canto constante o que la cara inferior del tablero tenga una alineación autogenerable, que cumpla con los rangos de luces citados y que haya espacio suficiente para poder realizar el taller de fabricación y empuje.

Este procedimiento tiene también su influencia en el proyecto, que se ve condicionado en algunos aspectos por él como son el tener que realizar refuerzos tanto en los tableros metálicos como en los de hormigón, refuerzos que van desde un aumento en los rigidizadores, un incremento del pretensado, más espesor de chapas, etc. Se puede concluir por tanto que el proyecto de un puente que se va a empujar varía mucho del que tendría el mismo puente en caso de que fuera construido por otro procedimiento. [ALVAR-05].

1.2.4.- Fundamentos del empuje.

El empuje comienza por la preparación de la zona desde la que se va a realizar el mismo, denominado parque de empuje, para el que hay que tener en cuenta que debe contar con una longitud y anchura mínima para poder realizar un montaje y ensamblaje óptimo así como un espacio adicional para la retenida y torres de atirantamiento. En el parque de empuje en el caso de tableros de hormigón es donde se situarán los carros de encofrado para hormigonar posteriormente cada uno de los tramos, así como albergue de todas las cimentaciones que van a servir de guía en el empuje tanto en los de hormigón como los mixtos, por lo que debe ser un terreno con suficiente capacidad portante y con asientos muy limitados.



Imagen I.10.- Parque de empuje del Viaducto de la Miel.

En el parque de empuje hay que situar todos los elementos necesarios en función del sistema de empuje que se utilice, ya que es éste el que determina la forma de traslación de las piezas y se dimensiona en función del tipo de material a empujar, hormigón o acero, de la longitud de las dovelas, etc., en definitiva del peso total a movilizar. Los sistemas de empuje se basan de forma simplista en "empujar la dovela" o "tirar de la dovela", utilizando en el primer caso los gatos de fricción y en el segundo equipos hidráulicos de tiro, ya sean de barras o de cables.

Los gatos de fricción se basan en el rozamiento existente entre la dovela y el equipo de empuje, trasladando la reacción a un macizo trasero de hormigón. Su funcionamiento básico se puede ver en la siguiente figura de [ROSIG-02].

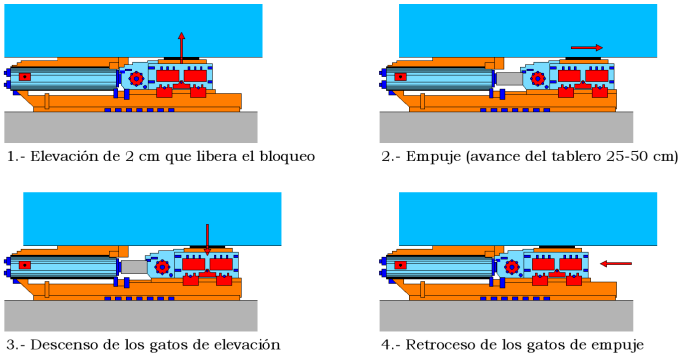


Figura I.16.- Secuencia de trabajo en el empuje de un gato de fricción.

Por su lado, los equipos hidráulicos de tiro se basan en barras o cables que están unidos al tablero del que se tesan con gatos huecos situados normalmente en el estribo. Su funcionamiento básico se puede ver en la siguiente figura.

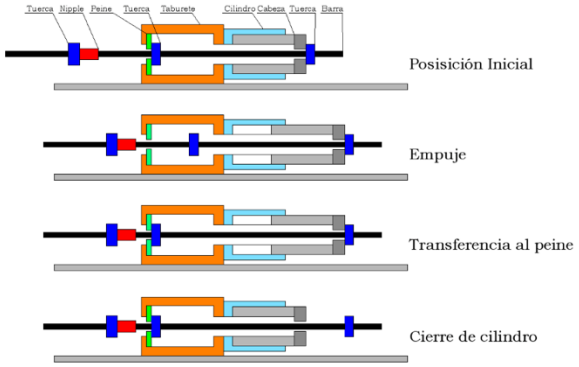


Figura I.17.- Secuencia de trabajo en el empuje de un gato hueco de tiro.

Si se da el caso de que se empuje a favor de pendiente hay que disponer de sistemas de retenida del tablero mediante cables y barras igualmente.

Otro aspecto importante durante el empuje es el control de esfuerzos y deformaciones, pudiéndose reducir por diferentes sistemas según sea la configuración del empuje:

- El primero de ellos mediante nariz de empuje, con una longitud en tableros de hormigón de aproximadamente el 60% de la luz del vano a salvar y con mucha variabilidad en tableros mixtos. En este elemento es muy importante el sistema de conexión con la dovela así como su desmontaje posterior. Este sistema debe llevar incorporado un sistema de recuperación de flecha a parte del canto variable de la nariz, como pueden ser apoyos intermedios regulables en altura o mediante grúas externas.
- El segundo sistema es mediante una torre de atirantamiento que realiza un control de esfuerzos y flechas de manera activa. Su situación en el tablero debe cumplir que quede por detrás de la pila en el momento de máximo voladizo de tablero sobre ella. La altura de la torre de atirantamiento en tableros metálicos oscila entre el 15-25% de la luz máxima del tablero siendo un 40-45% en el caso de tableros de hormigón. Su unión al tablero se realiza mediante una articulación. Este segundo sistema tiene la ventaja sobre el primero de que existe un mayor control en tiempo real y el paso sobre las pilas es más sencillo.

Una vez definidos los elementos necesarios para el empuje e iniciado el mismo, hay que definir los apoyos por los que pasará el tablero así como las guías laterales para asegurar el correcto recorrido del mismo. Los apoyos deslizantes deben permitir el deslizamiento del tablero sobre ellos con los esfuerzos transmitidos durante el empuje con un rozamiento lo más pequeño posible. Para ellos se suele recurrir a apoyos de teflón. Por otro lado el guiado transversal provoca que el tablero se mueva por el camino preconcebido aparte de ser necesario para evitar movimientos o vuelcos, motivados por acción del viento, sismos, etc.

De esta manera se está en condiciones de llegar al final del empuje donde hay que realizar dos operaciones, por un lado el gateo y por otro lado la colocación de los apoyos definitivos.



Imagen I.11.- Torre de atirantamiento del Viaducto de la Miel.

1.2.5.- Tableros empujados de hormigón.

1.2.5.1.- Los tableros de hormigón.

Los tableros empujados de hormigón se caracterizan por tener una sección con poca área y mucha inercia, siendo la más normal la del cajón de canto constante con almas verticales o inclinadas. No son aptas para empujar secciones en Π o losas y poco habituales las vigas artesas.

En cuanto a la luz de los mismos hay que distinguir entre los puentes carreteros donde el rango usual varía de los 35 a los 60 metros y los puentes para ferrocarril en los que se puede llegar a los 70 metros.

La esbeltez de los tableros es de $\left[\frac{1}{17} - \frac{1}{20}\right]$ en los utilizados en carreteras y de $\left[\frac{1}{13} - \frac{1}{17}\right]$ en ferrocarriles. Esta esbeltez hace que sea una tipología muy adecuada para su uso en puentes para ferrocarril.

El tablero de hormigón tiene poco flexibilidad en cuanto a la geometría de empuje, ya que no es adecuado si el trazado en planta tiene una clotoide o si el trazado en alzado está parcialmente en un acuerdo vertical más allá de lo que se pueda regularizar con el balasto en el caso de puentes ferroviarios.

1.2.5.2.- Sistemas de empuje aplicables a los tableros de hormigón.

Como se ha comentado en el apartado anterior es usual realizar el empuje con gatos de fricción, uno en cada alma, donde el recorrido habitual de carrera varía entre los 250 y los 500 milímetros.

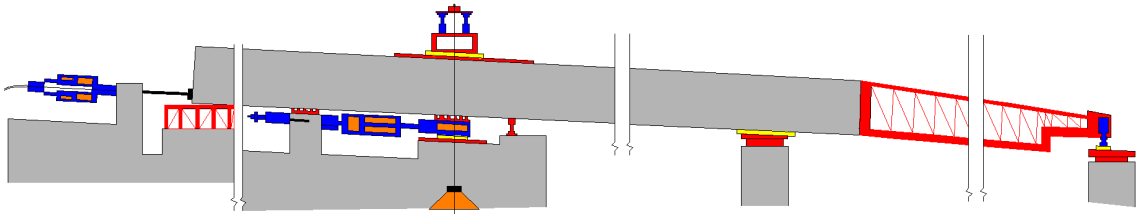


Figura I.18.- Sistemas de empuje en tableros de hormigón (Dragados y Construcciones S.A.)

El empuje con barras en esta tipología está menos extendido ya que su uso se limita a un empuje máximo de 1.000 toneladas y sólo sería posible en longitudes totales de tablero relativamente cortas, aunque sí a través de un sistema mixto.

1.2.5.3.- Aspectos a considerar en el empuje de un tablero de hormigón.

El procedimiento constructivo de empuje condiciona el dimensionamiento del puente, y lo hace hasta tal punto que para poder hacer el cálculo del mismo es necesario conocer los medios que se van a emplear así como el sistema de empuje.

Lo normal es utilizar una nariz metálica en la punta de avance para reducir los esfuerzos de flexión. No es habitual utilizar la torre de atirantamiento reservada para los mixtos. La longitud de esta nariz oscila entre el 50-60% de la luz del vano ya que de ser menores haría una tablero excesivamente sobredimensionado para sus cargas previstas finales y una longitud mayor de la nariz llevaría a una estructura metálica muy costosa.

El dimensionamiento de la nariz se realiza para las dos situaciones más desfavorables por las que va a pasar, la primera justo cuando está en voladizo máximo y por tanto tendrá la máxima flexión negativa y la segunda cuando apoya en la pila aguantando todo el peso del vano y que estará sometida a una flexión máxima positiva. Para ellos la unión entre la nariz y el tablero de hormigón se hace mediante barras pretensadas.

En cuanto al tablero se le someterá a un pretensado en la fase de empuje, su objetivo es resistir los esfuerzos en cada una de las fases de empuje y por lo tanto se va aplicando a medida que se va fabricando y otro pretensado final una vez situado en su posición definitiva.

En cuanto a las pilas, no son elementos que se vean condicionadas por el empuje a no ser que haya problemas con los aparatos de apoyo que pudieran llegar a agarrotarse, de aquí la importancia del control deformacional de las cabezas de pila durante el empuje. Las pilas por otra parte sí que tienen que tener unas dimensiones en las que se puedan colocar todos los elementos auxiliares ya comentados, como son las guías laterales, los gatos de elevación y los apoyos provisionales y definitivos.

Por último los estribos, sólo se verán alterados de su cálculo inicial en el caso de empuje con barras (tiro) ya que han de albergar los esfuerzos correspondientes. En el caso usual de gatos de fricción no sufren variación alguna.

1.2.5.4.- El parque de empuje.

El parque de empuje en el caso de tableros de hormigón se divide en tres zonas:

- Parque de ferralla, zona donde se elabora y pre-monta la armadura de la dovela.
- Parque de hormigonado, en ella se encuentran los encofrados y es donde se hormigona la dovela.
- Parque de empuje, en él están situados los sistemas de empuje descritos.

1.2.6.- Tableros mixtos empujados.

1.2.6.1.- Los tableros mixtos.

Los tableros empujados mixtos se caracterizan por tener una sección metálica durante el empuje, dejando para una fase posterior la colocación de prelosas para hormigonado tanto de la losa superior como el hormigón de fondo de tablero en la zona de momentos flectores negativos. De esta manera se minimiza la masa desplazada durante el empuje por lo que se requieren menores esfuerzos de empuje y consecuentemente unos medios de empuje menos potentes.

Lo expuesto lleva igualmente a secciones en empuje más flexibles y débiles, dándose el caso con bastante frecuencia de tener que hacer rigidizaciones adicionales a torsión así como refuerzos frente a la abolladura.

Esta mayor flexibilidad en lo que se refiere a las secciones empujables hace que el rango de aplicación usual sea entre los 40 y 120 metros, debido también a la capacidad del acero de trabajar parcialmente fuera de su rango elástico, [ALVAR-05].

1.2.6.2.- Sistemas de empuje aplicables a los tableros mixtos.

Como se ha comentado en los apartados anteriores, debido al menor peso movilizado, es usual realizar el empuje con gatos huecos de tiro, uno en cada alma, donde el recorrido habitual de carrera es entre 250-300 milímetros.

1.2.6.3.- Aspectos a considerar en el empuje de un tablero mixto.

El procedimiento constructivo de empuje condiciona el dimensionamiento del puente, y lo hace hasta tal punto que para poder hacer el cálculo del mismo es necesario conocer los medios que se van a emplear así como el sistema de empuje, al igual que pasaba en los de hormigón.

En este caso, todas las secciones están sometidas al momento flector negativo máximo y al cortante y flector máximo positivo en su paso por la pila, lo que obliga a realizar esfuerzos adicionales en el tablero metálico ya que la sección no está cerrada (torsión y abolladura).

Por su lado, al contrario que el anterior, el estribo hay que sobredimensionarlo ya que es desde el que se va a realizar todo el esfuerzo de tiro, aumentando de forma importante las acciones horizontales.

En cuanto a las pilas es normal que haya que reforzarlas, debido al rozamiento sobre ella, en concreto el armado longitudinal. Igualmente al caso anterior, tienen que tener unas dimensiones en las que se puedan colocar todos los elementos auxiliares ya comentados, como son las guías laterales, los gatos de elevación y los apoyos provisionales y definitivos.

1.2.6.4.- El parque de empuje.

El parque de empuje en el caso de tableros mixtos se puede ver muy simplificado ya que las dovelas vienen normalmente de un taller al ser un proceso mucho más industrializado y conseguir mejores resultados en cuanto a corte y soldadura.

De esta manera sí que obliga a que los accesos hasta el parque de empuje estén mucho mejor preparados para facilitar la llegada de los transportes especiales.

1.2.7.- El proyecto de empuje.

1.2.7.1.- Introducción.

Elegido el proceso constructivo y previo a la ejecución del mismo, es necesario elaborar el Proyecto de Empuje, que es el documento definitorio del proceso que a través de los procedimientos constructivos elaborados en obra, garantiza un empuje adecuado.

En el caso de tableros mixtos, las deformaciones previstas en la fase de lanzamiento son de orden decimétrico, mucho mayores que las previstas durante su fase de servicio. Éstas se producen en el extremo del tablero que se está lanzando, punta de lanzamiento, que se encuentra en voladizo.

Las deformaciones en la punta de avance pueden ser en sentido descendente cuando ésta avanza en voladizo o pueden tener sentido ascendente cuando para compensar la flecha anterior se le imponen desplazamientos de forma que en su avance pueda deslizar por encima de las pilas.

En el caso de tableros mixtos puede haber diferentes diseños de su sección transversal, siendo las más habituales las secciones cajón o sección en Π finalizando la losa de compresión en hormigón.

1.2.7.2.- Contenido habitual del proyecto de empuje.

Se trata de un documento guía para que todas las partes involucradas en el proceso de empuje tengan los conocimientos suficientes para realizar el proceso de una forma segura, conociendo los trabajos y condiciones previas necesarias para el empuje así como la secuencia de los trabajos que se han de realizar.

Tiene por tanto una parte donde se definen y dimensionan todos los elementos auxiliares necesarios para el empuje, como son, el sistema de empuje y anclaje, los sistemas de retenida, los sistemas de corrección lateral y bloqueos, los rodones y patines, el sistema de atirantamiento y el sistema de gateo.

Por otro lado, se deben definir claramente todas y cada una de las fases de lanzamiento, pormenorizando cada una de las actividades a realizar por cada una de las partes implicadas, así como un apartado en el que se definen las condiciones necesarias para proceder al lanzamiento de las diferentes fases, por un lado condiciones geométricas y por otro lado las condiciones metereológicas.

Además, define el control geométrico a realizar en el parque de fabricación, por un lado en cuanto a la situación de los patines de deslizamiento y por otro lado la correcta colocación, planta y alzado, de las sucesivas dovelas, de forma que la unión entre ambas sea correcta y dentro de las tolerancias marcadas, es decir, el replanteo correcto de todos los elementos. Todo ello para que una vez iniciado el empuje, éste se realice dentro de los márgenes de seguridad, por ello contiene otro apartado de Control Topográfico durante el empuje.

Para finalizar se suelen adjuntar los anejos de cálculo necesarios que definan todos los puntos anteriores.

1.3.- EL CONTROL GEOMÉTRICO DE ESTRUCTURAS Y SU EVOLUCIÓN.

1.3.1.- Introducción.

El control geométrico de las estructuras es fundamental tanto durante la construcción como en la explotación, tal y como se ha visto en el epígrafe anterior, si bien todo el diseño del plan de control se debe llevar a cabo en la fase de proyecto, ya que es aquí donde la realidad se modeliza y se analiza la viabilidad de dicho modelo, siendo durante su construcción y en la explotación cuando se deben corroborar los resultados

esperados. El funcionamiento inadecuado de una estructura puede traer consecuencias indeseadas, desde accidentes hasta la ruptura de la propia estructura, lo que traducido a términos económicos afecta tanto a los costes directos de los posibles accidentes o incluso al coste de la reconstrucción.

1.3.2.- Esquema de control.

Los controles a los que se somete una estructura durante su etapa de construcción y explotación pueden ser muy variados, pudiéndose diferenciar por un lado en función de la fase en la que se encuentre y por otro lado según la tipología estructural que se pretende controlar.

En la siguiente tabla, se presentan los sistemas más usuales utilizados actualmente, desde los sistemas topográficos clásicos, pasando por los que habitualmente se han utilizado en la realización de las pruebas de carga, los utilizados para medir parámetros que sirvan de base a análisis dinámico hasta los métodos más novedosos utilizados últimamente utilizando las últimas tecnologías.

De este modo, en la siguiente tabla se resumen todas ellas, para la realización de los controles descritos:

SISTEMAS DE CONTROL GEOMÉTRICO DE PUENTES
Métodos Topográficos
Nivelación de Precisión
Estación Topográfica
Sistemas de Posicionamiento Global
Métodos de Lectura Puntual
Comparadores analógico/digitales
Fisurómetros
Métodos de Registro Continuo
Acelerómetros
Transductores Inductivos de Desplazamiento
Galgas Extensométricas
Sensores Geotécnicos
Otros Sensores Ambientales
Nuevas Tecnologías (en desarrollo)
Fibra Óptica
Láser Escáner Estático y Dinámico
Análisis Modal
Termografía

Tabla I.6.- Resumen de los sistemas de control geométrico durante la construcción de puentes.

A la vista de todo lo comentado y de la tabla resumen anterior, los diferentes sistemas de control geométrico que se llevan a cabo durante la construcción de puentes dependen en gran medida del tipo de puente que se pretende controlar, del entorno en el que se lleva a cabo la estructura así como de los medios disponibles. Igualmente, una vez finalizada la estructura en el caso de los puentes o viaductos sometidos a tráfico (carreteras o ferrocarril) se deben someter a una prueba de carga con el objeto de certificar la correcta ejecución y comportamiento de la estructura en funcionamiento.

PRUEBAS DE CARGA, TIPOS Y MÉTODOS
Pruebas de Carga en Obras Lineales (carretera y ferrocarril)
Pruebas de Carga Estáticas
Pruebas de Carga Dinámica

Tabla I.7.- Tipología de los controles geométricos en puentes después de su construcción.

Una vez conocidos los “instrumentos” y la técnica con la que en estos momentos se cuenta para el control de estructuras, y siguiendo con el mismo esquema del apartado

anterior en el que se detallaban las diferentes tipologías de estructuras, en la siguiente tabla, a partir de la descrita por [TARQU-05] se expone de forma resumida la intensidad que se debe dar a este control en función de esa tipología y el proceso constructivo tanto en la fase de proyecto, como en la constructiva o en la de explotación.

PROCEDIMENTO CONSTRUCTIVO DE TABLEROS DE PUENTES

Tipología			Rango luces (m)		Cimbra	Cimbra Autoportante	Grúas con o sin apeos	Viga de lanzamiento	Empujado	Carros con cabestrante	Carros avance
Losa in situ de canto constante	Maciza	Armada	15	20	Normal						
		Pretensada	20	25	Intenso						
	Aligerada	Pretensada	25	35	Intenso	Intenso					
Tableros de vigas	Prefabifcadas	Armada	10	20			Normal				
	Dobles T	Pretensadas	15	45			Normal	Normal			
	Artesas	Pretensadas	15	45			Normal	Normal			
	Metálicas	Dobles T	40	50			Normal				
Losa in situ de canto variable	Aligerada	Pretensada	35	50	Intenso						
Sección Pi in	Canto constante	Pretensada	35	45		Intenso					
Cajón in situ	Canto constante	Pretensado	35	60	Intenso	Intenso			Severo		
Mixtos	Canto constante	Alma llena	60	100			Normal		Severo		
		Celosía	60	150					Severo		
	Canto variable	Alma llena	80	150			Normal		Severo	Intenso	
		Celosía	60	200			Normal		Severo	Intenso	
Dovelas Cajón	Canto constante	Vano a vano	40	55				Normal			
		Empujado	35	50					Severo		
		Voladizos	70	100			Normal	Normal		Normal	
	Canto variable	Voladizos	70	150			Normal	Normal		Normal	
Voladizos in situ	Canto constante	Sección	70	100							Intenso
	Canto variable	Sección	70	300							Intenso
Puentes arco	Tablero Superior		100	500	Severo						
	Tablero Inferior		100	500	Severo						
	Tablero		100	500	Severo						
Atirantados			100	1.000	Severo						
Colgantes			1.000	2.000	Severo						

Tabla I.8.- Calificación del control geométrico necesario durante proyecto, construcción e explotación de puentes.

1.3.3.- Instrumentación y control geométrico del empuje.

El empuje es un proceso vivo que requiere un control ya que pueden alcanzarse situaciones límites durante el empuje que conviene tener controladas. El sistema de control debe particularizarse para cada puente en concreto ya que todos son distintos y cada uno con sus peculiaridades particulares, de forma que se amolde el nivel de control así como la frecuencia de las medidas y tolerancias, a estas circunstancias.

El control geométrico en la construcción de un puente cuyo tablero sea por procedimiento de empuje, requiere dos partes claramente diferenciadas, siendo la primera, el control en el parque de fabricación y la segunda en el empuje en sí mismo.

En el parque de fabricación se debe realizar, previamente al lanzamiento un replanteo en alzado lo más preciso posible, de forma que el proceso posterior no se vea afectado por posibles errores geométricos que pudieran provocar problemas en él, para ello es necesario la utilización de equipos precisos que garanticen precisiones del orden milimétrico.

Durante la fase de empuje, en la que se habrán calculado previamente el peso de la estructura a empujar (para conocer la fuerza de tiro necesaria) y las condiciones meteorológicas (viento y temperatura ambiente) en las que se puede hacer el empuje, hay que conocer las reacciones en los apoyos, las tensiones producidas en la estructura y en los cables de la torre de atirantamiento, así como el movimiento en la cabeza de pilas. Además, y quizás el más importante, sin dejar de serlo los anteriores, es el movimiento en punta de lanzamiento, tanto en su componente vertical como horizontal.

Este movimiento en punta de lanzamiento, tanto en su componente vertical como horizontal, es lo que comúnmente se denomina control geométrico y es fundamental básicamente por dos motivos:

- Control del proceso constructivo: la medida obtenida sobre los desplazamientos reales han de ser de la misma magnitud que los previstos en la fase de proyecto, y dentro de los márgenes allí pronosticados. Si éstos no coincidieran se podría deber tanto a defectos constructivos como a fallos en el proceso de empuje.
- Conocimiento del estado geométrico para la corrección de cualquier desviación que se produzca.

Si se dieran desplazamientos nos esperados, podría significar la sobrecarga tensional de la estructura y por tanto una merma en los márgenes de seguridad de la misma durante vida útil.

Por todo ello, es esencial el control de la curva de deformación de la estructura en su peor sección que es la punta de lanzamiento, control que habitualmente se realiza mediante observaciones con Estación Topográfica y mediante metodologías que se desarrollarán en el capítulo II de esta Tesis Doctoral y que buscan precisiones en el entorno de 1-2 milímetros.

Además del control en la punta de lanzamiento, se debe controlar el movimiento en la cabeza de las pilas, puntos por los que va pasando cada una de las secciones del puente en su camino hacia el estado final hiperestático, y que provoca una deformación horizontal en la cabeza de la misma, deformación que debe estar dentro de los márgenes establecidos. De este modo, en la fase de diseño del empuje, se habrá definido el tipo de almohadilla interpuesta entre la pila y el tablero, de forma que si el coeficiente de seguridad es muy alto en el coeficiente de rozamiento de aquella, el control de la pila no será necesariamente muy intenso pero sí será una pila excesivamente costosa, por lo que lo normal será ir a coeficientes más ajustados que hagan que los movimientos en la cabeza sean más grandes y que conlleve un control geométrico estricto de las mismas de forma que no se sobrepasen los límites de deformabilidad previamente calculados. Este control geométrico se lleva a cabo con el mismo instrumental y metodología topográfica con la que se realiza el control del tablero en la punta de lanzamiento.

1.4.- DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.

Tal y como se ha descrito en epígrafes anteriores, en la construcción de puentes mediante empuje de tableros, bien sean de hormigón o mixtos, se hace necesario llevar a cabo un control geométrico del proceso de lanzamiento del tablero en el que especialmente se hace necesario controlar los sistemas auxiliares necesarios para el empuje, así como el propio tablero y las pilas.

En cuanto a los sistemas auxiliares cabe poco que reseñar desde el punto de vista topográfico, dado que el replanteo de dichos sistemas es algo que hoy día está perfectamente resuelto, incluso con el nivel de exigencia en cuanto a precisión se refiere. Sin embargo durante la fase de empuje se hace necesario conocer el peso de la estructura, condiciones ambientales, tensiones en la estructura y en los cables de la torre de atirantamiento, movimiento en la cabeza de las pilas y sin duda alguna el más importante el movimiento tridimensional de la punta de lanzamiento del tablero.

Precisamente es el movimiento tridimensional de la punta de lanzamiento del tablero, cuando es empujado hacia su posición final, donde se centra la presente investigación, en el contraste del instrumental y metodologías clásicas con las nuevas técnicas de posicionamiento global.

1.5.- MOTIVACIÓN Y OBJETIVO DE LA TESIS.

La motivación de la investigación se justifica en el momento que se valoran las actividades topográficas a llevar a cabo en la fase de empuje del tablero, donde la Estación Topográfica ha tenido tradicionalmente todo el protagonismo de la actuación topográfica. Aunque con la implantación de los Sistemas de Posicionamiento Global, parece que podrían caber otras alternativas, que manteniendo las precisiones en las

determinaciones topográficas, eliminasen una serie de inconvenientes que se producen con la Estación Topográfica, entre los que cabe destacar:

- En las observaciones topográficas es imprescindible la visión directa entre el equipo topográfico y el punto ubicado en la punta de lanzamiento del tablero, para poder observar ángulos y distancias y en base a dichas observaciones obtener el movimiento. Lo que generalmente requiere una buena ubicación "visual" de la Estación Topográfica.
- Las observaciones topográficas están limitadas por las condiciones ambientales y luminosas por la misma razón de intervisibilidad, este factor dificulta y condiciona gravemente la captura de observables, que generalmente repercute en la precisión de los resultados obtenidos, a medida que la observación se aleja de las condiciones óptimas.
- La información que se genera con las Estaciones Topográficas se captura de forma discreta (intervalos de tiempo o de longitud de avance) y aunque su comportamiento se puede modelizar, hay que tener precaución en la interpretación de los resultados y el contraste con el modelo teórico, que suele ser continuo.
- Para garantizar precisiones de orden milimétrico, se requiere tener varios equipos observando simultáneamente y perfectamente sincronizados, esto supone aumentar los costes directos del control geométrico.
- Para garantizar precisiones de orden milimétrico, se requiere disponer los diferentes elementos participantes de la observación de una apropiada geometría, dada la morfología del territorio en la que se suelen llevar a cabo este tipo de estructuras, la situación óptima de observación no siempre es posible.

Con el objetivo de reducir e incluso eliminar estos problemas inherentes a las observaciones realizadas con la Estación Topográfica, y dada la plena implantación que tiene en el ámbito topográfico los Sistemas de Posicionamiento Global, parece lógico proponer un contraste entre los métodos de control geométrico que se pueden llevar a cabo con la Estación Topográfica y GPS, que dilucide la posibilidad de llevar a cabo dichos controles con este instrumental en aras a facilitar el proceso de empuje así como realizarlo de una forma más segura aprovechando las ventajas que la observación GPS ofrece frente a la observación con Estación Topográfica:

- No es necesaria una visión directa entre el observador y el punto a observar, con lo que la ubicación del punto a observar esta menos comprometida.
- No le afectan las malas condiciones meteorológicas o lumínicas.
- La información y datos aportada por el GPS es mucho mayor y además continua, lo que posiblemente permita otro tipos de resultados.
- Se elimina la dependencia del observador ya que el proceso se puede cuasi automatizar aunque se tenga que disponer de más de un equipo.
- Se elimina la dependencia de la geometría de la observación que en muchos de los casos era el problema más insalvable de los métodos clásicos.

El objeto de la investigación por tanto, se centra en la determinación de si el instrumental denominado GPS es apto o no para la realización de controles geométricos en punta de lanzamiento de tableros empujados, analizando las metodologías que se debieran llevar a cabo y como aprovechar integralmente la información adicional que generan estos equipos dado que su registro es prácticamente continuo, pudiendo entonces llegar a eliminar de este tipo de controles geométricos a las clásicas Estaciones Topográficas que aún consiguiendo las precisiones marcadas, exigen una serie de requerimientos que dificultan seriamente su ejecución, llegando incluso a impedir en determinados momentos la fase de empuje de tableros en puentes.

2.- LA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA EN LOS CONTROLES GEOMÉTRICOS EN LA INGENIERÍA.

2.1.- INTRODUCCIÓN A LOS CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE LA INVESTIGACIÓN.

2.1.1.- El conocimiento científico: Ciencia e Investigación.

Para comprender los conceptos fundamentales de la investigación científica se debe comenzar por entender el concepto de *Ciencia*, que abarca todos los conocimientos arraigados y reglamentados por la humanidad, históricamente conservados y transmitidos a través del relevo generacional. La ciencia necesita de la actitud del ser humano, primero para observar y segundo para experimentar, de forma que los conocimientos obtenidos sean organizados a través de diferentes métodos y puedan alcanzar su utilidad global o, dicho de otro modo, que a través de la práctica social sean verificados. La ciencia es la que permite al ser humano analizar e interpretar fenómenos naturales, pudiéndose clasificar de forma básica, tal y como citan numerosos autores, en ciencias empíricas y ciencias formales.

El conocimiento empírico está fundamentado en la experiencia y sirve de base del conocimiento en cuanto a su origen y contenidos del mismo, mientras que el conocimiento formal se basa en el aprendizaje que brinda una escuela o una academia, siendo por tanto un conocimiento organizado, con un método de enseñanza-aprendizaje. El conocimiento científico es una transformación del conocimiento empírico en el que a través de métodos, teorías, leyes, etc. percibe y explica el porqué de las cosas, puede generalizarlas y hacer previsiones.

Sin embargo, el hombre siempre tiene la inquietud de avanzar y progresar, necesitando por ello *investigar* continuamente, generalmente en la búsqueda de nuevos conocimientos que a priori le ayuden a resolver problemas. Estos nuevos conocimientos se consiguen a partir de una serie de actuaciones cuyo conjunto global se denomina habitualmente *Investigación.* La *investigación científica* toma como puntos de partida la ciencia consolidada y el conocimiento preestablecido, siendo un proceso llamado a resolver problemas cotidianos de la sociedad y, por lo tanto, un instrumento necesario para fomentar el desarrollo de los países y por ende el progreso de la humanidad.

La *investigación científica* se desarrolla mediante una serie de técnicas y reglas para llegar al fin deseado, que habitualmente se denomina el *método científico.* A partir de la observación de la realidad y tomando como referencia la teoría ya consolidada, trata de dar soluciones a problemas o cuestiones reales, analizando su eficacia mediante el contraste en experiencias, problemas y hechos reales. Así, el *conocimiento científico* se engendra a través del método científico, que no deja de ser una metamorfosis del conocimiento empírico hacia el conocimiento científico, sancionado por la experiencia y por la comunidad científica.

2.1.2.- El conocimiento: clasificación de los conocimientos.

La clasificación realizada por [ARTIG-01] en su libro "Filosofía de la Ciencia", respecto a los conocimientos puramente teóricos y a los conocimientos experimentales, se encuadra en los grupos detallados en los epígrafes siguientes.

2.1.2.1.- Obtención de conocimientos particulares.

Son los conocimientos adquiridos sobre aspectos muy específicos, cuyos resultados constituyen las bases empíricas para la comprobación y formulación de leyes, modelos y teorías, siendo de gran importancia en el avance del conocimiento. Constituyen el mayor porcentaje de los trabajos de investigación y presentan un carácter acumulativo, de tal manera que, en la mayoría de los casos, los avances del conocimiento se producen basándose en el conocimiento previo y no como consecuencia de una intuición más o

menos genial. Generalmente están basados en la experimentación o en la observación de los fenómenos de la naturaleza.

2.1.2.2.- Formulación de leyes experimentales.

Las leyes son la representación, muchas veces de tipo matemático, de la relación existente entre las variables o magnitudes de la experimentación. Una ley experimental no es una traducción exacta de lo que ocurre en la naturaleza, y cuando se expresa matemáticamente sería más propio hablar de ecuaciones que de leyes. El conjunto de ellas, dentro de una misma disciplina, puede dar lugar a una teoría; otras veces, las leyes se deducen de las teorías formuladas, pero deben ser validadas experimentalmente. Las leyes tienen validez por sí mismas, independientes de la certeza o no de la teoría que las agrupa.

2.1.2.3.- Construcción de modelos experimentales.

Cuando los fenómenos a estudiar son demasiado complejos, se recurre a modelos experimentales simplificados en donde se supone que se encuentran los aspectos más importantes de los mismos, para después, en estudios posteriores, buscar el ajuste del modelo estudiado. En otros casos, cuando la complejidad del sustrato sobre el que se investiga es muy grande o poco estructurada, y ello puede dar lugar a falsear determinadas propiedades que se desean analizar, se sustituye el sustrato por otro más simple que no pueda enmascarar las propiedades iniciales.

2.1.2.4.- Propuestas de teorías marco.

Como su nombre indica, son interpretaciones generales aplicables a muchos fenómenos. Se originan cuando existe un conjunto de leyes que actúan como soporte de la teoría y demuestran la validez de ésta. No son sistemas deductivos y consisten en ideas y explicaciones generales que se van modificando y ampliando con ayuda de teorías específicas. Por lo general, las teorías requieren el empleo de mucho tiempo y un gran esfuerzo de sistematización para su exposición y validez. La formulación de una teoría en sus inicios no es completa y se modifica y amplía en el transcurso del tiempo. Las teorías pueden ser válidas mediante experimentación, denominándose teorías fenomenológicas.

2.1.2.5.- Construcción de sistemas teóricos.

Son sistemas que proporcionan una explicación unitaria de amplios campos del conocimiento y constituyen una novedad importante sobre los conocimientos previos que se tenían. Estos sistemas proporcionan unidad científica y cuando se logran, la disciplina científica puede considerarse que ha alcanzado un buen grado de consistencia y madurez.

2.1.3.- La investigación científica.

La investigación científica es racional desde que todas sus fases están interrelacionadas de inicio a fin y programada porque los propósitos buscados están preestablecidos.

2.1.3.1.- Etapas de la investigación.

Así la investigación, con su empeño y voluntad de aumentar el conocimiento científico y resolver problemas, debe tener un orden programado y preestablecido y, por tanto, necesita inicialmente estudios previos, posteriormente descriptivos (gráficos, representativos) y por último experimentales (empíricos).

Por tanto se puede hablar de diferentes etapas de investigación:

- Una primera etapa considerada como investigación inicial o de campo, en la que el investigador toma contacto directo con la realidad que se pretende investigar, toma de datos, conocimiento del entorno, etc., y por tanto todos los datos

necesarios para poder realizar un análisis previo del problema que se pretender resolver, personas que deben intervenir, coste, entre otros.

- Una segunda etapa considerada como investigación gráfica o representativa, que trata de describir detalladamente características del hecho investigado, así como introducirse en el hecho de conocer las causas que han originado o condicionado el problema en estudio.
- La tercera etapa, empírica, comprueba los efectos del hecho investigado sobre el problema inicial que provocó el origen del estudio de investigación.

2.1.3.2.- Tipos de investigación científica.

La clasificación de la investigación se ha realizado de múltiples formas atendiendo a diferentes autores, pero desde el punto de vista de esta tesis se lleva a cabo según la finalidad perseguida, y parece adecuada una clasificación entre Investigación Fundamental e Investigación Tecnológica, dada la significación actual en el desarrollo de nuevas tecnologías.

- La Investigación Fundamental, también llamada teórica, dogmática, básica o pura: su objetivo es el avance científico, de forma que se incrementen los conocimientos puramente teóricos sin tener un interés de forma directa sobre sus aplicaciones prácticas o en su contraste. Lo hace a través de la formulación de nuevas teorías o incluso modificando las ya establecidas, con el objetivo de constituir generalizaciones cada vez mayores. Es decir, se inicia en el marco puramente teórico y se mantiene en él.
- La Investigación Aplicada, también llamada tecnológica, práctica o empírica: el punto de partida es el mismo que el anterior, el avance científico, pero no con el objetivo de formular nuevas teorías, leyes o hipótesis sino el uso de los conocimientos en el campo de las aplicaciones para la resolución directa de problemas previamente planteados.

2.1.4.- La innovación tecnológica.

La investigación que está al servicio de la sociedad para conseguir la resolución de los problemas que ésta plantea, la materializa bien a través de productos, de instrumental o de procesos, denominados innovaciones tecnológicas. Una vez son aceptadas por ésta, pueden ser primicia o novedad, si es la primera vez que se pone en el mercado, o pueden ser una réplica o imitación, cuando el producto o proceso es puesto en el mercado a través de otra empresa diferente a la que inicialmente lo materializó. Sin embargo, si el mercado no lo admite, se está ante una invención pero no una innovación.

La innovación tecnológica según [SCHUM-78] se define como: *"La innovación es la introducción de nuevos productos y servicios, nuevos procesos, nuevas fuentes de abastecimiento y cambios en la organización industrial, de manera continua, y orientados al cliente, consumidor o usuario".*

Para conseguir el objetivo de innovar, las empresas lo acometen fundamentalmente desde tres frentes:

- A través de la innovación tecnológica, que es sin duda el modo más eficiente ya que no está influenciado por condicionantes externos.
- A través del "know how" de otras empresas o instituciones, adaptando éste, por un lado a las características propias de la empresa que lo intenta implantar, y por otro a las circunstancias del mercado donde se pretende implantar.
- A través de una base documental actualizada de forma que se puedan desarrollar nuevas ideas en las empresas.

Atendiendo a su impacto, y según la mayoría de los autores, las innovaciones se clasifican en:

- Básicas o radicales (disruptivas) que exploran nuevos mercados ya sea en la esfera científica o en las administraciones públicas.
- Incrementales (progresivas) que ocasionan cambios en tecnologías existentes con el ánimo de mejorarlas manteniendo su espíritu inicial.
- Cambios en los sistemas tecnológicos, combinación de las dos anteriores que implementadas en los círculos organizativos dan lugar a mejoras en diferentes ámbitos de producción.
- Cambios en los paradigmas tecnológicos, que son las que han revolucionado históricamente la industria y la tecnología. Ejemplos muy representativos: la máquina de vapor o más recientemente la microelectrónica.

Los requisitos que debe cumplir una innovación para que sea aceptada por el mercado, y poder así transformarse en realidad, son:

- Que satisfaga un problema reclamado por la sociedad.
- Que tecnológicamente se pueda resolver.
- Que económicamente sea viable.

Dicho de otro modo, la innovación ilustra el camino hacia la competitividad. En esta línea, [PORTE-90] afirmó: *"La competitividad de una nación depende de la capacidad de su industria para innovar y mejorar. La empresa consigue ventaja competitiva mediante innovaciones".*

La innovación tecnológica abarca todas las fases científicas, técnicas, comerciales y financieras necesarias para el desarrollo y mercantilización adecuada del nuevo producto, instrumental o procesos. Así, la innovación tecnológica permite encajar en los mercados nuevos o mejorados productos, servicios, procesos productivos, mejora de sistemas principalmente. Aquí es donde surge la obligación de perfeccionar los conceptos de asimilación y transferencia de tecnologías (la innovación está presente en ambos).

2.2.- EL CONTROL GEOMÉTRICO DE PUENTES Y VIADUCTOS.

2.2.1.- Introducción.

El ingeniero civil siempre está implicado en proyectos cada vez más ambiciosos que se traducen en bienestar y mejoras para los ciudadanos, respondiendo así a la demanda y la necesidad de la sociedad. El desarrollo de un país pasa ineludiblemente por el desarrollo de sus infraestructuras. A este respecto la historia pone ejemplos con cualquiera de ellas:

- Las carreteras y ferrocarriles cada vez tienen trazados más estrictos que conllevan:
  - Desmontes cada vez más altos.
  - Terraplenes cada vez más altos.
  - Puentes cada vez más largos.
  - Túneles excavados cada vez en terrenos más complicados.
- Las obras portuarias exigen cada vez diques más profundos.
- Los aeropuertos requieren pistas cada vez más largas sobre terrenos más complicados.

- Los edificios constan cada vez con más plantas y con diseños arquitectónicos desafiantes al cálculo.

La justificación de que la Ingeniería Civil plantea retos cada vez más difíciles es reconocida por todos los profesionales que exigen el cumplimento de esos nuevos modelos de realidad cada vez más precisos, y procedimientos de cálculo más rigurosos, teniendo que sopesar la frontera entre la captación de modelos de realidad precisos y/o necesarios, dado que la tecnología actual permite acometer prácticamente todo lo que se plantee. Pasando al ámbito concreto del control de los puentes y viaductos es esencial, tanto durante su fase constructiva como en la de explotación, si bien todo el diseño del plan de control se debe llevar a cabo en la fase de proyecto, ya que es aquí donde la realidad se modeliza y se analiza la viabilidad de dicho modelo, siendo durante su construcción y en la explotación cuando se deben corroborar los resultados esperados.

El funcionamiento inadecuado de una estructura puede traer consecuencias indeseadas, desde accidentes hasta la ruptura de la propia estructura, lo que traducido a términos económicos afecta tanto a los costes directos de los posibles accidentes o incluso al coste de la reconstrucción.

En este sentido cabe reseñar que durante la construcción y explotación de una estructura se puede y debe controlar (o auscultar) de forma global una serie de parámetros como pueden ser presiones, humedades, temperaturas, etc., aunque la presente investigación se centra únicamente en el control geométrico de estructuras (o auscultación geodésica), en la que mediante observaciones topo-geodésicas se determina si una estructura se mueve o deforma ante una serie de solicitaciones exteriores.

2.2.2.- Los datos.

Los modelos de realidad requieren de una captación de datos que permita la correcta representación de la realidad a simbolizar. Un ejemplo claro son los datos topográficos, datos comunes a toda representación del territorio, que permiten la posterior elaboración del diseño, cálculo y valoración inherentes a todo proyecto en ingeniería. Ahora bien, no son iguales los datos necesarios para representar un terraplén, un viaducto o el control de movimientos (auscultación) de una presa en servicio.

En este caso, los datos topográficos se ponen como ejemplo clásico, pero como se ha dicho anteriormente, en todos los campos del conocimiento hay una serie de magnitudes que conviene repasar antes de entrar de lleno a analizar cada uno de ellos en los siguientes capítulos, y que supone la razón de este trabajo.

2.2.3.- El control geométrico.

La Ingeniería Civil está al servicio de la sociedad a través de sus actuaciones, que en la mayoría de los casos son construcciones con los materiales básicos de la ingeniería y que deben cumplir con varios aspectos de funcionamiento: estéticos, viabilidad económica de afrontarlas, perdurables en el tiempo y con plena seguridad para los usuarios (inamovibles, indeformables y resistentes).

El control geométrico de puentes y viaductos comprende el conjunto de actividades destinadas a conocer su pauta de funcionamiento real, ya sea en un determinado instante como a lo largo de su vida útil. Estas actividades se realizan mediante técnicas cada vez más depuradas de medición y con instrumental específico. Tras este trabajo de campo, con un posterior proceso de tratamiento y análisis de los datos obtenidos, se puede profundizar en el conocimiento de su funcionamiento y así poder tomar las decisiones oportunas para ahondar en la seguridad global de la estructura.

La necesidad de controlar geométricamente o auscultar las estructuras que se llevan a cabo en ingeniería civil nace de la responsabilidad de la humanidad de construir para desarrollar el mundo en el que vive, pudiendo evolucionar y ansiar nuevos retos, pero

garantizando que lo construido cumple una serie de objetivos. En el caso concreto que se desarrolla en esta tesis, el control geométrico de puentes y viaductos debe cumplir los siguientes objetivos mínimos:

- El puente debe ser perdurable, lo que implica que debe mantener sus cualidades a lo largo del tiempo, con una perdurabilidad que depende de la vida útil que se le confiera al mismo.
- El puente debe ser inamovible, máxima del ingeniero, llevada a cabo a través del equilibrio estático. Todas las fuerzas al final "deben llegar al suelo".
- El puente debe ser indeformable, tanto desde el punto de vista del límite de la resistencia del material como del confort del elemento diseñado en el caso de que sea de uso público.
- El puente debe ser resistente, es decir, tiene que resistir las acciones que son susceptibles de ser aplicadas sobre él.

De forma similar a lo que ocurre con otras estructuras, la garantía del correcto funcionamiento de un puente o viaducto depende en primer lugar de un proyecto de calidad, en segundo lugar de una construcción correcta, y tercero, y no menos importante, de un seguimiento de control durante su vida útil, aspecto que se puede denominar como programa de control y seguimiento para un adecuado mantenimiento.

Así, este control y seguimiento, llevados a cabo a través de una auscultación adecuada, permiten un conocimiento profundo del elemento estructural y poder compararlo con el estudio de partida, comprobando que se cumplen los requisitos establecidos previamente en los modelos de simulación de comportamiento, válidos por tanto en todas las fases aquí establecidas, y por qué no, para mejorar los modelos inicialmente establecidos y afinar en las técnicas experimentales.

Las magnitudes medidas en los puentes y viaductos con el instrumental actual son principalmente: las distancias (flechas y asientos), los ángulos, las aceleraciones y vibraciones así como las deformaciones unitarias. Magnitudes que se consiguen a través de sistemas de auscultación por métodos geodésicos y geotécnicos. Independientemente de la magnitud a modelizar, la estructura general de la modelización sigue el siguiente esquema:

- *Primera fase: Conocimiento del Medio – Toma de Datos – Elaboración de Proyecto.* Todo proyecto de ingeniería, en base a lo anteriormente explicitado, tiene en común dos tipos de datos por el mero hecho de que los esfuerzos tienen que llegar al terreno, el primero el conocimiento de la geometría del terreno y el segundo el conocimiento de las características de éste.
- *Segunda fase: Construcción de lo diseñado.* Estos datos materializados en el proyecto deben prestar su marco de referencia al estudio, construcción y servir de base para la vigilancia y control.
- *Tercera fase: Control de lo construido.* La observación de obras durante y después de su construcción permite comprobar los resultados del cálculo, fijar su comportamiento y tomar las medidas correctivas oportunas, en caso de riesgo importante. Estas observaciones siempre podrán ser aplicadas al diseño de futuras estructuras, suministrando la información suficiente para optimizar los recursos disponibles.

Todos estos controles se plasman a través de los *informes de auscultación*, documentos que agrupan los datos históricos de la estructura y que a través de ellos se puede predecir el comportamiento que podría tener en un futuro. El contenido del informe, independientemente de que habrá que adaptarlo a cada tipología, puede tener el siguiente contenido:

- Memoria, en la que se analizan todos los datos frente al comportamiento teórico del puente o viaducto.
- Anejo correspondiente a la toma de datos así como ensayos que se hayan realizado.
- Anejo con el modelo de cálculo aplicado, ya sea estadístico, determinista o mezcla de ambos, de forma que se puedan contrastar las magnitudes medidas con las estimadas en el cálculo.
- Conclusiones y recomendaciones a la vista de los resultados obtenidos (programa de lecturas, programa de alarmas, etc.).
- Documento gráfico con los planos, situando los diferentes equipos e instrumental necesario en la auscultación.

2.2.4.- Sensores y/o instrumental de auscultación.

El conocimiento del instrumental y los métodos o técnica de medición existentes para realizar la medida de los diferentes observables necesarios para llevar a cabo modelos de realidad es fundamental en la Ingeniería Civil, ya que en todos sus proyectos el ingeniero hace realidad su conocimiento de las disciplinas vinculadas a la propia Ingeniería Civil, utilizando procedimientos de cálculo en los que siempre interviene el modelo de realidad como condición fundamental o hipótesis de cálculo y, por tanto, condicionando los resultados finales.

Así, para efectuar las medidas de las diferentes magnitudes utilizadas (y necesarias), es importante saber los medios y dispositivos con los que se cuenta para poder realizarlas, así como la precisión que ofrecen y, por lo tanto, tener capacidad para poder elegir los más adecuados en cada momento en función del fin que se pretenda conseguir. Es fundamental discernir en cada momento la precisión necesaria y con qué instrumental se puede conseguir o, expresado de otro modo, no utilizar un aparato extremadamente preciso (y casi siempre caro) cuando el exceso de precisión no aporta valor añadido ni es necesario.

La investigación desarrollada en la presente tesis doctoral "*Contraste metodológico e instrumental en el control geométrico de puentes por empuje de tablero durante su construcción*" se centra precisamente en el contraste de un instrumental y una técnica de observación que en su caso facilitaría enormemente el proceso de control geométrico durante la construcción de este tipo de viaductos, asumiendo que la investigación aplicada o tecnológica se trasformaría rápidamente en una innovación tecnológica en el ámbito empresarial debido a las ventajas del sistema.

2.2.5.- La auscultación geodésica.

2.2.5.1.- Marco referencial.

Las auscultaciones geodésicas de forma general posibilitan la captación, mediante el instrumental adecuado, de pequeños movimientos que interpretados adecuadamente arrojan una información importante sobre el estado tensional y deformacional del sólido a controlar, habitualmente en ingeniería civil, estructuras y suelos.

Cabe reseñar que en el ámbito topo-geodésico era habitual separar el aspecto planimétrico del altimétrico, dado que tanto el instrumental como la metodología empleada en ambos casos era diferente, es decir, por un lado se observaba y procesaba lo planimétrico y por otro lo altimétrico. El instrumental objeto de contraste en la presente investigación se caracteriza porque obtiene directamente información tridimensional, lo que evita un segundo instrumental y otra metodología, lo que refuerza la tesis de que esta investigación puede ser rápidamente asumida por el sector profesional, en caso de ser positiva, convirtiéndose rápidamente en una auténtica innovación tecnológica.

2.2.5.2.- Auscultaciones geodésicas planimétricas.

Las auscultaciones geodésicas planimétricas que se llevan a cabo en la actualidad se caracterizan porque en el caso de puentes y viaductos son elementos lineales y sólidos rígidos; por lo tanto, la disposición más coherente es la que sitúa los puntos de control a lo largo del mismo y en las secciones críticas. Así se obtienen observaciones topográficas robustas ya que se pueden hacer observaciones en red, de forma que mediante análisis posteriores y procedimientos matemáticos y estadísticos sencillos, consiguen precisión en la delimitación de su posición.

Las auscultaciones geodésicas planimétricas tienen una dependencia muy relevante de la geometría dispositiva en la que se encuentren los puntos que se pretende controlar del puente o viaducto y el lugar donde se ubica el instrumento de medición. Aún así, el procedimiento general para realizar auscultaciones geodésicas ha ido variando a lo largo del tiempo a medida que han evolucionado los sensores con los que se obtiene la información geométrica, pudiendo reseñar en este sentido los siguientes procedimientos generales:

A.- Mediante observación angular.

Para realizar una observación angular adecuada se precisa de una red de pilares ubicados fuera de la zona de influencia del hipotético movimiento, una red de dianas ubicadas a lo largo de la estructura que se pretende controlar, una serie de puntos externos que permitan determinar la estabilidad de los pilares y un teodolito de precisión. La idea es que con el teodolito estacionado en cada pilar (mínimo dos y máximo cuatro) se realizan observaciones primero a los puntos de seguridad para garantizar que los pilares no se han movido entre campañas de observación y después a las dianas ubicadas en la estructura a controlar.

La observación es muy lenta, conlleva personal altamente cualificado, existen factores externos que condicionan la precisión y no se consigue información en tiempo real, tan necesaria especialmente en el proceso de construcción de la estructura.

B.- Mediante observación distanciométrica.

Los requerimientos son muy parecidos a los descritos en el epígrafe anterior, salvo que en este caso en vez de utilizar un teodolito de precisión es necesario un distanciómetro de precisión con el que observar distancias en vez de ángulos. La base y procedimiento de cálculo también son muy parecidos al caso angular, pero también tiene las mismas dificultades con lo que el desarrollo de un nuevo instrumental y técnica sería muy interesante para la evolución tecnológica de las auscultaciones geodésicas.

C.- Otras posibilidades.

Cabe reseñar que con los avances tecnológicos acaecidos en los últimos años y la irrupción en escena de otros sensores, se ha generado una serie de investigaciones centradas en otras alternativas instrumentales como son la fotogrametría terrestre, láser escáner, incluso los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS), pero que en ningún caso se tiene constancia de investigaciones centradas en el contraste de tipología de estructura y proceso constructivo como el que se plantea en la presente investigación.

2.2.5.3.- Auscultaciones geodésicas altimétricas.

Dada la importancia del componente vertical del movimiento en este tipo de determinaciones y como auscultación completamente independiente de la planimétrica, está la auscultación altimétrica, que se caracterizada por utilizar un instrumental y una metodología totalmente diferentes de la planimétrica, en la que nuevamente existen dos alternativas para su ejecución.

A.- Mediante nivelación geométrica.

Se desarrolla generalmente mediante el cierre de anillos a lo largo del puente o viaducto observados con niveles electrónicos y pasando por los puntos de control estratégicamente dispuestos en la estructura, realizando las pasadas de forma múltiple para obtener duplicidad de datos y por tanto minimizar el error mediante técnicas matemáticas y estadísticas.

Los resultados obtenidos actualmente en cuanto a precisiones son plenamente satisfactorios, pero la observación es muy lenta, conlleva personal altamente cualificado, existen factores externos que condicionan la precisión y no se consigue información en tiempo real, tan necesaria especialmente en el proceso de construcción de la estructura.

B.- Mediante nivelación trigonométrica.

Se lleva a cabo mediante observaciones realizadas con estación topográfica, medida de ángulos y distancias, y generalmente se observa desde fuera de la estructura a una serie de puntos ubicados en la estructura. Aunque el instrumental y los requerimientos son muy diferentes, la técnica está muy consolidada, aunque no por ello deja de tener las mismas dificultadas que la nivelación geométrica.

2.2.5.4.- Aportación de la investigación a las auscultaciones geodésicas.

Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente, si el instrumental objeto de contraste en la presente investigación superare las pruebas que confirmen la idoneidad de su uso, la aportación de esta tesis a las auscultaciones geodésicas o controles geométricos de puentes construidos por empuje de tablero sería inmediata, y consistiría en el desarrollo de una nueva técnica de observación que con GPS permitiese la sustitución de las clásicas y complicadas auscultaciones geodésicas planimétricas y altimétricas que se vienen haciendo históricamente en la construcción de puentes empujados por una única técnica que reportaría los mismos resultados pero con un único instrumental y una única metodología, con todo lo que ello conlleva en cuanto a rendimientos y costes económicos.

3.- MARCO INVESTIGADOR APLICADO AL DESARROLLO DE LA TESIS.

3.1.- JUSTIFICACIÓN Y OBJETO.

La investigación está conformada por una serie de pasos que se deben cumplir de forma rigurosa para llegar al objetivo pretendido, y que según [BEHAR-08] son los siguientes:

- Introducción.
- Justificación del estudio.
- Planteamiento del problema.
- Objeto de la investigación.
- Exposición de la hipótesis.
- Fundamentación teórica.
- Metodología de la investigación.
- Procesamiento de la investigación.
- Presentación y discusión de resultados.
- Conclusiones.
- Bibliografía.

En este caso, se trata de una investigación experimental, y como tal, la experiencia ocupa un lugar notable, sin dejar de lado el conocimiento teórico al respecto. Así se pueden distinguir dos procesos en esta actividad científica, el primero en un sentido que es la base de conceptos, propiedades, relaciones, teorías y leyes, y el segundo en sentido contrario consistente en comprobar estas teorías y leyes a partir de datos experimentales.

Como ya se ha referido anteriormente, la investigación de la realidad, en sí denominado *objeto científico*, se realiza a través de modelos que tratan de simular el comportamiento y acercarse lo más posible a él, eligiendo conceptos que definan los aspectos importantes del objeto científico y no tanto los aspectos secundarios del mismo, de forma que permitan su estudio a través de experiencias controladas. Ahora bien, el objeto del estudio debe estar adecuadamente delimitado de forma que la investigación sea concreta en objetivos y no sea excesivamente ambiciosa y con alta probabilidad de fracaso.

Por su lado, las hipótesis son el enlace entre la teoría y la investigación, y se pueden desarrollar desde diferentes puntos. El trabajar con hipótesis proporciona al investigador una serie de ventajas, minimizando los riesgos de fracaso. La fundamentación teórica se podría definir como el *apoyo conocido sobre la realidad que se quiere estudiar (estado del arte).* Basarse en estos conocimientos previos ayuda a elegir el camino correcto en la investigación, a discernir las posibles rutas de error y a marcar nuevas rutas de investigación.

3.2.- EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.

El investigador tiene como labor esencial reconocer el problema de investigación para poder discernir qué y porqué se va a investigar. Reconocer el problema, sus particularidades, sus límites, sus condiciones de contorno, etc., establecen los supuestos metodológicos para un tratamiento eficiente del problema que se va a emprender científicamente.

El autor [BUNGE-04] lo identifica de la siguiente manera: *"Un problema de investigación es una dificultad que no puede resolverse automáticamente, sino que requiere una investigación conceptual o empírica. Es el primer eslabón de una cadena: problema - investigación - solución".*

Además debe ser perdurable en el tiempo, original (que no haya sido tratado por otras investigaciones) y amplio socialmente, de forma que tenga interés real y general. Por otro lado, debe estar lo suficientemente acotado para que el investigador se pueda ceñir a un ámbito espacial, temporal y teórico concreto.

La investigación debe estar pautada por objetivos, que son hitos que determinan el progreso de la investigación. Éstos deben ser claros, de forma que se minimicen las hipotéticas desviaciones y además deben ser realistas.

El establecimiento de objetivos debe ser coherente con la selección del problema que se haya establecido, debiendo de ser concisos, claros y concretos, y ser establecidos por el investigador de forma realista. Además, se debe guardar una relación mínima entre el título de la investigación y la hipótesis del trabajo.

3.3.- EXPOSICIÓN, PLANTEAMIENTO Y REPRESENTACIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.

3.3.1.- Concepto.

El investigador tiene como primera labor plantear adecuadamente el problema que se pretende resolver, ya que con ello se habrá conseguido un gran paso hacia el objetivo. Así, [TORRE-07] lo expresa del siguiente modo*: "Plantear el problema de investigación, significa orientar previamente la correcta formulación de los objetivos e hipótesis, diseñar los instrumentos para recolectar la información, establecer las técnicas y procesos metodológicos a utilizarse. Si el problema no está bien planteado se formularán objetivos e hipótesis incorrectas e incoherentes, se seleccionarán instrumentos poco útiles para captar y procesar la información requerida, en consecuencia, se obtendrán conclusiones inconsistentes e impregnadas de los errores indicados anteriormente".*

Esto requiere tener un profundo y objetivo conocimiento del problema de investigación. Además, para evitar indeterminaciones, ha de estar perfectamente acotado y justificado.

3.3.2.- Presentación del problema de investigación.

Toda investigación comienza con la presentación del problema que posteriormente se trata de resolver, trabajo que no siempre es sencillo. Esta formulación normalmente se realiza con el planteamiento de diferentes preguntas que son las que luego se responden. Si estas preguntas son adecuadas y concisas, se facilitará parte del éxito para llegar mediante metodologías pautadas a la resolución del problema. Ahondado en este ámbito, al tratarse de una investigación científica, al formular el problema hay que tener en cuenta que las variables que intervienen deben ser contemplables, medibles, examinables e interpretables.

3.3.3.- Argumentación del trabajo de investigación.

No hay que olvidar que la investigación tiene un fin que se debe explicar. Se ha comentado en párrafos anteriores que la investigación es un proceso llamado a resolver problemas cotidianos de la sociedad. Por lo tanto hay que argumentar la conveniencia, la utilidad, los beneficios y el alcance de los resultados obtenidos por la investigación, tanto para la sociedad como en el aspecto del aporte que suponga para la sociedad científica.

3.4.- DELIMITACIÓN TEÓRICA A TRAVÉS DEL ESTADO DEL ARTE.

La delimitación teórica no hace sino encuadrar los límites de las teorías, leyes, teoremas e hipótesis existentes, que conducen y dan soporte de forma teórica a dicha investigación.

Por otro lado, si para el problema en cuestión se selecciona toda la información que al respecto se conoce y que revela todo el progreso en investigaciones previas, se está ante un nuevo concepto, conocido como *estado del arte,* pilar fundamental del marco teórico.

Esta delimitación teórica usualmente se complementa a las referidas teorías, leyes, teoremas e hipótesis, con información estadística por un lado y con información empírica primaria o directa, adquirida a través de entrevistas, encuestas, ensayos, etc., pero casi siempre en contacto directo con el problema a investigar y con una muestra suficientemente representativa.

3.5.- EXPOSICIÓN DE LA HIPÓTESIS.

La hipótesis, proveniente del latín hypothĕsis, es una propuesta que ha sido enunciada a partir de la toma de datos e información, que puede no estar corroborada, y que vale para argumentar de modo alternativo un problema con base científica. Una hipótesis puede utilizarse como una propuesta provisional que incluso no se persigue demostrar rigurosamente, y que su veracidad dependerá en la medida en que los datos empíricos apoyen lo afirmado en la hipótesis, o puede ser un pronóstico que el propio método científico debe verificar.

Una hipótesis de investigación simboliza un componente esencial en el proceso de investigación. Tras exponer un problema, el investigador enuncia la hipótesis que guiará el proceso y facultará obtener conclusiones precisas y puntuales. Una hipótesis precisa, específica y clara, puede ser el camino que ha de seguir la investigación, ya que constituye el contorno de la misma, ayuda a ordenar las ideas y encauza el proceso del problema en cuestión. Por tanto, se puede decir que las hipótesis son el eslabón entre la teoría y la práctica. Además, si la hipótesis es correcta puede ser viable:

- Alcanzar el objetivo marcado en la investigación.
- Elegir el tipo de investigación acorde al problema expuesto.
- Elegir el método, los instrumentos y las técnicas de investigación conforme al problema a resolver.
- Elegir los recursos, tanto humanos como materiales, necesarios para concluir de forma satisfactoria la investigación diseñada.

Las hipótesis planteadas en la investigación científica deben tener una serie de características:

- Deben apuntar a situaciones reales.
- Tienen que ser inteligibles, claras, evidentes, concretas y estar bien definidas.
- La relación entre variables propuestas por una hipótesis debe ser clara y posible.
- Los términos de la hipótesis y la relación entre ellos, han de poder ser observados y medidos.
- Las hipótesis deben estar relacionadas con técnicas disponibles para probarlas.

3.6.- METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.

3.6.1.- Introducción.

El éxito de la investigación depende en gran medida de la claridad en el planteamiento de objetivos, así como de la estructura metodológica elegida.

El método científico, estricto en cuanto a su pauta de trabajo y que tiene como objetivo corroborar con la experiencia lo enunciado por leyes e hipótesis, debe hacerse a través de un método adecuado. Para ello, se distinguen entre los métodos inductivos que lo hacen desarrollando la teoría y los métodos deductivos que lo que tratan es de analizar aquellas mismas teorías. Otros autores clasifican los métodos científicos según la tipología de las variables a investigar, así [BEHAR-08] lo explica conforme a la siguiente tabla:

INVESTIGACIÓN CUANTITATIVA	INVESTIGACIÓN CUALITATIVA
Recoge información empírica (de cosas o aspectos que se pueden contar, pesar o medir) y que por su naturaleza siempre arroja números como resultado. Galileo Galilei afirmaba en este sentido: *"mide lo que sea medible y haz medible lo que no lo sea".*	Recoge información de carácter subjetivo, es decir que no se perciben por los sentidos, como el cariño, la afición, los valores, aspectos culturales. Por lo que sus resultados siempre se traducen en apreciaciones conceptuales (en ideas o conceptos) pero de la más alta precisión o fidelidad posible con la realidad investigada.
Termina con datos numéricos.	Termina con datos de apreciaciones conceptuales.
Es fuerte en cuanto a la precisión del fenómeno mismo pero es débil en cuanto al papel del contexto o ambiente en la generación de esos datos.	Débil en cuanto a la precisión acerca de los datos pero fuerte en cuanto al papel del ambiente que genera el fenómeno investigado.

Tabla I.9.- Connotaciones de la investigación cuantitativa y cualitativa.

Así, existen diferentes métodos de investigar, y se exponen a continuación los más usuales en relación con esta tesis, de forma que el objeto científico se pueda estudiar a través de experiencias controladas.

3.6.2.- Método lógico-deductivo.

En este método se aplican los principios descubiertos a casos particulares a partir de la vinculación de juicios. El papel de la deducción es doble:

- El primero consiste en encontrar principios desconocidos a partir de los conocidos. Una ley o principio puede reducirse a otra más general que la incluya.
- El segundo también sirve para descubrir consecuencias desconocidas de principios conocidos. La matemática es la ciencia inductiva por excelencia: parte de axiomas y definiciones.

3.6.3.- Método Inductivo.

El método inductivo concibe leyes una vez observados los hechos que se tratan de estudiar, universalizando el comportamiento examinado. Tiene un matiz, y es que este método se considera válido mientras no se encuentre ningún caso que no cumpla el modelo propuesto por [LATOR-03].

Este método se basa en la reiteración de experimentos, es decir, se admite que diferentes experimentos realizados en momentos diferentes, pero bajo las mismas condiciones, producen los mismos resultados. Sin embargo, no se puede extrapolar hasta el punto de que de un experimento concreto se puede constituir una teoría general, pues sería como adoptar que no se pueden dar resultados diferentes en el ámbito general de dicha teoría, argumento no lógico pues se estaría entrando de lleno en el determinismo, no admitido en la sociedad científica actual.

Este método hace corresponder inducción a extrapolación, aspecto socorrido en el ámbito experimental, si bien es cierto que no se ratifica continuamente. Es decir, se puede concluir que mediante la inducción continua se puede tener una recopilación de referencias experimentales que cimentarían "leyes científicas" según el sentido común; sin embargo, sin un sustento sólido científico. En ciencias experimentales se emplea conjuntamente con el método hipotético-deductivo.

3.6.4.- Método hipotético-deductivo.

El método hipotético-deductivo consta de diferentes fases, en una primera ha de observarse el hecho que se trata de estudiar, en una segunda hay que desarrollar una hipótesis a través de la cual se pueda explicar el hecho, para posteriormente extraer

conclusiones básicas de dicha hipótesis y así finalmente contrastarlos con experiencias reales.

Puede ocurrir que el hecho que se trata de estudiar esté próximo al nivel de observación y entonces las hipótesis a desarrollar serían empíricas. Por otro lado, si el hecho estudia temas más complejos, las hipótesis serían teóricas.

Según [ARTIG-01] existen cinco criterios para juzgar la validez de las hipótesis generales, aplicables tanto a las hipótesis próximas a la experimentación como a las de elevado nivel teórico:

- El poder explicativo. La capacidad de ciertas hipótesis para dar solución a ciertos problemas planteados con los datos disponibles en ese momento, puede generar la admisión de dichas hipótesis, cuya demostración empírica se formaliza posteriormente.
- El poder predictivo. Si de una hipótesis se deduce una determinada consecuencia, puede decirse que la hipótesis predice y explica dicha consecuencia. Este criterio es especialmente importante cuando se trata de predicciones antes desconocidas.
- La precisión de las explicaciones y las predicciones. Este criterio refuerza a los dos anteriores, ya que en la ciencia experimental el progreso se debe en buena parte a la exactitud de los cálculos y comprobaciones.
- La convergencia de pruebas variadas e independientes. Este criterio refuerza la fiabilidad de ciertas hipótesis o teorías que, sin estar justificadas empíricamente, permiten dar solución a problemas planteados con los datos disponibles en ese momento.
- El apoyo mutuo entre las teorías. Es una buena prueba de validez para determinadas hipótesis, en las que todas las teorías se entrelazan formando una red, en la cual las comprobaciones de algunas consecuencias experimentales refuerzan la validez de todo el conjunto.

3.6.5.- Método experimental.

Este método verifica y evalúa los cambios sobre una situación dada en la que varía una causa del entorno y se mantienen el resto de causas inalteradas. Lo que se pretende además es que el experimento esté controlado, para lo cual se modifican una o varias variables de forma controlada de forma que se puedan medir los efectos producidos por dichos cambios.

Las fases del método experimental, coincidentes a diversos autores son:

A.- Observación.

B.- Formulación de hipótesis.

C.- Verificación de hipótesis.

D.- Enunciación de la ley.

3.6.6.- Otros métodos.

Existen otros con menos relación con esta tesis, de forma que el objeto científico se pueda estudiar a través de experiencias controladas:

- Método histórico – lógico.
- Método investigación- acción.
- Método etnográfico.
- Etnometodología.

- Método fenomenológico.
- Método sintético analítico.
- Método hermenéutico.
- Método biográfico.

3.7.- UNIVERSO, POBLACIÓN Y MUESTRA.

3.7.1.- Introducción.

Normalmente, durante una investigación, no es posible analizar o examinar todos y cada uno de los elementos participantes a los que se refiere el problema, sino que lo lógico es estudiar un grupo de los mismos de forma que los resultados que se obtengan se generalizan al total. Esta técnica se denomina según la mayoría de los autores como *inferencia estadística*. Para ello es necesario que este grupo elegido sea representativo del total, es decir que el número de ellos con respecto al total sea adecuado así como la forma en las que éstos se seleccionan.

3.7.2.- Requisitos de una muestra adecuada.

Una vez que se llega a la conclusión de realizar la investigación sobre una muestra por imposibilidad real de estudiar sobre la población, y como fracción representativa de ésta, la muestra debe cumplir con los siguientes requerimientos:

- La muestra debe tener idénticas propiedades y características que la población.
- La muestra ha de estar sujeta a unas reglas de selección, de forma que sea adecuada en cantidad y calidad y, por tanto, realizada la selección conforme a procedimientos estadísticos adecuados.
- La muestra debe ser proporcional a la dimensión de la población.
- El error muestral, definido por las leyes estadísticas, ha de estar dentro de los límites establecidos, ya que es el que determina la precisión de los resultados. Éste se podría definir como la máxima diferencia aceptable entre el valor de la variable conseguido de la muestra y el valor real de la variable en el universo.
- Estar dentro del coeficiente de confianza de la estimación establecido para la investigación.

3.8.- VARIABLES.

Las hipótesis se componen de diferentes variables, que son propiedades, particularidades, y/o magnitudes de un hecho o de un objeto que puede tomar diferentes valores.

El trabajo científico tiene como propósito identificar las relaciones entre las diferentes variables así como cuantificarlas. Esto se traduce, en que una vez establecido el objeto de estudio de la investigación, explicado anteriormente, de forma concisa y científica, el investigador tiene que ilustrar dicho objeto.

La clasificación de las variables más común es:

- Variables independientes que manifiestan las causas del fenómeno (factores que explican un fenómeno científico).
- Variables dependientes que manifiestan las consecuencias del fenómeno (resultados del fenómeno que se está investigando).

3.9.- TOMA DE DATOS. INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN.

Una vez abordada la parte más teórica de la investigación, y como tal investigación científica tratada en esta tesis, la parte empírica y, por ende, la toma de datos es fundamental. Ahora bien, si importante es la toma de datos, más importante es la

planificación previa de la misma, de forma que se optimicen los recursos para tomarlos de forma que la calidad de los mismos sea máxima.

La investigación requiere de un dominio de las diferentes técnicas de toma de datos, ya que guían al contraste del problema inicialmente planteado. Estas técnicas dependerán en gran medida del tipo de investigación que se esté llevando a cabo y cada técnica lleva aparejada los instrumentos y medios necesarios.

3.9.1.- Etapa inicial.

En esta fase previa, en la mayoría de los casos se procede a realizar una recopilación a través de la bibliografía existente así como lo publicado sobre el tema objeto de investigación. Así, las fuentes de información son libros, revistas científicas, revistas tecnológicas, congresos y resúmenes anuales, principalmente.

La experiencia, en esta fase, aboga por fomentar la capacidad creativa del investigador, intentando siempre dar valores añadidos tras la reflexión sobre el objeto de la investigación, con apoyo en los análisis que se puedan realizar sobre el trabajo realizado previamente por otros investigadores. Este es el camino para el desarrollo de un plan, plan inicial, que plasme ambas ideas, por un lado las que otros investigadores hayan aportado, y por otro lado las de nueva aportación por el investigador.

Ahora bien, para este esfuerzo realizado con las formas de trabajo actuales, en las que lo habitual es formar parte de grupos de investigación, es aconsejable llevar a cabo una puesta en escena y posterior discusión con el grupo, en la que principalmente los investigadores con más experiencia opinarán acerca del planteamiento así como de sus posibles puntos de mejora. Una vez realizada esta discusión y planteados los puntos de mejora, comienza la fase de búsqueda de información bibliográfica, explicada en el siguiente apartado.

3.9.2.- Compilación y verificación bibliográfica.

Es esta fase, se trata de buscar, localizar, identificar, seleccionar, ordenar, analizar, asimilar y en definitiva organizar toda la información existente acerca de un problema de investigación. El conocimiento de toda esta documentación es importante ya que el investigador no debe repetir un trabajo previamente realizado, y paralelamente ser consciente de todo lo que otros investigadores han realizado al respecto de dicha investigación. De esta manera se podrán aportar ideas novedosas, así como conocer qué técnicas y métodos han empleado otros investigadores ante problemas e investigaciones similares.

Con toda la información procesada se debe hacer un análisis crítico y objetivo, de forma que se extraiga la esencia para no cometer dos errores: por un lado quedase con información sesgada o tendencias interesadas que pueden tener algunos textos, y por otro lado evitar copias y refundidos. De aquí la importancia de hacer una recopilación de información de calidad, con fuentes de información fidedignas que, en el caso de revistas especializadas, algunos autores recomiendan que tengan revisión previa de los artículos. En cuanto a la cantidad de información necesaria, como no puede ser de otra manera, va a ser muy variable en función de la investigación que se vaya a realizar, del objetivo de la misma, del área en el que esté encuadrada, de los medios disponibles, etc.

Normalmente el investigador dispone de una base de datos personalizada para cada problema de investigación y actualizada a la vez que existan publicaciones. Si esta base de datos no existe, el investigador debe realizar un recorrido por la bibliografía existente, pudiendo hacerlo a través de los resúmenes informatizados (abstracts) o a través de las bases de datos informatizadas. En cuanto al ámbito temporal de búsqueda va a depender en gran medida del área en la que se sitúe la investigación, no siendo lo mismo para una investigación histórica que para una investigación de ciencia muy dinámica, donde el ámbito no debe ir más allá de los 5 ó 10 años.

Una adecuada asimilación de la información compilada requiere de una profunda reflexión y análisis de la misma, para realizar una estructuración de la misma y posterior programación de los trabajos a realizar.

3.9.3.- Compilación de datos e instrumental.

Las diferentes técnicas de recopilación de datos reconocidas en investigación son fundamentales para que ésta sea exitosa, ya que ayudan a corroborar el problema objeto. Las técnicas varían en función del tipo de investigación y cada técnica utiliza instrumentos diferentes. Aún siendo diferentes las técnicas y los métodos empleados para observar, los resultados finales con pretensión de éxito van a depender de una elección adecuada en dichas técnicas.

Según [BEHAR-08] se clasifican las técnicas de recolección de datos en:

- La entrevista.
- La encuesta.
- El cuestionario.
- La observación.
- El diagrama de flujo.
- El diccionario de datos.
- Las escalas de medición.
- La escala Likert.

Ahora bien, más concretamente en la investigación científica y en relación con el objeto de esta tesis, la recopilación de datos conlleva una buena selección del instrumento de medición, que el empleo del mismo sea correcto y que posteriormente, mediante el trabajo de gabinete con las mediciones obtenidas, se pueda llegar a las conclusiones adecuadas.

Los requerimientos que se le deben exigir, tanto al instrumento utilizado para la toma de datos como a las mediciones obtenidas, es que sean fidedignos en el sentido de que realizadas éstas sobre un mismo hecho siempre arrojen el mismo resultado, y que sean válidas en el sentido de que se obtengan las precisiones pretendidas.

Tanto en la elección del instrumento adecuado como si decide la invención de uno nuevo para el objeto pretendido, las fases a seguir son:

- Relación de variables a examinar.
- Comprensión del concepto teórico de dichas variables.
- Conocimiento exhaustivo del instrumental que se va a utilizar (utilidad, precisión, manejo, etc.).
- Proceso de medición de cada variable.
- Organización de los datos obtenidos de cada variable.
- Programa previo de pruebas del instrumental.
- Ajuste del instrumental tras los resultados de las pruebas realizadas sobre el instrumento al objeto de la investigación a realizar.

3.10.- PROCESADO DE LA INFORMACIÓN.

En esta fase es donde se comienza a vislumbrar si la investigación llegará a buen término, ya que con los datos tomados se comprueban las hipótesis de partida. Esta comprobación y análisis deben ser realizados de forma que los datos se ordenen

adecuadamente al objeto de la investigación y a las diferentes etapas de ésta, ya sea en la fase del planteamiento inicial, en la ejecución o en la discusión de conclusiones.

El método para realizarlo es adaptado por cada investigador, si bien una base para el mismo, ampliamente reconocida en la sociedad científica, sería:

- Lectura del resumen y conclusiones.
- Lista de los aspectos más importantes
- Técnica de recopilación de la información.

3.10.1.- Análisis del objeto del trabajo tras el resumen y las conclusiones.

Lo primero que se debe realizar es un análisis del documento en cuanto al resumen y conclusiones del mismo con el objeto de conocer si la investigación es original, es decir, no es repetida y ya se ha llevado a cabo previamente, ya sea de forma parcial o total, con lo que habría que cambiar el objeto de la misma. Por otro lado, permitirá conocer si se ha llevado a cabo en el área de investigación preestablecida así como sin las conclusiones obtenidas coinciden con el objeto de la investigación.

3.10.2.- Relación de los aspectos más importantes.

Una vez reconocida la investigación como original a la vista del resumen y conclusiones de las fuentes de información consultadas, es el momento de comprobar los hechos relevantes que en cada etapa deben quedar resueltos.

Un posible método de actuación para aglutinar los hechos más importantes, puede ser:

- Campo científico o tecnológico implicado. Debe ser concreto y conciso respecto al problema a resolver. El investigador no debe pretender abarcar un campo más extenso que haga desviar la investigación del objetivo principal.
- Variables. El investigador, como verdadero conocedor de los límites de su investigación, determinará sin dificultad las variables aplicables al problema de investigación, así como las relaciones existentes entre ellas, que en una investigación científica serán a menudo relaciones matemáticas.
- Clase de datos necesarios. Una vez determinado el campo científico así como las variables en juego, es el momento de delimitar los datos necesarios para abordar el problema científico.
- Métodos empleados en similares investigaciones. El estado del arte sobre los métodos empleados en otras investigaciones similares puede ser de gran ayuda para elegir el método a aplicar al problema de investigación. Para esta elección se debe tener en cuenta los equipos, medios e instrumental con los que se cuenta en el equipo de investigación, así como el coste de aplicación de los mismos.
- Correlación entre variables. Puede ser a través de relaciones matemáticas o a modo de tendencia sin expresión matemática.
- Coste. No es un campo en el que normalmente el investigador se sienta ágil, y hay que tener en cuenta que el cálculo que se realice siempre será aproximado.

3.10.3.- Las técnicas actuales aplicadas a la información disponible.

Una vez recopilados los datos necesarios para la investigación, es tan importante su obtención como una adecuada organización de los mismos para que su accesibilidad futura sea práctica. Para ello se ha de emplear una técnica adecuada tanto para el procedimiento utilizado como para el medio puesto a disposición.

La técnica para ello más utilizada es:

- Procedimiento utilizado: en cada referencia compilada debe reflejarse “Revista-Autor Principal-Número-Año-Páginas”. Posteriormente se puede clasificar según

criterios diferentes que cada investigador puede personalizar conforme a su criterio y facilidad posterior de acceso a los mismos.
- Medio: Lo normal actualmente, tanto por facilidad como rapidez de acceso posterior, es la utilización de medios informáticos adaptados, de forma que se clasifique en carpetas y subcarpetas a través de archivos de textos e imágenes.

3.11.- POSTULADO DE SOLUCIONES.

3.11.1.- Aspectos fundamentales.

Continuando con el objeto global de la investigación, es decir, una vez definido el objeto de la misma, habiendo recopilado toda la información necesaria, habiéndola clasificado convenientemente, es el momento en el que el investigador debe marcar las pautas a seguir para llegar a la resolución del problema de investigación planteado aplicando sus conocimientos al mismo.

Así la propuesta de solución es la siguiente, teniendo en cuenta que no es la última etapa fundamental, para avanzar hacia el objetivo principal de la investigación. Inicialmente, con el objeto de maximizar las conclusiones sobre el objetivo, se debe realizar una planificación sobre los pasos a seguir. Es aquí, en esta planificación, cuando, junto al director de la investigación, se debe reflexionar si hay aspectos no tenidos en cuenta que fueran susceptibles de ser incluidos en la investigación a fin de potenciar la misma.

Esta planificación engloba desde un esquema sobre los medios hasta la planificación en la obtención e interpretación de los datos. De aquí la importancia de esta planificación previa, ya que el tiempo invertido anteriormente con rigor, evita la "entropía" en el trabajo posterior, así como una minimización del tiempo de estudio, lo cual no quiere decir que esa planificación sea lo suficientemente flexible para poder incorporar cualquier aspecto que durante cualquier fase se crea conveniente incorporar a la investigación.

3.11.2.- Programación de los medios a emplear.

Como parte de la planificación necesaria expuesta, figura la planificación de los medios puestos a disposición de la investigación, ya sean los materiales o instrumentales. Los materiales que se utilicen en la investigación deben tener unas características previamente definidas en lo que a composición, estructura, propiedades físicas y químicas se refiere. Además conviene hacer una previsión de la cantidad necesaria de cada uno de ellos incluyendo un porcentaje de ensayos fallidos.

En la elección entre los equipos existentes, hay que tener en cuenta la continua y rápida evolución de la mayoría de ellos, tanto que si la investigación está prevista a lo largo de un periodo largo de tiempo incluso podrían variar éstos a lo largo de la misma. Los equipos cada vez tienen mayor capacidad en el tratamiento de datos, siendo a la vez más precisos y rápidos; hasta tal punto que en ocasiones se requerirá la puesta en marcha y utilización por personal especializado en los mismos. El problema con equipos de última generación partirá a menudo de la adquisición o alquiler de los mismos por los propios centros de investigación, condicionando muchas veces por tanto los propios proyectos de investigación.

3.11.3.- Los resultados, la discusión.

Habitualmente los resultados se presentan mediante tablas, matrices, gráficas, etc. y posteriormente sirven para realizar todos los cálculos y discusiones que la investigación requiera. Así, explicar la experiencia y análisis de los datos obtenidos se puede hacer inicialmente sin los cálculos posteriores descritos.

La discusión sobre los resultados es una fase de suma importancia ya que es cuando el investigador demuestra sus verdaderos conocimientos así como la capacidad de análisis y capacidad crítica. A menudo la gran cantidad de datos existentes hace necesario

utilizar métodos matemáticos y estadísticos para poder comparar diferentes hipótesis con distintos niveles de confianza, de forma que se pueda contrastar con resultados obtenidos por otros investigadores. Esta discusión de resultados y conclusiones se debe realizar en una fase intermedia de la investigación.

3.12.- VERIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA.

La siguiente etapa, una vez planificado el trabajo, es ejecutarla tal y como se ha planificado en sus diferentes fases. No es una pauta exacta para todas las áreas de conocimiento aunque de forma general se puede hacer una guía similar a la que a continuación se expone.

3.12.1.- La preparación y articulación del trabajo.

En toda actividad que se realice, la organización del trabajo, su planificación en definitiva, es fundamental y dentro de todas esas actividades, el trabajo de investigación está sometido a una organización previa en la que hay que tener en cuenta diferentes factores:

- Se ha comprobado en apartados anteriores el peso fundamental que tienen en la investigación tanto el contar con diferentes materiales, instrumental, etc., como el disponer de una adecuada previsión de los mismos y un programa para su mantenimiento.
- Del mismo modo, los laboratorios, que son los espacios en los que se lleva cabo normalmente el análisis experimental, han de ser lo suficientemente espaciosos y cumplir determinadas características de forma que con los citados materiales e instrumental se pueda trabajar de forma ordenada y adecuada.
- Por razones de salubridad y seguridad en el centro de trabajo se debe trabajar con el material de forma ordenada y con limpieza, con espacios ordenados para el almacenamiento y conservación, así como todos los elementos de seguridad tanto individual como colectiva marcados por la ley y las buenas prácticas.
- Se debe prestar una especial atención, además de todos los puntos comentados, con el instrumental especialmente costoso y tecnológicamente avanzado ya que en el supuesto de una hipotética avería, ésta repercutiría de forma muy negativa por dos razones, primero por el gran coste económico que su reparación supondría, y en segundo lugar por los retrasos que implicaría en el desarrollo normal de la investigación.

3.12.2.- Programa de trabajos.

El programa de trabajos debe de actuar como la agenda de la investigación además de ser un instrumento de coordinación de todas las actuaciones. Para su realización hay que tener en cuenta diferentes aspectos:

- Cuando se establece una programación se considera como la mejor secuencia enlazada de actuaciones para llegar al objetivo en ese momento. Sin embargo, siempre aparecen imprevistos o datos nuevos que no se habían tenido en cuenta por desconocidos o simplemente porque no se podían conocer, y es a través del autocontrol al que obliga el programa de trabajos como hay que adaptarlo a estas nuevas circunstancias, es decir con la flexibilidad lógica de lo explicado pero con el rigor de no perder el rumbo del objetivo principal.
- El programa de trabajos debe tener unos hitos de reflexión e incluso hitos de parada, los cuales, junto a las adaptaciones a las que inevitablemente hay que someter el programa de trabajos, deben ser la base para una reflexión en cada etapa para el seguimiento de consecución de objetivos parciales, así como someterlo al director de investigación para su análisis conjunto.

3.12.3.- El investigador.

El investigador científico, dedicado al problema de investigación planteado, debe tener una dedicación intensa y persistente.

3.12.3.1.- Responsabilidades del investigador.

Como concepto general, el investigador es un eslabón más de la cadena de aporte del ser humano a la ciencia, a través del desarrollo y la creación de nuevos conocimientos, además de depurar los existentes. Su papel en la sociedad científica es adiestrar, indicar, canalizar, dirigir el desarrollo del método científico a través de una metodología congruente, coherente, lógica, racional y reflexiva, y por lo tanto no se debe limitar a la mera transmisión y acrecentamiento del conocimiento a lo largo de las generaciones, sino que debe pensar en una transmisión social en todas sus áreas y disciplinas.

La ciencia es fundamental que tenga libertad de investigación, discusión y expresión y moralmente está obligada a fomentar el desarrollo de los países más subdesarrollados a través de su progreso científico y técnico.

3.12.3.2.- Cualidades del investigador.

Las cualidades más relevantes del investigador son las siguientes:

- La primera cualidad, y quizá la más importante, es que tenga vocación verdadera e intensa, demostrada a través de la pasión, el fervor y la perseverancia y siempre en busca de la verdad.
- La segunda es tener una dedicación incesante y vehemente, siempre anteponiéndolo a otros compromisos.
- La tercera es la importancia de finalizar los trabajos en el menor tiempo posible, pero por encima de todo realizados de forma correcta.
- La cuarta es tener una actitud reflexiva, lo que implica un sentido crítico a la hora de realizar el trabajo y a la vez una actitud objetiva.
- La quinta es que ha de ser ordenado en cuanto a los documentos y a las reflexiones. Se muestra a través de los programas de trabajo ya comentados.
- La sexta es una relación fluida con el director de la investigación ya que es clave para la buena marcha de los trabajos. Esta relación pasa por diferentes etapas, siendo la inicial en la que el director escucha las inquietudes del investigador con cautela para no frustrar ni coartar la creatividad de éste; en la siguiente, el director, una vez reflexionado al respecto, expresará el amplio conocimiento sobre el problema a investigar y, sobre todo, marcando los hitos fundamentales de ésta; y, por último, una comunicación fluida entre ambos de forma que el avance sea continuo.

3.12.4.- El diario del investigador.

3.12.4.1.- Propósito del diario.

El objeto de este documento es dejar reflejado todo lo que se observe o ejecute. Cada hecho experimental debe plasmarse de una forma ordenada y clara con el fin de que si el investigador u otra persona, tuviera que repetir el experimento en algún momento, lo podría hacer en las mismas condiciones sin duda alguna. Es un documento de gran utilidad y valía ya que en análisis posteriores del mismo se puede extraer el modo en el que se ha realizado el experimento así como los resultados que se obtuvieron y si son acordes a lo esperado inicialmente. Es importante realizarlo en el mismo instante que se efectúan los ensayos, no siendo conveniente el posponer su redacción para no caer en el posible error de no plasmar la realidad real de lo hecho.

3.12.4.2.- Contenido del diario.

Por lo general existen dos formas de presentar el contenido en el diario en función del trabajo a realizar, la primera incluye de forma conjunta datos y observaciones, y la segunda distingue en documentos independientes entre la planificación y las observaciones.

Tal y como expone [DELUI-09] el contenido fundamental del diario debe contemplar:

- Tipos de instrumentos empleados y sus técnicas.
- Esquemas o planos de puntos utilizados.
- Técnica experimental empleada, haciendo constar aquellos parámetros más importantes y las condiciones de desarrollo de la experiencia.
- Observaciones importantes, si las hubiere, durante el transcurso de la investigación.
- Resultados numéricos obtenidos, expresando sus unidades, bien en forma de tablas o de gráficos.
- Fórmulas empleadas en la elaboración de los resultados, así como los valores hallados con sus unidades.
- Discusión parcial de los resultados finales, indicando la concordancia, disconformidad o novedad con los hallados por otros investigadores, citando la bibliografía pertinente.
- Cualquier tipo de anotación que se considere conveniente o necesaria para ulteriores experiencias.
- Experiencias abandonadas y su justificación. Experiencias relacionadas de otros trabajos y su ubicación (archivo y fecha).
- Fechas de inicio y fin de la experiencia.

3.12.4.3.- Cuerpo estructural del diario.

La estructura del mismo debe reflejar inicialmente la identificación del proyecto de investigación, posteriormente un resumen del trabajo realizado con objetivo perseguido y finalmente conclusiones a las que se ha llegado.

A continuación, de forma concreta hay que citar los trabajos, sean del autor o los consultados, que han servido de soporte para componer el estado del arte en el área investigado.

Una vez realizado el paso anterior, es el momento de exponer las experiencias realizadas de forma detallada, así como los resultados obtenidos y análisis realizados sobre ellos.

Finalmente, se debe finalizar con las conclusiones de la investigación, así como las posibles líneas de investigación futuras.

3.12.5.- Análisis y discusión de los resultados.

En función del tipo de investigación, la presentación del análisis y discusión se puede efectuar en ciertas fases de la investigación o bien al final del trabajo. Si la investigación tiene fases posteriores que se apoyan en resultados de fases previas se aconseja una presentación intermedia; si antagónicamente se necesitan todos los datos para llegar a conclusiones definitivas, obviamente la presentación se hará a la finalización del mismo.

Es en esta fase cuando el investigador se pone a prueba frente a la sociedad científica, teniendo que exponer sus cualidades como investigador en cuanto a sus verdaderos conocimientos dentro del área de investigación, su capacidad a la hora de interpretación de resultados y su resistencia mental.

3.13.- PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.

En esta fase se resumen y extractan las principales conclusiones de la investigación mediante diferentes técnicas de presentación, ya sean gráficos, cuadros, matrices, tablas, etc. El objetivo es que el investigador por un lado evidencie el dominio de la base técnica correspondiente a la investigación que ha realizado, por otro lado el beneficio que este encuadre teórico aporta a la ciencia en general, y por último marcar posibles líneas de investigación futura. El alma del análisis de los datos, así como su posterior interpretación y discusión, es aportar el "extra" que los datos por sí solos no proporcionan, es decir, encontrar su verdadero sentido dentro de la investigación y, por supuesto, a través de respuestas a los problemas planteados en ella.

Hay que tener en cuenta que esta fase es para la que todas las anteriores trabajan, siempre con el ánimo de buscar ampliaciones de conocimiento en un trabajo comparativo con el conocimiento actual, leyes, hipótesis, etc. Es sin duda alguna la última etapa del método científico y se puede decir que es el apogeo de la investigación. La presentación de resultados varía en función del objeto de la misma, es decir, no es lo mismo una presentación de resultados como puede ser una defensa de una tesis doctoral, que una presentación enfocada a congresos, revistas científicas, seminarios, simposios, los cuales suelen tener pautas propias.

4.- LA TESIS, ELABORACIÓN Y CONTENIDO.

4.1.- LA ELECCIÓN DEL TEMA.

En numerosas ocasiones, en la comunidad científica y académica, la elección del tema no es una libre elección del investigador, sino que como miembro perteneciente a un grupo de investigación en el que existe una serie de líneas de investigación abiertas, debe adherirse a una de ellas.

4.1.1.- La importancia de la elección del tema y título de la tesis.

Sin embargo, la elección del tema de la tesis suele resultar muy complicada para el doctorando y a menudo no se deja a la libre elección de éste, sino que es el director el que le va enfocando en la elección del tema. Todo ello con el fin de evitar riesgos innecesarios en la elección del tema y por supuesto, sin imposiciones innecesarias que provocarían la desmotivación y la disminución del nivel necesario de creatividad.

El tema inevitablemente tiene que suponer una investigación científica y, por tanto, debe referirse a aspectos no deducibles con procedimientos directos, pudiéndose entonces denominar problema científico, problema que es el que la investigación trata de resolver.

En cuanto al título de la tesis, es la tarjeta de presentación del trabajo de investigación por lo que debe partir de la problemática que se ha planteado, siendo lo suficientemente explícito y concreto y que exprese la especificidad del texto que se va a examinar. A priori, el consejo de varios autores, es que sea corto, claro y conciso, y que refleje la personalidad del autor en el trabajo. En este sentido el título de la presente tesis doctoral es "*Contraste metodológico e instrumental en el control geométrico de puentes por empuje de tablero durante su construcción*".

4.1.2.- Condiciones del tema de la tesis.

Las condiciones del tema de la tesis o del problema a investigar son simplemente los requisitos que como tal debe reunir. Estos requisitos se pueden considerar desde dos puntos de vista: subjetivo y objetivo. Desde un punto de vista subjetivo, es decir, teniendo en cuenta las circunstancias personales del doctorando, los requisitos del problema a investigar se pueden agrupar alrededor de los tres rasgos fundamentales que debe cumplir la tesis: viabilidad, no excesiva dificultad e interés. Con relación al primero, la viabilidad, el criterio fundamental a seguir es que, antes de decidir el tema elegido, se esté seguro de que su desarrollo no exige:

- Conocimientos especiales, por ejemplo, matemáticos, estadísticos, lógicos, informáticos, etc., que el doctorando no posee ni puede adquirir previamente.
- El dominio de lenguas extranjeras que el doctorando no conozca.
- El empleo de métodos o técnicas especiales o el uso de instrumentos en los que no esté adiestrado el doctorando.
- Un tiempo de duración mayor que el que se le pueda dedicar o un coste económico superior a las posibilidades del investigador.

En cuando al segundo rasgo, no excesiva dificultad, y partiendo del supuesto normal de que la tesis es la primera investigación independiente que se realiza, el criterio básico debe ser elegir un tema que esté al alcance del doctorando, como persona que se inicia en el amplio contexto de la investigación. Este criterio implica el ejercicio de una cierta modestia en la elección del tema, de modo que en lugar de enfrentarse con los grandes problemas científicos aún no resueltos, se deben escoger temas científicamente significativos, pero de menor envergadura, que incluso pueden ser accesorios con relación al gran problema sin resolver.

Por último, sobre el tercer rasgo, el tema elegido debe ser tal que represente para el doctorando un triple interés: psicológico, profesional y social. Psicológico, porque la investigación científica reclama que se realice con verdadera pasión y total entrega, lo que probablemente no ocurrirá si se es consciente que el tema elegido es banal e intranscendente. La investigación científica, al no ser un proceso rutinario, y requerir originalidad y pensamiento creativo, es muy sensible al estado psicológico del científico. Profesional, porque es lógico y aconsejable que exista una concordancia entre el tema elegido y la orientación profesional, inmediata o futura, que se piense seguir. El interés social del tema elegido, la consideración de su utilidad posible, próxima o remota para la comunidad en general, es un aspecto a tener en cuenta también en la elección del tema de la tesis.

Objetivamente, es decir, sin tener en cuenta al doctorando o investigador, se pueden destacar los siguientes requisitos:

- El tema de la investigación debe constituir un problema de la ciencia susceptible de investigación científica.
- El problema a investigar no ha de ser vago y genérico, sino que debe ser concreto y estar formulado lo más precisamente posible.
- El problema elegido debe ser innovador, por lo que no son admisibles investigaciones sobre fenómenos ya conocidos y estudiados o cuestiones ya resueltas.

4.1.3.- Elección del tema y objeto de la tesis.

Una tesis requiere de un esfuerzo importante, ya que la calidad que se espera del trabajo conlleva una implicación superior a la que el estudiante ha estado acostumbrado en sus etapas anteriores, sin olvidar que es un acto que se hace libremente. Por otro lado, hay que buscar un tema significativo dentro de la investigación científica, requiriendo por último de una serie de medios y recursos. El planteamiento realizado en este documento es el de redactar una tesis cuya tema principal sea el control geométrico de puentes y viaductos construidos mediante empuje de tablero en su fase de construcción.

Si el tema central planteado son las auscultaciones geodésicas, para definir correctamente el tema de la tesis conviene pormenorizar el objeto de la misma, que en el presente caso consiste en realizar un contraste en la ejecución de auscultaciones geodésicas por métodos clásicos y con técnica GPS. El primer método, históricamente empleado a través de la observación de ángulos y distancias, con aparatos topográficos convencionales, está ampliamente contrastado y sus resultados están en un orden de precisión parecido al exigido en este tipo de actuaciones topográficas. El segundo método se sustenta en un instrumental relativamente reciente en implantación en el mercado, que combinado con la metodología de observación adecuada y sus correspondientes resultados, es el que se pretende contrastar en esta tesis, determinando si estos resultados obtenidos permiten emplear estos equipos y técnicas en uno de los trabajos más precisos que se realizan hoy día en el ámbito de la microgeodesia.

4.1.4.- Bosquejo del tema de la tesis o del problema de investigación.

La determinación del tema de la tesis o del problema de investigación no es algo instantáneo y, aunque puede intervenir la intuición, debe derivar de todo un proceso, más o menos largo, ya analizado en los epígrafes anteriores, debiéndose también tener en cuenta aspectos como la titulación cursada, experiencia profesional, consultas bibliográficas y cómo no, la suficiencia investigadora realizada por el doctorando.

La suficiencia investigadora como primer mini-trabajo de investigación realizado por el doctorando debe estar bien abocado al tema de la tesis. En el presente caso se centró en un estudio titulado "*El control geométrico de puentes y viaductos en ingeniería civil*", lo cual reafirma la elección del tema elegido para la redacción de la tesis.

Con el objeto de centrar el tema elegido para la redacción de la tesis, se pueden definir los siguientes rasgos:

- *Enunciado.* Contraste en la ejecución de auscultaciones geodésicas por métodos clásicos y con técnicas de posicionamiento global (GPS).
- *Naturaleza.* Investigación experimental sin hipótesis previa.
- *Ámbito.* Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría (Microgeodesia).
- *Concreción.* Análisis de las metodologías de observación y precisiones que se pueden obtener en la ejecución de auscultaciones geodésicas con técnicas topográficas convencionales y GPS.
- *Importancia científica.* Determinación de la validez de este instrumental de reciente aparición para la ejecución de auscultaciones geodésicas con los beneficios que ello reporta.

4.2.- PROCESO DE ELABORACIÓN DE LA TESIS.

El proceso de una investigación experimental sin hipótesis previa, como la planteada en la presente tesis, requiere una secuencia de fases debidamente estructurada, que marque el camino a seguir y evite desviaciones del objeto final de la investigación, situación bastante habitual en este tipo de investigaciones.

La descripción pormenorizada de las fases para elaborar la investigación tampoco es totalmente necesaria, ya que produce demasiada rigidez en la ejecución de la investigación y extensión en el presente documento, por lo que a continuación se hace una descripción un tanto generalista, pero que sin duda permite entrever el proceso de elaboración de la presente tesis doctoral:

- Revisión y análisis del estado de los procedimientos, instrumentos, métodos y cálculos existentes en la actualidad para llevar a cabo auscultaciones geodésicas por métodos clásicos y con GPS.
- Observación simultánea de una estructura de esta tipología en la que durante el proceso de empuje se tomen observables por métodos clásicos y con GPS, para obtener resultados por ambas metodologías.
- Resolución de los desplazamientos que sufre el tablero durante el proceso de empuje por métodos basados en la observación angular, distanciométrica y GPS.
- Contraste de los resultados obtenidos en los diferentes procesos de empuje al que se somete la estructura durante su fase de construcción por métodos clásicos y con GPS.
- Establecimiento de las conclusiones que permitan precisar si, tanto las metodologías de observación como este instrumental, tienen el suficiente grado de exactitud y, por tanto, determinar la validez o no del instrumental ensayado y comparado con el clásico, para la ejecución de este tipo de trabajos.

4.3.- LA TESIS Y SU CONTENIDO.

4.3.1.- Introducción.

La tesis doctoral en cuanto a contenido se refiere debe ser el informe sobre una investigación científica realizada por el doctorando, pero con una singularidad fundamental, el objeto del propio documento, que no es otro que su presentación en ámbitos universitarios, y así obtener el autor el grado académico de doctor. La tesis se puede definir como el trabajo escrito en el que el doctorando describe y explica el contenido y los resultados de una investigación científica original, efectuada con la orientación de un director y sobre una materia relacionada con el programa de doctorado.

Se dice que original es todo aquello que no se deriva de algo anterior; en el orden humano, nada es original de modo absoluto, sino parcial. Lo mismo sucede en la investigación científica, en la que siempre es parte de unos conocimientos previos. La originalidad en la tesis, por tanto, no puede consistir en una total novedad, sino que debe ser el resultado del propio esfuerzo del investigador y no una copia o plagio de una investigación anterior, debiendo realizar alguna aportación nueva, aunque sea modesta, que signifique un cierto adelanto en la ciencia y en sus métodos, o un avance en el conocimiento de la realidad que constituya su propio campo.

El tema objeto de la tesis habitualmente es planteado por el doctorando y admitido o no por el departamento, todo ello en base a que actualmente la asignación de los programas de doctorado a los departamentos universitarios es un hecho, siendo éstos los auténticos supervisores y directores de los diversos programas de doctorado que el propio departamento pueda plantear, siempre dentro del campo científico, técnico o artístico al que está vinculado.

La auténtica razón de ser de la tesis en cuanto a trabajo académico se refiere es simplemente la necesidad del aspirante al máximo grado académico universitario y científico de demostrar que es capaz de realizar una investigación científica original. En cuanto al informe de la investigación científica realizada, responde a una doble necesidad:

- La exigencia científica de dar a conocer los hallazgos y descubrimientos de la investigación de alcance o interés científico, cumpliendo así la condición esencial de la ciencia moderna, que no es otra que su carácter manifiesto y público.
- Exponer y declarar los procedimientos y técnicas utilizados en la investigación, que permitan su reproducción, contraste y verificación por otros científicos o, como mínimo, para que se pueda juzgar la validez y fiabilidad de las nuevas aportaciones científicas que se proponen.

4.3.2.- El contenido de la tesis.

Nada en lo expuesto anteriormente obliga o impone lo más mínimo en cuanto al contenido o el esquema al que obligatoriamente se deban ajustar todas las tesis o informes, independientemente del tipo que sean. Sin embargo, sí se pueden señalar algunos puntos básicos de acuerdo con su razón de ser y sus funciones, que merecen ser tenidos en cuenta a este respecto.

El contenido de esta tesis se puede dividir en una parte principal y otra complementaria, estando la primera conformada por el documento impreso y la segunda presentándose tan solo en formato digital debido a su gran extensión y a que, fundamentalmente, contiene la justificación de los cálculos descritos en la principal. Dentro de ambas partes se pueden destacar los siguientes documentos que conforman el contenido de la tesis:

- *Parte principal:*
    - Índices.
    - Capítulo I.- Planteamiento general de la investigación.
    - Capítulo II.- Marco referencial y estado del conocimiento actual en las auscultaciones geodésicas clásicas.
    - Capítulo III.- El nuevo marco de resolución mediante tecnología GPS.
    - Capítulo IV.- Contraste metodológico en la resolución de auscultaciones.
    - Capítulo V.- Conclusiones y futuras líneas de investigación.
    - Fuentes de información.
- *Parte complementaria:*

- En formato exclusivamente digital se entrega información complementaria que puede ayudar a entender la investigación realizada, pero que no constituye el núcleo fundamental de ésta.
- Observables de campo de ambos instrumentales a partir de los cuales se lleva a cabo la investigación.
- La justificación de los ensayos de control geométrico realizado.

4.3.2.1.- Parte principal.

Los índices permiten estructurar y localizar todo el documento de forma pormenorizada. Existen varias clases de índices, entre los que cabe destacar los tipos empleados en la presente tesis:

- Contenido sistemático.
- Tablas, imágenes y figuras.

En el primer tipo se recogen literalmente los títulos que encabezan las divisiones y subdivisiones de la obra, y en el segundo se hace lo propio con las tablas, imágenes y figuras del documento. Como los títulos, según se ha indicado, deben reflejar los temas básicos tratados en cada punto, estos índices sintetizan el contenido de la tesis y la significación de las tablas, imágenes y figuras.

El primer capítulo sirve para presentar o situar a grandes trazos el problema objeto de investigación, no planteando en ningún momento la solución, aunque se proporcionan algunas indicaciones generales que son necesarias para abordar y entender más fácilmente la materia, comprendiendo así la concepción del tema y la forma de tratarlo.

En él se hace referencia a las siguientes cuestiones fundamentales:

- El proceso de formación del doctorando y su preparación para la investigación.
- La génesis, motivación y objeto de la tesis elegida.
- La importancia científica de la investigación realizada y las razones que justifican su estudio.
- El enunciado del problema investigado y de sus antecedentes históricos.
- La especificación del problema investigado mediante la exposición de los objetivos de la investigación.

En el segundo capítulo se lleva a cabo una revisión y definición de los procedimientos, técnicas, metodologías e instrumental empleados en la actualidad para realizar controles geométricos de estas tipologías con técnicas topográficas clásicas. Esta definición es fundamental porque fruto de ella se elegirán posteriormente las técnicas, instrumental y método de cálculo a emplear para obtener el hipotético desplazamiento del tablero cuando es empujado hasta su posición definitiva.

En el tercer capítulo se describe el nuevo marco que se abre para la resolución de controles geométricos mediante sistemas de posicionamiento global. En él se pormenorizan el fundamento de la medición, la descripción de los GPS actuales, así como las fuentes de error que surgen en las medidas con esta técnica, así como el procedimiento matemático de Fourier que permite desarrollar una de las principales líneas de investigación, los controles geométricos dinámicos. El objeto de esta búsqueda y análisis es entender tanto el instrumental como la metodología que se utilizan posteriormente para obtener unos desplazamientos en el tablero que en teoría debieran coincidir con los obtenidos con técnicas topográficas clásicas, los cuales también serán contrastados.

El cuarto capítulo tiene por finalidad responder a la necesidad de rendir cuentas sobre las técnicas de observación utilizadas y de los procedimientos de análisis empleados

para que otros investigadores puedan no sólo repetirla, sino también verificar la adecuación de dichas técnicas y procedimientos al objeto de la investigación y su correcta aplicación en el caso en cuestión. Por tanto, esta parte contiene una exposición, lo más clara y completa posible, de la metodología seguida en las operaciones básicas de la investigación mediante la enumeración de las variables generales y empíricas estudiadas y de sus definiciones operativas adoptadas, y de las técnicas empleadas en la observación, cálculo y análisis de resultados:

- Respecto a la observación, se proporcionan todas las explicaciones que son pertinentes de los elementos observados. Sobre los instrumentos, generalmente se dan los datos que los caracterizan, nombre, marca, tipo, etc., sin describirlos en detalle. También se explican el procedimiento seguido para su manejo y los resultados de las observaciones.
- En cuanto al cálculo, se da cuenta de los procedimientos seguidos en la investigación para la obtención de los resultados, reseñando las experiencias dignas de mención, las dificultades especiales encontradas y el modo de resolverlas y clasificarlas.
- En relación al contraste de resultados, cabe destacar que no falta la indicación de los tipos y modalidades de análisis utilizados: coeficientes de asociación, test de hipótesis empleados para comprobar la significación respecto a la población de los resultados y otros tipos de análisis matemáticos, con especial mención de las particularidades que presentan en la investigación de que se trate. El objetivo de esta tercera parte del informe responde a la necesidad de divulgar los resultados de la investigación; por tanto, en ella se exponen, en primer lugar, dichos resultados, de manera ordenada, clara, detallada y global, con indicación de sus fuentes y fundamentos concretos dentro del conjunto de las operaciones de la investigación, enjuiciándose críticamente la validez y fiabilidad de los resultados en cuestión, a la vez que se les compara con los resultados obtenidos con otras fuentes.

En el quinto y último capítulo de la tesis se exponen las conclusiones. Toda tesis debe presentar alguna aportación, aunque sea modesta, que signifique un cierto adelanto en la ciencia o en su método o un avance en el conocimiento de la realidad que constituye su campo propio; por tanto, las conclusiones es la parte de la tesis en la que se pone de relieve, con los argumentos adecuados, sintética y sistemáticamente, lo que ésta supone de novedad, y las aportaciones teóricas y prácticas que a su juicio implica, abriendo futuras líneas de investigación y poniendo punto final al trabajo de investigación.

Las fuentes de información son un compendio de todos aquellos documentos que se han consultado en la elaboración de la tesis doctoral. Básicamente se pueden reducir a bibliografía, artículos en revistas especializadas, actas de congresos y otros trabajos de investigación referentes o complementarios a la materia objeto de la investigación realizada en esta tesis. Las fuentes de información se han estructurado mediante la siguiente configuración:

- En primer lugar una clasificación por tipos de fuentes.
- La referencia de las obras consultadas para la elaboración de la tesis, aunque no se hayan citado expresamente.

4.3.2.2.- Parte complementaria.

En formato exclusivamente digital se entrega información complementaria que ayudando a entender la investigación realizada, no constituye el núcleo fundamental de ésta y que de ser incluidos en la memoria, harían de ésta un documento difícilmente entendible y bastante farragoso, lo que justifica que se haya recurrido a este tipo de estructura, en la que se eliminan de la misma todos estos documentos, citándose solamente cuando es necesario y presentándoles de forma adjunta.

CAPÍTULO II

MARCO REFERENCIAL Y ESTADO DEL CONOCIMIENTO EN LAS AUSCULTACIONES GEODÉSICAS CLÁSICAS.

1.- INTRODUCCIÓN

Dentro de cualquier actividad profesional relacionada con la ingeniería civil se distinguen tres actividades encadenadas: proyectar, construir y explotar, también denominadas fase de diseño o creativa, la de ejecución o construcción, y por último, la de explotación. En este sentido cabe reseñar que en la fase de diseño se establece el modelo teórico de comportamiento que debe tener la estructura durante su construcción y explotación, con el objeto de poder comparar los resultados obtenidos con las observaciones realizadas durante la fase de construcción y explotación y en base a dicho control geométrico establecer si la estructura se comporta como era previsible o tiene algún problema de construcción o explotación.

Cabe reseñar que en la fase de explotación muchas de las obras ejecutadas, no están sujetas a un control periódico que garantice su buen funcionamiento a lo largo del tiempo, por motivos meramente económicos, prescribiéndose dichos controles cuando se detectan problemas estructurales, tales casos se pueden dar en los muros de escollera, muros rígidos, taludes, suelos, puentes y viaductos no singulares, etc., no así sucede en las grandes presas en las que la normativa de seguridad obliga a controles periódicos que determinen la estabilidad o movimiento dentro de tolerancias de dichas estructuras.

El conjunto de actividades o campañas desarrolladas con objeto de determinar las deformaciones geométricas producidas en las estructuras utilizando métodos topográficos se denominan habitualmente auscultaciones geodésicas. Más concretamente, se define auscultación geodésica como el conjunto de observaciones topográficas llevadas a cabo para la determinación de movimientos sufridos por la estructura objeto de análisis en un determinado periodo de tiempo.

Como casi todo lo que se hace en ámbitos topográficos y debido a la precisión con la que hay que determinar las componentes del movimiento, dependiendo del tipo de movimiento a detectar se distinguen auscultaciones planimétricas (movimiento en el plano horizontal) y altimétricas (movimiento en el eje vertical), a su vez dentro de cada una de ellas se establecen distintas metodologías según sea la magnitud de desplazamiento esperado, y por tanto la incertidumbre permitida en la determinación.

Otro factor importante es la periodicidad de las observaciones, que a su vez permite mediante las pertinentes comparaciones de resultados cuantificar la velocidad del movimiento. Estas cuantías de movimiento son el objeto final de la auscultación, ya que según se sitúen en referencia a los márgenes de seguridad teóricos, determinarán el estado de la estructura estudiada.

De forma resumida se puede decir que para llevar a cabo los controles geométricos de estructuras, se parte de un estado o situación inicial y después de reiteradas observaciones en el tiempo, y el procesado y comparación de los datos obtenidos para distintas épocas de observación, se establecen los movimientos resultantes que comparados con los teóricos establecidos por el proyectista, permiten determinar el estado deformacional, íntimamente relacionado con el estado tensional, de la estructura. Cabe reseñar que los diferentes métodos de resolución que se desarrollan en los siguientes epígrafes se aplican en todo tipo de estructuras utilizadas en Ingeniería Civil, aunque en la presente investigación se particularizan a la fase de construcción de puentes por empuje de tablero.

2.- GENERALIDADES SOBRE EL CONTROL DEFORMACIONAL.

2.1.- RASGOS FUNDAMENTALES DEL CONTROL DEFORMACIONAL.

2.1.1.- Marco referencial.

El trabajo de la Ingeniería Civil generalmente comienza con una necesidad social (abastecimiento a una población, carretera necesaria para llegar a un determinado lugar, ampliación en un puerto, construcción de una presa, etc.) y, como primer paso, una vez tomada la decisión de interactuar en el territorio para dar solución a un problema suscitado, se redacta un proyecto que permita analizar las diferentes alternativas, concretar la más beneficiosa y pormenorizar la elegida. Una vez realizado y tramitado dicho proyecto se pasa a la fase de construcción, para posteriormente acometer la fase de mantenimiento y control de la obra realizada, etapa que cada vez tiene más importancia debido a los retos cada vez mayores en ingeniería.

En las tres fases, proyectar, construir y explotar, la información tridimensional es fundamental para el éxito del proceso ingenieril: un buen plano o mapa permite la correcta definición y valoración económica de la obra que se pretende efectuar; en la fase de construcción, la materialización de la obra en el territorio nuevamente requiere de la gestión de información tridimensional con el objeto de que en la construcción se acometan las obras planteadas según fueron proyectadas; y una vez finalizada la obra, nuevamente vuelve a ser primordial durante la explotación de la actuación que inevitablemente tiene que ser controlada para garantizar que su comportamiento sea el previsto inicialmente.

Así pues, la topografía y la geodesia ocupan y deben ocupar, un lugar determinante en todo el proceso explicado de la ingeniería civil, estableciendo las metodologías más adecuadas en cada fase, tomando más protagonismo en una u otra fase dependiendo de la tipología en cuestión (viaductos, presas, muros, taludes inestables, suelos, etc.), así como de los objetivos definidos previamente, aspectos que influirán tanto en el instrumental a emplear, como en el tipo de datos a tomar y en el modelo de control.

2.1.2.- Objeto general del control deformacional.

Tanto en la fase de construcción como de explotación de una estructura convencional, ésta se caracteriza por constituir un conjunto elástico que se deforma frente a una solicitación exterior (presión hidráulica, empuje del terreno, etc.) o interior (motivada por acciones térmicas o por fenómenos de retracción), transmitiendo al modelo construido unos esfuerzos y tensiones que debe ser capaz de resistir dentro de los límites de seguridad preestablecidos. Así pues, dado que tensión y deformación están relacionadas según las diferentes teorías desarrolladas para las diferentes tipologías de estructuras, el conocimiento de las deformaciones a través de la medida de los desplazamientos sirve como fuente de información esencial para controlar la resistencia del conjunto, así como para la toma de decisiones ante comportamientos previamente no esperados.

El propósito último de una auscultación geodésica es el conocimiento del hipotético desplazamiento que pueden sufrir una serie de puntos solidarios del elemento que se pretende auscultar, de forma que si se determina un determinado movimiento en esos puntos, se puede considerar que el elemento ha sufrido también ese movimiento. Estos desplazamientos se determinan mediante observaciones topográficas, con instrumental y métodos de observación apropiados al nivel de precisión con el que se pretende obtener el desplazamiento. En el caso objeto de análisis en la presente investigación, como el elemento a auscultar es una estructura, la precisión se suele fijar en el umbral de uno a dos milímetros.

2.2.- ELEMENTOS PARTICIPANTES EN EL PROCESO DE AUSCULTACIÓN.

2.2.1.- Introducción.

El control deformacional mediante métodos topográficos, como prácticamente todas las actividades que se hacen en dicho ámbito, se suele dividir en planimétrico y altimétrico, dado que se lleva a cabo con instrumental y métodos diferentes en cada caso.

Los elementos que hay que disponer para poder llevar a cabo una auscultación tienen condicionantes geométricos, morfológicos y geotécnicos particulares de cada lugar, que hacen que su disposición no siempre se pueda hacer de la forma más apropiada y esto es algo que inevitablemente puede afectar a la incertidumbre final. Lo que sí es cierto es que dependiendo del instrumental se tienen que disponer unos u otros, en este sentido en el siguiente epígrafe se analizan todos y cada uno de ellos, de forma que cuando se desarrollen los métodos de resolución se describirá los que son necesarios en cada caso.

Para definir el instrumental a emplear, es conveniente analizar previamente la evolución que el instrumental topográfico ha tenido en los últimos años. Tradicionalmente, la evaluación de desplazamientos en planta se hacía mediante la observación con teodolitos de apreciación en el entorno de la décima de segundo sexagesimal, sin embargo hoy se pueden utilizar distanciómetros de precisión $1\,mm + 1\,ppm$ apareciendo un nuevo campo de actuación y alternativa a las observaciones angulares. Igualmente sucede con la evaluación de desplazamientos verticales, realizada tradicionalmente en trabajos de precisión con niveles automáticos, que hoy se pueden hacer mediante el uso de niveles electrónicos de precisión abriendo igualmente un campo de actuación y alternativa a las nivelaciones clásicas.

Así, tomando como base los elementos participantes y el instrumental en función del observable que se pretenda determinar, ángulos, distancias o alturas, se puede diseñar la auscultación geodésica planimétrica y/o altimétrica de formas diferentes pero con el mismo fin, determinar los desplazamientos relativos precitados del orden de uno a dos milímetros.

2.2.2.- Elementos participantes en una auscultación planimétrica.

2.2.2.1.- La red de pilares de auscultación.

Los pilares de auscultación, constituyen el lugar físico donde se ubica el instrumento topográfico con el que se llevan a cabo las observaciones. Aunque generalmente no hay preestablecidas unas dimensiones estándar para los pilares, se suelen construir a modo de vértices geodésicos, incluso con dimensiones parecidas. En la siguiente imagen se pueden apreciar las dimensiones y ubicación de un pilar de auscultación.



Imagen II.1.- Pilar de auscultación en el Viaducto de Montabliz (Cantabria).

La misión fundamental es garantizar que el punto-estación sea siempre el mismo y además perdure en el tiempo estimado para las diferentes campañas de observación, de forma que se garantice el estacionamiento del instrumento topográfico en el mismo punto de forma reiterativa y precisa, pudiendo así llegar a eliminar los errores típicos de dirección y estacionamiento, errores que de otro modo pueden alterar de forma fundamental el rango de precisión buscado. Los dispositivos utilizados en los pilares para que se pueda hacer el correcto estacionamiento del instrumento son los denominados sistemas de centrado forzoso, siendo los más comunes las basadas y los pernos roscados.

Una distancia adecuada entre los pilares de auscultación y el elemento a observar para conseguir la precisión establecida previamente, puede ser entre 100 y 200 metros con el objeto de que se pueda realizar la observación con buenas punterías, y en la medida de lo posible en zona estable frente a posibles movimientos. Aún así, antes del comienzo de cada campaña de auscultación, se debe comprobar que el pilar mantiene las coordenadas preestablecidas o si ha sufrido movimientos con respecto a la campaña anterior, proceso denominado control de estabilidad de los pilares de auscultación.

Para fijar el número de pilares necesarios para resolver una auscultación, como posteriormente se justificará, es necesario disponer de al menos dos pilares, sin embargo es habitual y conveniente tener cuatro pilares dadas las ventajas adicionales que reporta:

- Se consigue redundancia de observaciones, con lo cual se pueden realizar comprobaciones y obtener valores estadísticos para realizar ajustes matemáticos posteriores: matrices de varianza-covarianza, elipses de error, etc., que muestran la tolerancia de la observación.
- Habitualmente, el diseño de la red de pilares por motivos geométricos y topográficos obliga a visuales complicadas, e incluso suelen quedarse puntos sin observar desde todos los pilares por la imposibilidad física de llevar a cabo observaciones concretas, debiendo entonces no dejar ningún punto a observar con observaciones desde un único pilar, dado que en ese caso no se tienen datos suficientes para poder resolver la posición del punto y, por tanto, no se puede establecer el hipotético desplazamiento.

En la siguiente fotografía de la zona se puede apreciar tanto la situación de cada uno de los pilares, como la dificultad de los accesos a los mismos, lo que entorpece los movimientos del observador durante la campaña de observación.



Imagen II.2.- Ubicación de los pilares de auscultación existentes en el Viaducto de la Miel.

El diseño óptimo de la red de pilares es fundamental para la calidad posterior de los resultados que se obtenga desde ella. Para ello hay que estudiar pormenorizadamente el número de pilares a disponer, distancia de cada uno de ellos a las dianas, ángulos de intersección entre visuales, inclinación de las visuales, etc., aspectos casi siempre condicionados por los aspectos topográficos y geotécnicos del entorno, y que, como conocidos que son, se debe estudiar para así hacer una disposición en las mejores ubicaciones posibles desde el punto de vista de observación.

2.2.2.2.- La malla de las dianas de puntería.

La malla de dianas conforma la red de puntos sobre los que se realiza la observación y sobre los que se calcula el hipotético desplazamiento, para posteriormente extrapolar el movimiento al conjunto total del elemento a auscultar. Así pues, esta malla posee un número de puntos y una distribución dependientes de la geometría que tenga la estructura o entorno físico que se pretende analizar. El componente elemental de la malla es la diana de puntería, elemento que se hace solidario a la estructura objeto de análisis mediante resinas, pegamentos rígidos, soldaduras, etc., de forma que el hipotético desplazamiento se pueda extrapolar a la estructura y no sea causado por el movimiento independiente de la propia diana.

Si las auscultaciones geodésicas se realizan mediante observaciones angulares, el elemento más comúnmente utilizado es el clavo metálico embebido normalmente de hormigón y, por tanto, solidario con él. Este clavo, dado que se requiere una precisión muy alta, tiene un diámetro de 1 centímetro con una marca que garantice siempre la misma referencia para la medida. En la siguiente fotografía se puede ver un ejemplo de lo comentado.

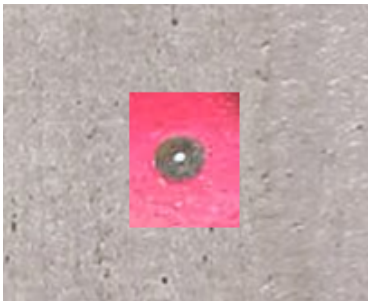


Imagen II.3.- Diana de puntería recomendada en auscultaciones geodésicas angulares.

Si las auscultaciones geodésicas se realizan mediante observaciones distanciométricas, el elemento utilizado debe ser reflexivo, de forma que devuelva la onda portadora enviada por el instrumento topográfico (distanciómetro) y pueda así evaluar la distancia. Los elementos comúnmente utilizados son los miniprismas convencionales que permiten realizar mediciones superiores a los 800 metros. De la misma manera que las dianas, lo ideal es solidarizar el miniprisma al elemento a auscultar.



Imagen II.4.- Diana de puntería recomendada en auscultaciones geodésicas distanciométricas, (Leica).

Ya sea uno u otro modelo el utilizado, hay que distribuirlo por el elemento a auscultar en función de su geometría y del comportamiento estructural que se desea estudiar, resultando generalmente mallas estructuradas en filas y columnas de dimensiones muy variables. Aunque en el caso de la presente investigación, dado que solamente interesa el movimiento en la punta del tablero, se propone la colocación de una diana en el extremo del tablero, siguiendo la norma de buena práctica en el momento de la construcción del viaducto.

2.2.2.3.- La red de puntos de seguridad.

La red de puntos de seguridad tiene por misión poder comprobar la estabilidad de los pilares entre campañas e incluso, en caso de movimiento de algún pilar, fijar dicho desplazamiento para poder trasladarlo a la diana, de forma que se pueda corregir un hecho no deseable, pero que a veces sucede, como es el movimiento del pilar.

Dado que la metodología a utilizar para determinar la estabilidad del pilar consiste en la resolución de intersecciones inversas y tres es el número mínimo de puntos para resolver una intersección inversa, aunque lo ideal es que tenga cinco o seis, se suele poner el número de puntos necesario para ver cuatro o cinco puntos desde cada pilar, pero teniendo en cuenta que los puntos de un pilar valen para otro pilar siempre que tenga visual.

Como estos puntos son los que fijan el posible movimiento del pilar entre campañas, se deben ubicar obligatoriamente fuera del área de influencia del objeto a analizar y, por supuesto, en un sitio estable a lo largo de todo el tiempo que duren las diferentes campañas de auscultación del elemento objeto de análisis, ubicándose generalmente a distancias que no pasen de 200 ó 300 metros de los pilares, con el fin de garantizar la calidad suficiente de las visuales, pero en sentido contrario a la ubicación de la estructura.

Dependiendo del tipo de observable que se pretenda realizar, ángulos o distancias, la tipología constructiva permitirá hacer punterías angulares o medida de distancias mediante prismas de reflexión. En la siguiente imagen se puede apreciar la tipología constructiva de los puntos de seguridad, así como sus dimensiones, para la media de ángulos dado que si se pretende medir distancias se utilizan miniprismas como los descritos anteriormente. Dichos puntos se suelen fijar a elementos con posición fija en el territorio como grandes rocas, muros, zapatas, cimentaciones de estabilidad contrastada, etc.



Imagen II.5.- Detalle constructivo de los puntos de seguridad.

2.2.2.4.- Polares.

Con el fin de inicializar el ángulo horizontal en cada una de las campañas, y lograr que las lecturas con las que se determinan las variaciones angulares entre campañas sean siempre lo más parecidas posible (permite la fácil orientación del observador), se pueden utilizar uno o más puntos fuera del área de influencia de la zona que se va auscultar, denominándose estos puntos como polares. Su tipología constructiva es idéntica a la de los puntos de seguridad.

2.2.2.5.- Instrumental topográfico.

Como se ha comentado anteriormente, la observación de una auscultación puede realizarse mediante observaciones angulares, y requiere la observación desde los pilares de auscultación a las polares, puntos de seguridad y dianas de puntería, debiendo ser el instrumental a emplear lo más preciso posible, recomendándose que las mediciones angulares se realicen con teodolitos de alta precisión (TAP) o, por lo menos, de precisión (TP), y cuya apreciación angular no debiera ser mayor de un segundo sexagesimal. En caso de realizar medidas distanciométricas se deben utilizar distanciómetros con precisiones del orden milimétrico $1\,mm + 1\,ppm$.

En la actualidad todos los fabricantes ofertan estaciones topográficas que combinan teodolitos y distanciómetros de altas prestaciones, como es el caso de Leica, cuyo modelo TC2003 se caracteriza por tener una apreciación en los limbos de 0,5" y 35 aumentos en el anteojo, además de un distanciómetro de $1\,mm + 1\,ppm$. Este instrumento eminentemente preciso y que, combinado con una tarjeta electrónica, permite almacenar y posteriormente volcar toda la información captada de forma totalmente automática, al margen de la mejora de rendimiento que produce, consigue reducir notablemente el número de errores groseros que se cometen al hacer el mismo proceso de forma manual.



Imagen II.6.- Estación Topográfica, marca Leica, modelo TC2003.

Es obvio que todo el instrumental empleado en una auscultación geodésica, por ser una metodología tremendamente exigente con respecto a la precisión, debe estar en buen estado. Además, el instrumento debe pasar las oportunas revisiones de limpieza y calibración realizadas por el personal técnico de la empresa suministradora, garantizando así en todo momento su buen estado y el cumplimento de las especificaciones técnicas marcadas en la definición técnica del propio instrumento.

2.2.3.- Elementos participantes en una auscultación altimétrica.

2.2.3.1.- El origen de cotas.

Dada la exigencia en precisión que se requiere en las auscultaciones geodésicas altimétricas, es habitual utilizar nivelación geométrica y trabajar con origen de cotas local, evitando así nivelaciones largas desde clavos de la red de nivelación hasta la zona objeto de análisis. Por ello, la primera necesidad que surge al realizar una auscultación altimétrica es la ubicación en el entorno de un origen de cotas, que puede estar más o menos alejado de la zona de influencia en función de la estructura que se pretenda auscultar y el intervalo de tiempo con el que se realizará dicha auscultación, pero cuya estabilidad sea incuestionable, dado que cualquier movimiento que sufra dicho clavo será transmitido a toda la nivelación que desde él se lleve a cabo.

El tipo de señalización más habitual es el clavo con cabeza esférica, lo que facilita que no se hunda al colocar la estadía sobre el propio clavo, efecto que se puede producir

en suelos de carácter poco consistente o poroso, como el aglomerado. En la siguiente figura se puede apreciar un clavo tipo utilizado en la señalización de orígenes de cota.



Imagen II.7.- Señalización tipo para el origen de cotas.

El hecho de tener cabeza esférica permite además que cuando se coloca la estadía sobre el propio clavo, ésta no toca el suelo, que por lo general tiene forma irregular, generando que la estadía arranque desde cotas altimétricas diferentes en función de dónde se coloque. En la siguiente figura se puede apreciar el detalle de cómo una vez colocada la estadía sobre el clavo, en ningún momento ésta toca el suelo.



Imagen II.8.- Efecto de la cabeza esférica del clavo.

2.2.3.2.- Red de clavos de nivelación.

Señalizado adecuadamente el origen de cotas, a continuación se hace necesario establecer una serie de clavos para llevar a cabo la nivelación geométrica y que estén ubicados en los lugares en los que se pretende llevar a cabo el control deformacional, para lo que es fundamental concretar el tipo de estructura que se pretende auscultar y los puntos en los que hay que realizar el control; por ejemplo, en un viaducto suele ser menester auscultar el centro del tablero, los apoyos, los estribos, etc., aunque en el caso de la presente investigación interesa nuevamente el extremo del tablero que se está empujando. El diseño en la ubicación de los puntos que se pretende auscultar y los anillos de nivelación que se realizarán posteriormente comprometen la precisión posterior, por lo que se hace imprescindible poner interés en esta fase ya que posteriormente condicionará los resultados que se obtengan.

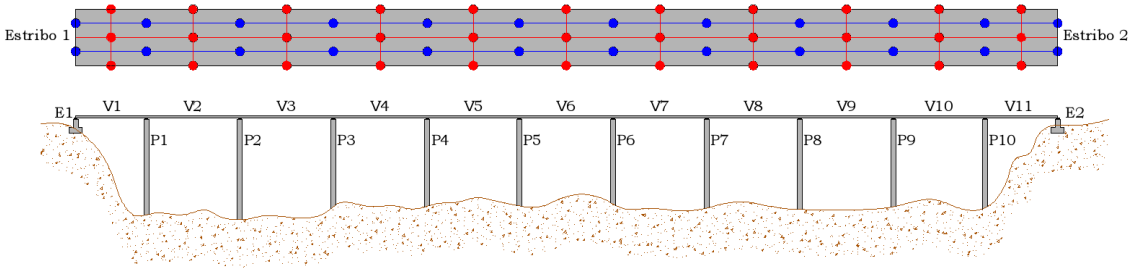


Figura II.1.- Red de clavos de nivelación en un viaducto tipo.

En cuanto al tipo de señalización que se utiliza para esta red de clavos de nivelación suele ser la misma que la empleada para el origen de cotas, es decir, clavos de cabeza esférica, que poseen todas las ventajas descritas en el epígrafe anterior.

2.2.3.3.- Instrumental.

La evolución del instrumental topográfico empleado en trabajos altimétricos también es notable en los últimos tiempos; así se pasó de utilizar los clásicos niveles automáticos a utilizar los niveles electrónicos, capaces de interceptar un código de barras que usualmente se coloca sobre una estadía vertical de invar e interpretar y almacenar el valor de la altura de forma automática. Además este instrumental, en su gama superior, es capaz de interceptar los valores de la altura de mira con precisiones que rondan la centésima de milímetro, lo que permite garantizar la precisión absoluta exigida en este tipo de controles, que suele rondar el milímetro de precisión. En la siguiente figura se puede apreciar un instrumento que recoge todas las prestaciones para llevar a cabo los controles que se pretenden llevar a cabo.



Imagen II.9.- Nivel electrónico, marca Leica, modelo DNA03.

Como elemento auxiliar en la nivelación geométrica se hace imprescindible la estadía vertical que, en el caso de emplear nivel electrónico, requiere que tenga su propio código de barras para que el lector óptico pueda interpretar la altura de la estadía. En la siguiente figura se puede apreciar a un auxiliar colocando la estadía para realizar una observación durante el control deformacional del tablero de un puente.



Imagen II.10.- Estadía vertical en disposición de realizar observación.

2.2.3.4.- Otros.

En el caso de no poder realizar la observación mediante nivelación geométrica o para complementarla, es habitual utilizar pilares de replanteo externos a la propia estructura desde los cuales realizar nivelación trigonométrica mediante estación topográfica de alta prestación (generalmente la utilizada para la auscultación

planimétrica) centrada en dicho pilar y haciendo puntería sobre mini-prismas ubicados en la propia estructura.



Imagen II.11.- Pilar de auscultación planimétrica utilizado para altimetría.

2.3.- CARACTERIZACIÓN DE MOVIMIENTOS.

2.3.1.- Introducción.

Generalmente el inicio de una auscultación geodésica no coincide con el momento de la finalización de la construcción del elemento a auscultar, si bien es conveniente puntualizar, que lo importante en las diferentes campañas es conocer la evolución y tendencia de los movimientos entre diferentes campañas, de forma que permita conocer el comportamiento de la misma, así como predecir futuros movimientos.

Este inicio de la auscultación se denomina campaña cero, y es a partir de ella, con la lectura en campañas posteriores de todos los elementos intervinientes en la auscultación y explicados anteriormente, cuando se puede realizar ese contraste de mediciones y posiciones relativas entre campañas.

En este punto es cuando hay que definir el tipo de observable y su correspondiente metodología de resolución con el que se desea plantear la auscultación, que básicamente depende de dos factores: por un lado, la tipología estructural y por otro del comportamiento estructural y su correspondiente tipo de movimiento que se pretende determinar. Caben tres tipos de movimientos, el movimiento que tiene una clara componente horizontal, el que tiene una componente vertical y el que tiene tanto componente planimétrica como altimétrica.

2.3.2.- Proceso de auscultación planimétrica.

En el proceso de auscultación planimétrica se pretende determinar si un punto, generalmente perteneciente al elemento a auscultar, ha sufrido un desplazamiento planimétrico o no, en un intervalo de tiempo determinado. Para ello se proponer realizar una observación idéntica en dos instantes diferentes, que permite determinar la posición relativa de ese punto en ambas campañas, y por diferencia de la posición relativa la determinación del posible desplazamiento o deformación que ha sufrido el elemento objeto de análisis.

Cabe reseñar que antes de iniciar el proceso de auscultación hay que prever el tipo de movimiento o deformación que se espera de la estructura. El movimiento planimétrico se produce generalmente en estructuras tipo muros, presas, etc. en las que el movimiento o deformación esperado prácticamente no tiene componente altimétrica, tal y como se puede apreciar en la siguiente figura.

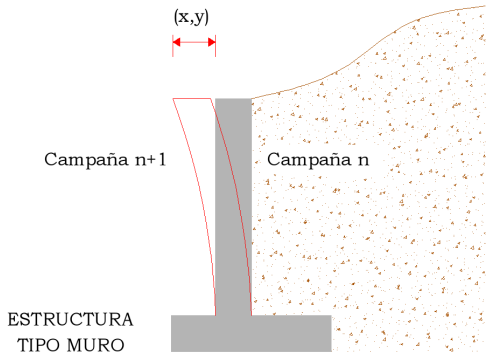


Figura II.2.- Caracterización del movimiento o deformación planimétrico.

De forma sencilla se pude decir que para llevar a cabo una auscultación planimétrica clásica se pueden realizar observaciones de dos tipos diferentes, ángulos o distancias, en las que las metodologías intervinientes son muy parecidas, describiéndose pormenorizadamente más adelante, y que son:

- Intersecciones inversas: Realizadas con las observaciones que se llevan a cabo desde los pilares de auscultación a los puntos de seguridad, permiten comprobar la estabilidad de los pilares entre campañas o no. Si los pilares no se han movido, que es lo habitual, se pasa a la siguiente metodología y si se han movido se determina el desplazamiento para corregir la posición relativa del pilar.
- Intersecciones directas: Determinada la estabilidad de los pilares o corregidos sus posibles desplazamientos, se pasa a observar desde los pilares a las dianas de puntería para determinar el posible movimiento de las dianas y establecer así el hipotético movimiento o deformación de la estructura.

En la siguiente figura se puede apreciar la disposición habitual de los elementos que participan en una auscultación planimétrica, así como la estrecha vinculación existente entre dicha disposición y las metodologías que se emplean con los diferentes objetivos que se han planteado en este mismo epígrafe.

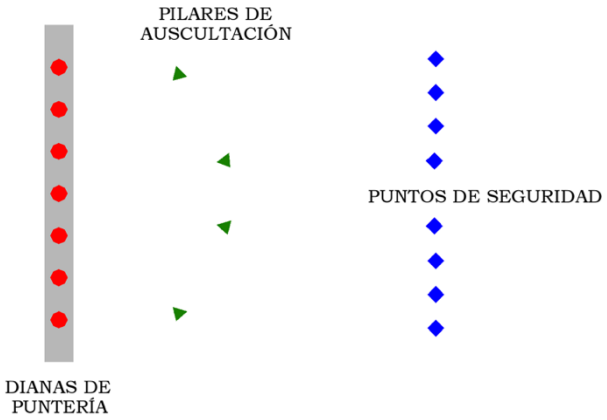


Figura II.3.- Esquema general de los elementos participantes en una auscultación planimétrica.

Dada la ingente cantidad de intersecciones directas o inversas que se producen, se han desarrollado metodologías que permiten la resolución masiva de dichas intersecciones y que también se pormenorizan en los siguientes epígrafes de este capítulo.

2.3.3.- Proceso de auscultación altimétrica.

En el proceso de auscultación altimétrica se pretende determinar si un punto, generalmente perteneciente al elemento a auscultar, ha sufrido un desplazamiento

altimétrico o no, en un intervalo de tiempo. Para ello se propone realizar una observación idéntica en dos instantes diferentes, que permite determinar la posición relativa de ese punto en ambas campañas y, por diferencia de la posición relativa, la determinación del posible desplazamiento o deformación que ha sufrido el elemento objeto de análisis.

Cabe reseñar que antes de iniciar el proceso de auscultación hay que prever el tipo de movimiento o deformación que se espera de la estructura, en el caso altimétrico se produce generalmente en estructuras tipo puentes, viaductos, subsidencia minera, etc., en las que el movimiento o deformación esperado prácticamente no tiene componente planimétrica, tal y como se puede apreciar en la siguiente figura.

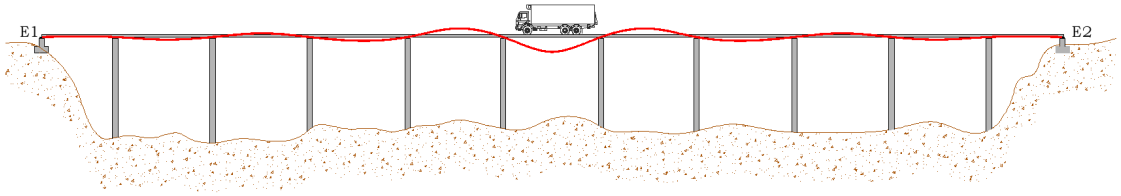


Figura II.4.- Caracterización del movimiento o deformación altimétrico.

De forma sencilla se pude decir que para llevar a cabo una auscultación altimétrica clásica se realizan diferentes anillos de nivelación geométrica que permiten establecer la cota precisa se una serie de puntos en diferentes instantes de tiempo y que a partir de las diferentes nivelaciones que se hacen en diferentes hipótesis, para determinar el desplazamiento o deformación de la estructura, tan solo hay que analizar la diferencia de cotas. Actualmente existen diferentes procedimientos para ajustar los resultados que se obtiene fruto de la resolución de los anillos de nivelación, que se justifican en epígrafes posteriores de este capítulo.

En la siguiente figura se puede apreciar la disposición habitual de los elementos que participan en una auscultación altimétrica, así como la estrecha vinculación existente entre dicha disposición y las metodologías que se emplean con los diferentes objetivos que se han planteado en este mismo epígrafe.

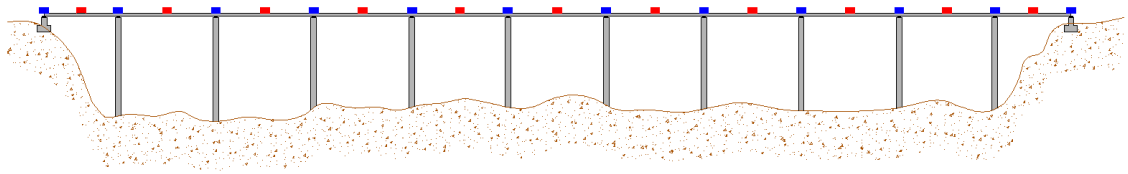


Figura II.5.- Esquema general de los elementos participantes en una auscultación altimétrica.

2.3.4.- Proceso de auscultación combinado.

En el proceso de auscultación combinado se pretende determinar si un punto, generalmente perteneciente al elemento a auscultar, ha sufrido un desplazamiento tanto planimétrico como altimétrico o no, en un intervalo de tiempo. Para ello se propone realizar una observación idéntica en dos instantes diferentes, que permite determinar la posición relativa de ese punto en ambas campañas y, por diferencia de la posición relativa, la determinación del posible desplazamiento o deformación que ha sufrido el elemento objeto de análisis.

Cabe reseñar que antes de iniciar el proceso de auscultación hay que prever el tipo de movimiento o deformación que se espera de la estructura, en el caso de movimiento combinado se produce generalmente en estructuras tipo escolleras, terraplenes, taludes inestables, etc., en las que el movimiento o deformación esperada tiene tanto la componente planimétrica como la altimétrica, tal y como se puede apreciar en la siguiente figura.

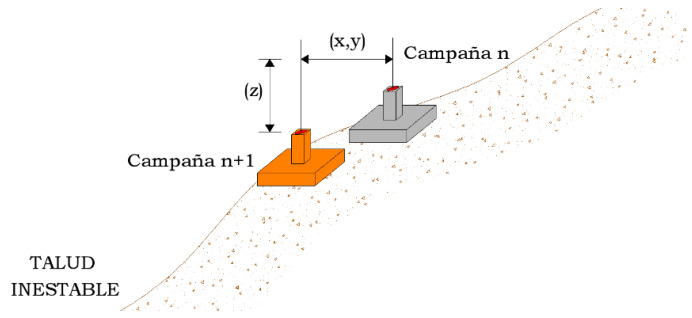


Figura II.6.- Caracterización del movimiento o deformación combinado.

En el mismo caso se encuentra el caso particular de esta investigación, que trata de abordar el control geométrico durante la construcción de puente empujado; el procedimiento de empuje consiste en la prefabricación del tablero en uno de sus extremos para proceder al lanzamiento del mismo desde uno de los estribos, haciéndolo pasar por las pilas respectivas y apoyando en ellas sobre apoyos provisionales deslizantes. En este proceso, para garantizar su correcto desarrollo, es necesario establecer una serie de controles entre los que priman los del control planimétrico y altimétrico, siendo los más importantes:

- Control de la geometría del tablero ya empujado.
- Control de la geometría del parque de montaje o prefabricación después de cada empuje.
- Control de la fuerza de empuje. Si se excede a la prevista es síntoma de un rozamiento mayor o un acodalamiento del tablero, por lo que se puede afectar a las pilas y estribos.
- Control de la flecha del pescante en la aproximación a las líneas de apoyo. Tiene en cuenta la flexibilidad del tablero e indica su integridad estructural.
- Control del desplazamiento horizontal en la cabeza de la pila en las operaciones de remonte del pescante.
- Control de la fuerza necesaria en los gatos del pescante para remontar la flecha de la aproximación.

Dado que la investigación se centra en el movimiento del tablero durante el proceso de lanzamiento, se puede pensar que la componente del movimiento es exclusivamente vertical, pero dado que durante el proceso de empuje o lanzamiento es necesario corregir la posición de éste mediante las torres de atirantamiento, también se puede producir movimientos horizontales, lo que motiva tener que pensar en que, a priori, la naturaleza del movimiento puede ser combinado, aunque la mayor componente del movimiento sea la vertical.



Imagen II.12.- Caracterización del movimiento o deformación combinado en un puente empujado.

3.- LA OBSERVACIÓN ANGULAR.

3.1.- INTRODUCCIÓN.

Con la medición de ángulos se puede determinar la orientación de puntos con respecto a una referencia, pudiéndose obtener ángulos tanto en el plano horizontal como en el plano vertical. Así en los siguientes apartados se trata de dar un repaso a todos estos aspectos de forma pormenorizada de forma que se pueda determinar con exactitud la posición entre campañas de los diferentes puntos objeto de la auscultación.

3.2.- IMPORTANCIA DEL DISEÑO DE LAS DIFERENTES REDES.

Existen tres redes directamente implicadas cuyo diseño es de extrema importancia en el panorama de una auscultación: la red de pilares, la red de dianas y la red de puntos de seguridad. Es en el diseño de estas redes donde el proyectista ha de plasmar sus conocimientos, dando valor a todo aquello que con posterioridad tendrá influencia en las observaciones: número de pilares, proximidad a las dianas, ángulo de intersección entre visuales, inclinación de las mismas, etc. Esta fase tiene tanta importancia que, como posteriormente se demostrará, el diseño de las redes permite definir la incertidumbre esperada a priori.

En muchas ocasiones no es sencillo diseñar la red óptima pues, aunque exista en la teoría, no se puede construir en la práctica por simples consideraciones topográficas. No obstante, en el presente caso no se han podido establecer criterios propios de diseño ya que las redes eran un factor de partida debido a su existencia en el entorno del viaducto objeto de análisis.

En este caso, lo que sí es factible es determinar la incertidumbre esperada en función del error cometido al realizar la observación angular, con lo que al menos se pueden elegir las prestaciones que debe tener el teodolito con el que se pretenden realizar las mencionadas observaciones. Más adelante, una vez demostrada la expresión que permite establecer el desplazamiento, se desarrollarán todos estos aspectos tan importantes para la delimitación del mismo.

3.3.- METODOLOGÍAS INTERVINIENTES.

Existen dos metodologías implicadas en el tratamiento de los datos observados:

- *Intersección inversa.* La determinación de los posibles movimientos de los pilares auscultación se consigue mediante la observación y posterior resolución de las diferentes intersecciones inversas que se crean entre los puntos de seguridad y los propios pilares de auscultación.
- *Intersección directa.* La determinación de los desplazamientos de las dianas de puntería se consigue mediante la observación y posterior resolución de las diferentes intersecciones directas que se crean entre los pilares de auscultación y las propias dianas de puntería.

Estas metodologías que se van a desarrollar ampliamente en los apartados siguientes, se fundamentan en todo el desarrollo profundamente expuesto por [FERRE-92], OJEDA-84] y [DELUI-09].

Aunque no es lo habitual, si el pilar sufre algún desplazamiento, la resolución de la intersección inversa múltiple permite establecer dicho desplazamiento, con lo que se consigue posteriormente y mediante una excéntrica, corregir la observación realizada y poder compararla con la realizada en la campaña anterior, pudiendo definitivamente determinar el movimiento de la diana. Además, esta excentricidad de una observación con respecto a la anterior permite corregir cualquier error de dirección que se pueda cometer al estacionar el teodolito, pues equivaldría al desplazamiento del pilar.

Este proceso, que en ocasiones surge espontáneamente, otras veces hay que ponerlo en marcha, especialmente cuando no se encuentra una ubicación para los pilares que garantice su estabilidad.

3.3.1.- Fundamentos teóricos de la intersección directa angular.

La intersección directa en la observación angular es un método de resolución en la determinación de la posición de puntos que tan sólo requiere para ello de observaciones angulares desde puntos con coordenadas conocidas.

Tal y como se puede ver en la siguiente figura, el instrumento topográfico (teodolito) se estaciona en dos pilares (Pilar I y Pilar II) cuyas coordenadas son conocidas. Desde cada uno de los pilares se observa al otro pilar y al punto objeto de posicionamiento.

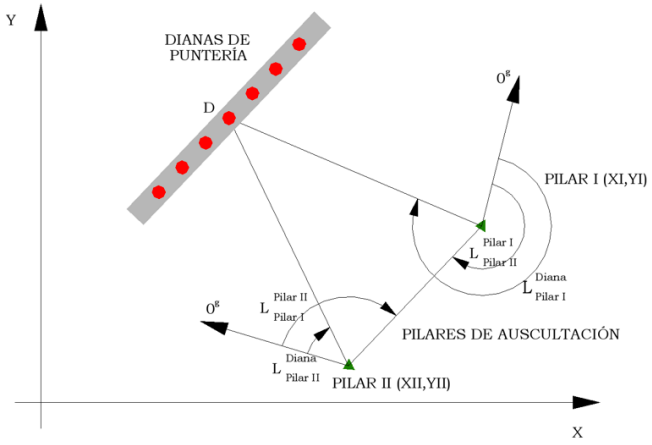


Figura II.7.- Esquema genérico de las observaciones de una intersección directa angular.

Con las observaciones realizadas, y por simple diferencia de lecturas, se establecen los ángulos α y β, que se pueden apreciar en la siguiente figura.

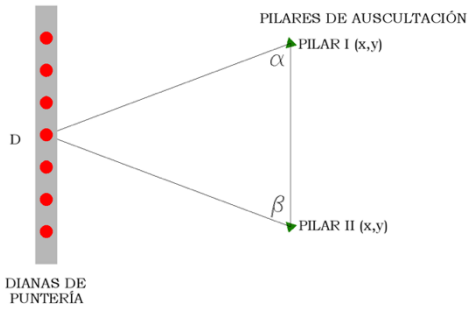


Figura II.8.- Esquema genérico de la intersección directa angular.

Las coordenadas del punto D pueden obtenerse a partir de las coordenadas conocidas de los pilares I y II, calculando la distancia y la orientación correspondientes, aunque generalmente se calculan por duplicado a partir de los dos puntos para poder tener comprobación de resultados. Es fundamental observar que de este modo sólo se comprueban los cálculos, pero no las observaciones de campo, pues unas observaciones de ángulos mal tomadas aportarán un punto D distinto al real pero perfectamente obtenible a través del proceso de cálculo.

Datos iniciales:

$$Pilar\ I: (x_I, y_I)$$

$$Pilar\ II: (x_{II}, y_{II})$$

Observaciones de campo:

$$L_{Pilar\ I}^{Pilar\ II}, L_{Pilar\ I}^{Diana}, L_{Pilar\ II}^{Pilar\ I}, L_{Pilar\ II}^{Diana}$$

Siempre será posible la obtención de los ángulos α y β, por simple diferencia de lecturas:

$$\beta = L_{Pilar\ II}^{Pilar\ I} - L_{Pilar\ II}^{Diana} \quad [II.1]$$

$$\alpha = L_{Pilar\ I}^{Diana} - L_{Pilar\ I}^{Pilar\ II} \quad [II.2]$$

Con los ángulos α y β, definidos, las coordenadas de la diana D se obtienen mediante el siguiente proceso:

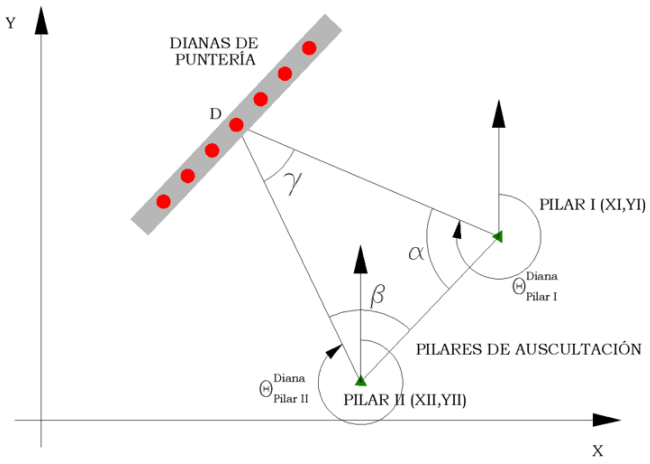


Figura II.9.- Resolución numérica de la intersección directa angular.

En cualquier caso, es conocida la distancia reducida entre el Pilar I y el Pilar II.

$$D_I^{II} = \sqrt{(x_{II} - x_I)^2 + (y_{II} - y_I)^2} \quad [II.3]$$

Es necesario calcular los incrementos de coordenadas entre el Pilar I y la Diana y entre el Pilar II y la Diana:

$$\Delta x_{Pilar\ II}^{Diana} = D_{Pilar\ II}^{Diana} \sin \theta_{Pilar\ II}^{Diana}$$

$$\Delta y_{Pilar\ II}^{Diana} = D_{Pilar\ II}^{Diana} \cos \theta_{Pilar\ II}^{Diana}$$

$$\Delta x_{Pilar\ I}^{Diana} = D_{Pilar\ I}^{Diana} \sin \theta_{Pilar\ I}^{Diana}$$

$$\Delta y_{Pilar\ I}^{Diana} = D_{Pilar\ I}^{Diana} \cos \theta_{Pilar\ I}^{Diana}$$

Evaluación de los ángulos acimutales:

$$\theta_{Pilar\ II}^{Diana} = \theta_{Pilar\ II}^{Pilar\ I} \pm \beta$$

$$\theta_{Pilar\ I}^{Diana} = \theta_{Pilar\ I}^{Pilar\ II} \pm \alpha = \left(\theta_{Pilar\ II}^{Pilar\ I} \pm 200\right) \pm \alpha$$

siendo:

$$\theta_{Pilar\ II}^{Pilar\ I} = arctg \frac{x_{Pilar\ I} - x_{Pilar\ II}}{y_{Pilar\ I} - y_{Pilar\ II}} \quad [II.4]$$

$$\theta_{Pilar\ I}^{Pilar\ II} = arctg \frac{x_{Pilar\ II} - x_{Pilar\ I}}{y_{Pilar\ II} - y_{Pilar\ I}}$$

El problema de la intersección directa queda centrado por el cálculo de las distancias reducidas $D_{Pilar\ II}^{Diana}$ y $D_{Pilar\ I}^{Diana}$.

En el triángulo Pilar I – Pilar II – Diana se cumple:

a.- Relación de la distancia reducida Pilar I-Pilar II con Pilar II- Diana, aplicando el teorema del seno:

$$\frac{D_{Pilar\ II}^{Diana}}{\sin\alpha} = \frac{D_{Pilar\ II}^{Pilar\ I}}{\sin\gamma} \Rightarrow D_{Pilar\ II}^{Diana} = \frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} D_{Pilar\ II}^{Pilar\ I}$$

$$\alpha + \beta + \gamma = 200^g \Rightarrow \gamma = 200 - (\alpha + \beta) \quad [II.5]$$

b.- Relación de la distancia reducida Pilar I-Pilar II con Pilar I- Diana, aplicando el teorema del seno:

$$\frac{D_{Pilar\ I}^{Diana}}{\sin\beta} = \frac{D_{Pilar\ II}^{Pilar\ I}}{\sin\gamma} \Rightarrow D_{Pilar\ I}^{Diana} = \frac{\sin\beta}{\sin\gamma} D_{Pilar\ II}^{Pilar\ I}$$

$$\alpha + \beta + \gamma = 200^g \Rightarrow \gamma = 200 - (\alpha + \beta)$$

De este modo se cumple:

$$\frac{D_{Pilar\ I}^{Diana}}{\sin\beta} = \frac{D_{PilarII}^{Diana}}{\sin a} = \frac{D_{Pilar\ II}^{Pilar\ I}}{\sin\gamma} \quad [II.6]$$

Y los acimutes desde cada pilar a la diana se obtienen de forma sencilla:

$$\theta_{Pilar\ I}^{Diana} = \theta_{Pilar\ I}^{Pilar\ II} \pm \alpha \quad [II.7]$$

$$\theta_{Pilar\ II}^{Diana} = \theta_{Pilar\ II}^{Pilar\ I} \pm \beta \quad [II.8]$$

Y por tanto, las coordenadas de la Diana ya son fácilmente expresables.

a.- Partiendo del Pilar II:

$$x_{Diana} = x_{Pilar\ II} + D_{Pilar\ II}^{Diana} \sin\theta_{Pilar\ II}^{Diana} \quad [II.9]$$

$$y_{Diana} = y_{Pilar\ II} + D_{Pilar\ II}^{Diana} \cos\theta_{Pilar\ II}^{Diana} \quad [II.10]$$

b.- Partiendo del Pilar I:

$$x_{Diana} = x_{Pilar\ I} + D_{Pilar\ I}^{Diana} \sin\theta_{Pilar\ I}^{Diana} \quad [II.11]$$

$$y_{Diana} = y_{Pilar\ I} + D_{Pilar\ I}^{Diana} \cos\theta_{Pilar\ I}^{Diana} \quad [II.12]$$

Con el proceso seguido en este método se otorga al ángulo la potestad de lograr determinar la posición de la diana en las diferentes campañas realizadas, todo ello tomando como base las coordenadas conocidas de los pilares y haciendo observaciones angulares de campo de los ángulos α y β en cada una de las campañas, tal y como se muestra en la figura II.9. Este proceso de cálculo descrito utiliza un sistema de coordenadas absoluto de grandes dimensiones con unas variaciones angulares muy pequeñas, lo cual implica un inconveniente ya que matemáticamente produce grandes desplazamientos y, por tanto, es necesario un procedimiento de cálculo diferente al explicado y que permita resolver la gran cantidad de intersecciones producidas.

3.3.2.- Fundamentos teóricos de la intersección inversa angular.

El problema de la intersección inversa es un problema planteado desde hace mucho tiempo, teniendo varias soluciones gráficas y numéricas. En este problema, para determinar las coordenadas de un punto P se realizan desde él observaciones con un teodolito a tres vértices topográficos A, B y C (como mínimo), tomando los ángulos formados entre sí por las visuales a dichos puntos.

Este procedimiento permite determinar la estabilidad de los pilares en la auscultación geodésica, ya que mediante la observación, al menos, de tres puntos de seguridad permite resolver la posición del pilar.

Habitualmente se realizan intersecciones inversas múltiples en vez de intersecciones inversas simples, es decir a cuatro o más puntos de seguridad, lo que produce un

sistema más complejo, pero con redundancia de datos, que a su vez permite obtener comprobaciones y errores. La resolución de la intersección inversa simple consiste básicamente en resolver el siguiente proceso matemático:

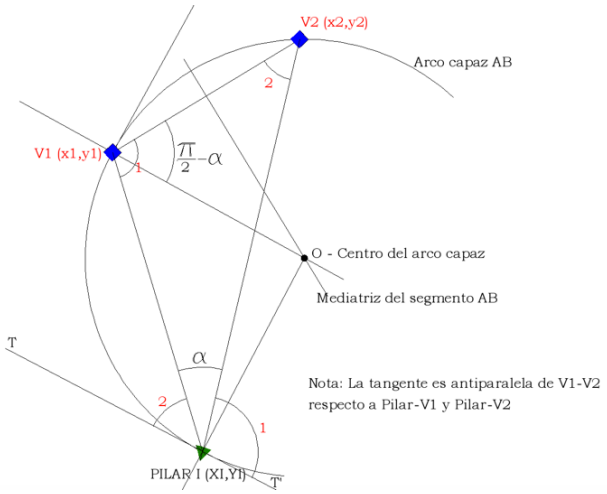


Figura II.10.- El arco capaz y su tangente.

Dado un lado V1-V2 y un ángulo α, el arco capaz de ángulo α levantado sobre V1-V2 se obtiene trazando desde los dos extremos hacia el interior las rectas de ángulo $\left(\frac{\pi}{2}-\alpha\right)$ con V1-V2, siendo el punto de corte de ambas el centro del área capaz.

Al considerar la tangente T-T', en un punto P (Pilar I) del arco capaz se verifica que el ángulo:

$$V1-P-T=V1-V2-P=2 \qquad [II.13]$$

y que:

$$V2-P-T'=V2-V1-P=1 \qquad [II.14]$$

ya que ambos son la mitad del arco de circunferencia correspondiente.

La intersección inversa P (Pilar I) es la solución que determina la intersección de los dos arcos capaces V1-V2 de ángulo α y V2-V3 de ángulo β, obtenidos a partir de ambos segmentos. Si ambos arcos capaces coinciden, no existe solución, denominándose al arco circunferencia peligrosa.

La resolución matemática de la intersección inversa, parte por tanto de la observación desde un punto de coordenadas indeterminadas (pilar de auscultación) a tres puntos de coordenadas determinadas (puntos de seguridad), tal y como se puede apreciar en la siguiente figura:

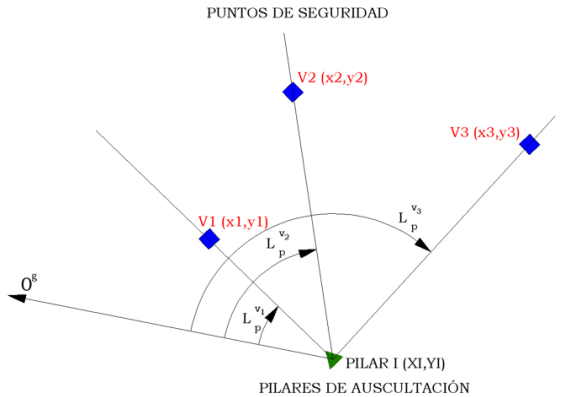


Figura II.11.- Observación en campo de una intersección inversa simple.

Lo que en definitiva requiere de tres visuales desde un punto P a tres puntos A, B y C que genera tres lecturas angulares horizontales PA, PB y PC que proporcionan los datos necesarios para resolver matemáticamente el problema, los ángulos $\alpha\, y\, \beta$, planteando en su caso, el método denominado de Pothenot.

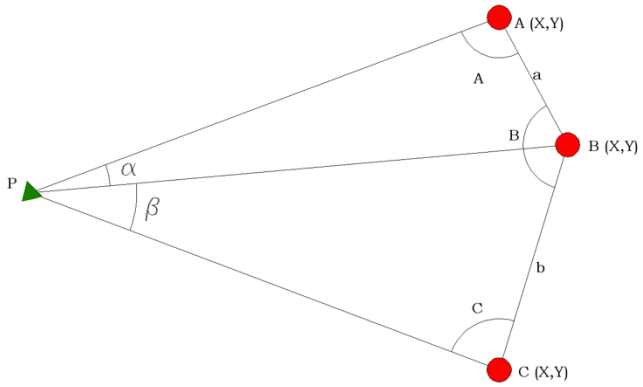


Figura II.12.- Esquema conceptual de la intersección inversa simple.

Con los datos de partida se obtienen las distancias reducidas, particularizando la expresión [II.3] para los puntos de coordenadas conocidas:

$$A(x_a, y_a) - B(x_b, y_b) \;\Rightarrow\; D_A^B = \sqrt{(x_b - x_a)^2 + (y_b - y_a)^2}$$

$$B(x_b, y_b) - C(x_c, y_c) \;\Rightarrow\; D_B^C = \sqrt{(x_c - x_b)^2 + (y_c - y_b)^2}$$

Hay que evaluar las coordenadas del punto $P(x_p, y_p)$; para ello se estaciona el teodolito en P y se evalúan los ángulos $\alpha\, y\, \beta$. Con las coordenadas de los tres vértices A, B y C, y los ángulos evaluados en campo $\alpha\, y\, \beta$, se obtienen las coordenadas del vértice P. Para lo cual se establece el valor de la diagonal común PB en ambos triángulos y se iguala:

$$\frac{D_P^B}{\sin A} = \frac{D_A^B}{\sin \alpha} \;\Rightarrow\; D_P^B = a\frac{\sin A}{\sin \alpha}$$

$$\frac{D_P^B}{\sin C} = \frac{D_B^C}{\sin \alpha} \;\Rightarrow\; D_P^B = b\frac{\sin C}{\sin \alpha}$$

$$a\frac{\sin A}{\sin \alpha} = b\frac{\sin C}{\sin \alpha} \;\Rightarrow\; \frac{\sin C}{\sin A} = \frac{a}{b}\frac{\sin \beta}{\sin \alpha}$$

$$\frac{\sin A}{\sin C} = \frac{b}{a}\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = M \qquad \text{[II.15]}$$

En el cuadrilátero PABC se verifica:

$$A + C = 400^g - (\alpha + \beta + B) = N \qquad \text{[II.16]}$$

En ambas igualdades M y N son valores numéricos conocidos, fácilmente evaluables:

$$C = N - A$$

$$\frac{\sin A}{\sin(N - A)} = M \;\Rightarrow\; \sin A = M \sin(N - A)$$

$$\sin A = M(\sin N \cos A - \cos N \sin A) = M \sin N \cos A - M \cos N \sin A$$

$$\sin A(1 + M \cos N) = (M \sin N) \cos A \qquad \text{[II.17]}$$

Si en la expresión anterior se denomina:

$$(1 + M \cos N) = I \qquad \text{[II.18]}$$

$$(M \sin N) = J \qquad \text{[II.19]}$$

Sustituyendo las expresiones [II.18] y [II.19] en la expresión [II.17], resulta:

$$I \sin A = J \cos A$$

De donde se deduce:

$$\tan A = \frac{J}{I} \Rightarrow A = arctg\frac{J}{I} \qquad [II.20]$$

Obteniendo el valor de A, el de C es inmediato:

$$C = N - A$$

Conociendo los ángulos A y C pueden calcularse las coordenadas de P desde cualquiera de los tres puntos de coordenadas conocidas mediante las expresiones generales del cálculo de coordenadas:

$$\theta_A^P = \theta_A^B + A \;\Rightarrow\; D_A^P = a\frac{\sin(A-\alpha)}{\sin\alpha}$$

$$\theta_C^P = \theta_C^B - C \;\Rightarrow\; D_C^P = b\frac{\sin(C+B)}{\sin\beta}$$

$$\Delta x_A^P = D_A^P \sin\theta_A^P; \Delta y_A^P = D_A^P \cos\theta_A^P \Rightarrow x_P = x_A + \Delta x_A^P;\; y_P = y_A + \Delta y_A^P$$

$$\Delta x_C^P = D_C^P \sin\theta_C^P; \Delta y_C^P = D_C^P \cos\theta_C^P \Rightarrow x_P = x_C + \Delta x_C^P;\; y_P = y_C + \Delta y_C^P$$

Así con los ángulos calculados, obtener las coordenadas del pilar es inmediato:

$$x_P = x_A + D_A^P \sin\theta_A^P$$

$$y_P = y_A + D_A^P \cos\theta_A^P$$

De esta forma se puede comprobar la bondad de los cálculos, aunque no las observaciones de campo, pues se ha evaluado con el mínimo número de datos para la obtención de la solución.

En el caso de observar a más de tres puntos de seguridad, al igual que en el caso de las intersecciones directas, las intersecciones inversas requieren de un procedimiento que permita resolver el sistema, lo mecanice y, a poder ser, consiga tener un tratamiento estadístico adosado. Nuevamente en este caso, en el que existen más ecuaciones que incógnitas, existe redundancia de datos y a partir de la matriz residuos, se puede conseguir interesante información que refleja la bondad del resultado obtenido.

3.4.- LA OBSERVACIÓN DE ÁNGULOS EN CAMPO.

3.4.1.- Método de observación.

La auscultación geodésica por medio de ángulos tiene como método más contrastado el denominado *vuelta de horizonte* que se fundamenta en los extremos que a continuación se exponen:

- Es necesario establecer como referencia las "polares", que son referencias externas que sirven para inicializar las lecturas de ángulos horizontales una vez estacionado el instrumento topográfico, en este caso el teodolito. Esta referencia externa, polar, puede ser única para todos los pilares o una diferente para cada uno de ellos, y la distancia a la que se encuentre va a depender del tamaño que tenga la red a auscultar pero debe garantizar el poder realizar una puntería nítida.
- Una vez inicializados los ángulos horizontales, se realiza una observación de los ángulos horizontales de todos los puntos que componen la red en círculo directo. La sucesión de lecturas a través de los puntos de la red se realizará en orden siguiendo el sentido horario.

- Finalizada la lectura de los vértices que componen la red en sentido horario, se cierra con la lectura de la referencia inicial y externa (polar). El error de cierre ha de ser inferior a la precisión marcada de antemano, que depende del instrumento utilizado y de las condiciones ambientales existentes en el momento de la toma de datos.
- En el caso de que el error de cierre esté dentro de los límites establecidos previamente, se comienza con las lecturas del mismo modo pero en sentido contrario, es decir, círculo inverso, y de forma que la sucesión de lecturas a través de los puntos de la red sea en orden siguiendo el sentido antihorario. De este modo, se obtiene de cada vértice de la red la lectura en círculo directo y en círculo inverso, haciendo la media de cada una de las observaciones. El conjunto de todas estas lecturas promediadas en todos los vértices de la red es lo que constituye una serie de medición.
- La experiencia recomienda que en este método de observación no se realicen más de cuatro series de medición. Si el objetivo es conseguir aún mayor precisión en las observaciones conviene utilizar un teodolito de mayor precisión.

Este método permite llevar a cabo las observaciones con prontitud aunque no suprime los errores que se pueden dar como consecuencia de efectos de la climatología sobre los pilares, principalmente la deformación torsional que pudiera sufrir.

Si se quisieran eliminar errores, habría que recurrir a otros métodos de observación, como pueden ser el de *pares de referencia* y *Schreiber*. Se basan en hacer observaciones consecutivas en muy poco espacio de tiempo para, posteriormente, calcular la media. Son métodos que ralentizan mucho la toma de datos, siendo opción del observador realizar una u otra en función de los resultados que se pretendan obtener teniendo en cuenta todos estos factores comentados.

3.4.2.- Controles a realizar en una observación angular.

3.4.2.1.- Controles previos a la observación angular.

Previamente al comienzo de la auscultación geodésica hay que verificar que el instrumento topográfico esté en condiciones de medir con las precisiones requeridas, si es posible con una calibración realizada por el fabricante lo más cercana posible en el tiempo a la ejecución de la auscultación.

Además de esta calibración, es norma de buena práctica realizar una serie de comprobaciones para comprobar si tiene algún defecto grosero:

- Perpendicularidad entre el eje de colimación y el eje secundario.
- Perpendicularidad entre el eje principal y el eje secundario.
- Comprobación del error de nivel de línea.
- Comprobación del error de coincidencia entre el eje de colimación y el eje óptico del anteojo.

3.4.2.2.- Controles durante la observación angular.

La principal cautela y examen que se debe realizar, es por parte del observador, el cual debe cerciorarse de que los cierres realizados tengan un error por debajo de las tolerancias acordadas, para no invalidar el trabajo posterior de gabinete en el tratamiento de estos datos.

4.- RESOLUCIÓN DE AUSCULTACIONES PLANIMÉTRICAS MEDIANTE LA OBSERVACIÓN DE ÁNGULOS.

4.1.- INTRODUCCIÓN.

Una vez realizadas las observaciones angulares de campo y con los datos obtenidos con las pautas marcadas en el epígrafe anterior, la resolución de una auscultación requiere resolver intersecciones directas e inversas, para determinar los correspondientes movimientos de las dianas de puntería y los posibles movimientos de los pilares, no olvidando que la captura de observables se hace con la redundancia suficiente para poder tener una comprobación de la incertidumbre final obtenida.

Para resolver estas metodologías es necesario tener unas coordenadas "a priori" de toda la red, que se caracterizarán por ser permanentes para los puntos de seguridad, previsiblemente definitivas para los pilares, que en caso de moverse se podrán redefinir mediante la resolución de las intersecciones inversas y aproximadas para las dianas, que obviamente son las que tienen más posibilidad de moverse y cuyo movimiento se determinará mediante la resolución de las intersecciones directas. Para obtener las coordenadas aproximadas de toda la red es habitual hacer una campaña de observación en red, observando ángulos y distancias en la primera campaña y dotar así de coordenadas, en sus diferentes estadios, a todos los puntos que conforman la propia auscultación. Todo ello se desarrolla en los siguientes apartados en base a las premisas marcadas por [FERRE-92] y [DELUI-09].

Establecidas las coordenadas aproximadas de toda la red, se pasa a resolver primero la estabilidad de los pilares y después la de las dianas, mediante las intersecciones inversas y directas. También es cierto que la resolución de intersecciones inversas se puede obviar en aquellos casos en los que las variaciones angulares entre campañas sea cero o próximas a éste, dado que entre puntos que no tienen movimiento relativo entre campañas pilares-puntos de seguridad, la variación angular debe ser cero. La resolución de intersecciones bien directas o inversas masiva que se produce en una auscultación requiere de métodos de resolución que consigan simplificar y mecanizar el proceso, además de permitir calcular el error esperado. Tanto para las intersecciones inversas como directas, los métodos de resolución son gráfico, numérico y de variación de coordenadas, y se pormenorizarán posteriormente, fundamentados en la precitada referencia así como en [OJEDA-84].

4.2.- AJUSTE DE LA RED.

Para efectuar el ajuste de todas las observaciones distanciométricas y angulares realizadas es habitual llevar a cabo un ajuste matemático por el método de los mínimos cuadrados, el cual se caracteriza por que hace mínimo el valor de la suma al cuadrado de todos los residuos obtenidos en cada ecuación de observación. Está demostrado que los valores de las cantidades ajustadas son más probables con este método que con otros, por lo que hoy día es el utilizado habitualmente, permitiendo la asignación de pesos a las medidas según la fiabilidad de las observaciones.

Por tanto, el primer paso es plantear las ecuaciones de dirección y de distancias a partir de las observaciones angulares y de distancias realizadas para poder definir los residuos de la observación, siendo las expresiones matemáticas que definen dichos residuos:

Ecuaciones de dirección:

$$V_{ij} = \frac{r''}{D^2_{calc}}\left[\left(y_j - y_i\right)dx_j - \left(x_j - x_i\right)dy_j + \left(x_j - x_i\right)dy_j\right] + Az_{casl} - Az_{abs} \qquad \text{[II.21]}$$

Ecuaciones de distancia:

$$V_{ij} = \frac{1}{D_{calc}}\left[\left(x_j - x_i\right)dx_j - \left(x_j - x_i\right)dx_i - \left(y_j - y_i\right)dy_j + \left(y_j - y_i\right)dy_i\right] + D_{casl} - D_{abs} \qquad \text{[II.22]}$$

Estas ecuaciones se transforman en un sistema matricial de la forma:

$$V = P\,A\,X - P\,T \qquad \text{[II.23]}$$

en donde:

V *es la matriz de los residuos.*

A *es la matriz de los coeficientes.*

X *es la matriz de las incógnitas.*

T *es la matriz de los términos independientes.*

P *es la matriz de los pesos.*

La matriz P es una matriz diagonal, en la que cada elemento tiene la siguiente forma:

$$p_{ii} = \frac{1}{e^2} \qquad \text{[II.24]}$$

siendo "e" el error medio cuadrático de la media de cada observación.

Tanto las distancias como los ángulos se observan con diferentes unidades, motivo por el cuál para que se combinen en un mismo ajuste se deben emplear coeficientes apropiados en los pesos. De este modo, se deduce que si las observaciones se pesan en función del inverso de sus errores y si se usan las mismas unidades en los residuos y en los errores, los términos $P - V$ deben ser adimensionales y por lo tanto compatibles para ajustes simultáneos.

Como se ha comentado al inicio la condición fundamental del método de mínimos cuadrados es la minimización de la suma de los residuos al cuadrado, es decir en la forma matricial definida anteriormente $V^T \cdot P \cdot V$. Para que se cumpla esta condición, el diferencial de $V^T \cdot P \cdot V$ debe ser igual a cero.

$$\frac{\partial (V^t P V)}{\partial X} = 2V^t P \frac{\partial V}{\partial X} = 0$$

Diferenciando la expresión anterior, se obtiene:

$$P\frac{\partial V}{\partial X} = P\frac{\partial (V^t P V)}{\partial X} = PA$$

Sustituyendo la ecuación anterior en la condición, se obtiene:

$$2\,V^t\,P\,A = 0$$

Trasponiendo la ecuación anterior se deduce:

$$A^t\,P^t\,V = 0$$

Sustituyendo el valor de V en la expresión anterior, se obtiene:

$$A^t\,P^t\,(A\,X - T) = A^t\,P^t\,A\,X - A^t\,P^t\,T = 0$$

Como P es una matriz diagonal $P = P^t$, entonces:

$$A^t\,P\,A\,X = A^t\,P\,T$$

Definitivamente se deduce X, obteniéndose:

$$X = (A^t\,P\,A)^{-1}\,A\,P\,T \qquad \text{[II.25]}$$

siendo esta ecuación la expresión matricial general para mínimos cuadrados de ecuaciones de observación utilizando pesos. Una vez calculadas las incógnitas, se obtiene la desviación estándar del ajuste mediante la expresión:

$$S_0 = \sqrt{\frac{\Sigma(p\,v^2)}{m-n}} \qquad \text{[II.26]}$$

En esta ecuación m es el número de ecuaciones de observación y n es el número de incógnitas. El denominador $m-n$ es la redundancia, normalmente conocida en estadística como el número de grados de libertad. Para el cálculo de las desviaciones estándar de los valores ajustados se emplea la matriz de covarianza. Esta matriz está formada a partir de los coeficientes de las incógnitas en las ecuaciones de observación.

Despejando el término $P\ A\ X$ de la ecuación inicial, se obtiene:

$$P\ A\ X = P\ T + P\ V$$

En la ecuación final del ajuste en la que se define X, éste es el valor más probable de las incógnitas. Considerando que el valor real de las incógnitas sea la matriz:

$$\bar{X} = X + \Delta X \qquad \text{[II.27]}$$

El término ΔX es el error cometido en los valores ajustados. Este ΔX produce un ΔT en los valores de T. Por lo que la ecuación definitiva se transforma en:

$$X + \Delta X = (A^t\ P\ A)^{-1} A^t\ P(T + \Delta T)$$

Operando, se obtiene:

$$X + \Delta X = (A^t\ P\ A)^{-1} A^t\ P\ T + \ (A^t\ P\ A)^{-1} A^t\ P\ \Delta T$$

Sustituyendo la ecuación de X en la anterior, se obtiene:

$$\Delta X = (A^t\ P\ A)^{-1} A^t\ P\ \Delta T$$

Reconociendo ΔT como los residuos en los valores de T observados, la ecuación anterior se transforma en:

$$\Delta X = (A^t\ P\ A)^{-1} A^t\ P\ V \qquad \text{[II.28]}$$

Considerando también que:

$$B = (A^t\ P\ A)^{-1} A^t\ P$$

Entonces:

$$\Delta X = B\ V$$

Multiplicando ambos lados de la ecuación anterior por sus traspuestas se obtiene:

$$\Delta X\ \Delta X^t = B\ V\ V^t\ B^t$$

Desarrollando el primer término de la ecuación anterior se obtiene:

$$\Delta X\ \Delta X^t = \begin{bmatrix} \Delta X_1^2 & \Delta X_1 \Delta X_2 & \Delta X_1 \Delta X_3 & \dots & \Delta X_1 \Delta X_n \\ \Delta X_2 \Delta X_1 & \Delta X_2^2 & \Delta X_2 \Delta X_3 & \dots & \Delta X_2 \Delta X_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Delta X_n \Delta X_1 & \Delta X_n \Delta X_2 & \Delta X_n \Delta X_3 & \dots & \Delta X_n^2 \end{bmatrix}$$

Desarrollando el segundo término:

$$B\ V\ V^t\ B^t = \begin{bmatrix} v_1^2 & v_1 v_2 & v_1 v_3 & \dots & v_1 v_n \\ v_2 v_1 & v_2^2 & v_2 v_3 & \dots & v_2 v_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_n v_1 & v_n v_2 & v_n v_3 & \dots & v_n^2 \end{bmatrix} B^t$$

Asumiendo que es posible repetir toda la secuencia de observaciones un número "a" de veces, siendo cada vez ligeramente diferente el resultado del ajuste. Promediando los resultados para cada valor, la expresión se convierte en:

$$\frac{1}{a}\sum(\Delta X\ \Delta X^t) = \begin{bmatrix} \sum\frac{\Delta X_1^2}{a} & \sum\frac{\Delta X_1\Delta X_2}{a} & \sum\frac{\Delta X_1\Delta X_3}{a} & \dots & \sum\frac{\Delta X_1\Delta X_n}{a} \\ \sum\frac{\Delta X_2\Delta X_1}{a} & \sum\frac{\Delta X_2^2}{a} & \sum\frac{\Delta X_2\Delta X_3}{a} & \dots & \sum\frac{\Delta X_2\Delta X_n}{a} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sum\frac{\Delta X_n\Delta X_1}{a} & \sum\frac{\Delta X_n\Delta X_2}{a} & \sum\frac{\Delta X_n\Delta X_3}{a} & \dots & \sum\frac{\Delta X_n^2}{a} \end{bmatrix}$$

Si el valor de "a" es grande, los términos de la expresión anterior equivalen a las varianzas y covarianzas, resultando la siguiente matriz:

$$\begin{bmatrix} S_{X1}^2 & S_{X1}S_{X2} & S_{X1}S_{X3} & \dots & S_{X1}S_{Xn} \\ S_{X2}S_{X1} & S_{X2}^2 & S_{X2}S_{X3} & \dots & S_{X2}S_{Xn} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{Xn}S_{X1} & S_{Xn}S_{X2} & S_{Xn}S_{X3} & \dots & S_{Xn}^2 \end{bmatrix}$$

La matriz anterior es la matriz de covarianza. También, teniendo en cuenta un número V de observaciones, la ecuación del segundo término se convierte en:

$$\frac{1}{a}\sum(B\ V\ V^t\ B^t) = B\begin{bmatrix} \sum\frac{v_1^2}{a} & \sum\frac{v_1v_2}{a} & \sum\frac{v_1v_3}{a} & \dots & \sum\frac{v_1v_n}{a} \\ \sum\frac{v_2v_1}{a} & \sum\frac{v_2^2}{a} & \sum\frac{v_2v_3}{a} & \dots & \sum\frac{v_2v_n}{a} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sum\frac{v_nv_1}{a} & \sum\frac{v_nv_2}{a} & \sum\frac{v_nv_3}{a} & \dots & \sum\frac{v_n^2}{a} \end{bmatrix}B^t$$

Para un valor grande de "a", los términos que están fuera de la diagonal son 0, por lo que la matriz se convierte en:

$$B\begin{bmatrix} S_1^2 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & S_2^2 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & S_n^2 \end{bmatrix}B^t$$

Sabiendo que los pesos de las observaciones son inversamente proporcionales a las varianzas de las mismas, se tiene que:

$$S_1^2 = \frac{S_0^2}{P_i} \qquad \text{[II.29]}$$

Sustituyendo el valor de B en la ecuación anterior:

$$S_0^2\ B\ P^{-1}\ B^t = S_0^2\ [(A^t\ P\ A)^{-1}]\ A^t\ P\ P^{-1}\ P^t\ A\ [(A^t\ P\ A)^{-1}]$$

Puesto que las ecuaciones normales son simétricas y por ser P una matriz diagonal se obtiene:

$$S_0^2\ [(A^t\ P\ A)^{-1}]\ [A^t\ P\ A]\ [(A^t\ P\ A)^{-1}] = S_0^2\ [(A^t\ P\ A)^{-1}]$$

Igualando las ecuaciones anteriores se obtiene que la matriz covarianza es igual a la inversa de la matriz de los coeficientes de las ecuaciones normales por la varianza unidad.

$$S_x^2 = S_0^2\ [(A^t\ P\ A)^{-1}] = S_0^2\ Q$$

Despejando el valor de la desviación estándar en la expresión anterior se obtiene el error para cualquier incógnita:

$$S_{Xi} = S_0\sqrt{Q_{XiXi}} \qquad \text{[II.30]}$$

donde Q_{XiXi} es el elemento diagonal de la matriz Q.

Para un punto A de coordenadas (X, Y), se obtiene una desviación S_x y S_y. Puesto que la probabilidad de que ambos errores se den conjuntamente es mínima, se adopta como área de posible error la elipse de tolerancia cuyos semiejes son dichas desviaciones. Esto significa que cualquier nueva posición que esté dentro de la elipse será aceptable (variaciones no representativas de movimientos) y que ninguna nueva posición dentro de la elipse tendrá un radio de desplazamiento superior al semieje mayor. Por esta razón se toma como valor de la precisión en las coordenadas el semieje mayor de ambos.

Ante la dificultad que conlleva trabajar de forma manual con sistemas matriciales en los que las matrices son tan grandes, es habitual trabajar con herramientas informáticas que facilitan la ardua labor matemática de resolver estos sistemas matriciales. Hoy día estas herramientas informáticas son fáciles de encontrar y manejar motivo por el cual su uso está totalmente generalizado.

4.3.- RESOLUCIÓN DE INTERSECCIONES DIRECTAS ANGULARES.

4.3.1.- Resolución de intersecciones directas, método numérico.

El método numérico se fundamenta en la resolución de todas las intersecciones directas conseguidas mediante las observaciones angulares efectuadas en cada campaña y la obtención de una media ponderada de las coordenadas en cada campaña, de forma que por diferencia de coordenadas se logra la deformación o desplazamiento de las dianas objeto de análisis.

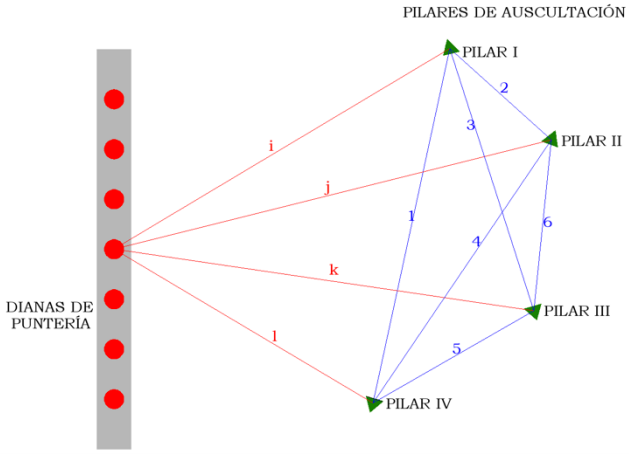


Figura II.13.- Conjunto de intersecciones directas de una diana de puntería.

En el caso de la figura anterior, en el que se han dispuesto cuatro pilares, al realizar todas las observaciones posibles se obtienen seis intersecciones directas:

$$Intersección\ directa\ 1 \Rightarrow \langle i \quad j \quad 2 \rangle$$

$$Intersección\ directa\ 2 \Rightarrow \langle i \quad k \quad 3 \rangle$$

$$Intersección\ directa\ 3 \Rightarrow \langle i \quad l \quad 1 \rangle$$

$$Intersección\ directa\ 4 \Rightarrow \langle j \quad k \quad 3 \rangle$$

$$Intersección\ directa\ 5 \Rightarrow \langle j \quad l \quad 4 \rangle$$

$$Intersección\ directa\ 6 \Rightarrow \langle k \quad l \quad 5 \rangle$$

Una vez resueltas estas intersecciones, se consiguen seis pares de coordenadas para cada diana, semejantes entre sí pero no idénticas. Es por ello por lo que para establecer en cada campaña las coordenadas de cada diana se realiza la media ponderada de los seis pares de coordenadas obtenidos previamente en función de la precisión de cada intersección.

Como se ha comentado en el párrafo anterior, para establecer las coordenadas de la diana en cada campaña, se calcula una media ponderada, que otorga más peso a las intersecciones más precisas. La incertidumbre de una intersección directa es función de la geometría que tiene cada intersección, y para determinarla es necesario analizar las observaciones que se llevan a cabo. Como desde cada pilar se realizan una observación angular a cada diana, se estima que en cada una de ellas se comente un error angular $\mathcal{E}_H$, formándose una zona de incertidumbre, tal y como puede apreciarse en la siguiente figura, sobre donde se encuentra la posición real del punto, que obviamente es desconocida.

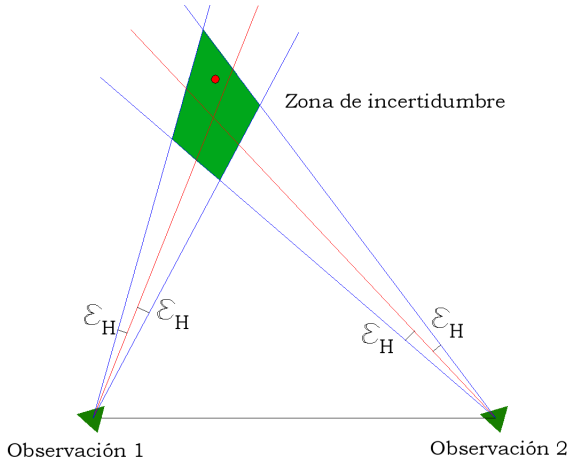


Figura II.14.- Afección del error angular en las intersecciones directas.

Ahora bien, si en el entorno de la intersección de las visuales desde ambas observaciones se considera que éstas son paralelas, consideración aceptable teniendo en cuenta que la probabilidad de que la desviación sea la máxima en ambas observaciones es mínima, la zona de incertidumbre adoptaría la forma que se puede apreciar en la figura anterior.

Así pues, la zona de incertidumbre se convierte en un cuadrilátero regular, en cuyo interior se puede inscribir una elipse, siendo el valor del semieje mayor de la misma la tolerancia de la intersección directa angular que se está analizando.

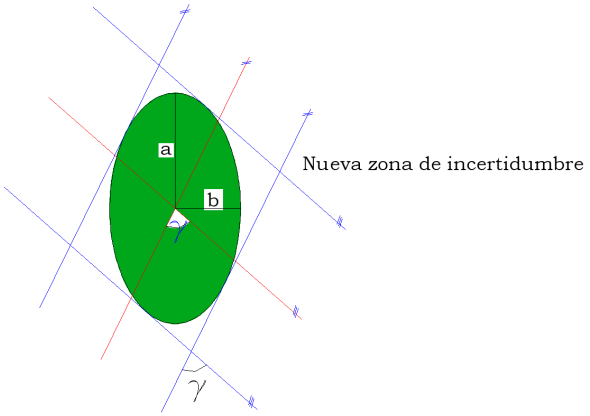


Figura II.15.- Elipse de error en las intersecciones directas angulares.

Una vez definida la zona de incertidumbre definitiva para la resolución de la intersección directa, resta por concretar los parámetros fundamentales de la elipse, es decir, los semiejes de la misma. Éstos se pueden deducir a partir de la teoría de los diámetros conjugados de una elipse (Apolonio).

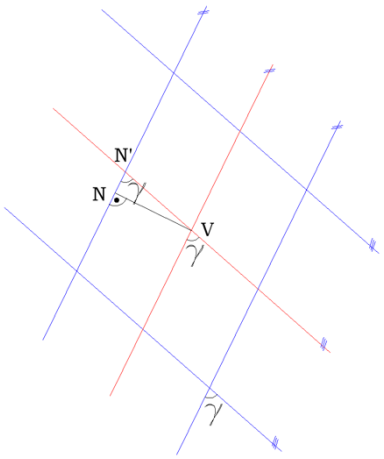


Figura II.16.- Valor del diámetro conjugado de la elipse.

En la figura anterior se puede apreciar que en el triángulo VNN', VN' es el diámetro conjugado, cuyo valor es de fácil obtención partiendo de que al valor VN se le puede aproximar al arco, resultando las siguientes expresiones:

$$VN = L\varepsilon_H\sqrt{2} \qquad [II.31]$$

$$\sin\gamma = \frac{VN}{VN'} \Rightarrow VN' = \frac{VN}{\sin\gamma} \qquad [II.32]$$

$$VN' = \frac{L\,\varepsilon_H\sqrt{2}}{\sin\gamma} \qquad [II.33]$$

Según la teoría de los diámetros conjugados, se tiene que:

$$a^2 + b^2 = 2VN'^2$$

$$2ab = 2VN'^2\sin\gamma$$

Sumando estas dos expresiones se obtiene:

$$a^2 + b^2 + 2ab = 2VN'^2(1 + \sin\gamma)$$

$$(a+b)^2 = 2VN'^2(1+\sin\gamma)$$

$$(a+b) = \sqrt{2}VN'\sqrt{1+\sin\gamma}$$

Restando estas dos mismas expresiones, resulta:

$$a^2 + b^2 - 2ab = 2VN'^2(1 - \sin\gamma)$$

$$(a-b)^2 = 2VN'^2(1-\sin\gamma)$$

$$(a-b) = \sqrt{2}VN'\sqrt{1-\sin\gamma}$$

Sumando ahora las dos expresiones deducidas anteriormente, se obtiene:

$$2a = \sqrt{2}VN'\left(\sqrt{1+\sin\gamma} + \sqrt{1-\sin\gamma}\right)$$

$$a = \frac{\sqrt{2}VN'}{2}\left(\sqrt{1+\sin\gamma} + \sqrt{1-\sin\gamma}\right)$$

Como igualdad trigonométrica se tiene la siguiente expresión conocida:

$$\frac{1}{2}\left(\sqrt{1+\sin\gamma} + \sqrt{1-\sin\gamma}\right) = \cos\frac{\gamma}{2}$$

que sustituyendo en la expresión del semieje mayor de la elipse resulta:

$$a = \sqrt{2} VN' \cos\frac{\gamma}{2}$$

De las expresiones obtenidas anteriormente se deduce:

$$VN' = \frac{L\ \varepsilon_H \sqrt{2}}{\sin\gamma}$$

Como igualdad trigonométrica se tiene la siguiente expresión conocida:

$$\sin\gamma = 2\sin\frac{\gamma}{2}\cos\frac{\gamma}{2}$$

Sustituyendo el valor de VN' en la expresión del semieje mayor obtenido y aplicando la igualdad trigonométrica, resulta:

$$a = \sqrt{2} VN' \cos\frac{\gamma}{2}$$

$$a = \frac{\sqrt{2} L\ \varepsilon_H \sqrt{2} \cos\frac{\gamma}{2}}{\sin\gamma}$$

$$a = \frac{2L\ \varepsilon_H \cos\frac{\gamma}{2}}{\sin\gamma}$$

$$a = \frac{2L\ \varepsilon_H \cos\frac{\gamma}{2}}{2\sin\frac{\gamma}{2}\cos\frac{\gamma}{2}}$$

Así, la expresión del valor del semieje mayor de la elipse de error, elipse que muestra la tolerancia o error esperado al realizar una observación angular mediante intersección directa, queda:

$$a = \frac{L\ \varepsilon_H}{\sin\frac{\gamma}{2}} \qquad [II.34]$$

donde:

L *es la distancia entre los pilares y la diana*

ε_H *es el error angular acimutal del instrumento de medida angular* $(teodolito)$

γ *es el ángulo de la intersección*

Habiendo acotado el valor del error esperado al realizar una observación angular mediante intersección directa, y en el caso de que todas las observaciones angulares mediante intersección directa se realicen con el mismo instrumento topográfico, de forma que el error angular acimutal del instrumento sea siempre el mismo, se puede obtener la importancia (el peso) que tiene cada observación, que va a depender como es lógico del ángulo de la observación, con la siguiente expresión:

$$Peso = \frac{\sin^2\frac{\gamma}{2}}{L^2} \qquad [II.35]$$

Con el peso se estable la media ponderada de las coordenadas para cada diana y con las coordenadas de cada diana en cada campaña, el vector desplazamiento de cada diana entre ambas campañas de observación.

4.3.2.- Resolución de intersecciones directas, método gráfico.

La resolución de intersecciones directas masivas mediante el método gráfico con objeto de obtener la tolerancia o error esperado de la observación angular requiere del conocimiento de las coordenadas de los pilares y de las coordenadas aproximadas de las dianas. De este modo, es habitual asignar como coordenadas aproximadas para

todas las campañas las coordenadas obtenidas por observación de las mismas en la primera de las campañas.

De esta manera, si las coordenadas de los elementos intervinientes, pilar y diana, son conocidas en primera aproximación, se pueden obtener las distancias aproximadas entre los pilares y cada diana de la auscultación. Esta distancia aproximada se puede considerar como constante entre observaciones consecutivas, ya que la variación va a ser mínima, especialmente en la auscultación de estructuras, y no va a influir en el resultado final del vector desplazamiento.

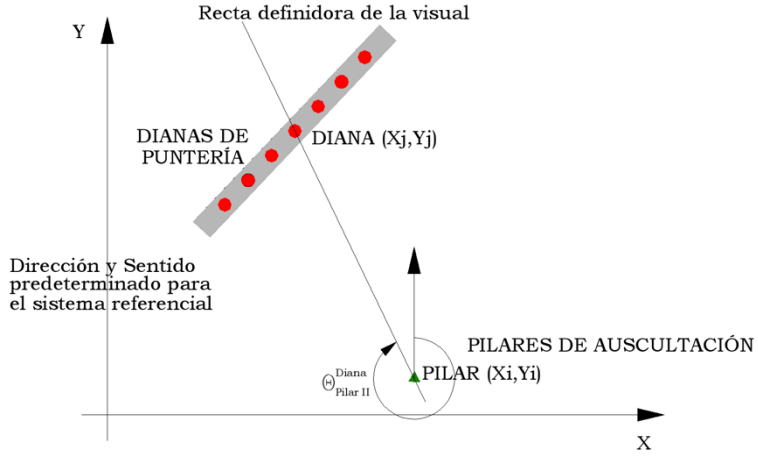


Figura II.17.- Conocimiento de las coordenadas de cálculo.

Aplicando la expresión general [II.3] al caso concreto, se establece el acimut de la visual pilar-diana de forma aproximada:

$$\theta_{pilar}^{diana} = arctg\frac{x_j - x_i}{y_j - y_i}$$

De la misma forma, aplicando la expresión general [II.4] al caso concreto, se establece la distancia aproximada entre el pilar y la diana:

$$d_i^j = \sqrt{(x_j - x_i)^2 - (y_j - y_i)^2}$$

Cabe reseñar que los valores así obtenidos, aunque sean aproximados se consideran constantes, dado que las pequeñas variaciones que caben esperar en una auscultación frente a los valores que suelen alcanzar las distancias entre los pilares y las dianas, hacen despreciables las variaciones que se pueden producir en los resultados finales. En algunas ocasiones, cuando se establecen movimientos en la red de pilares, se suelen incorporar a una nueva red de coordenadas de la red de pilares, en el caso de las dianas de puntería antes de incorporar al sistema unas nuevas coordenadas de la red de dianas, se analiza si los movimientos lo justifican.

La base operacional consiste en evaluar en el doblete (i, j) el valor del desplazamiento d_i^j, para un incremento angular detectado $\Delta\alpha_{ij}$ entre dos observaciones consecutivas, es decir, determinar el módulo del desplazamiento para un incremento angular entre dos observaciones consecutivas.

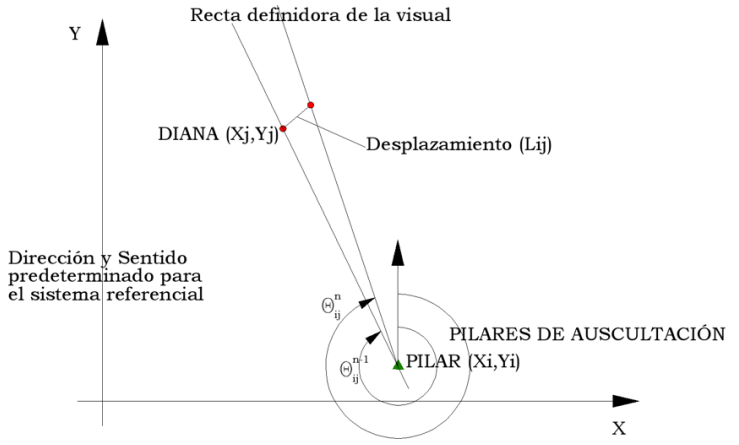


Figura II.18.- Fundamento de cálculo de la variación angular.

El incremento angular entre dos campañas consecutivas se define como:

$$\Delta\alpha_{ij} = \theta_{ij}^{n} - \theta_{ij}^{n-1} \qquad \text{[II.36]}$$

Ahora bien, este incremento angular se puede calcular trabajando con lecturas del ángulo horizontal o con acimutes:

- En el caso de tener convertidas las lecturas a acimutes mediante el cálculo de la desorientación y el posterior cálculo de acimutes, el incremento angular se obtiene restando los acimutes de cada campaña.

$$\Delta\alpha_P^D = \theta_{Pilar}^{Diana}(n) - \theta_{Pilar}^{Diana}(n+1) \qquad \text{[II.37]}$$

- En el caso de operar con lecturas, si en ambas campañas las lecturas se realizan con el origen de ángulos horizontales en la misma dirección, el incremento de ángulos se consigue mediante la resta de lecturas.

$$\Delta\alpha_P^D = \theta_{Pilar}^{Diana}(n) - L_{Pilar}^{Diana}(n+1) \qquad \text{[II.38]}$$

- En el caso de operar con lecturas tomadas con diferentes orientaciones a la referencia externa o polar, el cálculo de la variación angular requiere tener en cuenta la diferencia de orientaciones.

$$\Delta\alpha_P^D = L_{Pilar}^{Polar}(n) - L_{Pilar}^{Diana}(n) - L_{Pilar}^{Polar}(n+1) + L_{Pilar}^{Diana}(n+1) \qquad \text{[II.39]}$$

Como el ángulo $\Delta\alpha_{ij}$ para este tipo de observaciones es muy pequeño, el arco se sustituye por la tangente y, por tanto, son aplicables las relaciones definidas para dos infinitésimos:

$$L_{ij} = D_i^j \Delta\alpha_{ij} = D_i^j \frac{\Delta\alpha_{ij}^{(")}}{206.265"} = D_i^j \frac{\Delta\alpha_{ij}^{(cc}}{636.620^{cc}} \qquad \text{[II.40]}$$

Considerando la distancia como un valor cuasi constante, se denomina sensibilidad de la visual (i,j) al valor:

$S_i^j = \frac{D_i^j}{206.265}$ para aplicarlo a incrementos en segundos sexagesimales

$S_i^j = \frac{D_i^j}{636.620}$ para aplicarlo a incrementos en segundos centesimales

Lo que permite calcular la tangente con la expresión:

$$L_{ij} = S_i^j \Delta\alpha_{ij} \qquad \text{[II.41]}$$

Una vez determinadas las tangentes se recurre a representar sobre un plano a gran escala $\left[\frac{5}{1}\text{ ó }\frac{10}{1}\right]$, en primera instancia la posición inicial de la diana, sobre ella las

direcciones de los acimutes aproximados del pilar a la diana y finalmente las líneas paralelas a una distancia que corresponde con las tangentes calculadas anteriormente. Tal y como se puede apreciar en la siguiente figura:

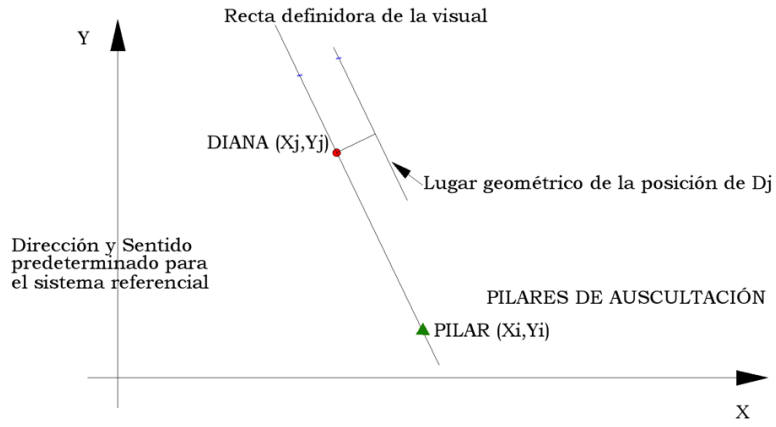


Figura II.19.- Representación de la nueva ubicación de la diana a lo largo de la paralela.

De esta forma se procede con el resto de los pilares y para cada diana. En el caso usual de disponer cuatro pilares, en el caso ideal de hacer la observación sin ningún tipo de error, la posición de la D_j queda definida por un punto perfectamente caracterizado, como el comportamiento ideal difícilmente se produce, lo que se genera habitualmente es un recinto formado por tantos lados como visuales y en el que cada lado corresponde a una de las visuales trazadas en paralelo. Así, la nueva posición de la diana hay que definirlo dentro de este polígono de error; de forma común se establece en el centro del mismo salvo que se quiera dar más o menos peso a alguna de las visuales realizadas. En la siguiente figura se muestra un gráfico habitual de la resolución de una diana de puntería por este método.

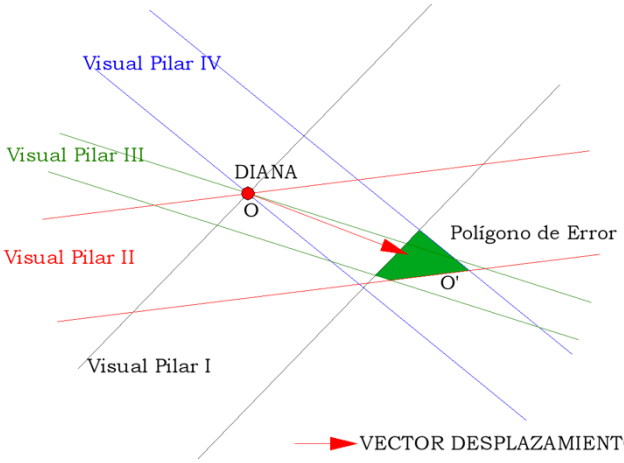


Figura II.20.- Resolución del desplazamiento de una diana por el método gráfico.

Las dimensiones del polígono tienen su importancia ya que indican en el global de las observaciones angulares realizadas el error cometido, influyendo, por tanto, en la definición del vector desplazamiento (magnitud y sentido).

4.3.3.- Resolución de intersecciones directas, variación de coordenadas.

El método de variación de coordenadas se fundamenta en que al variar un ángulo evaluado desde un punto fijo i, varían de una forma concreta las coordenadas del punto extremo j, según se puede ver en la siguiente figura.

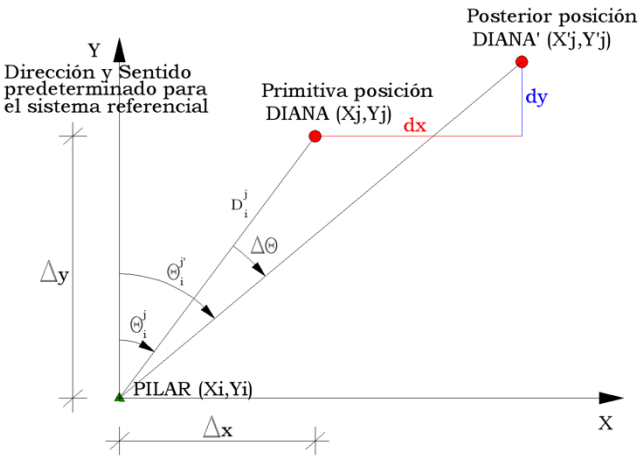


Figura II.21.- Desplazamientos lineales debidos a variaciones angulares.

Aplicando la expresión general de los acimutes [II.3] se deduce:

$$\tan\theta_i^j = \frac{x_j - x_i}{y_j - y_i}$$

Derivando ambos miembros de esta expresión, se obtiene:

$$\frac{1}{\cos^2\theta_i^j}\,d\theta_i^j = \frac{y_j - y_i}{(y_j - y_i)^2}dx - \frac{x_j - x_i}{(y_j - y_i)^2}dy$$

En la misma figura:

$$\cos^2\theta_i^j = \frac{(y_j - y_i)^2}{(D_i^j)^2}$$

Sustituyendo en la ecuación anterior y simplificando:

$$d\theta_i^j = \frac{y_j - y_i}{(D_i^j)^2}dx - \frac{x_j - x_i}{(D_i^j)^2}dy$$

Que de forma simplificada se suele transcribir como:

$$\Delta\theta = \frac{1}{D_i^2}[\Delta y\, dx_i - \Delta x\, dy_i] \qquad [II.42]$$

Que constituye la ecuación del método, donde:

$\Delta\theta$ *es el incremento angular entre campañas*

D_i^j *es la distancia aproximada entre cada pilar y diana*

Δx *es el incremento de abscisas aproximadas entre pilas y diana*

Δy *es el incremento de ordenadas aproximadas entre pilar y diana*

Aplicando la ecuación anterior a cada una de las visuales realizadas desde cada pilar se obtiene un sistema de tantas ecuaciones como visuales y dos incógnitas:

$$\Delta\theta_I^d = \frac{1}{D_I^{d\,2}}\left[\Delta y_{\mathrm{I}}^{\mathrm{d}}\, dx - \Delta x_{\mathrm{I}}^{\mathrm{d}}\, dy\right]$$

$$\Delta\theta_{II}^d = \frac{1}{D_{II}^{d\,2}}\left[\Delta y_{\mathrm{II}}^{\mathrm{d}}\, dx - \Delta x_{\mathrm{II}}^{\mathrm{d}}\, dy\right]$$

$$\Delta\theta_{III}^d = \frac{1}{D_{III}^{d\,2}}\left[\Delta y_{\mathrm{III}}^{\mathrm{d}}\, dx - \Delta x_{\mathrm{III}}^{\mathrm{d}}\, dy\right]$$

$$\Delta\theta_{IV}^{d} = \frac{1}{D_{IV}^{d\,2}}\left[\Delta y_{\mathrm{IV}}^{\mathrm{d}}\, dx - \Delta x_{\mathrm{IV}}^{\mathrm{d}}\, dy\right]$$

Que se puede expresar de la siguiente forma matricial:

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta_{I}^{d} \\ \Delta\theta_{II}^{d} \\ \Delta\theta_{III}^{d} \\ \Delta\theta_{IV}^{d} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta y_{I}^{d}}{D_{I}^{d\,2}} & \frac{\Delta x_{I}^{d}}{D_{I}^{d\,2}} \\ \frac{\Delta y_{II}^{d}}{D_{II}^{d\,2}} & \frac{\Delta x_{II}^{d}}{D_{II}^{d\,2}} \\ \frac{\Delta y_{III}^{d}}{D_{III}^{d\,2}} & \frac{\Delta x_{III}^{d}}{D_{III}^{d\,2}} \\ \frac{\Delta y_{IV}^{d}}{D_{IV}^{d\,2}} & \frac{\Delta x_{IV}^{d}}{D_{IV}^{d\,2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx \\ dy \end{bmatrix}$$

O lo que es lo mismo

$$\{\Delta\theta\} = [A]\{x\} \qquad \text{[II.43]}$$

donde:

$\Delta\theta$ *se denomina a la matriz de variaciones angulares.*

A *se denomina a la matriz de configuración.*

x *se denomina a la matriz de desplazamientos.*

Para resolver el sistema de matrices se multiplica por la matriz transpuesta de la de configuración:

$$A^t \Delta\theta = A^t A\, x$$

Denominando:

$$P = A^t\, \Delta\theta$$

$$N = A^t\, A$$

Sustituyendo:

$$P = N\, x$$

Y finalmente, despejando se obtiene la matriz de desplazamientos:

$$x = N^{-1}\, P \qquad \text{[II.44]}$$

Cuyas componentes permiten establecer los valores de los desplazamientos en X e Y. De forma habitual es lógico observar desde más de dos pilares de auscultación, con lo cual se genera una redundancia de datos que facilita obtener las desviaciones, (matriz de residuos), para lo que partiendo de la ecuación [II.43] en la que se incorporan los residuos:

$$\Delta\theta = A\, x + R \qquad \text{[II.45]}$$

$$R = \Delta\theta - A\, x$$

Lo que permite establecer la matriz de residuos y ya se pueden aprovechar los análisis basados en inferencia estadística, siguiendo modelos de Markov o procedimientos Bayesianos.

La varianza se obtiene como:

$$S^2 = \frac{R^t\, R}{m-n} \qquad \text{[II.46]}$$

donde:

$$m \ es\ el\ número\ de\ ecuaciones\ =\ número\ de\ visuales\ desde\ pilares$$

$$n \ es\ el\ número\ de\ incógnitas\ =\ dx\ ,dy$$

Siendo la desviación típica S:

$$S = \sqrt{S^2} = \sqrt{\frac{R^t\,R}{m-n}} \qquad [II.47]$$

Y la matriz varianza-covarianza se obtiene como:

$$C = S^2 N^{-1} = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 \sigma_{yx} \\ \sigma_{xy} \sigma_y^2 \end{bmatrix} \qquad [II.48]$$

que aplicando la teoría de los autovalores y autovectores se llega a:

$$\sigma^2 = \frac{1}{2}\left[\sigma_x^2 + \sigma_y^2 \pm \sqrt{\left(\sigma_x^2 - \sigma_y^2\right)^2 + 4\sigma_{xy}^2}\right] \Rightarrow \sigma \begin{cases} \sigma_{máx} \\ \sigma_{mín} \end{cases} \qquad [II.49]$$

$$\tan 2\theta = \frac{2\sigma_{xy}}{\sigma_y^2 - \sigma_x^2} \qquad [II.50]$$

obteniéndose las máximas y mínimas desviaciones, $\sigma_{máx.}$ y $\sigma_{mín.}$ Estos valores quedan reflejados en la siguiente figura, donde también se determina el acimut del eje principal de la elipse.

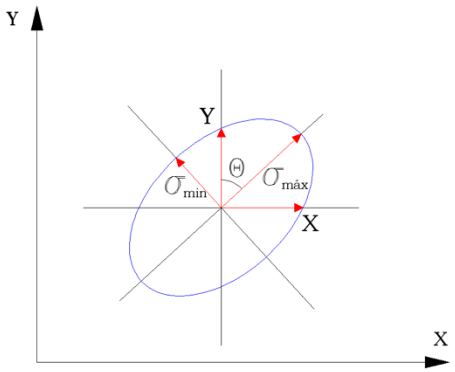


Figura II.22.- Establecimiento de la elipse de error en variación de coordenadas.

4.4.- RESOLUCIÓN DE INTERSECCIONES INVERSAS ANGULARES.

4.4.1.- Introducción.

Al igual que las intersecciones directas, las inversas se pueden resolver mediante los tres métodos, el numérico, el gráfico y el de variación de coordenadas. Este último se ha generalizado debido a posibilidades que los otros no tienen, como puede ser la facilidad de programación, el permitir calcular elipses de error, etc., y que, en definitiva, han hecho que este método sea el que se utilice habitualmente, lo que justifica que para las intersecciones inversas solamente se desarrolle el método de variación de coordenadas.

4.4.2.- Resolución de intersecciones inversas, variación de coordenadas.

Sobre los pilares desde los que se realiza la auscultación geodésica, y sobre los que se ha basado toda la metodología y cálculos anteriores de la intersección directa, es necesario conocer el grado de estabilidad de los mismos. A este conocimiento se llega haciendo desde los pilares intersecciones inversas a los puntos de seguridad, puntos cuyas coordenadas se consideran fijas en el tiempo al estar ubicados en zonas suficientemente alejadas del territorio de influencia del elemento a auscultar y situados estratégicamente en puntos estables.

Habitualmente se realizan intersecciones inversas múltiples en vez de intersecciones inversas simples, es decir, a cuatro o más puntos de seguridad, lo que produce un sistema más complejo, pero con redundancia de datos, que a su vez permite obtener comprobaciones y errores.

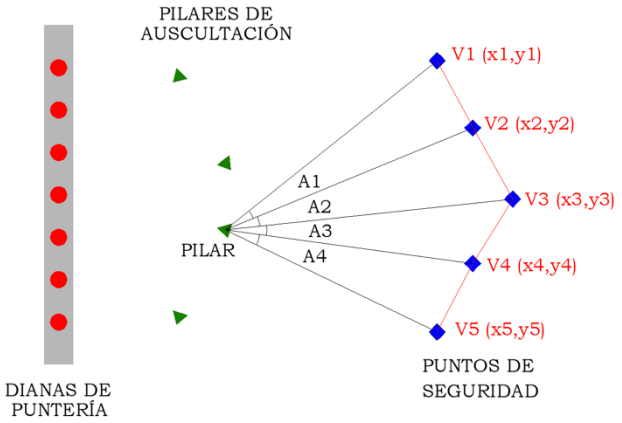


Figura II.23.- Establecimiento de los ángulos de una intersección inversa múltiple.

En la resolución de las intersecciones inversas mediante método de variación de coordenadas es indispensable conocer por un lado los ángulos existentes entre el pilar y cada uno de los puntos de seguridad, y por otro lado las coordenadas iniciales de la red de vértices, ajustadas por mínimos cuadrados.

Una vez realizados los cálculos para la campaña de auscultación inicial y obtenidas las coordenadas de la red, en campañas posteriores se toman estas mismas coordenadas como definitivas para los puntos de seguridad y aproximadas para los pilares, y a partir de esta consideración es cuando se aplica el método de variación de coordenadas para el cálculo de la hipotética y nueva situación del pilar.

Con estas hipótesis, y de forma similar al apartado anterior, se aplica el método general de variación de coordenadas a las intersecciones inversas, en las que las consideraciones generales son iguales, tal y como se puede apreciar en la siguiente figura:

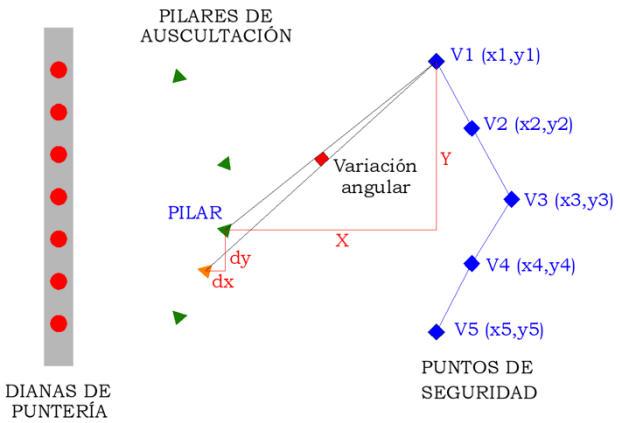


Figura II.24.- Variación de coordenadas aplicada a las intersecciones inversas.

La expresión resultante es la misma que para las intersecciones directas [II.42], salvo que ahora se aplica tantas veces como puntos de seguridad se observen, mientras que en el caso de las directas se aplicaba tantas veces como pilares hubiesen observado a la diana.

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta_I^{PS1} \\ \Delta\theta_I^{PS2} \\ \Delta\theta_I^{PS3} \\ \Delta\theta_I^{PS4} \\ \cdots \cdots \\ \Delta\theta_I^{PSn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta y_I^{PS1}}{D_I^{PS1^2}} & \frac{\Delta x_I^{PS1}}{D_I^{PS1^2}} \\ \frac{\Delta y_I^{PS2}}{D_I^{PS2^2}} & \frac{\Delta x_I^{PS2}}{D_I^{d^2}} \\ \frac{\Delta y_I^{PS3}}{D_I^{PS3^2}} & \frac{\Delta x_I^{PS3}}{D_I^{PS3^2}} \\ \frac{\Delta y_I^{PS4}}{D_I^{PS4^2}} & \frac{\Delta x_I^{PS4}}{D_I^{PS4^2}} \\ \cdots \cdots & \cdots \cdots \\ \frac{\Delta y_I^{PSn}}{D_I^{PSn^2}} & \frac{\Delta y_I^{PSn}}{D_I^{PSn^2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx \\ dy \end{bmatrix} \qquad [II.51]$$

Lo que vuelve a generar un sistema matricial tipo [II.43], que se resuelve de la misma forma y con el mismo potencial que el método de variación de coordenadas en cuanto a resultados y elipses de error.

4.5.- DISEÑO DE LAS REDES IMPLICADAS.

Como se ha referido anteriormente, la importancia del diseño de las diferentes redes intervinientes en la auscultación geodésica es fundamental para determinar a priori el error previsible en la resolución de la propia auscultación. Recordando este aspecto, las redes que participan en la auscultación son: la red de puntos de seguridad, la red de pilares de auscultación y la red de dianas, resolviéndose las dos primeras mediante intersecciones inversas para delimitar posibles movimientos de los pilares de auscultación entre diferentes campañas y las dos últimas mediante intersecciones directas con el objeto de definir posibles variaciones de posición de las dianas.

Ya se ha fundamentado matemáticamente en los apartados anteriores el error esperado en la resolución de intersecciones directas e inversas, resulta de aplicar las expresiones [II.47], [II.48], [II.49] y [II.50]. A la vista de éstas expresiones, se deduce que la incertidumbre es función de:

- La precisión en la medida de los ángulos, ya que dicha precisión condiciona la matriz de variaciones angulares $\Delta\theta$.
- La geometría de los puntos que conforman la red, ya que ésta se traduce en la matriz de configuración de la red [A].
- El número de visuales de la observación ya que condiciona el valor de la varianza S concretamente a través del valor [m-n].

5.- LA OBSERVACIÓN DISTANCIOMÉTRICA.

5.1.- INTRODUCCIÓN.

Siguiendo un desarrollo paralelo a los métodos angulares y en base a los desarrollos de los mismas referencias allí descritas [FERRE-92], [OJEDA-84] y [DELUI-09], las posibles operaciones o procedimientos sustitutivos de las intersecciones directas, intersecciones inversas y triangulación serían la intersección directa de distancias, intersección inversa de distancias y trilateración, aunque en el caso anterior sería muy sencillo pasar de distancia a ángulo y seguir la metodología habitual de la forma siguiente.

El conocimiento de (x_I, y_I) y (x_{II}, y_{II}) permite determinar el valor de la distancia entre ambos puntos, mediante la expresión [II.3]:

$$D_I^{II} = \sqrt{(x_{II} - x_I)^2 + (y_{II} - y_I)^2}$$

Medidas D_I^V y D_{II}^V, se puede aplicar el teorema del coseno:

$$(D_{II}^V)^2 = (D_I^{II})^2 + (D_I^V)^2 - 2\, D_I^{II}\, D_I^V \cos\alpha \qquad \text{[II.52]}$$

Y calcular α ó β según las necesidades:

$$\alpha = arccos\left[\frac{(D_{II}^V)^2 - D_I^{II} - (D_I^V)^2}{2\, D_I^{II}\, D_I^V}\right] \qquad \text{[II.53]}$$

5.1.1.- Intersección de distancias.

En el establecimiento de la posición de puntos por medio de la medición de distancias, para el caso de dos pilares $P_I(x_I, y_I)$ y $P_{II}(x_{II}, y_{II})$ establecidas las distancias, tal y como se puede apreciar en la siguiente figura:

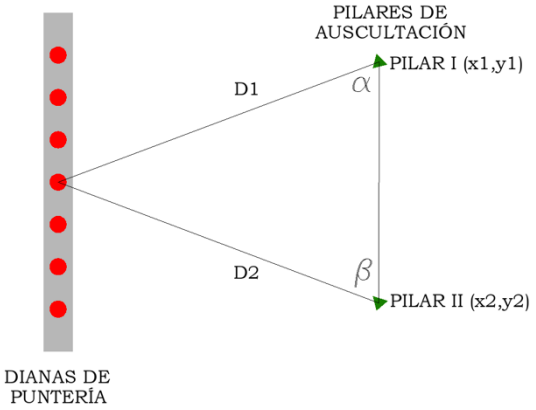


Figura II.25.- Esquema genérico de la trilateración.

Las coordenadas del punto V se obtienen en el sistema referencial definido por los pilares mediante las expresiones:

$$\left.\begin{aligned}(x_V - x_I)^2 + (y_V - y_I)^2 &= (D_I^V)^2\\ (x_V - x_{II})^2 + (y_V - y_{II})^2 &= (D_{II}^V)^2\end{aligned}\right\} \qquad \text{[II.54]}$$

El sistema se caracteriza por tener dos ecuaciones con dos incógnitas, pudiéndose resolver de forma sencilla y estricta. Este procedimiento de resolución otorga a la distancia dos propiedades características que la diferencian del observable angular, siendo la primera la total independencia del observador, y la segunda, y no por ello menos importante, la pérdida de protagonismo de la posición del instrumento topográfico en los vértices de coordenadas conocidas, quedando el concepto de intersección directa e inversa restringido a la determinación de la ubicación del instrumento dentro de los vértices del triángulo.

Al igual que en las observaciones angulares es necesario continuar con los sistemas en los que se observa la distancia de forma múltiple, obteniendo un sistema más complejo, pero con redundancia de datos, que permite obtener comprobaciones y errores, generando así las llamadas intersecciones múltiples de distancia.

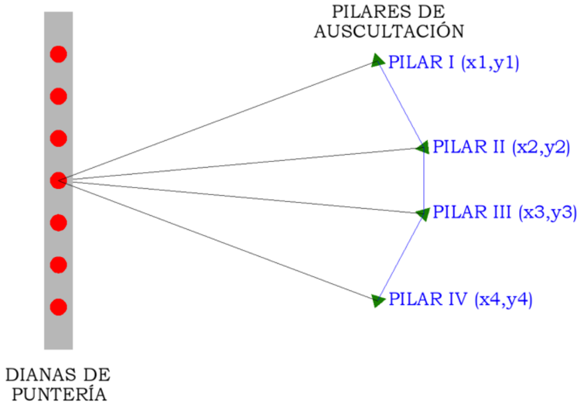


Figura II.26.- La distancia en la intersección inversa múltiple.

El tradicional sistema indeterminado, pero con más ecuaciones que incógnitas, requiere de un procedimiento que lo sustituya, lo mecanice y consiga tener un tratamiento estadístico adosado. En este caso, en el que existen más ecuaciones que incógnitas, existe redundancia de datos y partiendo de la matriz de residuos, se puede obtener interesante información que refleje la bondad del resultado obtenido.

$$\begin{array}{c} (x_{PI}-x_D)^2+\left(y_{PI}-y_D\right)^2=(D_{PI}^D)^2 \\ (x_{PII}-x_D)^2+\left(y_{PII}-y_D\right)^2=(D_{PII}^D)^2 \\ (x_{PIII}-x_D)^2+\left(y_{PIII}-y_D\right)^2=(D_{PIII}^D)^2 \\ (x_{PIV}-x_D)^2+\left(y_{PIV}-y_D\right)^2=(D_{PIV}^D)^2 \\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\ (x_P-x_D)^2+\left(y_P-y_D\right)^2=(D_P^D)^2 \end{array} \qquad [II.55]$$

5.1.2.- Problemática de la observación.

En la mayor parte de los trabajos de campo la toma de datos con la clásica observación angular sigue siendo la estrategia habitual, pero cada vez está siendo más sustituida por la de distancias debido, fundamentalmente, a la extraordinaria precisión que la distanciometría electrónica ha otorgado a la observable distancia.

Esta circunstancia, añadida a la indeterminación en las punterías cuando se utilizan paneles de prismas para realizar las orientaciones externas, debido a la falta de perpendicularidad del plano del prisma con el eje de colimación, crea una mini-desorientación tanto en planta como en alzado que altera los ángulos acimutal y cenital, circunstancia despreciable para el observable distancia, tal y como se puede apreciar en la siguiente figura.

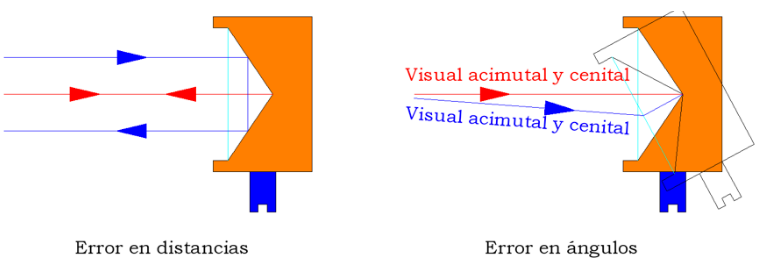


Figura II.27.- Problemática de las observaciones de campo.

5.2.- INSTRUMENTAL TOPOGRÁFICO.

El instrumental topográfico empleado en la observación distanciométrica, generalmente es el distanciómetro incluido en la estación topográfica, y se debe caracterizar por garantizar una precisión de $1\,mm + 1\,ppm$. Además, como complemento indispensable, se utilizaron prismas reflectores para la observación de distancias, así como las basadas que permiten montar el equipo con su base nivelante en un mecanismo de centrado forzoso.

Asimismo, para establecer los parámetros atmosféricos necesarios y poder obtener la corrección meteorológica con una precisión de $1\,ppm$, se debe emplear una estación meteorológica que marca directamente en pantalla de cristal líquido los datos de presión, temperatura y humedad relativa en el momento de realizar la observación, como puede apreciarse en la siguiente figura.



Imagen II.13.- Estación meteorológica de uso topográfico.

Para determinar los parámetros atmosféricos se recomienda utilizar simultáneamente dos estaciones meteorológicas, una situada en el pilar y manipulada por el observador, y otra en el lugar donde se ubica el prisma reflector y manejada por el auxiliar, de forma que se pueda establecer una corrección atmosférica promedio, mucho más aproximada a la trayectoria real que recorre la onda electromagnética en el momento de realizar la medición.

5.3.- MÉTODO DE OBSERVACIÓN.

Así como en la medida de ángulos los métodos de observación están perfectamente acotados en función de la precisión que se pretenda obtener, en la medida de distancias no existen unos métodos preconcebidos, motivo por el cual la observación de distancias se recomienda que sea realizada con la misma metodología que los ángulos, es decir, mediante vueltas de horizonte realizadas en círculo directo, de forma que se obtengan tres series de mediciones en cada pilar.

5.3.1.- Control de observaciones distanciométricas.

La influencia del observador en el resultado final de las distancias observadas es mínima, ya que ésta depende exclusivamente de factores meramente instrumentales, pero para cumplir esta premisa es fundamental que el observador tenga en cuenta los siguientes factores de vital importancia.

5.3.1.1.- Corrección atmosférica.

El principio de medición de distancias mediante instrumentos electrónicos es el siguiente: se coloca el instrumento en uno de los extremos del tramo a medir y un prisma en el otro; el instrumento emite un tren de ondas que se propaga a través del medio hasta el prisma, se refleja en éste y regresa al propio instrumento. La medición del tiempo de viaje de la onda (o de la diferencia de fase entre la onda emitida y recibida) permite el cálculo de la distancia entre el aparato y el prisma. En dicho cálculo, y debido a múltiples efectos, es necesario tener en cuenta varias medidas correctoras.

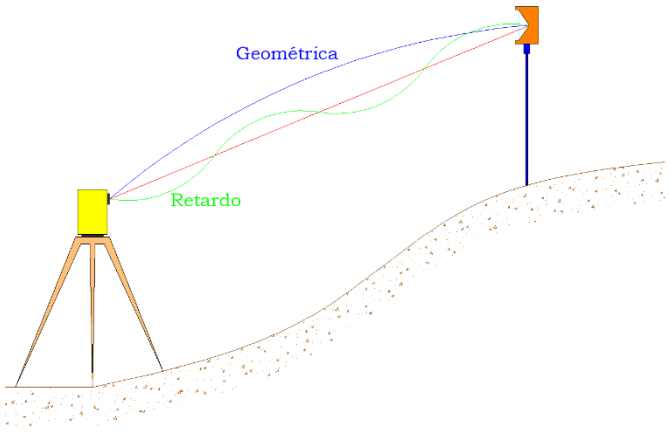


Figura II.28.- Efecto de la refracción en la medida de distancias.

El efecto corrector más importante se denomina "variación en la velocidad de propagación" y su fundamento a grandes rasgos se caracteriza porque la onda atraviesa diferentes capas de la atmósfera, cada una de ellas con un índice de refracción distinto, por lo que la velocidad con la que se propaga por el medio será distinta a la velocidad teórica de la radiación electromagnética en el vacío. Para corregir este fenómeno, a la distancia se le debe aplicar la denominada "corrección por velocidad de propagación", más conocida como "refracción atmosférica". El conocimiento de la velocidad de propagación del tren de ondas por el medio es de gran importancia para el cálculo de la distancia, pudiéndose expresar de la forma:

$$v = \frac{c_0}{n} \qquad [II.56]$$

donde:

c_0 *es la velocidad de la radiación electromagnética en el vacío*

n *es el índice de refracción del medio en el que se propagan las ondas*

Es decir, que conocer el valor del índice de refracción es fundamental para corregir la velocidad real con respecto a la teórica. El instrumento facilita una distancia para una atmósfera hipotética, definida por el índice de refracción estándar, es decir:

$$d_0 = \frac{c_0\, t}{n_s} \qquad [II.57]$$

donde:

t *es la mitad del tiempo invertido por el tren de ondas* $(estación - prisma - estac.)$

c_0 *es la velocidad de la radiación electromagnética en el vacío*

n_s *es el índice de refracción para una atmósfera estándar*

Los fabricantes de éstos instrumentos topográficos adoptan unos modelos de comportamiento de estándar, los cuales se adaptan a la realidad de la atmósfera existente en función de la presión y la temperatura.

Así, en los instrumentos asiáticos lo normal es emplear como principales parámetros:

$$[Presión: 1.013\ mb] - [Temperatura: 15^oC]$$

Y en el instrumental centroeuropeo:

$$[Presión: 1.013\ mb] - [Temperatura: 12{,}5^oC]$$

De este modo, tanto en una u otra localización, se obtendrá la distancia verdadera si en el momento de la observación la atmósfera existente coincide con estos valores, aspecto poco probable, ante lo cual habrá que hacer la corrección correspondiente.

A.- Cálculo del coeficiente instantáneo de variación.

Si el instrumento topográfico mide la distancia de manera directa, se tiene el siguiente valor en la expresión:

$$D = \frac{c_0\, t}{n_s}$$

En el instante de realizar la medición de la distancia, el índice de refracción de la atmósfera es con una alta probabilidad, diferente al estándar, por lo que la medida devuelta por el instrumento no será la real y habrá que realizar la pertinente corrección sobre la misma, a saber:

$$Distancia\ real\ \Rightarrow D_R = \frac{c_0\, t}{n_R} \qquad [II.58]$$

$$Distancia\ medida\ \Rightarrow D_m = \frac{c_0\, t}{n_s} \qquad [II.59]$$

Y por lo tanto, la corrección se realizará con arreglo a la siguiente expresión:

$$Corrección = D_R - D_m = \frac{c_0\, t}{n_R} - \frac{c_0\, t}{n_s} = \frac{c_0\, t}{n_s}\left(\frac{n_s}{n_R} - 1\right) = D_m\left(\frac{n_s}{n_R} - 1\right) \qquad [II.60]$$

B.- Resolución habitual del coeficiente instantáneo de variación.

Este problema, los fabricantes de instrumentos lo resuelven a través de una fórmula que establece la corrección atmosférica de forma rápida y suficientemente precisa para el uso habitual del instrumento:

$$Corrección \Rightarrow C = 282{,}2 - \frac{0{,}2908}{1+0{,}00366\,T} P \qquad [II.61]$$

donde:

$C\ es\ la\ corrección\ en\ partes\ por\ millón\ (ppm)$

$T\ es\ la\ temperatura\ en\ ºC$

$P\ es\ la\ presión\ en\ mb$

Es habitual, encontrar esta fórmula en forma de ábacos para agilizar el coeficiente de corrección, ábacos como es lógico en función de la presión y la temperatura, según se puede apreciar en la siguiente figura:

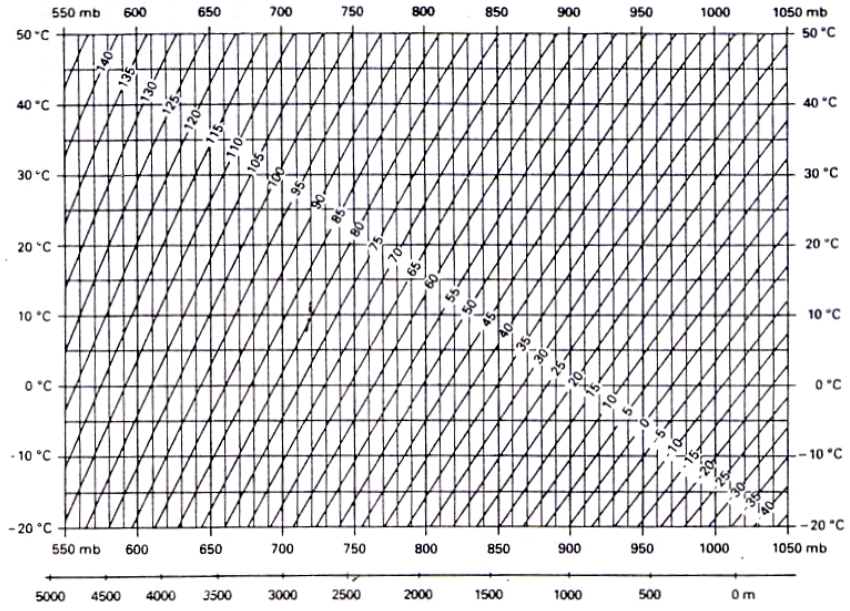


Imagen II.14.- Ábaco de corrección atmosférica.

C.- Estudio riguroso del coeficiente instantáneo de variación.

Barrell y Sears definen el índice de refracción estándar para una onda monocromática, en una atmósfera estándar (aire con un contenido del 0,03% $de\ CO_2$ a una temperatura de 0^oC y una presión de 760 $mmHg$, mediante la siguiente expresión:

$$n_{onda} = 1 + \left[2.876{,}04 + \frac{16{,}288}{\lambda^2} + \frac{0{,}136}{\lambda^4}\right] 10^{-7} \qquad \text{[II.62]}$$

donde:

$\lambda\ es\ la\ longitud\ de\ onda\ en\ micras\ (\mu m)$

Ahora bien, si el instrumento tiene un distanciómetro mediante infrarrojos, la luz es emitida en trenes de ondas, y como consecuencia el índice de refracción será el del grupo, que en una atmósfera estándar (aire con un contenido del 0,03% $de\ CO_2$ a una temperatura de 0^oC y una presión de 760 $mmHg$) y sin humedad, viene dado por la siguiente expresión:

$$n_{grupo} = 1 + \left[2.876{,}04 + 3\frac{16{,}288}{\lambda^2} + \frac{0{,}136}{\lambda^4}\right] 10^{-7} \qquad \text{[II.63]}$$

Esta fórmula experimental, se realizó para longitudes de onda entre $(0{,}436 - 0{,}644\ \mu m)$, las cuales se ha demostrado que don válidas hasta el infrarrojo cercano.
Según Barrell y Sears, si el grupo de ondas está en un medio diferente al estándar, el índice del grupo de ondas resulta:

$$(n_{pte}\text{-}1)10^6 = (n_{grupo}\text{-}1)10^6 \frac{P[1+P(1{,}049\text{-}0{,}0157T)10^{-6}]}{760{,}606(1+\alpha T)} - \left(0{,}0624 - \frac{0{,}00204}{\lambda^2}\right)\frac{e}{(1+\alpha T)}$$

Que de forma simplificada:

$$n_{pte} = 1 + \frac{n_{grupo}-1}{1+\alpha T}\frac{P}{760} - \frac{5{,}5e10^{-8}}{1+\alpha T} \qquad \text{[II.64]}$$

Expresión válida para:

$10^oC < T < 30^oC$

$720\ mmHg < P < 800\ mmHg$

$e \simeq 20\ mmHg$

y por tanto tomando como expresión definitiva para la corrección:

$$Corrección \Rightarrow C = D_m\left(\frac{n_s}{n_R} - 1\right)$$

En esta expresión hay que dar valor a las variables de las condiciones estándar y los particulares del medio para llegar al valor de la corrección.

Si la atmósfera que se considera es la real, con una presión p y una temperatura t, y en presencia de humedad, la relación es más compleja. La humedad en el aire queda reflejada a través del e, tensión de vapor.

La atmósfera contiene vapor de agua, el cual ejerce un presión, denominada presión (tensión) de vapor y para cada temperatura de la atmósfera (temperatura seca) tiene un valor característica.

Temperatura (ºC)	Presión del vapor de agua (mmHg)
0	4,58
5	6,54
10	9,21
15	12,79
20	17,54
25	23,76
30	31,82
35	42,18
40	55,32
45	71,88
50	92,51

Tabla II.1.- Temperaturas y presiones del vapor de agua.

La presión del vapor de agua se puede determinar de dos formas, ya sea con un psicómetro o con un higrómetro. La precisión de ambos es similar pero es de uso más extendido por su facilidad de uso, el higrómetro.

El psicrómetro está formado por dos termómetros; determina la humedad relativa midiendo la temperatura ambiente y la temperatura de una fuente de agua en evaporación. El bulbo de uno de ellos está envuelto en un tejido que se mantiene siempre humedecido.

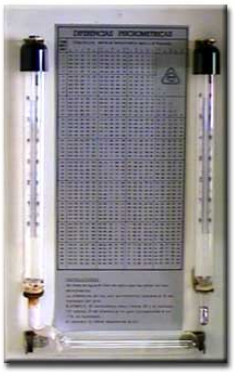


Imagen II.15.- Psicómetro de uso topográfico.

Su principio de funcionamiento se basa en la evaporación desde la superficie del bulbo húmedo dentro de la corriente de aire enfría el bulbo húmedo hasta una temperatura estacionaria tal que haya un equilibrio entre el calor perdido por la evaporación y el ganado por la convección y radiación. Esta temperatura depende de la presión, temperatura y humedad de la atmosfera. Así pues cuando se dispone de un valor aproximado de presión, la humedad puede obtenerse a partir de las temperaturas observadas de los bulbos húmedo y seco.

Fórmula psicométrica:

$$HA = E' - 0{,}5(t_s - t_h)$$

donde:

t_s *es la temperatura del termómetro seco*

t_h *es la temperatura del termómetro húmedo*

E'*es la máxima tensión de la temperatura*

Según las temperaturas obtenidas, temperatura seca y temperatura húmeda, el valor de la tensión de vapor se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$e = E - 0{,}00066(1 + 0{,}0115t_h)p(t - t_h) \qquad [II.65]$$

donde:

t_h *es la temperatura húmeda en grados centígrados*

E *es la tensión máxima de vapor de agua en mmHg*

Esta tensión máxima E se puede obtener de la tabla anterior o a través de la siguiente expresión:

$$logE = 26{,}1262 - \frac{3.049{,}50}{273{,}2+t_h} - 5{,}86970\ log(273{,}2 + t_h) \qquad [II.66]$$

Utilización del higrómetro

Si alternativamente, se usa el higrómetro, éste refleja la humedad relativa H(%), con lo que la tensión de vapor se puede obtener según la siguiente expresión:

$$e = \frac{H(\%)}{100}\ E \qquad [II.67]$$

donde:

E *es la presión de saturación* (*expresión anterior*)

Hasta hace muy poco tiempo, la humedad no se tenía en cuenta como valor para la corrección atmosférica ya que la influencia era mínima, sin embargo con el instrumental topográfico actual es una variable a tener en cuenta ya que puede tener más influencia que la propia tolerancia del distanciómetro ($1\ mm + 1\ ppm$).

5.3.1.2.- La constante de equipo.

El funcionamiento del distanciómetro se basa en emitir el tren de ondas desde su centro eléctrico, partiendo hacia el prisma, que marca la distancia a medir, esto lleva a tener en cuenta dos consideraciones:

- el eje mecánico del instrumento no coincide con el centro eléctrico.
- el eje mecánico del sistema receptor (prisma) no coincide con su centro óptico.

esto se conoce como constante del equipo.

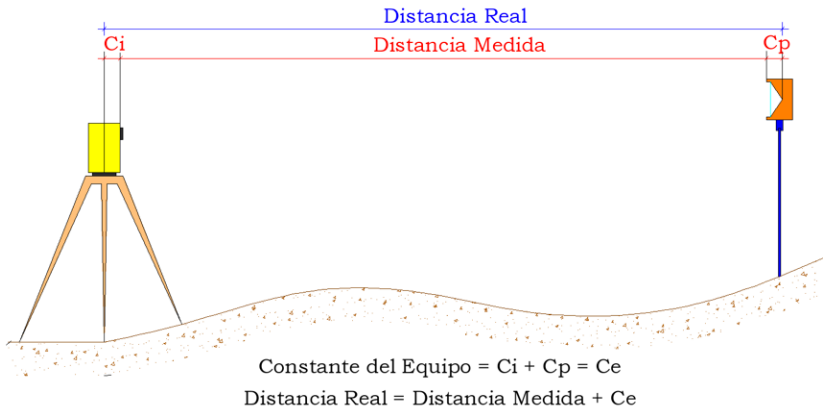


Figura II.29.- Concepto geométrico de la constante de equipo.

Normalmente este valor de la constante del equipo viene marcado por el propio fabricante del instrumento, no obstante, al ser equipos que se pueden complementar con diferentes accesorios y componentes, hace necesario tener que acudir a un método por el que se puede determinar dicha constante, procedimiento conocido como

método del segmento partido; para ello son necesarios tres puntos alineados inmóviles sobre una pendiente nula.

Establecidas las distancias geométricas como media recíproca de cada segmento, se puede calcular la constante del equipo, siendo ésta la diferencia entre un tramo y la suma de los segmentos que lo forman, consiguiendo de este modo una constante. De forma usual se hacen todas las combinaciones posibles de tramos en la base. Así se obtienen cinco constantes, siendo la del equipo la media de éstas. Cabe destacar que en este proceso no es necesario disponer de las distancias reales ya que es un método autosuficiente.

5.3.2.- Errores en la medida de distancias.

Las principales fuentes y orígenes de error cometidos en las observación distanciométrica por métodos electromagnéticos se describen en los dos siguientes apartados.

Ahora bien, es importante reseñar que en las auscultaciones geodésicas, en los métodos empleados para resolverlas, se comparan mediciones entre diferentes campañas (métodos diferenciales) y si se realizan con el mismo instrumento, los errores se anulan, siendo su incidencia por lo tanto mínima.

5.3.2.1.- Error de desfase.

El error de desfase es un error cíclico, que se repite en cada ciclo de observación, que en el caso de distanciometría, es en cada longitud de onda. Así, el error (M) que se comete al medir una distancia dada (X), es el mismo más una longitud de onda completa, y un error accidental con motivo de que la diferencia de fase tan solo se puede medir con la precisión de una milésima de longitud de onda, determinando el centímetro, por lo que el milímetro se establece a estima.

El error cíclico de una medida se evalúa a partir de la distancia patrón de forma que se pueda comparar con la medida. La diferencia entre ambas magnitudes se puede representar gráficamente, disponiendo en ordenadas los valores de los errores cíclicos y en abscisas la unidad de metro correspondiente. Así se puede interpolar los valores del error cíclico de las unidades de metro no determinadas.

5.3.2.2.- Error de escala.

El error de escala se da como consecuencia del desajuste en la generación de la onda. Así, si la frecuencia de la modulación aumenta, las longitudes de onda disminuyen y por lo tanto "cabrán" más ondas en una distancia y por tanto provoca que las lecturas sean mayores que los que son en realidad y ante esto hay que aplicar un factor de escala, determinado por la siguiente expresión:

$$K = \frac{D_p}{D_c} \qquad \text{[II.68]}$$

donde:

K *es el factor de escala*

D_p *es la distancia patrón*

D_c *es la distancia corregida de constante de equipo y correcciones atmosféricas*

Como se ha comentado en la introducción de este apartado, ninguno de estos dos errores tiene incidencia cuando se hacen observaciones por métodos diferenciales (auscultaciones geodésicas), ya que al realizar las observaciones con el mismo instrumento topográfico, ambos errores son iguales en la determinación de distancia y por tanto ambos se anulan en la comparación de distancias.

6.- RESOLUCIÓN DE AUSCULTACIONES PLANIMÉTRICAS MEDIANTE LA OBSERVACIÓN DE DISTANCIAS.

6.1.- INTRODUCCIÓN.

Para resolver la metodología, al igual que en el caso angular, es necesario disponer de las coordenadas de todos los elementos participantes, y para resolver la auscultación nuevamente se inicia por comprobar la estabilidad de los pilares y posteriormente el hipotético movimiento de los prismas reflectores, ubicados en las dianas de puntería. La comprobación de estabilidad de los pilares es fácilmente sustituible por un proceso de comparación de las distancias observadas entre los pilares y si los puntos de seguridad no cambian entre campañas, se puede considerar que no existe movimiento del pilar. Aún con todo, se plantea el cálculo correspondiente que se detallará más adelante. Tras esta verificación realizada sobre los pilares de la auscultación, se procede a determinar los posibles movimientos de las dianas de puntería, movimientos que se establecen a través de la resolución de las intersecciones directas, que para el caso distanciométrico no dejan de ser más que intersecciones distanciométricas.

Las metodologías empleadas para la resolución de las intersecciones distanciométricas, al igual que para el caso angular, responden a tres posibles alternativas: método numérico, gráfico y de variación de coordenada, que son convenientemente desarrollados en los siguientes epígrafes, basadas igualmente en los desarrollos llevados a cabo por [FERRE-92], [OJEDA-84] y [DELUI-09].

6.2.- RESOLUCIÓN DE INTERSECCIONES DIRECTAS DISTANCIOMÉTRICAS.

6.2.1.- Resolución de intersecciones directas, método numérico.

El método numérico se fundamenta en la resolución de todas las intersecciones obtenidas mediante las observaciones distanciométricas efectuadas en las sucesivas campañas de auscultación desde los pilares a las dianas de puntería.

En el caso habitual de disponer de cuatro pilares, desde los que se observa la distancia a un prisma reflector ubicado en la diana de puntería. Con una estructura de observaciones similar a la que se muestra en la siguiente figura:

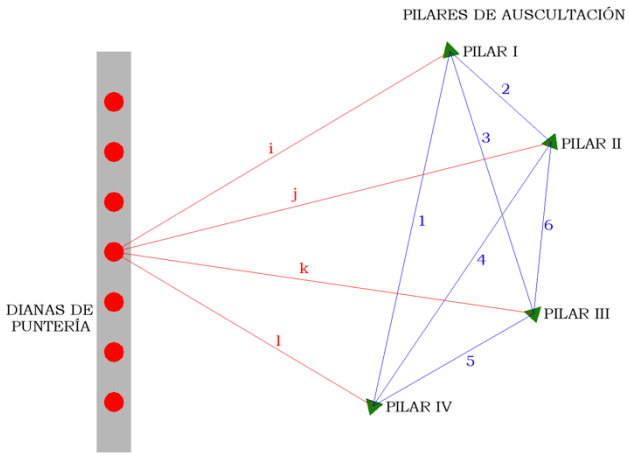


Figura II.30.- Intersecciones distanciométricas de una de las dianas de putería.

Se dispone de un conjunto total de 6 intersecciones directas a resolver:

$$Intersección\ directa\ 1 \Rightarrow \langle i \quad j \quad 2\rangle$$

$$Intersección\ directa\ 2 \Rightarrow \langle i \quad k \quad 3\rangle$$

$$Intersección\ directa\ 3 \Rightarrow \langle i \quad l \quad 1\rangle$$

$$Intersección\ directa\ 4 \Rightarrow \langle j \quad k \quad 3\rangle$$

$$Intersección\ directa\ 5 \Rightarrow \langle j \quad l \quad 4 \rangle$$

$$Intersección\ directa\ 6 \Rightarrow \langle k \quad l \quad 5 \rangle$$

Una vez resueltas las intersecciones directas, se obtienen seis pares de coordenadas para cada diana, semejantes entre sí pero no idénticas. Es por ello por lo que para establecer en cada campaña las coordenadas de cada diana, se realiza la media ponderada de los seis pares de coordenadas obtenidos previamente (seis en este caso establecido para cuatro pilares). A partir de las coordenadas obtenidas por este método y por comparación con las obtenidas en la campaña anterior, se establece el desplazamiento de la diana entre campañas.

Como se ha comentado en el párrafo anterior, para establecer las coordenadas de la diana se hace una media ponderada en función del error que se espere cometer en cada intersección, que básicamente depende de la geometría del propio triángulo y del error que se comete al medir la distancia. Por tanto, el peso establecido para cada una de ellas simboliza la precisión de la propia intersección.

En la intersección, desde cada pilar se realizan dos observaciones distanciométricas, por lo que si se estima que en cada una de ellas se comente un error en la medida de la distancia ε_D, se forma una zona de incertidumbre probable, como se puede ver en la siguiente figura, donde se encuentra la posición real del punto observado.

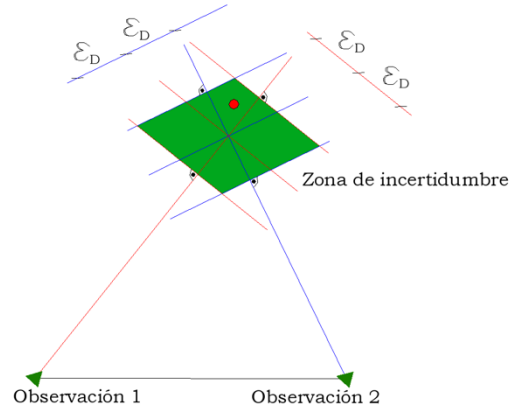


Figura II.31.- Afección del error distanciométrico en las intersecciones directas.

Ahora bien, si en el entorno del punto objeto de análisis sobre el que se miden las distancias, se considera que el lugar geométrico de todos los puntos que equidistan una distancia es la circunferencia y en el infinitésimo se puede considerar que es una perpendicular, consideración aceptable teniendo en cuenta que la probabilidad de que la desviación sea la máxima en ambas observaciones es mínima, la zona de incertidumbre adoptaría la forma que se puede apreciar en la siguiente figura.

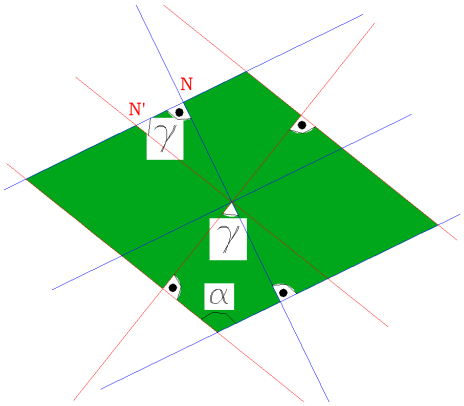


Figura II.32.- Zona de incertidumbre considerando visuales perpendiculares.

La zona de incertidumbre se convierte en un cuadrilátero regular, en cuyo interior se puede inscribir una elipse, siendo el valor del semieje mayor de la misma la tolerancia de la intersección distanciométrica que se está analizando.

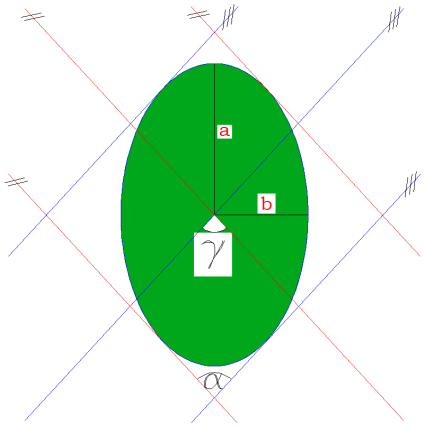


Figura II.33.- Elipse de error en las intersecciones directas distanciométricas.

En la que los parámetros fundamentales de la elipse, es decir, los semiejes de la misma. Estos se pueden deducir a partir de la teoría de los diámetros conjugados de una elipse (Apolonio).

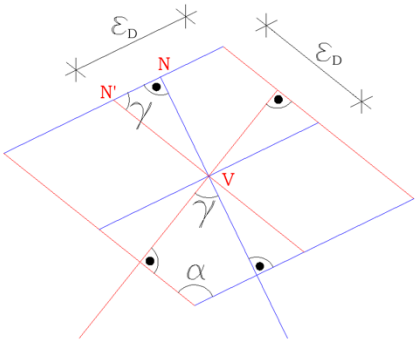


Figura II.34.- Valor del diámetro conjugado de la elipse.

En la figura anterior se puede apreciar que en el triángulo VNN', VN' es el diámetro conjugado, cuyo valor se deduce partiendo de que el valor VN coincide con el error absoluto en la medición de distancias, resultando las siguientes expresiones:

$$VN = \varepsilon_D \qquad [II.69]$$

$$\sin\gamma = \frac{VN}{VN'} \Rightarrow VN' = \frac{VN}{\sin\gamma} \qquad [II.70]$$

$$VN' = \frac{\varepsilon_D}{\sin\gamma} \qquad [II.71]$$

Aplicando la teoría de los diámetros conjugados, se tiene que:

$$a^2 + b^2 = 2VN'^2$$

$$2ab = 2VN'^2 \sin\gamma$$

Sumando estas dos expresiones se obtiene:

$$a^2 + b^2 + 2ab = 2VN'^2(1 + \sin\gamma)$$

$$(a+b)^2 = 2VN'^2(1 + \sin\gamma)$$

$$(a+b) = \sqrt{2}VN'\sqrt{1+\sin\gamma}$$

Restando estas dos mismas expresiones, resulta:

$$a^2 + b^2 - 2ab = 2VN'^2(1-\sin\gamma)$$

$$(a-b)^2 = 2VN'^2(1-\sin\gamma)$$

$$(a-b) = \sqrt{2}VN'\sqrt{1-\sin\gamma}$$

Sumando ahora las dos expresiones deducidas anteriormente, se obtiene:

$$2a = \sqrt{2}VN'\left(\sqrt{1+\sin\gamma} + \sqrt{1-\sin\gamma}\right)$$

$$a = \frac{\sqrt{2}VN'}{2}\left(\sqrt{1+\sin\gamma} + \sqrt{1-\sin\gamma}\right)$$

Como igualdad trigonométrica se tiene la siguientes expresión conocida:

$$\frac{1}{2}\left(\sqrt{1+\sin\gamma} + \sqrt{1-\sin\gamma}\right) = \cos\frac{\gamma}{2}$$

que sustituyendo en la expresión obtenida del semieje mayor de la elipse, se obtiene:

$$a = \sqrt{2}VN'\cos\frac{\gamma}{2}$$

De las expresiones obtenidas anteriormente resulta:

$$VN' = \frac{\varepsilon_D}{\sin\gamma}$$

Como igualdad trigonométrica se tiene la siguiente expresión conocida:

$$\sin\gamma = 2\sin\frac{\gamma}{2}\cos\frac{\gamma}{2}$$

Sustituyendo el valor de VN' en la expresión del semieje mayor obtenido y aplicando la igualdad trigonométrica, se tiene:

$$a = \sqrt{2}VN'\cos\frac{\gamma}{2}$$

$$a = \frac{\sqrt{2}\,\varepsilon_D\cos\frac{\gamma}{2}}{\sin\gamma}$$

$$a = \frac{\sqrt{2}\,\varepsilon_D\cos\frac{\gamma}{2}}{2\sin\frac{\gamma}{2}\cos\frac{\gamma}{2}}$$

Así, la expresión del valor del semieje mayor de la elipse de error, elipse que muestra la tolerancia o error esperado al realizar una observación angular mediante intersección directa, queda:

$$a = \frac{\varepsilon_D}{\sqrt{2}\sin\frac{\gamma}{2}} \qquad \text{[II.72]}$$

donde:

L es la distancia entre los pilares y la diana.

ε_D es el error absoluto en la medida de las distancias.

γ es el ángulo de la intersección.

Una vez establecidas las coordenadas en cada una de las dianas, el vector desplazamiento de cada una de ellas se obtiene por la comparación de coordenadas entre dos campañas para cada diana de puntería.

6.2.2.- Resolución de intersecciones directas, método gráfico.

La resolución de la intersección directa mediante el método gráfico con objeto de obtener la tolerancia o error esperado de la observación distanciométrica, requiere del conocimiento de las coordenadas de los pilares y de las coordenadas aproximadas de las dianas. De este modo, es habitual asignar como coordenadas aproximadas para todas las campañas, las coordenadas obtenidas por observación de las mismas en la primera de las campañas.

De esta manera, si las coordenadas de los elementos intervinientes, pilar y diana, son conocidas, se pueden obtener las distancias aproximadas entre los pilares y cada diana de la auscultación. Esta distancia aproximada se puede considerar como constante entre observaciones consecutivas, ya que la variación va a ser mínima y no va a influir en el resultado final del vector desplazamiento.

Así, la distancia aproximada entre el pilar y la diana, viene dada por la siguiente expresión:

$$d_i^j = \sqrt{\left(x_j - x_i\right)^2 - \left(y_j - y_i\right)^2}$$

Como se ha comentado, estos valores, obtenidos al inicio de las observaciones y basados en el conocimiento de las coordenadas d_j *y* P_i se suponen permanentes a lo largo de todo el proceso, dado que la variación de la posición de una observación respecto a la anterior no supone cambio sustancial para el proceso que se pretende acometer, así:

$$d_{aproximada} = \sqrt{\left(\Delta x_{pilar}^{diana}\right) + \left(\Delta y_{pilar}^{diana}\right)}$$

La base operacional consiste en evaluar en el doblete (i, j) el valor del desplazamiento d_i^j para un incremento de distancias detectado ΔD_{ij}, entre dos observaciones consecutivas, es decir determinar el módulo del desplazamiento para un incremento distanciométrico entre dos observaciones consecutivas.

El incremento angular entre dos campañas consecutivas se define como:

$$\Delta D_{ij} = d_{ij}^n - d_{ij}^{n-1} \qquad \text{[II.73]}$$

El principio sobre el que se basa el cálculo gráfico es el cálculo del valor del desplazamiento para una variación distanciométrica ente dos observaciones consecutivas:

$$\Delta D = D_{Pilar(n)}^{Diana} - D_{Pilar(n+1)}^{Diana}$$

Una vez conocida la dirección aproximada, que se puede calcular mediante las coordenadas aproximadas, y la variación de distancia experimentada por la diana, que se calcula mediante la diferencia de distancias observadas en ambas campañas, la nueva posición de la diana se puede determinar mediante un sencillo gráfico. Para la construcción de dicho gráfico se debe tener en cuenta que el punto objeto de análisis sobre el que se miden las distancias, se encuentra en el lugar geométrico de todos los puntos que equidistan una distancia que es la circunferencia y en el infinitésimo se puede considerar que es una perpendicular, tal y como se puede apreciar en la siguiente figura:

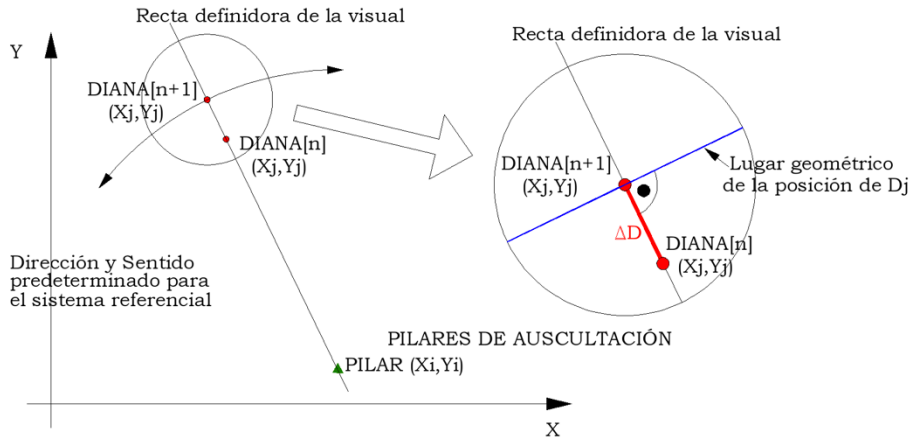


Figura II.35.- Lugar geométrico en el que se ubica la nueva posición de la diana.

Así, en este método gráfico, sobre un plano a gran escala (5/1 ó 10/1) se sitúa la posición inicial de la diana j. A partir de él se marcan sobre el plano todas las direcciones de las visuales realizadas desde los diferentes pilares desde los cuales se observa la distancia.

Puesto que los movimientos a detectar son muy pequeños respecto a la distancia Pilar- Diana, D_i^j, puede suponerse sin error que el nuevo lugar geométrico donde se va a encontrar la diana, entre dos campañas consecutivas, campaña n y campaña n-1, está en la perpendicular a la visual por el punto de incremento de distancia detectado.

De forma teórica, las direcciones de las visuales con sus correspondientes desplazamientos, uno por cada pilar, establecen la nueva situación de la diana, es decir el lugar geométrico donde se cortan todas las direcciones. Ahora bien, este punto teórico no se da en la realidad como consecuencia de los errores cometidos en las diferentes observaciones y, por lo tanto, las visuales se cortan generando un polígono con tantos lados como visuales se hayan realizado a la diana y que viene a representar la magnitud del error real cometido.

Así, la nueva posición de la diana hay que definirla dentro de este polígono de error, estableciéndose de forma común en el centro del mismo salvo que se quiera dar más o menos peso a alguna de las visuales realizadas. En la siguiente figura se muestra un gráfico habitual de la resolución de una diana de puntería por este método.

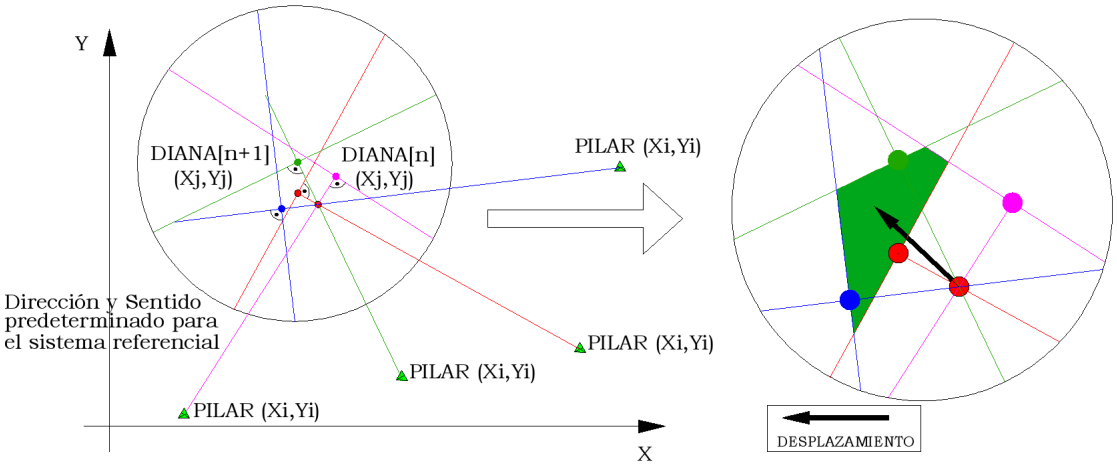


Figura II.36.- Resolución del desplazamiento de una diana por el método gráfico.

Las dimensiones del polígono tienen su importancia ya que indican en el global de las observaciones la incertidumbre con la que se obtiene el desplazamiento mediante las observaciones distanciométricas.

6.2.3.- Resolución de intersecciones directas, variación de coordenadas.

Para la resolución de intersecciones directas distanciométricas por el método de variación de coordenadas se desarrolla un procedimiento matemático muy parecido al angular, salvo que la expresión de la variación distanciométrica tiene su fundamento en la expresión general que permite el cálculo de distancias entre puntos de coordenadas conocidas [II.3]. Diferenciando dicha ecuación resulta:

$$D_i^j = \sqrt{\left(x_j - x_i\right)^2 + \left(y_j - y_i\right)^2}$$

$$f(x) = \sqrt{u} \Rightarrow f'^{(x)} = \frac{u'}{2\sqrt{u}}$$

$$dD_i^j = \frac{(x_j - x_i)dx + (y_j - y_i)dy}{\sqrt{\left(x_j - x_i\right)^2 + \left(y_j - y_i\right)^2}} \qquad \text{[II.74]}$$

$$dD_i^j = \frac{\left(x_j - x_i\right)dx + \left(y_j - y_i\right)dy}{D_i^j}$$

$$dD_i^j = \frac{\left(x_j - x_i\right)}{D_i^j}dx + \frac{\left(y_j - y_i\right)}{D_i^j}dy$$

Simplificando, resulta:

$$dD = \frac{\Delta x}{D}dx + \frac{\Delta y}{D}dy \qquad \text{[II.75]}$$

En la que cabe reseñar que si hay observación desde dos pilares, la resolución es estricta y si hay más de dos pilares, se produce una redundancia que permite obtener residuos y su posterior ajuste.

$$si\ m > 2 \Rightarrow dD = \frac{\Delta x}{D}dx + \frac{\Delta y}{D}dy + R \qquad \text{[II.76]}$$

donde:

dD *es el incremento distanciométrico entre campañas.*

D_i^j *es la distancia aproximada entre cada pilar y diana.*

Δx *es el incremento de abscisas entre pilar y diana* (*aproximado*).

Δy *es el incremento de ordenadas entre pilar y diana* (*aproximado*).

R *es el residuo de la relación de la observación.*

Aplicando la ecuación anterior a cada una de las visuales realizadas desde cada pilar se obtiene un sistema de tantas ecuaciones como visuales y dos incógnitas:

$$dD_{Pilar\ 1}^{Diana} = \frac{\Delta x}{D_{Pilar\ 1}^{Diana}}dx + \frac{\Delta y}{D_{Pilar\ 1}^{Diana}}dy$$

$$dD_{Pilar\ 2}^{Diana} = \frac{\Delta x}{D_{Pilar\ 2}^{Diana}}dx + \frac{\Delta y}{D_{Pilar\ 2}^{Diana}}dy$$

$$[\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots]$$

$$dD_{Pilar\ n}^{Diana} = \frac{\Delta x}{D_{Pilar\ n}^{Diana}}dx + \frac{\Delta y}{D_{Pilar\ n}^{Diana}}dy$$

Que se puede expresar de la siguiente forma matricial:

$$\begin{bmatrix} dD_1 \\ dD_2 \\ \dots \\ dD_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta x_{Pilar\ 1}^{Diana}}{D_{Pilar\ 1}^{Diana}} & \frac{\Delta y_{Pilar\ 1}^{Diana}}{D_{Pilar\ 1}^{Diana}} \\ \frac{\Delta x_{Pilar\ 2}^{Diana}}{D_{Pilar\ 2}^{Diana}} & \frac{\Delta y_{Pilar\ 2}^{Diana}}{D_{Pilar\ 2}^{Diana}} \\ \dots\ \dots & \dots \\ \frac{\Delta x_{Pilar\ n}^{Diana}}{D_{Pilar\ n}^{Diana}} & \frac{\Delta y_{Pilar\ n}^{Diana}}{D_{Pilar\ n}^{Diana}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx \\ dy \end{bmatrix} \qquad [II.77]$$

O lo que es lo mismo

$$\{dD\} = [A]\{x\}$$

Cuya resolución tiene un procedimiento matemático idéntico al caso de variación de coordenadas con observable angular resuelto entre las ecuaciones [II.43] y [II.50].

6.3.- RESOLUCIÓN DE INTERSECCIONES INVERSAS DISTANCIOMÉTRICAS.

6.3.1.- Introducción.

Al igual que en el caso angular, las intersecciones directas e inversas se pueden resolver mediante los tres métodos, el numérico, el gráfico y el de variación de coordenadas. Este último se ha generalizado debido a posibilidades que los otros no tienen, como puede ser la facilidad de programación, el permitir calcular elipses de error, etc., y que, en definitiva, han hecho que este método sea el que se utilice habitualmente, lo que justifica que para las intersecciones inversas solamente se desarrolle el método de variación de coordenadas.

6.3.2.- Resolución de intersecciones inversas, variación de coordenadas.

Sobre los pilares desde los que se realiza la auscultación geodésica, y sobre los que se ha basado toda la exposición y cálculos anteriores de la intersección directa, es necesario conocer el grado de estabilidad de los mismos. A este conocimiento se llega haciendo desde los pilares intersecciones inversas a los considerados puntos de seguridad, puntos cuyas coordenadas se consideran fijas en el tiempo al estar situados en zonas suficientemente alejadas del área de influencia del elemento a auscultar y ubicados estratégicamente en puntos estables.

Habitualmente se realizan intersecciones distanciométricas, a las que debido al lugar en el que se estaciona el equipo se les suele denominar inversas, y que además suelen ser múltiples, con el objeto de reproducir un sistema más complejo, pero con redundancia de datos, que a su vez permite obtener comprobaciones y errores.

Determinadas las distancias existentes entre el pilar de auscultación y los puntos de seguridad observados, se plantea una geométrica que nuevamente nos genera múltiples intersecciones inversas, tal y como se puede apreciar en la siguiente figura:

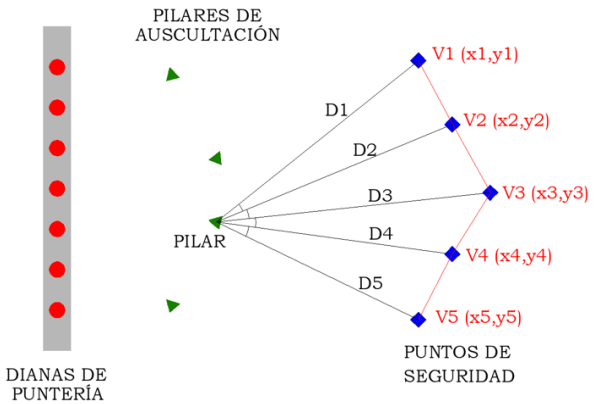


Figura II.37.- Intersección inversa múltiple de distancias.

Conocida la ecuación de la distancia [II.3] y llevando a cabo el mismo análisis diferencial que el empleado para las intersecciones directas distanciométricas, se llega a la ecuación [II.75], en la que ahora se aplica tantas veces como puntos de seguridad se observen, mientras que en el caso de las directas se aplicaba tantas veces como pilares hubiesen observado a la diana.

$$\begin{bmatrix} dD_1 \\ dD_2 \\ dD_3 \\ \dots \\ dD_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta x_{V1}^{Pilar}}{D_{V1}^{Pilar}} & \frac{\Delta y_{V1}^{Pilar}}{D_{V1}^{Pilar}} \\ \frac{\Delta x_{V2}^{Pilar}}{D_{V2}^{Pilar}} & \frac{\Delta y_{V2}^{Pilar}}{D_{V2}^{Pilar}} \\ \frac{\Delta x_{V3}^{Pilar}}{D_{V3}^{Pilar}} & \frac{\Delta y_{V3}^{Pilar}}{D_{V3}^{Pilar}} \\ \dots & \dots \\ \frac{\Delta x_{Vn}^{Pilar}}{D_{Vn}^{Pilar}} & \frac{\Delta y_{Vn}^{Pilar}}{D_{Vn}^{Pilar}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx \\ dy \end{bmatrix} \qquad [II.78]$$

$$dD = A\,x$$

Lo que vuelve a generar un sistema matricial tipo [II.43], que se resuelve de la misma forma y con el mismo potencial que el método de variación de coordenadas en cuanto a resultados y elipses de error.

7.- LA OBSERVACIÓN ALTIMÉTRICA.

7.1.- INTRODUCCIÓN.

Hay ocasiones, en las que la componente vertical representa de forma general y casi global, el desplazamiento que se desea evaluar. Una de éstas ocasiones, de gran trascendencia en el ámbito de la ingeniería civil, es el comportamiento longitudinal de los puentes y viaductos. La actuación clásica en este sentido es la representada por la prueba de carga de dichas estructuras, si bien no se tiene por qué limitar el comportamiento de estructuras finalizadas, sino que tal y como se quiere dejar constancia en esta tesis, es importante hacer un control durante la fase de construcción de las mismas.

La precisión requerida en una nivelación depende del objetivo de la misma, y por lo tanto, dicho objetivo dependerá por un lado el tipo de instrumental a emplear y el método a emplear. Estas determinaciones pueden ser efectuadas en la actualidad por la instrumentación y metodologías topográficas clásicas y el orden de magnitud de la precisión en los diferentes métodos de nivelación es el que de forma aproximada se muestra en la siguiente tabla:

ORDEN DE MAGNITUD EN LA PRECISIÓN DE UNA NIVELACIÓN

Método	Precisión
Barométrica	50 cm.
GPS	1-2 cm.
Trigonométrica	1 cm.
Geométrica	>7 mm.
Geométrica precisión	>1mm/km
Geométrica alta precisión	<1 mm/km.

Tabla II.- Orden de magnitud en la precisión de los diferentes métodos de nivelación.

Derivada de la consideración general que se hace en la tabla anterior, obtenida de la bibliografía actual y relativa a la precisión que se puede obtener con el diferente instrumental y su correspondiente metodología, surge uno de los principales objetivos de la investigación planteada en esta tesis. El contraste entre los resultados que se pueden obtener por los diferentes instrumentales y métodos en la construcción de puentes por empuje de tablero. Cabe reseñar que en éste capítulo de la tesis se desarrollan el instrumental y los métodos clásicos, fundamentadas en el desarrollo general expuesto por [LOPEZ-93]

7.2.- NIVELACIÓN GEOMÉTRICA.

7.2.1.- Instrumental.

La evolución tecnológica que se ha producido en los últimos años es sin duda una de las más notables en cuanto instrumental topográfico, en la actualidad existen cuatro grandes grupos de niveles: convencional, automático, láser y electrónico o digital.

Aunque conceptualmente el fundamento de trabajo es en todos igual, una vez estacionados todos forman un plano horizontal y proyectan dicho plano sobre una estadía, en la que se determina la altura de dicho plano y por diferencia de alturas establecen las cotas. La materialización de dicho plano es en lo que les hace diferentes a unos de otros.

A.- Nivel convencional.

Este aparato va montado sobre una plataforma, gobernada por tres tornillos de nivelación, que permiten disponer el instrumento en un plano horizontal. Además dispone de un anteojo para efectuar la puntería, en cuyo retículo está dispuesta la cruz filar, que permite proyectar sobre la estadía la altura a la que se encuentra el

plano horizontal respecto el eje del nivel, dado que carece de movimiento cenital. El nivel se caracteriza por los aumentos de su anteojo y por la sensibilidad de su nivel de burbuja. Se estaciona como cualquier instrumento topográfico con la salvedad de que no tiene plomada dado que la importancia de la nivelación no reside en el punto estación sino en la altura a la que se estaciona el equipo.

B.- Nivel automático.

El instrumento tiene el mismo fundamento y funcionamiento que el nivel convencional, salvo que ahora tiene un sistema que hace que la nivelación o estacionamiento del equipo sea cuasi-automática. Para ello dispone de un sistema interno que en base a un péndulo simple, establece la vertical del lugar y coloca el eje de colimación en plano normal que no deja de ser un plano horizontal, haciendo mucho más cómodo el proceso de estacionamiento. Cabe reseñar que el instrumento sigue teniendo los tornillos de nivelación, dado que el instrumento hay que pre-nivelarle para garantizar que el péndulo es capaz de buscar la vertical del lugar.

C.- Nivel láser.

Este instrumento, que se estaciona de forma cuasi-automática, al igual que el anterior, se caracteriza porque una vez estacionado y encendido emite una radiación en el espectro del láser, contenida en el plano horizontal y que mediante dos sensores deslizantes en las estadías permiten identificar la altura a la que se encuentra el láser en diferentes puntos y, por lo tanto, establecer el desnivel entre puntos dados.

D.- Nivel electrónico o digital.

Este instrumento, que se estaciona de forma cuasi-automática, al igual que los anteriores, se caracteriza porque una vez estacionado y encendido posee un sensor óptico que es capaz de evaluar una imagen captada sobre una estadía vertical con un código de barras e interpretar la altura en el punto de de dicho estadía. La desviación típica en la determinación de la altura la hace de forma tremendamente precisa, ya que llega a alcanzar la centésima de milímetro, lo que no exime de otras fuentes de error, pero lo hace el equipo más preciso hoy día en el mercado. Además reporta la ventaja de poder leer y almacenar datos de forma automática, tal y como se desarrolla en (Cap. II – Apdo.[2.2.3.3]).

7.2.2.- Metodología de observación.

En una determinación altimétrica con nivel, en la que se pretende determinar la cota de un punto en base a otro punto de cota conocida, el fundamento de la observación es el planteado en la siguiente figura:

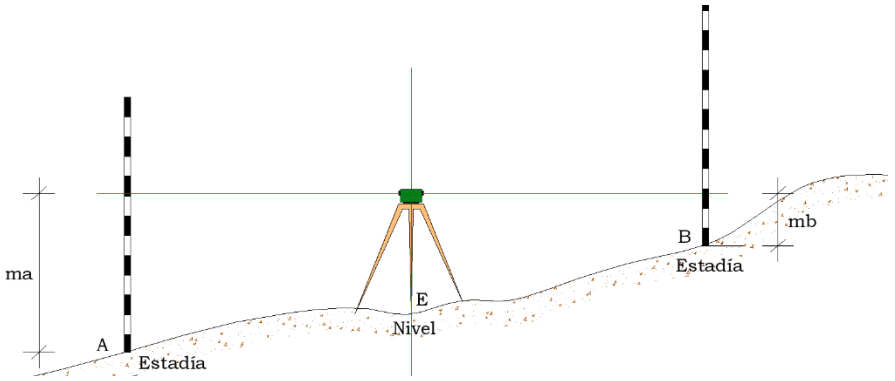


Figura II.38.- Fundamento de la nivelación geométrica.

El desnivel entre dos puntos considerados es:

$$\Delta Z_A^B = m_a - m_b \qquad [II.79]$$

Conociendo la cota del punto A, la cota del punto B queda definida de la forma:

$$Z_B = Z_A + \Delta Z_A^B \qquad [II.80]$$

Este fundamento da lugar a diferentes modos de aplicación que se pueden reducir a:

A.- Método del punto medio.

Tal y como se puede apreciar en la siguiente figura, el desnivel existente entre los puntos A y B, se determina a través del estacionamiento del instrumento, en el punto medio entre ambos puntos. De esta forma la distancia EA es igual a EB, y por tanto, el posible error instrumental, motivado por no ser las visuales totalmente horizontales debido a la precisión del instrumento y las posibles correcciones de esfericidad y refracción, se eliminan al ser ambas visuales idénticas pero de dirección contraria.

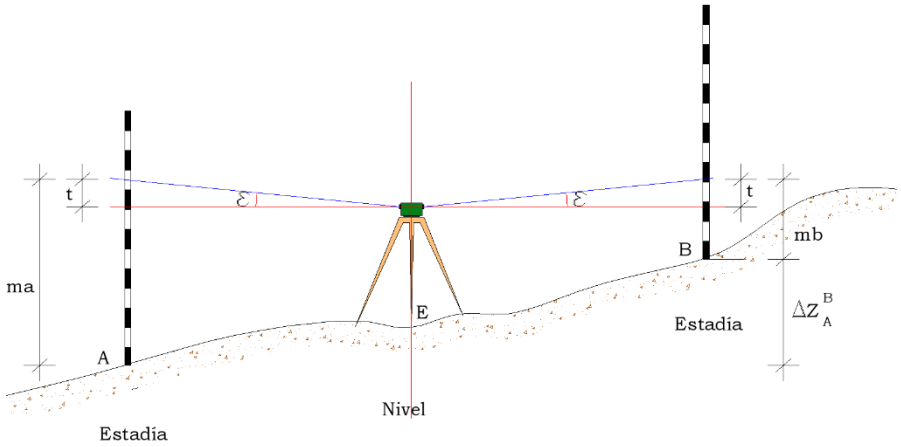


Figura II.39.- Método de nivelación geométrica del punto medio.

Debido a las precisiones que se pretenden obtener no conviene que la longitud de la nivelada, distancia entre equipo y estadía, no pase de 50 metros de longitud, dado que si se pasa de esas distancias la precisión aumenta hasta los límites preestablecidos.

B.- Método del punto extremo.

En la siguiente figura se puede apreciar como el desnivel existente entre los puntos A y B, se realiza a través del estacionamiento del instrumento, en uno de los extremos.

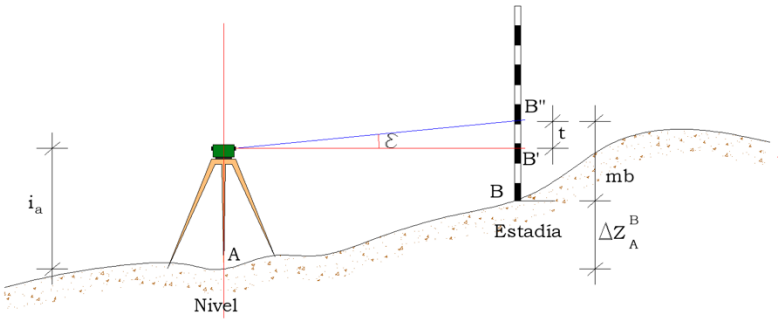


Figura II.40.- Método de nivelación geométrica del punto extremo.

Este método tiene principalmente dos inconvenientes con respecto al anterior que le hacen poco usado, no se eliminan los errores mencionados en el apartado anterior y al tener que determinar la altura del aparato, se introduce una nueva fuente de error, que por sí sola, se considera habitualmente del orden de un centímetro.

Para minimizar estos errores se suele recurrir a realizar estaciones recíprocas en ambos extremos, es decir, estacionar primeramente en A y calcular el desnivel hasta el punto B para posteriormente estacionar en B y calcular el desnivel hasta el punto A,

siendo el desnivel entre ambos puntos la media aritmética de las dos anteriores obtenidas, de forma que el error residual y las correcciones por esfericidad y refracción se eliminan, pero se reducen a la mitad las distancias niveladas, bajando por tanto el rendimiento a la mitad.

C.- Método de las estaciones exteriores.

En este método, el instrumento se sitúa fuera del tramo a nivelar, teniendo que realizar dos estacionamientos al igual que en el caso anterior, aunque con la ventaja de eliminar la medida de la altura del aparato.

La diferencia de altura entre los dos puntos, se obtiene como media aritmética de ambas lecturas eliminándose igualmente el error residual pero no el error de esfericidad y refracción. Este método, resulta muy adecuado en el caso de tener que salvar obstáculos importantes.

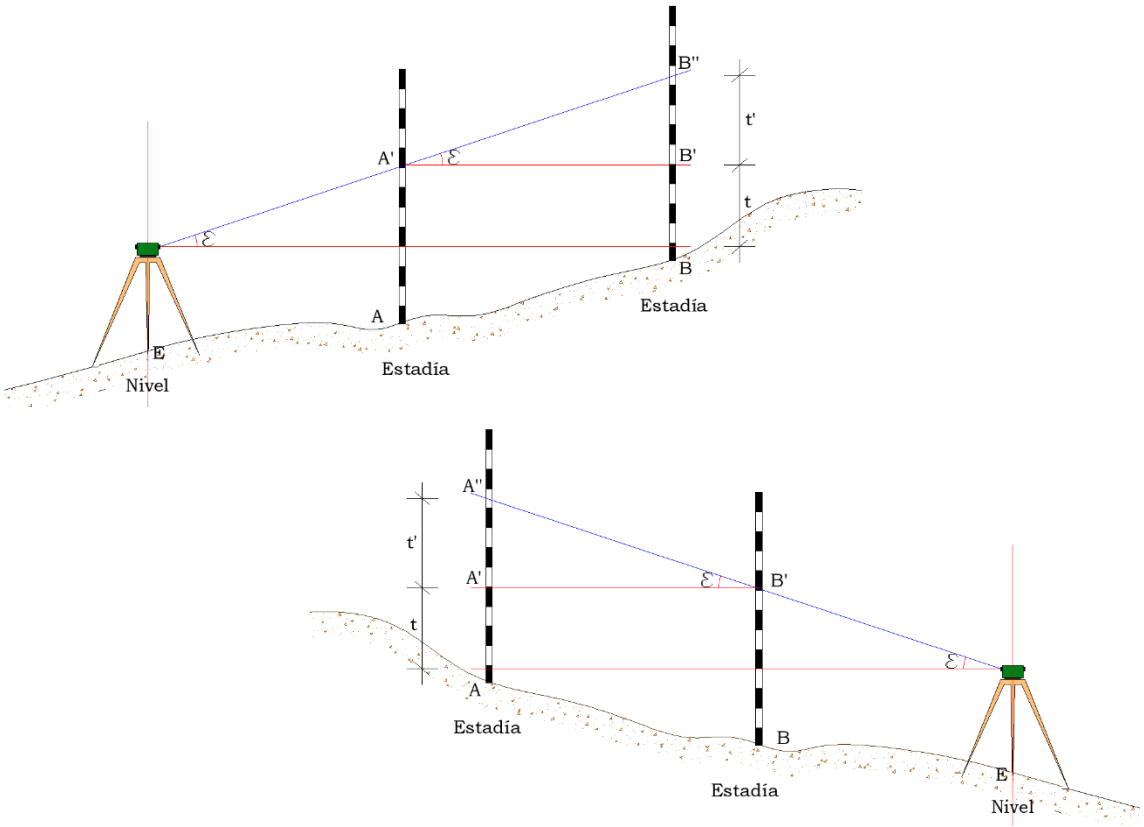


Figura II.41.- Método de nivelación geométrica de estaciones exteriores.

D.- Método de las estaciones equidistantes.

El método se basa en hacer dos estacionamientos, ambos dentro del tramo a nivelar, caracterizado porque la distancia entre el aparato y la mira más cercana en ambos casos son iguales. De esto modo se elimina el error residual, así como el de esfericidad y refracción, siendo el desnivel entre ambos puntos la media aritmética de las dos lecturas observadas.

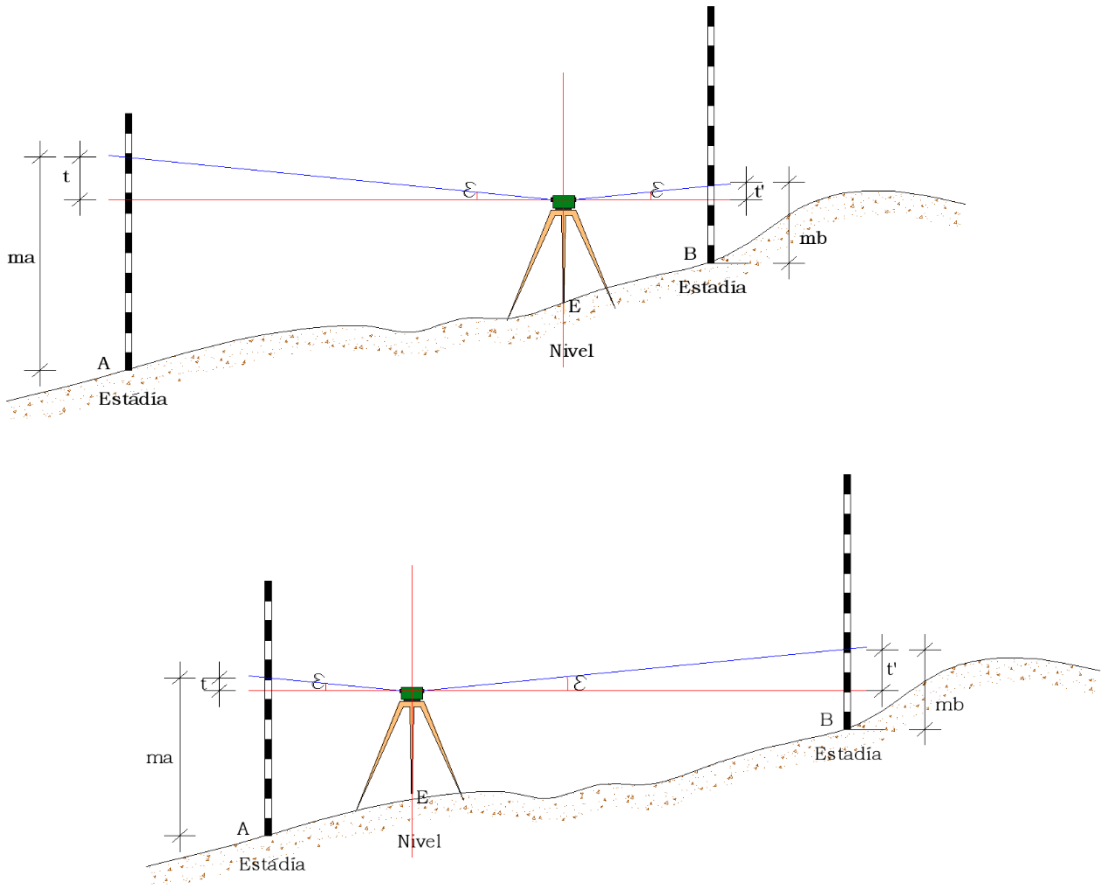


Figura II.42.- Método de nivelación geométrica de estaciones equidistantes.

7.2.3.- Metodología de resolución.

Para obtener el desnivel entre dos puntos, A y E, se calcula a partir de la suma de los desniveles parciales que se obtienen para cada uno de los diferentes tramos intermedios que se puedan llevar a cabo, es decir:

$$\Delta_A^E = (L_A^1 - L_B^1) + (L_B^2 - L_C^2) + (L_C^3 - L_D^3) + (L_D^4 - L_E^4) \qquad [II.81]$$

Si durante el itinerario además se quieren dar cotas a los puntos intermedios de forma adecuada, se debe conocer la cota del punto de llegada o bien hay que realizar un itinerario de ida y vuelta, para acabar en el punto en el que se inició el itinerario. Si se llega al mismo punto de partida, el desnivel total obtenido debe ser nulo, siguiendo el mismo criterio si se llega de un punto de cota conocida a otro de cota también conocida.

Esta exposición teórica, en la práctica lleva a que existen diferencias, y esta diferencia existente es la que se denomina error de cierre, que de forma matemática se puede expresar:

$$\varepsilon_{cierre} = \Delta z' - \Delta z \qquad [II.82]$$

donde:

$\Delta z'$ *es el desnivel obtenido en el itinerario*

$\Delta z'$ *es el desnivel real existente*

Dicho error de cierre, si es admisible, se puede compensar con tres criterios diferentes:

A.- Reparto en función del número de estaciones.

Es la forma más básica a la hora de compensar el error, ya que éste se reparte de forma lineal en cada uno de los tramos que componen el itinerario de nivelación, de forma que el error que cada tramo se le asigna, será:

$$Compensación_i = \frac{\varepsilon_{cierre}}{n} \quad [II.83]$$

donde:

n *es el número de tramos del itinerio*

Y por lo tanto $Compensación_i$ es la cantidad que habrá que sumar a cada uno de los desniveles obtenidos. Suele ser la más utilizada por su sencillez, no por su exactitud.

B.- Reparto proporcional en función de los desniveles.

El reparto se hace de forma proporcional al desnivel de cada tramo con respecto al desnivel total. Por tanto, dentro del reparto se asignará más a los tramos con más desnivel acumulado, y se puede hacer conforme a la siguiente ecuación:

$$\frac{\varepsilon_{cierre}}{\Delta z} = \frac{\varepsilon_{tramoi}}{\Delta z_i} \quad [II.84]$$

donde:

ε_{cierre} *es el error de cierre obtenido*

Δz *es el desnivel total acumulado obtenido en el itinerario*

ε_{tramoi} *es el error cometido en la nivelación del tramo i*

Δz_i *es el desnivel parcial del tramo i*

C.- Reparto proporcional en función de las longitudes de los tramos.

El criterio es similar al anterior, cambiando el desnivel obtenido en cada tramo por la longitud de cada tramo, es decir, que el reparto se hace de forma proporcional a la longitud de cada tramo con respecto a la longitud total. Por tanto, dentro del reparto se asignará más a los tramos con más longitud, y se puede hacer conforme a la siguiente ecuación:

$$\frac{\varepsilon_{cierre}}{L} = \frac{\varepsilon_{tramoi}}{l_i} \quad [II.85]$$

donde:

ε_{cierre} *es el error de cierre obtenido*

L *es la longitu total del itinerario*

ε_{tramoi} *es el error cometido en la nivelación del tramo i*

l_i *es la longitu del tramo i*

7.2.4.- La tolerancia.

La metodología de resolución requiere que los resultados sean admisibles, para lo que habitualmente hay que definir la tolerancia. Por tanto se define la tolerancia como el error máximo que se puede esperar de un cierre para considerarlo aceptable, y estará obviamente relacionado con la longitud existente entre los puntos que se pretende nivelar. Para poder comparar errores se estable el error kilométrico, definido por el error que se comete en la observación en un kilómetro, que a su vez permite establecer la tolerancia con la expresión:

$$tolerancia = e_{km}\sqrt{km} \quad [II.85]$$

donde:

$e_{km} = mm\ de\ error\ cometidos\ por\ cada\ km\ de\ nivelación$

$km = kilómetros\ del\ itinerario$

La determinación del error cometido por kilómetro de nivelación, requiere tener en cuenta dos factores.

A.- Error intrínseco del instrumento.

Se determina en base al error total cenital del instrumento y representa la desviación del plano horizontal que supuestamente genera el instrumento y el verdadero plano horizontal, para determinarlo es necesario calcular dos errores accidentales.

- Error de puntería:

$$\varepsilon_{puntería} \leq \frac{150}{A}\left(1 + \frac{4A}{100}\right) \quad [II.86]$$

- Error de lectura:

$$\varepsilon_{lectura} \leq \frac{1}{3}S \quad [II.87]$$

Posteriormente calcular el error total cenital del instrumento:

$$\varepsilon_{total} = \sqrt{\left(\varepsilon_{puntería}\right)^2 + (\varepsilon_{lectura})^2} \quad [II.88]$$

Y finalmente el error propio del instrumento:

$$\varepsilon_{ins} = \frac{\varepsilon_{total}}{r^{"}} L \quad [II.89]$$

donde:

$L\ es\ la\ longitud\ de\ la\ nivelada$

$r^{"} son\ los\ segundo\ centesimales\ que\ tiene\ un\ radián$

B.- Error por inclinación de la mira.

Este error se debe a la falta de verticalidad que se produce al colocar la mira por parte del auxiliar. Para su determinación basta con calcular la diferencia entre la lectura con mira inclinada y la lectura con mira perfectamente vertical.

$$\varepsilon_{mira} = \frac{m\,\beta^{"}}{r^{"}} \tan \beta^{"} \quad [II.90]$$

donde:

$\beta\ es\ el\ ángulo\ de\ inclinación\ de\ la\ mira$

$m\ es\ la\ altura\ de\ la\ mira$

Estos factores permiten calcular la tolerancia en un tramo de nivelación mediante la expresión:

tramo de Lo que permite

$$\varepsilon_{tramo} = \sqrt{(\varepsilon_{ins})^2 + (\varepsilon_{mira})^2} \quad [II.91]$$

Que a su vez permite establecer el error kilométrico

$$\varepsilon_{km} = \varepsilon_{tramo}\sqrt{\frac{1000}{L}} \quad [II.92]$$

Siendo nuevamente

$L\ longitud\ de\ la\ visual\ en\ metros.$

7.2.5.- Compensación por mínimos cuadrados.

Tal y como se ha visto en epígrafes anteriores de este capítulo, la compensación por mínimos cuadrados constituye la herramienta matemática más utilizada en topografía y geodesia para compensación.

Para poder llevarla a cabo se requiere redundancia de datos que permitan resolver los sistemas de ecuaciones planteados y escoger como criterio de que la suma de los cuadrados de los residuos sea mínima, que en el caso de la nivelación se hace según el siguiente criterio:

$$Valor\ aproximado + Corrección - Valor\ observado = Residuo$$

El valor que se pretende calcular es el de la $Corrección$. Para ello en cada tramo se calcula un $Valor\ aproximado$ a partir de las cotas sin compensar, y teniendo por tanto para cada tramo una ecuación. De esta forma, se tiene información redundante, más ecuaciones que incógnitas. El $Residuo$, es el error inevitable que sólo sería nulo si fuera una observación perfecta. Así, si dicha ecuación se expresa en los términos de nivelación como sigue:

$$R_A^B = [z_B - z_A] + [l_B - l_A] - \Delta z' \qquad \text{[II.93]}$$

Planteada esta ecuación para cada uno de los tramos y linealizando el sistema, queda la siguiente expresión matricial:

$$[A][x] - [L] = [V] \qquad \text{[II.94]}$$

donde:

$[A]$ $esla\ matriz\ de\ los\ coeficientes$

$[x]$ $es\ la\ matriz\ incógnita$

$[L]$ $es\ la\ matriz\ de\ los\ términos\ independientes$

$[V]$ $es\ la\ matriz\ de\ resiudos$

Operando matemáticamente se tiene:

$$[x] = [A^T A][A^T L]$$

Que introduciendo el concepto de matriz "peso" $[P]$, matriz cuadrada de dimensiones $m\,x\,m$, donde m es el número de observaciones, pasando la ecuación anterior a la forma:

$$[x] = [A^T P\ A][A^T\ P\ L] \qquad \text{[II.95]}$$

Así, en función del criterio de ponderación que se siga se puede distinguir:

- Reparto sin ningún criterio, con lo que la matriz $[P]$ será una matriz unidad.
- Reparto en función del desnivel observado, y para ello la diagonal de la matriz $[P]$ tendrá los términos $\frac{1}{\Delta z}$, desnivel correspondiente al tramo que hace referencia la ecuación correspondiente.
- Reparto en función de la longitud del tramo, y para ello la diagonal de la matriz $[P]$ tendrá los términos $\frac{1}{L}$, longitud del tramo al que hace referencia la ecuación correspondiente.

En el caso de que los anillos de nivelación o algún tramo se haya observado con instrumentos topográficos de diferente precisión, se puede reflejar en la matriz $[P]$ mediante el coeficiente de ponderación $\frac{1}{\varepsilon_{kilométrico}}$.

Para obtener los valores de compensación y la estimación de la precisión conseguida, se emplean los estimadores de la varianza de peso unidad y el de la matriz varianza-covarianza de los valores ajustados.

El primer estimador responde a:

$$\sigma_0^2 = \frac{[V^T] \quad [P] \quad [V]}{c-n} \qquad \text{[II.96]}$$

donde:

c *es el número de ecuaciones de observación*

n *es el número de incógnitas*

$[V]$ *es la matriz de residuos*

$[P]$ *es la matriz peso*

Y el segundo estimador se puede expresar como:

$$\sigma_{xx} = \sigma_0^2 Q_{xx} = \sigma_0^2 [[A^T] \quad [P] \quad [A]]^{-1} \qquad \text{[II.97]}$$

Con estos dos indicadores se permite compensar los desniveles y además conocer la precisión.

7.3.- NIVELACIÓN TRIGONOMÉTRICA.

7.3.1.- Instrumental.

La Estación Topográfica constituye en sí mismo el instrumento topográfico más utilizado para realizar nivelaciones, dado que su relación entre la precisión y rendimiento en la observación y procesado, es difícilmente igualable por otros equipos.

La tipología de las estaciones topográficas empleadas en este tipo de trabajos se ha realizado en (Cap. II – Apdo.[2.2.2.5]).

7.3.2.- Metodología y cálculo de observables.

El fundamento básico en el que se cimienta la observación de una nivelación trigonométrica, pasa por la medición compacta del ángulo cenital y distancia geométrica entre un punto en el que se encuentra en disposición de medir una estación topográfica y el punto objeto de análisis, tal y como se puede apreciar en la siguiente figura:

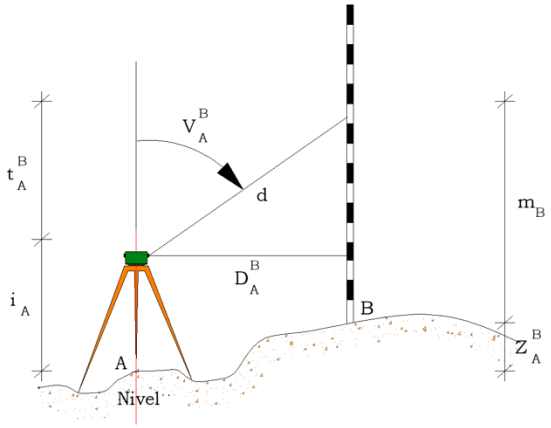


Figura II.43.- Fundamento de la nivelación trigonométrica.

Se pueden deducir la siguiente relación elemental:

$$\Delta Z_A^B = D_A^B cotag V_A^B + i_A - m_B + 0{,}42\frac{D_A^B}{R} \qquad \text{[II.98]}$$

Considerando los observables como posibles fuentes de error:

- Error o incertidumbre al evaluar la distancia: ΔD
- Error o incertidumbre al evaluar el ángulo cenital: ε_T^V

- Error o incertidumbre al evaluar la altura del aparato: i

- Error o incertidumbre al evaluar la altura del prisma: m

Haciendo una observación tipo a las que se plantean en este tipo de actuaciones, en las que es habitual que tanto la estación topográfica como el prisma reflector estén anclados en el pilar de auscultación y en la diana de puntería respectivamente, los errores por tener que medir la altura del instrumento y del prisma se hacen nulos, quedando la tolerancia reducida a dos fuentes diferentes:

$$e_t^I = \Delta D_A^B \; cotag V_A^B \qquad [II.99]$$

$$e_t^{II} = D_A^B [cotag(V_A^B \pm \varepsilon_T^V) - cotag V_A^B] \qquad [II.100]$$

Con estas consideraciones se calcula la tolerancia altimétrica para una visual aislada con la expresión:

$$e_z = \sqrt{(\Delta D_A^B \; cotag V_A^B)^2 + \{D_A^B [cotag(V_A^B \pm \varepsilon_T^V) - cotag V_A^B]\}^2} \qquad [II.101]$$

donde:

ΔD_A^B *es el error longitudinal*

D_A^B *es la distancia entre el nivel y puntería* $(reducida)$

V_A^B *es el ángulo cenital*

ε_T^V *es el error del ángulo cenital*

Utilizando Estación Topográfica y Nivelación Trigonométrica se demuestra que llevando a cabo las precauciones indicadas se generan tolerancias parecidas a las que se puedan llevar a cabo en una nivelación geométrica.

Si además se analiza la problemática de una observación tipo como la que se plantea en la presente investigación, la construcción de puentes por empuje de tablero:

- La observación mediante nivelación geométrica solamente reporta información en el ámbito altimétrico, mientras que con la Estación Topográfica se obtiene información planimétrica y altimétrica.

- La observación mediante nivelación geométrica requiere un proceso de observación que exige tiempo para la captura de los datos y por tanto genera unos intervalos de tiempo entre resultados que hace muy difícil llevar a cabo un control geométrico continuo a lo largo del proceso de empuje.

- La observación mediante nivelación geométrica requiere un proceso en el que tanto el instrumental como la estadía debe observar sobre la misma estructura que se está empujando, lo que la hace inviable desde el punto de vista de la seguridad de los operarios.

Todo ello hace que el instrumental y metodología más utilizada, para el control geométrico en la construcción de puentes mediante empuje de tablero, durante la fase de lanzamiento, sea la Estación Topográfica y Nivelación trigonométrica. Todo ello relegando a un segundo plano el control geométrico mediante nivelación geométrica, que aún siendo un poco más preciso, genera serios inconvenientes.

8.- MEDIDA DE ACELERACIONES: VIBRACIONES E IMPACTOS.

8.1.- INTRODUCCIÓN

En el caso de la construcción de puentes mediante empuje de tablero, el concepto de la vibración está ligado a un movimiento oscilatorio de un sistema, es decir, el movimiento del mismo alrededor de una posición de equilibrio, que en el campo de las estructuras puede estar producido por excitaciones externas, impactos en las mismas, etc.

En el proceso de caracterización de vibraciones hay que tener en cuenta magnitudes tales como el desplazamiento, la velocidad, la aceleración, el impacto y las frecuencias. Por otro lado, hay que considerar que la vibración puede ser periódica o aleatoria, y en el caso de ser periódica su variación en el tiempo puede ser predecible. Todos los parámetros que gobiernan las vibraciones se rigen por las leyes de Newton, estando por tanto relacionada la fuerza excitadora sobre un sistema con una cierta masa que le provoca una aceleración que concluye en un movimiento vibratorio del mismo.

En estos sistemas es común tomar como magnitud de partida la aceleración, pudiendo deducir la velocidad por integración de ésta y el desplazamiento por integración de la velocidad. Se tiene por tanto la necesidad de medir una de las tres magnitudes anteriores para caracterizar la vibración, ya que las tres están relacionadas entre sí, siendo más adecuada la medida de unas u otras en función del valor de la frecuencia del sistema. Así para sistemas con frecuencias bajas, y por tanto periodos altos, lo más adecuado es medir el desplazamiento no así con sistemas con frecuencias altas donde el desplazamiento es pequeño y por tanto su dificultad de medida lleva a utilizar transductores de velocidad o aceleración para medir éstas como una opción más adecuada.

De esta forma, la importancia de medir la vibración en una estructura radica por un lado en que puede afectar al uso confortable de la misma, así como su durabilidad y seguridad, y por otro, del análisis espectral de la misma, así como la evolución de ésta en el tiempo permite comprobar el comportamiento adecuado o posibles daños que la estructura pudiera tener.

Así pues, éstas vibraciones pueden afectar al comportamiento en servicio de las estructuras por razones funcionales, pueden causar incomodidad en sus ocupantes o usuarios, pueden afectar al funcionamiento de equipos sensibles a este tipo de fenómenos, pudiendo clasificar las acciones que causan las vibraciones en las estructuras en:

- Maquinaria adosada a las mismas.
- Ráfagas de viento u oleaje.
- Sobrecarga de tráfico de carretera o ferrocarril.
- Cargas en movimiento encima de las mismas.
- Algunos procedimientos constructivos tales como hincado de pilotes o tablestacas, compactación mecánica del suelo, etc.

Las vibraciones pueden producir el colapso de la estructura, grandes deformaciones debidas a la resonancia o pérdida de resistencia debido a la fatiga, y por lo tanto deben ser tenidas en cuenta en la comprobación de los estados límite en el diseño de las mismas, de forma que las frecuencias naturales de vibración estén lejos de los valores que se consideren como críticos, lo que justifica la importancia de la medida de las vibraciones en las estructuras.

8.2.- LAS VIBRACIONES.

8.2.1.- Caracterización de las vibraciones

La vibración se puede entender como un movimiento oscilante de una masa en torno a una posición de referencia, quedando definida por los siguientes conceptos [FRAIL-12]:

- *Amplitud:* La amplitud de una vibración es la distancia desde la posición de equilibrio hasta la posición en el que el desplazamiento es máximo.
- *Periodo:* El periodo de la vibración T es el tiempo necesario para que el sistema se repita, es decir, para realizar una vibración completa.
- *Frecuencia:* Es la inversa del periodo y corresponde al número de vibraciones completas por unidad de tiempo.
- *Ciclo:* El movimiento que se produce en un periodo se denomina ciclo.

Si este movimiento oscilante queda definido mediante una coordenada exclusivamente, se trata de un sistema con un grado de libertad, sin embargo cuando el sistema está compuesto por varias masas que hacen que el sistema vibre de forma aleatoria, y se está ante un sistema con n grados de libertad.

8.2.2.- Tipos de vibraciones.

8.2.2.1.- Clasificación de las vibraciones según la producción del movimiento.

- *Vibración libre:* Cuando se tiene un sistema elástico que se desplaza en torno a la posición de equilibrio de forma periódica. La frecuencia de esta vibración libre se designa como frecuencia natural o propia del sistema.
- *Vibración forzada:* Cuando la vibración es resultado de la aplicación de una fuerza periódica externa.
- *Resonancia:* En el caso de que la frecuencia de la fuerza periódica aplicada externamente coincida con la frecuencia natural del sistema, la amplitud de la vibración crece de manera importante y el sistema entra en resonancia.

8.2.2.2.- Clasificación de las vibraciones desde su definición matemática.

- Vibración determinista: Son las que se pueden definir a partir de expresiones matemáticas, pudiendo ser periódicas o aperiódicas.
- Vibración aleatoria: Son las que se definen a partir de parámetros estadísticos, pudiendo ser estacionarias y no estacionarias.

8.2.3.- Tipos de movimiento

8.2.3.1.- Movimiento periódico

Un sistema tiene un movimiento periódico cuando su movimiento alrededor de la posición de referencia se puede representar mediante una función matemática que se repite exactamente en intervalos temporales iguales, periodo.

El movimiento periódico más simple es el movimiento armónico, que se puede representar a través de una sinusoide, conforme a la siguiente expresión:

$$x = A \sin \omega t \qquad [II.102]$$

donde:

$\omega = 2\pi f$; $frecuencia\ angular$

$f = \frac{1}{T}$; $T\ es\ el\ periodo\ y\ f\ la\ frecuencia$

$A\ es\ la\ amplitud\ de\ la\ vibración$

y al ser un movimiento periódico se cumple

$$x(t) = x(t+T) \qquad \text{[II.103]}$$

A partir de la ecuación [II.102], se puede obtener la velocidad y la aceleración del desplazamiento según las expresiones siguientes:

$$v = \frac{dx}{dt} = A\,\omega\,\cos\omega t \qquad \text{[II.104]}$$

$$a = \frac{d^2x}{dt^2} = -\,A\,\omega^2 \sin\omega t \qquad \text{[II.105]}$$

La medida de la vibración se realiza con transductores llamados acelerómetros que proporcionan una señal proporcional a la aceleración. Esta aceleración se puede representar de forma genérica bajo la siguiente expresión:

$$a = X \sin\omega t \qquad \text{[II.106]}$$

A partir de la aceleración, se puede obtener la velocidad mediante una integración y por tanto:

$$v = \int a\,dt = \int X\,\sin\omega t\,dt = \frac{X}{\omega}\cos\omega t \qquad \text{[II.107]}$$

Y del mismo modo el desplazamiento:

$$x = \int v\,dt = \int \frac{X}{\omega}\cos\omega t\,dt = -\frac{X}{\omega^2}\sin\omega t \qquad \text{[II.108]}$$

Ahora bien, lo más normal es que en los casos prácticos que se dan en ingeniería civil, las vibraciones no sean movimientos armónicos, si bien si que se pueden considerar periódicos. En este caso, movimientos periódicos no armónicos, es útil analizarlos desde el dominio de la frecuencia, a través del teorema de Fourier, el cual es capaz de expresar una onda periódica como combinación de una serie de ondas sinusoidales de diferentes frecuencias, frecuencias denominadas armónicas.

8.2.3.2.- Movimiento no periódico

Este tipo de movimientos está relacionado con los impactos que se producen sobre una estructura, dando lugar a fenómenos transitorios con función no periódica y de muy corta duración. Su medición no es fácil, ya que aunque en teoría se puede representar por una aceleración, una velocidad o un desplazamiento, para que sea inequívoca hay que expresarlo a lo largo del tiempo. No obstante, desde el punto de vista estructural, el impacto no es lo más importante, sino sus consecuencias posteriores al mismo, y es aquí donde, de nuevo, lo importante es realizar un análisis en el dominio de la frecuencia sobre dicho efecto.

8.3.- LA MEDIDA DE LAS VIBRACIONES.

Para la medida de vibraciones e impactos se emplean transductores eléctricos, instrumentos de medida de los que se puede entender su funcionamiento a partir de un modelo lineal, en el que el instrumento se esquematiza mediante un sistema de un grado de libertad, compuesto por una masa, un resorte y un sensor eléctrico. El funcionamiento se basa en que este último transforma el movimiento detectado en una señal eléctrica equivalente. El disponer de una señal eléctrica tiene ventajas de cara al procesado posterior de la señal, como poder tratarla a distancia, poder realizar transductores de tamaño reducido, la señal se puede tratar en términos de tensión o de corriente, aunque puede haber en ocasiones problemas de precisión.

El transductor más utilizado en la medida de vibraciones es el acelerómetro ya que donde el resto de transductores necesitan una referencia externa, éstos arrojan valores absolutos. El funcionamiento de un transductor sísmico, se esquematiza en la siguiente figura [FRAIL-12].

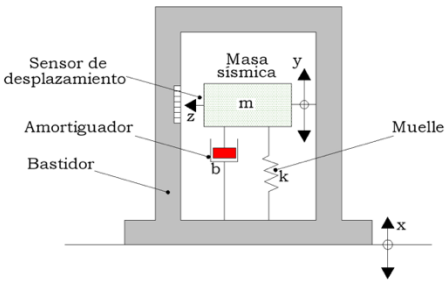


Figura II.44.- Fundamento del Transductor Sísmico.

En la imagen anterior se puede apreciar como la masa m está sobre un resorte de rigidez k y sobre un amortiguador de coeficiente c. Según la ley de Hooke, se tiene que la fuerza ejercida sobre el resorte, es proporcional a la elongación del mismo, de forma que se cumple:

$$F_{elástica} = k\,x \qquad [II.109]$$

Del mismo modo en el amortiguador, la fuerza es proporcional a la velocidad y por tanto:

$$F_{amortiguamiento} = c\,v = \; c\frac{dx}{dt} \qquad [II.110]$$

Y según la segunda ley de Newton

$$F_{inercia} = m\,a = m\,\frac{d^2x}{dt^2} \qquad [II.111]$$

El sistema masa-resorte-sensor está rígidamente unido a una carcasa que es la que se fija al elemento del que se pretende conocer su vibración. La vibración se registra como consecuencia del movimiento que sufre la masa m, movimiento que capta el sensor.

Según las tres expresiones anteriores, con un transductor sísmico de este tipo, conociendo los valores de $k, c\,y\,m$, se podría medir desplazamientos, velocidades o aceleraciones. Ahora bien, lo más normal es la medida de aceleraciones con este tipo de instrumentos, ya que para medir desplazamientos se necesitarían masas muy grandes y resortes muy flexibles, sin embargo la medida de aceleraciones requiere de masas pequeñas y resortes rígidos, lo que hace más adecuado para su construcción en elementos de tamaño manejable para su colocación en estructuras.

Partiendo de la figura anterior, recordando que se presentó como un sistema con un grado de libertad, se tiene que el sistema se mueve "x" y por tanto es el movimiento absoluto del sistema, y la masa se mueve "y" y representa igualmente su movimiento absoluto, con lo que en un sistema de referencia fijo "z", se puede obtener el movimiento relativo, que es el detectado por el sensor, y viene dado por:

$$z = y - x \qquad [II.112]$$

Este es por tanto el movimiento relativo de la masa respecto al sistema, y por lo tanto las expresiones anteriores quedan del siguiente modo:

$$F_{elástica} = k\,(y - x)$$

$$F_{amortiguamiento} = c\,v = \; c\frac{d(y-x)}{dt}$$

$$F_{inercia} = m\,a = m\,\frac{d^2y}{dt^2}$$

Si se aplica la ecuación del movimiento a la masa, se obtiene:

$$p(t) = kz + c\frac{dz}{dt} + m\frac{d^2y}{dt^2} = 0 \qquad [II.113]$$

Teniendo en cuenta que $z = y - x$, se cumple que:

$$\frac{dz}{dt} = \frac{dy}{dt} - \frac{dx}{dt} \qquad [II.114]$$

$$\frac{d^2z}{dt^2} = \frac{d^2y}{dt^2} - \frac{d^2x}{dt^2} \quad \Rightarrow \quad \frac{d^2y}{dt^2} = \frac{d^2z}{dt^2} + \frac{d^2x}{dt^2} \qquad [II.115]$$

Y por lo tanto:

$$kz + c\frac{dz}{dt} + m\frac{d^2z}{dt^2} = -m\frac{d^2x}{dt^2} \qquad [II.116]$$

La ecuación anterior se puede transformar llamando

$\omega_m = \left(k/m\right)^{1/2}$ pulsación de la masa sobre el resorte

$\lambda = \frac{c}{2(km)^{\frac{1}{2}}}$ factor de amortiguamiento

$K = \frac{1}{k}$ sensibilidad estática

como sigue:

$$\frac{d^2z}{dt^2} + 2\lambda\omega_m\frac{dz}{dt} + \omega_m^2 z = -\frac{d^2x}{dt^2} \qquad [II.117]$$

A partir de esta ecuación, el objetivo es calcular la función de transferencia del transductor, siendo necesario para ello en un primer paso, el cálculo de la transformada de Laplace, considerando las condiciones iniciales nulas, se obtiene:

$$(s^2 + 2\lambda\omega_m s + \omega_m^2)Z(s) = -s^2X(s)$$

operando:

$$\frac{Z(s)}{X(s)} = \frac{-s^2}{s^2+2\lambda\omega_m s+\omega_m^2} \qquad [II.118]$$

Esta ecuación se puede desarrollar y particularizar para transductores de desplazamiento, para transductores de velocidad y para transductores de aceleración, desarrollo matemático que no se expone al salirse del objeto de esta tesis, para exponer las consideraciones de índole práctico de estos instrumentos de medida, aunque si conviene exponer de forma resumida el resultado para cada uno de ellos, en el caso de que el sistema se mueva a de forma sinusoidal con amplitud A y pulsación $\omega = \frac{2\pi}{T}$ donde T es el período de la vibración:

- En los transductores de desplazamiento se llega a que:

  $$z(t) = A\cos\omega t = x(t) \qquad [II.119]$$

  Se puede decir que el desplazamiento relativo de la masa, x, es idéntica tanto en fase como en magnitud con el desplazamiento del sistema, z.

- En los transductores de velocidad se obtiene:

  $$\frac{dz}{dt} = -A\,\omega\sin\omega t = \frac{dx}{dt} \qquad [II.120]$$

  De la expresión a la que se llega se puede decir que la velocidad relativa de la masa, $\frac{dx}{dt}$, es idéntica tanto en fase como en magnitud con la velocidad de desplazamiento del sistema, $\frac{dz}{dt}$, y por lo tanto, la señal captada por un transductor de velocidad sólo depende de la velocidad del sistema.

- En los transductores de aceleración se llega a que:

  $$z(t) = -\frac{m}{k}\frac{d^2x}{dt^2} \qquad [II.121]$$

Este tipo de transductores son los acelerómetros y a la vista de su ecuación de funcionamiento dentro del sistema en vibración, requiere de una masa pequeña y un resorte muy rígido, de forma que se puede conseguir una frecuencia muy alta en el sensor. Al necesitar una masa *m* muy pequeña, el instrumento de medida será de reducidas dimensiones y peso y por tanto no tendrá efecto sobre la inercia total del sistema.

A la vista de las expresiones matemáticas a las que se llega en cada uno de ellos se puede intuir el campo de aplicación adecuado para cada uno de los diferentes transductores, y depende principalmente de las frecuencias que se quieran obtener del sistema en vibración. Así, para sistemas con frecuencias naturales bajas, el transductor debe tener una masa grande, con la desventaja de ser un instrumento grande, empleándose sólo para medida de desplazamientos, siendo los más utilizados los acelerómetros.

La investigación planteada en esta tesis pretende proponer observaciones GPS que a través de la observación continua de los desplazamientos, permitan determinar los modos de vibración de una estructura, concretamente durante la ejecución del tablero de sección metálica, cuyo procedimiento constructivo es mediante empuje del mismo desde uno de los estribos hasta llegar al otro, así como su posible aplicación posterior en su fase de explotación, todo ello a través de procesos de monitorización.

Esta propuesta viene motivada por el hecho de que en sistemas con frecuencias bajas, y por lo tanto periodos altos, aspecto que se da especialmente durante la construcción de puentes empujados, lo más adecuado es medir desplazamientos frente a las otras alternativas como son velocidades o aceleraciones, medida que puede ser monitorizada mediante GPS de forma ideal.

Ahora bien, los movimientos vibratorios tienen una naturaleza compleja y es habitual tener que recurrir a análisis matemáticos avanzados para discernir su estudio frecuencial, realizándose a través del análisis de Fourier. En este campo, tradicionalmente utilizado en la ingeniería industrial y aeronáutica, es habitual la utilización de transductores de velocidad o aceleración, para realizar posteriormente un análisis frecuencial, dado que trabajan con sistemas con frecuencias altas donde el desplazamiento es pequeño y por tanto es complicado medir éste.

De esta forma, la importancia de medir la vibración en una estructura radica por un lado en que puede afectar al uso confortable de la misma, así como su durabilidad y seguridad, y por otro, del análisis espectral de la misma así como la evolución de ésta en el tiempo, se puede comprobar el comportamiento adecuado o posibles daños que la estructura pudiera tener.

Esta propuesta se realiza en aras de un mayor control de la seguridad estructural del puente, eliminando la instrumentación clásica utilizada durante el empuje, que no permite determinar las vibraciones y proponiendo el uso de un único instrumental (GPS) con el que se plantearía el control geométrico y el análisis de vibraciones.

8.4.- INSTRUMENTACIÓN.

Es importante matizar que el desarrollo de este instrumental se ha producido principalmente al albor de la ingeniería industrial y aeronáutica, en la actualidad y en el campo de la ingeniería civil este instrumental está mucho menos desarrollado, principalmente por problemas de escala, si bien aplicando la misma filosofía se puede llegar a usos y conclusiones similares.

La filosofía, debido a las estrictas normas de calidad actuales de la industria, así como la fuerte competencia global, ha obligado a cambiar los departamentos inicialmente creados de reparación o sustitución de piezas completas, mantenimiento correctivo, así como los creados posteriormente y denominados de mantenimiento preventivo, donde se hacían revisiones periódicas y se cambiaban las piezas en función de

estimaciones estadísticas, a un nuevo departamento donde se aplican nuevas técnicas predictivas, mantenimiento predictivo, basados en realizar mediciones periódicas de diferentes variables físicas dependientes de cada tipo de equipo, con el objetivo de ofrecer información con la anticipación suficiente para tomar las decisiones oportunas en cada momento.

El mantenimiento predictivo está fundamentado en diferentes disciplinas, siendo la de más importancia la del análisis de vibraciones, ya que mediante un análisis adecuado de las mismas se pueden detectar valores anormales, pudiéndose aplicar esta misma idea en estructuras de obra civil, y proponiendo en esta tesis dicha aplicación durante la construcción de tableros empujados dada su alta flexibilidad.

En el caso de poder hacerse por esta nueva vía planteada en esta investigación, se podrá tener el histórico de los datos, incluso los datos del momento de su construcción.

8.4.1.- Transductor de desplazamiento.

El transductor de desplazamiento, denominado también proxímetro, se utiliza para bajas frecuencias (por debajo de 1.000 Hz), midiendo así el desplazamiento radial o axial de ejes y es utilizado principalmente medir desplazamiento radial de ejes de turbinas.

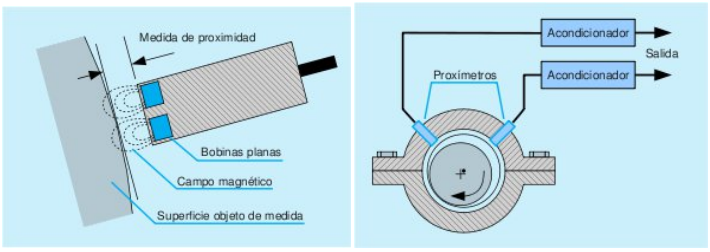


Imagen II.16.- Esquema de un próximetro (Izqda.) - proxímetro en un cojinete (Dcha.).[Sinais Ingeniería]

Estos sistemas están compuestos por un sensor y un acondicionador de señal. Su respuesta en frecuencia es excelente. No tienen un límite inferior de frecuencia de trabajo y se emplean en la medición tanto de vibración como de la posición axial de ejes.



Imagen II.17.- Transductor sísmico de desplazamiento. [Sinais Ingeniería]

Estos sistemas requieren de una instalación permanente y costosa, lo que le confiere una gran desventaja. De momento no se le ha encontrado aplicación en ingeniería civil.

8.4.2.- Transductor de velocidad.

El transductor de velocidad está compuesto por un imán situado en el centro de una bobina, de forma que cuando el sistema vibra, hay un movimiento relativo entre el imán y el bobinado, de forma que según la ley de Faraday se induce una tensión que es proporcional a la velocidad del movimiento.

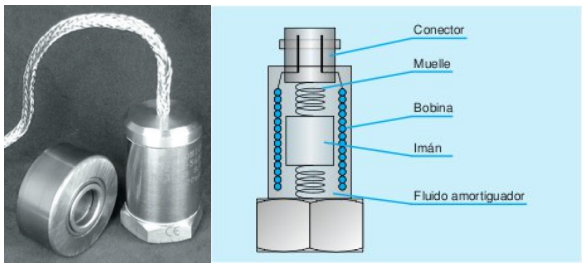


Imagen II.18.- Transductor sísmico de velocidad. [Sinais Ingeniería]

De este modo, la fuerza electromotriz inducida en la bobina, responde a la ecuación:

$$Fuerza\ electromotriz = \Psi\ \mathcal{L}\ v \qquad [II.122]$$

donde:

$\Psi\ es\ la\ inducción\ (teslas)$

$\mathcal{L}\ es\ la\ longitud\ de\ la\ bobina\ (metros)$

$v\ es\ la\ velocidad\ de\ la\ bobina$

Tiene la ventaja de poder medir directamente la velocidad, ya que es proporcional a la vibración, y la desventaja de ser relativamente voluminoso así como tener una dependencia grande en su fiabilidad de los datos de la temperatura. Igualmente este transductor es de escasa aplicación en la ingeniería civil.

8.4.3.- Acelerómetro con banda extensométrica.

Este tipo de acelerómetro se basa en medir a través de una banda extensométrica las deformaciones por flexión producidas por la vibración en una ménsula que en sus extremos porta una masa m. La banda extensométrica mide la deformación a través de la variación de resistencia eléctrica en las mismas [FRAIL-12].

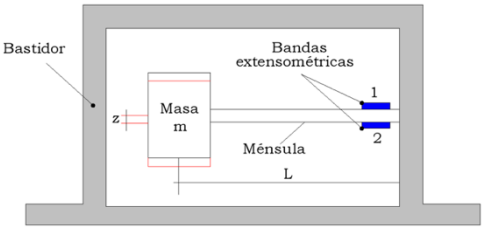


Figura II.45.- Acelerómetro con banda extensométrica en una ménsula.

Así, según el esquema de la figura anterior, durante la vibración, la masa m sufre un desplazamiento, que si se relaciona con la flecha dada por la resistencia de materiales en una ménsula, se tiene [FRAIL-12]:

$$y = \frac{Pl^3}{3EI} \qquad [II.123]$$

donde:

$P\ fuerza\ actuante\ sobre\ la\ masa\ m$

$l\ longitud\ del\ voladizo$

$E\ módulo\ de\ elasticidad$

$I\ inercia\ de\ la\ ménsula$

En el sistema se puede expresar:

$$P = k\ y \qquad [II.124]$$

siendo k la rigidez del sistema, similar a la constante de la ley de Hooke.

De las dos expresiones anteriores se puede obtener el valor de la constante k, rigidez del sistema:

$$P = k\,\frac{Pl^3}{3EI} \Rightarrow k = \frac{3EI}{l^3} \qquad \text{[II.125]}$$

En la ecuación [II.117], se denomino pulsación de la masa sobre el resorte al término $\omega_m = \left(k/m\right)^{1/2}$ con lo que:

$$\omega_m = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{3EI}{ml^3}} \qquad \text{[II.126]}$$

El siguiente paso es la determinación de la deformación en la banda extensométrica debida al desplazamiento de la masa en el extremo, deformación que viene dada por la siguiente expresión:

$$\sigma = E\varepsilon \;\Rightarrow\; \varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{Ple}{2EI} \qquad \text{[II.127]}$$

siendo e el espesor de la ménsula.

Según lo obtenido en la ecuación [II.122], se tiene que:

$$y(t) = -\frac{m}{k}\frac{d^2x}{dt^2} \qquad \text{[II.128]}$$

que sustituyendo con las expresiones anteriores se obtiene:

$$y(t) = -\frac{m}{k}\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{Pl^3}{3EI} = \frac{2\varepsilon l^2}{3e}$$

$$-\frac{\varepsilon}{\frac{d^2x}{dt^2}} = \frac{3em}{2kl^2} = \frac{eml}{2EI} \qquad \text{[II.129]}$$

Esta última ecuación se denomina la sensibilidad estática del acelerómetro y ω_m la respuesta del mismo en el dominio de la frecuencia.

De estas dos ecuaciones se pueden sacar bastantes conclusiones de cara a la utilización de los acelerómetros. Si se analiza la expresión de la sensibilidad, para que este tenga mucha sensibilidad la masa y la longitud de la ménsula deberían ser valores elevados aunque esto mismo haría que la frecuencia natural se viera muy reducida [FRAIL-12]. Por lo tanto hay que conseguir una combinación entre ambas de forma que de cumplimiento adecuado a ambas.

8.4.4.- Acelerómetro piezoeléctrico.

Este tipo de transductor a través de la presión sobre un cristal piezoeléctrico genera una tensión eléctrica, que es proporcional a dicha presión. Son adecuados para vibraciones con alta frecuencia con desplazamientos relativamente pequeños.

El esquema de un acelerómetro piezoeléctrico se puede ver en la siguiente imagen, donde en la parte superior dispone de un muelle semiesférico que fija la masa del instrumento contra los cristales piezoeléctricos, cristales que son sensibles a la fuerza que se ejerce sobre ellos y la convierten en una señal eléctrica equivalente [FRAIL-12].

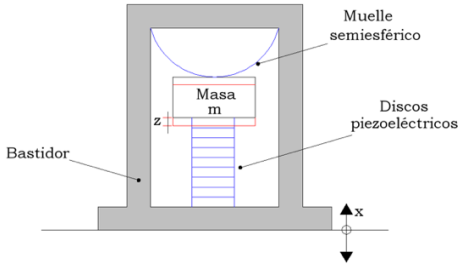


Figura II.46.- Acelerómetro piezoeléctrico.

El comportamiento de estos transductores se analiza a partir de dos conceptos, el primero denominado sensibilidad de carga del instrumento, que viene definido por:

$$\Psi_{\varphi} = \frac{\varphi}{P} \qquad [II.130]$$

donde:

$\varphi\ carga\ generada$

$P\ fuerza\ aplicada\ sobre\ los\ cristales$

Y el segundo factor de sensibilidad de tensión, definido a partir de la ecuación siguiente:

$$\Psi_{\tau} = \frac{\tau}{P} \qquad [II.131]$$

donde:

$\tau\ voltaje$

$P\ fuerza\ aplicada\ sobre\ los\ cristales$

Ambas expresiones se pueden relacionar a partir de la capacidad del condensador que forman los discos piezoeléctricos, ya que:

$$\Psi_{\tau} = \frac{\tau}{P} = \frac{\frac{\varphi}{C}}{P} = \frac{\varphi}{PC} = \frac{\Psi_{\varphi}}{C} \qquad [II.132]$$

Expresión que relaciona ambos factores, que si además se relaciona la capacidad C, con la permitividad de los cristales y el espesor de estos se tiene:

$$C = \frac{\epsilon\Omega}{\kappa} \qquad [II.133]$$

donde:

$\epsilon\ permitividad = \epsilon_{cristal}\epsilon_{vacío}$

$\Omega\ área\ del\ cristal$

$\kappa\ espesor\ del\ cristal$

Y de forma general, en este tipo de transductores, el valor de la pulsación de la masa responde a:

$$\omega_m = \sqrt{\frac{\Omega E}{m\kappa}} \qquad [II.134]$$

La ventaja de este tipo de transductores es que son muy compactos, de poco peso y de tamaño reducido y por lo tanto su montaje es relativamente sencillo, teniendo como desventaja la necesidad de alimentación externa y por tanto tener que cablear toda la estructura en su fase de construcción, en principio determina aceleraciones teniendo que integrar para hacer representaciones espectrales, lo que lleva a una pérdida de información y no da directamente desplazamientos.



Imagen II.19.- Transductor piezoeléctrico (Izqda.) – Acelerómetro piezoeléctrico (Dcha.). [Sinais Ingeniería]

8.4.5.- Acelerómetro de balance de fuerza (servoacelerómetro).

En el caso de que las vibraciones se produzcan sobre grandes estructuras, es necesario disponer de acelerómetros muy sensibles que puedan captar las bajas aceleraciones que se producen sobre ellas, debido a que los modos de vibración se producen igualmente a frecuencias bajas, siendo en estos casos el más adecuado el acelerómetro de balance de fuerza.

Su funcionamiento se basa en el que al contrario que los anteriores, se crea una fuerza interna de forma que la masa del instrumento permanezca en todo momento en equilibrio relativo con respecto a su posición dentro del propio instrumento. Su esquema fundamental se puede ver en la siguiente imagen [FRAIL-12].

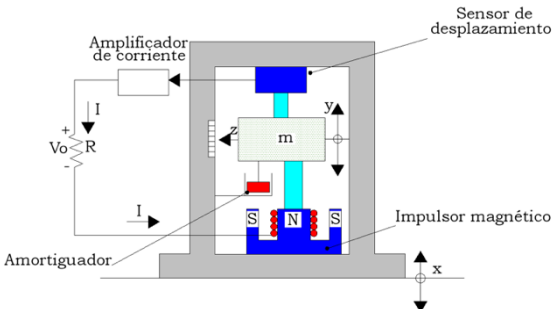


Figura II.47.- Servoacelerómetro.

El instrumento se compone de un sensor de desplazamiento, que es el que indica la señal eléctrica que se debe producir para compensar el movimiento relativo de la masa, de este modo, la corriente aportada da una idea de la aceleración producida sobre el instrumento.

Así, haciendo un desarrollo similar al realizado en anteriores modelos, se tiene que el movimiento relativo de la masa viene dado por:

$$z = y - x$$

Este es por tanto el movimiento relativo de la masa respecto al sistema, y por lo tanto las expresiones anteriores quedan del siguiente modo [FRAIL-12]:

$$F_{elástica} = k\,(y - x) = 0$$

$$F_{amortiguamiento} = c\,v = \; c\frac{d(y-x)}{dt}$$

$$F_{inercia} = m\,a = m\,\frac{d^2y}{dt^2}$$

$$F_{corriente} = \Gamma_1 I$$

Si se aplica la ecuación del movimiento a la masa, se obtiene:

$$p(t) = \Gamma_1 I + c\frac{dz}{dt} + m\frac{d^2y}{dt^2} = 0 \qquad \text{[II.135]}$$

siendo:

Γ_1 *fuerza del excitador magnético por unidad de corriente*

I *corriente a su vez proporcional al desplazamiento:* $I = \Gamma_2 z$

De la ecuación anterior se tiene:

$$z = \frac{I}{\Gamma_2} \Rightarrow \begin{cases} \dfrac{dz}{dt} = \dfrac{1}{\Gamma_2}\dfrac{dI}{dt} \\ \dfrac{d^2z}{dt^2} = \dfrac{1}{\Gamma_2}\dfrac{d^2I}{dt^2} \end{cases} \qquad \text{[II.136]}$$

que teniendo en cuenta que $z = y - x$, se cumple que:

$$\frac{dz}{dt} = \frac{dy}{dt} - \frac{dx}{dt}$$

$$\frac{d^2z}{dt^2} = \frac{d^2y}{dt^2} - \frac{d^2x}{dt^2} \quad \Rightarrow \quad \frac{d^2y}{dt^2} = \frac{d^2z}{dt^2} + \frac{d^2x}{dt^2}$$

y por tanto:

$$\Gamma_1 I + c\frac{dz}{dt} + m\frac{d^2z}{dt^2} + m\frac{d^2x}{dt^2} = 0$$

$$\Gamma_1 I + \frac{c}{\Gamma_2}\frac{dI}{dt} + \frac{m}{\Gamma_2}\frac{d^2I}{dt^2} = -m\frac{d^2x}{dt^2} \qquad \text{[II.137]}$$

A partir de esta ecuación, el objetivo es calcular la función de transferencia del transductor, siendo necesario para ello en un primer paso, el cálculo de la transformada de Laplace de la ecuación anterior, considerando las condiciones iniciales nulas, obteniendo [FRAIL-12]:

$$\left(\frac{m}{\Gamma_2}s^2 + \frac{c}{\Gamma_2}s + \Gamma_1\right) I(s) = -ms^2 X(s) \qquad \text{[II.138]}$$

obteniendo:

$$\frac{I(s)}{X(s)} = \frac{-ms^2}{\frac{m}{\Gamma_2}s^2 + \frac{c}{\Gamma_2}s + \Gamma_1}$$

que expresado de otro modo:

$$\frac{I(s)}{s^2 X(s)} = \frac{-\Gamma_2}{s^2 + \frac{c}{m}s + \frac{\Gamma_1\Gamma_2}{m}} \qquad \text{[II.139]}$$

siendo la frecuencia natural:

$$\omega_{natural} = \sqrt{\frac{\Gamma_1\Gamma_2}{m}} \qquad \text{[II.140]}$$

Llegando, como se explicó en la introducción de los transductores de aceleración a que:

$$i(t) = -\frac{m}{\Gamma_1}\frac{d^2x}{dt^2} \qquad \text{[II.141]}$$

que es una ecuación similar a la obtenida [II.102], indicando en este caso que la intensidad de corriente necesaria para compensar la masa m es proporcional a la aceleración $\frac{d^2x}{dt^2}$.



Imagen II.20.- Servoacelerómetro, aspecto externo.[Sensorex]

Con estos dispositivos, [FRAIL-12], se pueden lograr sensibilidades muy altas y que pueden medir aceleraciones entre $\pm 0{,}1g$ y $\pm 1g$ y con una tensión de salida analógica en el rango de $\pm 5\,V$. Además, se consigue una buena respuesta a la frecuencia, que es bastante plana entre 2 y $500\,Hz$.

CAPÍTULO III

LOS SISTEMAS GPS EN EL MARCO DEL CONTROL GEOMÉTRICO DE ESTRUCTURAS.

1.- INTRODUCCIÓN

Habitualmente se considera GPS a la abreviatura de NAVSTAR GPS, que viene a representar el acrónimo en inglés de NAVigation System with Time And Ranging Global Positioning System, que en castellano significa Sistema de Posicionamiento Global con Sistema de Navegación por Tiempo y Distancia. El sistema GPS es la solución para una de las incógnitas más antiguas que se ha planteado el hombre, cuál es la posición de un punto sobre la superficie terrestre. Durante muchos siglos, este problema fue resuelto empleando observaciones astronómicas al Sol y las estrellas, lo que permitía posicionar puntos que posteriormente servían de referencia para otras observaciones geodésicas o topográficas que permitían la representación del territorio de forma georeferenciada.

Estos métodos cumplían su cometido dentro de ciertos límites, pues el Sol y las estrellas no pueden ser observados cuando el cielo está nublado. Además, aún efectuando mediciones lo más precisas posibles, la posición no podía ser determinada de forma muy exacta. Después de la Segunda Guerra Mundial, el Departamento de Defensa de los Estados Unidos buscó incansablemente una solución al problema de determinar una posición absoluta y exacta. Durante los siguientes veinticinco años, se llevaron a cabo muy diversos proyectos y experimentos con este fin, entre los que se cuentan los sistemas Transit, Timation, Loran, Decca etc. Todos ellos permitían determinar posiciones, pero continuaban siendo muy limitados en precisión y funcionalidad.

A principios de los años setenta se propuso un nuevo proyecto, el GPS. Este concepto prometía satisfacer todos los requerimientos del gobierno de los Estados Unidos, principalmente el poder determinar en cualquier momento y bajo cualquier condición atmosférica, una posición precisa en cualquier punto de la superficie terrestre. El GPS es un sistema basado en satélites artificiales, dispuestos en una constelación de veinticuatro satélites, para brindar al usuario una posición precisa. El concepto de precisión depende de las necesidades que puedan tener el usuario o mejor dicho, el fin para el que se necesiten los posicionamientos en navegación posiblemente con 5 metros de precisión es más que suficiente. Sin embargo en ingeniería se hace necesario buscar precisiones que no pasen de 1 centímetro e incluso menores. El GPS se puede emplear para obtener todos estos rangos de precisión, la diferencia radicará en el tipo de receptor a emplear y en la técnica aplicada.

El GPS fue diseñado originalmente para emplearse con fines militares, en cualquier momento y sobre cualquier punto de la superficie terrestre. Poco tiempo después de presentarse las propuestas originales de este sistema, resultaba claro que el GPS también podía ser utilizado en aplicaciones civiles y no únicamente para obtener el posicionamiento personal como era previsto para los fines militares. Las dos primeras aplicaciones principales de tipo civil fueron aquellas para navegación y geodesia. Hoy en día, el rango de aplicaciones va desde la navegación de automóviles, la administración de una flota de camiones, hasta la automatización de maquinaria de construcción, actividades topográficas inherentes a todo tipo de obra civil, etc. en todas ellas los posicionamientos requieren precisiones mayores del centímetro. En esta investigación se pretende determinar si este instrumental y técnica de medida puede utilizarse en el control geométrico de estructuras en las que el rango de precisión baja del centímetro.

2.- LA GEODESIA ESPACIAL.

2.1.- INTRODUCCIÓN.

2.1.1.- Origen de la geodesia espacial.

Una de las definiciones más empleada para establecer el concepto de Geodesia la hizo el geodesta alemán Friedrich Robert Helmert en el siglo XIX, que dijo que la Geodesia era la "ciencia de medir y cartografiar la superficie terrestre". Históricamente el papel de la geodesia ha ido evolucionando en campos de conocimiento que han permitido la determinación de la forma de la superficie terrestre a partir de la observación de cuerpos celestes desde la tierra, siendo la luna con una alta probabilidad el primero, aunque también bien abarca otros campos, como son la determinación de la forma terrestre incorporando el campo gravitatorio, figuras de aproximación, tratamiento de las observaciones geodésicas, las proyecciones cartográficas, etc.

Todo esto se puede resumir, complementado a lo expresado por Helmert, según se expresa en [TORGE-83]: *"El problema de la geodesia es determinar la figura y el campo de gravedad externo a la tierra y de otros cuerpos celestes, en función del tiempo; al igual que, determinar el elipsoide terrestre medio partiendo de parámetros observados sobre y exteriormente a la superficie de la tierra".*

Tanto es así que a lo largo de la historia ha existido la necesidad de definir una forma de la tierra, siendo la primera la esfera. Este hecho fue discutido desde antiguo, incluso 800 años a.C., pasando entre otros por Pitágoras y Aristóteles, siendo Eratóstenes (276-195 a.C.) el que llegó a dar una medida aproximada del radio de ésta. Éste basó su medición en la diferente longitud de la sombra en dos puntos situados en el mismo meridiano pero con diferentes latitudes. De esta forma observó que en Siena, hoy Asuán, en el solsticio de verano los rayos del sol iluminaban el fondo de los pozos; mientras que en Alejandría, que supuso situada en el mismo meridiano, no ocurría lo mismo. A partir de la distancia entre ambas localizaciones y el ángulo de incidencia de los rayos solares en Alejandría pudo calcular el radio terrestre con una aproximación considerable para su época, del orden del 15%.

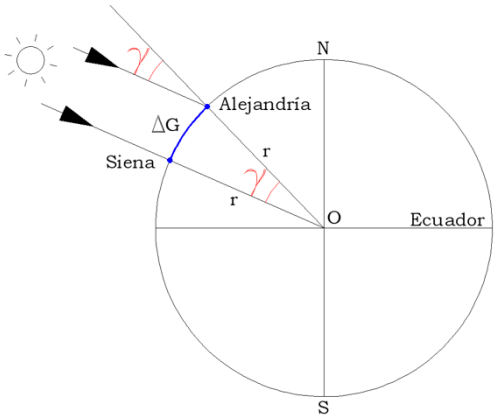


Figura III.1.- Método de medida de arco de Eratóstenes.

Así, el valor obtenido del radio de la tierra suponiendo ésta esférica, ha ido cambiando en función de la precisión conseguida en la medida del arco y, por tanto, en la evolución del instrumental disponible, estando por un lado los telescopios para visualización de cuerpos celestes, o por otro lado el instrumental topográfico utilizado principalmente en triangulaciones cada vez más largas, siendo en el año 1670 cuando el astrónomo Jean Picard obtiene un valor del radio con una precisión de 0.01%.

Desde el siglo XV principalmente comienzan las teorías de la no esfericidad de la tierra, a partir de diferentes fenómenos y experimentos que inducen a ello, como la

observación del achatamiento de los polos en Júpiter mediante observaciones astronómicas o el incremento de la gravedad en zonas próximas al polo frente a zonas cercanas al ecuador. Es Newton quien en 1687 formuló un elipsoide de revolución como forma aproximada de la tierra, representando dicho elipsoide el equilibrio de una masa homogénea, líquida y rotacional basada en la validez de la ley de la gravitación universal [TORGE-83], formulación que propone comprobar con medidas de arcos, es decir, la relación entre la geodesia geométrica y física es biunívoca. Estas mediciones de arcos para dar forma al elipsoide se produjeron a lo largo de los siglos XIX y XX, fundamentados en levantamientos geodésicos, siendo más recientes los métodos astro-geodésicos.

Ahora bien, modelizar la tierra mediante un elipsoide global no genera una precisión de observación suficientemente alta, debido a la falta de coincidencia de la normal al elipsoide en un punto con la dirección de la gravedad en éste, cabe destacar que aunque realizaron ajustes de forma continua, no consiguieron errores aceptables en la medida, razón por la cual hubo que desarrollar toda la teoría relativa a la figura del geoide.

Obligado aquí es definir el geoide, que según [FERRE-92] es una superficie equipotencial del campo gravitatorio terrestre y, por lo tanto, el lugar geométrico de los puntos que están en equilibrio por la actuación de las siguientes solicitaciones:

- Fuerzas gravitacionales de la tierra.
- Fuerzas de atracción de los demás astros.
- Fuerza centrífuga debida a la rotación terrestre.

Estudiando estas fuerzas y los potenciales que provocan se puede definir física y geométricamente la figura del geoide, que es asimilable a prolongar la superficie de los mares en calma por debajo de los continentes.

La definición del geoide se hizo desde finales del siglo XIX hasta los años cincuenta del siglo XX convirtiéndose en el gran reto u objetivo de la geodesia en ese periodo de tiempo. A partir de los años ochenta del siglo XX se incrementa notablemente la importancia de este objetivo debido a la necesidad del establecimiento de sistemas de referencia tridimensionales globales. La razón no es otra que la entrada en la era espacial con el lanzamiento de los primeros satélites artificiales, iniciada con el lanzamiento del primer satélite artificial el 4 de octubre de 1957 por parte de la antigua URSS, el Sputnik I, y acelerada con el uso cada vez más intensivo de los satélites artificiales para innumerables aplicaciones.

Este primer lanzamiento supuso el establecimiento de un sistema de referencia único para toda la tierra, aumentando sensiblemente la precisión de los sistemas geodésicos que se habían venido utilizando, así como el establecimiento de nuevos métodos de medición y procesado de datos ya que estos satélites se encuentran a alturas considerables y se mueven a gran velocidad.

Igualmente los satélites proporcionaron la posibilidad de resolver problemas geodésicos clásicos como fueron las triangulaciones de lados de más de cien kilómetros o posicionamientos absolutos con mayor precisión a los obtenidos hasta entonces.

Esto obliga a un conocimiento aún más profundo del campo gravitatorio terrestre ya que es necesario conocer por un lado las órbitas de los satélites con exactitud, y por otro la posición de los puntos en la tierra desde los que se capta la señal para una correcta interpretación de todos los datos recibidos mediante radiación electromagnética desde ellos.

Así, desde el lanzamiento de aquel primer satélite hasta la actualidad, se han puesto en marcha numerosos programas espaciales con instrumentación cada vez más sofisticada (espejos, relojes, transmisores, radio altímetros, estabilizadores de órbita,

etc.). Fundamentalmente en geodesia se utilizan dos tipos de satélites, por un lado los satélites pasivos que se caracterizan por no emitir radiaciones y sólo reflejar las que reciben, por otro lado están los satélites activos que sí emiten radiaciones electromagnéticas. Todos ellos dan lugar a diferentes sistemas de posicionamiento.

2.1.2.- Antecedentes a los sistemas actuales de posicionamiento espacial.

2.1.2.1.- Sistema láser por satélite (SLR).

El sistema SLR (Satellite Laser Ranging) se fundamenta en medir la distancia a un satélite desde una estación ubicada en la superficie de la tierra en función del tiempo de viaje de un haz láser emitido desde ésta, según se esquematiza en la siguiente figura, en la que se utiliza el equipo de láser pulsante, un fotodetector y un reloj atómico de control de tiempo que controla el tiempo que se tarda en recorrer *estación – satélite – estación*.

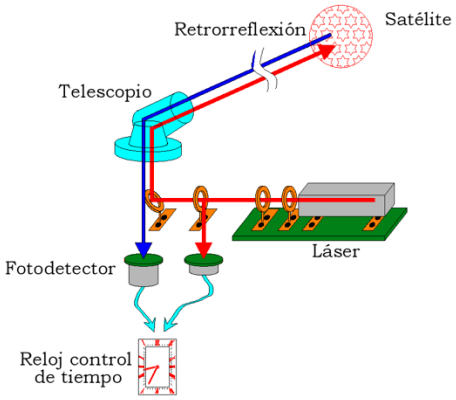


Figura III.2.- Fundamento del mecanismo de observación con SLR.

El tipo de satélites utilizados en este sistema son pasivos con esferas recubiertas de prismas de reflexión total, siendo el primero puesto en órbita por Francia el STARETTE en el año 1975. Para dar cobertura a este sistema, existen varias constelaciones en la actualidad, la denominada LAGEOS [Láser – GEOdynamic, Satellite] con 5.900 *km* de altura orbital, la constelación AJISAI y la rusa ETALON [SEEBE-93].

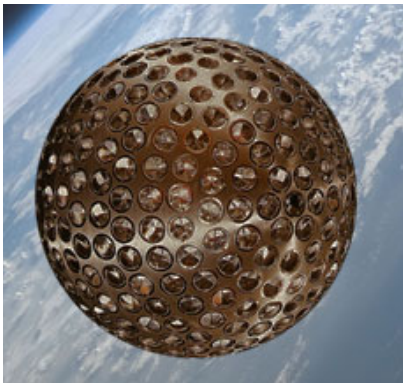


Imagen III.1.- Satélite LAGEOS 2.

Este tipo de medidas en España se puede realizar desde el Real Instituto y Observatorio de la Armada de San Fernando (Cádiz) con un láser de tercera generación de seguimiento de satélites situado en la cúpula principal. Esta estación forma parte de la red europea EUROLAS y a su vez es miembro del International Laser Ranging Service (ILRS). En esta estación se consiguen precisiones centimétricas

con las correcciones oportunas de refracción troposférica así como del movimiento relativo entre el satélite y el instrumento.



Imagen III.2.- Real Instituto y Observatorio de la Armada (San Fernando-Cádiz).

2.1.2.2.- Interferometría de bases de gran longitud (VLBI).

La interferometría de bases de gran longitud (VLBI), aún no siendo un método geodésico basado en satélites, tiene la ventaja de conseguir una gran precisión en distancias largas, precisión centimétrica en distancias de miles de kilómetros, tomando como base la observación del retardo de una señal de radio extragaláctica observada de forma simultánea desde dos o más estaciones terrestres con un radiotelescopio. [SEEBE-93].

La señal captada tiene una longitud de onda que puede variar de 1,3 cm a 75 cm, siendo su frecuencia de 22 GHz a 0,5 GHz, señal que se procesa junto al tiempo medido a partir de un máser de hidrógeno. A su vez, se comprueban las medidas tomadas en dos o más estaciones, obteniendo por tanto el tiempo de retardo del frente de la señal en diferentes puntos, radiotelescopios. Este retardo lleva a obtener la diferencia de fase en fracciones de longitud de onda.

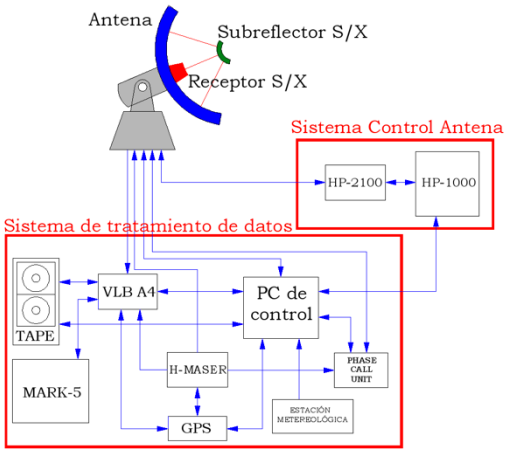


Figura III.3.- Fundamento del mecanismo de observación con VLBI.

El objeto es obtener la componente del vector que une dos radiotelescopios en la dirección de llegada de la señal y por tanto habrá que obtener las componentes coplanarias siendo necesario para ello repetir la observación en otras dos direcciones.

Los resultados obtenidos mediante VLBI son de mayor precisión que el resto de los existentes, motivo por el cual es ideal para su uso como método de calibración de los demás. Para ello hay que realizar las correcciones debidas al corrimiento Doppler de la señal, nutación, precesión, aberración diurna, retardo troposférico e ionosférico, relatividad general y especial, efectos de hardware, etc. [SEEBE-93].

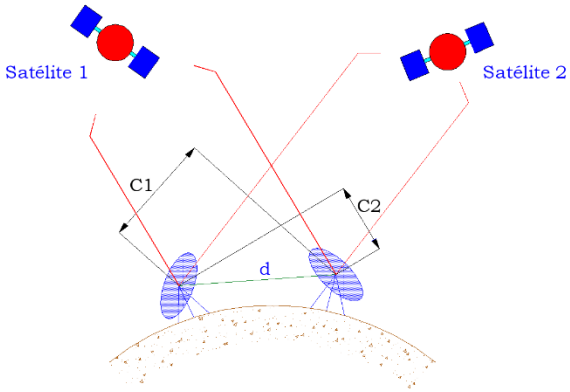


Figura III.4.- Fundamento del posicionamiento mediante observaciones con VLBI.

Este tipo de medidas en España se puede realizar desde el Centro Astronómico de Yebes, comenzando su desarrollado con la instalación de un radiotelescopio de 14 *metros* de diámetro para ondas milimétricas, a partir de los años 1970. Posteriormente en el año 2008, comenzó a funcionar un radiotelescopio de 40 *metros* de diámetros para ondas centimétricas y milimétricas para observaciones VLBI de antena única.

La aplicación de este sistema está enfocado para la obtención de distancias entre puntos muy lejanos así como parámetros de rotación terrestre, con una precisión centrimétrica.



Imagen III.3.- Radiotelescopio del Centro Astronómico de Yebes.

2.1.2.3.- Sistema TRANSIT.

El sistema se basa en poder determinar la posición de puntos en la corteza terrestre a partir de la señal emitida por satélites artificiales mediante la cuenta Doppler, propuesta de Frank McClure a partir del proceso contrario que se venía realizando en la Universidad Johns Hopkins, es decir, determinar posiciones satelitales a partir de puntos conocidos en la corteza terrestre.

Comienza su uso con los satélites Navy Navegation Satellite System, NNSS, comenzando su uso civil en 1967, con los satélites lanzados en órbitas a 1.100 km por cohetes Scont.

Estos satélites emiten cada dos minutos (UTC) señales mediante un oscilador de gran estabilidad en frecuencias de 400 y 500 MHz, las cuales permiten conocer su posición referidas a un datum geodésico con una precisión entre 10 y 20 $metros$.

Para analizar los datos, éstos se basan en el efecto Doppler, en el que la frecuencia varía según sea la velocidad de alejamiento o acercamiento del emisor respecto al receptor. De esta forma el receptor en la tierra genera una frecuencia de referencia constante que compara con la que recibe. La diferencia entre ambas es la que permite realizar la cuenta Doppler. Si a ésta se le añade la diferencia de tiempo entre dos

instantes de emisión del satélite, permiten calcular la distancia entre el receptor y ambas posiciones del satélite. Conocer esta distancia, permite determinar la posición del receptor en un hiperboloide de revolución cuyos focos están en las posiciones del satélite que han de haberse transmitido. La intersección de los sucesivos hiperboloides determina la posición del observador.

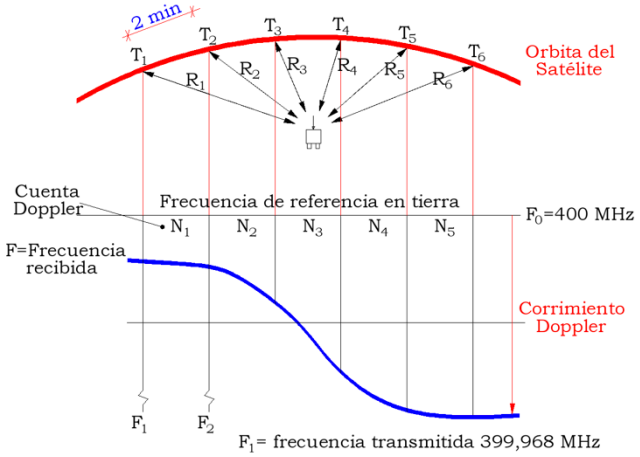


Figura III.5.- Fundamento del posicionamiento mediante cuenta Doppler.

2.2.- FUNDAMENTOS DE LOS SISTEMAS DE REFERENCIA GEODÉSICOS.

Uno de los principales objetivos de la geodesia y de la topografía es establecer coordenadas para puntos situados en la superficie terrestre con lo que es necesario que estén referidas a un sistema de referencia que sea fijo, ya sea dentro de un sistema bidimensional o tridimensional en función del trabajo a realizar, siendo este último el necesario en trabajos de geodesia global como el que ocupa en este trabajo, donde la coordenada de la altitud estará referida la geoide o elipsoide considerado, siendo necesario entender como traspasar de uno a otro así como conocer la precisión que se va a obtener en dicho sistema.

En geodesia espacial las observaciones (observaciones a astros, a satélites u otros cuerpos en movimiento) hay que referirlas a un instante determinado, por lo que hay que ser capaces de medir el tiempo con la mayor precisión posible, ya que las observaciones que se realicen van a estar referidas a ese instante.

Así, a la hora de elegir el sistema de referencia, los mayores obstáculos a librar son de tipo geodinámico, ya que la tierra no es un sólido de forma constante en el tiempo y por tanto los puntos que se pudieran considerar como fijos sufren deformaciones en el tiempo. Estas deformaciones, de forma principal, son producidas por: el movimiento del polo, el movimiento de placas tectónicas y las mareas terrestres.

Centrando la geodesia espacial más en el objeto de la investigación, la señal astral será emitida por un satélite artificial, y por tanto el observable es la distancia entre dicho satélite artificial y el receptor, con el objeto final de obtener la posición en tierra, participando en este proceso de determinación del observable los siguientes elementos:

- Los sistemas de referencia espaciales que sirven de referencia para establecer las posiciones de los diferentes elementos.
- El satélite artificial, sus componentes y su movimiento orbital.
- La escala de tiempos que es la que a través de la sincronización entre los relojes y el receptor permite determinar la distancia entre ambos.

- El conocimiento de la propagación de las ondas electromagnéticas en las diferentes capas de la atmósferas, los efectos relativistas así como el efecto multicamino.
- Los receptores en tierra de la señal.

Todos ellos quedan reflejados en la siguiente figura:

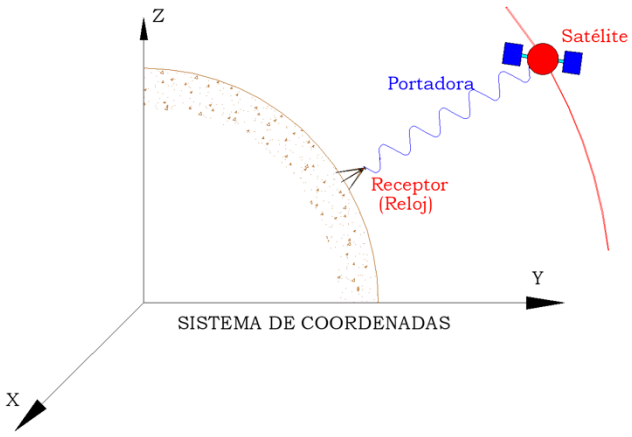


Figura III.6.- Consideraciones sobre los sistemas de referencia.

2.2.1.- Sistemas de referencia terrestres.

2.2.1.1.- Sistema de referencia astronómico local (AL).

Es el sistema fundamental para establecer coordenadas a partir de un sistema cartesiano y en el que todas las medidas geodésicas clásicas, excepto las distancias geométricas, se realizan materializando físicamente la vertical astronómica del lugar.

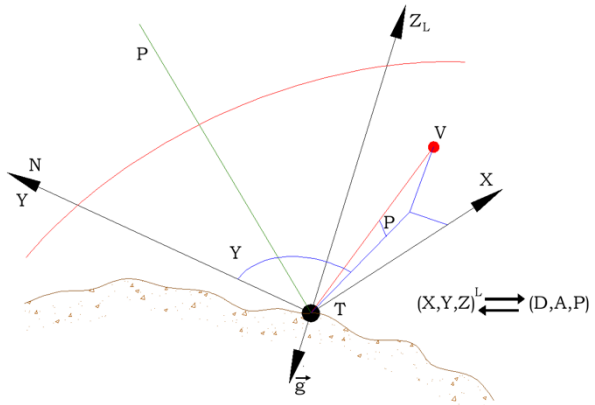


Figura III.7.- Sistema astronómico local.

Se define así un sistema astronómico local en V, punto de estación considerado, con ejes:

- eje z: sigue la dirección del vector gravedad en V y tiene sentido contrario.
- eje y: tangente a la superficie equipotencial que pasa por V y dirección Norte.
- eje x: tangente a la superficie equipotencial que pasa por V y dirección Este.

En este sistema, las coordenadas de cualquier punto viene determinado por:

$$V_i = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix}$$

El vector unitario en la dirección TV es,

$$\overrightarrow{u^{TV}} = \begin{bmatrix} \cos P & \sin A \\ \cos P & \cos A \\ \sin P & \end{bmatrix} \qquad [III.1]$$

que es el vector unitario de V en el sistema astronómico local.

Si la distancia entre ambos puntos, $T\,y\,V$, se conoce, siendo esta distancia D, las coordenadas en este sistema del punto V, vienen dadas por la siguiente expresión matricial:

$$Coordenadas\ de\ V: D\ \overrightarrow{u^{TV}} \Rightarrow \begin{bmatrix} x = D\cos P \sin A \\ y = D\cos P\ \cos A \\ z = D\ \sin P \end{bmatrix} \qquad [III.2]$$

Siendo la transformación inversa inmediata:

$$Coordenadas\ de\ V: \Rightarrow \begin{bmatrix} D = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \\ A = \arctan\dfrac{x}{y} \\ P = \arcsin\dfrac{z}{D} \end{bmatrix}$$

Quedando la transformación definida del siguiente modo:

$$(x, y, z)^{astronómico\ local} \rightleftarrows (D, A, P)$$

Este sistema es válido exclusivamente para zonas muy limitadas, ya que el eje z sigue siempre la dirección de la gravedad, y por lo tanto como es normal a la superficie equipotencial, en cada punto tendrá una dirección diferente, de este modo, el sistema de referencia padecerá una rotación de magnitud dependiente de la curvatura de las superficies equipotenciales del campo gravitatorio. Por tanto, un sistema de referencia astronómico local no será un sistema adecuado para hacer levantamientos ya que es exclusivo para cada punto, siendo válido solamente para referir observaciones.

Cabe aquí una pequeña observación sobre lo que habitualmente se hace en trabajos de topografía al tratar datos de forma conjunta aun habiendo sido tomados desde dos estacionamientos diferentes como pertenecientes a un único sistema, práctica que no es válida en cálculos geodésicos.

2.2.1.2.- Sistema de referencia global (C.T.)

Este sistema nace ante la necesidad obtener un sistema de referencia ligado al campo gravitatorio y que sus ejes no dependan del punto en estudio. En él, se define el meridiano astronómico de un punto el que conteniendo el vector gravedad de dicho punto es además paralelo al eje de rotación.

En este sistema, un punto viene definido por las siguientes coordenadas:

- Latitud astronómica Φ, ángulo medido sobre el plano meridiano entre la dirección de la gravedad en el punto y el plano del ecuador.
- Longitud astronómica Λ, ángulo medido sobre el plano ecuador entre meridiano de Greenwich y el meridiano astronómico.
- Potencial de la gravedad W, es el potencial de la gravedad en el punto y lo coloca dentro del sistema de superficies de nivel correspondiente.

Normalmente, para integrar de forma homogénea los datos obtenidos por diferentes observadores se toma como origen de coordenadas el centro de masas de la tierra, coincidiendo el eje z con el eje de rotación de la tierra y el plano formado por los ejes x-y, perpendicular al anterior y coincidente con el plano del Ecuador medio con la particularidad de que el eje x está en el plano del meridiano de Greenwich y el eje y perpendicular a los otros dos en sentido directo.

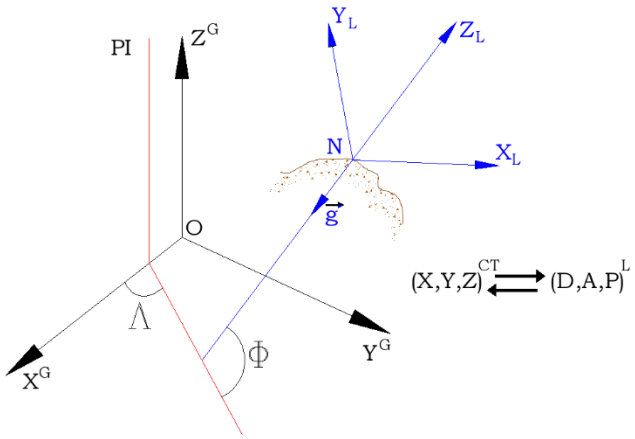


Figura III.8.- Sistema de referencia convencional terrestre o sistema astronómico global.

Las coordenadas (Φ, Λ), se pueden determinar de forma absoluta mediante observaciones astronómicas [MARTI-00].

Para transformar las coordenadas de este sistema a otro sistema de referencia cartesiano, hay que realizar un giro sobre cada uno de los ejes y que se denominará: θ_x, θ_y y θ_z.

Cabe recordar, con fundamento en el álgebra línea, que las matrices de rotación alrededor de cada uno de los ejes, para un ángulo θ genérico viene dada por:

$$R(\theta_x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} ; R(\theta_y) = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix}; R(\theta_z) = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Si un sistema es directo y otro retrógrado la matriz de cambio de sentido es:

$$S = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Las propiedades inherentes a las matrices de rotación son:

- El producto de matrices no es conmutativo aunque sí asociativo.
- Las rotaciones alrededor del mismo eje son aditivas: $R_i(\alpha)R_i(\beta) = R_i(\alpha+\beta)$
- Las matrices son ortogonales y cumplen: $R_i^{-1}(\theta) = R_i^T(\theta) = R_i(-\theta)$
- Se verifica que: $\left[R_i(\alpha)R_j(\beta)\right]^{-1} = R_j^{-1}(\beta)R_i^{-1}(\alpha)$

La primera de las rotaciones que se debe realizar es alrededor del eje z, y de valor $(\pi - \Lambda)$, de forma que los ejes (X^G, Y^G) y (x, y) de ambos sistemas queden paralelos, siendo la matriz de rotación.

$$R_z(\pi - \Lambda) = \begin{bmatrix} \cos(\pi-\Lambda) & \sin(\pi-\Lambda) & 0 \\ -\sin(\pi-\Lambda) & \cos(\pi-\Lambda) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos\Lambda & \sin\Lambda & 0 \\ -\sin\Lambda & -\cos\Lambda & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad [III.3]$$

La segunda de las rotaciones que se debe realizar es alrededor del eje y, y de valor $(90 - \Phi)$, de modo que los tres ejes en ambos sistemas se sitúan paralelos, siendo la matriz de rotación:

$$R_y(90-\Phi) = \begin{bmatrix} \cos(90-\Phi) & 0 & -\sin(90-\Phi) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(90-\Phi) & 0 & \cos(90-\Phi) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\Phi & 0 & -\cos\Phi \\ 0 & 1 & 0 \\ \cos\Phi & 0 & \sin\Phi \end{bmatrix} \qquad [III.4]$$

Se multiplica por la matriz S por existir cambio de sentido al medir la longitud en sentido directo y el acimut en sentido retrógrado:

$$R = R_Z R_Y S = \begin{bmatrix} -\cos\Lambda\sin\Phi & \sin\Lambda & \cos\Lambda\cos\Phi \\ -\sin\Lambda\sin\Phi & -\cos\Lambda & \sin\Lambda\cos\Phi \\ \cos\Phi & 0 & \sin\Phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{[III.5]}$$

$$R = \begin{bmatrix} -\cos\Lambda\sin\Phi & -\sin\Lambda & \cos\Lambda\cos\Phi \\ -\sin\Lambda\sin\Phi & \cos\Lambda & \sin\Lambda\cos\Phi \\ \cos\Phi & 0 & \sin\Phi \end{bmatrix} \quad \text{[III.6]}$$

Por lo que la relación entre vectores unitarios de ambos sistemas, queda:

$$\overrightarrow{e^{sistema\ astronómico\ global}} = R\ \overrightarrow{e^{sistema\ astronómico\ local}}$$

Que de forma matricial se tiene:

$$\begin{bmatrix} x^G \\ y^G \\ z^G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos\Lambda\sin\Phi & -\sin\Lambda & \cos\Lambda\cos\Phi \\ -\sin\Lambda\sin\Phi & \cos\Lambda & \sin\Lambda\cos\Phi \\ \cos\Phi & 0 & \sin\Phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^L \\ y^L \\ z^L \end{bmatrix} \quad \text{[III.7]}$$

Siendo la transformación inversa:

$$\begin{bmatrix} x^L \\ y^L \\ z^L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos\Lambda\sin\Phi & -\sin\Lambda\sin\Phi & \cos\Phi \\ -\sin\Lambda & \cos\Lambda & 0 \\ \cos\Lambda\cos\Phi & \sin\Lambda\cos\Phi & \sin\Phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^G \\ y^G \\ z^G \end{bmatrix} \quad \text{[III.8]}$$

Con estas expresiones obtenidas, se puede transformar las observaciones obtenidas en un sistema astronómico local a incrementos de coordenadas cartesianas geocéntricas, (que son los observables que produce el GPS como en apartados anteriores se verá), es decir, que conociendo la latitud y longitud astronómica de un punto, se puede utilizar la latitud y longitud geodésica sin perder precisión.

Es decir, que al observar un punto V desde una punto estación T, que en el sistema local tendrá unas coordenadas $(x_V, y_V, z_V)^{AL}$, relacionarlo con la base TV en el sistema convencional terrestre (CT), sin necesidad de conocimiento de la distancia, ya que como en el sistema local $x_T = y_T = z_T = 0$, se tiene:

$$\begin{bmatrix} x_V - x_T \\ y_V - y_T \\ z_V - z_T \end{bmatrix}^{CT} = R \begin{bmatrix} x_V \\ y_V \\ z_V \end{bmatrix}^{AL} \quad \text{[III.9]}$$

O la transformación inversa que es más utilizada en la práctica:

$$\begin{bmatrix} x_V \\ y_V \\ z_V \end{bmatrix}^{AL} = R^{-1} \begin{bmatrix} x_V - x_T \\ y_V - y_T \\ z_V - z_T \end{bmatrix}^{CT} \quad \text{[III.10]}$$

Así, a través de esta transformación, con las coordenadas $(x_V, y_V, z_V)^{CT}$ y $(x_T, y_T, z_T)^{CT}$, se puede calcular el acimut A, la altura P y la distancia D, entre T y V del sistema local:

$$D = \sqrt{{x_V^{AL}}^2 + {y_V^{AL}}^2 + {z_V^{AL}}^2} \quad \text{[III.11]}$$

$$A = \arctan\frac{x_V^{AL}}{y_V^{AL}} \quad \text{[III.12]}$$

$$P = \arcsin\frac{z_V^{AL}}{D} \quad \text{[III.13]}$$

Es decir, que también es posible transformar incrementos de coordenadas cartesianas geocéntricas (que son los observables GPS), en observables clásicas en el correspondiente sistema astronómico local. Hay que destacar que como se ha comentado, la distancia geométrica es invariante e independiente del sistema de referencia utilizado.

2.2.1.3.- Sistema de referencia elipsoidal.

Un sistema de referencia elipsoidal se define mediante dos planos, el Ecuador y el meridiano de Greenwich.

Este sistema posiciona un punto mediante tres coordenadas (φ, λ, h):

φ *es el ángulo que forma el plano del Ecuador y la normal en dicho punto.*

λ *es el ángulo diedro que forma el meridiano del punto y el de origen, en sentido directo.*

h *es el altitud del punto sobre el elipsoide medida a lo largo de la normal al elipsoide que pasa por el punto.*

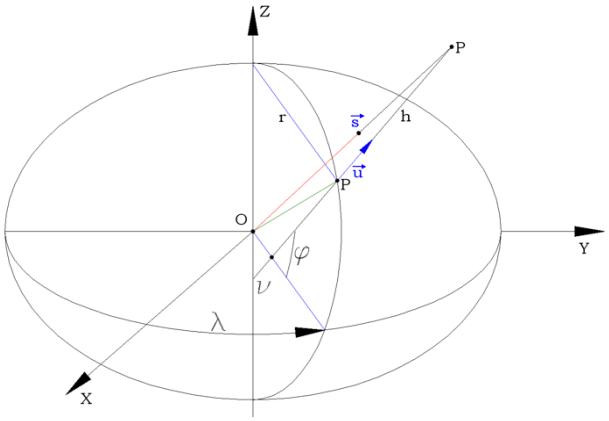


Figura III.9.- Sistema de referencia elipsoidal.

En este sistema de referencia elipsoidal se usa como superficie de aproximación un elipsoide de revolución, que se define a partir de sus parámetros (a, b), definiéndose a partir de estos sus elementos característicos:

$$Aplanamiento: \alpha = \frac{a-b}{a} = 1 - \frac{b}{a}$$

$$Primera\ excentricidad: e = \frac{\sqrt{a^2-b^2}}{a}$$

$$Segunda\ excentridad: e' = \frac{\sqrt{a^2-b^2}}{b}$$

Las líneas de referencia están constituidas por la red de meridianos y paralelos, donde el plano fundamental se constituye como una rotación del semieje mayor, escogiendo como plano secundario el que contiene al meridiano origen. Así, los puntos vienen definidos por las coordenadas curvilíneas (φ, λ).

Ahora, si dentro del elipsoide, se establece un sistema cartesiano, donde el eje X viene definido por la intersección entre el plano principal y el plano secundario, donde el eje Z es el semieje menor del elipsoide y donde el eje Y es el que completa el sistema cartesiano rectángulo dextrógiro, la ecuación del elipsoide viene definida por:

$$\frac{x^2+y^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1 \qquad [III.14]$$

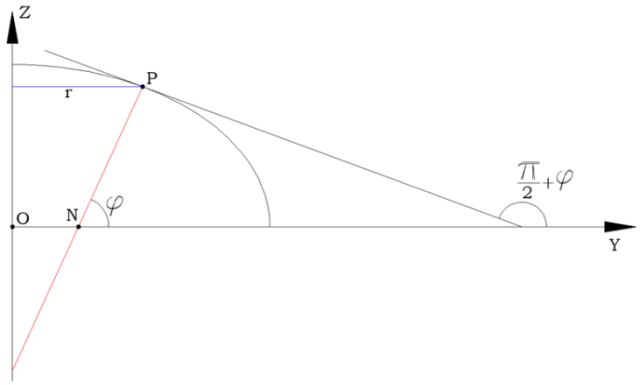


Figura III.10.- Caracterización de la tangente y de la gran normal.

En un elipsoide de revolución, en un punto V del mismo, si se llama r al radio paralelo que pasa por ese punto, se cumple las siguientes expresiones:

$$x = r\cos\lambda$$
$$y = r\sin\lambda$$
$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$
$$\left.\begin{matrix} x = r\cos\lambda \\ y = r\sin\lambda \\ r = \sqrt{x^2+y^2} \end{matrix}\right\} r = \nu\cos\varphi \Rightarrow \begin{cases} x = \nu\cos\varphi\cos\lambda \\ y = \nu\cos\varphi\sin\lambda \end{cases}$$

Que sustituyendo en la ecuación [III.14], queda:

$$\frac{r^2(\cos^2\lambda+\sin^2\lambda)}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1 \Rightarrow \frac{r^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1 \qquad \text{[III.15]}$$

La tangente en dicho punto del elipsoide, se obtiene diferenciando:

$$\frac{dz}{dr} = -\frac{b^2}{a^2}\frac{r}{z} = -\operatorname{cotag}\varphi = -\frac{1}{\tan\varphi}$$

donde:

$$z = \left(\frac{b}{a}\right)^2 r\tan\varphi = \left(\frac{b}{a}\right)^2 \nu\cos\varphi\tan\varphi = \left(\frac{b}{a}\right)^2 \nu\sin\varphi \qquad \text{[III.16]}$$

De los elementos característicos del elipsoide, tenemos:

$$\frac{b}{a} = \sqrt{1-e^2}$$

Con lo que:

$$z = (1-e^2)\,\nu\sin\varphi \qquad \text{[III.17]}$$

Así, las coordenadas cartesianas serían:

$$\left.\begin{matrix} x = \nu\cos\varphi\cos\lambda \\ y = \nu\cos\varphi\sin\lambda \\ z = (1-e^2)\,\nu\sin\varphi \end{matrix}\right\} \Longrightarrow S' = \begin{bmatrix} x_P \\ y_P \\ z_P \end{bmatrix} = \nu\begin{bmatrix} \cos\varphi & \cos\lambda \\ \cos\varphi & \sin\lambda \\ 1-e^2 & \sin\varphi \end{bmatrix} \qquad \text{[III.18]}$$

Como características adicionales que se tienen del elipsoide se tienen los radios de curvatura principales en un punto del elipsoide:

- ρ: radio de curvatura del meridiano que para por el punto.

$$\rho = \frac{a(1-e^2)}{\sqrt[3/2]{1-e^2\sin^2\varphi}} \qquad \text{[III.19]}$$

- ν: radio de curvatura del primer vertical que pasa por el punto denominado también gran normal.

$$\nu = \frac{a}{\sqrt{1-e^2\sin^2\varphi}} \qquad \text{[III.20]}$$

De esta manera, si lo que se pretende es determinar un punto en el espacio, exterior al elipsoide, es necesario definir un nuevo parámetro, h, definido como la distancia, medida a lo largo de la gran normal por dicho punto, hasta la superficie del elipsoide. Y de este modo, las coordenadas geodésicas del punto P, serán:

$$(latitud, longitud, altura) = (\varphi, \lambda, h)$$

Y por tanto para obtener las coordenadas del punto P, se parte de las expresiones ya conocidas, llegando a la siguiente identidad vectorial:

$$\vec{S} = \overrightarrow{S'} + h\vec{u} \qquad \text{[III.21]}$$

donde $\vec{u}$, es el vector unitario de componentes, definido por:

$$\vec{u} = \begin{bmatrix} \cos\varphi & \cos\lambda \\ \cos\varphi & \sin\lambda \\ \sin\varphi & \end{bmatrix}$$

Llegando a la siguiente expresión matricial:

$$\vec{S} = \overrightarrow{S'} + h\vec{u} \Rightarrow \begin{bmatrix} x = (\nu + h)\cos\varphi\cos\lambda \\ y = (\nu + h)\cos\varphi\sin\lambda \\ z = [(1-e^2)\nu + h]\sin\varphi \end{bmatrix} \qquad \text{[III.22]}$$

La transformación inversa, es decir la transformación de coordenadas geodésicas en coordenadas cartesianas se puede acometer mediante iteraciones, siendo la convergencia muy rápida ya que $\nu > h$.

$$x = r\cos\lambda$$

$$y = r\sin\lambda$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{[(\nu + h)\cos\varphi\cos\lambda]^2 + [(\nu + h)\cos\varphi\sin\lambda]^2}$$

$$r = (\nu + h)\cos\varphi \implies h = \frac{r}{\cos\varphi} - \nu \qquad \text{[III.23]}$$

De la expresión anterior se tiene:

$$z = [(1-e^2)\nu + h]\sin\varphi \qquad \text{[III.24]}$$

Y dividiendo por r se obtiene:

$$\frac{z}{r} = \frac{[(1-e^2)\nu + h]\sin\varphi}{r} = \frac{[(1-e^2)\nu + h]\sin\varphi}{(\nu + h)\cos\varphi} = \frac{[(1-e^2)\nu + h]}{(\nu + h)}\tan\varphi$$

Con lo que:

$$\tan\varphi = \frac{z}{r}\frac{(\nu+h)}{[(1-e^2)\nu+h]} = \frac{z}{r}\left(1 - \frac{e^2\nu}{\nu+h}\right)^{-1} \qquad \text{[III.25]}$$

La primera iteración comienza haciendo $h = 0$, con lo que la ecuación anterior queda:

$$\tan\varphi_1 = \frac{z}{r}\left(1-e^2\right)^{-1} \qquad \text{[III.26]}$$

obteniéndose φ_1, a partir del cual se calcula ν_1 y h_1

$$\nu_1 = \frac{a}{\sqrt{1-e^2\sin^2\varphi_1}} \qquad \text{[III.27]}$$

$$h_1 = \frac{r}{\cos\varphi_1} - \nu_1 \qquad \text{[III.28]}$$

Una vez obtenidos ν_1 y h_1, se calcula φ_2, y así de forma iterativa, siendo el cálculo de λ inmediato a través de la siguiente expresión:

$$\tan\lambda = \frac{y}{x} \qquad \text{[III.29]}$$

Con este sistema definido, se puede expresar la relación entre las coordenadas del punto P en este sistema con el sistema clásico cartesiano con las siguientes expresiones, de forma directa e indirecta:

$$\begin{bmatrix} x = (\nu + h)\cos\varphi\cos\lambda \\ y = (\nu + h)\cos\varphi\sin\lambda \\ z = [(1-e^2)\nu + h]\sin\varphi \end{bmatrix} \leftrightarrow \begin{bmatrix} \varphi = arctg\frac{Z}{\sqrt{X^2+Y^2}}\left(1 - e^2\frac{\nu}{\nu+h}\right)^{-1} \\ \lambda = \arctan\frac{y}{x} \\ h = \frac{\sqrt{X^2+Y^2}}{\cos\varphi} - \nu \end{bmatrix} \qquad \text{[III.30]}$$

2.2.2.- Sistemas de referencia convencional terrestre.

2.2.2.1.- La precisión necesaria en un sistema de referencia geodésico.

El sistema de referencia elipsoidal explicado en el apartado anterior, considerando la Tierra como rígida, se puede considerar como válido para observaciones con precisión 10^{-6}, es decir $1\ \frac{mm}{km}$.

Actualmente, mayores precisiones, sólo se consiguen con técnicas de SLR (telemetría láser por satélites) y VLBI (interferometría de bases de gran longitud), que están en torno a 10^{-8}, es decir $0.01\ \frac{mm}{km}$. Estos sistemas, exigen establecer sistemas de referencia en los que se considera que la Tierra es deformable.

2.2.2.2.- El movimiento del polo.

En el marco terrestre, si consideramos las coordenadas ecuatoriales del polo (x_{polo}, y_{polo}), pero el eje de inercia principal de la Tierra no es coincidente con su eje de giro, por lo que el movimiento de éste presenta dos componentes fundamentales, la primera una oscilación libre con un periodo de 430 días y una amplitud de $(0.1'' - 0.2'')$ de arco que equivale a $(1 - 2)$ metros, denominado basculamiento Chandleriano, que se traduce en un movimiento "circular" de unos 6 metros de radio, y la segunda una oscilación anual forzada por el desplazamiento estacional del aire y las masas de agua (fuerza gravitatoria que ejerce la luna y el sol sobre la tierra) de unos 60 centímetros de magnitud, descomponiéndose en una componente de periodo largo denominada Precesión y otra de ciclo corto denominada Nutación.

Ambos movimientos se componen y dan forma a un movimiento sinusoidal que se representa gráficamente mediante la Polodia, que es la curva del polo verdadero respecto al polo medio a lo largo del tiempo. Esta curva es publicada por el International Earth Rotation Service (IERS).

A.- Basculamiento Chandleriano

En el Sistema de referencia convencional terrestre o sistema global (C.T.), como se ha indicado en (Cap. III – Apdo.[2.2.1.2]), toma como origen de coordenadas el centro de masas de la tierra, coincidiendo el *eje z* con el eje de rotación de la tierra medio, y por lo tanto con la línea de polos instantáneos (polodia). Si este se quiere referir al polo medio, la diferencia publicada por el IERS se expresa por sus componentes (x_{polo}, y_{polo}), según se puede ver en la figura.

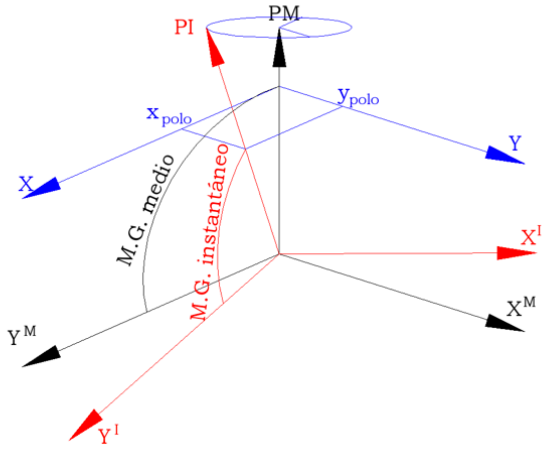


Figura III.11.- Discrepancias del polo.

Para transformar las coordenadas de uno a otro, se hace mediante un giro respecto al eje Y de valor $-x_{polo}$, y otro giro con respecto al eje X de valor $-y_{polo}$, que expresado matemáticamente quedaría:

$$\overrightarrow{e^{polo\ medio}} = R_x(-y_{polo})R_y(-x_{polo})\overrightarrow{e^{polo\ instantáneo}} \quad [III.31]$$

B.- Precesión

La forma de la Tierra es un elipsoide irregular, la cual, debido a la atracción gravitacional del Sol, la Luna, y en menor medida, de los planetas, está achatada en los polos. Esto provoca un balanceo en la Tierra en sentido inverso al de rotación, con una frecuencia muy baja denominado "precesión de los equinoccios".

El movimiento del eje describe un doble cono de 47º de abertura, cuyo vértice está situado en el centro de la Tierra. Motivado por la precisión de los equinoccios descrita, lo que provoca que la posición del polo celeste va cambiando a lo largo de los siglos. En estos momentos, como ejemplo, la estrella polar no coincide exactamente con el Polo Norte Celeste.

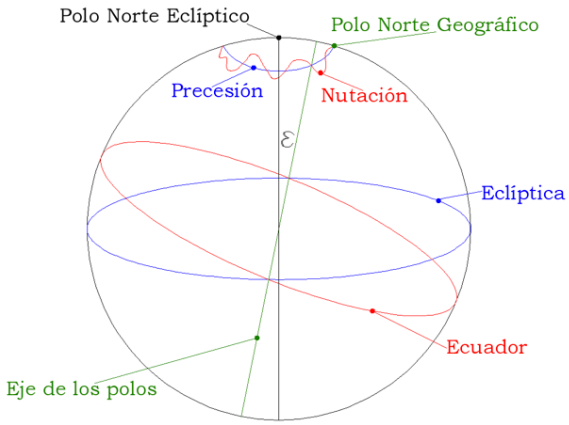


Figura III.12.- Movimientos de precesión y nutación.

C.- Nutación.

El movimiento de nutación es un vaivén del eje de la Tierra, y que se produce conjuntamente con el movimiento de precesión, y viene producido por el efecto gravitacional existente entre la Luna y la Tierra. Para hacer una comparativa con el movimiento anterior, en el que el eje de rotación describe el movimiento cónico de precesión, a su vez describe un movimiento en bucle con un periodo de 18,6 años, que haciendo la comparativa con el tiempo de una vuelta completa de precesión, la cual son un total de 25.767 años, realiza un total de 1.300 bucles de nutación.

D.- Greenwich Apparent Siderea Time (GAST)

Si en todo lo anterior, se define el eje X en la dirección del punto Aries (punto de la eclíptica a partir del cual el Sol pasa del hemisferio sur terrestre al hemisferio norte, lo que ocurre en el equinoccio de primavera), se denomina GAST al ángulo que forma Aries con el meridiano de Greenwich entre los ejes de abscisas de ambos sistemas.

La transformación entre ambos se realizar a través de una rotación $R_z(GAST)$, no existiendo en la actualidad formulación matemática que lo exprese teniendo que recurrir a medidas directas mediante técnicas precisas de medición de largas distancias como son SLR y VLBI.

La matriz de transformación entre ambos sería:

$$S = R_x(-y_p)R_y(-x_p)R_z(GAST) \quad [III.32]$$

2.2.2.3.- Sistema de referencia terrestre convencional medio (CTRS).

En el apartado anterior se han descrito todos los desplazamientos del eje de rotación del cuerpo terrestre, ahora bien es necesario definir este eje Z para observaciones geodésicas.

Este sistema de referencia terrestre convencional medio (CTRS) se define mediante un sistema cartesiano fijo a la tierra, donde:

- El origen está situado en el centro de masas de la tierra, geocentro.
- El eje Z coincide con el eje de rotación definido por el CIO (Conventional International Origin) que se adopta que sea el eje medio de rotación correspondiente al centro del movimiento libre del polo entre 1900 y 1906.
- El eje X, perpendicular al eje Z en la dirección del meridiano de Greenwich
- El eje Y, dentro del plano del ecuador medio y perpendicular a los dos anteriores en sentido destrógiro.

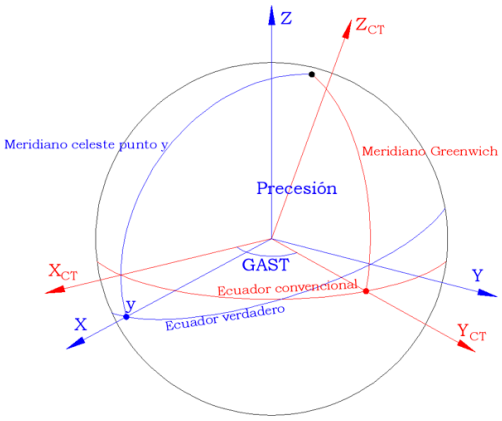


Figura III.13.- Sistemas de referencia convencional terrestre.

El sistema de referencia terrestre convencional medio (CTRS) es usual asignarle un elipsoide de referencia, siendo los más comunes el WGS-84 y el elipsoide de Hayford, de forma que se pueda conocer la relación entre el CTP y el CEP (Celestial Ephemeris Pole – Polo instantáneo). Éste último es obtenido por el International Earth Rotation Service (IERS), dentro del seguimiento de la variación de coordenadas de una serie de estaciones permanentes a lo largo del tiempo. Las medidas se realizan por los métodos explicados anteriormente: Sistema láser por satélite (SLR), Interferometría de bases de gran longitud (VLBI), …, de forma que se obtienen las rotaciones diferenciales x_{polo} *e* y_{polo} y así poder relacionar las coordenadas CEP con las coordenadas CTP. De esta forma una vez conocida la posición del polo CTP respecto al polo CEP, la transformación de coordenadas entre ambos sistemas obedece a la siguiente expresión matricial:

$$\begin{bmatrix} x_{CEP} \\ y_{CEP} \\ z_{CEP} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -x_p \\ 0 & 1 & y_p \\ x_p & -y_p & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{CTP} \\ y_{CTP} \\ z_{CTP} \end{bmatrix} \qquad \text{[III.33]}$$

2.2.3.- Sistemas de referencia espaciales.

En los sistemas de referencia explicados hasta ahora, sistemas de referencia terrestres, la coordenadas de un objeto que se encuentre fijo en el espacio, cambian constantemente debidos a la rotación terrestre. Para situar estos objetos convenientemente, se definen los sistemas de referencia espaciales.

En particular en esta investigación, para situar adecuadamente los satélites artificiales se necesitan dos tipos de sistemas de referencia. El primero se trata de un sistema de referencia fijo inercial, situado en el espacio de forma que se conozca el movimiento del satélite, y el segundo, un sistema de referencia fijo en la superficie terrestre, que será el que defina la posición del observador, coordenadas en definitiva que se quieren conocer.

2.2.3.1.- Sistema de referencia espacial de coordenadas ecuatoriales absolutas.

Este sistema de referencia se ha venido utilizando para situar las estrellas con respecto a la Tierra, y viene definido por:

- Ecuador celeste es el que contiene al geocentro y es perpendicular al eje de rotación instantáneo (CEP).
- El punto Aries, γ, viene definido por la intersección del plano ecuatorial celeste y el plano de la eclíptica, (punto de la eclíptica a partir del cual el Sol pasa del hemisferio sur terrestre al hemisferio norte, lo que ocurre en el equinoccio de primavera).
- Ascensión recta α, que es el ángulo en sentido directo a lo largo del ecuador celeste, entre la dirección del punto Aries, γ, y el meridiano del objeto celeste.
- Declinación, δ, que es el ángulo que va desde el ecuador celeste hasta el cuerpo que se esté midiendo medido sobre el meridiano celeste de este.

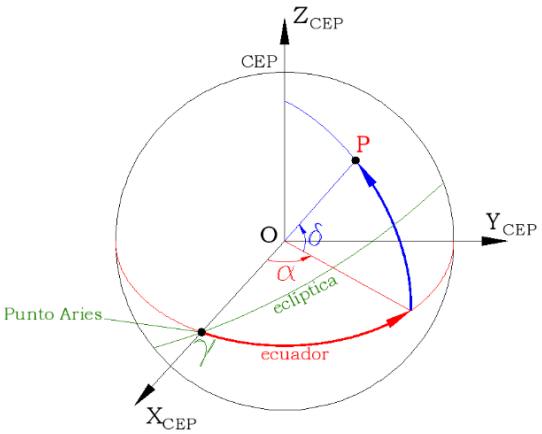


Figura III.14.- Sistema de coordenadas ecuatoriales absolutas.

Este sistema, adecuado para cuerpos celestes lejanos a la Tierra, define la situación de los mismos mediante dos valores angulares, sin embargo, si los objetos están más cerca de la Tierra, como es el caso de los satélites artificiales que es necesario conocer además sus órbitas, lo más adecuado es adicionar un sistema cartesiano geocéntrico asociado al eje de rotación instantáneo (CEP).

Con este sistema definido, se puede expresar la relación entre las coordenadas del punto P en este sistema con el sistema clásico cartesiano con las siguientes expresiones, de forma directa e indirecta:

$$\begin{bmatrix} x = r_p \cos\delta \cos\alpha \\ y = r_p \cos\delta \sin\alpha \\ z = r_p \sin\delta \end{bmatrix} \leftrightarrow \begin{bmatrix} r_p = \sqrt{x^2+y^2+z^2} \\ \alpha = \arctan\frac{y}{x} \\ \delta = \arctan\frac{z}{\sqrt{x^2+y^2}} \end{bmatrix} \qquad \text{[III.34]}$$

El eje instantáneo de rotación (CEP) y el punto Aries (γ) tienen asociadas unas coordenadas cartesianas geocéntricas que pueden ser relacionadas con el sistema de referencia terrestre convencional medio (CTRS), cuyo polo se define por el CTP (Conventional Terrestrial Pole). Para ello es necesario conocer tres parámetros, por un lado las dos rotaciones diferenciales x_{polo} *e* y_{polo} que son obtenidas de forma periódica por el International Earth Rotation Service (IERS) y por otro la hora sidérea aparente en Greenwich GAST (Greenwich Apparent Sidereal Time). Con estos datos la relación entre ambos sistemas se expresa a través de:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{CTP} = \begin{bmatrix} \cos(GAST) & \sin(GAST) & x_p \\ -\sin(GAST) & \cos(GAST) & -y_p \\ -x_p\cos(GAST) - y_p\sin(GAST) & -x_p\sin(GAST) + y_p\cos(GAST) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{CEP\_\gamma} \qquad \text{[III.35]}$$

Esta transformación expresada a través de la formulación matricial anterior, relaciona las coordenadas cartesianas geocéntricas CEP referidas al punto Aries y las coordenadas cartesianas geocéntricas CEP referidas al meridiano de Greenwich.

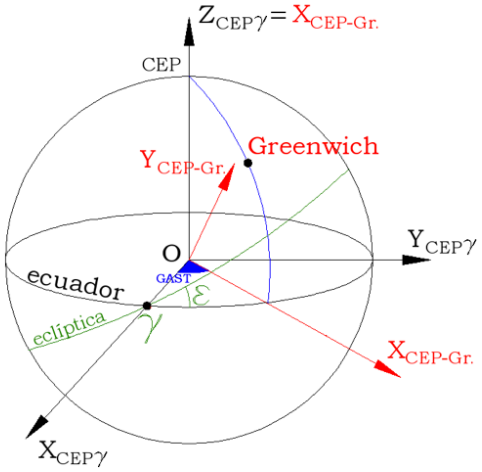


Figura III.15.- Relación entre sistemas cartesianos definidos por el polo CEP.

La primera ley de Newton sirve para definir un tipo especial de sistemas de referencia, los que se están en este apartado tratando, los sistemas de referencia inerciales, que son aquellos sistemas de referencia desde los que se observa que un cuerpo sobre el que no actúa ninguna fuerza neta se mueve con velocidad constante. Así, el sistema que más se aproxima a esto es el sistema ecuatorial referenciado a un instante t_0, con las siguientes características en su definición:

- El origen del sistema de referencia está situado en el centro de masas de la tierra.
- El $eje\ Z^+$ está enfocado hacia el polo norte (CEP) del instante t_0.
- El $eje\ X^+$ está enfocado hacia el primer punto Aries.
- El $eje\ Y^+$ es el que completa el sistema cartesiano rectángulo dextrógiro.
- La definición de un punto genérico P en este sistema se consigue con la ascensión de la recta α y la declinación δ.

2.2.3.2.- Sistema de referencia espacial de coordenadas eclípticas.

Las coordenadas obtenidas en el apartado anterior, sean por un lado la ascensión recta y la declinación o de otro modo mediante coordenadas cartesianas geocéntricas asociadas al eje instantáneo de rotación (CEP), tiene de cara a situar objetos satelitales, el inconveniente del movimiento que sufre el dicho eje instantáneo de rotación respecto al espacio, movimientos ya explicados y conocidos como precesión y nutación.

El polo CEP sufre una variación en el espacio que hace necesario definir un sistema de referencia elíptico, en el que el el plano principal en dicho sistema lo forma la eclíptica o plano orbital de la Tierra respecto al Sol. Este plano de la eclíptica es perpendicular al polo NEP (North Ephemeris Pole), también denominado polo de la eclíptica. De este modo, si se considera una esfera geocéntrica de radio unidad, la situación de un objeto situado en el espacio viene definido por sus coordenadas eclípticas, a saber:

- Longitud eclíptica λ, ángulo medido en el plano de la eclíptica entre el punto aries el plano del círculo máximo que pasando por el objeto considerado contiene al NEP.
- Latitud eclíptica β, ángulo medido a lo largo del circulo máximo que contiene al objeto considerado y al NEP y que va desde el plano de la eclíptica hasta el objeto.

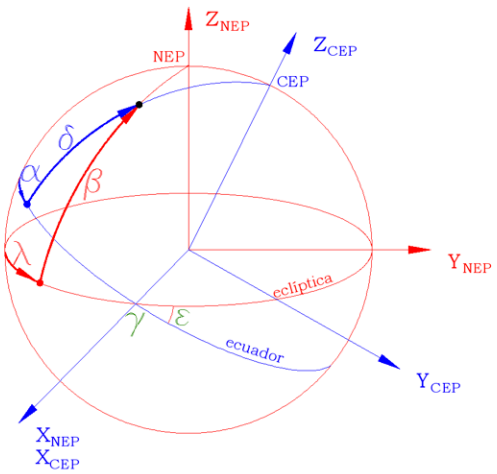


Figura III.16.- Sistema de coordenadas eclípticas.

Este sistema de coordenadas es el más adecuado para definir la posición de las estrellas con respecto a la Tierra, y se define como CIS (Conventional Inertial System). En el caso de que se quiera situar satélites artificiales se puede asociar un sistema de coordenadas cartesianas geocéntricas con el eje Z en la dirección del NEP, el eje X del punto aries y el eje Y que es perpendicular a los dos anteriores.

Para relacionar este sistema de coordenadas elípticas con las coordenadas cartesianas se puede hacer a través de la siguiente formulación matricial:

$$\begin{bmatrix} x_{NEP} = r\cos\beta\cos\lambda \\ y_{NEP} = r\cos\beta\sin\lambda \\ z_{NEP} = r\sin\beta \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} r = \sqrt{x_{NEP}^2 + y_{NEP}^2 + z_{NEP}^2} \\ \lambda = \text{arctag}\dfrac{y_{NEP}}{x_{NEP}} \\ \beta = \text{arctg}\dfrac{z_{NEP}}{\sqrt{x_{NEP}^2+y_{NEP}^2}} \end{bmatrix} \quad \text{[III.36]}$$

2.2.3.3.- Transformación se coordenadas ecuatoriales absolutas a coordenadas eclípticas.

Para relacionar las coordenadas ecuatoriales absolutas y las coordenadas eclípticas se utilizan las teorías desarrolladas en los años 80, IUA Theory of Nutation, basadas en cálculos de mecánica celeste. Estos cálculos parten del conocimiento de los parámetros de precesión ζ, z, θ, la oblicuidad ε, y los parámetros de la nutación $\Delta\varepsilon, \Delta\psi$.

De este modo la relación de transformación se puede obtener a partir de:

$$\begin{bmatrix} x_{NEP} \\ y_{NEP} \\ z_{NEP} \end{bmatrix} = NP \begin{bmatrix} x_{CEP} \\ y_{CEP} \\ z_{CEP} \end{bmatrix} \quad \text{[III.37]}$$

$$JD = 367\ x\ AÑO - 7X$$

En resumen, la relación entre el CTRS y el CIS vendría dada por la transformación

$$\begin{bmatrix} x_{NEP} \\ y_{NEP} \\ z_{NEP} \end{bmatrix} = NPGM \begin{bmatrix} x_{CEP} \\ y_{CEP} \\ z_{CEP} \end{bmatrix} \quad \text{[III.38]}$$

2.2.3.4.- Transformación del coordenadas geodésicas la sistema convencional terrestre.

La definición completa de la transformación, se realiza definiendo el tamaño y forma del elipsoide con dos parámetros, sus dos semiejes, (a, b), más otros seis parámetros que fijen o eliminen los seis grados de libertad con que el elipsoide puede moverse con respecto a la Tierra. De esta forma, el número riguroso de parámetros necesarios para

definir un datum geométrico, son en total ocho. Así, definidos los semiejes del elipsoide, (a, b), los otros seis pueden ser por un lado las coordenadas del centro del elipsoide respecto al geocentro de la tierra (x_E, y_E, z_E) y por otro lado, los tres ángulos de giro de ambos sistemas tridimensionales.

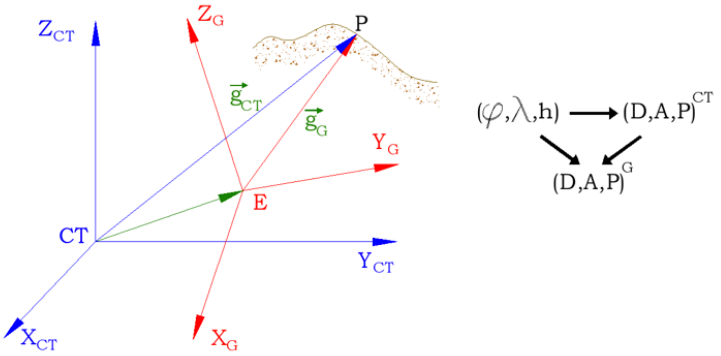


Figura III.17.- Transformación de coordenadas geodésicas al sistema convencional terrestre.

La transformación lógica, en este marco, será:

$$(\varphi_G, \lambda_G, h_G) \implies (x_G, y_G, z_G) \implies (x_{CT}, y_{CT}, z_{CT})$$

De este modo:

$$\overrightarrow{r^{CT}} = \begin{bmatrix} x_{CT} \\ y_{CT} \\ z_{CT} \end{bmatrix} = R_1(\epsilon_x)\, R_2(\epsilon_y)\, R_3(\epsilon_z) \begin{bmatrix} x_G \\ y_G \\ z_G \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_E \\ y_E \\ z_E \end{bmatrix} \qquad \text{[III.39]}$$

Y si ambos sistemas tienen los ejes paralelos, $(\epsilon_x) = (\epsilon_y) = (\epsilon_z) = 0$, queda matricialmente del siguiente modo:

$$\overrightarrow{r^{CT}} = \overrightarrow{r^{G}} + \begin{bmatrix} x_E \\ y_E \\ z_E \end{bmatrix} \qquad \text{[III.40]}$$

2.2.3.5.- Transformación del coordenadas geográficas en coordenadas geodésicas.

Esta transformación, relaciona las coordenadas astronómicas observadas (Φ, Λ, A) con las coordenadas geodésicas (ψ, λ, α).

Una vez determinados (Φ, Λ, A), en un punto de la superficie terrestre, es posible calcular sus valores medios, ya que los observados corresponden a un polo instantáneo, obteniendo:

$$\begin{aligned} \overline{\Phi} &= \Phi - x_p \cos\Lambda + y_p \sin\Lambda \\ \overline{\Lambda} &= \Lambda - (x_p \sin\Lambda + y_p \cos\Lambda) \tan\Phi \\ \overline{\mathrm{A}} &= \mathrm{A} - (x_p \sin\Lambda + y_p \cos\Lambda) \sec\Phi \end{aligned} \qquad \text{[III.41]}$$

donde x_p *e* y_p son las componentes del movimiento del polo.

La transformación se hace definiendo un sistema geodésico local (GL) análogo al definido anteriormente, astronómico local (AL), definido del siguiente modo:

- Origen: lugar de observación T (topocéntrico).
- Eje Z: normal al elipsoide desde el punto T.
- Eje X: hacia el norte geográfico y contenido en el plano meridiano geodésico. definido por la normal al elipsoide en T y el eje menor del elipsoide.

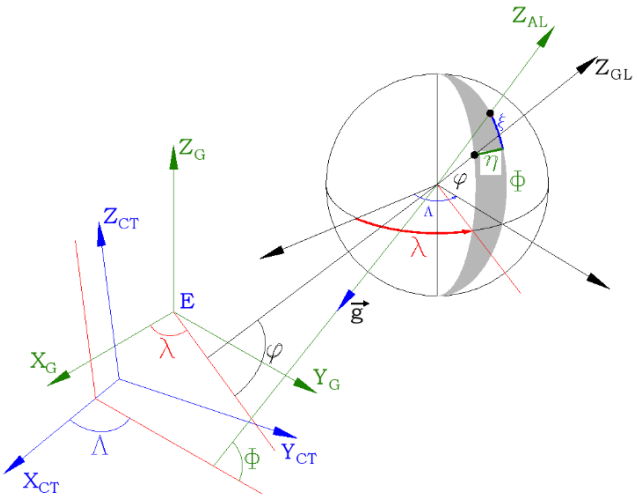


Figura III.18.- Relación entre los sistemas GL – G – CT - AL.

La transformación entre (GL) y (G) es similar a la realizada entre (AL) y (CT).

En el apartado anterior se ha visto que:

$$\overrightarrow{r^{CT}} = \begin{bmatrix} x_{CT} \\ y_{CT} \\ z_{CT} \end{bmatrix} = R_1(\epsilon_x)\, R_2(\epsilon_y)\, R_3(\epsilon_z) \begin{bmatrix} x_G \\ y_G \\ z_G \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_E \\ y_E \\ z_E \end{bmatrix} \qquad \text{[III.42]}$$

Se puede obviar la traslación, rotando sólo un vector unitario, de este modo:

$$\overrightarrow{r^{CT}} = \begin{bmatrix} x_{CT} \\ y_{CT} \\ z_{CT} \end{bmatrix} = R(\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z) \begin{bmatrix} x_G \\ y_G \\ z_G \end{bmatrix} \qquad \text{[III.43]}$$

$$\overrightarrow{r^{CT}} = R(\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z)\overrightarrow{r^{G}}$$

De este modo, entre el sistema geodésico local (GL) y el astronómico local (AL), se puede pasar a través de los ángulos: $\Delta\alpha, -\xi, \eta$, y por tanto:

$$\overrightarrow{r^{GL}} = R_z(\Delta\alpha)R_y(-\xi)R_x(\eta)\overrightarrow{r^{AL}} = R^T(\Delta\alpha, -\xi, \eta)\overrightarrow{r^{AL}} \qquad \text{[III.44]}$$

Por otro lado, viendo la relación que existía entre el sistema astronómico local (AL) y el sistema astronómico global (CT),

$$\overrightarrow{e^{CT}} = R_x(\pi - \Lambda)R_z(90 - \phi)S\overrightarrow{e^{AL}} \qquad \text{[III.45]}$$

Y entre el geodésico global (G) y el geodésico local (GL), la relación debe ser análoga, con lo que:

$$\overrightarrow{e^{G}} = R_x(\pi - \lambda)R_z(90 - \varphi)S\overrightarrow{e^{GL}} \qquad \text{[III.46]}$$

Sustituyendo en [III.46] y [III.43], resulta:

$$\overrightarrow{r^{CT}} = R(\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z)R_x(\pi - \lambda)R_z(90 - \varphi)S\overrightarrow{r^{GL}} \qquad \text{[III.47]}$$

Y sustituyendo en esta expresión $\overrightarrow{r^{GL}}$ por su valor [III.44]:

$$\overrightarrow{r^{CT}} = R(\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z)R_x(\pi - \lambda)R_z(90 - \varphi)S\, R^T(\Delta\alpha, -\xi, \eta)\overrightarrow{r^{AL}} \qquad \text{[III.48]}$$

Esta ecuación [III.48] ha de ser totalmente equivalente a [III.45], pues describen la misma transformación, y por ello:

$$R_x(\pi - \Lambda)R_z(90 - \phi)S = R(\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z)R_x(\pi - \lambda)R_z(90 - \varphi)S\, R^T(\Delta\alpha, -\xi, \eta)\overrightarrow{r^{AL}} \qquad \text{[III.49]}$$

En esta ecuación $(\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z, \Delta\alpha, \xi, \eta, \Delta - \lambda, \phi - \psi)$, son cantidades muy pequeñas pudiéndose desarrollar en serie sus funciones trigonométricas y escogiendo sólo el primer término. Desarrollando de este modo, queda:

$$\begin{bmatrix}\Delta\alpha\\ \xi\\ \eta\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}(\Lambda-\lambda)\sin\varphi\\ \phi-\varphi\\ (\Lambda-\lambda)\cos\varphi\end{bmatrix}-\begin{bmatrix}\cos\varphi\left(\epsilon_x\cos\lambda+\epsilon_y\sin\lambda\right)+\epsilon_z\sin\lambda\\ \epsilon_x\sin\lambda-\epsilon_y\cos\lambda\\ -\sin\varphi\left(\epsilon_x\cos\lambda+\epsilon_y\sin\lambda\right)+\epsilon_z\cos\lambda\end{bmatrix} \quad [III.50]$$

Pudiéndose simplificar del siguiente modo:

$$\begin{bmatrix}\Delta\alpha\\ \xi\\ -\eta\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}(\Lambda-\lambda)\sin\varphi\\ \phi-\varphi\\ -(\Lambda-\lambda)\cos\varphi\end{bmatrix}-R_y(\varphi-\pi)R_z(\lambda-\pi)\begin{bmatrix}\epsilon_x\\ \epsilon_y\\ \epsilon_z\end{bmatrix} \quad [III.51]$$

Como el sistema geodésico G y por tanto su elipsoide se posiciona y orienta respecto al sistema CT localmente en un punto principal T_0, en él se conoce estos seis parámetros: $\psi_0,\lambda_0,\alpha_0,\xi_0,\eta_0,N_0$. Así si se utiliza este método para fijar el datum y la orientación, la ecuación queda:

$$\begin{bmatrix}\Delta\alpha\\ \xi\\ -\eta\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}(\Lambda-\lambda)\sin\varphi\\ \phi-\varphi\\ -(\Lambda-\lambda)\cos\varphi\end{bmatrix}-R_2(\varphi-\pi)R_3(\lambda-\pi)\begin{bmatrix}\cos\varphi_0 & \cos\lambda_0\\ \cos\varphi_0 & \sin\lambda_0\\ \sin\lambda_0 & \end{bmatrix}\Delta_0 \quad [III.52]$$

donde Δ_0 es el ángulo de desorientación o desalineamiento contrado a partir de la normal al elipsoide en T_0.

Si el sistema G estuviese totalmente alineado con el CT entonces $(\epsilon_x)=\left(\epsilon_y\right)=(\epsilon_z)=0$, quedando:

$$\begin{aligned}&\Delta\alpha=(\Lambda-\lambda)\sin\varphi\implies ecuación\ de\ Laplace\\ &\xi=\phi-\varphi\\ &\eta=(\Lambda-\lambda)\cos\varphi\end{aligned} \quad [III.53]$$

Estas tres ecuaciones constituyen las condiciones topocéntricas de paralelismo entre los ejes de los sistemas G y CT. Si el paralelismo existe, las tres ecuaciones se deben satisfacer para todos los puntos de las superficie terrestre (Φ,Λ,A) (observables directos).

La condición de paralelismo se puede encontrar a través de los observables (A,Z), siendo Z la distancia cenital. Para ello rotando un vector unitario del sistema AL al GL se tiene:

$$r^{GL}=R_z(\Delta A)R_y(-\xi)R_x(\eta)r^{AL} \quad [III.54]$$

que expresado matricialmente:

$$\begin{bmatrix}\cos\alpha\sin Z'\\ \sin\alpha\sin Z'\\ \cos Z'\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1 & \Delta A & \xi\\ -\Delta A & 1 & \eta\\ -\xi & -\eta & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\cos A\sin Z\\ \sin A\sin Z\\ \cos Z\end{bmatrix} \quad [III.55]$$

que desarrollando en serie de Taylor en (A,Z) se tiene:

$$(A-\alpha)\begin{bmatrix}\sin A\sin Z\\ -\cos A\sin Z\\ 0\end{bmatrix}+(Z-Z')\begin{bmatrix}-\cos A\cos Z\\ -\sin A\cos Z\\ \sin Z\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0 & \Delta A & \xi\\ -\Delta A & 0 & \eta\\ -\xi & -\eta & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\cos A\sin Z\\ \sin A\sin Z\\ \cos Z\end{bmatrix} \quad [III.56]$$

De las tres ecuaciones que resultan, la tercera da:

$$(Z-Z')=-\xi\cos A-\eta\sin A$$

y multiplicando la primera por $\sin A$ y la segunda por $\cos A$,restando la segunda de la primera y sustituyendo $\Delta A=\eta\tan\phi$, resulta:

$$A-(\xi\sin A-\eta\cos A)\operatorname{cotag}Z-\alpha=\eta\tan\phi \quad [III.57]$$

Con estas dos últimas ecuación, es se realiza la transformación entre (Λ,ϕ,A,Z,H), con significado físico a: $(\lambda,\psi,\alpha,Z',h)$, que son convencionales.

2.2.3.6.- Cambio de Datum.

El cambio de datum, supone la trasformación de coordenadas entre distintos elipsoides globales. Al tratar esta transformación de forma general, se ha de tener en cuenta la diferencia de tamaño de los elipsoides, aspecto representado por sus

semiejes, $(a_1, b_1), (a_2, b_2)$, la diferencia de los centros geométricos, O_1, O_2, y la diferencia o giro en la orientación de los ejes $(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2)$.

En un primer paso, con todos estos datos de ambos sistemas, se trata de ver como están ambos elipsoides con respecto al sistema convencional terrestre (CT), para lo cual se definen las siguientes magnitudes:

- r_1, r_2 son los vectores posición del centro geométrico de cada uno de los elipsoides respecto al geocentro.
- $(\epsilon_x^1, \epsilon_y^1, \epsilon_z^1), (\epsilon_x^2, \epsilon_y^2, \epsilon_z^2)$ son los ángulos de desorientación entre los ejes de cada sistema elipsoidal respecto al sistema CT.

El método más natural de cálculo es calcular a partir de (ψ_1, λ_1, h_1) las coordenadas CT y después de éstos pasar a (ψ_2, λ_2, h_2).

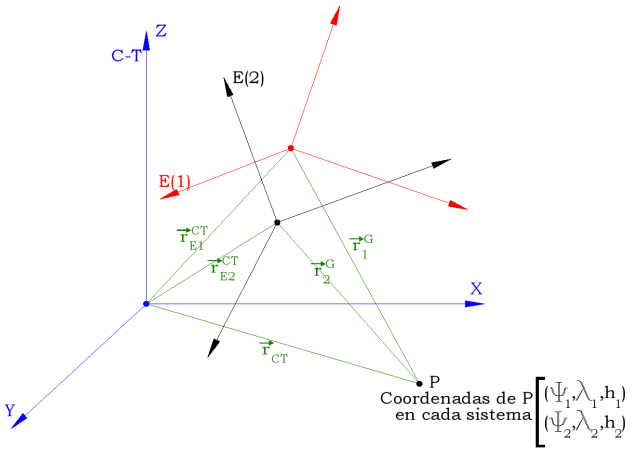


Figura III.19.- Cambio de Datum.

Un procedimiento más operativo es un método diferencial que es posible aplicar cuando las diferencias de ambos elipsoides en tamaño, posición de los centros y posiciones de los ejes son pequeños.

De este modo, las coordenadas de un mismo punto en ambos datum serán:

$$P \Longrightarrow \begin{cases} (\psi_1, \lambda_1, h_1) \\ (\psi_2, \lambda_2, h_2) \end{cases}$$

Expresando a través de cada una de ellas las coordenadas Convencionales Terrestres (CT) del punto, será:

$$\overrightarrow{r^{CT}} = \begin{bmatrix} x_{CT} \\ y_{CT} \\ z_{CT} \end{bmatrix} = R_1(\epsilon_x)\, R_2(\epsilon_y)\, R_3(\epsilon_z) \begin{bmatrix} x_G \\ y_G \\ z_G \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_E \\ y_E \\ z_E \end{bmatrix}$$

Que para ángulos pequeños, queda:

$$\overrightarrow{r^{CT}} = \begin{bmatrix} x_{CT} \\ y_{CT} \\ z_{CT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_G \\ y_G \\ z_G \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -Z & Y \\ Z & 0 & -X \\ -Y & X & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{CT}^{Elipsoide} \\ y_{CT}^{Elipsoide} \\ z_{CT}^{Elipsoide} \end{bmatrix}$$

Que de forma vectorial:

$$\overrightarrow{r^{CT}} = \overrightarrow{r^G} + M^G \vec{\epsilon} + \overrightarrow{r_{Elipsoide}^{CT}} \qquad \text{[III.58]}$$

Que para cada uno de los datum, quedaría:

$$\overrightarrow{r^{CT}} = \overrightarrow{r_1^G} + M^G \overrightarrow{\epsilon_1} + \overrightarrow{r_{Elipsoide\ 1}^{CT}}$$

$$\overrightarrow{r^{CT}} = \overrightarrow{r_2^G} + M^G \overrightarrow{\epsilon_2} + \overrightarrow{r_{Elipsoide\ 2}^{CT}}$$

Restando ambas:

$$\overrightarrow{r_2^G} - \overrightarrow{r_1^G} + M^G(\overrightarrow{\epsilon_2} - \overrightarrow{\epsilon_1}) + \overrightarrow{r_{Elipsoide\ 2}^{CT}} - \overrightarrow{r_{Elipsoide\ 1}^{CT}} = 0 \qquad \text{[III.59]}$$

$\overrightarrow{r_1^G}$ y $\overrightarrow{r_2^G}$ se pueden expresar en función de (ψ_1, λ_1, h_1) y (ψ_2, λ_2, h_2) respectivamente por las fórmulas previamente expuestas, resultando:

$$\overrightarrow{r_2^G} - \overrightarrow{r_1^G} = N \begin{bmatrix} \varphi_2 - \varphi_1 \\ \lambda_2 - \lambda_1 \\ h_2 - h_1 \end{bmatrix} + T \begin{bmatrix} \delta a \\ \delta f \end{bmatrix} \qquad \text{[III.60]}$$

donde N y T son matrices cuyo valor utilizando la aproximación esférica que supone $f = 0, \nu = a, h = 0$, son:

$$N = \begin{bmatrix} -a \sin\varphi \cos\lambda & -a \cos\varphi \sin\lambda & \cos\varphi \cos\lambda \\ -a \sin\varphi \sin\lambda & a \cos\varphi \cos\lambda & \cos\varphi \sin\lambda \\ a \cos\varphi & 0 & \sin\varphi \end{bmatrix}$$

$$T = \begin{bmatrix} \cos\varphi \cos\lambda & \mathrm{a} \sin^2\varphi \cos\varphi \cos\lambda \\ \cos\varphi \sin\lambda & \mathrm{a} \sin^2\varphi \cos\varphi \sin\lambda \\ \sin\varphi & a(\sin^2\varphi - 2) \sin\varphi \end{bmatrix}$$

Sustituyendo en [III.60] y [III.59], resulta:

$$\overrightarrow{r_2^G} - \overrightarrow{r_1^G} = N \begin{bmatrix} \varphi_2 - \varphi_1 \\ \lambda_2 - \lambda_1 \\ h_2 - h_1 \end{bmatrix} + T \begin{bmatrix} \delta a \\ \delta f \end{bmatrix} + M \begin{bmatrix} \delta\epsilon_x \\ \delta\epsilon_y \\ \delta\epsilon_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta x_{CT}^{Elipsoide} \\ \delta y_{CT}^{Elipsoide} \\ \delta z_{CT}^{Elipsoide} \end{bmatrix} = 0$$

que despejando la matriz

$$\begin{bmatrix} \varphi_2 - \varphi_1 \\ \lambda_2 - \lambda_1 \\ h_2 - h_1 \end{bmatrix}$$

será:

$$\begin{bmatrix} \varphi_2 \\ \lambda_2 \\ h_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \lambda_1 \\ h_1 \end{bmatrix} - N^{-1} \left\{ \begin{bmatrix} \delta x_{CT}^{Elipsoide} \\ \delta y_{CT}^{Elipsoide} \\ \delta z_{CT}^{Elipsoide} \end{bmatrix} + M \begin{bmatrix} \delta\epsilon_x \\ \delta\epsilon_y \\ \delta\epsilon_z \end{bmatrix} + T \begin{bmatrix} \delta a \\ \delta f \end{bmatrix} \right\} \qquad \text{[III.61]}$$

donde:

$$N^{-1} = \begin{bmatrix} -\dfrac{\sin\varphi \cos\lambda}{a} & -\dfrac{\sin\varphi \sin\lambda}{a} & \dfrac{\cos\varphi}{a} \\ -\dfrac{\sin\lambda}{\mathrm{a} \cos\varphi} & \dfrac{\cos\lambda}{\mathrm{a} \cos\varphi} & 0 \\ \cos\varphi \cos\lambda & \cos\varphi \ \sin\lambda & \sin\varphi \end{bmatrix}$$

Es más operativo expresar M en función de las coordenadas geográficas, así:

$$M = \begin{bmatrix} 0 & -\sin\varphi & \cos\varphi \sin\lambda \\ \sin\varphi & 0 & -\cos\varphi \cos\lambda \\ -\cos\varphi \sin\lambda & \cos\varphi \cos\lambda & 0 \end{bmatrix}$$

Estas matrices, M, N y T, pueden calcularse en cualquiera de los dos datum ya que la diferencia es pequeña.

Es frecuente suponer que los dos elipsoides tienen los ejes paralelos y paralelo el eje al eje de rotación Terrestre por lo que $\delta\epsilon_x = \delta\epsilon_y = \delta\epsilon_z = 0$, resultando:

$$\begin{bmatrix} \varphi_2 \\ \lambda_2 \\ h_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \lambda_1 \\ h_1 \end{bmatrix} - N^{-1} \left\{ \begin{bmatrix} \delta x_{CT}^{Elipsoide} \\ \delta y_{CT}^{Elipsoide} \\ \delta z_{CT}^{Elipsoide} \end{bmatrix} + T \begin{bmatrix} \delta a \\ \delta f \end{bmatrix} \right\}$$

$$\begin{bmatrix}\Delta\varphi\\ \Delta\lambda\\ \Delta\mathrm{h}\end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} -\frac{\sin\varphi\cos\lambda}{a} & -\frac{\sin\varphi\sin\lambda}{a} & \frac{\cos\varphi}{a}\\ -\frac{\sin\lambda}{\mathrm{a}\cos\varphi} & \frac{\cos\lambda}{\mathrm{a}\cos\varphi} & 0\\ \cos\varphi\cos\lambda & \cos\varphi\ \sin\lambda & \sin\varphi\end{bmatrix}\left\{\begin{bmatrix}\delta x_{CT}^{Elipsoide}\\ \delta y_{CT}^{Elipsoide}\\ \delta z_{CT}^{Elipsoide}\end{bmatrix} + T\begin{bmatrix}\delta a\\ \delta f\end{bmatrix}\right\}$$

El segundo término del producto es:

$$\begin{bmatrix}\delta x_{CT}^{Elipsoide}\\ \delta y_{CT}^{Elipsoide}\\ \delta z_{CT}^{Elipsoide}\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}\cos\varphi\cos\lambda & \mathrm{a}\sin^2\varphi\cos\varphi\cos\lambda\\ \cos\varphi\sin\lambda & \mathrm{a}\sin^2\varphi\cos\varphi\sin\lambda\\ \sin\varphi & a(\sin^2\varphi-2)\sin\varphi\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\delta a\\ \delta f\end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix}\delta x_{CT}^{Elipsoide} + \cos\varphi\cos\lambda\,\delta a + \mathrm{a}\sin^2\varphi\cos\varphi\cos\lambda\,\delta f\\ \delta y_{CT}^{Elipsoide} + \cos\varphi\sin\lambda\,\delta a + \mathrm{a}\sin^2\varphi\cos\varphi\sin\lambda\,\delta f a(\sin^2\varphi-2)\sin\varphi\\ \delta z_{CT}^{Elipsoide} + \sin\varphi\,\delta a + a(\sin^2\varphi-2)\sin\varphi\ a(\sin^2\varphi-2)\sin\varphi\end{bmatrix}$$

Efectuando el producto:

$$\Delta\varphi = \frac{\sin\varphi\cos\lambda}{a}\left(\delta x_{CT}^{Elipsoide} + \cos\varphi\cos\lambda\,\delta a + \mathrm{a}\sin^2\varphi\cos\varphi\cos\lambda\,\delta f\right)$$
$$+\frac{\sin\varphi\sin\lambda}{a}\left(\delta y_{CT}^{Elipsoide} + \cos\varphi\sin\lambda\,\delta a + \mathrm{a}\sin^2\varphi\cos\varphi\sin\lambda\,\delta f a\right)$$
$$-\frac{\cos\varphi}{a}\left(\delta z_{CT}^{Elipsoide} + \sin\varphi\,\delta a + a(\sin^2\varphi-2)\sin\varphi\ a(\sin^2\varphi-2)\sin\varphi\right)$$

$$a\Delta\varphi = \delta x_{CT}^{Elipsoide}\sin\varphi\cos\lambda + \delta y_{CT}^{Elipsoide}\sin\varphi\sin\lambda - \delta x_{CT}^{Elipsoide}\cos\varphi + \delta f 2a\sin\varphi\cos\varphi \quad \text{[III.62]}$$

$$\Delta\lambda = \frac{\sin\lambda}{\mathrm{a}\cos\varphi}\left(\delta x_{CT}^{Elipsoide} + \cos\varphi\cos\lambda\,\delta a + \mathrm{a}\sin^2\varphi\cos\varphi\cos\lambda\,\delta f\right)$$
$$-\frac{\cos\lambda}{\mathrm{a}\cos\varphi}\left(\delta y_{CT}^{Elipsoide} + \cos\varphi\sin\lambda\,\delta a + \mathrm{a}\sin^2\varphi\cos\varphi\sin\lambda\,\delta f a(\sin^2\varphi-2)\sin\varphi\right)$$

$$\mathrm{a}\cos\varphi\ \Delta\lambda = \sin\lambda\,\delta x_{CT}^{Elipsoide} - \cos\lambda\,\delta y_{CT}^{Elipsoide} \quad \text{[III.63]}$$

$$\Delta\mathrm{h} = -\cos\varphi\cos\lambda\left(\delta x_{CT}^{Elipsoide} + \cos\varphi\cos\lambda\,\delta a + \mathrm{a}\sin^2\varphi\cos\varphi\cos\lambda\,\delta f\right) - \cos\varphi\ \sin\lambda\left(\delta y_{CT}^{Elipsoide}\right.$$
$$\left. + \cos\varphi\sin\lambda\,\delta a + \mathrm{a}\sin^2\varphi\cos\varphi\sin\lambda\,\delta f a(\sin^2\varphi-2)\sin\varphi\right)$$
$$-\sin\varphi\left(\delta z_{CT}^{Elipsoide} + \sin\varphi\,\delta a + a(\sin^2\varphi-2)\sin\varphi\ a(\sin^2\varphi-2)\sin\varphi\right)$$

$$\Delta\mathrm{h} = -\delta x_{CT}^{Elipsoide}\cos\varphi\cos\lambda - \delta y_{CT}^{Elipsoide}\cos\varphi\sin\lambda - \delta z_{CT}^{Elipsoide}\sin\varphi - \delta a + \delta f a\sin^2\varphi \quad \text{[III.64]}$$

De forma práctica, lo que siempre se conoce es $\delta a\ y\ \delta f$ al conocer las dimensiones de los dos elipsoides. Lo que si se puede plantear de distintos modos es el conocimiento del datum que en esta hipótesis ya solo se necesitaría tres parámetros.

Las tres posibilidades de definirlo es:

$con\ (\xi,\eta,N)\ en\ un\ punto$

$con\ (\varphi,\lambda,h)\ en\ un\ punto$

$con\ (x_E\ ,y_E\ ,z_E\ )\ coordeandas\ del\ elipsoide\ respectoal\ c.d.g.de\ la\ tierra$

Con las fórmulas dadas conociendo $(\delta a,\delta f,\delta x_E\ ,\delta y_E\ ,\delta z_E\ )$ entre dos elipsoides, permite conocer $(\Delta\varphi,\Delta\lambda,\Delta h)$.

Es frecuente dar el datum definiendo las coordenadas geográficas de un punto, así el cambio del elipsoide puede venir dado por $(\delta\varphi_p,\delta\lambda_p,\delta h_p)$ en un punto. El problema se

puede plantear directamente, o bien despejar del sistema anterior $(\delta x_E, \delta y_E, \delta z_E)$, calcularlos y ya para los demás puntos calcular $(\delta\varphi_i, \delta\lambda_i, \delta h_i)$.

Si en vez de con un punto se hace con varios se pueden calcular y ajustar por mínimos cuadrados el valor de $(\delta x_E, \delta y_E, \delta z_E)$.

Las fórmulas que permiten el cálculo en cualquier punto de $(\delta\varphi_i, \delta\lambda_i, \delta h_i)$ en función de $(\delta\varphi, \delta\lambda, \delta h)$ dados

$$\begin{aligned}\delta\varphi = {} & (\cos\varphi_1\cos\varphi + \sin\varphi_1\sin\varphi\cos\Delta\lambda) \\ & - \sin\varphi\sin\Delta\lambda\cos\varphi_1\delta\lambda_1 \\ & + (\sin\varphi_1\cos\varphi - \cos\varphi_1\sin\varphi\cos\Delta\lambda)\left(\frac{\delta h_1}{a} + \frac{\delta a}{a} + \sin^2\varphi_1\delta f\right) \\ & + 2\cos\varphi\,(\sin\varphi - \sin\varphi_1)\delta f\end{aligned}$$

$$\cos\varphi\,\delta\lambda = \sin\varphi_1\sin\Delta\lambda\,\delta\varphi_1 + \cos\Delta\lambda\cos\varphi_1\,\delta\lambda_1 - \cos\varphi_1\sin\Delta\lambda\left(\frac{\delta h_1}{a} + \frac{\delta a}{a} + \sin^2\varphi_1\delta f\right)$$

$$\begin{aligned}\frac{\delta h}{a} = {} & (\cos\varphi_1\sin\varphi - \sin\varphi_1\cos\varphi\cos\Delta\lambda)\delta\varphi_1 + \cos\varphi\sin\Delta\lambda\cos\varphi_1\,\delta\lambda \\ & + (\sin\varphi_1\sin\varphi + \cos\varphi_1\cos\varphi\cos\Delta\lambda)\left(\frac{\delta h_1}{a} + \frac{\delta a}{a} + \sin^2\varphi_1\delta f\right) - \frac{\delta a}{a} \\ & + (\sin^2\varphi - 2\sin\varphi_1\sin\varphi)\delta f\end{aligned}$$

La otra forma posible de dar el datum es a través de (ξ, η, N). Así entre dos datum se tendrá $(\delta\xi, \delta\eta, \delta N)$ que en función de las coordenadas geográficas son:

$$\delta\xi = -\delta\varphi$$
$$-\delta\eta = -\delta\lambda\,\cos\varphi$$
$$\delta N = \delta h$$

Así, las fórmulas anteriores se expresan:

$$\begin{aligned}\delta\xi = {} & (\cos\varphi_1\cos\varphi + \sin\varphi_1\sin\varphi\cos\Delta\lambda)\delta\xi_1 \\ & - \sin\varphi\sin\Delta\lambda\,\delta\eta_1 - (\sin\varphi_1\cos\varphi - \cos\varphi_1\sin\varphi\cos\Delta\lambda)\left(\frac{\delta N_1}{a} + \frac{\delta a}{a} + \sin^2\varphi_1\delta f\right) \\ & - 2\cos\varphi\,(\sin\varphi - \sin\varphi_1)\delta f\end{aligned}$$

$$\delta\eta = \sin\varphi_1\sin\Delta\lambda\,\delta\xi_1 + \cos\Delta\lambda\,\delta\eta_1 + \cos\varphi_1\sin\Delta\lambda\left(\frac{\delta N_1}{a} + \frac{\delta a}{a} + \sin^2\varphi_1\delta f\right)$$

$$\begin{aligned}\frac{\delta N}{a} = {} & (\cos\varphi_1\sin\varphi - \sin\varphi_1\cos\varphi\cos\Delta\lambda)\delta\xi_1 - \cos\varphi\sin\Delta\lambda\cos\varphi_1\,\delta\eta_1 \\ & + (\sin\varphi_1\sin\varphi + \cos\varphi_1\cos\varphi\cos\Delta\lambda)\left(\frac{\delta N_1}{a} + \frac{\delta a}{a} + \sin^2\varphi_1\delta f\right) - \frac{\delta a}{a} \\ & + (\sin^2\varphi - 2\sin\varphi_1\sin\varphi)\delta f\end{aligned}$$

2.2.4.- Sistemas de referencia temporales.

2.2.4.1.- Clasificación del concepto de tiempo en geodesia espacial.

En la geodesia espacial, para medir el tiempo se utilizan dos escalas:

- Escala de tiempo astronómica:

  Están fundamentadas en el movimiento de rotación de la Tierra y son fundamentales para referenciar puntos de un sistema de referencia fijo con posiciones de la corteza terrestre.

  Las escalas más comúnmente utilizadas son la de Tiempo Universal (UT – Universal Time) y la de Tiempo Sidéreo.

El tiempo universal (UT) se define como tiempo solar medio referido al meridiano de Greenwich asentado en el rotación de la Tierra, definiendo día medio como el intervalo de tiempo entre dos pasos consecutivos del Sol Medio por el meridiano de un lugar, y por ende se llega a lo que es una hora media.

El día sidéreo medio es el intervalo de tiempo entre dos cruces consecutivos del equinoccio (γ) medido a través del meridiano origen. Esta afectado por el movimiento de precesión y por tanto no es constante, teniendo una variación diaria de 0,0084 segundos [SEEBE-93].

Así la relación entre ambos queda:

$$1\ día\ sidero\ medio = 1\ día\ solar\ medio - 3'\ 55{,}909''$$

- Escala de tiempo atómica:

  Están fundamentadas en la física nuclear, más fiables y estables que las astronómicas y por tanto necesarias para medir adecuadamente el tiempo de tránsito de la señal emitida por los satélites.

  La escala de tiempo son las escalas de tiempo atómicas (TA), actualmente definido por el tiempo atómico internacional (TAI).

  La unidad de medida es el segundo atómico definida, en la 13ª Conferencia General de Pesos y Medidas (CGPM) en 1967, como *"intervalo de tiempo para el cual la frecuencia de radiación del cesio correspondiente a la transición* 4.0 $\Longrightarrow$ 3.0 *en campo magnético nulo tiene por valor f=9192631770 Hz".*

  Definida esta unidad de tiempo, se define el tiempo universal coordinado (UTC), a través de tres tipos de tiempo, UT0, UT1 y UT2.

  UT0 es el tiempo universal obtenido a partir de observaciones estelares, haciendo la consideración expuesta anteriormente de que la diferencia entre un día sidéreo medio y un día solar medio (universal) es de 3' 55,909".

  UT1 es el UT0 corregido de la componente rotacional inducida por el movimiento del polo.

  UT2 es el UT1 corregido por variaciones periódicas y estacionales en la velocidad de rotación de la tierra.

  La escala UT1 es equivalente a la GMT (Greenwich Mean Time) y prácticamente igual a UTC.

  UTC se pasa a UT mediante la corrección DTU1. Esta diferencia, mínima, se aproxima mediante correcciones llamadas segundos intercalares (leap seconds) que son sucesivos incrementos de 1 segundo motivados por la variación de la velocidad de la Tierra, y que pueden alcanzar varios milisegundos diarios. La relación entre el tiempo medio sidéreo de Greenwich (GMST) y la escala UT1 viene dada por la relación:

$$GMST = UT1 + \alpha_m - 12^h \qquad \text{[III.65]}$$

  donde:

$$-\alpha_m = 18^h 41^m 50^s, 54841 + 8640184^s, 8182866 * T_U + 0^s, 093104 * T_U^2 - 6^s, 20\ 10^6 * T_U^3$$

  siendo:

  T_U es el tiempo trasncurrido, expresado en siglos julianos de 36.525 días solares medios, entre la época de referencia estándar del año 2000,0 (juliano) y el momento de observación.

  α_m es la ascensión recta media del sol medio.

- Sistemas de tiempo dinámicos:

  Estos sistemas provienen de los movimientos planetarios del sistema solar.

  Se define el tiempo dinámico terrestre (TDT – terrestrial dynamic time) y emplea como unidad de medida el segundo atómico, definido por:

$$TDT = TAI + 32^S, 184 \qquad \text{[III.66]}$$

Y se define el tiempo dinámico baricéntrico (TDB) con la siguiente relación:

$$TDB = TDT - 10^S, 001658 \ \sin(g + 0{,}0167 \sin g) \qquad \text{[III.67]}$$

donde:

$$g = \frac{2\pi}{360^o} \ (357^o, 528 + \ 35.999^o, 050 * JD)$$

2.2.4.2.- Tiempo GPS.

El Sistema de Posicionamiento Global (GPS), utiliza una escala de tiempo atómica, determinada a través de 25 relojes atómicos dispuestos por el US Naval Observatory. Estos relojes permiten establecer una escala propia e interna del GPS, escala denominada GPS Time.

Esto obliga a relacionar el tiempo universal (UT) para una posición determinada con el tiempo GPS con el objeto de asociar un tiempo al polo terrestre convencional, de forma que cualquier estación a lo largo de un determinado meridiano es capaz de observar el mismo tiempo universal:

$$UT1 = UT + \Delta \qquad \text{[III.68]}$$

El movimiento de los satélites alrededor de la tierra es independiente de la rotación de ésta, por lo que hubo que definir una escala de tiempo que relacionara ambas; por ello, en el año 1972 se definió la ya referida escala de tiempo universal coordinado (UTC), que relaciona las escalas de tiempo atómicas con las astronómicas, que de forma resumida se puede explicar como una escala de tiempo atómica que se adapta al UT1 corrigiendo con segundos intercalares (leap seconds), sucesivos incrementos de 1 segundo motivados por la variación del polo terrestre.

$$UTC = TAI - n \qquad \text{[III.69]}$$

donde n es un número entero de segundos.

El origen de esta nueva escala de tiempo se fija coincidente con el UTC el 6 de enero de 1980 a las 0:00, momento en el que existían 19 segundos de diferencia entre UTC y TAI y por tanto:

$$6 \ enero \ de \ 1980 \begin{cases} UTC = TAI \\ UTC = TAI = GPS_{time} + 19", 000 \\ TAI = TDT - 32", 184 \\ TAI = UTC + 1", 000 * n \ (n = seg.intercalares) \end{cases} \qquad \text{[III.70]}$$

De forma general se establece que la relación entre ambas escalas viene dada por la expresión [SEEBE-93].

$$GPS_{time} - UTC = n(seg) - c_0 \qquad \text{[III.71]}$$

donde c_0 es una constante de corrección.

Así, de forma general, con el sistema GPS, aparte de conseguir un posicionamiento geodésico, se consigue recepcionar el tiempo atómico, ya que la transmisión es instantánea y el retardo predecible. La precisión con que este tiempo puede ser determinado es del orden de 100 nanosegundos.

Actualmente, los satélites para medir el tiempo utilizan osciladores máser de hidrógeno con una precisión de 10^{-15} segundos y los aparatos receptores suelen incorporar osciladores de cuarzo, más económicos y menos precisos.

Tipo de oscilador	Frecuencia del oscilador	Estabilidad por día (Δf/f)	Tiempo para que el desfase sea de 1 seg.
Cristal de cuarzo	0.005	1,00E-09	30 años
Rubidio	6834682613	1,00E-12	30.000 años
Cesio	9192631770	1,00E-13	300.000 años
Máser de Hidrógeno	1420405751	1,00E-15	3.0000.000 años

Tabla III.1.- Características de los principales osciladores.

2.2.5.- Movimiento orbital de un satélite.

2.2.5.1.- Introducción.

Los satélites artificiales se encuentran orbitando alrededor de la tierra y, por tanto, sometidos a la fuerza de atracción de ésta, estando su movimiento definido por la Ley de Newton de la gravitación universal:

$$F = G\frac{m\,m'}{d^2} \qquad \text{[III.72]}$$

donde $G = 6{,}672 * 10^{-11}\frac{N-m^2}{kg^2}$, determinada por Cavendish.

Dado que se cumple que:

$$\vec{F} = m_s\overrightarrow{a_s} = m_s\frac{d^2r}{dt^2} \qquad \text{[III.73]}$$

Igualando ambas expresiones:

$$\overrightarrow{a_s} = \frac{d^2r}{dt^2} = G\frac{M_T}{r^2} \qquad \text{[III.74]}$$

Descomponiendo esta expresión sobre un sistema de ejes cartesianos (x, y, z):

$$a_x = \frac{d^2x}{dt^2} = GM_T\frac{(x_2-x_1)}{r^3}\ ;\ a_y = \frac{d^2y}{dt^2} = GM_T\frac{(y_2-y_1)}{r^3}\ ;\ a_x = \frac{d^2z}{dt^2} = GM_T\frac{(z_2-z_1)}{r^3} \qquad \text{[III.75]}$$

Si el sistema de referencia se considera geocéntrico, la expresión se transforma en [SEEBE-93]:

$$a_x = -GM_T\frac{x}{r^3}\ ;\ a_y = -GM_T\frac{y}{r^3}\ ;\ a_x = -GM_T\frac{z}{r^3} \qquad \text{[III.76]}$$

siendo $x^2 + y^2 + z^2 = r^2$

Con estas tres ecuaciones queda definida la órbita del satélite (forma y dimensiones) y, por tanto, el movimiento del satélite en ella; si bien con las hipótesis realizadas hasta ahora se ha acordado que el satélite se mueve en una órbita situada en un plano (plano orbital) y con una fuerza gravitatoria geocéntrica, con lo que con dos de las tres expresiones es suficiente para situarlo.

Con el ánimo de simplificar matemáticamente la situación del satélite, se puede suponer que el plano orbital es coincidente con el plano cartesiano XY. Aplicando el teorema del movimiento cinético, al ser la fuerza central, el momento es constante y su derivada es nula:

$$\frac{d\overrightarrow{M_{cinético}}}{dt} = 0 \qquad \text{[III.77]}$$

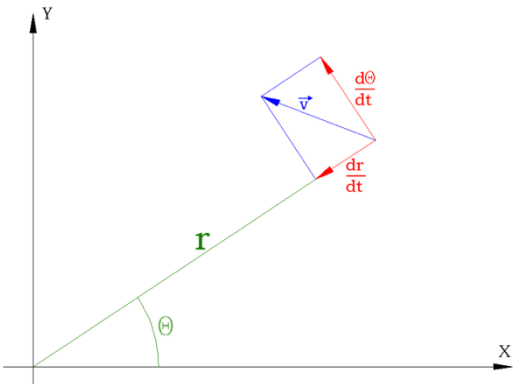


Figura III.20.- Movimiento cinético de los satélites.

De este modo,

$$\overrightarrow{M_{cinético}} = \vec{r} \wedge \vec{V} \; ; \; \left|\overrightarrow{M_{cinético}}\right| = c \qquad \text{[III.78]}$$

Si se aplica el teorema de las fuerzas vivas, se puede obtener un sistema de ecuaciones del que se obtiene la órbita como [SEEBE-93]:

$$r = \frac{a\left(1+e^2\right)}{1+e\cos(\theta-\theta_0)} \qquad \text{[III.79]}$$

Esta cónica será en función del valor de e una elipse ($e < 1$), una parábola ($e = 1$)o una hipérbola ($e > 1$), siendo en la geodesia espacial una elipse en todos los casos.

2.2.5.2.- Movimiento kepleriano.

Johannes Kepler (1571-1630) formuló tres leyes del movimiento planetario basadas en el estudio empírico de los datos obtenidos por el astrónomo Tycho Brahe (1546-1601), a saber:

- Primera Ley: Los planetas se desplazan alrededor del sol describiendo órbitas elípticas y éste se encuentra en uno de los focos de la elipse.
- Segunda Ley o ley de áreas, en la que las áreas barridas por los radios vectores que van del sol al planeta son iguales a igualdad de tiempos, es decir que los planetas se mueven con velocidad aerolar constante. Esta ley de áreas equivale a exponer momentos angulares constantes o, dicho de otro modo, cuando el planeta está más alejado del sol su velocidad es más pequeña que cuando está cerca. Si se define el momento angular L como el producto entre la masa del planeta en cuestión, su velocidad y su distancia al centro del sol, se cumple:

  $$L = m\, r_1\, v_1 = m\, r_2\, v_2 \qquad \text{[III.80]}$$

  Se puede concluir que las órbitas son planas y estables, que siempre tienen el mismo sentido y que la fuerza que los mueve es central.

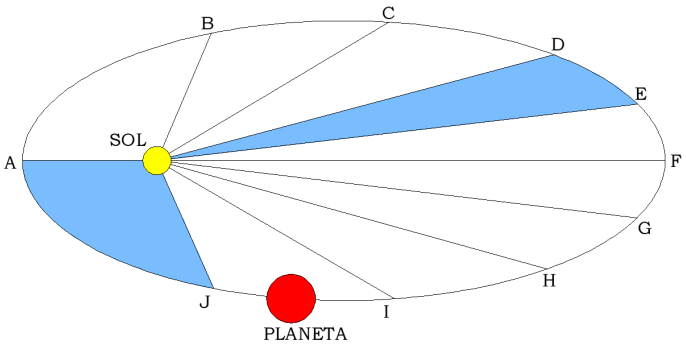


Figura III.21.- Detalle de la velocidad aerolar constante.

- Tercera Ley: los cuadrados de los períodos de revolución de los planetas alrededor del sol son proporcionales a los cubos de los semiejes mayores de sus respectivas órbitas.

$$\frac{T^2}{L^3} = constante \qquad [III.81]$$

Con todo lo anteriormente expuesto, y haciendo una traslación entre la tierra y los satélites artificiales, la tierra de masa M, crea un campo gravitatorio a su alrededor de forma que cualquier masa que esté a una distancia de la tierra se va a mover alrededor de ella siguiendo las leyes de Kepler anteriormente expuestas, abstracción que se puede realizar para un satélite artificial cuya masa es despreciable con respecto a la de la tierra.

El movimiento resultante, denominado kepleriano o imperturbado, parte de una serie de premisas como son: la trayectoria es una elipse en la que la tierra se sitúa en uno de sus focos; la masa del satélite artificial se considera despreciable frente a la de la tierra, moviéndose éste a través del vacío; y, por último, no se consideran las fuerzas gravitatorias de cualquier otro astro (el sol, la luna, etc.).

Para fijar la posición del satélite mediante un sistema de referencia cartesiano inercial fijo en el espacio se utilizan seis parámetros conocidos como parámetros orbitales keplerianos que se comprenden a través de la siguiente figura:

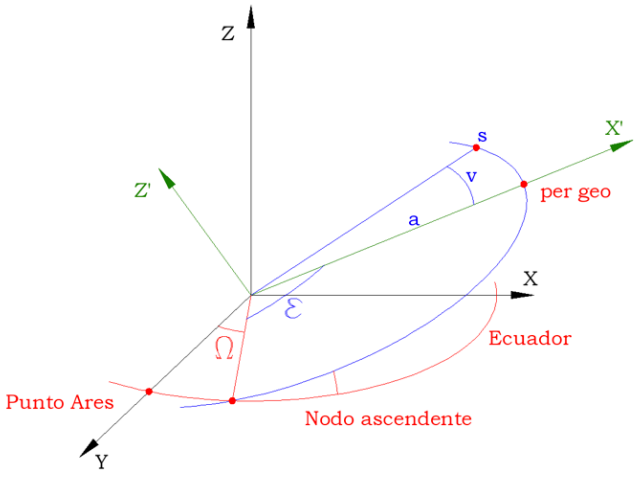


Figura III.22.- Plano orbital en el sistema inercial convencional.

donde:

Ω *es la ascensión del nodo ascendente.*

i *es la inclinación del plano orbital* (*para fijar la posición de la elipse en el plano orbital*).

ω *es el argumento del perigeo* (*para fijar el tamaño orbital*).

a *es el semidiámetro mayor de la elipse.*

e *es la excentricidadad primera de la elipse.*

(*para fijar la posición de la elipse en el plano orbital*)

T_0 *es la época de paso por el perigeo.*

Si bien, de forma habitual, la situación de un satélite dentro de su órbita se define mediante las denominadas anomalías, que son los valores angulares que se muestran en la siguiente figura:

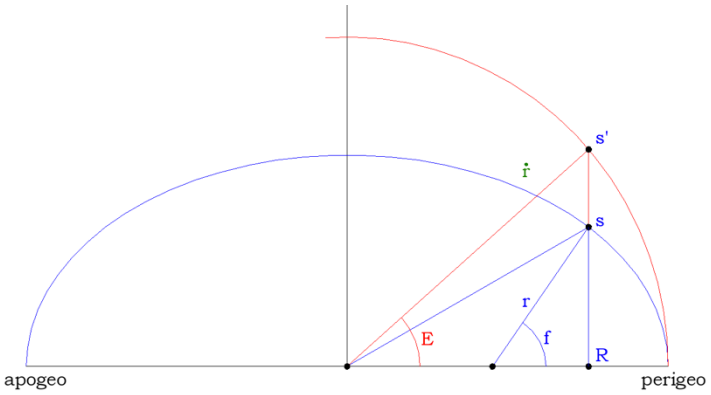


Figura III.23.- Sistema de coordenadas en el plano orbital.

Siendo:

f *la anomalía verdadera* $\Rightarrow f(t)$

E *la anomalía excéntrica* $\Rightarrow E(t)$

M *la anomalía media* $(principal) \Rightarrow M(t)$

Dentro de la teoría kepleriana expuesta, si se analizan todos los parámetros anteriormente enumerados, hay cinco que son invariables a lo largo del tiempo, (Ω, i, w, a, e), siendo las anomalías dependientes de éste: $[f(t), E(t), M(t)]$. Sin embargo, en las tendencias actuales de las teorías orbitales todas las variables dependen del tiempo y se conocen como parámetros keplerianos osculadores. A partir de las leyes de Kepler, se pueden llegar a relacionar matemáticamente las anomalías entre sí.

- Primera ley aplicada al duplo tierra-satélite artificial: la órbita, con los parámetros definidos anteriormente, viene definida por la siguiente expresión, previa exposición de las equivalencias en una elipse:

$$p = \frac{b^2}{a}\ ; e = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}}\ ; a = \frac{p}{1-e^2}\ ; b = \frac{p}{\sqrt{1-e^2}} \qquad [III.82]$$

$$r = \frac{b^2}{a}\ \frac{1}{1 + \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}}\ \cos f} = \frac{p}{1 + e\cos f}$$

$$r = \frac{a(1-e^2)}{1 + e\cos f}$$

$$r = a(1 - e\cos E) \qquad [III.83]$$

  Donde r es la distancia entre el geocentro y el satélite

- Segunda ley o ley de áreas aplicada al duplo tierra-satélite artificial: en la que las áreas barridas por los radios vectores son iguales a igualdad de tiempos, es decir, la velocidad aerolar constante. Por lo tanto se puede determinar la posición del satélite con respecto a la tierra en función del tiempo, según sus coordenadas polares $r\ y\ f$. Así se puede deducir la siguiente expresión para calcular el área del triángulo:

$$\overset{\Delta}{\rightarrow} [Geocentro - Satélite^{t} - Satélite^{\,t+\Delta t}] = \frac{1}{2}\ base * altura \qquad [III.84]$$

$$base = arco = ángulo * radio = \Delta f * r$$

$$altura = r$$

$$área = \Delta A = \frac{1}{2} r^2 \Delta f \qquad [III.85]$$

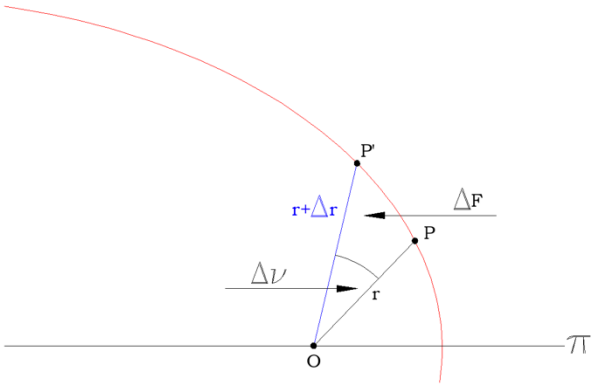


Figura III.24.- Determinación del área del triángulo.

Según esta segunda ley, en esta expresión se debe cumplir:

$$\frac{dA}{dt} = \frac{1}{2} r^2 \frac{df}{dt} = \frac{1}{2}\sqrt{aGM_T(1-e)} \qquad \text{[III.86]}$$

- Tercera ley aplicada al duplo tierra-satélite artificial: permite determinar la velocidad angular media del satélite:

$$Periodo(T) = \frac{2\pi}{frecuencia\ angular\ (F)} \qquad \text{[III.87]}$$

$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{F^2 a^3} = constante \qquad \text{[III.88]}$$

con lo que:

$$F^2 a^3 = \frac{constante}{4\pi^2} = c^2$$

donde c es una constante para el sistema $[tierra - satélite\ artifical]_i$ obtenida empíricamente, siendo su valor:

$$F^2 a^3 = \frac{k^2}{4\pi^2}(M_{Tierra} + m_{satélite})$$

Como:

$$\pi ab = \frac{1}{2} T r^2 \frac{df}{dt}\ ;\ r^2 \frac{df}{dt} = \sqrt{GM_T p}$$

Se obtiene:

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{GM_T}} a^{\frac{3}{2}} \qquad \text{[III.89]}$$

Sabiendo que la velocidad angular del satélite es:

$$\eta = \frac{2\pi}{T} \qquad \text{[III.90]}$$

Aplicando la tercera ley de Kepler, se tiene:

$$\frac{2\pi}{\eta} = \frac{2\pi}{\sqrt{GM_T}} a^{\frac{3}{2}}$$

$$\eta^2\, a^3 = GM_T\ ;\ \eta = \sqrt{\frac{GM_T}{a^3}}$$

De la segunda ley de Kepler:

$$r^2 df = \sqrt{GM_T p}\, dt = \sqrt{GM_T a(1-e^2)}\, dt$$

$$r = \frac{a(1-e^2)}{1+e\cos f} \Rightarrow dr = \frac{er^2}{a(1-e^2)} \sin f\, df = ea \sin E\, dE$$

$$\sin E\, dE = \frac{r^2}{a^2(1-e^2)} \sin f\, df = \frac{r^2}{b^2} \sin f\, df \qquad \text{[III.91]}$$

Como $\sin E = r \sin f$ y como $y = b$, entonces:

$$dE = \frac{r}{b} df \;\Rightarrow\; b\, dE = r\, df$$

$$r^2 df = \sqrt{GM_T a(1-e^2)}\, dt = \sqrt{\frac{GM_T b^2}{a}}\, dt = \frac{r^2 b}{r} dE = rbdE$$

Como $r = a(1 - \mathrm{e}\cos E)$:

$$ab(1 - \mathrm{e}\cos E) dE = ab\sqrt{\frac{GM_T}{a^3}}\, dt$$

$$(1 - \mathrm{e}\cos E) dE = \sqrt{\frac{GM_T}{a^3}}\, dt = \eta dt$$

Integrando esta expresión, se obtiene:

$$E - e\sin E = \eta(t - t_0) \qquad \text{[III.92]}$$

que se denomina ecuación de Kepler, donde:

$$\eta(t - t_0) = M, anomalía\ media$$

Que se relaciona con la anomalía verdadera a través de la siguiente expresión:

$$\tan f = \frac{\sqrt{1-e^2}\sin E}{\cos E - e} \qquad \text{[III.93]}$$

La anomalía media es la más utilizada en geodesia y de forma física se puede entender como el ángulo descrito por el satélite artificial si su trayectoria estuviera encuadrada en la circunferencia circunscrita y se desplazara a una velocidad equivalente al del movimiento medio η, y además se puede relacionar con el tiempo.

2.2.5.3.- Posición del satélite.

A.- Posicionamiento del satélite en su plano orbital.

A partir de lo anteriormente indicado, y según la [Figura III.22] se puede establecer:

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r\cos f \\ r\sin f \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a(\cos E - e) \\ a\sqrt{1-e^2}\sin E \\ 0 \end{bmatrix} \qquad \text{[II.94]}$$

A partir de ésta, se puede obtener el vector velocidad:

$$\vec{v} = \begin{bmatrix} \frac{dX'}{dt} \\ \frac{dY'}{dt} \\ \frac{dZ'}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{dr}{dt}\cos f - r\sin f \frac{df}{dt} \\ \frac{dr}{dt}\sin f + r\cos f \frac{df}{dt} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a\sin E \frac{dE}{dt} \\ a\sqrt{1-e^2}\cos E \frac{dE}{dt} \\ 0 \end{bmatrix} \qquad \text{[II.95]}$$

Aplicando la denominada ecuación de Kepler:

$$\vec{v} = \frac{\eta\, a}{(1-e\cos E)}\begin{bmatrix} -\sin E \\ \sqrt{1-e^2}\cos E \\ 0 \end{bmatrix} \qquad [II.96]$$

Como:

$$\frac{r}{a} = \frac{1}{(1-e\cos E)} \Rightarrow \vec{v} = \eta\, r \begin{bmatrix} -\sin E \\ \sqrt{1-e^2}\cos E \\ 0 \end{bmatrix} \qquad [II.97]$$

Igualando el valor de la anomalía verdadera $X' = r\cos\theta$ con el valor de la anomalía excéntrica $X' = a(\cos E - e)$ y operando se obtiene [HOFMA-01]:

$$v = \sqrt{\frac{u^*}{a\left(1-e^2\right)}}\begin{bmatrix} -\sin f \\ \cos f + e \end{bmatrix} \qquad [III.98]$$

B.- Cálculo de la posición del satélite en el sistema inercial convencional (CIS).

La posición del satélite así como su velocidad es necesario referenciarlas respecto a un sistema de referencia universal, (T, X, Y, Z), donde el plano fundamental es el ecuador celeste, siendo el paso de un sistema a otro a través de la siguiente matriz de rotación:

$$R = R(w)R(i)R(\Omega) \qquad [III.99]$$

$$R = \begin{bmatrix} \cos w & \sin w & 0 \\ -\sin w & \cos w & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos i & \sin i \\ 0 & -\sin i & \cos i \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \cos\Omega & \sin\Omega & 0 \\ -\sin\Omega & \cos\Omega & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad [III.100]$$

$$R = \begin{bmatrix} \cos w\cos\Omega - \cos i\cos w\sin\Omega & \cos w\sin\Omega - \cos i\sin w\cos\Omega & \sin i\sin w \\ \sin w\cos\Omega - \cos i\cos w\sin\Omega & \sin w\sin\Omega + \cos i\cos w\cos\Omega & \sin i\cos w \\ -\sin i\sin\Omega & -\sin i\cos\Omega & \cos i \end{bmatrix} \qquad [III.101]$$

siendo la transformación inversa la definida por la matriz R^{-1}.

$$R^{-1} = \frac{1}{\cos^2 w - \sin^2 w}\begin{bmatrix} \sin w\sin\Omega + \cos w\cos\Omega & -\sin w\cos\Omega - \cos i\cos w\sin\Omega & \dfrac{\sin i\sin\Omega}{\cos^2 w - \sin^2 w} \\ \cos w\sin\Omega - \sin w\cos\Omega & -\sin w\sin\Omega - \cos i\cos w\cos\Omega & \dfrac{\sin i\cos\Omega}{\cos^2 w - \sin^2 w} \\ \sin i\sin w & \sin i\cos w & \dfrac{\cos i}{\cos^2 w - \sin^2 w} \end{bmatrix}$$

Luego:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = R^{-1}\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} \quad ; \quad \begin{bmatrix} \frac{dX}{dt} \\ \frac{dY}{dt} \\ \frac{dZ}{dt} \end{bmatrix} = R^{-1}\begin{bmatrix} \frac{dX'}{dt} \\ \frac{dY'}{dt} \\ \frac{dZ'}{dt} \end{bmatrix} \qquad [III.102]$$

C.- Cálculo de los parámetros de la órbita a partir de la posición del satélite.

Los parámetros keplerianos se pueden determinar a partir de la posición del satélite y de su velocidad, teniendo en cuenta el momento angular $\overrightarrow{M_a}$:

$$\overrightarrow{M_a} = \vec{r} \wedge \vec{v} = \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} \qquad [III.103]$$

Obteniendo según [LEICK-95] las siguientes expresiones:

$$\Omega = \operatorname{atan}\left(\frac{M_x}{-M_y}\right); i = \operatorname{atan}\frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{M_z}; a = \frac{r}{2 - r\frac{v^2}{\mu^*}}$$

$$e = \sqrt{1 - \frac{M_a^2}{\mu^* a}}; E = \arccos\frac{a - r}{a\, e}; f = \operatorname{atan}\left(\frac{\sqrt{1 - e^2}\sin E}{\cos E - e}\right)$$

$$M = E - e\sin E$$

D.- Coordenadas topocéntricas del satélite.

La posición del satélite se obtiene con una precisión de $[200 - 300]\, metros$ según las ecuaciones de movimiento obtenidas a partir de la teoría kepleriana, precisisón suficiente para saber si el satélite es visible desde una cierta estación. Por tanto, es necesario definir un nuevo sistema de referencia local en función del lugar de observación. Desde esta posición el satélite describirá un movimiento denominado topocéntrico. Al estar el satélite relativamente cercano a la tierra, el movimiento geocéntrico y topocéntrico de éste diferirán sensiblemente.

Las coordenadas cartesianas geocéntricas ecuatoriales absolutas (α, R, δ), son conocidas según la siguiente expresión:

$$X = r\cos\alpha\, R\cos\delta\ ; Y = r\sin\alpha\, R\cos\delta\ ; Z = r\sin\delta$$

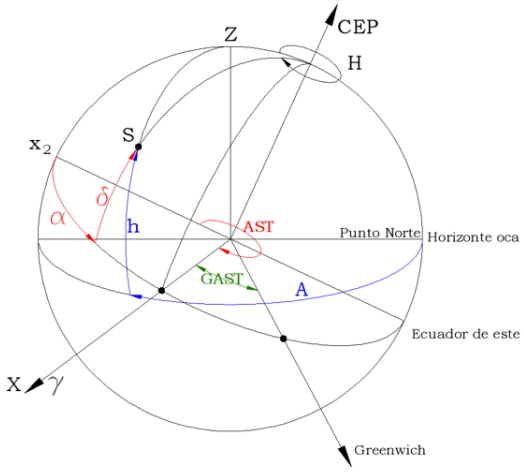


Figura III.25.- Sistema de coordenadas geocéntrico: Acimut y Altura.

La conversión del sistema ecuatorial absoluto al sistema ecuatorial horario se realiza a través de una inversión y de una rotación de ángulo (AST) según queda reflejado en la figura anterior, [LEICK-95] y expresado a partir de la siguiente ecuación:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{H,\delta} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} R_3(AST) \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\alpha,\delta} \qquad [III.104]$$

El siguiente paso es la conversión a un sistema no ecuatorial, horizontal, de coordenadas acimut (A) y de altura (h), realizándolo a través de una rotación en el eje X hasta que sea coincidente con la dirección el punto norte conforme a:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{A,h} = R_3(-180)R_2(90 - \varphi) \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{H,\delta} \qquad [III.105]$$

donde:

φ *es la latitud esférica.*

De este modo se obtienen las coordenadas horizontales geocéntricas, pero aún así las que realmente interesan son las coordenadas topocéntricas siendo necesario realizar una transformación adicional, definiendo dos sistemas de referencia cartesianos

paralelos, uno geocéntrico: (T,X,Y,Z) y otro topocéntrico: (P,X',Y',Z'), tal y como se puede apreciar en la siguiente figura:

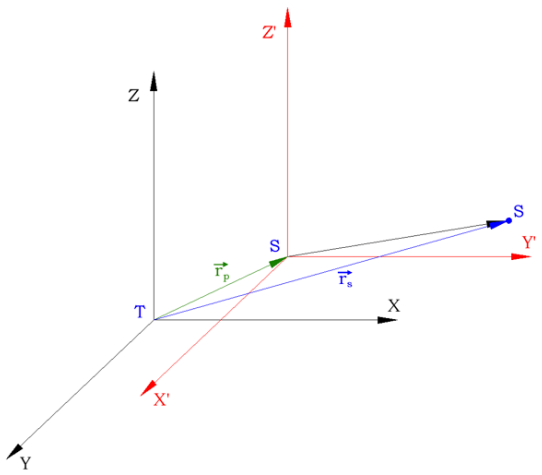


Figura III.26.- Sistema topocéntrico y geocéntrico de coordenadas.

De la figura anterior se determina:

$$\overrightarrow{PS} = \vec{r_s} - \vec{r_p} \qquad \text{[III.106]}$$

Que haciendo una discretización en componentes:

$$X'_S = X_S - X_P$$

$$Y'_S = Y_S - Y_P$$

$$Z'_S = Z_S - Z_P$$

Lo habitual es que la posición el observador (estación) venga dada en coordenadas terrestres medias (sistema de referencia geocéntrico con plano fundamental el ecuador terrestre medio, el eje *w* coincidiendo con la dirección del polo terrestre medio y el eje en la dirección del meridiano de Greenwich).

De este modo, si se conoce la hora sidérea de Greenwich (GAST), y los parámetros del movimiento del polo (x_p, y_p), las coordenadas ecuatoriales del punto P serán:

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix} = R_3(-GAST)R_2(X_P)R_1(Y_P)\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \qquad \text{[III.107]}$$

Así, como las coordenadas cartesianas geocéntricas del satélite son conocidas, se pueden obtener las coordenadas topocéntricas ecuatoriales del satélite y, por tanto, las topocéntricas horizontales a partir de las expresiones anteriores.

2.2.5.4.- Movimiento perturbado de los satélites.

Todo lo expuesto hasta ahora en relación a los satélites artificiales se ha realizado con las hipótesis en las que se basan las teorías de Kepler, primero en cuanto a la esfericidad y homogeneidad de la tierra, y segundo la influencia gravitatoria externa, aspectos que influyen en la órbita real del satélite artificial. Aquellas órbitas respondían al movimiento kepleriano dado por:

$$\frac{d^2r}{dt^2} = -G\frac{M_T}{r^3}\,r$$

De forma que integrando conlleva a soluciones del tipo:

$$r(t) = r(t;a_i)\ donde\ i \in [1\ a\ 6]$$

$$\frac{dr}{dt} = \frac{d}{dt}(t; a_i) \; donde \; i \in [1 \; a \; 6]$$

habiendo utilizado como $a_i = [a, e, i, \omega, \Omega, \bar{M}]$

Estas influencias no consideradas se pueden resumir del siguiente modo:

- Aspectos gravitacionales:
    - La tierra no es esférica y tampoco tiene un reparto homogéneo de su masa, lo que supone una consecuencia directa sobre el campo gravitacional, no siendo un campo central como se ha considerado hasta ahora.
    - Otros cuerpos celestes, como son el sol y la luna de forma más influyente, ejercen fuerzas de atracción gravitacionales sobre el satélite.
- Aspectos no gravitacionales:
    - El satélite en su movimiento orbital ha de vencer por un lado la resistencia de las partículas de la atmósfera.
    - Existen fuerzas con origen en las mareas oceánicas y de la corteza terrestre.
    - Presión de la radiación solar.
    - Efectos relativistas.
    - Fuerzas del campo magnético terrestre.

Todas estas fuerzas hacen que el movimiento real de un satélite no se corresponda con lo establecido por las teorías keplerianas. Se suele estudiar el movimiento real de un satélite como movimiento perturbado por aquellas fuerzas que actúan sobre el satélite apartándolo de su trayectoria kepleriana y cuyo origen se ha descrito con anterioridad. La fuerza perturbadora resultante será la suma de los componentes anteriores, siendo algunas periódicas, de corto o largo periodo, y otras seculares, es decir, proporcionales al tiempo.

$$k_p = \sum_i \ddot{r}_i \qquad \text{[III.108]}$$

Esta ecuación diferencial, de difícil resolución, se suele resolver a partir de simplificaciones, calculando a posteriori el error cometido como consecuencia de ellas. De este modo el movimiento orbital responderá a la ecuación kepleriana inicial corregida por esta resultante:

$$\frac{d^2r}{dt^2} = -G\frac{M_T}{r^3}\, r + \; k_p k_p = \sum_i \ddot{r}_i \qquad \text{[III.109]}$$

Para representar el movimiento real perturbado, [SEEBE-93], propone dos procedimientos:

- Procedimiento de integración numérica o de variación de coordenadas: calcula las coordenadas del satélite considerando las perturbaciones y las determina numéricamente sin entrar a determinar de forma analítica la trayectoria.
- Procedimiento de integración analítica o variación de constantes: considera los parámetros orbitales ($a_i = f(t)$), dependientes del tiempo.

A.- Influencia en la trayectoria orbital kepleriana debido a la falta de simetría del campo gravitatorio terrestre.

Es el factor que más influye y se produce como consecuencia del achatamiento de la tierra y, por tanto, de un sistema gravitatorio no centrado. Produce una fuerza sobre el

satélite que tiende a modificar la órbita del satélite para incluirla en el plano ecuatorial.

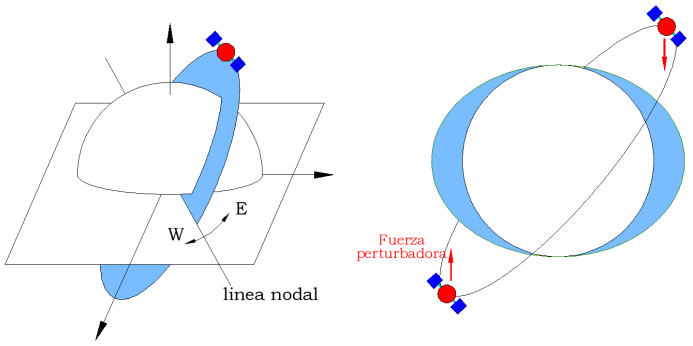


Figura III.27.- Precesión nodal causada por el achatamiento de la tierra.

La expresión que cuantifica esta perturbación se puede encontrar en [LEICK-04]:

$$\ddot{r}_g = \begin{bmatrix} \frac{\partial V}{\partial x} \\ \frac{\partial V}{\partial y} \\ \frac{\partial V}{\partial z} \end{bmatrix} \qquad \text{[III.110]}$$

Donde V es el potencial gravitatorio y que se suele expresar en armónicos esféricos, tal como se puede encontrar en [SEEBE-93]:

$$V = \frac{GM}{r}\left[1 + \sum_{n=1}^{\infty}\sum_{m=0}^{n}\left(\frac{a_e}{r}\right)^n (C_{nm}\cos m\lambda + S_{nm}\sin m\lambda) P_{nm}(\cos v)\right] \qquad \text{[III.111]}$$

donde:

C_{nm} y S_{nm} *son los coeficientes armónicos representan la distribución de la masa*

a_e *es el radio ecuatorial*

P_{nm} *está asociado a la función de Legendre*

Por lo tanto:

$\frac{Gm}{r}$ *representa el potencial gravitatorio de una masa esférica puntual*

k *representa el potencial de perturbación debido al campo gravitatorio asimétrico*

Desarrollando matemáticamente, aspecto que no se expone por sobrepasar el objeto de este trabajo, se llega a que el coeficiente con mayor influencia es el C_{20}, influencia mayor a 1.000 a 1 con respecto al resto de coeficientes, y empleando el procedimiento referido anteriormente de variación constante, se llega a una relación entre el campo gravitatorio y la variación de los parámetros orbitales en función del tiempo [SEEBE-93].

$$\frac{d\Omega}{dt} = C_{20}\frac{3\vec{n}a_e^2}{2a^2(1-e^2)^2}\cos i \qquad \text{[III.112]}$$

$$\frac{d\omega}{dt} = C_{20}\frac{3\vec{n}a_e^2}{4a^2(1-e^2)^2}\left(1 - 5\cos^2 i\right) \qquad \text{[III.113]}$$

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = \overrightarrow{n -} C_{20}\frac{3\vec{n}a_e^2}{4a^2\sqrt{(1-e^2)^3}}\left(3\cos^2 i - 1\right) \qquad \text{[III.114]}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{da}{dt} = \frac{de}{dt} = 0 \qquad \text{[III.115]}$$

B.- Influencia en la trayectoria orbital kepleriana debido al campo gravitatorio del sol y de la luna.

De forma análoga al apartado anterior, existe una atracción gravitatoria sobre el satélite ejercida por el sol y por la luna, tal y como se puede apreciar en la siguiente figura:

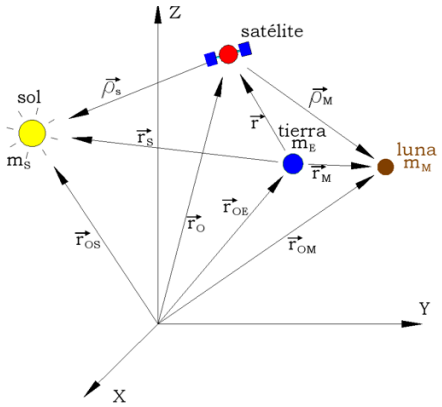


Figura III.28.- Atracción gravitatoria ejercida sobre el satélite por el sol y la luna.

Si sobre ellos se hace la hipótesis de que son masas uniformes, la expresión que rige el fenómeno será:

$$\frac{d^2r}{dt^2} = -G\frac{M_i}{r^3}\,r \qquad \text{[III.116]}$$

Las fuerzas de atracción ejercidas por la luna y el sol serán, respectivamente:

$$\frac{d^2r_M}{dt^2} = GM_{luna}\left(\frac{r_M - r}{|r_M - r|^3} - \frac{r_M}{|r_M|^3}\right) \qquad \text{[III.117]}$$

$$\frac{d^2r_S}{dt^2} = GM_{sol}\left(\frac{r_S - r}{|r_S - r|^3} - \frac{r_S}{|r_S|^3}\right) \qquad \text{[III.118]}$$

Conocida la relación de masas entre el sol, la luna y la tierra es posible determinar la influencia gravitatoria de los dos primeros astros, y con ello puede determinarse el efecto perturbador en los parámetros orbitales.

$$\frac{M_{sol}}{M_{tierra}} = 332.946\,;\frac{M_{luna}}{M_{tierra}} = 0{,}0123002$$

C.- Influencia en la trayectoria orbital kepleriana debido a la radiación solar.

La emisión continua por parte del sol de fotones provoca sobre los satélites artificiales dos efectos diferenciados: por un lado, el choque directo de fotones sobre el satélite y, por otro, el choque de fotones reflejados por la tierra. Ambos fenómenos producen sobre el satélite un efecto perturbador análogo.

La fuerza resultante ejercida sobre el satélite artificial es directamente proporcional a la superficie expuesta del satélite, así como la reflectividad de su superficie y del flujo luminoso del sol, e inversamente proporcional a la velocidad de la radiación solar y a la distancia al cuadrado entre ambos (satélite-sol).

La perturbación producida sobre el satélite se puede expresar a través de la aceleración producida sobre éste a través de la siguiente expresión [SEEBE-93]:

$$\frac{d^2r_{radiación\ solar}}{dt} = \upsilon\, K_s K_r K_a (UA)^2 \frac{\overrightarrow{r_{satélite}} - \overrightarrow{r_{sol}}}{|\overrightarrow{r_{satélite}} - \overrightarrow{r_{sol}}|^3} \qquad \text{[III.119]}$$

donde:

υ *es un parámetro en función de la sombra radiada sobre el satélite, cuyos valores son*:

$\upsilon = 1$ *en la zona iluminada por el sol.*

$\upsilon = 0$ *en la zona de sombra.*

$\upsilon \in [0-1]$ *en la zona intermedia sol − sombra*

K_S *se define como la relación entre el flujo lumínico del sol y su velocidad de radiación.*
K_r *se define como el coeficiente de reflectividad de la superficie satelital.*

$K_a = \frac{A}{m_{satélite}}$ *es el cociente entre la superficie del satélite ortogonal al flujo y su masa*

UA es la unidad astronómica y equivale a la distancia medita tierra − sol $(149.597.870\ km)$

$r_{satélite}$ *es la posición geocéntrica del satélite.*

r_{sol} *es la posición geocéntrica del sol.*

D.- Influencia en la trayectoria orbital kepleriana debido a las mareas oceánicas y terrestres.

Las mareas oceánicas y terrestres actúan provocando un cambio en el potencial gravitatorio que se traduce en aceleraciones complementarias sobre los satélites, considerados por los diferentes autores como efectos gravitatorios indirectos de la luna y el sol.

Según [SEEBE-93], el valor de la aceleración causada por las mareas terrestres obedece a la siguiente expresión:

$$\frac{d^2 r_{marea\,terrestre}}{dt} = \frac{k_2}{2} G \frac{M_{astro}}{r_{astro}^3} \frac{a_{astro}^5}{r_{satélite}^4} \left(3 - 15\cos^2\theta\right) \frac{\overrightarrow{r_{satélite}}}{|r_{satélite}|} + 6\cos\frac{\overrightarrow{r_{astro}}}{r_{astro}} \qquad \text{[III.120]}$$

siendo:

M_{astro} *es la masa del astro* $(sol, luna)$.

r_{astro} *es el vector geocéntrico de posición del cuerpo perturbador.*

$r_{satélite}$ *es el vector geocéntrico de posición del satélite.*

θ *es el ángulo formado por los vectores de posisición* r_{astro} *y* $r_{satélite}$

k_2 *es el coeficiente de elasticidad de la tierra*

El valor de la aceleración producida sobre un satélite artificial es pequeña, siendo del orden de $10^{-9}\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{seg}^2}$ para los satélites GPS.

Los efectos de las mareas oceánicas, debido a la forma irregular de los bordes costeros, son difíciles de calcular. Es por ello que se han propuesto diferentes modelos [SEEBE-93] para su cuantificación, resultando una aceleración sobre los satélites GPS del orden de $10^{-10}\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{seg}^2}$.

E.- Influencia en la trayectoria orbital kepleriana debido a la resistencia atmosférica.

Este fenómeno es debido a la resistencia opuesta por las partículas existentes en la atmósfera al satélite en su trayectoria. Esta resistencia decrece de forma importante con la altura y por ello tiene una influencia grande en satélites con órbitas bajas, si bien hay que tenerlo en cuenta en todos los casos.

A partir de resultados empíricos de investigación, [SEEBE-93], propone su cálculo a partir de la siguiente expresión:

$$\frac{d^2 r_{resist.atmosf.}}{dt} = -\frac{1}{2} C_d \rho K_a \left(\frac{dr}{dt} - \frac{dr_{atmósfera}}{dt}\right)\left|\frac{dr}{dt} - \frac{dr_{atmósfera}}{dt}\right| \qquad \text{[III.121]}$$

siendo:

C_d *es el coeficiente de rozamiento (específico para cada satélite).*

ρ *es la densidad de la atmósfera en el entorno del satélite.*

$K_a = \frac{A}{m_{satélite}}$ *es el cociente entre la superficie del satélite ortogonal al flujo y su masa.*

$\frac{dr}{dt}$ *es la velocidad del satélite.*

$\frac{dr_{atmósfera}}{dt}$ *es la velocidad de la atmósfera en el entorno del satélite.*

La densidad de la atmósfera en el entorno del satélite, ρ, se puede calcular según la siguiente formulación:

$$\rho = \rho_0 e^{-\alpha_a h} \qquad \text{[III.122]}$$

donde:

α_a *es una constante.*

ρ *es la densidad a una altura, h, respecto de un punto en donde la densidad es conocida* ρ_0

El valor de la aceleración producida sobre un satélite artificial tiene un orden de magnitud de $10^{-3}\ a\ 10^{-9}\frac{m}{seg^2}$.

2.3.- PROBLEMÁTICA DE LA PROPAGACIÓN DE ONDAS A TRAVÉS DE LA ATMÓSFERA.

2.3.1.- El conocimiento de la atmósfera.

Una emisión radioeléctrica experimenta, respecto del vacío, un incremento en el tiempo de tránsito al atravesar un cierto medio. A esta variación o incremento de tiempo se le denomina retardo o retraso, y su causa se fundamenta en los siguientes fenómenos físicos:

- La velocidad de propagación de las ondas en el vacío es siempre mayor que en cualquier otro medio.
- Al pasar de un medio a otro, las ondas electromagnéticas experimentan un cambio en su dirección de propagación por efecto de la refracción.
- Los satélites se mueven a velocidades altas y el valor de la gravedad es variable, lo que provoca efectos relativistas.

El estudio del retardo sufrido por las señales satelitarias en su viaje a través de la atmósfera se realiza dividiendo ésta en las siguientes zonas en función de su altura respecto de la corteza terrestre:

- Troposfera: Es la que está en contacto directo con la corteza terrestre y es en la que se producen todos los fenómenos climatológicos. La temperatura en ella tiene un gradiente negativo con la altura de unos $[7-10]\frac{^{o}K}{km}$. Su espesor medio es de unos 11 km pudiendo llegar a los 20 km en algunas zonas del ecuador. Su composición es uniforme con los siguientes componentes: [N(78%) – O_2(21%) – Ar(1%) – CO_2(0,03%) – H(0,01%) – Ne – Kr – Xe – He – O_3]. Por encima, 5-10 km., se sitúa la tropopausa que se caracteriza porque el gradiente se anula.

  En esta zona, que tiene la densidad más alta de todas las capas de la atmósfera, la velocidad de propagación de la señal depende de la temperatura, de la humedad relativa y de la presión.

- Estratosfera: Está por encima de la anterior hasta los 50 km de altura media (unos 70 km desde el ecuador), teniendo por tanto un espesor medio de unos 25 km. En ella la temperatura tiene gradiente positivo, cambiando el signo con la anterior debido al ozono, O_3, existente que absorbe la radiación ultravioleta del sol produciendo calor y llegando a alcanzar los 270ºK.
- Mesosfera: Se prolonga por encima de la anterior hasta los 85 km de altura media y el gradiente de la temperatura vuelve a cambiar de signo descendiendo hasta los [130-150]ºK.
- Termosfera: Esta capa, que se prolonga hasta los 500 km, tiene la peculiaridad de que la temperatura sube de nuevo hasta los 1500ºK, con una disminución notable de la densidad.
- Ionosfera: En intersección con las peculiaridades expuestas de las dos anteriores, esta capa se denomina ionosfera a partir de los 80 km y por encima de la estratosfera y hasta la altura de 1.000 km. En esta capa las moléculas están ionizadas (tienen carga eléctrica) aunque con una baja conductividad. La ionización se produce debido a las radiaciones ultravioletas del sol. La densidad de electrones libres en esta capa influye en la velocidad de propagación de la señal y, a su vez, depende de la radiación solar. Dentro de la ionosfera, se dividen una serie de capas en función de la densidad de electrones, entre las que se producen corrientes eléctricas que originan campos magnéticos adicionales al producido por la tierra. Estas capas son:
    - Capa D: comienza a los 80 km de altura y tiene gran poder de absorción de las ondas electromagnéticas y gran capacidad para reflejar las ondas largas y muy largas (ondas de radio) y atenuar por absorción las frecuencias medias y altas. La ionización de esta capa es producida por la radiación solar, en concreto la radiación α de Lyman sobre el O_2. La densidad es de $[10^2 - 10^4]\frac{e^-}{m^3}$. La absorción es mayor en época estival que en invernal y prácticamente nula en horario nocturno.
    - Capa E: se sitúa entre los 100-120 km y su composición y comportamiento dependen en gran medida del ángulo cenital del sol. La densidad es de $[10^5]\frac{e^-}{m^3}$ en horario diurno y de $[2 * 10^3]\frac{e^-}{m^3}$ en horario nocturno.
    - Capa F: fijada entre los 120 km y los 400 km y compuesta por dos capas F_1 y F_2.
        - La capa F_1, que abarca entre los 120 km y los 200 km tiene una densidad que varía de $[10^3 - 5 * 10^5]\frac{e^-}{m^3}$.
        - La capa F_2, a partir de los 200 km y con una densidad que varía de $[3 * 10^5 - 10^6]\frac{e^-}{m^3}$, siendo variable en función de los ciclos de manchas solares junto con las épocas estacionales así como el día y la noche.
- Magnetosfera: Ya no es una capa propiamente dicha, situada por encima de los 400 km, sino una cubierta en dirección contraria al sol y a favor de los vientos solares ya que son éstos los que la provocan. Por encima de los 1500 km el gas está completamente ionizado y se le llama plasma.
- Exosfera: Por encima de la anterior, desde los 6000 km hasta el vacío interestelar. Sus partículas ya prácticamente no chocan entre sí, por lo que ya no afecta prácticamente a las emisiones de señales electromagnéticas.

2.3.2.- La transmisión de la señal de los satélites.

El conocimiento de la señal electromagnética emitida por los satélites es fundamental, por un lado el conocimiento físico de la misma para la determinación de distancias y por otro el conocimiento lógico para la determinación del posicionamiento así como información adicional.

2.3.2.1.- Estructura de la señal.

A.- Fundamento físico.

La información se transmite a través de ondas electromagnéticas que parten de los satélites artificiales hasta los receptores situados en la Tierra. Los datos normalmente transmitidos y a partir de los cuales se realizan los cálculos pertinentes son:

- la frecuencia, $f \Rightarrow unidad\ de\ medida: Hz = \frac{ciclos}{segundo}$
- la fase, $\varphi \Rightarrow unidad\ de\ medida: ciclos$
- la longitud de onda, $\lambda \Rightarrow unidad\ de\ medida: \frac{m}{ciclo}$
- el periodo, $P \Rightarrow unidad\ de\ medida: segundo$
- la velocidad de la luz, c $\Rightarrow unidad\ de\ medida: \frac{m}{segundo}$

La relación entre ellos, se hace a través de las siguientes expresiones:

$$f = 2\pi\frac{1}{P} = \frac{c}{\lambda}$$

$$f = \frac{d\varphi}{dt}$$

obteniendo por tanto la fase, integrando esta última expresión entre dos épocas t_0 y t

$$\varphi = \int_{t_0}^{t} f\ dt$$

B.- Componentes de la señal.

Los satélites llevan a bordo unos osciladores capaces de generar una frecuencia fundamental f_0 con una estabilidad de $10^{-13}\ \frac{Hz}{día}$. A partir de esta frecuencia fundamental se pueden obtener las portadoras en la banda L del espectro, que corresponde a la banda de frecuencia de las microondas en el intervalo $[1-2]\ GHz$. De este modo, las dos portadoras utilizadas son L1 y L2.

$$Portadora\ L1\ \Rightarrow 154\ f_0 = 1.575{,}42\ MHz$$

$$Portadora\ L2\ \Rightarrow 120\ f_0 = 1.227{,}60\ MHz$$

Estas dos portadoras, L1 y L2, se modulan de forma que transmitan toda la información necesaria como es:

$$Código\ P\ \Rightarrow\ f_0 = 10{,}23\ MHz\ repetido\ cada\ 266{,}4\ días\ y\ \lambda \approx 30\ cm, encriptado\ a\ uso\ civil$$

$$Código\ \frac{C}{A} \Rightarrow \frac{f_0}{10} = 1{,}023\ MHz\ repetido\ cada\ milisegundo, \lambda \approx 300\ m\ y\ modulado\ sobre\ L1$$

$$Mensaje\ de\ navegación\ \Rightarrow \frac{f_0}{204.600} = 50\ 10^{-6}\ MHz\ repetido\ cada\ 30\ segundos,$$
$$reporta\ información\ sobre\ efemérides, estado\ del\ satélite, \ldots$$

El código P se modula sobre las portadoras L1 y L2 y el código C/A sólo sobre la L1 en cuadratura de fase con el código P.

Las ecuaciones que representan las portadoras L1 y L2, son:

$$L1(t) = a_1 P(t) D(t) \cos(f,t) + a_1 \frac{C}{A}(t) D(t) \sin(f,t)$$

$$L2(t) = a_2 P(t) D(t) \cos(f,t)$$

siendo a_1 y a_2 las amplitudes de cada portadora y D(t) el mensaje de navegación.

Así, cada satélite emite de forma continua un *mensaje de navegación* a 50 $baudios = \frac{bits}{seg}$ sobre las dos ondas portadoras L1 y L2. El mensaje tiene una duración de 12,5 minutos con un contenido de 25 grupos (frames) cada uno con una longitud de 1500 bits, subdividido cada grupo en 5 subgrupos de 30 bits cada uno y cada subgrupo alberga 10 celdas (palabras) de 30 bits cada una. En cada una de las celdas, al inicio de la misma hay dos palabras que la caracterizan, la primera TLM (Telemetry) que es la que indica cuando está siendo incorporada información al satélite y la segunda HOW (Hand Over How) que es la que permite acceso al código P(Y) a usuarios autorizados.

Por otro lado, emite datos codificados en una *secuencia pseudoaleatoria*, generando una secuencia PRN en los códigos P y C/A que sirve para identificar el satélite, hora atómica, ...; secuencia generada por los LFSR (Tapped linear feedback shift register) mediante una cadena de valores binarios de 10 bits.

2.3.2.2.- Procesado de la señal.

Los satélites emiten señales que contienen tres componentes: $\left(L1, \frac{C}{A}, Mensaje\right), (L1, P, D), (L2, P, D)$ y los receptores de la señal han de ser capaces de reconstruir las diferentes componentes de la misma: reconstrucción de la portadora y códigos emitidos por el satélite. Los receptores captan esta señal a través de las antenas que convierte la señal electromagnética en señal eléctrica siendo fundamental que coincida el centro geométrico del receptor con el centro eléctrico, ya que esa través de donde se dan las coordenadas. Si ambos no coinciden la diferencia entre ambos se denomina excentricidad y para eliminar este error habrá que colocar la antena siempre con la misma orientación.

La antena va generalmente provista de un amplificador de forma que amplifica las señales de L1 y L2 y elimina las no necesarias.

Los datos recibidos se almacenan en el receptor, ya sea mediante tarjetas de memoria o cualquier otra forma utilizada normalmente, tratados convenientemente por el software del receptor.

Una vez que la señal ha sido recibida a través de la antena se discrimina mediante el código C/A. De esta forma se mezcla señales, por un lado la señal recibida y por otra una señal sinusoidal generada por el receptor. De esta forma, la frecuencia más baja obtenida es la frecuencia intermedia FI, que mantiene la fase y modulación de la recibida en alta frecuencia, denominada también portadora batida (beat frequency).

La medida de fase se realiza a través de dos métodos, uno la correlación de código siendo necesario conocer el código PRN de cada satélite y otro la cuadratura de la señal que no necesita conocer el PRN pero que al elevar la relación $\frac{señal}{ruido}$ complica el proceso.

2.3.3.- El camino de las ondas electromagnéticas a través de la atmósfera.

De forma resumida se puede decir que la velocidad de propagación de las ondas y su trayectoria dependen de la capa atmosférica que estén atravesando y de su frecuencia.

Las ondas electromagnéticas emitidas por los satélites artificiales tienen que pasar todas las capas expuestas en el apartado anterior y, por tanto, no se puede considerar un índice de refracción único y constante. De esta forma, los componentes de cada capa actúan de diferentes formas sobre cada longitud de onda. De todas las capas expuestas, la mayor influencia sobre la propagación de las ondas emitidas por los satélites GPS se experimenta en la troposfera y la ionosfera.

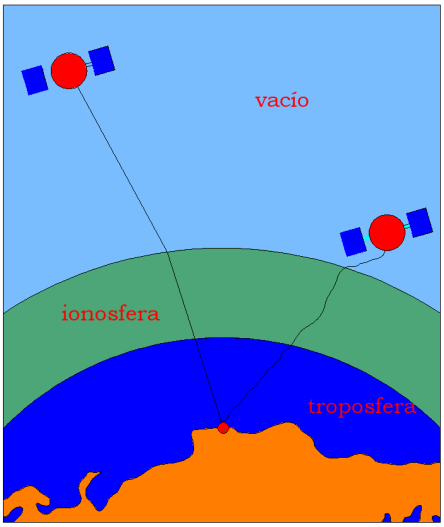


Imagen III.4.- Recorrido de las ondas desde el satélite hasta la superficie terrestre.

2.3.3.1.- El efecto troposférico.

La troposfera, capa en contacto con la corteza terrestre, tiene una composición de gases que hacen que sea un medio no dispersivo para las ondas de radio [$frecuencias \geq 15GHz$], significando que la propagación de las mismas no va a depender de la frecuencia. El efecto que produce se conoce como retardo troposférico y es debido a que esta atmósfera es neutral, es decir, no está ionizada. Su estimación se realiza únicamente a partir de modelos matemáticos, que tratándose de la capa en la que se dan todos los fenómenos meteorológicos, utilizan estas variables en ellos. Así, la humedad es la componente con mayor influencia hasta los 11 km. de altura y la temperatura seca hasta los 40 km.

Dado que la dinámica de las condiciones atmosféricas en muy compleja, el índice de refracción es muy difícil de modelar. En este sentido, los modelos matemáticos se basan en la toma de datos meteorológicos, como son temperatura seca, humedad relativa y presión atmosférica, dando lugar a diferentes formulaciones, desarrollándose a continuación los tres más utilizados: el modelo de Höpfield, el modelo de Saastamoinen y el modelo de Goad-Goodman.

A.- Modelo matemático de Höpfield.

Este modelo calcula la influencia del índice de refracción en dos componentes, una seca y una húmeda. Calcula la componente seca en función de la altura, haciendo la extrapolación del valor para la componente húmeda que es más complicada de determinar. Además, considera la oblicuidad de la señal respecto de la vertical del lugar del receptor.

De esta manera, Höpfield en el año 1969 formula para la componente seca en función de la altura, del siguiente modo:

$$N_{seco}^{Troposférico}(h) = N_{seco,0}^{Troposférico}\left(\frac{h_{seco}-h}{h_{seco}}\right)^4 \qquad [III.123]$$

donde:

h *es la altura a la que se pretende conocer el índice de refracción.*

h_{seco} *es la altura exterior del borde seco*

$$(\cong 40km) = 40.136 + 148{,}72(T - 273{,}16)[m] \qquad [III.124]$$

Como:

$$\Delta_{seco}^{Troposférico} = 10^{-6} \int N_{seco}^{Troposférico} ds_0 = 10^{-6} N_{seco}^{Troposférico} \int \left(\frac{h_{seco}-h}{h_{seco}}\right)^4 ds_0 \qquad \text{[III.125]}$$

Se puede simplificar al resolver la integral:

$$\Delta_{seco}^{Troposférico} = 10^{-6} N_{seco}^{Troposférico} \frac{1}{h_{seco}^4} \int_0^{h_{seco}} (h_{seco} - h)^4 dh$$

$$= 10^{-6} N_{seco}^{Troposférico} \frac{1}{h_{seco}^4} \left[-\frac{1}{5}(h_{seco} - h)^5\right]\Big|_{h=0}^{h=h_{seco}}$$

$$\Delta_{seco}^{Troposférico} = \frac{10^{-6}}{5} N_{seco,0}^{Troposférico} h_{seco} \qquad \text{[III.126]}$$

que equivale al retardo en la troposfera de la parte seca.

La parte húmeda es mucho más complicada de modelar y como se ha expuesto, Hopfield, aplica la misma fórmula que para la seca, llegando a la expresión:

$$\Delta_{húmeda}^{Troposférico} = \frac{10^{-6}}{5} N_{húmeda,0}^{Troposférico} h_{húmeda} \qquad \text{[III.127]}$$

que equivale al retardo en la troposfera de la parte húmeda, y por tanto, el retardo troposférico viene dado por:

$$\Delta^{Troposférico} = \frac{10^{-6}}{5} N_{seco,0}^{Troposférico} h_{seco} + \frac{10^{-6}}{5} N_{húmeda,0}^{Troposférico} h_{húmeda} \qquad \text{[III.128]}$$

A esta expresión falta incorporarle la corrección por oblicuidad de la señal, que se hace a través de las siguientes expresiones empíricas:

$$corrang_{seco}(\alpha) = \frac{1}{\sin\sqrt{\alpha^2+6{,}25}} \; ; \; corrang_{húmedo}(\alpha) = \frac{1}{\sin\sqrt{\alpha^2+2{,}25}} \qquad \text{[III.129]}$$

Quedando el retardo troposférico:

$$\Delta^{Troposférico} = \frac{10^{-6}}{5} N_{seco,0}^{Troposférico} h_{seco} corrang_{seco}(\alpha) + \frac{10^{-6}}{5} N_{húmeda,0}^{Troposférico} h_{húmeda} corrang_{húmedo}(\alpha) \qquad \text{[III.130]}$$

Y sustituyendo los valores numéricos expuestos anteriormente, se llega a:

$$\Delta_{seco}^{Troposférico}(\alpha) = \frac{(0{,}00230932\,T - 0{,}0075832)p}{T\sin\sqrt{\alpha^2+6{,}25}} \qquad \text{[III.131]}$$

$$\Delta_{húmedo}^{Troposférico}(\alpha) = \frac{(-0{,}028512\,T + 817{,}96)e}{T^2\sin\sqrt{\alpha^2+2{,}25}} \qquad \text{[III.132]}$$

Además de lo anterior Höpfield obtuvo un procedimiento modificado que realizó a partir de este procedimiento con la variante de tener en cuenta por un lado la longitud del rayo en función de la altitud de observación y por otro la distancia cenital de este rayo.

$$N_{seco}^{Troposférico}(r) = N_{seco,0}^{Troposférico} \left(\frac{r_{seco}-r_h}{r_{seco}-r_{tierra}}\right)^4 \qquad \text{[III.133]}$$

B.- Modelo matemático de Saastamoinen.

Este modelo trata de deducir el retardo a partir de la siguiente expresión, en que éste está expresado en metros:

$$\Delta^{Troposférico} = \frac{0.002277}{\cos z}\left[p + \left(\frac{1255}{T} + 0.05\right)e - \tan^2 z\right] \qquad \text{[III.134]}$$

donde:

z *es el ángulo cenital del satélite.*

p *es la presión atmosférica en mb.*

T *es la temperatura en* $^{\circ}K$.

e *es la presión parcial de vapor en mb.*

Posteriormente, el mismo autor perfecciona el modelo introduciendo dos coeficientes correctores, y quedando la expresión del siguiente modo:

$$\Delta^{Troposférico} = \frac{0.002277}{\cos z}\left[p + \left(\frac{1255}{T} + 0.05\right)e - B\tan^2 z\right] + \delta R \qquad \text{[III.135]}$$

obedeciendo los términos B y δR a los valores obtenidos de estas tablas, dadas por el mismo autor:

Altura (km)	B (mb)
0,0	1,156
0,5	1,079
1,0	1,006
1,5	0,938
2,0	0,874
2,5	0,813
3,0	0,757
4,0	0,654
5,0	0,563

Tabla III.2.- Corrección del término B para el modelo de Saastamoinen refinado.

Angulo cenital	Altura de la estación por encima del nivel del mar (km)							
	0,0	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0
60°00'	0,003	0,003	0,002	0,002	0,002	0,002	0,001	0,001
66°00'	0,006	0,006	0,005	0,005	0,004	0,003	0,003	0,002
70°00'	0,012	0,011	0,01	0,009	0,008	0,006	0,005	0,004
73°00'	0,02	0,018	0,017	0,015	0,013	0,011	0,009	0,007
75°00'	0,031	0,028	0,025	0,023	0,021	0,017	0,014	0,011
76°00'	0,039	0,035	0,032	0,029	0,026	0,021	0,017	0,014
77°00'	0,05	0,045	0,041	0,037	0,033	0,027	0,022	0,018
78°00'	0,065	0,059	0,054	0,049	0,044	0,036	0,03	0,024
78°30'	0,075	0,068	0,062	0,056	0,051	0,042	0,034	0,028
79°00'	0,087	0,079	0,072	0,065	0,059	0,049	0,04	0,033
79°30'	0,102	0,093	0,085	0,077	0,07	0,058	0,047	0,039
79°45'	0,111	0,101	0,092	0,083	0,076	0,063	0,052	0,043
80°00'	0,121	0,11	0,1	0,091	0,083	0,068	0,056	0,047

Tabla III.3.- Corrección del término δR para el modelo de Saastamoinen refinado.

C.- Modelo de Goad-Goodman.

Este modelo se encuentra descrito en [LEICK-04], proporcionando el valor de la corrección debida al retardo troposférico expresado en metros:

$$\Delta r = 10^3\left[N_1 \sum_{j=1}^{9} R_1^j \frac{\alpha_{j1}}{j} + N_2 \sum_{j=1}^{9} \frac{\alpha_{j2}}{j}\right] \qquad \text{[III.136]}$$

donde:

$$N_1 = \frac{77.624\ 10^{-6} p_s}{t_k}\left(\frac{h_d - h_k}{h_d}\right)^4$$

$$N_1 = \frac{\frac{0.3719}{t_k} - 12.92\ 10^{-6}}{t_k} e_s \left(\frac{h_d - h_k}{h_d}\right)^4$$

$$p_s = p\left(\frac{t_k}{t_v}\right)^{e_m}$$

$$t_k = T + 6.5h_t$$

$$t_e = T + 6.5\left(h_t - h_p\right)$$

$$e_s = e_o\left(\frac{t_k}{x}\right)^{4e_m}$$

$$e_m = 5.2459587$$

$$e_o = 0.0611\ h\ 10^{\frac{7.5(x-273.15)}{273.3+x-273.15}}$$

$$x = T - 6.5\left(h_h - h_p\right)$$

$$a_e = 63781.137$$

$$h_d = \frac{1.1385\ 10^{-5} t_k}{77.624\ 10^{-6} p_s}$$

$$h_w = 1.1385\ 10^{-5}\ \frac{\left(\frac{1255}{t_k} + 0.05\right) t_k}{77.624\ 10^{-6} p_s}$$

$$R_i = \sqrt{(a_e + h_i)^2 - (a_e + h_k)^2 \cos^2\beta - (a_e + h_k)\sin\beta}$$

$$\alpha_{1i} = 1;\ \alpha_{2i} = 4a_i;\ \alpha_{3i} = 6a_i^2 + 4b_i;\ \alpha_{4i} = 4a_i(a_i^2 + 3b_i)$$

$$\alpha_{5i} = a_i^4 + 12a_i^2 b_i + 6b_i^2;\ \alpha_{6i} = 4a_i b_i(a_i^2 + 3b_i);\ \alpha_{7i} = b_i^2(6a_i^2 + 4b_i)$$

$$\alpha_{8i} = 4a_i b_i^3;\ \alpha_{8i} = b_i^4$$

$$a_i = -\left(\frac{\sin\beta}{h_i - h_k}\right);\ b_i = -\frac{1}{2a_e}\frac{\cos^2\beta}{(h_i - h_k)}$$

siendo:

p *es la presión en mb para el punto de medida.*

T *es la temperatura en grados Kelvin.*

h_k *es la altura de la estación en kilómetros.*

h_p *es la altura para el punto de presión media en kilómetros.*

h_i *es la altura para el punto de temperatura media en kilómetros.*

h_h *es la altura para el punto de humedad media en kilómetros.*

h *es la humedad* (%)*a la altura* h_h.

β *es el ángulo de elevación* (*altura*).

2.3.3.2.- El efecto ionósférico.

La ionosfera manifiesta su influjo en las ondas de radio de dos formas bien diferenciadas: en primer lugar, dado que en función del grado de ionización del medio varía el índice de refracción, se produce en mayor o menor medida una curvatura en la trayectoria que se denomina curvatura por refracción. En segundo lugar, el campo eléctrico producido al paso del tren de ondas de radio provoca en los electrones libres

un movimiento y, por lo tanto, un aporte de energía por parte de la onda, produciéndose un fenómeno denominado de absorción. La densidad molecular es mayor en la subcapa D y en las partes bajas de la E y F, zonas en las que esta absorción será máxima.

La influencia de la ionosfera (retardo ionosférico) tiene la forma:

$$Retardo_{ionosférico} = f\left(\frac{k}{frecuencia^2}\right) \qquad \text{[III.137]}$$

por lo que las frecuencias más bajas serán las que más se vean afectadas por este fenómeno. En [SEEBE-93] se expone este fenómeno a partir del desarrollo en serie del coeficiente de refracción de fase, del siguiente modo:

$$n_{ionosfera} = 1 + \frac{c_2}{f^2} + \frac{c_3}{f^3} + \frac{c_4}{f^4} + \cdots \cong 1 + \frac{c_2}{f^2} = 1 - \frac{40.3\rho_{e^-}}{f^2}$$

$$dn_{ionosfera} = -\frac{2c_2}{f^3}df$$

Del mismo autor se llega a la siguiente equivalencia matemática:

$$n_{grupo} = n_{fase} + f\frac{dn_{fase}}{df}$$

Con lo que:

$$n_{grupo} = 1 - \frac{c_2}{f^2} = 1 + \frac{40.3\rho_{e^-}}{f^2}$$

$$R_{ionosférico} = \frac{c_2}{f^2} = -\frac{40.3\rho_{e^-}}{f^2} = -1.34\ 10^{-7}\frac{\rho_{e^-}}{f^2} \qquad \text{[III.138]}$$

donde:

$R_{ionosférico}$ *es el retardo que se obtiene en segundos.*

F *es la frecuencia en* Hz.

ρ_{e^-} *es la densidad de electrones* $\left(\frac{e^-}{m^3}\right)$

La densidad de electrones es función de múltiples factores, unos dependientes del astro solar (ciclo de manchas solares, flujo solar ionizante, potencial magnético), y por otro lado de diferentes aspectos físicos (ángulo de elevación del satélite, hora de observación, ubicación, estación del año), siendo mucho más estables todos estos aspectos influyentes durante la noche, estimándose una reducción de su efecto en un 30% durante este periodo.

La propagación de las ondas en la ionosfera es función del contenido total de electrones, TEC (Total Electron Content), que representa el número total de electrones contenidos en un cilindro de $1\ m^2$ de sección recta, que va desde el satélite al receptor, pudiéndose expresar como:

$$TEC = \int_{Satélite}^{Receptor} \rho_{e^-}(a)\ dA \qquad \text{[III.139]}$$

Definiéndose además el contenido total vertical de electrones, VTEC (Vertical Total Electron Content):

$$VTEC = \frac{TEC}{\cos z},$$

siendo la unidad el TECU = $1 * 10^{16}\frac{e^-}{m^2}$, donde z es el ángulo cenital del satélite.

De esta forma, el retardo ionosférico puede estimarse en función del tipo de receptor, de dos modos: para receptores monofrecuencia o de doble frecuencia. En los primeros a través de modelos matemáticos que suponen un TEC uniforme, y en los segundos a partir del retardo de cada una de las frecuencias, pudiéndose establecer para el caso del GPS con las portadoras L1 y L2 de la siguiente manera:

$$R_{ionosférico(L1)} = -1.34\ 10^{-7}\frac{\rho_{e^-}}{f_{L1}^2} \qquad \text{[III.140]}$$

$$R_{ionosférico(L2)} = -1.34\ 10^{-7}\frac{\rho_{e^-}}{f_{L2}^2} \qquad \text{[III.141]}$$

Restando la primera de la segunda:

$$R_{ionosférico(L1)} - R_{ionosférico(L2)} = -1.34\ 10^{-7}\left(\frac{\rho_{e^-}}{f_{L1}^2} - \frac{\rho_{e^-}}{f_{L2}^2}\right)$$

Y despejando el término de la densidad de electrones:

$$\rho_{e^-} = \frac{R_{ionosférico(L1)} - R_{ionosférico(L2)}}{-1.34\ 10^{-7}}\left(\frac{f_{L1}^2 f_{L2}^2}{f_{L2}^2 - f_{L1}^2}\right) \qquad \text{[III.142]}$$

La diferencia de retardos, $R_{\text{ionosférico (L1)}}$,-$R_{\text{ionosférico(L2)}}$, es un valor conocido, con lo cual se puede determinar la densidad de electrones, ρ_{e^-} y por ende el retardo inosférico, ya que la frecuencia es fija.

El error resultante debido al retardo ionosférico depende en gran medida de la longitud de las líneas base realizadas, pudiéndose hacer la siguiente clasificación:

- Líneas base < 10 km ⇒ $\varepsilon_{R_{ionosférico}}\ máx = 1\ cm$ con receptor una frecuencia.
- Líneas base [10 – 100 km] ⇒ $\varepsilon_{R_{ionosférico}}\ máx = 1 - 2\ ppm$ con receptor una frecuencia.
- Líneas base > 100 km ⇒ $\varepsilon_{R_{ionosférico}}\ máx = 1\ ppm$ con receptor doble frecuencia.

La justificación a este fenómeno se encuentra en la variación ionosférica en función del lugar de la tierra, por lo que resulta aconsejable limitar la longitud de las líneas base. En los receptores monofrecuencia, los modelos matemáticos utilizados para determinar este retardo ionosférico son los de Klobuchar, Delikaraoglou y Georgiadou.

A.- Modelo matemático de Klobuchar.

Este modelo matemático reproduce la variación diaria de la ionosfera mediante una función cosenoidal, [HOFMA-01], por lo que igualmente representa el retardo ionosférico. Se modula la amplitud y periodo en función de la localización de la estación, y lo modela mediante polinomios de tercer grado en el que sus coeficientes se transmiten dentro del mensaje de navegación.

Los coeficientes muestran la actividad solar modelada en un periodo de diez años, actualizándose cada diez días en el mensaje de información del satélite, salvo casos excepcionales de la actividad solar, donde la frecuencia sería mayor. Estos coeficientes dependen de la localización del usuario y de los ángulos de elevación y acimut del satélite así como del instante (hora) de medida.

El modelo se alimenta fundamentalmente de cuatro parámetros:

- La constante nocturna de tiempo. Se considera que tiene un valor constante $d_c = 5\ nseg$.
- La amplitud
- El periodo del coseno, con valor superior a las 24 horas.
- La fase que es constante a las 14:00 del tiempo local.

Todo el desarrollo del algoritmo de cálculo se desarrolla en los siguientes apartados de forma similar al presentado por [LEICK-04].

A.1.- Cálculo del ángulo geocéntrico terrestre.

El cálculo del contenido de electrones se realiza en el punto de entrada del rayo en la ionosfera, que se supone a $350\,kilómetros$ de altura, en vez de en la posición del observador. El ángulo de entrada en la ionosfera con respecto al sistema GPS se calcula conforme a la siguiente expresión:

$$\psi(ud.\,de\ semicírculo) = \frac{0{,}0137}{E_1+0{,}11} - 0{,}22 \qquad \text{[III.143]}$$

donde:

E_1 *es el ángulo de elevación local del satélite*

En esta expresión se comete un error menor a $0{,}2^0\ para\ E_1 > 10^0$.

A.2.- Cálculo de las coordenadas de la atmósfera media.

Posteriormente es necesario calcular las coordenadas en las que la radiación entra en la atmósfera según los datos anteriores supuestos en el cálculo. Para ello se utilizan las siguientes expresiones:

- Latitud ionosférica:

$$\varphi_i = \varphi_g + \psi \cos A \qquad \text{[III.144]}$$

donde φ_i toma los siguientes valores:

$\varphi_i = 0{,}416\ si\ [\varphi_i > 0{,}416\ ]$ ó $si\ [\varphi_i < -0{,}416\ ]$

Valor que se da en el caso de que la latitud sea mayor a 75^0, justificada en que el uso del GPS en latitudes mayores no es esperable a parte de que la actividad del TEC es muy pequeña, de este modo el retraso ionosférico no se modeliza para latitudes elevadas. La consecuencia es lo expresado por diferentes autores, como Murphy, Orpen o Georgiadou, donde los receptores con una frecuencia obtienen un resultados deficientes en observaciones GPS en estas zonas.

- Longitud ionosférica:

$$\lambda_i = \lambda_g + \frac{\psi \sin A}{\cos \varphi_g} \qquad \text{[III.145]}$$

donde:

A *es el acimut.*

φ_g *es la latitud geodésica.*

λ_g *es la longitud geodésica.*

A.3.- Conversión de latitud geodésica a geomagnética.

Se ha comprobado que la latitud geomagnética representa el retraso inosférico de una forma más eficiente que la latitud geodésica, por lo que el cambio de una a otra se realiza a partir de:

$$\varphi_{gm} = \varphi_i + 0{,}064(\cos \lambda_i - 1{,}617) \qquad \text{[III.146]}$$

El error obtenido mediante esta expresión es:

$menor\ a\ 1^o\ \ para\ latitudes\ menores\ a\ 40^o$

$(1^o - 2^o)\ \ para\ latitudes\ menores\ a\ 65^o$

A.4.- Se emplea la hora local para establecer el valor máximo del retraso.

A partir de la hora GPS se obtiene:

$$t = 4{,}32\ 10^4 \lambda_i + T_{GPS} \qquad \text{[III.147]}$$

donde el valor de t toma el siguiente valor:

$$si\ \ t > 0\ \ \Rightarrow\ t = t - 86400$$

$$si\ \ t < 0\ \ \Rightarrow\ \ t = t + 86400$$

A.5.- Cálculo del factor de elevación.

El retraso ionosférico vertical se debe reducir a la señal observada, para lo que se debe multiplicar por la secante del ángulo cenital en la ionosfera que se haya considerado. El cálculo se realiza a partir de la siguiente expresión:

$$L = 1{,}0 + 16(0{,}53 - E_l)^3 \qquad \text{[III.148]}$$

A.6.- Cálculo del retraso ionosférico total.

El retraso ionosférico total se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$T_{ionosférico} = L\left[5\ 10^{-9} + \sum_{i=0}^{i=3} \alpha_i \varphi_{gm}^n\right]\left(1 - \frac{x^2}{2} + \frac{x^4}{24}\right) \qquad \text{[III.149]}$$

donde:

$$x = \frac{2\pi(t-50400)}{\sum_{i=0}^{3} \beta_i \varphi_{gm}^i} \qquad \text{[III.150]}$$

siendo

$$\alpha_i\ y\ \beta_i\ para\ i = [0, \dots, 8]\ los\ parámetros\ radiofundidos\ en\ el\ mensaje$$

La corrección del error ionosférico con este modelo llega al 50% y que por tanto es insuficiente para observaciones GPS cuando éstas superan los $20 - 30\ kilómetros$.

B.- Modelo de Delikaraoglou.

Este modelo se fundamente en que los parámetros para la corrección inosférica se evalúen y transmitan desde las estaciones GPS de referencia, estaciones con receptores de doble frecuencia, hasta los usuarios con receptores monofrecuencia situados en el entorno de las estaciones. De este modo al utilizar estos parámetros en ambos receptores, fijo y móvil, se consiguen mejoras en el cálculo de las líneas observadas incluso en zonas de altitudes elevadas, donde se ha visto que era más problemático, así como en épocas de actividad ionosférica elevada.

El modelo se basa en que en el caso de no emplear ningún modelo atmosférico, el ajuste de las observaciones reparte el efecto ionosférico entre las magnitudes calculadas, es decir, las coordenadas de la estación y las ambigüedades (utilizando las ecuaciones de dobles diferencias en el cálculo).

Dicho efecto queda grabado en los residuos para cada época media media, efecto que puede descomponerse en una componente constante y otra variable, sujetas a una cierta regularidad estadística.

De esta forma la parte constante se puede representar mediante una función determinista y la variable mediante un modelo estocástico, modelo que se fundamenta en los datos preexistentes y suponiendo que el retraso ionosférico se mantiene dentro de unos límites con un cierto nivel de confianza.

De este modo, denominando el retraso ionosférico como $I_{receptor}^{satélite}$, retraso medido en una época n, se puede descomponer en dos partes tal y como sigue:

$$\delta\varphi_i = u_i + x_i\ ;\ \ i = 1, \dots, n \qquad \text{[III.151]}$$

El valor u_i al ser un valor determinista, se obtendrá a partir de una estimación de parámetros y por tanto simple de resolver.

En cuanto a x_i, se utilizan procesos de cálculo autorregresivos, obteniéndose:

$$x_i = -\sum_{j=1}^{p} a_j x_{ij} + w_i \qquad \text{[III.152]}$$

de forma que cada elemento x_i se formula como valor ponderado de $p - componentes$ anteriores más la componente de ruido, obteniendo el valor de p a partir de:

$$FPE(p) = \sigma_p^2 \frac{n+p+1}{n-p-1} \qquad \text{[III.153]}$$

donde:

$FPE(p)$ *es el error previsto final*

σ_p^2 *toma el valor de la función de n y p*

C.- Modelo de Georgiadou.

Este modelo, para receptores de una frecuencia, precisa de la determinación mediante receptores de dos frecuencias de un parámetro de una manera semejante al modelo anteriormente expuesto.

Parte de la hipótesis de que el contenido total de electrones a lo largo de la trayectoria es inversamente proporcional al coseno del ángulo cenital:

$$TEC_i^j = \frac{VEC}{\cos z_i^j} \qquad \text{[III.154]}$$

donde:

VEC *es el contenido de electrones en la vertical.*

Del mismo modo, el retardo ionosférico lo relaciona con el TEC a partir de la ecuación:

$$dI_i^j = 40{,}3 \frac{TEC_i^j}{f_r^2} \qquad \text{[III.155]}$$

Definiendo el retraso vertical ionosférico a partir de las expresiones anteriores y que si se expresa en metros respondería a:

$$dV = 40{,}3 \frac{VEC}{f_r^2} \qquad \text{[III.156]}$$

Expresando el retraso ionosférico en función de la línea base, de la elevación y del acimut del satélite, así como de la altitud de la capa ionosférica, se llega a:

$$dI_i^j = dv \cdot L_{ik} \frac{R}{(R+H)^2} \frac{\sin E^j \cos E^j}{(\cos z^j)^3} \left[1 + \frac{R}{E_g \sin E^j} + \left(\frac{R}{r_g \sin E^j}\right)^2\right] \qquad \text{[III.157]}$$

donde:

E^j *es la media de los ángulos de elevación del satélite* j *en las estaciones* i *y* k

r_g *es la distancia geocéntrica al satélite* j.

L_{ik} *es la componente horizontal de la línea base, en un plano vertical local que contiene al receptor* i, k *y al satélite*

z^j *se definie a partir de*: $\sin z^j = R(R+H)^{-1} \cos E^j$

El efecto producido sobre la línea base por el retardo ionosférico es a hacerla más corta, cuantificando esta magnitud como:

$$dL_{ik} = dI_{ik}^j \cos E_i^j \qquad \text{[III.158]}$$

En este método, el único parámetro conocido es dv que se conoce a lo largo de la trayectoria seguida por la señal, siendo lo más habitual utilizar un receptor de doble frecuencia situado en la zona de trabajo, evaluando este valor a partir de:

$$dv = \cos z_i^j \left[\frac{f_{r2}^2}{f_{r1}^2 - f_{r2}^2} \left(\lambda\varphi_i^j\right)_{L2} - \left(\lambda\varphi_i^j\right)_{L1} - C_p^* \right] \qquad \text{[III.159]}$$

donde:

C_p^* *es un parámetro obtenido mediante un ajuste por mínimos cuadrados.*

3.- FUNDAMENTOS DE LA OBSERVACIÓN MEDIANTE GPS.

3.1.- INTRODUCCIÓN.

El sistema GPS no es el único sistema de navegación y, por lo tanto, el conjunto de ellos se engloba dentro de los sistemas GNSS, Global Navigation Satellite System**.**

El sistema comenzó su desarrollo en el año 1973 cuando el ejército estadounidense decide crear el programa DNSS, sistema satelital de navegación de defensa. El programa DNSS, posteriormente se denominó programa NAVSTAR, nombre que se le dio a la constelación de satélites, 24 en total, con el objeto de conocer la posición en cualquier lugar de la tierra las 24 horas del día e independientemente de la climatología existente, aspectos novedosos hasta ese momento.

Este sistema nace inicialmente con fines militares, aunque pronto se vio sus ventajas en el mundo civil, principalmente en la navegación y en la topografía con múltiples aplicaciones. Sin embargo, esta propiedad militar hace que no sea oficialmente operativo y que su emisión pueda modificarse en cualquier momento afectando a la precisión. Estos 24 satélites, 3 de ellos de reserva, responden a esta necesidad, si bien, cabe decir que la precisión obtenida sobre la posición va a depender del receptor así como la técnica utilizada y esta irá en función de la precisión requerida según el uso, como puede ser entre otros, senderismo donde puede ser suficiente una precisión de 10-15 metros, navegación marítima donde con 5 metros de precisión puede ser suficiente o trabajos topográficos donde puede ser necesario precesiones subcentimétricas.

Para el estudio del sistema GPS, diferentes autores, entre ellos [FERRE-91], diferencian tres segmentos: el segmento espacial, el segmento de control y el segmento usuarios.

El segmento espacial recoge todo lo referente a los satélites, éstos se encuentran situados a una altura orbital media de 20.180 km sobre seis planos orbitales circulares con una inclinación de 55º, diseñado de forma que se garantiza que siempre haya al menos 4 satélites por encima de los 15º en cualquier punto de la corteza terrestre durante todo el día.

El segmento de control establece los mecanismos para controlar el sistema, todo lo referente a la señal emitida por lo satélites, así como toda la información contenida en sus portadoras L1 y L2, y tiene el objeto de observar y controlar la constelación de satélites así como establecer el sistema de tiempo GPS, calcular la efemérides de cada satélite así como actualizar su mensaje. Todo esto se hace desde cinco estaciones que en el siguiente apartado se desarrollará.

El segmento usuario abarca todo el estudio de los receptores de la señal en la superficie, que de forma general se pueden dividir en receptores monofrecuencia y en receptores de doble frecuencia.

El sistema GPS, hoy no es el único sistema de navegación, poniendo Rusia a disposición el sistema GLONASS y la Unión Europea el reciente sistema GALILEO. Por tanto estos sistemas, de forma general adoptan nuevas siglas como sistema, GNSS, Global Navigation Satellite System.

3.2.- LA ESTRUCTURA DEL SISTEMA GPS.

3.2.1.- El segmento espacial.

La constelación NAVSTAR, completa desde el mes de marzo de 1994, está compuesta por los 24 satélites mencionados, contenidos en seis planos orbitales, cada uno de ellos con cuatro satélites a una altitud media de 20.180 km (semieje mayor aproximadamente 26.500 km). Las órbitas se distribuyen uniformemente en el ecuador, con una inclinación de 55º. Según la tercera ley de Kepler, $\frac{T^2}{L^3} = constante$, el periodo de revolución del satélite es de 12 horas sidéreas, lo que implica dado el

reparto uniforme, que la posición de los satélites se repite cada día civil salvo los $3^{min}56^{seg}$ de adelanto y por tanto en cualquier punto serán visibles en cualquier momento entre 6 y 11 satélites. La identificación de los satélites se realizar mediante una letra, [A,B,C,D,E,F] que se refiere a los planos orbitales, y un número [1,2,3,4] que indica la posición del satélite en cada una de las órbitas.

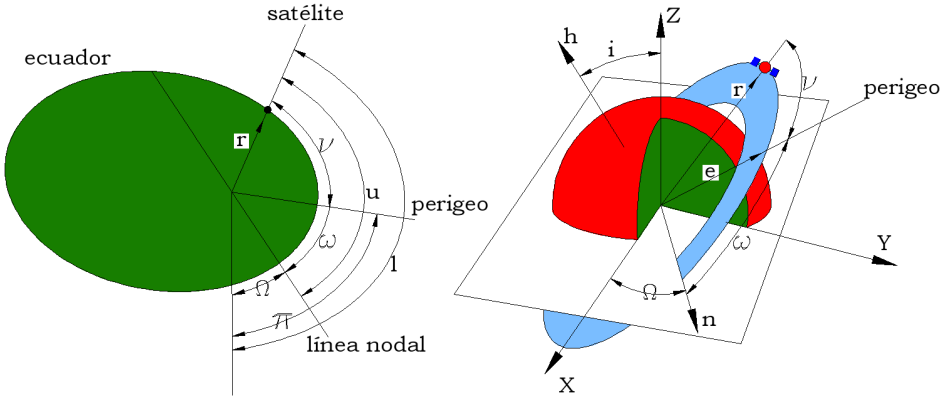


Figura III.29.- Distribución de los satélites en las orbitas.

La posición del satélite en el plano orbital viene definida por: $u = \omega + \nu$

Al igual que con los astros, existe un fenómeno inusual pero real, y son los eclipses, cuando el satélite está en la sombra de la Tierra, es decir que ésta evita que le llegue al satélite la luz del sol, ocurre dos veces al año, y tiene importancia en el cálculo de la posición y transmisión de efemérides, ya que los satélites dejan de recibir luz solar para sus placas con la consecuencia de un gasto extraordinario de batería que incluso puede dejarles inoperativos. De este modo se pueden ver alterados los modelos de las órbitas calculadas y se puede perder precisión en la determinación de la posición.

Los satélites de la constelación NAVSTAR pertenecen actualmente a seis generaciones diferentes, conocidas como: Bloque I que fue experimental, Bloque II/IIa de los que tan solo quedan operativos siete unidades, el Bloque IIR/IIRM que son los de renovación y reposición de satélites y los últimos lanzados que son los del Bloque IIF.

Las principales características de los satélites se pueden resumir en la tabla siguiente [PEREZ-96]:

Características	Bloque I	Bloque II	Bloque IIA
PESO	845 kg	1500 kg	2000 kg
PANELES SOLARES	7,5 m2	7,5 m2	7,5 m2
OSCILADOR	Cuarzo	Rubidio/Cesio	Hidrógeno
ALTITUD	20180 km	20180 km	20180 km
VELOCIDAD	4 km/seg	4 km/seg	4 km/seg
INCLINACIÓN ORBITA	63º	55º	55º
PERIODO REVOLUCIÓN	12 h sidéreas	12 h sidéreas	12 h sidéreas
ORIENTACIÓN	volantes de inercia	volantes de inercia	volantes de inercia
VIDA MEDIA PREVISTA	4,5 años	7,5 años	10 años
PRECIO	-	50 M$	75 M$
FABRICANTE	-	Rockwell Int.	G.E.

Tabla III.4.- Características fundamentales de los satélites.

La identificación de cada uno de los satélites se realiza a partir de un código que puede obtenerse de diferentes formas:

- Número NAVSTAR, corresponde al orden de lanzamiento del satélite.
- Órbita y posición: [A,B,C,D,E,F] -[1,2,3,4]; ejemplo C3

- Número del catálogo de la NASA, código de 5 cifras.
- Número IRON asignado por el ejército americano
- Código PRN (Pseudo Random Noise).



Imagen III.5.- Aspecto exterior de un satélite.

Los elementos principales del satélite son los paneles solares de unos 7,5 m^2, encargados de recargar las baterías y dar energía al conjunto, los osciladores, las antenas direccionales, el emisor de señales electromagnéticas en la banda L y el receptor de señales en la banda S. Estas antenas se orientan con el mástil de navegación que lo hace en sentido opuesto al geocentro.

En el apartado (Cap. III – Apdo.[2.3.2]), se ha explicado la transmisión y contenido de la señal del satélite, basada en una frecuencia fundamental obtenida a partir de los osciladores (10.23Mhz) y que está incluida en la banda L con un valor de 10.23Mhz. A partir de esta frecuencia fundamental se generan dos señales L1 y L2 resultado de multiplicarla por 154 y 120 respectivamente:

$$L1: 154*10.23Mhz=1575.42Mhz \rightarrow \lambda=19.05 \text{ cm.}$$

$$L2: 120*10.23Mhz=1227.60Mhz \rightarrow \lambda=24.45 \text{ cm.}$$

Cada satélite emite en ambas portadoras L1, L2, modulándose la siguiente información:

- Código C/A (coarse acquisition), conocido igualmente por código S, tiene por objeto el posicionamiento estándar SPS (estándar positioning service) con precisiones decamétricas. Se modula sobre la portadora L1.
- Código P (precise code), utilizado para el posicionamiento absoluto de precisión PPS (precise positioning service) y reservado para usuarios autorizados. Se modula sobre las dos portadoras L1 y L2 con un código encriptado W que genera un código Y que solo es accesible para estos usuarios autorizados.

  El acceso a los códigos P se hace a través de dos métodos, el de Disponibilidad Selectiva (SA) y el de Anti-Spooting (A-S), que lo que hace es descifrar el código encriptado Y obteniendo directamente el código P y por lo tanto la máxima precisión posible.

  A cada satélite se le asigna unívocamente una porción de una semana de duración, que se repite cada semana a las 0:00 horas (UT) entre el sábado y el domingo. El algoritmo de generación de este código puede encontrarse en [FERRE-91].
- Mensaje de navegación, enviado a 50 bites por segundo y repetido cada 30 segundos, proporciona información sobre las efemérides, estado del satélite, etc.

3.2.2.- El segmento control.

El segmento de control está encargado de rastrear los satélites de la constelación NAVSTAR, de forma que se pueda actualizar su posición orbital así como calibrar y sincronizar sus relojes atómicos. De esta forma, se puede determinar la posición de cada satélite y así hacer una estimación certera de la trayectoria que va a seguir en las 24 horas siguientes, información toda ella que se envía al satélite para que la emisión del satélite y que el receptor capta, sea información actualizada y veraz.

El segmento de control está, con este fin, compuesto por una estación de control maestra, cinco estaciones de control maestro y estaciones de control de tierra (antenas de tierra), todas ellas con coordenadas conocidas con una precisión extrema, situadas por métodos SLR y VLBI.

Las señales satelitales se captan en las cinco estaciones monitoras de Diego García, Colorado Springs, Kwajalein, Archipiélago de Ascensión, Hawaii, equipadas con receptores de código P y precisos relojes atómicos, calculando pseudistancias cada 1,5 segundos corrigiendo efectos atmosféricos y meteorológicos con los modelos anteriormente expuestos. Todo esto se envía a la estación de control maestra, Colorado Springs- Base Falcon Air Force, donde se analizan posibles errores. De aquí se envían a las cuatro estaciones de control de tierra, Ascensión, Kwajalein y Diego García, desde donde se envían de nuevo a los satélites a través de la banda S del espectro.

3.2.3.- El segmento usuario.

Con todo lo visto hasta ahora, se puede extraer que hay dos tipos de usuarios, los militares y los civiles. En los primeros su uso abarca la incorporación en todos los medios militares incluso sistemas personales en la infantería y en los segundos se pueden dividir en usuario con uso de navegación y en usuarios con fines geodésicos y topográficos. Ahora bien, siendo una propiedad militar, el uso civil es responsabilidad exclusiva del usuario.

Los receptores es el instrumento utilizado en tierra para captar las señales de los satélites por los usuarios y poder determinar las coordenadas del punto en el que se encuentre así como la hora (tiempo con precisión de oscilador atómico). Hay dos tipos de receptores, los que permiten calcular coordenadas en tiempo real y los que proporciona datos para procesarlos posteriormente.

En cuanto a los receptores, se ha realizado anteriormente otra clasificación entre receptores monofrecuencia y de doble frecuencia.

Su esquema físico es una antena que transforma la señal electromagnética en corriente eléctrica, habiendo antenas de varios tipos (dipolo, dipolo curvado, cónica espira, plana, helicoidal, ...), el receptor que procesa esta señal eléctrica de forma que da la información adecuada para posicionar el aparato y los elementos auxiliares de medida.

3.3.- OBSERVABLES GPS.

3.3.1.- Introducción.

Con todo lo expuesto hasta ahora, se podría hacer un resumen funcional de lo que se obtiene del sistema GPS. El sistema calcula las distancias, en un momento determinado, desde unos puntos "fijos" (satélites) hasta otro punto que es donde está ubicado el receptor, cálculo realizado por multilateración, ya sea en tiempo real o posteriormente en posproceso. Esto lo hace a través de dos métodos a partir de cuatro observables, pseudodistancias y medida de fase (diferencia de fase).

3.3.2.- La cuenta Doppler.

Existe otro método que queda fuera del ámbito GPS pero que merece la pena recordar, la cuenta Doppler, basada en el efecto doppler, que define el aparente cambio en la

frecuencia de una onda producida por el movimiento relativo de la fuente respecto a su observador. Un ejemplo cotidiano de este efecto, es el sonido que percibimos de la sirena de una ambulancia, siendo este mucho más grave a medida que se va acercando al observador.

Aplicado a los satélites, la frecuencia de recepción varía en función de la velocidad con la que el satélite se acerca o aleja del observador GPS. Esta técnica es la comúnmente utilizada y conocida en el sistema TRANSIT, con una desventaja en el sistema GPS ya que los satélites de su sistema son mucho más lentos (periodo de 12 horas en el GPS frente a 2 horas en el TRANSIT) y en una órbita mucho más alta (20.000 km en GPS frente a 1.000 km en TRANSIT), con lo que la variación de distancia en el tiempo es mucho más lenta.

Este método por tanto, aún no siendo el utilizado habitualmente en GPS, puede utilizarse para un posicionamiento rápido y poco preciso (>100 m).

Una vez recibida y procesada la señal GPS, es posible determinar la posición del receptor utilizando varias técnicas nacidas a partir de cuatro observables, siendo los dos primeros los fundamentales, por lo que se estudiarán detalladamente:

- Pseudodistancias a partir de la recepción del código y diferencia de fase o medida de fase a partir de la modulación de la portadora.
- Diferencias de pseudodistancias a partir de la modulación de la cuenta doppler y diferencia en el tiempo de viaje de la señal a partir de medidas interferométricas.

3.3.3.- Método de medida de pseudodistancias.

El método de medida por el método de pseudodistancias es una multilateriación rigurosa en el espacio, donde el punto del observador es el punto de intersección de las esferas medias generadas desde el centro del satélite, punto de coordenadas conocidas, y radio la distancia media al observador.

El cálculo de la pseudodistancia se hace a partir de calcular el tiempo que tarda en llegar la señal emitida por el satélite hasta el receptor, Δt.

$$espacio = velocidad * tiempo$$

$$d_{satélite}^{receptor} = c\,\Delta t$$

donde:

c *es la velocidad de la radiación en el vacío.*

La distancia obtenida de este modo es una distancia aproximada, ya que la realidad es que la velocidad no es la del vacío, ya que está sometida a todos los efectos expuestos en (Cap. III – Apdo.[2.3]), y que se cuantificarán en los apartados siguientes.

El observable en este método es el tiempo y se deduce en el receptor al ver el tiempo que tardar en correlar una réplica del código recibido del satélite, así, es el propio receptor el que genera la réplica y le aplica un retardo hasta que estén sincronizadas determinando entonces el tiempo buscado. La diferencia es el tiempo que la señal ha tardado en recorrer el camino entre el satélite y el receptor:

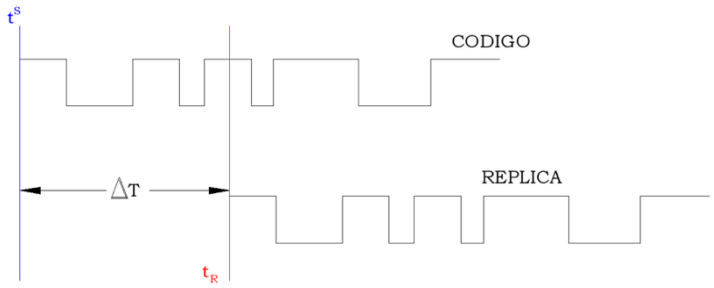


Figura III.30.- Correlación entre las señales del satélite y del receptor.

La diferencia entre las lecturas de los dos relojes, satélite y receptor, con respecto a un sistema de referencia temporal es

$\delta_{receptor}$: incluye los errores del reloj del receptor.

$\delta_{satélite}$: incluye los errores del reloj del satélite.

Así pues, la lectura de ambos en el sistema de referencia temporal es:

$$t_{srt}^{receptor} = t^{receptor} + \delta_{receptor} \quad \text{[III.160]}$$

$$t_{srt}^{satélite} = t^{satélite} + \delta_{satélite} \quad \text{[III.161]}$$

$$t_{srt}^{receptor} - t_{srt}^{satélite} = \left(t^{receptor} + \delta_{receptor}\right) - \left(t^{satélite} + \delta_{saté\square ite}\right) = \Delta t + \Delta\delta \quad \text{[III.162]}$$

Y la pseudodistancia se traduce en:

$$d_{satélite}^{receptor} = c\left(t_{srt}^{receptor} - t_{srt}^{satélite}\right) = c\Delta t + c\Delta\delta = \rho_{satélite}^{receptor} + c\Delta\delta \quad \text{[III.163]}$$

Donde $\rho_{satélite}^{receptor}$ es la distancia entre el satélite y el receptor para una época determinada.

Ahora bien, dado que la señal tiene que atravesar la atmósfera, la velocidad de la onda se verá afectada por el efecto troposférico e ionosférico que tiene como consecuencia un retardo en la llegada de la radiación, produciéndose un error en la distancia de signo negativo. La distancia verdadera entre el receptor y el satélite será, por lo tanto:

$$D_{satélite}^{receptor} = \rho_{satélite}^{receptor} + c\Delta\delta - r_{ionosférico} - r_{troposférico} \quad \text{[III.164]}$$

En esta expresión las variables a conocer para saber la distancia real son:

$\delta_{receptor} \Rightarrow errores\ del\ reloj\ del\ receptor$

$\delta_{satélite} \Rightarrow errores\ del\ reloj\ del\ satélite\ calculados\ a\ partir\ del\ mensaje\ de\ navegación$

$\left.\begin{matrix} r_{ionosférico} \\ r_{troposférico} \end{matrix}\right\} \Rightarrow retardos\ atmosféricos\ estimados\ con\ modelos\ matemáticos$

El retardo ionosférico en el caso de receptores de doble frecuencia se puede obtener directamente.

Por tanto se tienen cuatro incógnitas $(x, y, z, estado\ del\ reloj)$, por lo que se necesitan al menos cuatro satélites para determinar la posición en tiempo real, que sería suficiente con tres para un posicionamiento planimétrico. La precisión depende de las efemérides de los satélites pudiendo llegar a un 1% de la longitud de código con al menos cuatro satélites.

En el caso de correlar el código C/A,

$$Código\ \frac{C}{A} \Rightarrow \frac{f_0}{10} = 1{,}023\ MHz\ repetido\ cada\ milisegundo, \lambda \approx 300\ m\ y\ modulado\ sobre\ L1$$

se puede llegar a una precisión de decámetros en tiempo real.

Si se pudiera correlar el código P, encriptado por el US Force

$$Código\ P \Rightarrow f_0 = 10{,}23\ MHz\ repetido\ cada\ 266{,}4\ días\ y\ \lambda \approx 30\ cm, encriptado\ a\ uso\ civil$$

La precisión obtenida en esta posición es del orden de $5\ a\ 20\ metros$ utilizando el código C/A [SEEBE-93].

3.3.4.- Método de la medida de fase.

El método de medida por el método de medida de fase es similar a los métodos utilizados en distanciometría clásica obteniendo mayores precisiones que en el método anterior, y por tanto, más adecuado para trabajos topográficos y geodésicos.

Su fundamento está en comparar la fase de la señal recibida y la que genera el receptor, dicho de otro modo, el oscilador del receptor genera una frecuencia que se compara con la onda portadora, demodulada, tras la oportuna correlación o cuadratura. De esta manera, y es el fundamento real del método, le emisión

radioeléctrica emitida desde el satélite se controla en fase, desde una posición y frecuencia conocidas. De este modo, si se conoce y se tiene controlada la fase, se observa la evolución del desfase que cambiará conforme vaya cambiando la distancia entre el receptor y el satélite.

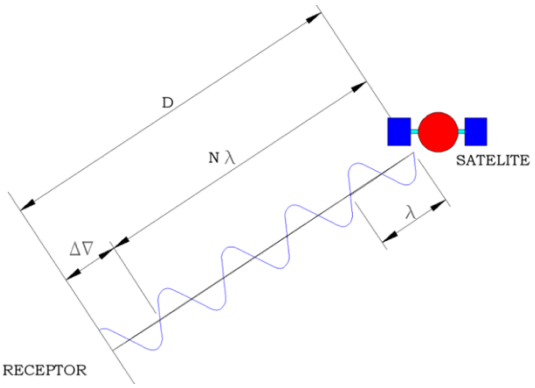


Figura III.31.- Evaluación de la distancia a través de la medida de fase.

Desde que la señal sale del satélite hasta que llega al receptor, la distancia que la onda portadora ha recorrido equivale de forma genérica a un número entero de longitudes de onda más la medida de fase, es decir:

$$D = \lambda N + \Delta\Phi \qquad \text{[III.165]}$$

El observable, $\Delta\Phi$, se puede determinar con precisiones superiores al 1%, lo que equivale, por ejemplo para la portadora L1 ($\lambda = 20\ cm$) a poder apreciar dos milímetros. Partiendo de la ecuación de fase de una onda electromagnética:

$$\varphi = \int_{t_0}^{t} f\ dt \qquad \text{[III.166]}$$

Si la frecuencia es constante y t_p es el tiempo necesario para que la señal recorra la distancia geométrica que separa el receptor del satélite, la expresión anterior queda:

$$\varphi = \int_{t_0}^{t} f\ dt = f(t - t_p) \qquad \text{[III.167]}$$

En ella se cumple que:

- para el momento $t_0 \Rightarrow \varphi(t_0) = 0$
- entonces $\rho_{satélite}^{receptor} = c\ \Delta t = c\ t_p$
- t_p : tiempo para recorrer la distancia entre el satélite y el receptor

Quedando la expresión en:

$$\varphi = f\left(t - \frac{\rho_{satélite}^{receptor}}{c}\right) = ft - f\frac{\rho_{satélite}^{receptor}}{c} \qquad \text{[III.168]}$$

Llamando a la fase recibida por el receptor $\varphi_{satélite}(t)$, y a la fase generada por el receptor, $\varphi_{receptor}(t)$, y siendo el instante inicial, $t_0 = 0$, se tiene:

$$\varphi_{satélite}(t) = ft - f\frac{\rho_{satélite}^{receptor}}{c} - \varphi_0^{satélite} \qquad \text{[III.169]}$$

$$\varphi_{receptor}(t) = ft - \varphi_0^{receptor} \qquad \text{[III.170]}$$

$\varphi_{satélite}(t)$ y $\varphi_{receptor}(t)$: están originadas por los errores de los relojes del satélite y receptor

$$\varphi_{satélite}(t) = f\ \delta_{satélite}$$

$$\varphi_{receptor}(t) = f\ \delta_{receptor}$$

Así, la diferencia de fase se calcula:

$$\varphi_{satélite}^{receptor}(t) = \varphi_{satélite}(t) - \varphi_{receptor}(t) = ft - f\frac{\rho_{satélite}^{receptor}}{c} - \varphi_0^{satélite} - ft + \varphi_0^{receptor} \quad \text{[III.171]}$$

Suponiendo que las frecuencias de la onda recibida y la de la generada son iguales ya que el efecto doppler tiene incidencia únicamente en la longitud de onda observada pero no en la propia fase de la portadora recibida, la expresión queda:

$$\varphi_{satélite}^{receptor}(t) = -f\frac{\rho_{satélite}^{receptor}}{c} - \varphi_0^{satélite} + \varphi_0^{receptor}$$

$$\varphi_{satélite}^{receptor}(t) = -f\frac{\rho_{satélite}^{receptor}}{c} - f\,\delta_{satélite} + f\,\delta_{receptor} = -f\frac{\rho_{satélite}^{receptor}}{c} - f\Delta\delta \quad \text{[III.172]}$$

Volviendo a la expresión, $D = \rho_{satélite}^{receptor} = \lambda N + \Delta\Phi$, el número N, definido como número entero de longitudes de onda no es conocido, y se denomina ambigüedad. Haciendo la hipótesis de que la diferencia de fase para t=0 es nula, se tiene:

$$\varphi_{satélite}^{receptor}(t) = \left[\Delta\varphi_{satélite}^{receptor}\right]_{t_0}^{t} + N$$

$$\varphi_{satélite}^{receptor}(t) = -f\frac{\rho_{satélite}^{receptor}}{c} - f\Delta\delta + N$$

$$\phi_{satélite}^{receptor}(t) = f\frac{\rho_{satélite}^{receptor}}{c} + f\Delta\delta + N \quad \text{[III.173]}$$

Como:

$$f = 2\pi\frac{1}{P} = \frac{c}{\lambda}$$

se llega en la ecuación en unidades de longitud:

$$\lambda\,\phi_{satélite}^{receptor}(t) = \rho_{satélite}^{receptor} + c\,\Delta\delta + \lambda\,N\ (uds.de\ longitud) \quad \text{[III.174]}$$

De este modo, la portadora generada por el receptor genera una doble función, por un lado establece la escala de tiempo del receptor y por otro permite grabar en un cierto intervalo de tiempo las diferencias de fase.

Si además se tienen en cuenta los retardos troposférico e ionosférico, del mismo modo que en el apartado anterior, se llega:

$$\lambda\,\phi_{satélite}^{receptor}(t) = \rho_{satélite}^{receptor} + c\,\Delta\delta + \lambda\,N - r_{ionosférico} - r_{troposférico} \quad \text{[III.175]}$$

3.4.- MÉTODOS DE POSICIONAMIENTO CON GPS.

3.4.1.- Introducción.

El objetivo principal que se le propone al receptor es el de conocer las coordenadas del punto en el que está estacionado. La bibliografía de GPS presenta diferentes modelos de posicionamiento que dependen del sistema de referencia utilizado: posicionamiento absoluto, que sólo requiere de un receptor GPS para proporcionar las coordenadas del punto observado, o el posicionamiento relativo, para lo que es necesario al menos dos receptores operando simultáneamente; en este caso, el observable es la línea base entre ambos receptores o, lo que es lo mismo, el vector entre ambos.

Por otro lado, atendiendo al movimiento entre y de los receptores, si los receptores a lo largo de la observación no se mueven se denomina posicionamiento estático, y cinemático cuando al menos uno de ellos está en movimiento durante el proceso.

Combinando las diferentes formas de observación anteriores y añadiendo a éstos la forma de medir la distancia entre el satélite y el receptor, medida de fase o pseudodistancia, se llega a diferentes métodos de observación.

A.- Posicionamiento dinámico absoluto.

Con este método de posicionamiento se obtiene la posición del receptor en el sistema de referencia considerado en tiempo real y mediante la medida de pseudodistancias. La precisión que se puede llegar a obtener es de 10 metros con un nivel de confianza del 95% [HOFMA-01]. Su aplicación principal es en la navegación.

B.- Posicionamiento estático absoluto.

Con este método de posicionamiento se obtiene la posición del receptor, en un punto estático y fijo en el sistema de referencia considerado en tiempo real y mediante la medida de pseudodistancias. La precisión obtenida depende del tiempo de observación, ya que a más tiempo observando se obtiene mayor redundancia en la misma, pudiendo llegar a los 5 metros de precisión.

C.- Posicionamiento dinámico relativo.

El procedimiento se realiza con dos receptores operando al mismo tiempo, el primero de ellos es fijo y actúa como estación de referencia y el otro es móvil y es sobre el que se va dando posiciones. Con los avances obtenidos, puede darse el caso de obtener comunicación entre ambos receptores y por tanto poder dar coordenadas en tiempo real, o en tiempo diferido.

Las diferentes variaciones que presentan los posicionamientos dinámicos relativos se pueden resumir en las siguientes metodologías:

- Semi-cinemático o stop and go: El receptor estaciona en los puntos que se desea observar durante un cierto tiempo. La precisión obtenida en ellos dependerá, entre otros, del tiempo de estancia en ellos, siendo mejor cuanto más tiempo de parada exista.
- Posicionamiento en tiempo real o cinemático: El receptor móvil está en movimiento continuo, pudiéndose distinguir dos variantes: si el observable es únicamente el código, las precisiones obtenidas serán de orden submétrico, denominándose GPS diferencial o DGPS. Si el observable es tanto el código como la fase se puede llegar a precisiones centimétricas, denominándose posicionamiento RTK (Real Time Kinematic).

D.- Posicionamiento estático relativo.

Este método define la línea base entre dos receptores en tiempo diferido (post-proceso), dependiendo el periodo de observación de la longitud de la línea base. Se pueden obtener precisiones de de $1\,cm + 1\,ppm$ o mejores y aún mejores para baselíneas superiores a los $100\,kilómetros$. [SEEBE-93] [HOFMA-08] [PERED-10].

Para conseguir mayores precisiones se utilizan receptores de doble frecuencia, con efemérides precisas y realizando las observaciones mediante técnicas de redes fiduciales con técnicas de cálculo de órbitas por relajación [SEEBE-93] [PERED-10].

E.- Posicionamiento pseudocinemático relativo.

La técnica es desarrollada por B. Remondi [REMON-85], y se ha denominado también como estática intermitente o método de reocupación. Para ello se basa en dos puntos, puntos fundamentales. Un escenario típico es empezar ocupando, a partir de un punto de referencia, otro punto durante cinco minutos aproximadamente. Posteriormente se recorren los puntos que se desean observar para cerrar el itinerario en el mismo punto en que se inició. [PERED-10]

3.4.2.- Ecuaciones de las observaciones GPS.

3.4.2.1.- Fundamentos para el cálculo del posicionamiento absoluto.

A.- Cálculo mediante la medida de pseudodistancias.

Recuperando la fórmula [III.164] se tiene:

$$D_{satélite}^{receptor}(t) = \rho_{satélite}^{receptor}(t) + c\Delta\delta(t) - r_{ionosférico} - r_{troposférico}$$

donde:

$D_{satélite}^{receptor}(t)$ *es la pseudodistancia entre el satélite y el receptor*

$\rho_{satélite}^{receptor}(t)$ *es la distancia real entre el satélite y el receptor*

c *es la velocidad de la radiación electr□magnética en el vacío*

$\Delta\delta(t) = \delta_{satélite}(t) - \delta_{receptor}(t)$

$\delta_{receptor}$ ⇒ *errores del reloj del receptor*

$\delta_{satélite}$ ⇒ *errores del reloj del satélite calculados a partir del mensaje de navegación*

El satélite manda el estado de su reloj en el mensaje de navegación, sin *embargo el estado del reloj del receptor no es constante por la calidad del oscilador que da precisión menor a la del sistema y por tanto es una incógnita más*

$\left.\begin{matrix} r_{ionosférico} \\ r_{troposférico} \end{matrix}\right\}$ ⇒ *retardos atmosféricos estimados con modelos matemáticos*

En esta expresión cabe resaltar que ambas épocas están referidas a un sistema de referencia temporal y $\rho_{satélite}^{receptor}$ sin embargo es función de dos épocas diferentes y por tanto lo usual es desarrollarlo en series de Taylor.

$$\rho_{satélite}^{receptor} = \rho_{satélite}^{receptor}\left(t^{satélite}, t^{receptor}\right) = \rho_{satélite}^{receptor}\left(t^{satélite}, t^{satélite} + \Delta t\right)$$

Se trata por tanto de calcular el valor de $\rho_{satélite}^{receptor}(t)$. El tiempo real que tarda la onda en recorrer la distancia entre el satélite y el receptor tampoco se conoce, que haciendo dicho desarrollo en serie de Taylor de dicha expresión, con únicamente los dos primeros términos, a partir de una posición aproximada, linealizando el tiempo de viaje, se obtiene:

$$\Delta t = \left(t_{srt}^{receptor} - t_{srt}^{satélite}\right) = t_k$$

$$Posición\ aproximada = (x_0, y_0, z_0)$$

$$\rho_{satélite}^{receptor} = \rho_{satélite}^{receptor}\left(t^{satélite}, t^{receptor}\right) = \rho_{satélite}^{receptor}\left(t^{satélite}, t^{satélite} + \Delta t\right)$$

$$\rho_{satélite}^{receptor} = \rho_{satélite}^{receptor}\left(t^{satélite}\right) + \frac{d\rho_{satélite}^{receptor}\left(t^{satélite}\right)}{dt}\Delta t$$

El segundo término representa la velocidad radial del satélite con respecto al receptor, y hay que tener en cuenta que esta velocidad radial es del orden de 1 $\frac{km}{seg}$ y el tiempo de viaje de la onda electromagnética entre el satélite y el receptor de $[0{,}06 - 0{,}1]seg$, con lo que en este tiempo el satélite habrá recorrido al menos 60 metros.

$$\rho_{satélite}^{receptor}\left(t^{satélite}\right) = \sqrt{(x_{sat} - x_0)^2 + (y_{sat} - y_0)^2 + (z_{sat} - z_0)^2}$$

$$\frac{d\rho_{satélite}^{receptor}\left(t^{satélite}\right)}{dt}\Delta t = -\frac{x_{sat} - x_0}{\rho_{satélite}^{receptor}(t^{satélite})}\Delta x_{rec} - \frac{y_{sat} - y_0}{\rho_{satélite}^{receptor}(t^{satélite})}\Delta y_{rec} - \frac{z_{sat} - z_0}{\rho_{satélite}^{receptor}(t^{satélite})}\Delta z_{rec}$$

Recuperando la ecuación original:

$$D_{satélite}^{receptor}(t) = \rho_{satélite}^{receptor}\left(t^{satélite}\right) + \frac{d\rho_{satélite}^{receptor}\left(t^{satélite}\right)}{dt}\Delta t + c[\delta_{satélite}(t) - \delta_{receptor}(t)] - r_{ionosférico} - r_{troposférico}$$

Y sustituyendo:

$$D_{satélite}^{receptor}(t) = \sqrt{(x_{sat}-x_0)^2+(y_{sat}-y_0)^2+(z_{sat}-z_0)^2} - \frac{x_{sat}-x_0}{\rho_{satélite}^{receptor}(t^{satélite})}\Delta x_{rec} - \frac{y_{sat}-y_0}{\rho_{satélite}^{receptor}(t^{satélite})}\Delta y_{rec} - \frac{z_{sat}-z_0}{\rho_{satélite}^{receptor}(t^{satélite})}\Delta z_{rec} + c[\delta_{satélite}(t)-\delta_{receptor}(t)] - r_{ionosférico} - r_{troposférico}$$

donde:

$$\Delta x_{rec}, \Delta y_{rec}, \Delta z_{rec} \; y \; \delta_{receptor}(t) \; son \; las \; incógnitas \; (4)$$
$$\delta_{satélite}(t) \; se \; cálcula \; a \; partir \; del \; mensaje \; radiofundido$$

De esta manera, el sistema se puede resolver con al menos cuatro satélites, teniendo un sistema de cuatro ecuaciones con cuatro incógnitas, obteniendo el posicionamiento por iteraciones a partir de una posición inicial arbitraria. La posición se puede obtener para cada época como media de las posiciones.

En el caso de tener más de cuatro satélites, habrá que ajustar la solución por mínimos cuadrados aplicando las teorías incluidas en el tratamiento de los ajustes de modelos estocásticos. Además permite posicionar puntos en tiempo real ya que en una misma época es capaz de resolver el sistema de ecuaciones con aplicaciones en navegación como ya se ha referido. En cuanto al campo de la geodesia y cartografía su uso se limita al cálculo de aproximación de coordenadas como base para otros métodos que aporten una precisión superior.

B.- Cálculo mediante la medida de la fase de la portadora.

B.1.- Cálculo mediante la ecuación fundamental de la diferencia de fase.

Recuperando la ecuación [III.175], se llega a la siguiente ecuación a través de la medida de fase:

$$\lambda\,\phi_{satélite}^{receptor}(t) = \rho_{satélite}^{receptor}(t) + c\,\Delta\delta + \lambda\,N - r_{ionosférico} - r_{troposférico}$$

La incógnita en este caso es la misma que en el caso anterior, $\rho_{satélite}^{receptor}$, que es la distancia real entre el satélite y el receptor, que operando del mismo modo, el tiempo real que tarda la onda en recorrer la distancia entre el satélite y el receptor tampoco se conoce y haciendo dicho desarrollo en serie de Taylor de dicha expresión, con únicamente los dos primeros términos, a partir de una posición aproximada, linealizando el tiempo de viaje, se obtiene:

$$\Delta t = \left(t_{srt}^{receptor} - t_{srt}^{satélite}\right) = t_k$$

$$Posición\ aproximada = (x_0, y_0, z_0)$$

$$\rho_{satélite}^{receptor} = \rho_{satélite}^{receptor}\left(t^{satélite}, t^{receptor}\right) = \rho_{satélite}^{receptor}\left(t^{satélite}, t^{satélite}+\Delta t\right)$$

$$\rho_{satélite}^{receptor} = \rho_{satélite}^{receptor}\left(t^{satélite}\right) + \frac{d\rho_{satélite}^{receptor}\left(t^{satélite}\right)}{dt}\Delta t$$

$$\rho_{satélite}^{receptor}\left(t^{satélite}\right) = \sqrt{(x_{sat}-x_0)^2+(y_{sat}-y_0)^2+(z_{sat}-z_0)^2}$$

$$\frac{d\rho_{satélite}^{receptor}\left(t^{satélite}\right)}{dt}\Delta t = -\frac{x_{sat}-x_0}{\rho_{satélite}^{receptor}(t^{satélite})}\Delta x_{rec} - \frac{y_{sat}-y_0}{\rho_{satélite}^{receptor}(t^{satélite})}\Delta y_{rec} - \frac{z_{sat}-z_0}{\rho_{satélite}^{receptor}(t^{satélite})}\Delta z_{rec}$$

Recuperando la ecuación original:

$$\lambda\,\phi_{satélite}^{receptor}(t) = \rho_{satélite}^{receptor}(t) + c\,\Delta\delta + \lambda\,N - r_{ionosférico} - r_{troposférico}$$

Recuperando la ecuación original:

$$\lambda\,\phi_{satélite}^{receptor}(t) = \rho_{satélite}^{receptor}\left(t^{satélite}\right) + \frac{d\rho_{satélite}^{receptor}\left(t^{satélite}\right)}{dt}\Delta t + c[\delta_{satélite}(t)-\delta_{receptor}(t)] + \lambda\,N - r_{ionosférico} - r_{troposférico}$$

Y sustituyendo:

$$\lambda\,\phi_{satélite}^{receptor}(t) - \rho_{satélite}^{receptor}\left(t^{satélite}\right) - c\left[\delta_{satélite}(t) - \delta_{receptor}(t)\right] = -\frac{x_{sat} - x_0}{\rho_{satélite}^{receptor}(t^{satélite})}\Delta x_{rec} - \frac{y_{sat} - y_0}{\rho_{satélite}^{receptor}(t^{satélite})}\Delta y_{rec} - \frac{z_{sat} - z_0}{\rho_{satélite}^{receptor}(t^{satélite})}\Delta z_{rec} + \lambda\, N\; - r_{ionosférico} - r_{troposférico}$$

donde:

$$\Delta x_{rec}, \Delta y_{rec}, \Delta x_{rec}, \delta_{receptor}(t)\ y\ N\ son\ las\ incógnitas \quad (5)$$

$$\delta_{satélite}(t)\ se\ cálcula\ a\ partir\ del\ mensaje\ radiofundido$$

Estas cinco incógnitas, en el caso clásico de tener cuatro satélites, se convierten en ocho incógnitas:

$$\Delta x_{rec}, \Delta x_{rec}, \Delta x_{rec}, \delta_{receptor}(t)$$

$$N_{receptor}^{satélite\ 1}, N_{receptor}^{satélite\ 2}, N_{receptor}^{satélite\ 3}, N_{receptor}^{satélite\ 4}$$

Y por tanto para poder resolver la ecuación es necesario observar más de una época, con un condicionante adicional, y es que por cada época adicional que se observe, aparece una incógnita adicional, el estado del reloj del receptor.

Así para poder resolver el sistema tenemos:

$$2\ épocas\ de\ observación\ \Rightarrow [8\ ecuaciones\ , 9\ incógnitas]\ \Rightarrow irresoluble$$

$$3\ épocas\ de\ observación\ \Rightarrow [12\ ecuaciones\ , 10\ incógnitas]\ \Rightarrow resoluble$$

con lo que se necesitan un mínimo de 3 épocas y resolver el sistema por mínimos cuadrados.

B.2.- Cálculo mediante “delta range”.

Se basa en que el incremento de fase es función de la distancia, variable, entre el satélite y el receptor en el movimiento de aquel, haciendo la hipótesis de que no hay pérdidas de ciclo, tal y como se puede ver en la figura y conocido como “delta range”:

$$\phi_{satélite}^{receptor}(t_1, t_2) = \phi_{satélite}^{receptor}(t_2) - \phi_{satélite}^{receptor}(t_1)$$

El incremento de la fase es función del cambio de la distancia entre el satélite y la antena y supone que no existen pérdidas de ciclo.

Las ambigüedades no intervienen ya que se eliminan en la expresión anterior. Sin embargo, los errores de los relojes del satélite y el receptor se hacen críticos. Modelando y estimando el error del reloj del receptor puede llegar a lograrse precisiones de alrededor de 1 metro o mejores, mediante la observación a lo largo del tiempo [HOFMA-01].

Esta técnica sólo se ha desarrollado recientemente a partir de la desactivación de la disponibilidad selectiva.

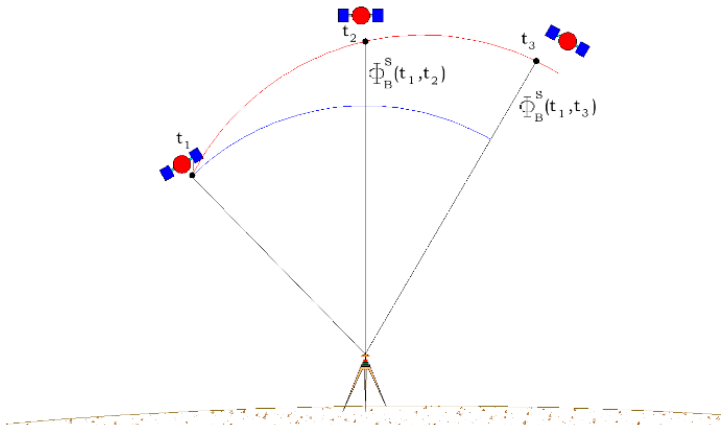


Figura III.32.- Variación de la fase en el tiempo.

3.4.2.2.- Fundamentos para el cálculo del posicionamiento diferencial.

En el caso de intervenir dos receptores, el objetivo es determinar la posición de un punto desconocido a partir de otro conocido, basándose el cálculo a través del vector que une ambos puntos, o "línea base" donde están las antenas de los receptores. De forma matemática, el cálculo de la posición responde a:

$$X_i = X_j + D_i^j$$

$$D_i^j = \begin{bmatrix} x_j - x_i \\ y_j - y_i \\ z_j - z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta x_i^j \\ \Delta y_i^j \\ \Delta z_i^j \end{bmatrix}$$

Por lo tanto, el objetivo de este método es determinar el vector D_i^j o línea base, pudiéndose determinar mediante la medida de pseudodistancias o mediante la medida de la fase portadora.

El cálculo puede realizarse a partir del código o del código y la fase.

A.- Cálculo mediante la medida de pseudodistancia.

En este procedimiento es necesario contar con dos receptores, i y j, captando las señales de un mismo satélite S y en una misma época. Con estos datos, y a través de la siguiente suma vectorial se puede obtener el vector D_i^j:

$$\overrightarrow{D_{receptor1}^{receptro2}(t)} = \overrightarrow{D_{receptor2}^{satélite}(t)} - \overrightarrow{D_{receptor1}^{satélite}(t)}$$

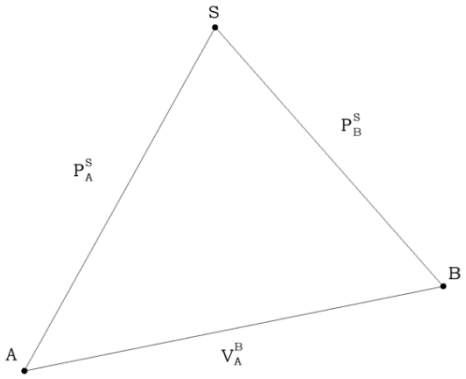


*Figura III.33.- Simples dife**r**encias.*

Según las ecuaciones obtenidas en el apartado anterior:

$$D_{satélite}^{receptor1}(t) = \rho_{satélite}^{receptor1}(t) + c\delta_{satélite}(t) - c\delta_{receptor1}(t) - r_{ionosférico} - r_{troposférico}$$

$$D_{satélite}^{receptor2}(t) = \rho_{satélite}^{receptor2}(t) + c\delta_{satélite}(t) - c\delta_{receptor2}(t) - r_{ionosférico} - r_{troposférico}$$

Así, restando ambas:

$$\overrightarrow{D_{receptor1}^{receptor2}(t)} = \overrightarrow{D_{receptor2}^{satélite}(t)} - \overrightarrow{D_{receptor1}^{satélite}(t)}$$

$$D_{receptor1}^{receptor1}(t) = \rho_{satélite}^{receptor2}(t) - \rho_{satélite}^{receptor1}(t) + c\left[\delta_{receptor1}(t) - \delta_{receptor2}(t)\right]$$

$$\rho_{satélite}^{receptor2}(t) = \rho_{satélite}^{receptor2}\left(t^{satélite}\right) + \frac{d\rho_{satélite}^{receptor2}\left(t^{satélite}\right)}{dt}\Delta t$$

$$= \rho_{satélite}^{receptor2}\left(t^{satélite}\right) - \frac{x_{sat} - x_0}{\rho_{satélite}^{receptor2}(t^{satélite})}\Delta x_{rec} - \frac{y_{sat} - y_0}{\rho_{satélite}^{receptor2}(t^{satélite})}\Delta y_{rec}$$

$$- \frac{z_{sat} - z_0}{\rho_{satélite}^{receptor2}(t^{satélite})}\Delta z_{rec}$$

$$\rho_{satélite}^{receptor1}(t) = \rho_{satélite}^{receptor1}\left(t^{satélite}\right) + \frac{d\rho_{satélite}^{receptor1}\left(t^{satélite}\right)}{dt}\Delta t$$
$$= \rho_{satélite}^{receptor1}\left(t^{satélite}\right) - \frac{x_{sat} - x_0}{\rho_{satélite}^{receptor1}(t^{satélite})}\Delta x_{rec} - \frac{y_{sat} - y_0}{\rho_{satélite}^{receptor1}(t^{satélite})}\Delta y_{rec}$$
$$- \frac{z_{sat} - z_0}{\rho_{satélite}^{receptor2}(t^{satélite})}\Delta z_{rec}$$

$$D_{receptor1}^{receptor1}(t) = \rho_{satélite}^{receptor2}\left(t^{satélite}\right) - \rho_{satélite}^{receptor1}\left(t^{satélite}\right)$$
$$- \left[\frac{x_{sat} - x_{B0}}{\rho_{satélite}^{receptor2}(t^{satélite})}\Delta x_{recB} + \frac{y_{sat} - y_{B0}}{\rho_{satélite}^{receptor2}(t^{satélite})}\Delta y_{recB}\right.$$
$$\left. + \frac{z_{sat} - z_{B0}}{\rho_{satélite}^{receptor2}(t^{satélite})}\Delta z_{recB}\right]$$
$$+ \left[\frac{x_{sat} - x_{A0}}{\rho_{satélite}^{receptor1}(t^{satélite})}\Delta x_{recA} + \frac{y_{sat} - y_{A0}}{\rho_{satélite}^{receptor1}(t^{satélite})}\Delta y_{recA}\right.$$
$$\left. + \frac{z_{sat} - z_{A0}}{\rho_{satélite}^{receptor2}(t^{satélite})}\Delta z_{recA}\right] + c\left[\delta_{receptor1}(t) - \delta_{receptor2}(t)\right]$$

donde al ser las coordenadas del punto A conocidas:

$$\Delta x_{recB}, \Delta y_{recB}, \Delta z_{recB}, \delta_{receptor1}(t)\ y\ \delta_{receptor2}(t)\ son\ las\ incógnitas \quad (5)$$

De este modo se tienen cinco incógnitas, por lo que se necesitan al menos cinco satélites para resolver el sistema.

Este procedimiento tiene la ventaja de que los errores de los relojes de los satélites no participan al eliminarse en las diferencias.

Si este procedimiento se realiza para más épocas aparecen dos incógnitas más por época añadida.

Las precisiones obtenidas en tiempo real de la antena son del orden del metro.

B.- Cálculo mediante la medida de la fase portadora.

En este procedimiento es necesario contar con dos receptores los cuales realizan observaciones de forma simultánea dando lugar a formar combinaciones lineales de los observables que en función de cómo se realicen pueden ser simples, dobles o triples diferencias, de forma que aprovechando estas combinaciones se reduzcan o incluso eliminen los errores que se dan con un único receptor.

B.1.- Simples diferencias.

En este método están implicados dos receptores y un satélite. Recuperando las ecuaciones anteriores:

$$\lambda\,\phi_{satélite}^{receptorA}(t) = \rho_{satélite}^{receptorA}(t) + c\,\Delta\delta_A + \lambda\,N_{satélite}^{receptorA} - r_{ionosférico} - r_{troposférico}$$
$$\lambda\,\phi_{satélite}^{receptorB}(t) = \rho_{satélite}^{receptorB}(t) + c\,\Delta\delta_B + \lambda\,N_{satélite}^{receptorB} - r_{ionosférico} - r_{troposférico}$$

Restando ambas expresiones:

$$\lambda\,\phi_{satélite}^{receptorB}(t) - \lambda\,\phi_{satélite}^{receptorA}(t)$$
$$= \rho_{satélite}^{receptorB}(t) - \rho_{satélite}^{receptorA}(t) + \lambda\,N_{satélite}^{receptorB} - \lambda\,N_{satélite}^{receptorA} + c\,\Delta\delta_B - c\,\Delta\delta_A$$

$$\phi_{satélite}^{receptorB}(t) - \phi_{satélite}^{receptorA}(t)$$
$$= \frac{1}{\lambda}\left(\rho_{satélite}^{receptorB}(t) - \rho_{satélite}^{receptorA}(t)\right) + N_{satélite}^{receptorB} - N_{satélite}^{receptorA} + \frac{c}{\lambda}(\Delta\delta_B - \Delta\delta_A)$$

Para simplificar la expresión se denomina:

$$\phi_{satélite}^{receptoresAB}(t) = \phi_{satélite}^{receptorB}(t) - \phi_{satélite}^{receptorA}$$
$$N_{satélite}^{receptoresAB} = N_{satélite}^{receptorB} - N_{satélite}^{receptorA}$$

$$\delta_{AB}(t) = \delta_B(t) - \delta_A(t)$$
$$\rho_{satélite}^{receptorAB}(t) = \rho_{satélite}^{receptorB}(t) - \rho_{satélite}^{receptorA}(t)$$

Quedando por tanto, de forma simplificada:

$$\phi_{satélite}^{receptoresAB}(t) = \frac{1}{\lambda}\rho_{satélite}^{receptorAB}(t) + N_{satélite}^{receptoresAB} - f\delta_{AB}(t)$$

En esta expresión resultante para las simples diferencias, el reloj del satélite no interviene.

B.2.- Dobles diferencias.

En este método están implicados dos receptores y dos satélites. Recuperando las ecuaciones iniciales, a partir de la expresión anterior de simples diferencias para cada satélite:

$$\phi_{satélite1}^{receptoresAB}(t) = \frac{1}{\lambda}\rho_{satélite1}^{receptorAB}(t) + N_{satélite1}^{receptoresAB} - f\delta_{AB}(t)$$
$$\phi_{satélite2}^{receptoresAB}(t) = \frac{1}{\lambda}\rho_{satélite2}^{receptorAB}(t) + N_{satélite2}^{receptoresAB} - f\delta_{AB}(t)$$

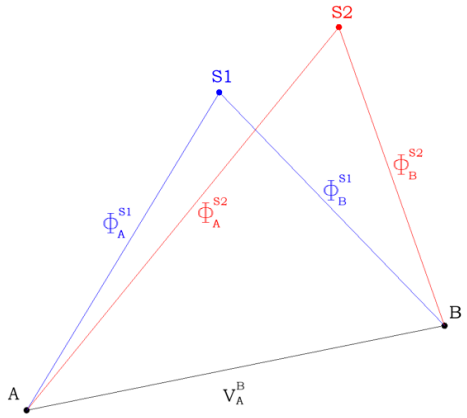


Figura III.34.- Dobles diferencias.

Si se restan las dos expresiones matemáticas, se tiene:

$$\phi_{satélite1}^{receptoresAB}(t) - \phi_{satélite2}^{receptoresAB}(t) = \frac{1}{\lambda}\left[\rho_{satélite1}^{receptorAB}(t) - \rho_{satélite2}^{receptorAB}(t)\right] + \left[N_{satélite1}^{receptoresAB} - N_{satélite2}^{receptoresAB}\right]$$

Igualmente en ella se eliminan los estados de los relojes para observaciones simultáneas y para frecuencias iguales en ambos satélites.

Para simplificar la expresión se denomina:

$$\phi_{satélite12}^{receptoresAB}(t) = \phi_{satélite1}^{receptoresAB}(t) - \phi_{satélite2}^{receptoresAB}(t)$$
$$\rho_{satélite12}^{receptorAB}(t) = \rho_{satélite1}^{receptorAB}(t) - \rho_{satélite2}^{receptorAB}(t)$$
$$N_{satélite12}^{receptoresAB} = N_{satélite1}^{receptoresAB} - N_{satélite2}^{receptoresAB}$$

Quedando por tanto, de forma simplificada:

$$\phi_{satélite12}^{receptoresAB}(t) = \frac{1}{\lambda}\rho_{satélite12}^{receptorAB}(t) + N_{satélite12}^{receptoresAB}$$

El sistema puede resolverse ya que, gracias al carácter entero de las ambigüedades, mediante iteración se reducen el número de parámetros. Este proceso se realiza mediante procesos que se describirán más adelante.

B.3.- Triples diferencias.

En este método están implicados dos receptores y dos satélites, considerando dos épocas diferentes de forma que se eliminen las ambigüedades. Recuperando las

ecuaciones iniciales, a partir de la expresión anterior de dobles diferencias para cada satélite:

$$\phi_{satélite12}^{receptoresAB}(t_1) = \frac{1}{\lambda}\rho_{satélite12}^{receptorAB}(t_1) + N_{satélite12}^{receptoresAB}$$

$$\phi_{satélite12}^{receptoresAB}(t_2) = \frac{1}{\lambda}\rho_{satélite12}^{receptorAB}(t_2) + N_{satélite12}^{receptoresAB}$$

Si se restan las dos expresiones matemáticas, se tiene:

$$\phi_{satélite12}^{receptoresAB}(t_2) - \phi_{satélite12}^{receptoresAB}(t_1) = \frac{1}{\lambda}\left[\rho_{satélite12}^{receptorAB}(t_2) - \rho_{satélite12}^{receptorAB}(t_1)\right] + \left[N_{satélite12}^{receptoresAB} - N_{satélite21}^{receptoresAB}\right]$$

Igualmente en ella se eliminan los estados de los relojes para observaciones simultáneas y para frecuencias iguales en ambos satélites.

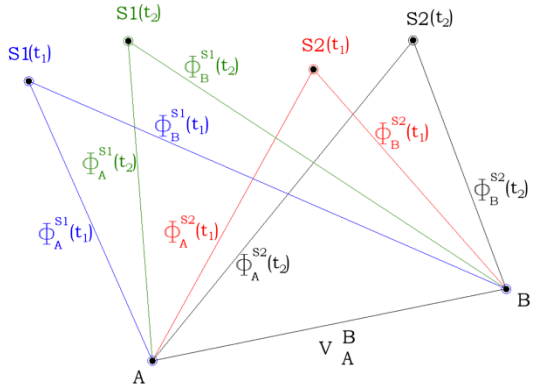


Figura III.35.- Triples diferencias.

Para simplificar la expresión se denomina:

$$\phi_{satélite12}^{receptoresAB}(t_1, t_2) = \phi_{satélite12}^{receptoresAB}(t_2) - \phi_{satélite12}^{receptoresAB}(t_1)$$

$$\rho_{satélite12}^{receptoresAB}(t_1, t_2) = \rho_{satélite12}^{receptorAB}(t_2) - \rho_{satélite12}^{receptorAB}(t_1)$$

Obteniendo:

$$\phi_{satélite12}^{receptoresAB}(t_1, t_2) = \frac{1}{\lambda}\rho_{satélite12}^{receptoresAB}(t_1, t_2)$$

Que recuperando y desarrollando la serie de simplificaciones anteriores realizadas

$$\phi_{satélite12}^{receptoresAB}(t_1, t_2) = \phi_{satélite12}^{receptoresAB}(t_2) - \phi_{satélite12}^{receptoresAB}(t_1)$$

$$\phi_{satélite12}^{receptoresAB}(t_2) = \phi_{satélite1}^{receptoresAB}(t_2) - \phi_{satélite2}^{receptoresAB}(t_2) = \phi_{satélite1}^{receptorB}(t_2) - \phi_{satélite1}^{receptorA}(t_2) - \phi_{satélite2}^{receptorB}(t_2) + \phi_{satélite2}^{receptorA}(t_2)$$

$$\phi_{satélite12}^{receptoresAB}(t_1) = \phi_{satélite1}^{receptoresAB}(t_1) - \phi_{satélite2}^{receptoresAB}(t_1) = \phi_{satélite1}^{receptorB}(t_1) - \phi_{satélite1}^{receptorA}(t_1) - \phi_{satélite2}^{receptorB}(t_1) + \phi_{satélite2}^{receptorA}(t_1)$$

$$\phi_{satélite12}^{receptoresAB}(t_1, t_2) = \phi_{satélite1}^{receptorB}(t_2) - \phi_{satélite1}^{receptorA}(t_2) - \phi_{satélite2}^{receptorB}(t_2) + \phi_{satélite2}^{receptorA}(t_2) - \phi_{satélite1}^{receptorB}(t_1) + \phi_{satélite1}^{receptorA}(t_1) + \phi_{satélite2}^{receptorB}(t_1) - \phi_{satélite2}^{receptorA}(t_1)$$

Y desarrollando análogamente:

$$\rho_{satélite12}^{receptoresAB}(t_1,t_2) = \rho_{satélite1}^{receptorB}(t_2) - \rho_{satélite1}^{receptorA}(t_2) - \rho_{satélite2}^{receptorB}(t_2) + \rho_{satélite2}^{receptorA}(t_2) - \rho_{satélite1}^{receptorB}(t_1) + \rho_{satélite1}^{receptorA}(t_1) + \rho_{satélite2}^{receptorB}(t_1) - \rho_{satélite2}^{receptorA}(t_1)$$

Este método tiene ventajas ya que se eliminan las incógnitas de las ambigüedades y las pérdidas de ciclo (diferencias en las ambigüedades por pérdidas de la señal) no afectan a la ecuación.

Las triples diferencias son, a menudo, consideradas como una técnica de preproceso para obtener una posición aproximada en la solución de las dobles diferencias.

3.5.- CÁLCULO DE LA POSICIÓN, RESOLUCIÓN DE AMBIGÜEDADES.

3.5.1.- Datos almacenados por el receptor.

El receptor de la señal emitida por el satélite es capaz de almacenar, normalmente mediante código binario, estos datos recibidos para su procesamiento; pseudodistancias, códigos de fase, mensaje de navegación, ...; en diferentes archivos.

El formato unificado para estos archivos de forma que la información se pueda intercambiar e interpretar por todos los fabricantes y usuarios, es decir de una forma estandarizada, es el RINEX (Receiver INdependent Exchange), acordado por el Instituto Astronómico de la Universidad de Berna en el año 1989, formato que permite el almacenamiento y la gestión de esta información recibida por el receptor así como su procesado posterior independientemente del fabricante del receptor o de la aplicación informática que trate los datos.

Debido a los nuevos sistemas de GNSS puestos en funcionamiento, el sistema RINEX ha tenido que ir adaptándose para poder acoger a todos, en estos momentos, GPS, GLONASS, EGNOS, WAAS así como el reciente GALILEO.

Los archivos tipo elaborados (formato ASCII) son:

- Fichero tipo O: datos de la observación
- Fichero tipo N: mensaje de navegación
- Fichero tipo M: datos meteorológicos
- Fichero del mensaje de navegación del sistema GLONASS
- Adicionalmente tres valores fundamentales para los observables: tiempo GPS, pseudodistancia y medida de fase (fase de la portadora en unidades de ciclos completos para ambas portadoras).

Los ficheros tipo O y N son creados en cada sesión, aunque ya en las últimas versiones se incluyen en un solo fichero datos de más de un estacionamiento lo que favorece para usos cinemáticos.

En el formato RINEX para los observables se definen tres parámetros fundamentales, como son el tiempo, expresado en tiempo GPS, la pseudodistancia y la medida de fase que definirá la fase de la portadora en unidades de ciclos completos para las dos portadoras.

Así definido el formato de los datos GPS, su tratamiento se puede realizar con diferente software comercial, cada uno con su formato propio a partir de los datos brutos de las observaciones, sean o no RINEX. El proceso de cálculo se explica en los apartados siguientes a partir de las ecuaciones obtenidas en los apartados anteriores.

3.5.2.- Consideraciones adicionales sobre el tiempo real.

Una alternativa para el cálculo de la posición en tiempo real del receptor móvil consiste en enviar desde el receptor fijo correcciones de fase, que serán aplicadas en la medida de fase del receptor móvil. La ventaja fundamental de esta manera de proceder consiste en que las correcciones contienen menos información que las observaciones

en sí, ya que su rango también es menor, y por ello el mensaje que debe enviar el receptor fijo tendrá una menor longitud.

El primer paso para calcular las correcciones de código consiste en definir el valor entero K_A^S según la expresión:

$$K_A^S \approx \frac{P_A^S(1)-\varphi_A^S(1)}{\lambda} \quad \text{[III.176]}$$

Como con la medida de fase no se puede completar el cálculo de la ambigüedad $N_A^S(1)$ el valor que se toma es arbitrario pero estimado según un contador.

Con posterioridad se define el rango de fase de la portadora como:

$$\Omega_A^S(1) = \varphi_A^S(1) + \lambda K_A^S \quad \text{[III.177]}$$

Este valor estará próximo a la pseudodistancia debido a la forma en que se ha definido.

Por lo tanto, se puede calcular para cada satélite y desde el receptor fijo A el rango de fase $\Omega_A^S(1)$ y la distancia topocéntrica $\varphi_A^S(1)$ a partir de las coordenadas del punto estación y las de los satélites, éstos últimos vía efemérides. El error de cometido o de cierre será:

$$L_A^S(1) = \varphi_A^S(1) - \Omega_A^S(1) \quad \text{[III.178]}$$

La media de todos ellos será, para la época 1:

$$\mu_A(1) = \frac{1}{n}\sum_{s=1}^{n} L_A^S(1) \quad \text{[III.179]}$$

donde n es el número de satélites.

La corrección de fase para la época 1 será:

$$\Delta\varphi_A^S(1) = \varphi_A^S(1) - \Omega_A^S(1) - \mu_A(1) \quad \text{[III.180]}$$

Para la época "t" el error de cierre será:

$$L_A^S(t,t-1) = L_A^S(1) - L_A^S(t-1) = [\varphi_A^S(1) - \varphi_A^S(t-1)] - [\Omega_A^S(1) - \Omega_A^S(t-1)]$$

y la media de todos ellos vendrá dada por:

$$\mu_A(t) = \mu_A(t-1) + \frac{1}{n}\sum_{s=1}^{n} L_A^S(t,t-1) \quad \text{[III.181]}$$

La corrección de fase para la época t vendrá definida por la expresión:

$$\Delta\varphi_A^S(t) = \varphi_A^S(t) - \Omega_A^S(t) - \mu_A(t) = \varphi_A^S(t) - [\varphi_A^S(1) + \lambda K_A^S] - \mu_A(1) \quad \text{[III.182]}$$

Esta corrección es transmitida al receptor móvil donde su portadora será corregida mediante la aplicación de este dato según la ecuación:

$$\bar{\varphi_M^S}(t) = \varphi_M^S(t) + \Delta\varphi_A^S(t) \quad \text{[III.183]}$$

La ecuación de corrección de fase puede ser resuelta para $\varphi_A^S(t)$ y sustituida en la siguiente expresión de simples diferencias:

$$\frac{1}{\lambda}[\varphi_A^S(t) - \varphi_M^S(t)] = \phi_A^S(t) - \phi_M^S(t) = \frac{1}{\lambda}\varphi_{MA}^S(t) - f\delta_{MA}(t) + N_{MA}^S \quad \text{[III.184]}$$

Operando convenientemente se obtiene la ecuación:

$$-\phi_M^S(t) - \Delta - \phi_M^S(t) = -\frac{1}{\lambda}\varphi_M^S(t) + [N_{MA}^S + K_A^S] - [f\delta_{MA}(t) - \mu_A(t)] = -\phi_M^S(t) \quad \text{[III.185]}$$

Estableciendo la ecuación de dobles diferencias para el receptor móvil se obtiene:

$$-\phi_M^{S1S2}(t) = -\phi_M^{S1}(t) - \phi_M^{S2}(t) = \frac{1}{\lambda}[\rho_M^{S1} - \rho_M^{S2}] + [N_{MA}^{S1S2} + K_A^{S1} - K_A^{S2}] \quad \text{[III.186]}$$

La posición del móvil puede calcularse a partir de esta última expresión utilizando la observación de fase corregida $\phi_M^S(t)$, para, al menos, cuatro satélites.

La diferencia con la solución tradicional de dobles diferencias radica en que la ambigüedad estimada es:

$$\overline{N}_{MA}^{S1S2} = N_{MA}^{S1S2} + K_A^{S1} - K_A^{S2} \qquad \text{[III.187]}$$

La posición así obtenida está calculada respecto del receptor fijo, ya que las coordenadas de éste han sido utilizadas para el cálculo de la corrección de fase.

El formato utilizado para la transmisión vía radio de estas correcciones fue establecido en 1994 y recibió el nombre de Radio Technical Commission for Maritime Services (RTCM-104), y que tiene una estructura bien definida. Aunque algunos receptores presentan un formato propio de transmisión de la corrección entre el receptor fijo y los móviles, éste está estandarizado desde 1985 de acuerdo con lo establecido por la Radio Technical Comisión for Maritime Services, Special Comité 104. Este formato se denomina RTCM, siendo la versión actual la 2.3, 3.0 y 3.1 con solución de red. Presenta 64 tipos de mensajes posibles, aunque algunos de ellos todavía están sin definir. El formato de cada uno de ellos es idéntico al del mensaje de navegación y consiste en una secuencia de palabras de 30 bits.

Cada mensaje empieza con una cabecera donde se indica un preámbulo fijo, una identificación del mensaje y el identificador del receptor que hace de referencia. La segunda palabra hace referencia al tiempo, el número de secuencia, la longitud del mensaje y el estado de referencia de la referencia. En algunos mensajes la tercera palabra también se añade a la cabecera. Los mensajes 1, 2 y 9 contienen la información para la corrección de pseudorango. Así puede suceder que la estación de referencia y el usuario obtengan diferentes mensajes de los satélites después de conseguir las efemérides radio difundidas. De esta forma el mensaje número 2 contiene las correcciones de pseudorango para las nuevas y viejas efemérides. El mensaje 9 está reservado para estaciones de referencia con relojes de alta estabilidad (atómicos).

El mensaje 7 se aplica para transmitir correcciones diferenciales en bajas y medias frecuencias proporcionando posicionamientos de baja precisión. Son propios de la navegación aérea y marítima. Los mensajes 8 y 12 se reservan para los falsos satélites, es decir, estaciones en tierra que transmiten de la misma forma que si fueran satélites GPS.

Los mensajes del 18 al 21 permiten la transmisión de pseudorangos y fase de las portadoras necesarias para técnicas de posicionamiento precisas, como la resolución de ambigüedades en movimiento (OTF).

3.5.3.- Cálculo de la posición GPS.

Ya se han detallado las diferentes técnicas de observación con las consiguientes métodos de posicionamiento a partir de los datos observados

En apartados anteriores se exponía el cálculo de posicionamientos diferenciales mediante la medida de fase, en el que en dobles diferencias se llegaba a:

$$\phi_{satélite12}^{receptoresAB}(t) = \frac{1}{\lambda}\rho_{satélite12}^{receptorAB}(t) + N_{satélite12}^{receptoresAB}$$

donde:

$$\phi_{satélite12}^{receptoresAB}(t) = \phi_{satélite1}^{receptoresAB}(t) - \phi_{satélite2}^{receptoresAB}(t)$$
$$\rho_{satélite12}^{receptorAB}(t) = \rho_{satélite1}^{receptorAB}(t) - \rho_{satélite2}^{receptorAB}(t)$$
$$N_{satélite12}^{receptoresAB} = N_{satélite1}^{receptoresAB} - N_{satélite2}^{receptoresAB}$$
$$\rho_{satélite1}^{receptorAB}(t) = \rho_{satélite1}^{receptorB}(t) - \rho_{satélite1}^{receptorA}(t)$$

$$\rho_{satélite2}^{receptorAB}(t) = \rho_{satélite2}^{receptorB}(t) - \rho_{satélite2}^{receptorA}(t)$$

y por tanto:

$$\rho_{satélite12}^{receptorAB}(t) = \rho_{satélite1}^{receptorB}(t) - \rho_{satélite1}^{receptorA}(t) - \rho_{satélite2}^{receptorB}(t) + \rho_{satélite2}^{receptorA}(t)$$

Cada uno de los términos han de ser linealizados a partir de unas coordenadas aproximadas del punto B ya que las coordenadas de A son conocidas

$$\lambda\, \phi_{satélite12}^{receptoresAB}(t) = \rho_{satélite12}^{receptorAB}(t) + \lambda N_{satélite12}^{receptoresAB}$$

$$\lambda\, \phi_{satélite12}^{receptoresAB}(t) - \rho_{satélite1}^{receptorB}(t) + \rho_{satélite1}^{receptorA}(t) + \rho_{satélite2}^{receptorB}(t) - \rho_{satélite2}^{receptorA}(t) = \lambda N_{satélite12}^{receptoresAB}$$

como:

$$-\rho_{satélite1}^{receptorB}(t) = -\rho_{satélite1}^{receptorB}\left(t^{satélite1}\right) + \frac{x_{sat} - x_0}{\rho_{satélite1}^{receptorB}(t^{satélite1})}\Delta x_{rec} + \frac{y_{sat} - y_0}{\rho_{satélite1}^{receptorB}(t^{satélite1})}\Delta y_{rec} + \frac{z_{sat} - z_0}{\rho_{satélite1}^{receptorB}(t^{satélite1})}\Delta z_{rec}$$

$$\rho_{satélite1}^{receptorA}(t) = \rho_{satélite1}^{receptorA}\left(t^{satélite1}\right) - \frac{x_{sat} - x_0}{\rho_{satélite1}^{receptorA}(t^{satélite1})}\Delta x_{rec} - \frac{y_{sat} - y_0}{\rho_{satélite1}^{receptorA}(t^{satélite1})}\Delta y_{rec} - \frac{z_{sat} - z_0}{\rho_{satélite1}^{receptorA}(t^{satélite1})}\Delta z_{rec}$$

$$\rho_{satélite2}^{receptorB}(t) = \rho_{satélite2}^{receptorB}\left(t^{satélite2}\right) - \frac{x_{sat} - x_0}{\rho_{satélite2}^{receptorB}(t^{satélite2})}\Delta x_{rec} - \frac{y_{sat} - y_0}{\rho_{satélite2}^{receptorB}(t^{satélite2})}\Delta y_{rec} - \frac{z_{sat} - z_0}{\rho_{satélite2}^{receptorB}(t^{satélite2})}\Delta z_{rec}$$

$$-\rho_{satélite2}^{receptorA}(t) = -\rho_{satélite2}^{receptorA}\left(t^{satélite2}\right) + \frac{x_{sat} - x_0}{\rho_{satélite2}^{receptorA}(t^{satélite2})}\Delta x_{rec} + \frac{y_{sat} - y_0}{\rho_{satélite2}^{receptorA}(t^{satélite2})}\Delta y_{rec} + \frac{z_{sat} - z_0}{\rho_{satélite2}^{receptorA}(t^{satélite2})}\Delta z_{rec}$$

Para un satélite determinado S, la ecuación se puede esbozar para cada época t, en la que la ambigüedad para la época t_0 es N_0, siendo para la época t:

$$N = N_0 + \Delta N$$

En esta expresión, la incógnita es ΔN, de forma que si la distancia entre el satélite y el receptor varía en una longitud de onda, las ambigüedades variarán en una unidad. Además, si la ambigüedad es conocida para una época inicial, se puede calcular para el resto de épocas ya que se relacionan con la de la época inicial a partir de la medida de fase. Esto quiere decir que la ambigüedad del instante inicial se mantiene constante a lo largo del tiempo, obteniéndose, las ambigüedades, a partir de diferentes técnicas de búsqueda.

3.5.3.1.- Detección y reparación de las pérdidas de ciclo.

En una sesión de GPS, al medir la fase, se almacena la diferencia de fase entre la portadora recibida y la generada desde el receptor (fracción de fase). De forma similar, cuando la fase pasa de 0^0 *a* 360^0, se activa un contador que incrementa su valor en una unidad. De este modo, el incremento de fase en una época es la del momento inicial más la fracción de fase y fase acumulada expresada por el contador citado.

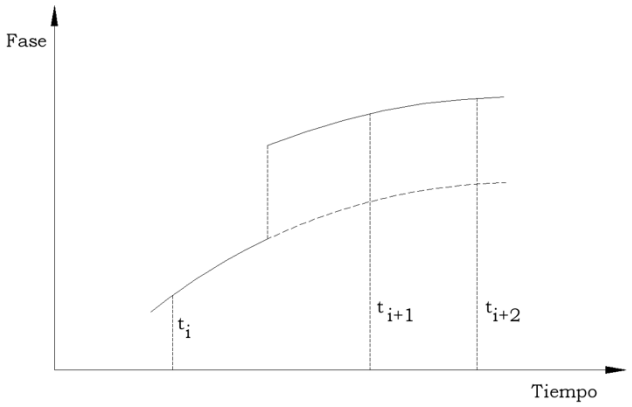


Figura III.36.- Representación gráfica de una pérdida de ciclo.

La ambigüedad inicial entera N_0 del satélite i es constante, ahora se puede dar el caso en que durante un periodo de tiempo se pierde la señal de la portadora y posteriormente se recupera. A este fenómeno se le denomina pérdida de ciclo (cycle slip) y en el contador de ciclos se reflejara mediante un salto en el "registro continuo" que equivaldrá a un número determinado de ciclos.

De forma esquemática esta pérdida de ciclo se puede ver representado en la figura anterior, donde si existe está perdida se ve reflejada mediante un escalón.

Estas pérdidas de ciclo se pueden deber a:

- Señal con ruido que se puede deber a diferentes causas:
  - Malas condiciones inosféricas
  - Baja elevación del satélite
  - Efecto multicamino
  - Movimiento del receptor con inclinación de la antena
- Ausencia de la señal del satélite por obstáculos: aviones, edificios, árboles, ….
- Error en el software del aparato receptor

Y su tratamiento adecuado tiene tres etapas la primera que es la detección de la pérdida de ciclo, posteriormente cuantificar esta pérdida de ciclo y por último la corrección de la misma.

A.- Detección de las pérdidas de ciclo.

La detección de las pérdidas de ciclo se hace a través de la medida de fase de la portadora así como de la medida de código. En una sola serie de observaciones de fase no puede ser determinada por lo que se recurre a los "test quantities" – magnitudes de prueba o valores de test, que salen a partir de combinaciones de diferentes observaciones así como otros observables con el objeto de determinar las diferencias para instantes de tiempo consecutivos.

Los "test quantities" más comúnmente utilizados dependiendo de los observables disponibles en uso civil son:

DATOS DISPONIBLES	VALORES DE TEST	
	UNA ESTACION	DOS ESTACIONES
Fase en una portadora (L1 ó L2)	Combinación de fase (residuo atmosférico)	Simples diferencias Dobles diferencias Triples diferencias
Fase en dos frecuencias (L1 y L2)		Combinaciones de dobles frecuencias y distancia calculada
Fase en una frecuencia y distancia calculada		

Tabla III.5.- Valores de test habituales.

A.1.- Análisis de las dobles diferencias y triples diferencias.

Para el uso de este método es necesario conocer la posición del receptor y del satélite a través de sus coordenadas. Las distancias se comparan con las observadas mediante dobles diferencias, estableciéndose por [SEEBE-93] la siguiente expresión para el residuo en cuestión:

$$Residuo_{distancia} = \phi_{satélite12}^{receptoresAB}(t) - \frac{1}{\lambda}\left[\rho_{satélite1}^{receptorB}(t) + \rho_{satélite1}^{receptorA}(t) + \rho_{satélite2}^{receptorB}(t) - \rho_{satélite2}^{receptorA}(t)\right] + dA$$

Este $Residuo_{distancia}$ se modeliza polinómicamente de forma que se puedan detectar las discontinuidades que a la postre son las pérdidas de ciclo.

El término dA representa los residuos atmosféricos, de forma principal el inosférico, que puede ser tenido en cuenta o no para distancias cortas.

La ventaja con la que se cuenta con este valor de test es que puede ser usado en receptores monofrecuencia, teniendo el inconveniente de la sensibilidad al ruido de la señal.

Si se supone una pérdida de ciclo Δ para el receptor A y el satélite $S1$ entre las épocas $t-1\ y\ t$, y dado otro receptor B haciendo observaciones simultáneamente y ambos a otro satélite $S2$, según las ecuaciones de dobles y triples diferencias, se pueden dar las siguientes combinaciones:

Fase Observada			
$\phi_A^{S1}(t-2)$	$\phi_A^{S2}(t-2)$	$\phi_B^{S1}(t-2)$	$\phi_B^{S2}(t-2)$
$\phi_A^{S1}(t-1)$	$\phi_A^{S2}(t-1)$	$\phi_B^{S1}(t-1)$	$\phi_B^{S2}(t-1)$
$\phi_A^{S1}(t)+\Delta$	$\phi_A^{S2}(t)$	$\phi_B^{S1}(t)$	$\phi_B^{S2}(t)$
$\phi_A^{S1}(t+1)+\Delta$	$\phi_A^{S2}(t+1)$	$\phi_B^{S1}(t+1)$	$\phi_B^{S2}(t+1)$
$\phi_A^{S1}(t+2)+\Delta$	$\phi_A^{S2}(t+2)$	$\phi_B^{S1}(t+2)$	$\phi_B^{S2}(t+2)$

Tabla III.6.- Variaciones en función de la fase observada.

Simples diferencias	
$\phi_{AB}^{S1}(t-2)$	$\phi_{AB}^{S2}(t-2)$
$\phi_{AB}^{S1}(t-1)$	$\phi_{AB}^{S2}(t-1)$
$\phi_{AB}^{S1}(t+\Delta)$	$\phi_{AB}^{S2}(t)$
$\phi_{AB}^{S1}(t+1)+\Delta$	$\phi_{AB}^{S2}(t+1)$
$\phi_{AB}^{S1}(t+2)+\Delta$	$\phi_{AB}^{S2}(t+2)$

Tabla III.7.- Efecto de pérdidas de ciclo en las ecuaciones con simples diferencias.

Dobles diferencias
$\phi_{AB}^{S1S2}(t-2)$
$\phi_{AB}^{S1S2}(t-1)$
$\phi_{AB}^{S1S2}(t)+\Delta$
$\phi_{AB}^{S1S2}(t+1)+\Delta$
$\phi_{AB}^{S1S2}(t+2)+\Delta$

Tabla III.8.- Efecto de pérdidas de ciclo en las ecuaciones con dobles diferencias.

Triples diferencias
$\phi_{AB}^{S1S2}(t-1,t-2)$
$\phi_{AB}^{S1S2}(t,t-1)+\Delta$
$\phi_{AB}^{S1S2}(t+1,t)$
$\phi_{AB}^{S1S2}(t+2,t+1)$

Tabla III.9.- Efecto de pérdidas de ciclo en las ecuaciones con triples diferencias.

Como queda demostrado, solamente se ve afectada una de las ecuaciones de triples diferencias, a partir de la cual puede detectarse la pérdida de ciclo ya que su residuo será grande.

A.2.- Análisis del residuo ionosférico.

En el caso de hacer las observaciones con receptores con doble frecuencia se pueden realizar análisis a partir de las diferencias entre las portadoras L1 y L2, por ello [SEEBE-93] propone como valor de test el siguiente:

$$Residuo_{ionosférico} = \Phi_{L1}(t) - \frac{f_{L1}}{f_{L2}}\Phi_{L2}(t)$$

la frecuencia, $f \Rightarrow unidad\ de\ medida: Hz = \frac{ciclos}{segundo}$

La ventaja con la que se cuenta con este valor de test es que el residuo inosférico sólo depende del estado de la ionosfera y su variación en el tiempo es muy lenta, además de que no es necesario conocer las coordenadas del receptor ni del satélite.

Por otro lado el inconveniente del método parte de que si se da la pérdida de ciclo de forma simultánea en las dos portadoras no se podrá calcular de forma unívoca al estar ambas relacionadas a través de la ecuación de Diophantine:

$$\Delta N = \Delta N_{L1} - \frac{f_{L1}}{f_{L2}}\Delta_{L2}$$

donde el término ΔN es el efecto resultante de la pérdida de ciclo total analizada en la ecuación $Residuo_{ionosférico}$, teniendo que resolver esta ecuación por métodos específicos.

A.3.-Análisis de dobles diferencias y distancia calculada.

Para el uso de este método es necesario conocer la posición del receptor y del satélite a través de sus coordenadas. Las distancias se comparan con las observadas mediante dobles diferencias, estableciéndose por [SEEBE-93] la siguiente expresión para el residuo en cuestión:

$$Residuo_{distancia} = \phi_{satélite12}^{receptoresAB}(t) - \frac{1}{\lambda}\left[\rho_{satélite1}^{receptorB}(t) + \rho_{satélite1}^{receptorA}(t) + \rho_{satélite2}^{receptorB}(t) - \rho_{satélite2}^{receptorA}(t)\right] + dA \quad \text{[III.164]}$$

Este $Residuo_{distancia}$ se modeliza polinómicamente de forma que se puedan detectar las discontinuidades que a la postre son las pérdidas de ciclo.

El término dA representa los residuos atmosféricos, de forma principal el inosférico, que puede ser tenido en cuenta o no para distancias cortas.

La ventaja con la que se cuenta con este valor de test es que puede ser usado en receptores monofrecuencia, teniendo el inconveniente de la sensibilidad al ruido de la señal.

A.4.- Análisis de las combinaciones de fase y códigos C/A y P.

En el caso de hacer las observaciones con un receptor que registra el código P, la pseudodistancia se puede observar de forma más precisa si se compara con la medida de fase, utilizando en este caso el valor de test siguiente, que depende sólo de un número entero N de ambigüedades:

$$Residuo_{códigoP} = \lambda\, \phi_{satélite}^{receptor}(t) + \lambda\, N - d(t)$$

Con este método se puede localizar pérdidas de ciclo de $\pm 3\, ciclos$ y se puede resolver casi en tiempo real.

Tiene la ventaja de que no depende ni de la ionosfera ni del conocimiento de las coordenadas del satélite ni del receptor y se comporta bien para correcciones de forma automática tanto en posicionamiento estático como cinemático.

A.5.- Consideraciones en observaciones cinemáticas.

En el caso de posicionamientos cinemáticos, como pueden ser las observaciones RTK, al menos un receptor está en movimiento y normalmente las ambigüedades son resueltas antes del comienzo de la medición, y por tanto la posición del receptor se puede calcular.

En este caso son necesarios más de cuatro satélites y si existiera en algún momento una pérdida de ciclo, la señal puede ser detectada y corregida respecto de los satélites restantes, pudiendo continuarse con la observación. Si no fuera así, se pierde la cuenta de las ambigüedades y la medición hay que rehacerla mediante un nuevo cálculo.

B.- Cuantificación y corrección de las pérdidas de ciclo.

En el caso de que en la observación se cuente con más de cuatro satélites y se produzca una pérdida de ciclo, siempre que se tenga la señal de cuatro de ellos, la pérdida se puede detectar y corregir con respecto a dichos satélites continuando la observación sin problema. Si no es así, se pierde la cuenta de las ambigüedades lo que obliga a reiniciar la medición con un nuevo cálculo, pudiendo seguir para ellos cuatro procedimientos diferentes.

- Método clásico: consiste en volver al último punto con coordenadas conocidas y determinar de nuevo la ambigüedad.
- Métodos predicitivos: en el caso de tener receptores de doble frecuencia consiste en utilizar los residuos ionosféricos, normalmente con un filtrado de Karman (OTF) para predecir el comportamiento dinámico en función de lo ocurrido durante la pérdida para una determinada época del valor del test y así cerrar la pérdida producida. Comparando el valor obtenido en el modelo con el observado hace posible por un lado la detección de la pérdida así como la cuantificación del salto producido y por tanto hace posible su corrección.
- Método basados en la interpolación: con técnicas de software complejo desarrollado al efecto y se basa en modelos que deduzcan lo ocurrido durante la pérdida para una determinada época del valor del test, en función de sus valores previos siempre que después de la pérdida se cuente con al menos seis satélites. Comparando el modelo con los valores reales, se puede detectar la pérdida de ciclo ya que ambas curvas deben ser prácticamente paralelas, haciendo por tanto un ajuste en la zona de la pérdida mediante regresión lineal o por mínimos cuadrados.
- Métodos físicos: consiste en dotar al receptor de un sensor adicional que junto con un reloj atómico externo sustituye a un satélite; este sensor de inercia interpola posiciones GPS en el caso de perdida de señal de un satélite.

3.5.3.2.- Técnicas de resolución de ambigüedades.

Recordando el fundamento de la medida de fase, se llegaba a que $D = \rho_{satélite}^{receptor} = \lambda N + \Delta\Phi$, el número N, definido como número entero de longitudes de onda no es conocido, y se denomina ambigüedad [HOFMA-01] [SEEBE-93].

La ambigüedad inicial N_0 es por tanto el número entero de ondas entre el receptor y satélite para un instante inicial, identificando en este momento el receptor el satélite en cuestión.

$$\lambda\, \phi_{satélite}^{receptor}(t) = \rho_{satélite}^{receptor} + c\,\Delta\delta + \lambda\, N\ - r_{ionosférico} - r_{troposférico}$$

Por otro lado, la ecuación definida para calcular una posición mediante dobles diferencias (para líneas base de menos de 20 km.), es la siguiente, en la cual la ambigüedad N_0 es incógnita.

$$\phi_{satélite12}^{receptoresAB}(t) = \frac{1}{\lambda}\rho_{satélite12}^{receptorAB}(t) + \ N_{satélite12}^{receptores\,B}$$

En esta expresión, por la longitud descrita de las líneas base, el retardo ionosférico y troposférico así como otros fenómenos, pueden ser despreciados, fenómeno no válido

para longitudes grandes de línea base que implicaría de usar esta ecuación una pérdida de precisión fundamentalmente así como degradación en el número entero N.

Cabe decir que es importante el uso de las dobles diferencias en vez de simples diferencias, ya que esta última incorporaría nuevas incógnitas al proceso, como es el tiempo del reloj.

Así, las ambigüedades pueden ser resueltas para líneas base cortas (<20 km.) con la siguiente expresión:

$$\phi_{satélite12}^{receptoresAB}(t) = \frac{1}{\lambda}\rho_{satélite12}^{receptorAB}(t) + N_{satélite12}^{receptoresAB} + Ruido$$

viéndose su resolución influenciada por los siguientes aspectos:

- número de satélites disponibles; a mayor número de satélites disponibles mayor será la redundancia y por tanto más fácil será el cálculo de ambigüedades.
- geometría de los satélites; que afecta a la información de la medida de fase al estar relacionada con el movimiento del satélite y por ende con el tiempo necesario para calcular la ambigüedad.
- efecto multicamino; aspecto crítico ya que contamina las observaciones de fase.

La resolución de ambigüedades comprende tres estadios fundamentales:

- *Definición de las combinaciones potenciales de ambigüedades.*

  Para ello es necesario definir una región donde se rastreará donde estén las posibles posiciones del receptor y por tanto una de ellas la verdadera. Esta región en el caso de observaciones cinemáticas se define mediante las pseudodistancias obtenidas por la observación del código.

  Esta región de búsqueda se puede acotar en el entorno de la posición aproximada y se va haciendo cada vez más pequeña a medida que el tiempo de observación aumenta ya que la desviación típica de los parámetros que se han estimado van disminuyendo y por tanto la región cada vez está más acotada.

  Ahora bien, al aumentar el tiempo también aumenta el número de posiciones potenciales del receptor y el tiempo de cálculo aumenta y se produce una ralentización del proceso, es por ello, para evitar estos contratiempos que se debe buscar una región de búsqueda óptima, de superficie mínima, que garantice que la posición real se encuentre en ella.

  De forma general, la zona de búsqueda se realiza a través de las observaciones y cálculo mediante dobles diferencias a partir de las desviaciones típicas de sus parámetros de ambigüedad; de forma usual se parte de un radio de $\pm 3\sigma$.

  Para minimizar la región de búsqueda y agilizar la solución se han desarrollado diferentes algoritmos y técnicas (FARA, FASF, LAMBDA y OMEGA).

- *Definición de las combinaciones adecuadas para los valores posibles de las ambigüedades.*

  Se basa en la selección de la combinación de un número entero que minimiza la suma de los residuos ajustándolo por mínimos cuadrados, ya que la combinación que mejor se adapte es el resultado correcto. Para que esto sea así debe haber suficiencia satelital de forma que haya redundancia.

- *Validación de las ambigüedades con test probabilísticos*

  Este tercer paso es una validación de las ambigüedades obtenidas, en el que sea realmente la solución adecuada depende del modelo utilizado (ecuaciones de observación), de la precisión de los observables y del método estimación de la ambigüedad utilizado a través de números enteros.

La resolución de las ambigüedades no siempre se puede llevar a cabo ya que existen efectos que no se tienen totalmente en cuenta como puedan ser el efecto multicamino, los efectos orbitales y de la atmósfera, cuya influencia es más importante para líneas

base largas. Además, los modelos estadísticos utilizados para discernir la combinación correcta presentan ciertos porcentajes de error.

Por tanto, las técnicas o métodos para resolver las ambigüedades son diferentes en función del enfoque que se le de a dicho análisis, pudiéndose hacer la siguiente clasificación:

- Métodos que se basan en el empleo de una única frecuencia(L1)
    - Método geométrico
    - Método directo
    - Técnicas de búsqueda
    - Función de ambigüedad
- Métodos que utilizan los datos observados en las dos frecuencias (L1 y L2)
    - Combinaciones de fase
    - Combinaciones de fase y código
- Métodos que permiten el movimiento del receptor
    - Número de satélites redundante
    - Número de satélites/antenas redundantes
    - Filtrado de Kalman
    - Resolución On de Fly (OTF)

A continuación se exponen dichas metodologías, haciendo especial mención en aquéllas que son de aplicación para el tema de la presente investigación.

A.- Método geométrico.

El satélite y el receptor están relacionados en función del tiempo, es decir, la distancia, variable, entre el satélite y el receptor se representa en función de la medida de fase sin tener en cuenta posibles pérdidas de ciclo. Las variaciones de distancia entre ambos puede ser determinadas mediante técnicas Doppler, de forma que se determinen las coordenadas del receptor. Determinadas estas coordenadas de la antena se calcula la distancia hasta el satélite y se hace una comparación con la obtenida mediante la medida de fase, obteniendo de este modo el valor de la ambigüedad N.

Las ventajas de este método geométrico es la simplicidad del mismo así como la validez para cualquier longitud de línea base, sin embargo tiene el inconveniente de requerir tiempos de observación muy prolongados de forma que haya una variación apreciable en la posición de los satélites.

Este método esta lógicamente, tal como se ha descrito, expuesto a los errores ionosférico y troposférico así como a las pérdidas de ciclo no recuperadas [SEEBE-93].

B.- Método directo.

Este método se basa en las ecuaciones obtenidas anteriormente de las dobles diferencias, en el que se hace un ajuste general de todos los parámetros, entre otros las ambigüedades. En la primera aproximación del método se considera la ambigüedad como un número real, perdiendo por tanto el carácter de número entero. El número entero asignado a la ambigüedad se obtiene como el que más se acerque al número obtenido como entero y que tenga la desviación típica más baja.

En este método influye mucho la refracción ionosférica y por tanto hay veces que este fenómeno debe ser modelado como ya se ha expuesto.

C.- Técnicas de búsqueda.

El objetivo de las técnicas de búsqueda es el de reducir en los posible el tiempo de observación, buscando la combinación de ambigüedades más probable y que por lo tanto será la óptima. A partir de las dobles diferencias, el algoritmo diseñado para la búsqueda, parte inicialmente de una solución aproximada limitando la solución del vector a valores enteros de ésta a partir de técnicas de optimización.

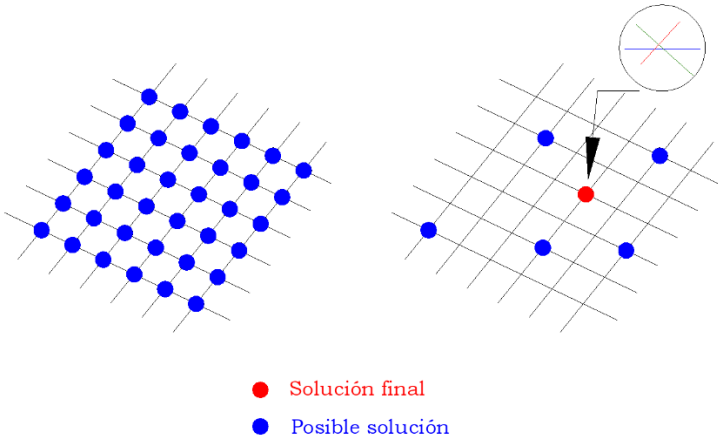


Figura III.37.- Técnicas de búsqueda.

El volumen de operaciones aumenta de forma muy rápida por lo que hay que hacer ciertas restricciones en el espacio de búsqueda ("volumen de búsqueda"), que se a partir de la solución real de la ambigüedad de cada satélite. Así es lógico pensar que el número de combinaciones posible es proporcional al número de satélites e inversamente proporcional al tiempo de observación, ya que a menos tiempo de observación se obtiene menos precisión de la solución flotante y de la zona de búsqueda.

Así, si tomamos de referencia la malla de la figura, la solución será el número entero que de forma significativa la posición en comparación con el resto de números.

Una alternativa a este proceso es, definida la malla de puntos (región de búsqueda), calcular las ambigüedades reales que le corresponden a la antena en cada uno de esos puntos, siendo en este caso la solución la correspondiente a aquélla en que se hayan obtenido todas y cada una de las ambigüedades cercanas a un número entero. Para este conjunto de ambigüedades se fijan sus valores al número entero correspondiente y más cercano y se recalcula la posición, que se toma como definitiva[SEEBE-93].

D.- Función de ambigüedad.

Este método parte de las simples diferencias en el que se llegaba a la siguiente expresión:

$$\phi_{satélite}^{receptoresAB}(t) = \frac{1}{\lambda}\rho_{satélite}^{receptorAB}(t) + N_{satélite}^{receptoresAB} - f\delta_{AB}(t)$$

donde:

$$\phi_{satélite}^{receptoresAB}(t) = \phi_{satélite}^{receptorB}(t) - \phi_{satélite}^{receptorA}$$
$$N_{satélite}^{receptoresAB} = N_{satélite}^{receptorB} - N_{satélite}^{receptorA}$$
$$\delta_{AB}(t) = \delta_B(t) - \delta_A(t)$$
$$\rho_{satélite}^{receptorAB}(t) = \rho_{satélite}^{receptorB}(t) - \rho_{satélite}^{receptorA}(t)$$

La ambigüedad es un número entero en base a la teoría de los números complejos, se llega a la siguiente función [HOFMA-01]:

$$\sum_{t=1}^{n_e}\left\|\sum_{j=1}^{n_s} e^{\left[i-\left(2\pi\phi_{AB}^{j}(t)-\frac{2\pi}{\lambda}\rho_{AB}^{j}(t)\right)\right]}\right\| = n_e n_j$$

El proceso asigna de forma inicial una solución aproximada para el receptor B (p.ej. triples diferencias), punto inicial que se coloca en el centro un cubo tal y como se puede ver en la siguiente figura, cubo que define la zona de búsqueda.

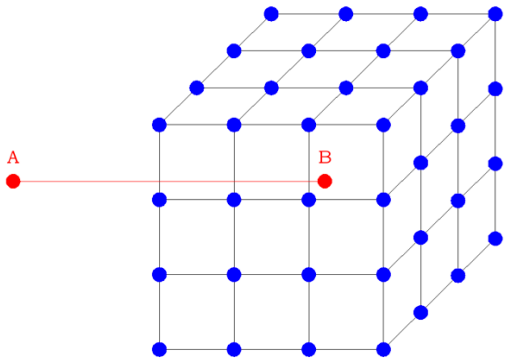


Figura III.38.- Técnicas de búsqueda.

Cada punto del cubo es una posible solución final, aplicando para cada uno de ellos la ecuación de dobles diferencias y calculando la función ambigüedad, siendo la solución definitiva donde es función se hace máxima.

Este método tiene la desventaja de no detectar las pérdidas de ciclo.

E.- Combinaciones de fase en ambas portadoras.

Con este método de forma general se obtienen datos más precisos y rápidos ya es un método que combina los anteriormente explicados. La resolución de ambigüedades mejora significativamente cuando se utilizan datos de doble frecuencia y fase. Hay muchas ventajas implícitas en los datos de doble frecuencia debido a las diversas combinaciones lineales posibles que se pueden realizar.

Las combinaciones más utilizadas son las de banda ancha y las de banda estrecha. Cogiendo las de banda ancha se tiene, datos de fase referentes a las frecuencias f1 y f2 por Φ1 y Φ2, entonces, según

$$\phi_{L1-L2} = \phi_{L1} - \phi_{L2} = \phi_w$$

$$\lambda_{L1}\,\phi^{receptor}_{satélite(L1)}(t) = \rho^{receptor}_{satélite} + c\,\Delta\delta + \lambda_{L1}\,N_{L1} - r_{ionosférico} - r_{troposférico}$$

$$\lambda_{L2}\,\phi^{receptor}_{satélite(L2)}(t) = \rho^{receptor}_{satélite} + c\,\Delta\delta + \lambda_{L2}\,N_{L2} - r_{ionosférico} - r_{troposférico}$$

$$\phi^{receptor}_{satélite(L1)}(t) = \frac{1}{\lambda_{L1}}\rho^{receptor}_{satélite} + \frac{c}{\lambda_{L1}}\Delta\delta + N_{L1} - \frac{1}{\lambda_{L1}}r_{ionosférico} - \frac{1}{\lambda_{L1}}r_{troposférico}$$

$$\phi^{receptor}_{satélite(L2)}(t) = \frac{1}{\lambda_{L2}}\rho^{receptor}_{satélite} + \frac{c}{\lambda_{L2}}\Delta\delta + N_{L2} - \frac{1}{\lambda_{L2}}r_{ionosférico} - \frac{1}{\lambda_{L2}}r_{troposférico}$$

$$\phi^{receptor}_{satélite(L1)}(t) - \phi^{receptor}_{satélite(L2)}(t) = \rho^{receptor}_{satélite}\left(\frac{1}{\lambda_{L1}} - \frac{1}{\lambda_{L2}}\right) + (N_{L1} - N_{L2}) - r_{ionosférico}\left(\frac{1}{\lambda_{L1}} - \frac{1}{\lambda_{L2}}\right) - r_{troposférico}\left(\frac{1}{\lambda_{L1}} - \frac{1}{\lambda_{L2}}\right)$$

Recuperando los datos de la portado L1 y L2:

$$Portadora\ L1 \Rightarrow 154\ f_0 = 1.575{,}42\ MHz$$

$$Portadora\ L2 \Rightarrow 120\ f_0 = 1.227{,}60\ MHz$$

La frecuencia asociada será por tanto de $[1.575{,}42 - 1.227{,}6 = 347{,}82\ MHz]$ al que le corresponde una longitud de onda de

- la frecuencia, $f \Rightarrow unidad\ de\ medida: Hz = \frac{ciclos}{segundo}$
- la fase, $\varphi \Rightarrow unidad\ de\ medida: ciclos$
- la longitud de onda, $\lambda \Rightarrow unidad\ de\ medida: \frac{m}{ciclo}$
- el periodo, $P \Rightarrow unidad\ de\ medida: segundo$

- la velocidad de la luz, c ⇒ $unidad\ de\ medida$: $\frac{m}{segundo}$

La relación entre ellos, se hace a través de las siguientes expresiones:

$$f = 2\pi\frac{1}{P} = \frac{c}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{c}{f}$$

con lo que sabiendo que $c \cong 29.9792.458\ \frac{m}{seg}$, se llega a que la longitud de onda asociada $\lambda_w = 86{,}192\ cm$ frente a las longitudes de onda, de menor magnitud, asociadas a las ondas portadoras, $\lambda_{L1} = 19\ cm\ y\ \lambda_{L2} = 24{,}4\ cm.$, lo que supone una ventaja de aquella en cuanto al espaciamiento de las ambigüedades .

$$\phi_{satélite(L1)}^{receptor}(t) - \phi_{satélite(L2)}^{receptor}(t) = \frac{1}{c}\rho_{satélite}^{receptor}(f_{L1} - f_{L2}) + (N_{L1} - N_{L2}) - \frac{1}{c}r_{ionosférico}(f_{L1} - f_{L2}) - \frac{1}{c}r_{troposférico}(f_{L1} - f_{L2})$$

Si se denomina:

$$\phi_w = \phi_{satélite(L1)}^{receptor}(t) - \phi_{satélite(L2)}^{receptor}(t)$$
$$f_w = f_{L1} - f_{L2}$$
$$N_w = N_{L1} - N_{L2}$$

la expresión anterior quedaría:

$$\phi_w = \frac{f_w}{c}\rho_{satélite}^{receptor} + N_w - \frac{f_w}{c}r_{ionosférico} - \frac{f_w}{c}r_{troposférico}$$

De esta forma, con esta expresión obtenida, se puede calcular la ambigüedad N_w con cualquiera de los métodos anteriores, y una vez conocida calcular la ambigüedad N_{L1} con las siguiente expresión

$$N_{L1} = \phi_{satélite(L1)}^{receptor}(t) - \frac{f_{L1}}{f_w}(\phi_w - N_w) + \frac{(f_{L1} - f_{L2})(f_{L1} + f_{L2})(r_{ionosférico} - r_{troposférico})}{cf_{L1}f_{L2}\left(\frac{1}{f_{L1}} - \frac{1}{f_{L2}}\right)}$$

En la expresión anterior la parte correspondiente a los retardos atmosféricos pueden ser despreciados en líneas base cortas al poder hacer la consideración de tener condiciones atmosféricas semejantes. Si las líneas base son largas hay que modelizar los retardos atmosféricos según lo expuesto.

F.- Combinación de fases en las dos frecuencias y código.

El factor menos fiable de la expresión obtenida en el apartado anterior es el retardo ionosférico y que además tiene un efecto creciente proporcional al incremento de longitud de la línea base. Este efecto ionosférico puede ser eliminado mediante este método por la combinación y comparación de la medida de fase en las dos frecuencias y el código.

Los modelos de fases en doble frecuencia y código se pueden expresar:

$$\phi_{satélite(L1)}^{receptor}(t) = \frac{1}{\lambda_{L1}}\rho_{satélite}^{receptor} + \frac{c}{\lambda_{L1}}\Delta\delta + N_{L1} - \frac{1}{\lambda_{L1}}r_{ionosférico} - \frac{1}{\lambda_{L1}}r_{troposférico}$$
$$\phi_{satélite(L2)}^{receptor}(t) = \frac{1}{\lambda_{L2}}\rho_{satélite}^{receptor} + \frac{c}{\lambda_{L2}}\Delta\delta + N_{L2} - \frac{1}{\lambda_{L2}}r_{ionosférico} - \frac{1}{\lambda_{L2}}r_{troposférico}$$
$$R_{L1} = \rho_{satélite}^{receptor} + c\Delta\delta + r_{ionosférico1}$$
$$R_{L2} = \rho_{satélite}^{receptor} + c\Delta\delta + r_{ionosférico2}$$

Operando con estas cuatro ecuaciones se llega a:

$$N_{L1} = \phi_{satélite(L1)}^{receptor}(t) + \frac{f_{L1}^2 + f_{L2}^2}{f_{L2}^2 - f_{L1}^2}R_{L1} - \frac{2f_{L1}f_{L2}}{f_{L2}^2 - f_{L1}^2}R_{L2}$$

$$N_{L2} = \phi^{receptor}_{satélite(L2)}(t) + \frac{2f_{L1}f_{L2}}{f_{L2}^2 - f_{L1}^2}R_{L1} - \frac{f_{L1}^2 + f_{L2}^2}{f_{L2}^2 - f_{L1}^2}R_{L2}$$

De este modo:

$$N_w = N_{L1} - N_{L2} = \phi_w - \frac{f_{L1} - f_{L2}}{f_{L1} + f_{L2}}(R_{L1} + R_{L2})$$

Así se puede comprobar en dicha expresión que la ambigüedad es independiente tanto de la longitud de la línea base como de los efectos atmosféricos, en especial el ionosférico, siendo en este caso crítico los posibles efectos multicamino.

De esta forma, con esta expresión obtenida, se puede calcular la ambigüedad N_w con cualquiera de los métodos anteriores, y una vez conocida calcular la ambigüedad N_{L1} con las siguiente expresión:

$$N_{L1} = \frac{f_{L1}}{f_w}\,\phi^{receptor}_{satélite(L1)}(t) - \frac{f_{L2}}{f_w}\left(\phi^{receptor}_{satélite(L2)}(t) + N_w\right) - \left(\frac{\rho^{receptor}_{satélite}}{c} + \rho^{receptor}_{satélite}\,t\right)(f_{L1} + f_{L2})$$

G.- Resolución de ambigüedades On The Fly (OTF).

Este método para resolver ambigüedades se utiliza cuando uno de los receptores está en movimiento y en ocasiones se denomina también como método On The Run (OTR) o como Ambiguity Resolution On The Fly (AROF) [HOFMA-01].

El espacio de búsqueda se define a través de la medida de la pseudodistancia obtenida a través del código de fase, dando esta posición de la antena como la de partida, estimada, ampliando y definiendo por tanto el espacio de búsqueda con la desviación estándar, así tenemos que el espacio de búsqueda es: $[centro\ de\ la\ antena\ \pm 3\sigma]$. Esta posición inicial de la antena, es usual estimarla combinando observaciones de código y fase en diferentes épocas conforme a triples diferencias.

Ahora bien, el espacio de búsqueda se puede definir a través de diferentes figuras geométricas, como pueden ser cubo, cilindro o elipsoide normalmente.

El objetivo por tanto es reducir el tamaño del espacio de búsqueda, es decir, el número de combinaciones de ambigüedades enteras; para ello es necesario que los datos de código de fase sean los más precisos posibles y por tanto que los receptores han de ser capaces de captar señales con bajo volumen (formar el correlador de banda estrecha) y que además incluyan algoritmos que reduzcan el efecto multicamino, llegando con esto a <10 cm.

Para reducir aún más el espacio de búsqueda, los receptores han de formar combinaciones de banda ancha reduciendo el número de combinaciones de ambigüedades ya que su longitud de onda asociada es de 86 cm.

De esta forma, es usual proceder para resolver ambigüedades OTF, con algoritmos que en banda ancha resuelvan las ambigüedades enteras, calculando una posición que luego se afina resolviendo con ella ambigüedades para L1.

Aplicando para un espacio de forma cúbica en el que cada esquina del cubo tiene una posición denominada C, la ambigüedad se puede calcular según la siguiente expresión, a partir de la obtenida de las dobles diferencias:

$$\phi^{receptoresAB}_{satélite12}(t) = \frac{1}{\lambda}\rho^{receptorAB}_{satélite12}(t) + N^{receptoresAB}_{satélite12}$$

$$N^{receptoresAB}_{satélite12} = \frac{1}{\lambda}\rho^{receptorAB}_{satélite12}(t) - \phi^{receptoresAB}_{satélite12}(t)$$

$$N^{recept\square resAB}_{satélite12} = \phi^{receptoresAB}_{satélite12}(t) - \frac{f}{C}\left[\rho^{receptorA}_{satélite1}(t) - \rho^{receptorBC}_{satélite1}(t)\right] + \frac{f}{C}\left[\rho^{receptorA}_{satélite2}(t) - \rho^{receptorBC}_{satélite2}(t)\right]$$

La ambigüedad N se calcula para cada vértice del cubo y así se puede calcular su volumen, si bien el número de ambigüedades crece con el número de satélites y por

tanto un software de resolución avanzado con el que se pueda determinar la posición para cada época.

En este método la posición de una época a la siguiente se debe propagar realizando un descarte progresivo de las posiciones que van siendo descartadas.

Así, para la época inicial se calcula como se ha expuesto la posición por dobles diferencias y para las épocas siguientes se realiza la nueva posición del receptor según la ecuación de triples diferencias recalculando las ambigüedades según la expresión conocida, repitiéndola para cada época:

$$N_{satélite12}^{receptoresAB}(1) = N_{satélite12}^{receptoresAB}$$

La solución adoptada es la que tenga menor error cuadrático medio.

3.6.- PRECISIÓN DE LAS OBSERVACIONES GPS.

3.6.1.- Aspectos generales.

La precisión de las observaciones GPS es consecuencia de todos los factores que intervienen en la medida, y su estudio está ligado a los posibles errores que se cometen durante la observación, pudiéndose establecer su clasificación como:

- Sistemáticos, diferenciándose, a su vez, tres tipos según sea su fuente de error:
    - Debidos al sector espacial, concretándose en los errores, la determinación de las órbitas, errores en el estado del reloj y geometría de la constelación.
    - Debidos al receptor: Falta de sincronización del reloj y centrado de la antena.
    - Debidos a la propagación de la onda a través de la atmósfera: Refracción troposférica e ionosférica.
- Accidentales: Son errores accidentales y, por lo tanto, difíciles de detectar y corregir. El más frecuente es el llamado efecto multicamino según el cual una señal es recibida tanto directamente del satélite como de otra fuente que actúa reflejando la señal emitida.

Los errores sistemáticos pueden ser corregidos en gran medida a través de modelos matemáticos o bien a partir de combinaciones matemáticas formadas según relaciones algebraicas cuyo efecto es la eliminación del error. Unos valores orientativos para conocer el orden de magnitud de los errores anteriores se encuentran en [GARCI-93]: Error en el posicionamiento del satélite: 2 m.; 0.2 ppm., error ionosférico: 1 ppm.; error troposférico: 0.4 ppm.; ruido del receptor: 0.5 m. hasta 1.5 m.

3.6.2.- Errores debidos a la componente espacial.

Las causas de los errores achacables a la componente espacial pueden ser:

3.6.2.1.- Errores de reloj.

Pueden ser originados por su estabilidad y su sincronización. Debido a la estabilidad de los relojes utilizados su deriva tiene una influencia despreciable, del orden del milímetro.

La influencia de la sincronización puede establecerse en 10-9 segundos, lo que implica un error de unos 30 cm., que se puede eliminar durante el cálculo.

3.6.2.2.- Errores en la órbita.

Pueden ser considerados también como un error de la componente de control. Su cuantificación puede expresarse a partir de la expresión:

$$\frac{db}{b} = \frac{dr}{r} \qquad \text{[III.188]}$$

Esta expresión relaciona el error en una base (db) debido a un error orbital (dr) en función de la longitud de la base (b) y del vector topocéntrico del satélite (r).

Para distancias del orden de 20000 km. y una bondad de las efemérides entre 20 m. y 80 m., resulta:

$$10^{-6} < \frac{dr}{r} < 4x10^{-6}$$

La mejora de las efemérides se logra mediante el seguimiento de los satélites desde estaciones de las que se conocen sus coordenadas con precisión a través de técnicas VLBI.

3.6.2.3.- Errores por la configuración geométrica de los satélites.

La configuración geométrica de los satélites visibles, así como de la estación, determina, al igual que en las intersecciones inversas, la bondad de las coordenadas. Esta geometría, variable en el tiempo, se cuantifica mediante un valor adimensional denominado dilución de la precisión (DOP).

La obtención del valor del DOP se realiza a partir de la matriz de diseño para conseguir las coordenadas a partir de la medida de pseudodistancias. Así:

$$\overline{X} = A\,\overline{L} \qquad \text{[III.189]}$$

donde A vale:

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{X_p(t)-X_1}{D_1} & -\frac{Y_p(t)-Y_1}{D_1} & -\frac{Z_p(t)-Z_1}{D_1} & 1 \\ -\frac{X_p(t)-X_2}{D_2} & -\frac{Y_p(t)-Y_2}{D_2} & -\frac{Z_p(t)-Z_2}{D_2} & 1 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ -\frac{X_p(t)-X_n}{D_n} & -\frac{Y_p(t)-Y}{D_n} & -\frac{Z_p(t)-Z_n}{D_n} & 1 \end{bmatrix} \qquad \text{[III.190]}$$

donde:

(X_P, Y_P, Z_P) *son las coordenadas de la estación*

(X_i, Y_i, Z_i) *son las coordenadas de los satélites* $(i = 1,2, \dots, n)$

$D_i'^{l}$ *es la distancia con las coordenadas aproximadas.*

La matriz A se caracteriza porque los tres primeros elementos de cada fila son las componentes del vector que une la estación con el satélite considerado. Existirá solución siempre que el determinante sea no nulo. Este es además proporcional al producto escalar:

$$(D_4' - D_1')(D_3' - D_1')(D_2' - D_1') \qquad \text{III.191]}$$

Su interpretación geométrica es el volumen de la figura formada por el punto estación y la intersección de cada uno de los vectores estación-satélite con una esfera de radio unitaria y centrada en el punto estación. Cuanto mayor sea el volumen mejor será la geometría, siendo:

$$PDOP = \frac{1}{v} \qquad \text{[III.192]}$$

PDOP: indicador de precisión en la posición 3D.

Más genéricamente pueden calcularse los DOP a partir de $(A^T A)^{-1}$, que es la matriz de los parámetros incógnitas de los ajustes. Se suele expresar de la forma [LEICK-04]:

$$C_{xx} = (A^T A)^{-1} = \begin{bmatrix} q_{xx} & q_{xy} & q_{xz} & q_{xt} \\ q_{yx} & q_{yy} & q_{yz} & q_{yt} \\ q_{zx} & q_{zy} & q_{zz} & q_{zt} \\ q_{tx} & q_{ty} & q_{tz} & q_{tt} \end{bmatrix} \qquad \text{[III.193]}$$

La matriz de covarianzas se obtendrá multiplicando la matriz anterior por el factor de varianza a priori o desviación estándar de la medida de pseudodistancias. Así:

$$Q_{xx} = \sigma_o^2 C_{xx} \qquad \text{[III.194]}$$

Uno de los criterios de optimización de la configuración geométrica de ajuste es que la traza C_{xx} sea mínima. En el sistema GPS, este hecho se expresa a partir de los DOP según:

$$\sigma_i = DOP\ \sigma_o \qquad \text{[III.195]}$$

Los DOP se suelen discretizar en:

$$GDOP = \sqrt{q_{xx} + q_{yy} + q_{zz} + q_{tt}} \Rightarrow dilución\ geométrica\ de\ la\ precisión$$

$$PDOP = \sqrt{q_{xx} + q_{yy} + q_{zz}} \Rightarrow dilución\ de\ la\ precisión\ de\ la\ posición\ 3D$$

$$HDOP = \sqrt{q_{xx} + q_{yy}} \Rightarrow dilución\ de\ la\ precisión\ planimétrica$$

$$VDOP = \sqrt{q_{zz}} \Rightarrow dilución\ de\ la\ precisión\ altimétrica$$

$$TDOP = \sqrt{q_{tt}} \Rightarrow dilución\ de\ la\ precisión\ de\ tiempo$$

Así:

$$\sigma_p = \sigma_o\ PDOP$$

$$\sigma_v = \sigma_o\ VDOP$$

$$\sigma_H = \sigma_o\ HDOP$$

$$\sigma_T = \sigma_o\ TDOP$$

$$\sigma_G = \sigma_o\ GDOP$$

Como la configuración óptima es la que minimiza la diagonal, conviene que los DOP sean lo menores posibles. En general, se recomienda que PDOP sea menor de 6 o que GDOP sea menor de 8 para aceptar la configuración. Es de destacar que los valores de los DOP pueden conseguirse a partir de la posición aproximada de la estación y de los satélites, obtenidos a partir de un almanaque, lo que permite conocer a priori los momentos más favorables para la observación.

3.6.3.- Errores debidos al efecto multicamino.

Su definición puede concretarse en la recepción de la señal emitida por un satélite desde varios caminos debido a la existencia de superficies reflectantes en las cercanías de la antena.

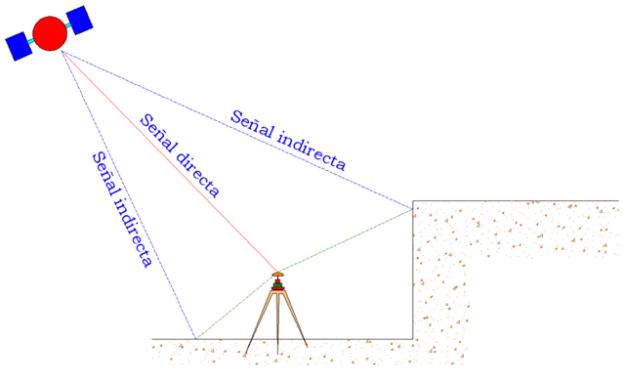


Figura III.39.- Efecto multicamino.

Su efecto se deja notar tanto en las pseudodistancias como en la medida de fase, con variaciones proporcionales al camino recorrido realmente por la trayectoria.

La variedad infinita de geometrías que puede plantearse hace que no exista un modelo para su cálculo. Sin embargo, puede estimarse su valor a partir de combinaciones de medida de fase de la portadora L1 y L2. Se basan en la eliminación de los errores comunes, quedando únicamente aspectos como el error ionosférico, el efecto multicamino y el ruido de la medición, independientes de la frecuencia. Estimando el error ionosférico, el error residual indicará, en cierta medida, el efecto multicamino, el cual puede afectar a la medida de pseudodistancias con errores de 10 a 20 m., y, sin embargo, a la medida de fase con errores centimétricos, [HOFMA-01]. Su efecto se puede calcular a partir de:

$$A_D = A\cos\phi \qquad \text{[III.196]}$$

$$A_R = \alpha\, A\cos[\phi + \Delta\phi] \qquad \text{[III.197]}$$

siendo:

$A\ es\ la\ amplitud\ de\ la\ señal\ directa$

$A_D\ es\ la\ señal\ directa$

$A_R\ es\ la\ señal\ reflejada$

$\alpha\ es\ el\ factor\ de\ influencia\ [0 \le \alpha \le 1]$

$\alpha = 0\ no\ existe\ reflexión\ de\ la\ señal$

$\alpha = 1\ la\ señals\ reflejada\ es\ tan\ fuerte\ como\ la\ original$

$\phi\ es\ la\ fase\ de\ la\ señal\ original$

$\Delta\phi\ es\ el\ incremento\ de\ fase\ de\ la\ señal\ reflejada$

Superponiendo ambas señales:

$$A\cos\phi + \alpha\, A\cos[\phi + \Delta\phi] = \beta_M A\cos[\phi + \Delta\phi_M] \qquad \text{[III.198]}$$

donde la amplitud recibida es función del término β_M de valor:

$$\beta_M = \sqrt{1 + \alpha^2 + 2\alpha\cos\Delta\phi} \qquad \text{III.199]}$$

El error en la medida de fase es función de $\Delta\phi_M$, siendo su valor:

$$\Delta\phi_M = arctan\left[\frac{\sin\phi}{\alpha^{-1}+\cos\phi}\right] \qquad \text{[III.200]}$$

Para $\alpha = 1$ el máximo error se comete para $\phi = 90$, es decir, un cuarto de ciclo, con lo que la influencia en la amplitud será de hasta 5 $centímetros$ en L1.

Para reducir el efecto multicamino se recomienda:

- Seleccionar estaciones sin superficies reflectantes cercanas.
- Utilizar antenas que sean capaces de evitar señales reflejadas.
- Utilizar materiales absorbentes en las cercanías de la antena.

3.6.4.- Efectos del centrado de la antena.

El punto realmente estacionado es el centro radioeléctrico de la antena, que no coincide con el centro geocéntrico debido a dos causas principales:

- Motivos de fabricación.
- Variación del centro radioeléctrico en función de la elevación, acimut e intensidad de la señal recibida.

En general se recomienda utilizar el mismo tipo de antenas y orientarlas hacia la misma dirección.

3.6.5.- Influencia de los efectos relativistas.

Respecto al sistema de referencia empleado por GPS el sistema ligado a cada satélite sufre un movimiento no uniformemente acelerado. Por lo tanto, se deberá tener en cuenta la teoría general de la relatividad que se traduce en cuatro aspectos básicos que se desarrollan en los siguientes apartados.

3.6.5.1.- Influencia en las órbitas de los satélites.

El campo gravitatorio terrestre produce perturbaciones en las órbitas de los satélites, quedando reflejadas en los parámetros del movimiento perturbado que se envía en el mensaje GPS.

3.6.5.2.- Influencia en la señal emitida por el satélite.

El campo gravitatorio produce una curvatura en el espacio-tiempo por lo que debe corregirse la distancia. Su cuantificación se propone en [HOFMA-01]. Su efecto se traduce en un error máximo de 18,7mm. en posicionamiento absoluto y en 0.001 ppm. en posicionamientos relativos, por lo que es prácticamente despreciable.

3.6.5.3.- Influencia en el reloj del satélite.

La frecuencia del reloj del satélite (10.23 MHz) por efectos relativistas sufre una variación entre la emitida y la recibida en la tierra según la expresión:

$$\Delta f = -4{,}464\ 10^{-10} f_o \qquad \text{[III.201]}$$

siendo

f_o *la frecuencia recibida.*

Por lo tanto, si se desea recibir una señal con una frecuencia de 10.23MHz, el satélite deberá emitir con una frecuencia básica de:

$$10{,}23 - 4{,}464\ 10^{-10} = 10{,}229999543\ MHz$$

3.6.5.4.- Influencia en la frecuencia del reloj del receptor.

Se estima que la variación de frecuencia en el oscilador del receptor tiene un valor de 10^{-12}, que corresponde a 10 nanosegundos cada 3 horas. Esta corrección es, generalmente, aplicada por el software del receptor.

4. ANÁLISIS MODAL OPERACIONAL PARA ESTRUCTURAS EVOLUTIVAS EN FASE DE CONSTRUCCIÓN.

4.1.- ESTADO DEL ARTE Y MOTIVACIÓN EN EL AVANCE EN LA INVESTIGACIÓN.

La construcción de puentes, y en concreto cuando el proceso constructivo se realiza mediante empuje del tablero desde uno o ambos estribos, tiene un control geométrico protocolizado a partir del propio proyecto de empuje, donde se marcan cada uno de los parámetros geométricos y estructurales a controlar en cada una de las fases. En este tipo de procesos constructivos, se realiza de forma general, a partir del control geométrico en la punta de lanzamiento, de tal manera que los desplazamientos obtenidos sobre ella sean del mismo orden que los previstos en la fase de proyecto; y en el caso de no ser así, determinar si pudiera deberse a defectos en la construcción o fallos en el propio empuje, y poder corregir cualquier anomalía.

Con los datos de control marcados por el propio proyecto de empuje, la experiencia ha sancionado que son suficientes para el objeto principal del proceso, que es la construcción con seguridad del tablero, y por lo tanto su llegada al punto final para el que fue diseñado, para su posterior finalización mediante la ejecución de la losa de compresión, base de la futura rodadura. Además, todos estos datos son suficientes para dar cumplimiento con la normativa actual para estas tipologías.

En el caso de la presente investigación y dada la cantidad de datos que generan las observaciones GPS y la precisión con que los obtiene, se plantea además de llevar a cabo el clásico control geométrico durante la fase del empuje del tablero, y por tanto mejorar en sí mismo dicho proceso, tomar datos que permitan llevar a cabo controles geométricos complementarios que permitan dar un valor añadido a dichos datos que incluso podrían llegar a evitar otros controles que suelen ser más complejos, laboriosos y costosos en procesos y fases posteriores.

Esto implica pasar del análisis de los datos dentro del cálculo estático a realizar un análisis de los mismos en el campo del cálculo dinámico, es decir, de considerar que las cargas que se aplican sobre la estructura son constantes o inapreciablemente variables en el tiempo a ser cargas variables en el espacio y en el tiempo y por tanto producir fuerzas de inercia que han de ser consideradas en el cálculo, pero con un matiz fundamental para el desarrollo de esta investigación, y es que estas cargas se producen durante la fase constructiva del puente, y por tanto, se pretende aprovechar la información para sacar resultados durante la ejecución, no solo desde el punto de vista estático y por tanto un control geométrico estándar y como tradicionalmente se ha realizado, sino que dentro del campo del análisis dinámico se pueda obtener más información sobre la bondad con la que se está realizando la construcción en cuanto a otros parámetros estructurales.

Por lo tanto, el avance de la investigación en este nuevo camino, como complementariedad a todo el control geométrico planteado inicialmente, viene además motivado porque existen muchos estudios de medida de movimientos vibratorios con acelérometros y algunos, muy pocos, de medida de movimientos con GPS, ambas para *estructuras en servicio*, sin embargo, la toma de este tipo de datos necesarios para un análisis dinámico durante *estructuras en construcción* se limita a puentes singulares ((y en ocasiones ni siquiera en éstos), utilizando acelerómetros de forma generalizada y con un uso del GPS de forma residual con apenas referencias en la actualidad, limitándose el uso de este último al control geométrico.

Dentro del campo del cálculo estático, el GPS ha demostrado que es eficiente para controlar todos los parámetros geométricos que tradicionalmente se han realizado en obra con la Estación Topográfica, sin embargo, parece lógico estudiar la aplicación de los datos tomados con GPS para un análisis dinámico durante el proceso constructivo de puentes, toda vez que es en estas fases cuando se dan los mayores movimientos en

la secciones críticas y por tanto se tendrá información del comportamiento real de la estructura en situaciones extremas, información adicional sobre la calidad de la estructura, información adicional de apoyo al proceso constructivo e información adicional de seguridad estructural y todo ello con un coste adicional mínimo.

Se estará por tanto, ante unas comprobaciones dinámicas realizadas de forma sistemática que podrían dar información más completa que la prueba de carga dinámica que puede o no ser obligatoria según el tipo de puente que se trate.

En España, según la -Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera IAP-11-, *las pruebas de carga dinámicas serán preceptivas, en puentes de luces superiores a sesenta metros o en aquellos cuyo diseño sean inusual, se utilicen nuevos materiales o contengan zonas de tránsito peatonal en las que se prevea que las vibraciones pueden causar molestias a los usuarios. En estos casos, en el proyecto se determinarán los parámetros dinámicos estructurales (modos principales de vibración, sus frecuencias correspondientes y amortiguamiento).*

Por otro lado, la normativa española, recoge las -Recomendaciones para la realización de pruebas de carga de recepción en puentes de carretera-, en el que de forma general marca las medidas a realizar en una prueba de carga estática, que se pueden resumir a continuación, en la siguiente tabla:

TIPOLOGÍA DE TABLERO	ELEMENTOS A MEDIR
De forma genérica	Flecha en el centro del vano
	Descenso de apoyos
Sección cajón	Más puntos para el efecto torsional
Tablero de vigas	Mínimo 3 vigas
Metálico o Mixto	Deformaciones unitarias del acero

Tabla III.10.- Elementos a controlar en una prueba de carga estática.

Las mediciones necesarias para la prueba se realizan comúnmente con estación topográfica, relojes de medida y extensómetros, siendo la primera la utilizada de forma habitual durante la construcción.

En cuanto a las pruebas de carga dinámicas, este mismo documento de recomendaciones, pretende *obtener información sobre la estructura, más allá de la proporcionada por la prueba de carga estática, determinando ciertos parámetros que identifican las características intrínsecas de la estructura, así como su respuesta bajo excitación externa*, consiguiendo resultados tanto en el dominio del tiempo como el de la frecuencia, de forma que se obtenga, entre otros:

- Líneas de influencia.
- Acelerogramas.
- Espectros de frecuencia.
- Modos de vibración.
- Impacto.
- Amortiguamiento.
- Detección de anomalías funcionales: vibraciones en tirantes, movimientos en apoyo imprevistos, etc.

Para ello la normativa actual, prevé el uso de instrumentación, generalmente acelerómetros como se ha indicado anteriormente y con el objetivo de "*detectar posibles anomalías en la estructura, tales como esfuerzos no previstos en el cálculo, incomodidad de uso de la estructura, desviaciones de la frecuencia de vibración respecto a las teóricas (aspecto que hace por ejemplo que cumpliendo la flecha con la esperada ponga de manifiesto una variación de la masa con respecto al cálculo).*"

La investigación adicional que se propone en esta tesis, es la utilización de los datos obtenidos con GPS, más allá de lo que en la práctica se viene utilizando, intentando obtener características intrínsecas de la estructura, es decir, analizar que aplicación puede tener el GPS en el análisis dinámico del puente.

Para ello, es necesario que las mediciones tomadas por el GPS sean tomadas a intervalos de tiempo suficientemente pequeños para que se puedan tratar como una monitorización a los efectos perseguidos, (obtención de características dinámicas intrínsecas).

De forma generalizada, esta toma de datos se ha realizado de forma asidua con acelerómetros, sin embargo la técnica no está exenta de dificultades, ajuste del punto de referencia del desplazamiento, los errores acumulados como consecuencia de la doble integración, la introducción de ruido motivado por el cable de conexión entre el aparato y el módulo de almacenamiento, el mantenimiento continuo de todo el cableado, etc., y por lo tanto su uso queda reservado para puentes singulares.

Datos similares tomados con GPS han permitido experimentos con éxito en la medición de desplazamientos, pero siempre en estructuras en servicio y muy flexibles, [PSIMO-07], tales como puentes colgantes y edificios de gran altura, consiguiendo determinar su frecuencia modal cuando ésta es superior a 1 Hz.

El tener medida de desplazamientos, GPS en este caso, da un valor adicional a la lectura que se obtiene con los acelerómetros, ya que la doble integración que conlleva pasar de aceleraciones a desplazamientos, da lugar a desplazamientos bastante inexactos a partir de aceleraciones aparentemente adecuadas.

De todas estas reflexiones se puede explicar el motivo por el que se pretende en esta tesis un avance en la investigación del alcance que se pueda obtener de los datos conseguidos con GPS, en estructuras en fase de construcción y dentro del campo del análisis dinámico, para su posible uso como alternativa, sin más instalaciones de las que ya tiene la propia obra y no tener que recurrir a personal especializado en la misma, incorporándolo dentro de los trabajos normales de topografía y control de calidad de la obra, y por lo tanto la propuesta de uso como alternativa del GPS frente a tradicionales acelerómetros, ya que las experiencias previas en este campo, han demostrado que el GPS puede medir el desplazamiento con precisión dentro de un cierto rango de amplitud y frecuencia.

4.2.- ANALISIS MODAL OPERACIONAL.

4.2.1.- Acercamiento al análisis modal operacional.

Debido al número de puentes construidos en los últimos años y su necesidad de mantenimiento a lo largo de los próximos años, existe una importancia creciente sobre el conocimiento del estado de la estructura para poder actuar en tiempo real, si fuera posible, sobre cualquier alteración en sus parámetros fundamentales. La técnica en el campo de los puentes se denomina monitorización de la salud estructural SHM (Structural Health Monitoring), capaz de diagnosticar su estado en cuasi tiempo real.

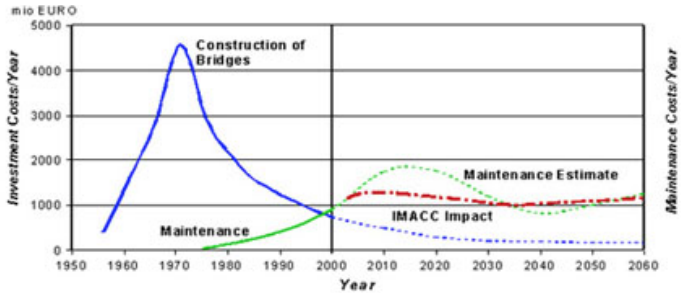


Figura III.40.- Relación entre la edad de los puentes y sus necesidades de mantenimiento (SAMCO).

El objetivo es la identificación de los parámetros modales (formas modales, frecuencias naturales y amortiguamiento) a partir de datos experimentales, diferenciando entre los que consiguen los datos a partir de una excitación producida por instrumentos externos que producen sobre el puente la acción pretendida o los que aprovechan la excitación producida por agentes ambientales, tales como el viento.

Una ventaja adicional de estos últimos es que están siempre presentes con lo que la monitorización puede ser continua y por tanto ver la evolución de los parámetros a lo largo del tiempo, incluso ante cualquier efecto que pueda sufrir el puente como un grave accidente, un terremoto, etc., idea principal esta de la salud estructural.

En ambos métodos de excitación, el objetivo es la identificación de los parámetros modales de la estructura a partir de una toma de datos de calidad, y por lo tanto realizar un diagnóstico basado en la vibrometría, técnica conocida como Análisis Modal Operacional, OMA (Operational Modal Analysis) y establecer una referencia esencial para poder diagnosticar el estado de una estructura.

Esta técnica, se basa en que una estructura vibra continuamente según unas frecuencias y unas formas modales conocidas, que además se pueden medir. De este modo, el OMA no requiere un conocimiento de las fuentes de excitación de la estructura, sino que se basa únicamente en medidas en diferentes puntos de la estructura, de forma que tratando los datos obtenidos a través de los algoritmos adecuados se convierte esta información obtenida en indicadores relevantes con información sobre contextos de daño previsible, así como su evolución e importancia.

4.2.2.- Fundamento de la Vibrometría para el análisis modal operacional.

El objeto de la vibrometría es la caracterización modal de la estructura, ya que en el caso de que la estructura esté afectada de alguna manera por un daño estructural, sus parámetros modales se verán afectados con respecto a los inicialmente previstos. Es decir, esta variabilidad servirá para identificar, cuantificar y localizar el posible daño a partir de los datos vibrométricos tomados a lo largo del tiempo en la estructura en estudio.

Además, el análisis vibrométrico tiene la ventaja por un lado de ser un método que permite inspeccionar de forma global toda la estructura y la de ser una técnica no destructiva.

Los métodos vibrométricos se pueden dividir en:

- Análisis Modal Experimental EMA (Experimental Modal Analysis).
- Análisis Modal Operacional OMA (Operational Modal Analysis).

Los primeros, Análisis Modal Experimental EMA (Experimental Modal Analysis), se basan en producir una vibración conocida mediante un impacto para posteriormente medir la respuesta, respuesta que adecuadamente tratada mediante algoritmos, ya sea en el dominio del tiempo o en el de la frecuencia, se caracteriza modalmente. Este método tiene una aplicación limitada en puentes debido a la dificultad de producir la vibración descrita de forma que se puedan activar todos sus modos, ya que requiere de la instalación de unos dispositivos demasiado costosos sobre él.

Los segundos, los de Análisis Modal Operacional OMA (Operational Modal Analysis), se registra la respuesta aprovechando las vibraciones naturales producidas por el viento o por el tráfico, no requiriendo por tanto esos costosos elementos auxiliares, utilizando posteriormente algoritmos más sofisticados de forma que se filtre el ruido producido. Las técnicas empleadas en el OMA se pueden clasificar en función del dominio en el que trabajen, sean en el dominio del tiempo o en el dominio de la frecuencia.

Las que se desarrollan en el dominio de la frecuencia, parten de la toma de datos de la señal a lo largo del tiempo y la transforman al dominio de la frecuencia. En este

campo se pueden distinguir principalmente dos técnicas, la primera la FDD (Frequency Domain Decomposition) que se basa en descomponer los valores singulares en los picos de los espectros de frecuencia, y la segunda la p-LSCF (Polyreference Least Squares Complex Frequency Domain Method) que proporciona diagramas de estabilización de claros. Por otro lado en el domino del tiempo se distingue entre la técnica de iteración por subespacios estocásticos conducido por las series temporales de la covarianza de los registros tomado SSI-COV (Covariance-driven Stochastic Subspace Identification) y la técnica de iteración por subespacios estocásticos conducido por las series temporales de datos (SSI-DATA).

Todos estos algoritmos generalizados para los campos aeronáuticos y mecánicos, tienen que ser desarrollados de forma personalizada en ingeniería civil, en concreto para cada estructura, y es por tanto un campo abierto con mucha proyección.

4.2.3.- Análisis modal operacional en estructuras evolutivas.

En los dos apartados anteriores, se ha explicado de forma sucinta el Análisis Modal Operacional, sus antecedentes y su objetivo, si bien de nuevo se ha visto como es una técnica aplicada normalmente sobre *estructuras en servicio*, sin embargo lo que se pretende en esta tesis es aplicarlo a estructuras en construcción, y más concretamente a puentes empujados, lo que lleva por tanto a denominar la aplicación pretendida como Análisis Modal Operacional en Estructuras Evolutivas.

Se ha visto como, en el caso de que una estructura, sobre todo si es muy flexible, suele tener una frecuencia fundamental, frecuencia que se diferencia en gran medida de las restantes. Esta frecuencia, y por tanto el periodo, depende básicamente de la inercia, es decir, de la rigidez de la estructura, y de la masa de la misma. Por lo tanto, a través de la frecuencia, se pueden hacer comprobaciones en las que intervenga la masa y la rigidez.

Continuando con los argumentos de (Cap. III – Apdo.[4.1.]), la prueba de carga estática sólo comprueba la rigidez y en concreto sólo de la parte de la estructura que es la que tiene influencia de esa flecha. Por ejemplo, si se tiene una estructura con cuatro vanos, y la carga se encuentra en el segundo vano, lo que aporta es sólo la rigidez de ese vano. Sin embargo, cuando se pasa a estudiar la vibración, integra toda la estructura.

Ahora bien, en el caso objeto de esta tesis de una *estructura evolutiva*, es decir, una estructura que se va construyendo por fases, fases en la que la flexibilidad es alta, si se pudiera en cada una de las fases calcular o comprobar el periodo de vibración respecto al teórico, se tendría una historia de todas las fases constructivas y por lo tanto se tendría caracterizada la bondad del modelo y de la correcta ejecución de todas las fases constructivas, de tal manera que si en cualquier momento se produce una diferencia entre el periodo de vibración teórico y el real, se sabe en tiempo real que existe alguna anomalía durante la construcción, por ejemplo, una sección con error de ejecución, una soldadura deficientemente ejecutada, un exceso de hormigón en la losa, etc., es decir se tiene un alto grado de control durante la ejecución. Es una comprobación de cada una de la secciones de la estructura a medida que se va ejecutando y por tanto se tiene conocimiento del grado de bondad de las mismas.

Esta alta flexibilidad de la estructura es la que sirve para que durante el proceso constructivo se tengan periodos y amplitudes lo suficientemente grandes como para que puedan ser medidas con instrumentos topográficos y geodésicos, y en concreto con GPS y lo que induce a llevar a cabo la presente investigación. Por lo tanto, si durante la construcción se está obligado a tener un control de deformaciones, en concreto con GPS, sin más incremento de aportación de instrumentos a la obra, simplemente con un intervalo de toma de datos adecuado y posteriormente tratados con el correspondiente algoritmo, se pueden obtener los periodos de vibración de la estructura en tiempo real.

En una estructura es muy importante tener en cuenta que el periodo es intrínseco a ella y que independientemente de la amplitud, el periodo siempre es constante. Por ejemplo, el amortiguamiento que tenga la estructura hará que baje la amplitud pero el periodo se mantendrá inalterable. *Por este motivo, el periodo es un dato muy potente sobre el que merece la pena profundizar en esta investigación,* y para ello hay que entrar en el cálculo dinámico de estructuras, aspecto que se tratará en el siguiente apartado.

Resumiendo, se puede decir que el control geométrico clásico realizado sobre las estructuras evolutivas es una prueba de carga estática. La investigación de esta tesis en esta línea, es que con la misma toma de datos que sirve para este control geométrico, tomándolos a intervalos adecuados y con un tratamiento de los mismos en tiempo real, se realice una prueba de carga dinámica con toda su aportación adicional de conocimiento estructural, puntualizando de nuevo, con los mismos datos y con un tratamiento adecuado de los mismos.

Es decir, se propone realizar un Análisis Modal Operacional en fase de construcción para estructuras evolutivas, a partir de la excitación ambiental, en concreto el viento, a través de una auscultación con GPS, con el objetivo de identificar sus parámetros modales (formas modales, frecuencias naturales y amortiguamiento) y así poder contrastar la bondad del modelo con la que se está ejecutando la obra en cuanto a sus principales parámetros estructurales.

4.3.- ANALISIS DINÁMICO DE ESTRUCTURAS, METODOS Y CONCLUSIONES DE APLICACIÓN EN ESTRUCTURAS EVOLUTIVAS.

4.3.1.- Introducción.

Toda estructura vibra continuamente según frecuencias y formas modales conocidas, que se pueden obtener a través diferentes formas de hacer las medidas adecuadas. La obtención de los parámetros modales de la estructura; frecuencias naturales, formas modales y el factor de amortiguamiento; sirve para compararlos con los valores teóricos obtenidos a partir de los modelos de cálculo utilizados para dimensionar la estructura.

Un diagnóstico basado en la vibrometría se ha expuesto que está basado en que una estructura vibra continuamente según unas frecuencias y unas formas modales conocidas, que además se pueden medir y que por tanto ni requiere fuentes externas de excitación ni su conocimiento, sino que se basa únicamente en medidas en diferentes puntos de la estructura, de forma que tratando los datos obtenidos a través de los algoritmos adecuados se convierte esta información obtenida en indicadores relevantes con información sobre contextos de daño previsible, así como su evolución e importancia.

Un sistema dinámico es aquel sobre el que actúa una carga dinámica, definiendo ésta como la que tiene una variación en el tiempo, es decir $\vec{p} = \vec{p}(t)$. Al ser la carga un vector, se considerará variable cuando varíen algunos de los tres parámetros por los que todo vector viene definido, su módulo, su dirección o su sentido en un sistema de referencia.

De forma concreta en los puentes existen de forma general cuatro tipo de acciones que pueden provocar vibraciones ($\sim movimientos\ con\ aceleración$), el sismo, el viento, el tráfico o maquinaria adosada a la estructura, y éstas tendrán importancia sobre la estructura en función de su influencia sobre el periodo fundamental de vibración de ella.

4.3.2.- Conceptos básicos de los sistemas dinámicos.

Para ello se parte de un movimiento periódico, que es aquel que se repite a intervalos regulares de tiempo. En este movimiento, se define como periodo T, el tiempo

necesario para que el sistema se repita, es decir, para realizar una vibración completa. Su inversa se denomina frecuencia $f = \frac{1}{T}$, y corresponde al número de vibraciones completas por unidad de tiempo. La distancia que hay en cada momento hasta la posición de equilibrio se denomina elongación u, siendo la amplitud A, la elongación máxima del movimiento periódico en estudio.

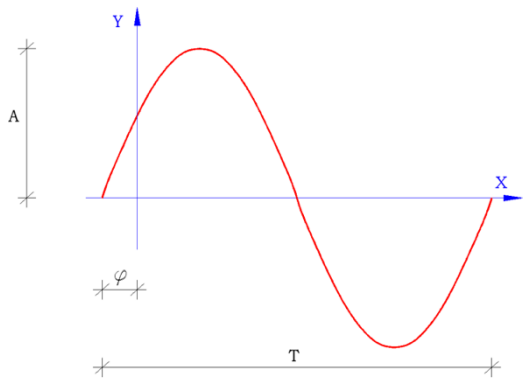


Figura III.41.- Parámetros fundamentales del movimiento periódico.

Siendo:

A *es la amplitud de la oscilación*

ω *es la velocidad angular* $\Rightarrow \omega = 2\pi f$

T *es el periodo de oscilación* $\Rightarrow T = 1/f$

f *es la frecuencia de oscilación*

$\omega t + \varphi$ *es la fase de oscilación.*

φ *es la fase inicial*

4.3.3.- Análisis dinámico a partir del sistema estático.

Tradicionalmente se han realizado los cálculos desde el análisis estático, si bien por los motivos que previamente se han comentado, toma cada vez más importancia el análisis dinámico, en el que comparando ambos hay que tener en cuenta una serie de consideraciones:

- Las cargas sobre la estructura son variables en el tiempo.
- La rigidez es idéntica en ambos análisis, salvo en casos muy puntuales donde se considera la rigidez dinámica.
- Las masas en movimiento establecen la aparición de fuerzas proporcionales a las aceleraciones.
- Aparecen fuerzas no conservativas de amortiguamiento, disipadoras de energía del sistema.

De este modo, a la hora de realizar un análisis dinámico de una estructura, hay que tener en cuenta las fuerzas de carácter elástico tradicionalmente utilizadas en el cálculo estático, si bien además: las fuerzas de inercia y las fuerzas de amortiguamiento, sobre las que habrá que realizar un modelo de cálculo al que se le asigna una interconexión entre puntos característicos que se definan, cada uno de ellos con sus propiedades intrínsecas en cuanto a comportamiento (elástico, plástico, etc.), masa y coeficiente de amortiguamiento así como las cargas aplicadas variables en el tiempo.

El modelo de cálculo ha implicado una discretización de la estructura, por lo que su resolución vendrá referida a una respuesta ante la acción en cada uno de los puntos y

en cada uno de los instantes elegidos, surgiendo entonces el concepto de grados de libertad, que se pueden asimilar a los parámetros que precisan la ubicación del modelo empleado en cada instante.

Como el modelo, la estructura, tiene que estar en equilibrio según estos grados de libertad, lleva a la resolución mediante un sistema de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales.

4.3.4.- Determinación de la respuesta dinámica.

La respuesta dinámica de un continuo se obtiene a partir de la ecuación del movimiento, en la que el sistema se encuentra en equilibrio cuando cada una de las fuerzas que actúan sobre el mismo, incluyendo las fuerzas de inercia, dan cumplimiento en cada instante a las ecuaciones de equilibrio estático.

El sistema sobre el que se establece el equilibrio dinámico puede ser un sistema continuo o un sistema discreto. En el caso de sistemas continuos el equilibrio se plantea mediante la resolución de un sistema de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, mientras que en el caso de sistemas discretos dependerá del número de grados de libertad asignados, dando lugar a un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias de coeficientes constantes.

De este modo se tiene un sistema dinámico, caracterizado por una carga dependiente del tiempo, $\vec{p} = \vec{p}(t)$ que provoca flechas dependientes del tiempo $\vec{y} = \vec{y}(t)$.

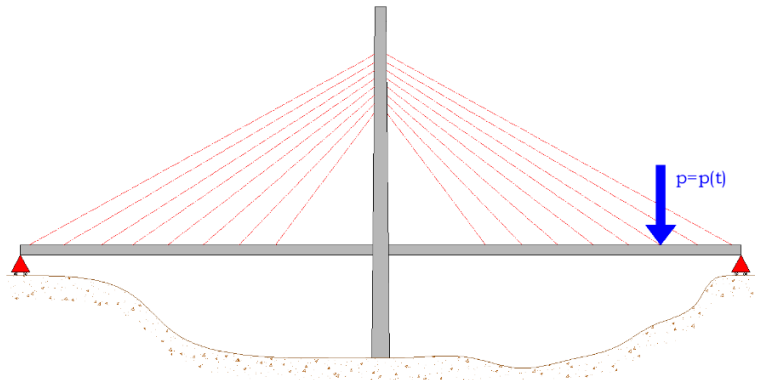


Figura III.42.- Esquema de una carga dependiente del tiempo en una estructura atirantada..

En la que:

$$\vec{p} = \vec{p}(t) \Rightarrow \vec{y} = \vec{y}(t) \qquad \text{[III.202]}$$

$$\vec{v} = \frac{d\vec{y}}{dt} \; ; \; \vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} \neq 0$$

Al estar relacionadas las flechas (deformaciones) con la velocidad y la aceleración se llega a que la aceleración no es nula ($\vec{a} \neq 0$) y por lo tanto existen fuerzas de inercia en el sistema.

$$\overrightarrow{F_{inercia}} = m\,\vec{a} \neq 0 \qquad \text{[III.203]}$$

De este modo, en un sistema dinámico en el que las esfuerzos se equilibran con las cargas, hay que considerar las fuerzas de inercia producidas como consecuencia de las cargas dependientes del tiempo.

En estos sistemas, el equilibrio viene expresado a través de la siguiente ecuación matemática:

$$p(t) = ky + c\frac{dy}{dt} + m\frac{d^2y}{dt^2} \qquad \text{[III.204]}$$

donde:

- m *es la masa.*
- c *es el coeficiente de amortiguamiento.*
- k *es la rigidez.*
- ky *es la fuerza elástica.*
- $c\frac{dy}{dt}$ *es la fuerza de amortiguamiento.*
- $m\frac{d^2y}{dt^2}$ *es la fuerza de inercia.*

que en el caso de N-Grados de Libertad:

- $[m]$ *es la matriz de masas.*
- $[C]$ *es la matriz de amortiguamiento.*
- $[K]$ *es la matriz de rigidez*

Tanto la matriz de rigidez, como la matriz de amortiguamiento así como la matriz de masas, son características de la estructura. La matriz de desplazamientos se obtendrá en función de las fuerzas aplicadas aplicadas sobre la estructura en el momento dado.

El siguiente paso será determinar la solución de esta ecuación del movimiento que dependerá, como se ha expuesto anteriormente, si es un sistema continuo o discreto.

En el caso de un sistema dinámico continuo se resuelve a partir del equilibrio en un elemento diferencial de la estructura en estudio en un instante de tiempo t. Si se analiza por ejemplo a partir de un elemento viga biapoyada con una carga $\vec{p} = \vec{p}(t)$,

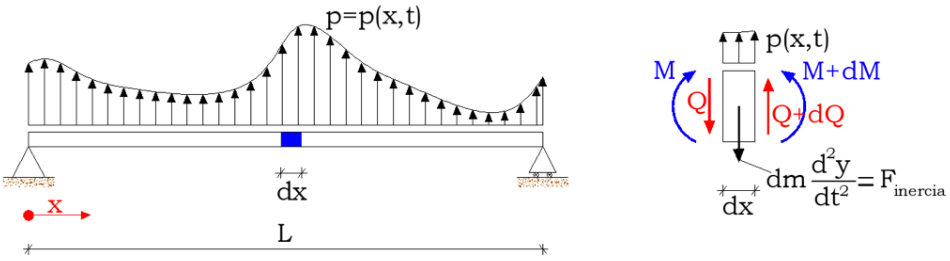


Figura III.43.- Viga bajo carga temporal distribuida y equilibrio dinámico en la rebanada elemental.

donde:

- M *es el momento flector.*
- Q *es el cortante.*
- $p(x,t)$ *es la carga aplicada sobre el elemento diferencial.*

y haciendo equilibrio de fuerzas sobre la rebanada elemental:

$$\sum F = 0 \Rightarrow dQ + p(x,t)dx - \gamma dx\frac{d^2y}{dt^2} = 0 \qquad \text{[III.205]}$$

$$\sum M = 0 \Rightarrow dM + Qdx = 0 \qquad \text{[III.206]}$$

$$Ecuación\ constituiva \Rightarrow M = EI\frac{d^2y}{dx^2} \qquad \text{[III.207]}$$

De la ecuación [III.206], se obtiene:

$$\frac{-dM}{dx} = Q \Rightarrow \frac{-d}{dx}\left(EI\frac{d^2y}{dt^2}\right) = Q$$

$$\frac{-d^2}{dx^2}\left(EI\frac{d^2y}{dt^2}\right) = \frac{dQ}{dx} \Rightarrow dQ = \frac{-d^2}{dx^2}\left(EI\frac{d^2y}{dt^2}\right)dx$$

donde:

- E *es el módulo de elasticidad*
- I *es la inercia*

Sustituyendo en [III.205], se tiene:

$$\frac{-d^2}{dx^2}\left(EI\frac{d^2y}{dt^2}\right)dx + p(x,t) - \gamma dx\frac{d^2y}{dt^2} = 0$$

Que suponiendo que la inercia es constante en la estructura ($I = cte.$):

$$EI\frac{d^4y}{dx^4} + \gamma dx\frac{d^2y}{dt^2} = p(x,t) \qquad \text{[III.208]}$$

se obtiene la ecuación diferencial en derivadas parciales.

En el caso de un sistema dinámico discreto, la estructura se discretiza tanto espacial como temporalmente, discretización que se puede llevar a cabo por diferentes métodos:

- Método de las masas concentradas.
- Método de los elementos finitos.
- Método de los desplazamientos generalizados.

Todos ellos llevan a buscar la solución del sistema de ecuaciones diferenciales descrita previamente para N-Grados de Libertad

$$p(t) = [K]y + [C]\frac{dy}{dt} + [m]\frac{d^2y}{dt^2} \qquad \text{[III.209]}$$

y que se puede afrontar desde diferentes métodos o formas de análisis, siendo los más comunes:

- Análisis en el dominio del tiempo
    - Análisis Modal Espectral
    - Métodos de superposición modal
    - Métodos directos de integración
- Análisis en el dominio de la frecuencia

Con estos métodos y análisis se obtiene la respuesta del sistema lineal, siendo el último a través del domino de la frecuencia, que desde el punto de vista de ésta tesis es el que se va a desarrollar en profundidad para avanzar en la investigación a partir de los datos obtenidos en los diferentes experimentos.

El motivo del estudio de los datos a través del dominio de la frecuencia, es debido a que se tiene la serie de datos a lo largo del tiempo, y permite de forma relativamente directa determinar algunas características dinámicas intrínsecas a la estructura ensayada, tales como sus modos de vibración, sus frecuencias propias, etc.

4.3.5.- Relación entre la toma de datos, el cálculo dinámico y el OMA.

Como ya se ha comentado anteriormente, las estructuras vibran de forma continua según frecuencias y formas modales conocidas, y éstas se pueden obtener a partir de las medidas que se realicen.

Para entender mejor el fenómeno, si se tiene aplicada una fuerza sobre un determinado cuerpo, la dinámica del cuerpo estará respondiendo conforme a la ecuación [III.204], y por tanto estará sometido a vibraciones forzadas. Sin embargo, si lo que se hace es causar un impacto sobre dicho cuerpo, impacto en un momento dado que cesa, el cuerpo se quedará vibrando de forma libre, lo que significa que el

término $p(t)$ de dicha ecuación es nulo salvo en el instante de la aplicación, y por tanto la suma de los términos es nula pero no así cada uno de los términos por separado de la ecuación, ya que el cuerpo sigue vibrando libremente. De este modo, al ser $[k], [m]\, y\, [c]$ conocidas, la ecuación tendrá una solución en y, siendo estas soluciones las formas modales de la estructura. De aquí parte la fundamentación de todo lo que se pretende, ya que si se mide en diferentes puntos de la estructura, se pueden conocer los modos de la estructura y por lo tanto conocer el comportamiento real de la misma. Todas las frecuencias obtenidas son función de la rigidez k, de la masa m y de las condiciones de contorno.

Es importante recordar que cada frecuencia tiene asociada una forma modal, con lo que un cambio en los parámetros modales está indicando un cambio en la respuesta de la estructura, como es función $f\left(\frac{k}{m}\right)$, habrán tenido que variar, o la rigidez o la masa o las condiciones de contorno, justificándose que midiendo en pocos puntos de la estructura, se pueda conocer el comportamiento global de la estructura y no de un elemento aislado de la misma.

El procedimiento de trabajo para poner en práctica estas ideas fundamentales, se explican en los siguientes apartados, si bien de forma resumida se podría esquematizar del siguiente modo:

- Obtención de la medida: En este tipo de trabajos, tradicionalmente se han medido aceleraciones en puntos conocidos de la estructura a lo largo de un tiempo conocido. *Esta tesis propone medir desplazamientos frente a las tradicionales aceleraciones.*
- Las medidas se hacen con cargas medioambientales, (OMA), y por tanto no hay que excitar la estructura con elementos externos, no hay que introducir vibraciones forzadas. Por lo tanto, es fundamental saber que de este modo se puede medir en cualquier momento y no estar condicionados a la ejecución de la acción externa, que ocasionalmente incluso pudieran producir algún tipo de daño sobre la misma.
- El tratamiento de datos para conseguir la extracción modal, es decir obtenidos los desplazamientos en el dominio del tiempo, se trata de transformar todos ellos al dominio de la frecuencia, de forma que se pueda identificar las frecuencias fundamentales que tiene la estructura en estudio. En cada una de las frecuencias habrá una forma modal asociada, tal y como se desarrolla en el siguiente apartado.
- Con los resultados obtenidos se llega a conocer el comportamiento real de la estructura, que mediante comparación con los datos del modelo estructural, normalmente un modelo en elementos finitos, permite llegar a conclusiones sobre el estado de la misma, en este caso en fase de construcción.

4.4.- EL ANÁLISIS DINÁMICO DE LAS ESTRUCTURAS A TRAVÉS SU ANÁLISIS ESPECTRAL. EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA.

4.4.1.- Introducción.

El análisis espectral está fundamentado en descomponer un determinado fenómeno físico en componentes separadas con respecto a la frecuencia, es decir, se trata en el caso de esta tesis, la descomposición del movimiento en cabeza del tablero que se está empujando, en sus frecuencias fundamentales, con el conocimiento añadido que da sobre la estructura para evitar por ejemplo fenómenos de resonancia, evitar sobretensiones, bondad de su comportamiento dinámico, etc., de forma que se garantiza una situación de control óptimo durante la fase de empuje.

Para poder realizar este control dinámico sobre la estructura, se puede trabajar en el dominio del tiempo en el que los parámetros estructurales obtenidos se obtienen

considerando el tiempo como variable, o se puede trabajar en el dominio de la frecuencia, en el que los citados parámetros estructurales se obtienen considerando como variables las diferentes frecuencias en las que se descompone el movimiento armónico del tablero.

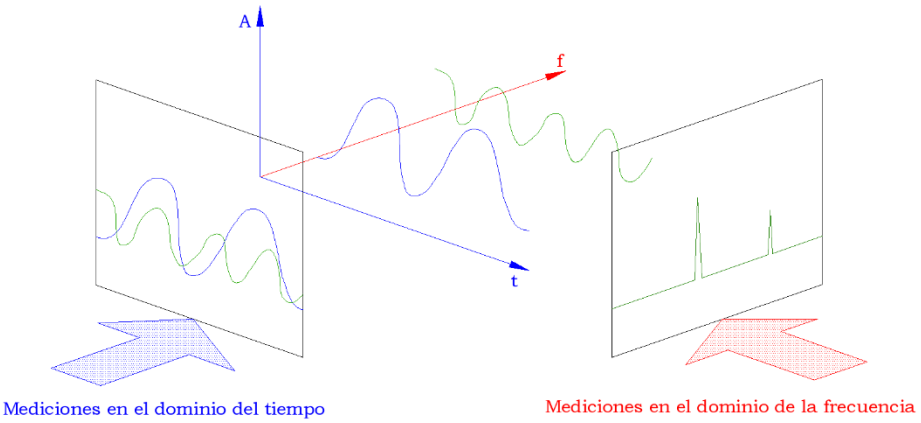


Figura III.44.- Significado del dominio temporal y la frecuencia.

Para poder realizar un análisis espectral adecuado así como una interpretación correcta del mismo se hace necesario un conocimiento matemático así como su interpretación física del tratamiento de las series de datos que se obtienen de la toma de datos de campo, para poder inferir las frecuencias, la densidad espectral, etc.

La ingeniería civil a través del tratamiento matemático ha tratado en muchas ocasiones de simplificar la complejidad inicial de un problema, utilizando técnicas de transformación de ecuaciones, que logran reducir su complejidad inicial a través de un cambio de dominio, siendo el análisis espectral uno de ellos. El instrumento matemático utilizado para la obtención de toda esta información necesaria es la transformada de Fourier, herramienta matemática que arroja la información frecuencial de una determinada función de la que se conoce su determinación a lo largo del tiempo, pudiendo además realizar la transformada inversa, es decir, pasar igualmente del campo de la frecuencia al temporal.

Es importante diferenciar la Serie de Fourier y la Transformada de Fourier; a través de la primera cualquier distribución temporal se puede descomponer en un sumatorio de distribuciones espaciales sinusoidales, utilizando la segunda cuando se tienen señales aperiódicas. Las condiciones en las que una función periódica se puede desarrollar en serie de Fourier vienen dadas por el Teorema de Dirichlet [BRACE-99]- [JAMES-11].

En el caso de que la toma de datos arroje señales discontinuas, según se verá tal y como demuestra Gibbs [CARSL-05], el error permanece constante en el entorno de la discontinuidad aunque se incremente el número de muestras, si bien es cierto que irá tendiendo a cero en el resto de puntos.

La transformada de Fourier demanda un número muy elevado de operaciones, tantas como el cuadrado de las muestras obtenidas, y por tanto mucho tiempo de cálculo, motivo por el cual se desarrolla un algoritmo de optimización de tiempo y operaciones, conocido como la Transformada Rápida de Fourier. Es el algoritmo en estos momentos más empleado para el paso del domino del tiempo a la frecuencia y viceversa.

4.4.2.- Las funciones periódicas a través de la serie de Fourier.

4.4.2.1.- Las funciones periódicas

Una función es periódica cuando los valores que toma son iguales en intervalos regulares, siendo el periodo $T(seg.)$ el tiempo entre dos repeticiones, es decir:

$$\bar{f}(t' + T) = \bar{f}(t') \qquad \text{[III.210]}$$

La constante T, de la fórmula anterior, de valor mínimo que da validez a la fórmula se designa como periodo y en el caso de funciones temporales viene expresado en segundos. Y siendo la frecuencia, la inversa del periodo, expresando el número de ciclos por segundo (Hz):

$$f = \frac{1}{T} \qquad \text{[III.211]}$$

Un ciclo equivale a 2π radianes, por lo que se denomina pulsación o frecuencia angular como:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \qquad \text{[III.212]}$$

que tiene como unidades $\frac{rad}{seg}$ ó $\frac{1}{seg}$.

En una función periódica es usual definir los valores pico de la onda, que equivalen a los valores máximos y mínimo en un periodo, siendo el valor de pico a pico la diferencia entre ellos, a saber:

$$\left.\begin{matrix} V_{máx} = máximo\left[\bar{f}(t')\right] \\ V_{mín} = mínimo\left[\bar{f}(t')\right] \end{matrix}\right] \Longrightarrow V_{pico-pico} = V_{máx} - V_{mín} \qquad \text{[III.213]}$$

Viniendo el valor medio de una función periódica según:

$$V_{medio} = \frac{1}{T}\int_0^T \bar{f}(\tau)d\tau \qquad \text{[III.214]}$$

4.4.2.2.- La serie de Fourier.

Según el Teorema de Dirichlet, si una función $f(t)$ es continua y periódica con periodo $T = 2\pi$, se puede descomponer en un sumatorio de funciones sinusoidales [BRACE-99]., siendo la frecuencia de éstas múltiplo de la función periódica, y tiene un desarrollo en serie de Fourier convergente:

$$f(t) = a_0 + \sum_{j=1}^{\infty} a_j \cos(jt) + b_j \sin(jt) \qquad \text{[III.215]}$$

Que aplicada al caso concreto resulta

$$f(t) = a_0 + \sum_{j=1}^{\infty} a_j \cos\left(\frac{2\pi}{T_0}jt\right) + b_j \sin\left(\frac{2\pi}{T_0}jt\right) \qquad \text{[III.216]}$$

Los coeficientes $a_0, a_j\ y\ b_j$, representan las amplitudes de las funciones seno y coseno, siendo $\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0}$, la frecuencia angular fundamental de la señal, y por tanto $\frac{2\pi}{T_0}j = j\omega_0$, simboliza el $j-ésimo$ armónico de la frecuencia fundamental.

El coeficiente a_0 se calcula integrando la función anterior en un periodo completo:

$$\int_{-T_0/2}^{T_0/2} f(t)\,dt = \int_{-T_0/2}^{T_0/2} a_0 dt + \int_{-T_0/2}^{T_0/2}\left[\sum_{j=1}^{n} a_j \cos\left(\frac{2\pi}{T_0}jt\right) + b_j \sin\left(\frac{2\pi}{T_0}jt\right)\right]dt$$

al estar evaluando en un periodo completo, las integrales de $\cos\left(\frac{2\pi}{T_0}jt\right) y \sin\left(\frac{2\pi}{T_0}jt\right)$ son cero, con lo que:

$$\int_{-T_0/2}^{T_0/2} f(t)\,dt = \int_{-T_0/2}^{T_0/2} a_0 dt = a_0 T_0$$

y por lo tanto:

$$a_0 = \frac{1}{T_0}\int_{-T_0/2}^{T_0/2} f(t)\,dt$$

Por su parte, los coeficientes a_j se calculan a partir de la ecuación [III.216] multiplicando a ambos lados por $\cos\left(\frac{2\pi}{T_0}jt\right)$ e integrando igualmente sobre un periodo completo:

$$\int_0^{T_0} f(t)\cos\left(\frac{2\pi}{T_0}jt\right) = \int_0^{T_0}\left[a_0 + \sum_{j=1}^{n} a_j\cos\left(\frac{2\pi}{T_0}jt\right) + b_j\sin\left(\frac{2\pi}{T_0}jt\right)\right]\cos\left(\frac{2\pi}{T_0}jt\right) \quad \text{[III.217]}$$

deduciéndose que:

$$a_j = \frac{2}{T_0}\int_{-T_0/2}^{T_0/2} f(t)\cos\left(\frac{2\pi}{T_0}jt\right)dt \quad siendo\ j = 1,2,3,\ldots$$

$$b_j = \frac{2}{T_0}\int_{-T_0/2}^{T_0/2} f(t)\sin\left(\frac{2\pi}{T_0}jt\right)dt \quad siendo\ j = 1,2,3,\ldots$$

La expresión general [III.216]], se puede truncar a un polinomio de grado n, siempre que $|a_n| + |b_n| \neq 0$

$$p_n(t) = a_0 + \sum_{j=1}^{n} a_j\cos\left(\frac{2\pi}{T_0}jt\right) + b_j\sin\left(\frac{2\pi}{T_0}jt\right) \quad \text{[III.218]}$$

4.4.2.3.- La representación exponencial compleja de la serie de Fourier.

Según la fórmula de De Moivre, cualquier número complejo, y de forma particular para un número real, x, y para cualquier número entero n, se cumple la siguiente ecuación[BRACE-99]- [JAMES-11]:

$$(\cos x + i\sin x)^n = \cos(nx) + i\sin(nx)$$

De la fórmula de Euler se tiene:

$$e^{ix} = \cos x + i\sin x$$

Como:

$$(e^{ix})^n = e^{inx}$$

Por lo que sustituyendo:

$$e^{inx} = \cos(nx) + i\sin(nx) = (\cos x + i\sin x)^n$$

Y por tanto:

$$p_n(t) = a_0 + \sum_{j=1}^{n} a_j\cos^j t + b_j\sin^j t$$

Volviendo de nuevo a la fórmula de Euler, se tiene:

$$e^{ix} = \cos x + i\sin x$$

$$e^{-ix} = \cos x - i\sin x$$

Por lo que

$$\cos x = \frac{e^{ix} + e^{-ix}}{2}$$

$$\sin x = \frac{e^{ix} - e^{-ix}}{2i}$$

La forma general de la serie de Fourier representado por la ecuación [III.218], se puede expresar en forma exponencial compleja, teniendo en cuenta las expresiones anteriores, del siguiente modo:

$$f(t) = a_0 + \sum_{j=1}^{\infty} a_j \cos\left(\frac{2\pi}{T_0} jt\right) + b_j \sin\left(\frac{2\pi}{T_0} jt\right) \qquad \text{[III.219]}$$

$$\cos\left(\frac{2\pi}{T_0} jt\right) = \frac{e^{i\frac{2\pi}{T_0}jt} + e^{-i\frac{2\pi}{T_0}jt}}{2}$$

$$\sin\frac{2\pi}{T_0} jt = \frac{e^{i\frac{2\pi}{T_0}jt} - e^{-i\frac{2\pi}{T_0}jt}}{2i}$$

Sustituyendo se llega a:

$$f(t) = a_0 + \sum_{j=1}^{\infty} \left[a_j \frac{e^{i\frac{2\pi}{T_0}jt} + e^{-i\frac{2\pi}{T_0}jt}}{2} + b_j \frac{e^{i\frac{2\pi}{T_0}jt} - e^{-i\frac{2\pi}{T_0}jt}}{2i} \right] \qquad \text{[III.220]}$$

Si se definen nuevas constantes $c_0\, y\, c_j$ a partir de $a_0\, y\, a_j$, se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones:

$$c_0 = a_0$$

$$c_j + c_{-j} = a_j$$

$$\left(c_j + c_{-j}\right) i = b_j$$

obteniendo del mismo:

$$c_j = \frac{a_j - ib_j}{2}$$

$$c_{-j} = \frac{a_j + ib_j}{2}$$

$$j = 1, \dots, n$$

$$f(t) = \sum_{j=-n}^{n} c_j e^{i\frac{2\pi}{T_0}jt} = \sum_{j=1}^{n} c_{-j} e^{-i\frac{2\pi}{T_0}jt} + c_0 + \sum_{j=1}^{n} c_j e^{i\frac{2\pi}{T_0}jt}$$

Si se denomina $z = e^{i\frac{2\pi}{T_0}t}$ se tiene:

$$f(t) = \sum_{j=-n}^{n} c_j z^j = P_n(z)$$

Multiplicando a ambos miembros por z^n se obtiene un polinomio de grado igual o menor a $2n$

$$z^n\, p_n(t) = z^n P_n(z) = Q_n(z) \qquad \text{[III.221]}$$

4.4.2.4.- El espectro de la señal, significado.

En los apartados anteriores se ha visto como una señal periódica $f(t)$, se puede representar por medio de la serie de Fourier, y que ésta equivale a representar la señal en sus diferentes componentes armónicos. Según la representación en forma compleja obtenida anteriormente

$$f(t) = \sum_{j=-n}^{n} c_j e^{i\frac{2\pi}{T_0}jt} \qquad \text{[III.222]}$$

se puede ver como la señal periódica $f(t)$ con un periodo T_0, sus componentes de frecuencia son: $[0, \pm\omega_0,\ \pm 2\omega_0, \pm 3\omega_0, \dots]$, donde $\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0}$.

Así, se tiene que $f(t)$ es una función continua definida en un intervalo finito o infinito perteneciente al dominio del tiempo. Esta misma función en el dominio de la

frecuencia viene caracterizada por los coeficientes c_j aglutinados en las frecuencias $\pm j\omega_0 \; siendo \; j = 0,1,2,\ldots$

De esta manera se define el espectro de la señal a la representación gráfica de los coeficientes c_j en función de la frecuencia (ωj).

Por lo tanto, la señal periódica $f(t)$ se puede definir de dos maneras completamente equivalentes, la primera en el dominio del tiempo, donde $f(t)$ es una función continua dependiente del tiempo y la segunda en el dominio de la frecuencia, en el que la señal queda definida por su espectro en función de las frecuencias armónicas.

El coeficiente de Fourier anteriormente definido, c_j, es un número complejo y por lo tanto se puede representar de forma polar como

$$c_j = |c_j| e^{i \arg (c_j)}$$

Y $|c_j|$ representa la amplitud de la $j-ésima$ componente armónica de la señal periódica $f(t)$.

Con todos estos datos se pueden obtener diferentes gráficos en función de las variables representadas y que se denominan según sigue:

- Espectro de amplitud discreto de la señal periódica en el caso de representar $|c_j|$ contra la frecuencia.
- Espectro de fase discreto de la señal cuando se grafía $\arg(c_j)$ enfrentado a la frecuencia.

En ambas representaciones espectrales la amplitud y la fase de c_j toman valores exclusivamente en frecuencias que son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental, siendo por tanto el primero una gráfico simétrico y el segundo antisimétrico.

4.4.3.- La transformada de Fourier de señales periódicas.

4.4.3.1.- Transformación de la serie de Fourier en la Integral de Fourier para señales periódicas.

Dada una señal periódica $f(t)$, su transformada de Fourier se puede obtener a partir de su representación en series de Fourier, fundamentado en un tren de impulsos en frecuencia, siendo las áreas de los impulsos proporcionales a los coeficientes de la serie de Fourier [ORAN-74]- [PAPOU-62]- [PRICE-85].

A partir de una señal periódica $f(t)$, si su transformada de Fourier $F(f)$ es un impulso de área unidad para la frecuencia $f = f_0$, entonces $F(f) = \delta(f - f_0)$, y por tanto, la señal $f(t)$ equivalente a esta transformada será:

$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \delta(f - f_0)\, e^{i2\pi f t} df = e^{i2\pi f_0 t} \qquad \text{[III.223]}$$

y de forma general si $X(f)$ es una combinación lineal de impulsos igualmente espaciados en frecuencia:

$$F(f) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} c_j \delta(f - k f_0) \qquad \text{[III.224]}$$

su transformada inversa será:

$$f(t) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} c_j e^{i2\pi f_0 t} \qquad \text{[III.225]}$$

expresión coincidente con [III.222] que era la representación en serie de Fourier de una señal periódica.

Por tanto se puede hacer una interpretación práctica del significado de la transformada de Fourier de una señal periódica de periodo T_0 y coeficientes c_j, se

puede asimilar a un tren de impulsos situados en las frecuencias armónicas relacionadas con $\frac{1}{T_0}$, donde el área del impulso de la frecuencia armónica jf_0 es el valor $j-ésimo$ coeficiente de la serie de Fourier c_j.

Sintetizando la relación entre la serie de Fourier y la transformada de Fourier de una señal periódica $\bar{x}(t)$ queda establecida con las siguientes expresiones:

$$\bar{x}(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k e^{i2\pi f_0 t} \quad \text{[III.226]}$$

$$\mathcal{F}\{\bar{x}(t)\} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k \delta(f - kf_0) = f_0 \sum_{k=-\infty}^{\infty} X(kf_0)\, \delta(f - kf_0) = \frac{1}{T_0}\sum_{k=-\infty}^{\infty} X\left(\frac{k}{T_0}\right) \delta\left(f - \frac{k}{T_0}\right) \quad \text{[III.227]}$$

Donde X(f) es la transformada de Fourier de $\bar{x}(t)$ definida como un período de la señal periódica:

$$x(t) = \begin{cases} \bar{x}(t), t_0 \le t \le t_0 + T_0 \\ 0, \quad caso\ contrario \end{cases}$$

4.4.3.2.- La transformada de Fourier para funciones no periódicas en un intervalo (a,b).

Recuperando la formulación compleja de la serie de Fourier, en la que se llegaba a que $\eta(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} d_n e^{i\omega_n t}$ siendo $d_n = \frac{1}{b-a}\int_a^b \eta(t) e^{-i\omega_n t} dt$, se obtiene la siguiente expresión:

$$\eta(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left(\frac{1}{b-a}\int_a^b \eta(t) e^{-i\omega_n t} dt\right) e^{i\omega_n t} \quad \text{[III.228]}$$

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left(\frac{2\pi}{b - a(2\pi)}\int_a^b \eta(t) e^{-i\omega_n t} dt\right) e^{i\omega_n t}$$

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\Delta\omega}{\sqrt{2\pi}}\left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_a^b \eta(t) e^{-i\omega_n t} dt\right) e^{i\omega_n t}$$

Como $\left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_a^b \eta(t) e^{-i\omega_n t} dt\right)$ es una función expresada como $d_n \simeq d(n\omega)$, pasando al límite tendiendo a cero de $\Delta\omega$ se tiene la integral de Fourier que representa la transformada de Fourier de la función $d(\omega)$.

$$\eta(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{\infty} d(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad \text{[III.229]}$$

Y la transformada inversa de la función $d(\omega)$ es:

$$d(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{\infty} \eta(t) e^{-i\omega t} dt \quad \text{[III.230]}$$

4.4.3.3.- La integral de convolución.

A través de la integral de convolución, para el caso de sistemas lineales e invariables en el tiempo, se puede obtener la respuesta del sistema ante cualquier excitación una vez conocida su respuesta ante la entrada unitaria, el impulso.

De este modo, si la respuesta de un sistema ante un impulso es $\varphi(t)$, la salida en el sistema ante una excitación $\eta(t)$ vendrá definida por:

$$\omega(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \eta(\tau)\varphi(t-\tau) d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} \eta(t-\tau)\, \varphi(\tau) d\tau \quad \text{[III.231]}$$

Siendo la función $\omega(t)$ la convolución de las funciones $\varphi(t)$ y $\eta(t)$, que se representa matemáticamente como $\varphi(t) * \eta(t)$.

4.4.3.4.- El teorema de convolución.

Aplicando el teorema de la convolución se puede calcular la convolución en el dominio del tiempo multiplicando las transformadas en el dominio de la frecuencia.

Para ello se parte de la ecuación anterior:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \omega(t)\, e^{-i2\pi ft} dt = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{-\infty}^{\infty} \chi(\tau)\varphi(t-\tau) d\tau \right] e^{-i2\pi ft} dt$$

$$\Omega(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \chi(\tau) \left[\int_{-\infty}^{\infty} \varphi(t-\tau) e^{-i2\pi ft} dt \right] d\tau$$

Si en la expresión anterior se denomina $\varepsilon = t - \tau$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \varphi(t-\tau) e^{-i2\pi ft} dt = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\varepsilon) e^{-i2\pi f(\varepsilon+\tau)}\, d\varepsilon = e^{-i2\pi f\tau} \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\varepsilon) e^{-i2\pi f\varepsilon} d\varepsilon = e^{-i2\pi f\tau} \Phi(f)$$

Por tanto:

$$\Omega(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \chi(\tau)\, e^{-i2\pi f\tau} \mathrm{X}(f) d\tau = \mathrm{X}(f) \int_{-\infty}^{\infty} \chi(\tau)\, e^{-i2\pi f\tau} d\tau = \Phi(f)\mathrm{X}(f) \qquad \text{[III.232]}$$

Esta expresión muestra la transformada de Fourier de la integral de convolución como producto de las transformadas de Fourier de las funciones convolucionadas.

4.4.4.- La transformada discreta de Fourier.

En el apartado anterior se han establecido los fundamentos matemáticos en el caso de funciones periódicas, y una generalización de los mismos, es decir, abarcar a las funciones no periódicas, es lo que se denomina Transformada de Fourier.

La transformada de Fourier es un instrumento matemático para obtener la información en el campo de la frecuencia de la función en estudio, de la que se conoce su determinación a lo largo del tiempo. A través de la transformada inversa se puede hacer la transformación contraria, es decir del campo de la frecuencia al temporal.

De forma matemática se podría resumir a partir de las siguientes expresiones:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(f) e^{i2\pi ft} df \qquad \text{[III.233]}$$

$$F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i2\pi ft} dt \qquad \text{[III.234]}$$

A la hora de su resolución mediante programación informática, estas expresiones no son fáciles de programar y por lo tanto resolver, debido principalmente a que toman en un intervalo finito de tiempo y frecuencia, infinitos valores, siendo necesario por tanto, adaptar las expresiones anteriores a otras que permitan su programación, motivo por el que surge la Transformada Discreta de Fourier, que no es más que una simplificación para el cálculo numérico.

Para ello es necesario hacer un muestreo de la función que tiene la señal, de forma que de los infinitos valores que alberga, se trata de coger un número discreto de valores separados entre ellos por un intervalo constante de la variable independiente. El muestreo adecuado viene definido por el Teorema del Muestreo o de Nyquist-Shannon.

4.4.4.1.- Análisis espectral de registros discretos.

En el caso estudio de esta investigación, no se dispone de una función continua en un determinado intervalo como se ha expuesto en los apartados anteriores, sino un de un registro discreto obtenido de una toma de datos en el punta de lanzamiento obtenidos a intervalos iguales Δt mediantes un GPS.

Con este marco de toma de datos, el periodo de muestreo T_s coincide con Δt y por tanto la frecuencia de muestreo $f_s = \frac{1}{T_s}$.

Así la función $\eta(t)$ pasa de ser continua a ser una serie de N datos en un intervalo finito y por tanto:

$$\eta(t) = [\eta(t_1), \eta(t_2), \eta(t_3), \dots, \eta(t_N)] \qquad \text{[III.235]}$$

Los instantes de la toma de datos son:

$$t = \left[t_1, t_2, t_3, \dots, t_n\right] \qquad \text{[III.236]}$$

Una vez obtenida la serie de datos discreta y en base a toda la teoría expuesta en los apartados anteriores, el objetivo será la obtención de su espectro de energía. Si se parte de las expresión obtenida para la función continua $\eta(t)$ en un intervalo (a, b).

$$\eta(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty}[a_n \cos(\omega_n t) + b_n \sin(\omega_n t)] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} d_n e^{i\omega_n t} \qquad \text{[III.237]}$$

donde:

$$\omega_n = \frac{2\pi n}{b-a}$$

$$d_n = \frac{1}{b-a}\int_a^b \eta(t) e^{-i\omega_n t} dt$$

Para el caso de que la función $\eta(t)$ venga definida por una serie de N datos en un intervalo finito, se podría expresar la expresión anterior sin pérdida de generalidad del siguiente modo, que representa la Serie de Fourier que pasa por todos los puntos $\left(t_j, \eta_{t_j}\right)$

$$\eta(t) \approx \sum_{n=-\frac{N}{2}}^{+\frac{N}{2}} d_n e^{i\omega_n t} = a_0 + \sum_{n=1}^{+\frac{N}{2}}[a_n \cos(\omega_n t) + b_n \sin(\omega_n t)] \qquad \text{[III.238]}$$

donde los coeficientes de la serie, análogos a los obtenidos anteriormente, pasan de ser integrales a sumatorias finitas:

$$a_0 = \frac{1}{N\Delta t}\sum_{j=1}^{N} \Delta t\, \eta_{t_j} \qquad \text{[III.239]}$$

$$a_n = \frac{2}{N\Delta t}\sum_{j=1}^{N} \Delta t\, \eta_{t_j} \cos\left(\frac{2\pi jn}{N}\right) \qquad \text{[III.240]}$$

$$b_n = \frac{2}{N\Delta t}\sum_{j=1}^{N} \Delta t\, \eta_{t_j} \sin\left(\frac{2\pi jn}{N}\right) \qquad \text{[III.241]}$$

Dentro de la serie de datos, el periodo mínimo y máximo detectable vendrá a través de las siguientes expresiones:

$$T_{min} \Longrightarrow \frac{1}{2\Delta t} = \frac{N}{2(t_N - t_1)} = f_{máx} \qquad \text{[III.242]}$$

$$T_{máx} \Longrightarrow \frac{1}{(t_N - t_1)} = f_{mín} \qquad \text{[III.243]}$$

Y cada frecuencia se da para:

$$\omega_n = \frac{2\pi n}{t_N - t_1}\ para\ n \in \left[1, \frac{N}{2}\right] \qquad \text{[III.244]}$$

El objetivo se fijó en obtener el espectro de energía, y visto en el apartado anterior que su deducción a partir de las ecuaciones [III.238], es laborioso, se recurre a la transformada rápida de Fourier.

$$\eta(t_j) = \sum_{n=-\frac{N}{2}}^{+\frac{N}{2}} d_n e^{\frac{inj}{N}} \qquad \text{[III.245]}$$

En esta expresión se puede diferenciar las frecuencias positivas de las negativas de forma que:

$$\eta(t_j) = d_0 + \sum_{n=1}^{+\frac{N}{2}} d_n e^{\frac{inj}{N}} + \sum_{n=-\frac{N}{2}}^{-1} d_n e^{\frac{inj}{N}}$$

Si se sustituye n por $-n$ no se pierde de nuevo ningún tipo de generalidad resultando:

$$\eta(t_j) = d_0 + \sum_{n=1}^{+\frac{N}{2}} d_n e^{\frac{inj}{N}} + \sum_{n=1}^{+\frac{N}{2}} d_{-n} e^{-\frac{inj}{N}}$$

Reemplazando n por $(N-n)$

$$\eta(t_j) = d_0 + \sum_{n=1}^{+\frac{N}{2}} d_n e^{\frac{inj}{N}} + \sum_{n=\frac{N}{2}}^{N-1} d_{n-N} e^{-\frac{i(N-n)j}{N}}$$

Dado que j es un número entero, de las propiedades de los números complejos, se tiene que:

$$e^{-\frac{i(N-n)j}{N}} = e^{\frac{i-nj}{N}}$$

Y por tanto:

$$\eta(t_j) = \sum_{n=0}^{N-1} h_n e^{\frac{inj}{N}} \qquad \text{[III.246]}$$

siendo:

$$h_n = \begin{cases} d_n & si\ n \in \left[1, \frac{N}{2} - 1\right] \\ a_0 & si\ n = 0 \\ a_{\frac{N}{2}} & si\ n = \frac{N}{2} \\ d_{n-N} & si\ n \in \left[\frac{N}{2} - 1, N - 1\right] \end{cases}$$

Con esto se consigue:

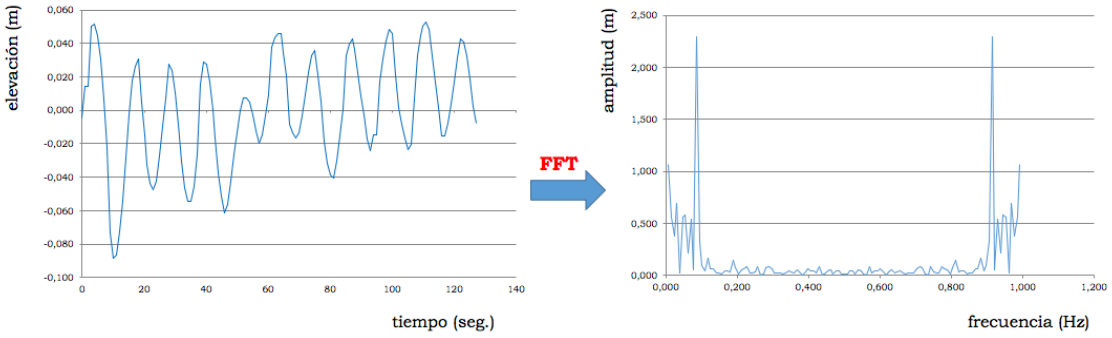


Figura III.45.- En la derecha se representa el módulo de los h_n de la función $\eta(t_j)$ de la izquierda.

La transformada de Fourier es una función discreta de N datos separados por intervalos de periodos regulares, así la transformada de Fourier Discreta se puede obtener numéricamente como una sucesión de datos (sin considerar), durante los cálculos, la variable independiente. De este modo el tiempo consumido por un ordenador para el cálculo de una DFT es proporcional a N^2.

4.4.4.2.- El espectro de energía en las series discretas.

Los datos de campo se pueden considerar como una serie temporal, ya que toman valores diferentes a lo largo del tiempo y por tanto tratarse de un proceso estocástico. Si se traslada al campo matemático, se podría explicar cómo una serie de números, y como tal, una sucesión de números reales puede representarse como una combinación lineal de senos y cosenos, proceso que se realiza a través de la transformada discreta de Fourier.

Del mismo modo, al tratarse de un proceso estocástico, la serie se puede representar a través de combinaciones lineales, en concreto integrales, de funciones trigonométricas o exponenciales complejas, ponderadas mediante coeficientes aleatorios. Esta representación se denomina representación espectral de un proceso estocástico y a la varianza de sus coeficientes de representación se conoce como densidad espectral.

Para entender el concepto se puede exponer a través de una onda progresiva lineal, en la que si se supone que el punto de observación se encuentra en $x = 0$, se tiene:

$$\eta(t) = a\cos(\omega t + \delta) \qquad \text{[III.247]}$$

donde:

$\eta(t)$ *es la elevación en el instante* t

a *es la amplitud de la señal*

ω *es la velocidad angular*

δ *es la fase inicial*

La onda progresiva $\eta(t)$ se puede entender como la superposición de j ondas simples, por lo que se puede expresar a través de la siguiente expresión:

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^{j} \eta_i(t) = \sum_{i=1}^{j} a_i \cos(\omega_i t + \delta_i) \qquad \text{[III.248]}$$

Que si se representa de forma gráfica según un diagrama temporal, que representa la elevación en función del tiempo, podría tener esta forma:

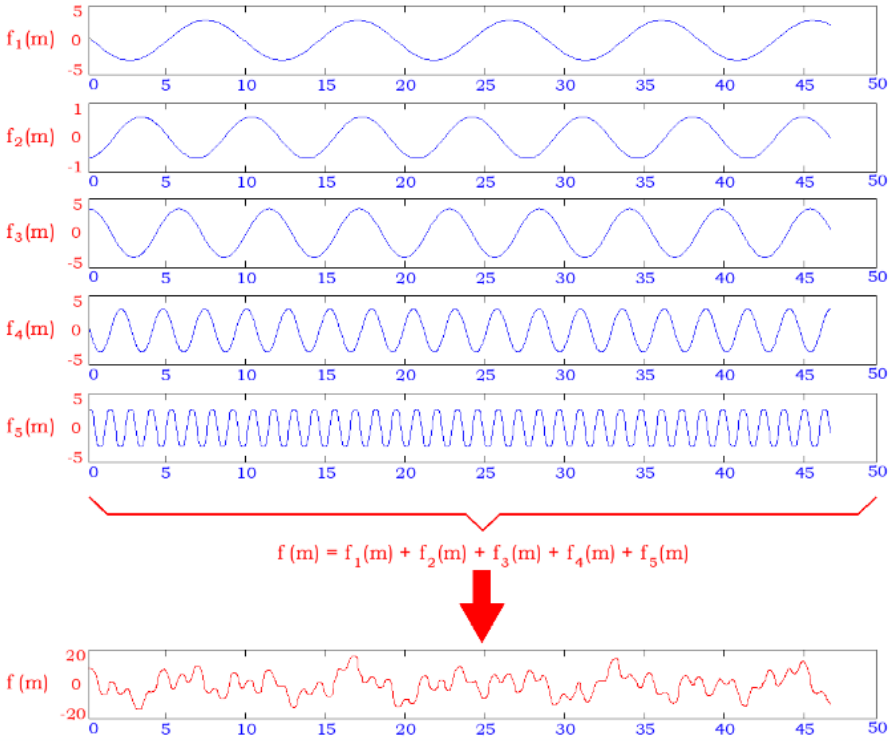


Figura III.46.- Tren de ondas producido por superposición de ondas lineales.

Y que se podría representar igualmente a través del diagrama de amplitudes, que representa la amplitud de la señal frente a la frecuencia.

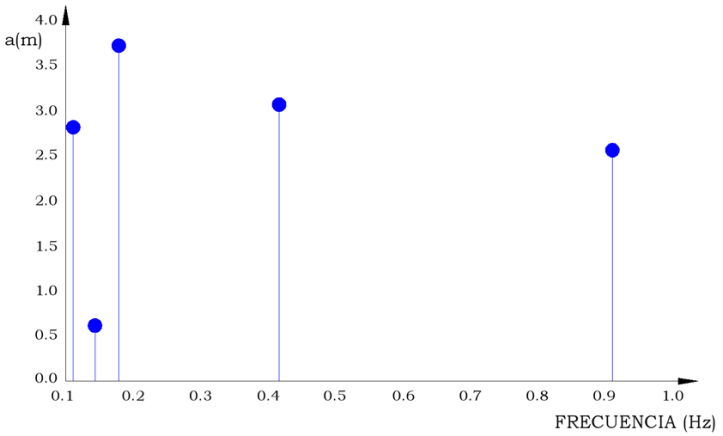


Figura III.47.- Diagrama de amplitud del tren de ondas de la figura anterior.

Ambos diagramas, serie temporal y diagrama de amplitudes son totalmente equivalentes, y se puede pasar de uno a otro sin pérdida alguna de información.

4.4.4.3.- El fenómeno de Gibbs, la frecuencia de Nyquist y el Aliasing.

Los datos que se han expuesto en este apartado, están discretizados y muestreados uniformemente según un periodo T_s, lo que ha llevado a que la transformada de Fourier se transforme en una serie de sumas finitas. Esta discretización lleva inherente una pérdida de información conocida, pero además existe otro error denominado el error de Aliasing.

Para entenderlo, se puede considerar una señal armónica de frecuencia f_1 muestreada de forma uniforme a intervalos T_s, con lo que se obtiene una serie de puntos muestreados. Estos puntos obtenidos no tienen porque definir de forma unívoca la función f_1 ya que puede haber una señal f_2 con una frecuencia superior que pase por esos mismos puntos en los mismos instantes de tiempo muestreados. Este caso se da en el caso de que $T_s = \frac{1}{f_1+f_2}$, y cuando se realice el análisis de Fourier no podrá distinguir entre ambas componentes.

En el dominio de la frecuencia, esto se traduce en que la energía de la mayor frecuencia, f_2, se suma a la frecuencia más pequeña, f_1.

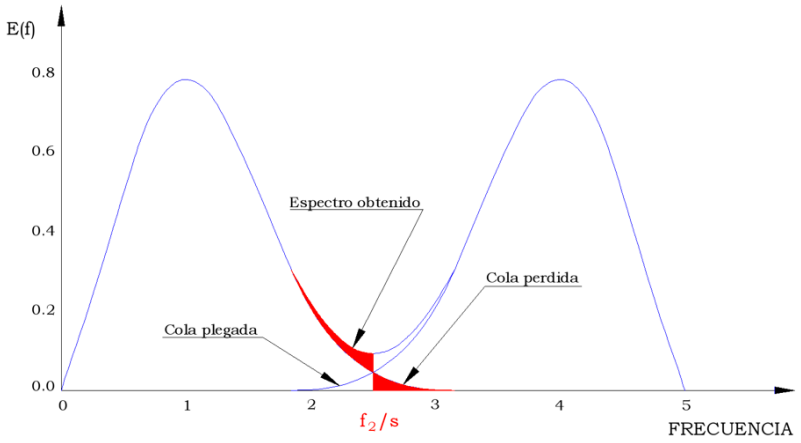


Figura III.48.- Error de Aliasing.

Es como si la distribución de energía se reflejara en la frecuencia máxima detectable en un análisis de Fourier (y sus múltiplos), denominada frecuencia de Nyquist

$$f_{Nyquist} = f_{máx} = \frac{f_s}{2}$$

Las frecuencias altas aparecen a otras frecuencias que aquellas a las que debería bajo un "alias". El error de aliasing produce un error del 100% en torno a la frecuencia de Nyquist.

El error de aliasing es típico en ingeniería oceánica, no siendo de mucha importancia en la aplicación de esta tesis. Para ello, la solución es seleccionar en el dispositivo de medida una frecuencia de muestreo lo suficientemente alta, mucho mayor que las frecuencias en las que estamos interesados.

Así, si la señal muestreada es

$$\eta_s(t) = \eta(t) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT_s) \qquad \text{[III.249]}$$

siendo δ una distribución de delta de Dirac. Si se desarrolla en serie de Fourier la δ

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT_s) = \frac{1}{T_s} \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{i\omega_s t} \qquad \text{[III.250]}$$

como $\omega_s = \frac{2\pi}{T_s}$

$$\eta_s(t) = \frac{1}{T_s} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \eta(t) e^{i\omega t}$$

Que aplicando a la transformada a ambos miembros de la igualdad

$$d_s(\omega) = \frac{1}{T_s} \sum_{n=-\infty}^{\infty} d(\omega - n\omega_s) \qquad \text{[III.251]}$$

Que es una repetición de espectros cada f_s, de forma que si la señal está limitada en banda se evita el solape, aliasing, muestreando a $f_s = 2f_{Nyquist}$. Si la señal no está limitada en banda, como ocurre en realidad, la única solución es incrementar la frecuencia de muestreo para no afectar las frecuencias de interés. Las señales tienen energía infinita y por tanto el espectro tiene que caer a cero a altas frecuencias y la parte interesantes del espectro, que es donde se concentrar la mayor parte de la energía, reside en una banda de frecuencias reducida.

4.4.5.- La transformada rápida de Fourier.

La transformada rápida de Fourier es simplemente un algoritmo para obtener la transformada discreta de Fourier, con la ventaja de que disminuye de forma considerable el tiempo de cálculo operacional en ordenador así como el error de redondeo, mediante una optimización del número de operaciones necesarias. De forma numérica se puede decir que el tiempo de cálculo con este algoritmo se reduce $\frac{log_2 N}{N}$, donde N es el número de muestras.

4.4.5.1.- Representación matricial.

Si se parte de la transformada discreta de Fourier según la siguiente expresión:

$$X(k\omega_0) = \sum_{k=0}^{N-1} x_0(nT) e^{-2\pi i n \frac{k}{N}} = \sum_{m=0}^{N-1} x_0(nT) W^{nk} \qquad \text{[III.252]}$$

Si por facilidad se denomina $W = e^{-i\frac{2\pi}{N}}$

Si se realiza el desarrollo del algoritmo para el caso de cuatro muestras, N=4, se tiene:

$$X(0) = x_0(0)W^0 + x_0(1)W^0 + x_0(2)W^0 + x_0(3)W^0$$
$$X(1) = x_0(0)W^0 + x_0(1)W^1 + x_0(2)W^2 + x_0(3)W^3$$
$$X(2) = x_0(0)W^0 + x_0(1)W^2 + x_0(2)W^4 + x_0(3)W^6$$
$$X(3) = x_0(0)W^0 + x_0(1)W^3 + x_0(2)W^6 + x_0(3)W^9$$

Si expresado de forma matricial resulta:

$$\begin{bmatrix} X(0) \\ X(1) \\ X(2) \\ X(3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W^0 & W^0 & W^0 & W^0 \\ W^0 & W^1 & W^2 & W^3 \\ W^0 & W^2 & W^4 & W^6 \\ W^0 & W^3 & W^6 & W^9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0(0) \\ x_0(1) \\ x_0(2) \\ x_0(3) \end{bmatrix} \quad \text{[III.253]}$$

$$X = W^{kn} x_0 \quad \text{[III.254]}$$

Para resolver este sistema, de N puntos, se necesitan N^2 multiplicaciones y $N(N-1)$ sumas, es decir 16 multiplicaciones y 12 sumas en el campo delos complejos, siendo el objetivo de la FFT reducir este número total de operaciones de forma drástica.

4.4.5.2.- Desarrollo de la transformada rápida de Fourier.

El algoritmo más utilizado es del de Cooley-Tukey, en el que el número de muestras elegido deber ser una potencia de 2, es decir $N = 2\gamma = \gamma^2$, siendo γ un número entero.

La reducción de operaciones del algoritmo se basa en una serie de propiedades de la matriz W, tales como:

$$W^{r+N} = W^r$$

$$W^{r+\frac{N}{2}} = -W^r$$

Según esto se puede expresar:

$$\begin{bmatrix} X(0) \\ X(1) \\ X(2) \\ X(3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & W^1 & W^2 & W^3 \\ 1 & W^2 & W^0 & W^2 \\ 1 & W^3 & W^2 & W^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0(0) \\ x_0(1) \\ x_0(2) \\ x_0(3) \end{bmatrix} \quad \text{[III.255]}$$

Factorizando la matriz W y cambiando las filas de $X(1)\ y\ X(2)$, se obtiene:

$$\begin{bmatrix} X(0) \\ X(2) \\ X(1) \\ X(3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & W^0 & 0 & 0 \\ 1 & W^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & W^1 \\ 0 & 0 & 1 & W^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & W^0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & W^0 \\ 1 & 0 & W^2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & W^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0(0) \\ x_0(1) \\ x_0(2) \\ x_0(3) \end{bmatrix} \quad \text{[III.256]}$$

Si se analizan las ecuaciones matriciales de forma separada se obtiene para la primera:

$$\begin{bmatrix} x_1(0) \\ x_1(1) \\ x_1(2) \\ x_1(3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & W^0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & W^0 \\ 1 & 0 & W^2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & W^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0(0) \\ x_0(1) \\ x_0(2) \\ x_0(3) \end{bmatrix} \quad \text{[III.257]}$$

Estas operaciones se realizan en el campo de los números complejos, por lo que desarrollando la matriz anterior, se tiene:

$$x_1(0) = x_0(0) + W^0 x_0(2) \implies 1\ multiplicación\ y\ 1\ suma$$

$$x_1(1) = x_0(1) + W^0 x_0(3) \implies 1\ multiplicación\ y\ 1\ suma$$

$$x_1(2) = x_0(0) - W^0 x_0(2) \implies 1\ suma \qquad W^2 = -W^0$$

$$x_1(3) = x_0(2) - W^0 x_0(3) \implies 1\ suma \qquad W^2 = -W^0$$

Y para la segunda:

$$\begin{bmatrix} X(0) \\ X(2) \\ X(1) \\ X(3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2(0) \\ x_2(1) \\ x_2(2) \\ x_3(3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & W^0 & 0 & 0 \\ 1 & W^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & W^1 \\ 0 & 0 & 1 & W^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(0) \\ x_1(1) \\ x_1(2) \\ x_1(3) \end{bmatrix} \quad \text{[III.258]}$$

Que de forma análoga:

$$x_2(0) = x_1(0) + W^0 x_1(1) \implies 1\ multiplicación\ y\ 1\ suma$$
$$x_2(1) = x_1(0) - W^0 x_1(1) \implies 1\ suma \qquad W^2 = -W^0$$
$$x_2(2) = x_1(2) + W^1 x_1(3) \implies 1\ multiplicación\ y\ 1\ suma$$
$$x_2(3) = x_1(2) - W^1 x_1(3) \implies 1\ suma \qquad W^3 = -W^1$$

De esta forma el número total de operaciones necesarias es de cuatro multiplicaciones y ocho sumas en el campo de los complejos, habiéndose reducido por tanto, sustancialmente conforme al número de operaciones necesarias inicialmente.

De forma generalizada, las operaciones se reducen del siguiente modo:

$$DFT \implies N^2\ multiplicaciones\ y\ N(N-1)\ sumas$$
$$FFT \implies \frac{N\gamma}{2}\ multiplicaciones \quad y \quad N\gamma\ sumas$$

Si el cálculo matricial anterior se reordena queda del siguiente modo:

$$\begin{bmatrix} X(0) \\ X(2) \\ X(1) \\ X(3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X(00) \\ X(10) \\ X(01) \\ X(11) \end{bmatrix} \begin{matrix} \longrightarrow \\ \searrow \\ \nearrow \\ \longrightarrow \end{matrix} \begin{matrix} \longrightarrow \\ \nearrow \\ \searrow \\ \longrightarrow \end{matrix} \begin{bmatrix} X(00) \\ X(10) \\ X(01) \\ X(11) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X(0) \\ X(1) \\ X(2) \\ X(3) \end{bmatrix} \qquad [III.259]$$

Si el número de muestras es superior es más complicado de ver y se soluciona mediante diagramas de flujo.

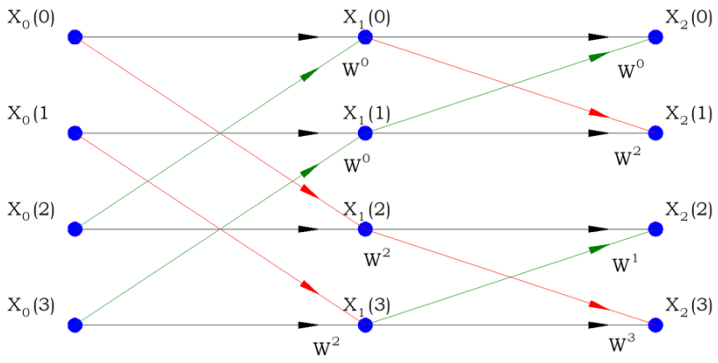


Figura III.49.- Mecanismo de obtención de la FFT.

CAPÍTULO IV

CONTRASTE METODOLÓGICO E INSTRUMENTAL PARA LA RESOLUCIÓN DE CONTROLES GEOMÉTRICOS.

1.- INTRODUCCIÓN

Desarrollados tanto los métodos como el instrumental que actualmente se utilizan para llevar a cabo los controles geométricos en la construcción de puentes o viaductos por medio de empuje de tablero y analizado el funcionamiento metodológico, el instrumental y las precisiones que actualmente están consiguiendo los Sistemas de Posicionamiento Global, parece justificada la presente investigación, en la que se pretende determinar si de alguna forma se pudieran sustituir los métodos clásicos (con todos sus inconvenientes) por las técnicas de posicionamiento global, además de intentar explorar las diversas posibilidades que se pueden generar del tratamiento de la información captada por este instrumental, así como determinar sus ventajas e inconvenientes.

En este sentido parece lógico que después de haber analizado el modelo teórico de comportamiento tanto en los métodos clásicos como en los nuevos propuestos, se lleve a cabo un experimento en el que se particularicen todos los aspectos teóricos y permita determinar el grado de acercamiento entre todo lo planteado de forma teórica y la realidad.

Es por ello que en este capítulo se proponen dos ensayos diferentes, el primero pretende determinar la posible sustitución de los métodos e instrumental topográfico que permiten llevar a cabo el control geométrico durante la fase de construcción de puentes o viaductos por medio de empuje de tablero por las nuevas técnicas de posicionamiento global. Para ellos se propone un contraste entre los resultados obtenidos por técnicas clásicas y con GPS en un viaducto real y fruto del cual se determina el grado de acuerdo entre ambos resultados y por tanto si es viable plantear su sustitución con sus correspondientes ventajas e inconvenientes.

Derivado del primer ensayo, en el que se tratan los resultados obtenidos con GPS, se investiga sobre el posible tratamiento de dichos resultados con el objeto de explorar sí dicha información podría aplicarse en controles geométricos dinámicos que generalmente conllevan las pruebas de carga dinámicas. Se plantea así la posibilidad de llevar los clásicos controles geométricos, pero dando un valor añadido a los datos que incluso podrían llegar a evitar otros controles que suelen ser más complejos, laboriosos y costosos en procesos y fases posteriores.

Cabe reseñar que debido a la forma en la que se desarrolla la tesis ha sido necesario la puesta a disposición de la misma de dos laboratorios a escala real, ya que los datos necesarios para la ampliación de la investigación planteada no fueron posible tomarse en el primer laboratorio al haber finalizado la obra.

En ambos casos los viaductos escogidos corresponden a dos obras emblemáticas ejecutadas en Andalucía, el primero denominado viaducto de la Miel, corresponde a la denominada Autovía del Mediterráneo A-7, tramo entre Nerja (Málaga) y la Herradura (Granada), corresponde a un viaducto clásico construido mediante empuje de tablero. El segundo viaducto corresponde a una obra recién inaugurada en la Bahía de Cádiz, denominado como el Puente de la Constitución de 1812, es el tercer puente más alto del mundo sobre bahía o mar, por delante incluso del Golden Gate de San Francisco. Su ejecución ha supuesto más de ocho años de construcción y 510 millones de euros y que ya es conocido con el nombre del Puente de la Constitución de 1812.

2.- EL CONTROL GEOMÉTRICO DURANTE LA FASE DE EMPUJE.

2.1.- INTRODUCCIÓN.

Como se ha descrito anteriormente, en esta fase de la investigación se plantea la posibilidad de contrastar los resultados obtenidos mediante técnicas clásicas y GPS, en el control geométrico a realizar en la construcción de un viaducto durante la fase de empuje del tablero.

En el caso de que las diferencias de los resultados obtenidos por ambas técnicas fuesen asumibles, las ventajas que se producen al sustituir las técnicas clásicas por las que se fundamentan en los Sistemas de Posicionamiento Global, son claras e inmediatas:

- Información continua de la evolución de la fase de empuje del tablero, en los controles geométricos clásicos la información es discreta, dado que solo se almacenan datos para procesar cuando el responsable de topografía graba datos. En los equipos GPS se puede programar para grabar datos cada cierto tiempo, pudiendo llegar a grabarse datos cada segundo, con lo que se puede decir que la información es casi continua.
- La toma de datos clásica requiere la observación de diferentes puntos lo que a su vez requiere varios equipos y múltiple personal que en el caso de la toma de datos con GPS, no tiene tales requerimientos pudiéndose evitar tal personal, lo que evita costes y riesgos de seguridad.

2.2.- ENCUADRE Y DESCRIPCIÓN DEL VIADUCTO DE LA MIEL.

Para contrastar los planteamientos realizados en esta investigación se propone llevar a cabo un contraste entre los resultados que se puedan obtener en un control geométrico clásico y otro planteado con técnicas GPS en un viaducto caracterizado por un proceso constructivo mediante empuje de tablero. La construcción del viaducto de la Miel, reunía todos los requisitos constructivos que se pretende investigar y además el autor de esta investigación fue el responsable de su ejecución, con lo que el conocimiento de la estructura era absoluto. El viaducto de la Miel se convierte por tanto, en el laboratorio a escala real en el que se plantea el primer ensayo propuesto en esta investigación y fruto del cual, al margen de las pertinentes conclusiones que se desarrollarán más adelante, permitieron plantear la segunda línea de investigación. Los datos fueron tomados durante su construcción en el año 2004 y la obra finalizó en 2006.

2.2.1.- Descripción general

El Ministerio de Fomento proyectó la construcción del tramo de autovía entre Nerja en la provincia de Málaga y la Herradura en la de Granada, dentro del corredor de la Autovía del Mediterráneo A-7, con el objetivo de suplir las carencias de capacidad y diseño de la antigua N-340 y por ende, mejorar la comunicación y los desplazamientos entre el sur de Andalucía y el Levante Peninsular, constituyendo el principal eje de comunicación de la costa.

Su trazado es una sucesión de túneles, viaductos y desmontes a media ladera. A lo largo del tramo hay cinco viaductos dobles, con una longitud total por sentido de 1.430 metros, que suponen un 15% de la longitud total. En cuanto a su tipología, el viaducto de la Miel es de tablero mixto empujado, mientras que los viaductos del Pino, Cantarriján y Marchante son de vigas pretensadas doble T prefabricadas y siendo por último el viaducto del Manantial de vigas artesa prefabricadas.

Simultáneamente y con el objeto de asegurar la permeabilidad territorial de este tramo, enclavado en pleno corazón de la Sierra de la Almijara, se diseñan un paso superior en arco y seis pasos inferiores.

Las obras incluyen además la realización de tres túneles dobles; el túnel de Cerrosol con una longitud de 200 metros por tubo, el túnel del Pino con 400 metros y el túnel del Marchante con 1.400 metros. Así la longitud en túnel supone unos 2.000 metros por sentido, que representa aproximadamente un 21% de la longitud total del tramo.

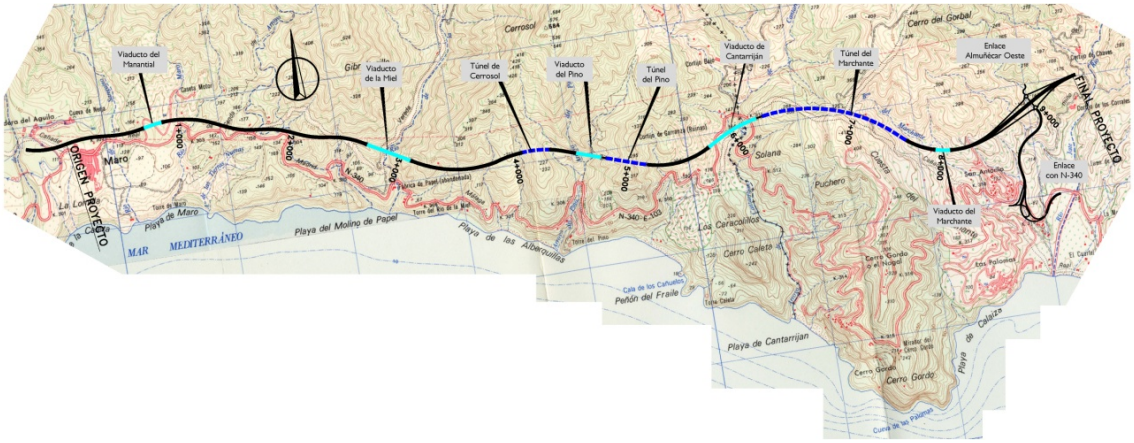


Imagen IV.1.- Situación general del viaducto.

Entre los $p.k.2+677{,}00$ y $p.k.3+053{,}00$ del tramo se encuentra el Viaducto de la Miel. Se trata de dos viaductos, uno por cada sentido de circulación, de tablero mixto compuesto por una estructura metálica bipoutre y losa de hormigón.

2.2.2.- Descripción de la estructura.

La estructura proyectada salva uno de los numerosos valles del trazado del tramo explicitado en el apartado anterior. El valle lleva encajado un arroyo y una carretera, ambos sensiblemente perpendiculares a la línea de costa, paralela a la cual se localiza el eje del puente. La altura máxima del tablero sobre el fondo del valle es de 110 metros, y su longitud 376 metros. Las laderas son muy escarpadas, complicando el acceso a las pilas y el trabajo de cimentaciones. Frente a estos inconvenientes se dispone de un sustrato muy competente formado por mármoles aflorando en superficie, lo que permite cimentar a tensiones relativamente altas. La solución desarrollada evita en lo posible la necesidad de acceder a las escarpadas laderas en fases posteriores a la ejecución de las pilas y consiste en un doble tablero de viga continua y sección mixta. Esta solución permite montar el tablero íntegramente a cota de estribos y empujarlo sin necesidad de acceder al valle. Las pilas también se han desdoblado en cada sección de apoyo, con lo que se permite el escalonamiento de ambas cimentaciones reduciendo así la excavación; además de evitar la ejecución de un gran capitel a más de cien metros de altura. La anchura de cada tablero es constante en toda la estructura repartido en cuatro carriles. Cada tablero está formado por una doble viga metálica de sección doble T de canto constante sobre él se dispone una losa de hormigón armado.

El apoyo del tablero sobre pilas y estribos se materializa en todos los casos mediante un doble apoyo, lo que constituye un empotramiento torsional. Todos los aparatos de apoyo son de neopreno armado, anclados en el estribo y en el tablero. Los aparatos de pila llevan además un tope que coaccione el desplazamiento transversal con objeto de absorber las elevadas cargas de viento transversal a las que está sometido.

La sección de las pilas es rectangular, de 8,10 metros de ancho (perpendicular al eje) y de canto variable (paralelo al eje), partiendo de 2,50 metros en cabeza y aumentando a razón de un metro por cada cuarenta de altura. Su interior está aligerado resultando los tabiques perimetrales con un espesor de 36 centímetros.



Imagen IV.2.- Viaducto de la Miel.

Los estribos son cerrados y van acompañados de muros laterales destinados a contener el derrame de tierras, cimentados mediante zapatas rectangulares de forma directa en roca por lo que no se consideran asientos.

El procedimiento de construcción del tablero de cada uno de los viaductos consiste en el montaje cíclico de uno o varios tramos de estructura metálica (fabricada en taller) sobre la playa de montaje en el trasdós del estribo, el hormigonado de la losa de fondo de pila cuando corresponda, la colocación de sus prelosas y el posterior lanzamiento del tablero una determinada longitud, para repetir el ciclo hasta completar el empuje.

2.2.3.- Normativa empleada en el cálculo.

La normativa empleada en el cálculo es, en la práctica totalidad de los cálculos, la normativa nacional vigente en el momento de redacción del proyecto. En concreto, tanto las acciones de cálculo como sus valores de combinación para los estados límites de servicio y estados límites últimos se han establecido de acuerdo con las indicaciones de la Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera (IAP-98), del Ministerio de Fomento, y en el Eurocódigo 1: Acciones.

En lo que se refiere al análisis estructural, se han seguido las indicaciones establecidas en las Recomendaciones para el proyecto de puentes mixtos para carreteras (RPX-95), en la NBE-EA, y en la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE), editadas por el Ministerio de Fomento.

En algún cálculo más específico como es el estudio de la abolladura de paneles sometidos a tensiones longitudinales y carga transversal se han seguido las indicaciones del Eurocódigo 3, que contempla el efecto beneficioso de la rigidización longitudinal.

2.2.4.- Materiales empleados en su construcción.

Los materiales empleados en la obra, así como la calidad que se les exige, se describen en los siguientes apartados. En su elección se ha tenido en cuenta el ambiente al que estará sometida la estructura, por lo que también se ha considerado adecuado incluir las condiciones que deberán cumplir los hormigones en lo que se refiere a los recubrimientos de armadura y a la limitación de la apertura de fisura. Asimismo, y por idéntico motivo, se indica el tratamiento superficial que se debe aplicar al acero estructural en chapas.

2.2.4.1.- Hormigones.

El ambiente de exposición de los elementos de la estructura que no se encuentran enterrados es IIIa por encontrase en zona costera, debiendo exigirse a estos

hormigones una resistencia mínima de 30 N/mm^2, con una relación agua-cemento máxima de 0,5 y una dosificación mínima en cemento de 300 kg. El recubrimiento nominal mínimo es de 40 milímetros (nivel intenso de control de ejecución) y la fisura característica de 0,2 milímetros.

Los hormigones que forman parte de las cimentaciones son de inferior calidad pues su ambiente de exposición es el IIa, siendo la resistencia mínima de 25 N/mm^2, el recubrimiento nominal 35 milímetros y la fisura característica 0,3 milímetros.

La lista de hormigones utilizada en la construcción del viaducto es la siguiente:

- Hormigón en limpieza y nivelación HM-15/P/40/IIIa
- Hormigón en cimentaciones HA-25/B/25/IIIa
- Hormigón en alzados de pilas y estribos HA-30/B/20/IIIa
- Hormigón en prelosas de tablero HA-35/B/15/IIIa
- Hormigón en losa de tablero HA-35/|P/20/IIIa
- Hormigón en el interior del tablero HA-45/P/20/IIIa

2.2.4.2.- Aceros.

EI acero empleado para las armaduras pasivas es en todos los casos B-500-S. Para el acero estructural en chapas y laminado en perfiles abiertos es de calidad S 355 J2G3. El acero para los perfiles tubulares es de calidad S 275 J0. Todos los aceros estructurales son adecuadamente tratados superficialmente.

2.2.5.- Geometría del tablero a empujar.

El viaducto está compuesto por dos tableros, que conforman cada uno de ellos las dos calzadas de la autovía, calzadas separadas por tanto, en una longitud total de 376 metros, longitud distribuida en cinco vanos, con las siguientes luces: $[(68\,m) + (3\ x\ 80\,m) + (68\,m)]$.

Así analizando el trazado del mismo, se tiene que el trazado en planta se desarrolla íntegramente dentro de una alineación recta con un bombeo constante del 2,0% salvo en una zona muy local junto al estribo.

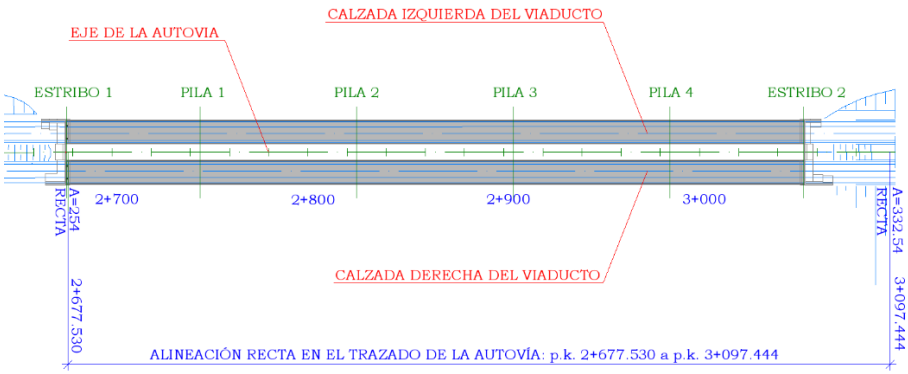


Figura IV.1.- Definición geométrica del trazado en planta del viaducto de la Miel.

El trazado geométrico en alzado, se caracteriza porque en el tramo en el que se ubica el viaducto se sitúa dentro de un acuerdo vertical cóncavo con un $K_v = 10.685$ variando la pendiente longitudinal entre el -0,5% y el 4,0%. En la siguiente figura se puede apreciar, la vaguada que salva el propio viaducto, así como el correspondiente perfil longitudinal.

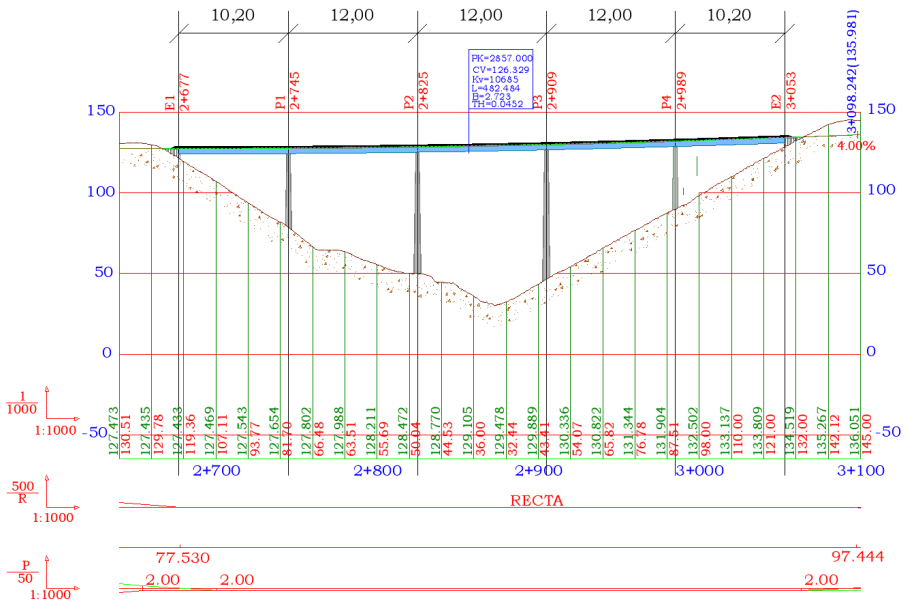


Figura IV.2.- Definición geométrica del trazado en alzado del viaducto de la Miel.(Banda izquierda).

La anchura de cada tablero es constante en toda la estructura y su valor es 12,20 metros, repartido en cuatro carriles de 3,50 metros con arcén exterior de 2,50 metros e interior de 1,00 metro. El ancho reservado para los pretiles es de 0,50 metros más una banda de sobreancho de 35 centímetros.

El tablero tiene un canto total de 3,3 metros. Cada tablero está formado por una doble viga metálica de sección doble T con 3,0 metros de canto y espaciamiento de 6,60 metros. Sobre él se dispone una losa de hormigón armado de 0,30 metros de espesor y 12,20 metros de ancho. El peralte se consigue mediante un desplazamiento vertical relativo entre ambas vigas, permitiendo así el empuje sobre superficies horizontales.

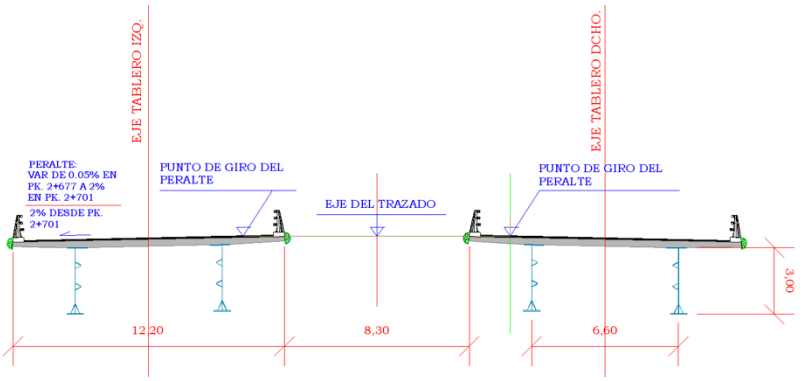


Figura IV.3.- Sección transversal de la autovía en el viaducto de la Miel..

Cada 4,00 metros se dispone una rigidización transversal destinada a arriostrar ambas vigas frente a esfuerzos horizontales de primer y segundo orden, previos a la ejecución de la losa, así como para rigidizar las almas y servir de apoyo a la rigidización longitudinal.

En la zona de pilas, doce metros a cada lado, se hormigona una losa de espesor variable en el fondo del tablero con objeto de conseguir doble acción mixta y, por tanto, un comportamiento mucho más dúctil de las secciones afectadas. La losa superior se hormigona sobre prelosas que colaboran estructuralmente con la losa in

situ frente a las acciones de proyecto. La dimensión en planta de las prelosas es 12,2 x 2,50 m^2.

El apoyo del tablero sobre pilas y estribos se materializa en todos los casos mediante un doble apoyo, lo que constituye un empotramiento torsional. Todos los aparatos de apoyo son de neopreno armado, anclados en el estribo y en el tablero. Los aparatos de pila llevarán además un tope que coaccione el desplazamiento transversal con objeto de absorber las elevadas cargas de viento transversal a las que está sometido.

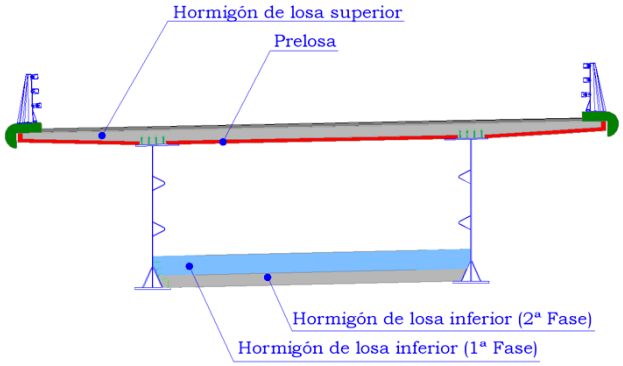


Figura IV.4.- Sección transversal del tablero.

2.2.6.- Proceso constructivo general del viaducto.

Las primeras actuaciones están destinadas a ejecutar las cimentaciones de pilas y estribos, completando el alzado de pilas y parcialmente el alzado de los estribos, que se hormigonan hasta la cota de coronación del fuste.

Además es preciso desmontar el acceso al estribo E1 hasta una cota aproximada de unos cinco metros por debajo de la rasante definitiva. Sobre la plataforma así definida se desarrollan los trabajos de armado y soldadura de las vigas metálicas con una ocupación mínima en longitud de unos 130 metros.

Con el esquema indicado se consigue que el fondo de las vigas se encuentre aproximadamente a un metro y medio por encima del terreno, lo que permite acometer correctamente las operaciones de armado y soldadura en obra, dejando espacio para la colocación de los patines y vigas de deslizamiento, y los gatos para el control de reacciones durante las operaciones de lanzamiento.

La colocación de la viga metálica en su posición definitiva se logró mediante el empuje completo desde el estribo E1. Las flechas en el extremo de la ménsula, ménsula que alcanza los 80 metros, se controla mediante una torre de atirantamiento provisional de 12 metros de altura, cuya secuencia de tesado se encuentra reflejada en el preceptivo proyecto de empuje del tablero.

Los apoyos durante el empuje se limitan a los patines de deslizamiento, colocados en pilas y estribo E1. Además se disponen los apoyos necesarios por detrás de este estribo con objeto de dar apoyo a los tramos montados en cola. La nivelación del tablero y la sustitución de los apoyos por los definitivos se realiza después de completar el empuje.

El diseño de los apoyos deslizantes provisionales empleados en el empuje, tienen capacidad ilimitada de rotación del apoyo con respecto a un eje horizontal perpendicular al plano medio del tablero y las dimensiones del aparato de apoyo, que es de neopreno armado, son de 1.000 milímetros de longitud y 600 milímetros de anchura. Sobre estos neoprenos, formados por varios neoprenos estándar colocados en serie, se dispone una lámina de teflón con objeto de permitir el deslizamiento relativo entre neopreno y tablero.

En lo que se refiere a los hormigones, el empuje se realiza con un hormigón de primera fase en la losa inferior de la zona de pilas y aproximadamente las dos terceras partes de las prelosas colocadas, 256 metros medidos desde el eje del estribo E1. Finalizado el empuje se procede al hormigonado de la segunda fase de la losa inferior de la zona de pilas, para continuar con la colocación de prelosas hasta completar la totalidad, y el hormigonado de la sección completa del tablero.

Los tiempos transcurridos entre los sucesivos hormigonados tiene cierta influencia en la deformación final del tablero y en los esfuerzos en servicio como consecuencia del desarrollo de la fluencia. Los hormigonados se realizan después de que la estructura se apoya en sus aparatos definitivos. A continuación se procede a la colocación de los pretiles, el aglomerado, el recrecido final de los estribos. La colocación de la junta se retrasa en lo posible para permitir que se desarrollen en su práctica totalidad las deformaciones asociadas a la retracción y fluencia de los hormigones del tablero.

2.2.7.- El proyecto de empuje de la Miel.

2.2.7.1.- Objeto.

En este tipo de estructuras es necesario, previo al comienzo del lanzamiento del tablero, unas pautas y control de proceso de forma que en todo momento se tengan controlados los parámetros básicos para poder concluir el lanzamiento con éxito. Todo esto se realiza a través del procedimiento de lanzamiento del tablero.

2.2.7.2.- Descripción del proceso.

El tablero que hay que lanzar se dimensiona, por una lado para resistir el paso de vehículos una vez puesto en servicio, pero también para soportar los esfuerzos a los que va a estar sometido sobre su particular proceso constructivo, ya que se monta en el estribo E1 y es empujado hasta su posición definitiva, pasado por diferentes fases con situaciones y por tanto comportamientos estructurales diferentes.

El lanzamiento del tablero se realiza mediante tiro con barras desde el estribo E1 a la cota definitiva y con una pendiente ascendente del 0 % al 4 % en el eje de trazado. El sistema de empuje es a través de gatos huecos y barras que reaccionan contra el estribo. En punta se sitúa una torre de atirantamiento para limitar los esfuerzos en la punta de avance por un lado, y por otro para poder pasar por encima de la cota de cada una de las pilas, a través de apoyos provisionales constituidos por balancines sobre los que se sitúa un neopreno teflón de forma que la estructura deslice sobre ellos con el menor rozamiento posible. Por su parte en la zona de la playa de montaje el deslizamiento se hace sobre carriles con sus respectivos bogies y elementos de guiado y retenida.



Imagen IV.3.- Pilas del viaducto de la Miel.

2.2.7.3.- Particularidades del empuje del viaducto de la Miel.

La singularidad del valle sobre el que se construye el viaducto hace que el acceso a la construcción de las pilas sea muy complicado, esto es lo que provoca que la optimización tipológica del viaducto llevase a que tuviera tan solo cuatro parejas de pilas, dos de ellas de gran altura sobre el fondo del valle y las otras dos con accesos muy complicados como se ha dicho. La consecuencia de estos dos factores es que las prelosas a colocar posteriormente a la construcción del viaducto habría que hacerla a gran altura y en todo caso sobre plataformas de izado muy complicados, aspectos que llevaron a un empuje con prelosas montadas en el tablero.

El peso de las prelosas no es un inconveniente insalvable, salvo en los primeros 120 metros en punta, debido al trazado en planta y alzado del mismo, que hacen que la pendiente media sobre la que se realiza el empuje sea baja así como los bajos rozamientos esperados.

Por otro lado, la estructura tipo metálica es una viga bijácena sin chapa de fondo, sección que obliga a una losa de compresión en el entorno de la zona de pilas, losa que podía conformarse a través de una de una losa de fondo, mediante un encofrado perdido o realizar el lanzamiento con la losa ya hormigonada, opción está última que fue la que se adoptó por los mismos motivos que las prelosas en la zona de rodadura. Esta losa de hormigón es de 25 centímetros de espesor disponiendo la armadura de conexión para el hormigonado final de la estructura una vez ubicada en su posición definitiva.

La longitud del área de montaje ideal en un puente empujado es la que del total del la longitud del puente, sin embargo en este caso, la superficie del área de montaje es mínima, lo cual requiere una optimización del espacio así como organización del parque de montaje. El motivo es el trazado en planta de la autovía, ya que aún siendo la traza del viaducto en recta, viene precedido de una curva con lo que para conseguir la superficie normal en una operación de este tipo obligaría a unos desmontes de gran altura en roca, inviables por motivos medioambientales al estar la traza situada en el Parque natural de las Sierras de Tejeda, Almijara y Alhama.

2.2.7.4.- Zonas y elementos estructurales intervinientes en el empuje.

A.- Los accesos.

Durante las diferentes operaciones de lanzamiento, es necesario el acceso tanto a la playa de montaje como a las pilas y estribos para el montaje de los elementos auxiliares necesarios, para el control durante dicho lanzamiento, para llegar con los diferentes materiales de construcción necesarios, etc.

Así, dicho acceso a la playa de montaje debe permitir el paso de los camiones que transportan la estructura metálica así como a las grúas, camiones, bombas y demás equipos auxiliares necesarios para el montaje y hormigonado de los diferentes tramos de tablero y su posterior lanzamiento. El trazado de este camino viene claramente condicionado por el transporte especial de los tramos provenientes del taller, con pendientes que no deben sobrepasar el 5% y sobre todo con curvas de radio mayor a 500 metros y acabado en zahorra artificial evitando lo más peligroso para estos transportes, los badenes y baches en el mismo.

Por otro lado está el acceso a las pilas, que debe permitir el paso del personal de la obra para el montaje en éstas de las plataformas de trabajo y de los elementos de guiado y apoyo de la estructura tanto durante el lanzamiento como en las fases posteriores a éste.



Imagen IV.4.- Llegada de un transporte especial a la playa de montaje.

B.- La playa de montaje.

La playa de montaje se encuentra situada en el trasdós del Estribo E1 y consta de dos partes diferenciadas, por un lado una plataforma para el montaje de la estructura situada por debajo de la rasante y por otra una rampa de acceso.



Imagen IV.5.- Playa de montaje en el estribo E1.

Una vez realizada la correspondiente excavación necesaria para poder montar la estructura y lanzarla sensiblemente a la cota definitiva, en primera instancia se hace necesaria la construcción de sendas zapatas de hormigón sobre las que irán los carriles de guiado, zapatas que cumplen el objetivo de minimizar los asientos de los carriles. Una vez finalizada las zapatas se procede a la colocación de los carriles, cuya situación es la de estar centrados respecto de la proyección en planta de las platabandas inferiores de la estructura metálica, finalmente se montan los carriles cortados cada 8,95 metros y se unen mediante chapas atornilladas en su posición definitiva, tal y como se puede apreciar en la siguiente figura.

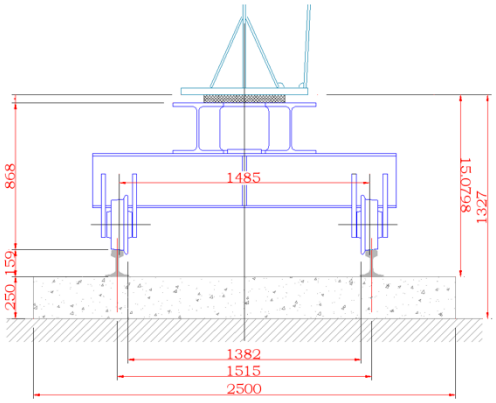


Figura IV.5.- Elementos necesarios para el guiado.

La última fase de colocación de carriles corresponde a la comprobación topográfica, asegurando con una nivelación topográfica que los carriles están en la cota prevista,

ya que es fundamental garantizar el correcto replanteo de éstos, siendo la tolerancia altimétrica de ±10 milímetros y de ±5 milímetros la planimétrica.

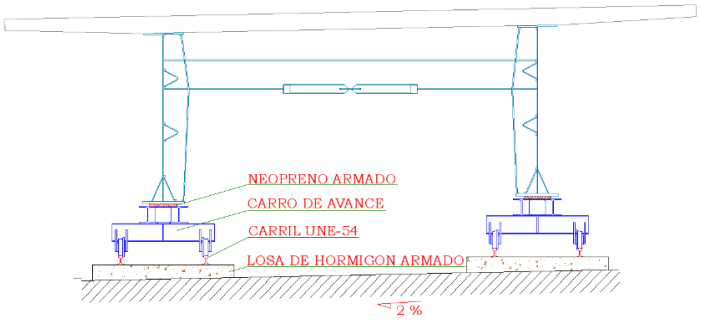


Figura IV.6.- Sistema de tiro en el estribo E1.

C.- Los estribos.

Dentro de la zona de estribos cabe destacar el diferente uso que se va a dar a cada uno de ellos. El estribo E1 se caracteriza porque desde éste se realizará toda la operación de empuje, por lo que deberá estar acondicionado a tal efecto, mientras que el estibo E2 sólo deberá acondicionarse para recibir a la estructura en la última fase de lanzamiento y colocación en su posición definitiva.

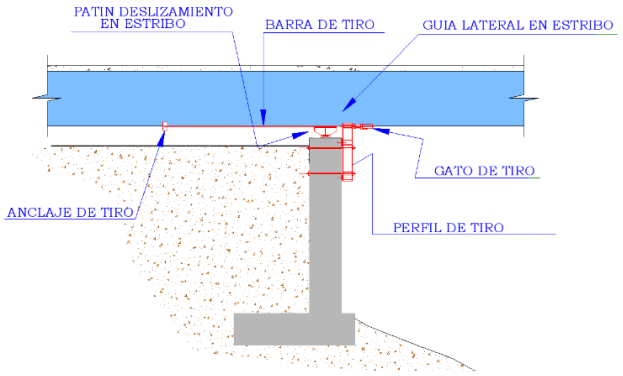


Figura IV.7.- Elementos necesarios en el estribo E1.

D.- Las pilas.

Las cuatro pilas son iguales en coronación, debiéndose añadir en todas ellas los mismos elementos auxiliares para el empuje y posterior cambio de apoyos.

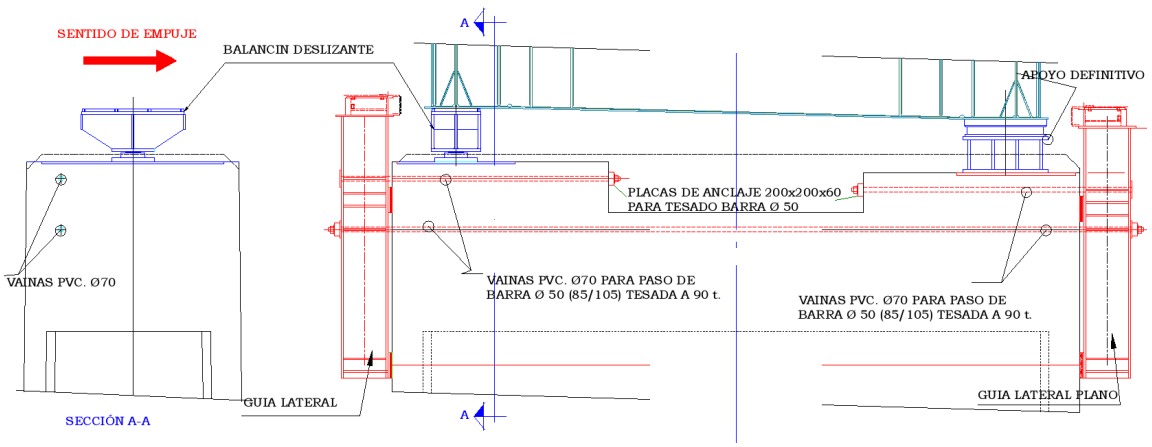


Figura IV.8.- Elementos necesarios sobre la cabeza de las pilas.

E.- Gatos hidráulicos.

Para las operaciones de lanzamiento se utilizan gatos hidráulicos, que en el caso del presente viaducto se caracterizaron por tener las siguientes propiedades:

- Gatos de tiro MH-205 de MK4 de 200 toneladas de carga, 475 milímetros de altura y 300 milímetros de carrera. Estos gatos se colocan uno en cada puntal de tiro.
- Gatos de elevación MP-200 de 200 toneladas de carga, 457 milímetros de altura y 100 milímetros de carrera.
- Gatos para el tesado y destesado de los tendones de atirantamiento MH-145, de 145 toneladas de carga, 375 milímetros de altura y 200 milímetros de carrera.



Imagen IV.6.- Gato hueco utilizado en el empuje del Viaducto de la Miel.

La secuencia de tiro para las operaciones es la que se puede apreciar en la siguiente figura:

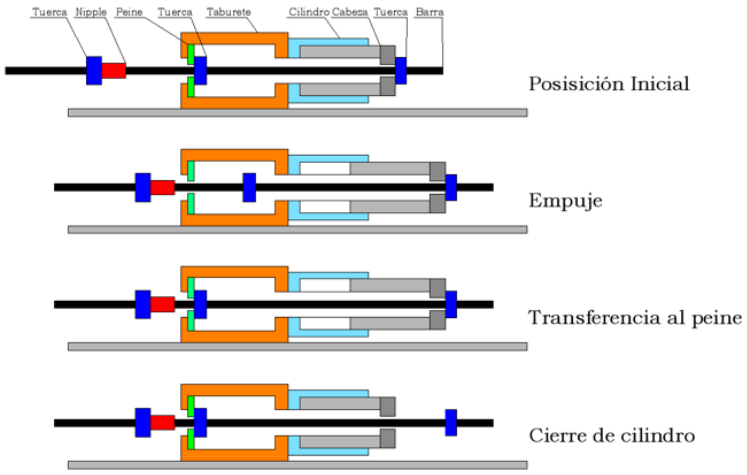


Figura IV.9.- Secuencia de trabajo del tiro con barra.

F.- Elementos auxiliares.

Una vez ejecutada la infraestructura principal necesaria para realizar el empuje es el momento de la colocación de los elementos auxiliares precisos para poder completar el proceso y entre los que caben destacar:

- *Placas de apoyo en pilas y estribos:* Las placas de apoyo se colocan embebidas en el hormigón a una cota situada 630 milímetros por debajo de la cota definitiva de apoyo de las platabandas inferiores de las dos vigas metálicas que

conforman el tablero. Sobre estas placas se colocarán los apoyos deslizantes primero y los apoyos definitivos después.

- *Apoyos deslizantes:* Los apoyos deslizantes se sitúan en el estribo E1, en la plataforma de hormigonado y en las pilas. Estos van situados sobre las placas embebidas citadas en el párrafo anterior, centrados bajo las platabandas inferiores de la estructura. Su misión es que la estructura apoye y deslice sobre ellos durante el lanzamiento del tablero, de esta forma su superficie de contacto con las platabandas inferiores de las vigas metálicas está formada por almohadillas. Estos apoyos son articulados mediante una rótula esférica para poder absorber las posibles variaciones de inclinación que sufren las platabandas durante el avance.

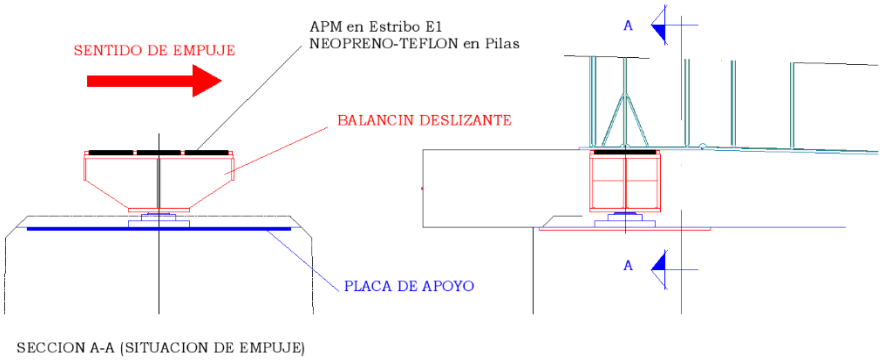


Figura IV.10.- Placas de apoyo y balancines deslizantes.

- *Guías laterales:* Con el fin de guiar lateralmente al tablero durante el empuje se disponen de unas guías laterales tanto en las pilas como en el estribo E1 así como en los dados de hormigón de la plataforma de hormigonado. Éstas suelen ir ubicadas en las pilas y en el estribo.



Imagen IV.7.- Guía latera y balancín deslizante en el estribo.

- *Puntales de tiro:* El sistema de empuje utilizado en el caso del Viaducto de la Miel es mediante tiro con equipos hidráulicos, concretamente con barras unidas al tablero y gatos huecos. En la cara vista del estribo E1 se sitúan dos puntales idénticos sobre los que se colocan los gatos de tiro. Cada puntal va anclado al estribo mediante dos barras tesadas de alta resistencia tipo MKY-1050 D36 milímetros. Sobre cada uno de estos se coloca un puente de tesado con un gato hidráulico de tiro, que se conectan en paralelo garantizando que en todo momento ambos tiran con la misma fuerza.



Imagen IV.8.- Puntales de tiro o tesado.

- *Enganches a la estructura:* El lanzamiento del tablero se realiza mediante barras que van ancladas a éste por unos elementos de enganche. Estos enganches son dos (uno por línea de tiro) y están formados por perfiles metálicos que van cosidos a la estructura mediante un sistema de viga y placas metálicas que abrazan la platabanda inferior. La unión del enganche con los gatos de tiro se realiza mediante las barras de alta resistencia tipo MKY-1050 D47 milímetros de 6 metros de longitud unidas mediante manguitos de empalme. Las barras de tiro se fijan al enganche de la estructura mediante una placa de reparto y una tuerca esférica.



Imagen IV.9.- Sistema de enganche a plataforma y barra de alta resistencia.

- *Barras de tiro:* Para las operaciones de tiro se emplearán dos juegos de barras tipo MKY-1050 D47 milímetros dispuestos cada uno de ellos de la siguiente manera:
  - Dos tramos de seis metros en la zona de enganche, uno situado en cada platabanda.
  - Ocho tramos de seis metros en la zona intermedia, cuatro en cada platabanda.
  - Un tramo de diez metros en la zona de tiro de los gatos.
- *Bogies:* Se componen de unos perfiles metálicos con unos rodamientos de ferrocarril para desplazarse sobre los carriles. Siempre se sitúan bajo mamparos de pila o diafragmas, apoyando las platabandas inferiores del tablero sobre estos a través de almohadillas de neopreno zunchado. Sirven como apoyo rodante en la zona de la playa de montaje.

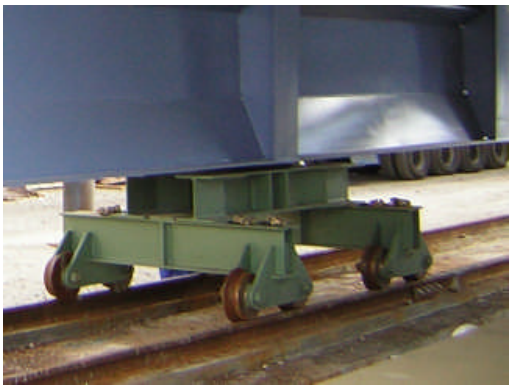


Imagen IV.10.- Bogies utilizados para lanzar el tablero.

2.2.7.5.- Sistema de atirantamiento provisional.

Durante el empuje del tablero existen varios aspectos característicos que hacen necesario un sistema de atirantamiento provisional; en primer lugar las diferentes configuraciones de apoyo que va teniendo el tablero conforme avanza, en segundo lugar la alternancia de momentos positivos y negativos y en tercer lugar el valor del cortante en una misma sección y por último las elevadas flechas por peso propio en situaciones de grandes voladizos [TARQU-05].

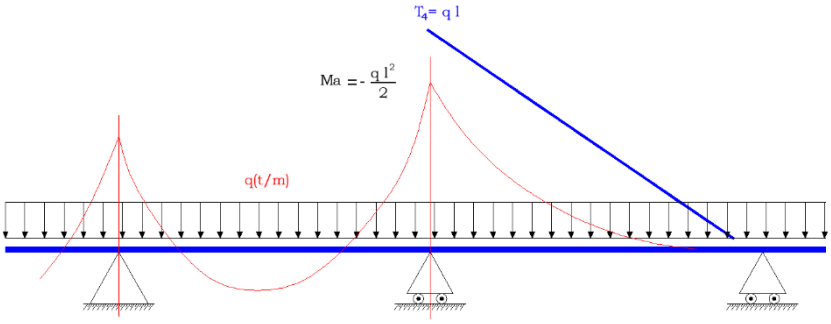


Figura IV.11.- Distribución de momentos durante el lanzamiento.

Esto hace necesario, que durante todo el proceso se instale un sistema de atirantamiento provisional, compuesto por anclajes activos, anclajes pasivos y la torre de atirantamiento, sistema de atirantamiento provisional que permite controlar las flechas que se producen en el frente de avance a lo largo de todo el lanzamiento así como equilibrar los esfuerzos que se producen en la estructura.

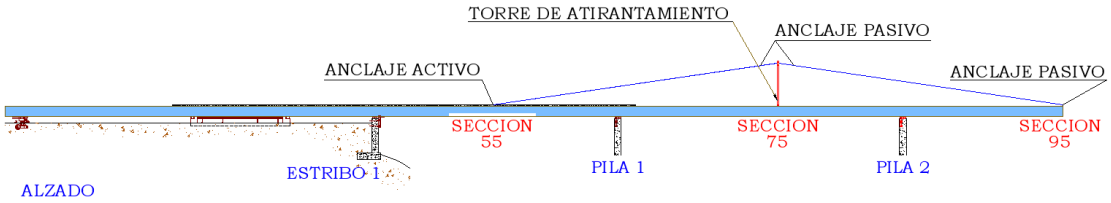


Figura IV.12.- Sistema de atirantamiento provisional.

El esquema general de dicho sistema de atirantamiento se basa en dos anclajes al tablero, uno pasivo en el frente de avance, y otro activo a 160 metros de distancia del anterior, con una torre central de 12 metros de altura.

Los dos anclajes activos, uno por cada una de las vigas laterales, se anclan en la sección número 55 del tablero metálico. Sirven para tesar los torones a la carga requerida en los momentos en que están previstos los tesados de los tirantes en el proceso del lanzamiento, siendo en ellos donde se actúa para dar el tesado inicial de

dos toneladas a cada uno de los torones de los cables, 19 torones ϕ0,6", así como los tesados y destesados sucesivos y necesarios con los gatos de barra.

Estos anclajes activos están unidos mediante dos tendones, uno por cada viga, a la torre de atirantamiento, situada en la sección número 75 y con una altura de doce metros. La torre de atirantamiento está articulada en la base para permitir que los cables delanteros se carguen al actuar sobre los anclajes activos de los cables traseros. Los tendones están compuestos por 19 torones ϕ0,6", salen de la cabeza de la torre y parten de una placa de extrusión situada en el interior de una horquilla que se encuentra anclada a la cabeza de la torre mediante una orejeta soldada a la cabeza de la misma. La longitud de dichos tendones es de aproximadamente 80 metros y terminan anclados en sendos anclajes pasivos delanteros, en la punta de lanzamiento, sección número 95 del tablero metálico. Estos se ponen en carga gracias al movimiento de la cabeza de la torre al actuar sobre el anclaje activo.



Imagen IV.11.- Ubicación de la torre de atirantamiento en el estribo.

La torre de atirantamiento está formada por dos planos paralelos situados sobre cada una de las vigas de la estructura y arriostrados entre sí. Con ella se consigue un control activo de esfuerzos y flechas ya que se puede regular la tensión de los cables durante todo el proceso, introduciendo un esfuerzo equivalente a un pretensado exterior muy excéntrico.



Imagen IV.12.- Torre de atirantamiento.

Una vez montada la torre sobre el tablero y apeada provisionalmente, se procede al montaje de los torones uno a uno desde la torre hacia las orejetas de los extremos. La unión con el tablero en ambos casos, se realiza mediante unas orejetas que permiten el giro alrededor de un eje transversal horizontal que une los apoyos de las patas. Con todos los cables montados, se procede a darles una ligera tensión de unas dos

toneladas por torón para recuperar la catenaria. Este proceso se realiza mediante cuatro gatos unifilares trabajando desde cada una de las horquillas del tablero y actuando sobre un torón cada vez hasta dar carga a los 19 torones de cada cable.



Imagen IV.13.- Anclaje de la torre de atirantamiento en el estribo.



Imagen IV.14.- Anclaje de la torre de atirantamiento en la punta del tablero.

2.2.7.6.- Operaciones de lanzamiento.

Para el correcto comienzo de la operación de lanzamiento, todos los elementos constituyentes y desarrollados en el apartado anterior: elementos auxiliares de pilas y estribos; placas embebidas, plataforma de pilas, puntales de tiro, apoyos deslizantes y guías laterales, deben estar según la disposición proyectada para ellos.

Con todos estos elementos dispuestos, la operación de lanzamiento consiste en el montaje de tramos, de forma sucesiva, por cada una de las calzadas, coordinándose con el empuje del mismo por fases cíclicas. Se puede distinguir dentro de la operación de lanzamiento, una fase inicial de montaje y una segunda fase de lanzamiento, destacando en ésta la operación de paso por encima de las pilas y el atirantamiento necesario en cada momento.

Fase 1: Montaje de la estructura.

La operación de montaje de la estructura se realiza en la playa de montaje a lo largo de una longitud de 108 metros, diferenciándose en la misma cuatro etapas que han de realizarse siempre en el mismo orden y que son:

- Montaje del tramo de tablero correspondiente sobre apeos provisionales en obra.
- Desapeo del tramo hasta su colocación sobre el bogie.
- Hormigonado de la losa inferior de tablero en los tramos que corresponda.

- Colocación de prelosas, excepto los primeros 120 metros.

Este proceso comienza, con un control topográfico previo, replanteando cada tramo metálico en su posición teórica, tanto en planta como en alzado.

Una vez iniciado este proceso de montaje, compuesto de siete ciclos, hay que distinguir entre el primer ciclo y los seis siguientes, ya que el primero de ellos se realiza sobre apeos provisionales en su posición teórica paralela a la rasante y los seis restantes se ejecuta sobre apeos contra la estructura ya lanzada, pudiendo existir variaciones en giro y cota con respecto a la rasante definitiva.

Fase 2: Lanzamiento.

El objetivo es llegar con el extremo de la estructura al estribo E2, lanzando para ello los 376 metros de tablero. La operación de lanzamiento del tablero se divide en siete fases con unas operaciones de montaje intermedias, diferenciando en cada una de las fases, cuatro operaciones, a saber:

- Colocación de las piezas de enganche de las barras de tiro al tablero.
- Avances.
- Tesado de los cables de la torre de atirantamiento.
- Destesado de los cables de la torre de atirantamiento a la llegada a pilas y estribo E2.

En cada una de estas fases el procedimiento de lanzamiento es similar, diferenciándose únicamente en si hay o no paso por pila.

Durante los avances las barras de tiro conectan los puntales de tiro a la estructura a través de unas piezas de enganche. Estas se anclan a la platabanda inferior de cada una de las dos vigas de la estructura logrando que enganche y platabanda formen un conjunto solidario.

2.2.7.7.- Sistema de atirantamiento.

El sistema de atirantamiento provisional permite controlar las flechas que se producen en el frente de avance a lo largo de todo el lanzamiento así como equilibrar los esfuerzos que se producen en la estructura.

El esquema general de dicho sistema de atirantamiento como se ha explicado anteriormente, se basa en dos anclajes al tablero, uno pasivo en el frente de avance (sección 95) y otro activo, a 160 metros de distancia (sección 55), con una torre central de 12 metros de altura (sección 75). El procedimiento de atirantamiento depende del vano en el que se encuentre el avance de la punta de lanzamiento y se divide en cuatro fases, una por cada vano.

En la compleja maniobra de empuje, cabe destacar el momento de paso por pilas y la llegada al estribo E2. Durante la llegada del frente de avance a la zona de pilas o estribo, hay que evitar que esta choque contra la pila y que el contacto de esta con el apoyo deslizante se produzca en toda su superficie para evitar cargas muy concentradas sobre éste y esfuerzos no centrados sobre la rótula.

En el avance a lo largo del primer vano, sólo se realiza un tesado a la llegada a la pila 1. En el resto de vanos se tesan los tendones durante el avance del tablero en dos escalones de tesado, además de la posibilidad de un tesado final, sólo en el caso de que la superficie inferior de la platabanda inferior se encuentre por debajo de la cota de la superficie superior del apoyo deslizante, para levantar la sección de avance y apoyar el tablero sobre la pila.

Por estos motivos cuando la sección en punta se encuentra a poca distancia de los apoyos provisionales de la pila sobre la que ha de apoyarse, tres metros

aproximadamente, se actúa sobre el sistema de atirantamiento situado sobre el tablero. De esta forma se eleva la sección en punta hasta la cota necesaria para poder rebasar el eje de los apoyos deslizantes una distancia suficiente que garantice el apoyo en la superficie total de estos una vez se descienda la estructura.

Cuando el frente de avance ha rebasado los apoyos se detiene el avance y se procede al destesado de tirantes, apoyando el tablero en los apoyos deslizantes de la pila. Finalizada la operación se continúa con el empuje.

Por último se ajustan las guías laterales que hasta ese momento estaban recogidas, comprobando que las almas de las vigas están centradas en el eje longitudinal de los patines de deslizamiento.

2.2.7.8.- Operaciones finales.

Una vez completado el empuje, el acabado de la estructura requiere los siguientes pasos:

- Desmontaje de todo el sistema de atirantamiento provisional.
- Cambio de los apoyos de deslizamiento por los aparatos definitivos.
- Montaje de las prelosas de los 120 metros próximos al estribo 2.
- Hormigonado del tablero sobre las prelosas.
- Hormigonado del resto de los fondos de pilas.

Además, y por necesidades de programa de obra, se deben ejecutar los espaldones de los estribos y los muros, en principio provisionales, de acompañamiento, necesarios para dar tráfico de obra por el tablero terminado, con independencia del lanzamiento del segundo tablero.

2.2.7.9.- Inspecciones a realizar durante el empuje.

El objeto de los controles que siguen es verificar que se cumplen las características exigidas en el P.P.T.P. en todo lo referente al lanzamiento estructural. Para ello se elabora un programa de puntos de inspección que se detalla en la siguiente tabla.

Tipo	Descripción	Frecuencia	Momento	Responsable
Punto de parada	SE COMPRUEBA REPLANTEO TOPOGRÁFICO DE APEOS Y TOPE LATERAL DE APEO TRASERO El 100% de los puntos de inspección comprobados difieren +/- 2 cm de las coordenadas de proyecto	Cada tramo	Antes del Proceso	Topógrafo
Punto de parada	COMPROBACIÓN DEL REPLANTEO DE LAS PRELOSAS El 100% de los puntos de inspección comprobados difieren +/- 2 cm de las coordenadas de proyecto	Cada 5 prelosas	Durante el proceso	Topógrafo
Punto de espera	COMPROBACIÓN DEL LANZAMIENTO DE CADA TRAMO El lanzamiento se realiza según procedimiento	Cada tramo	Después del proceso	Jefe Ejecución de Estructuras

Tabla IV.1.- Programa de puntos de inspección durante el lanzamiento.

2.3.- MODELO TEÓRICO DEL LANZAMIENTO.

2.3.1.- Introducción.

El dimensionamiento de la estructura se ha realizado según los principios de la mecánica racional y resistencia de los materiales, adaptadas al diseño estructural. Se

han seguido las prescripciones recogidas en la normativa vigente en el territorio español, así como las recomendaciones y la normativa internacional de aplicación.

2.3.2.- Bases de cálculo.

De acuerdo con lo anterior, el cálculo se ha realizado siguiendo el principio de los Estados Límites, que establece que la seguridad de la estructura en su conjunto, o en cualquiera de sus partes, se garantiza comprobando que la solicitación no supera la respuesta última de las mismas. Este requisito para la seguridad se expresa sintéticamente mediante la siguiente desigualdad:

$$S_d \leq R_d \qquad [IV.1]$$

donde:

- S_d *es la solicitación de cálculo aplicable en cada caso.*
- R_d *es la respuesta última de la sección o elemento*

Para la aplicación de este criterio de seguridad, se consideran tanto situaciones de servicio como de agotamiento, esto es, Estados Límites de Servicio (ELS) y Estados Límites Últimos (ELU), de acuerdo con las definiciones dadas para los mismos en las normativas de referencia. En principio, los Estados Límites Últimos están asociados a la rotura de secciones o elementos. Para ellos, se evalúan las solicitaciones mediante la mayoración de los valores representativos de las acciones (en general característicos), utilizando los oportunos coeficientes parciales que luego se detallan. Las resistencias de las secciones o elementos se estiman mediante las características geométricas, y las resistencias minoradas de los materiales.

Por el contrario, los Estados Límites de Servicio están asociados a la pérdida de funcionalidad de la estructura. Las solicitaciones se evalúan mediante sus valores representativos, en general sin mayorar, afectados de los oportunos coeficientes de combinación, para tener en cuenta la probabilidad de ocurrencia simultánea (concomitancia) de varias acciones. Las resistencias se estiman a partir de los valores nominales de las dimensiones y resistencias de los elementos o secciones de la estructura, sin minorar.

2.3.3.- Materiales, recubrimientos y coeficientes de ponderación.

A continuación se describen los materiales empleados en la obra, así como la calidad que se les exige. En su elección se tuvo en cuenta el ambiente al que iba a estar sometida la estructura, por lo que también se consideró adecuado incluir las condiciones que debían cumplir los hormigones en lo que se refiere al recubrimiento de armadura y a la limitación de la apertura de fisura. Asimismo, y por idéntico motivo, se indicó el tratamiento superficial aplicado al acero estructural en chapas.

2.3.4.- Acciones.

La determinación de los valores característicos de las acciones, así como de sus valores representativos y de cálculo y las combinaciones a realizar con las mismas, a fin de verificar el cumplimiento de los estados límite, se lleva a cabo según lo prescrito en la Instrucción IAP-98.

2.3.4.1.- Valores característicos de las acciones.

A.- Acciones permanentes.

- Peso Propio: El valor característico del peso de los elementos estructurales de hormigón, se determina tomando como peso específico del mencionado material 2,5 $\frac{t}{m^3}$.
- Cargas Muertas: Los valores característicos del peso de los elementos no estructurales que gravitan sobre los estructurales son los que siguen:

- Pavimento: peso específico de 2,3 $\frac{t}{m^3}$ y espesor teórico de 8 cm.
- Barrera: 0,8 $\frac{t}{m}$.

B.- Acciones permanentes de valor no constante.

- Acciones lentas: Suma de las deformaciones debidas a retracción, fluencia y térmica. Se ha tomado un valor de deformación unitaria total de 0,8 $\frac{mm}{m}$, típico en estructuras de vigas prefabricadas.
- Acciones debidas al terreno: Se tienen en cuenta tanto el peso de las tierras como el empuje que éstas ejercen sobre los distintos elementos estructurales. Para el empuje de tierras sobre los estribos, se adopta un peso específico de las tierras de 2 $\frac{t}{m^3}$, un ángulo de rozamiento interno de 38,68^o, de forma que resulta un coeficiente de empuje $\gamma\ k_0 = 0{,}75$ (empuje de tierras al reposo), tal y como aconseja[ARENA-84], para terraplenes de tierras bien compactados. En los muros situados entre los estribos de cada calzada se considera el empuje de las tierras activo, para un ángulo de rozamiento interno de 30^o (del lado de la seguridad).

C.- Acciones variables.

- Sobrecargas de uso, principalmente son:
  - Tren de cargas. Se introducen las siguientes acciones:
    - Sobrecarga uniforme: 0,4 $\frac{t}{m^2}$.
    - Carro: se considera la actuación de un único vehículo pesado de 60 t, distribuidas conforme a lo dispuesto en la IAP.
    - Frenado y arranque: se adopta un ancho de la plataforma del tablero de 11,2 m.
    - Fuerza centrífuga: Considerando una velocidad específica de 120 $\frac{km}{h}$ se tiene un valor de fuerza centrífuga total de 16 toneladas.
  - Sobrecarga en terrenos adyacentes al puente: se adopta un valor de $1,0\ \frac{t}{m^2}$ al considerar esta acción.
- Acciones climáticas, principalmente son:
  - Viento. Se evalúan las solicitaciones que la actuación del viento genera tanto en el tablero (con y sin sobrecarga de uso concomitante) como en las pilas. Para ello, se adopta como velocidad de referencia 24 $\frac{m}{seg}$, conforme al mapa de isotacas del artículo 3.2.3.2.1. de la IAP.
  - Nieve: No ha lugar a la consideración de la posible acción de la nieve sobre la estructura, dado que se estima que la sobrecarga de uso se extiende sobre la totalidad de la superficie del tablero.
- Acciones accidentales. Sismo, para el cálculo de la acción sísmica se han seguido las indicaciones recogidas en la IAP-98, los parámetros que se han adoptado son los siguientes:
  - Aceleración básica de valor 0,18 g.
  - Coeficiente de daño de valor 1,3.
  - Coeficiente de las Azores: $K = 1$

- Coeficiente de tipo de suelo: Dado que en algún caso la cimentación no se realiza directamente sobre roca en todas las pilas, se ha considerado un coeficiente de valor 1,2.
- Coeficiente de comportamiento: Este coeficiente es necesario en la determinación del espectro de respuesta de la estructura y depende de la capacidad de la misma para disipar parte de la energía del sismo mediante la adquisición de deformaciones plásticas.

En general, para acciones permanentes de valores no constantes y accidentales, se considera un único valor representativo, que es el adoptado para la verificación de los estados límite, coincidente con el valor característico descrito anteriormente.

Por el contrario, en el caso de las acciones variables, se tienen en consideración diferentes valores representativos, que se utilizarán en distintas combinaciones de acciones. Dichos valores resultan de afectar al valor característico de la acción de los siguientes coeficientes:

VALOR DE COMBINACIÓN (yo)	VALOR FRECUENTE (y1)	VALOR CASI-PERMANENTE (y2)
0.6	0.5	0.2

Tabla IV.2.- Coeficientes de aplicación al valor característico de las diferentes acciones.

2.3.4.2.- Combinación de acciones.

Las hipótesis de carga tomadas en consideración se forman combinando los valores de cálculo de las acciones cuya actuación pueda ser simultánea (acciones concomitantes), según los criterios generales prescritos en el Artículo 4 de la instrucción IAP-98, tanto para Estados Límite Últimos, en situaciones persistentes o transitorias y accidentales, como para Estados Límite de Servicio.

2.3.5.- Envolventes finales de esfuerzos de los modelos.

Teniendo en cuenta la geometría de la estructura y considerando las acciones descritas anteriormente, el proyectista realizó los diferentes modelos de cálculo para partiendo de los esfuerzos a los que se somete a la estructura sus valores de envolventes de momentos flectores y cortantes durante el lanzamiento, los cuales se pueden apreciar en las siguientes figuras.

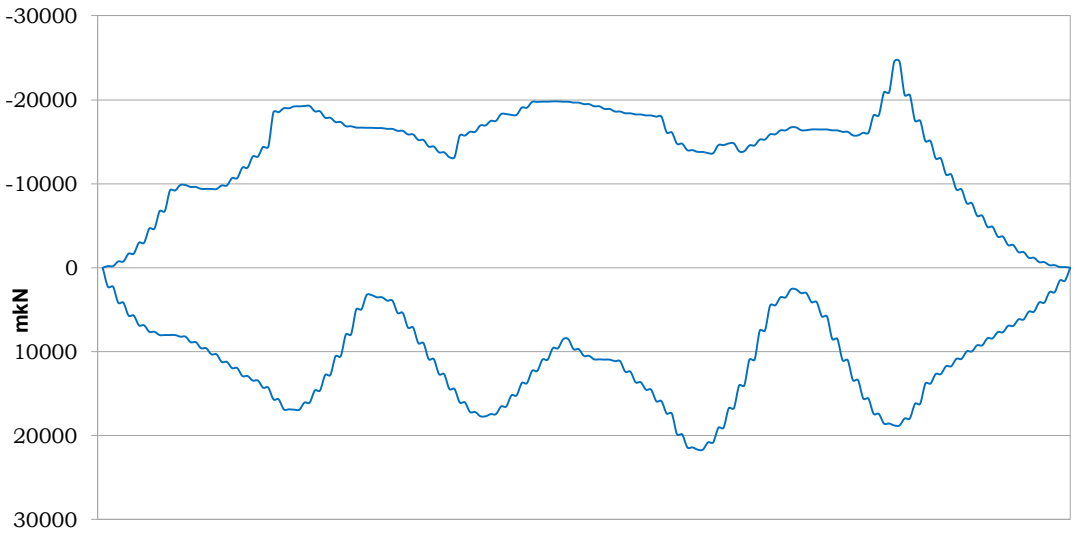


Figura IV.13.- Gráfico de envolventes de flectores del lanzamiento.

La envolvente de momentos flectores obtenida durante el lanzamiento, es un diagrama que representa para cada sección del tablero el valor máximo, tanto negativo como positivo, que adopta la sección durante todo el proceso.

En el viaducto de la Miel, dado que el empuje se hace desde el estribo E1 hasta finalizar en el estribo E2, la sección en la que se produce el momento flector máximo negativo, corresponde en la mayoría de los casos a la sección de pila inmediatamente anterior a la punta de lanzamiento, ya que al estar en voladizo es la que más solicitación tiene.

Igualmente se puede aprecia, como este momento flector, llegado a un valor máximo predeterminado, y para el cual se dimensiona la sección, se limita y reduce mediante el tirante en la punta a través de la torre de atirantamiento con la función adicional de reducir la flecha hasta que pueda pasar por la siguiente pila en su recorrido hasta el estribo E2.

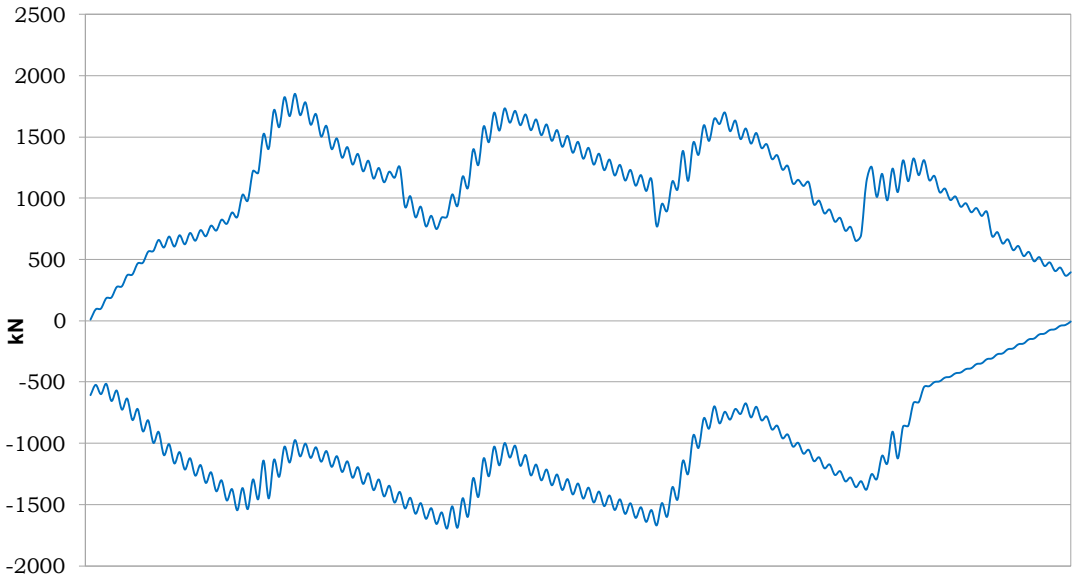


Figura IV.14.- Gráfico de envolventes de cortantes del lanzamiento.

2.3.6.- Desplazamientos en punta esperados.

A partir de los cálculos realizados, se obtienen cotas de la deformada, flechas, desplazamientos de la punta de lanzamiento cada 4 metros, a lo largo de las diferentes fases de empuje. En la siguiente tabla se pueden apreciar dichos valores de los que además es importante reseñar, las flechas máximas, llegadas a pila y estribo E2, etc.

Cabe reseñar que la deformada teórica en punta de avance durante el tablero de la calzada izquierda se determina sobre el eje longitudinal del tablero con el eje del mamparo derecho e izquierdo, dado que como se justificará más adelante sobre dichos puntos se ubican el prisma reflector y la antena receptora de GPS que se pretenden contrastar. Obteniéndose para cada cuatro metros, la fase del empuje en la que se encuentra el punto, el Punto Kilométrico, las coordenadas X e Y, la cota de la rasante en dicho PK, la flecha esperada y su correspondiente cota deformada. Tal y como puede apreciarse en las siguientes tablas, que debido a su longitud, se reduce exclusivamente a los 112 primeros metros de la estructura, pudiéndose poder consultar el resto de datos en los ficheros de datos adjuntos a esta Tesis Doctoral.

DEFORMADA TEÓRICA EN PUNTA DE LANZAMIENTO, TABLERO IZQUIERDO
Coordenadas y Cota en el Eje Longitudinal del Tablero con el Eje del Mamparo Derecho

FASE DE EMPUJE	AVANCE			P.K. (m)	COORDENADAS EJE				
	Paso	Parcial	Acum.		Coordenada X	Coordenada Y	Cota Rasante	Flecha (mm)	Cota Deformada
PRIMERO	1	0	0	2677,530	427237,032	4068393,390	127,031	0	127,031
(32 m)	2	4	4	2681,530	427240,525	4068391,442	127,035	-47	126,988
	3	8	8	2685,530	427244,019	4068389,494	127,039	-111	126,928
	4	12	12	2689,530	427247,512	4068387,545	127,045	-187	126,858
	5	16	16	2693,530	427251,006	4068385,597	127,053	-265	126,788
	6	20	20	2697,530	427254,499	4068383,649	127,062	-325	126,737
	7	24	24	2701,530	427257,993	4068381,701	127,072	-378	126,694
	8	28	28	2705,530	427261,486	4068379,752	127,085	-425	126,660
	9	32	32	2709,530	427264,980	4068377,804	127,098	-466	126,632
SEGUNDO	11	0	32	2709,530	427264,980	4068377,804	127,098	-469	126,629
(24 m)	12	4	36	2713,530	427268,473	4068375,856	127,113	-493	126,620
	13	8	40	2717,530	427271,967	4068373,908	127,130	-576	126,554
	14	12	44	2721,530	427275,460	4068371,960	127,148	-644	126,504
	15	16	48	2725,530	427278,954	4068370,011	127,168	-643	126,525
	16	20	52	2729,530	427282,447	4068368,063	127,189	-618	126,571
	17	24	56	2733,530	427285,941	4068366,115	127,211	-580	126,631
TERCERO	19	0	56	2733,530	427285,941	4068366,115	127,211	-596	126,615
(56 m)	20	4	60	2737,530	427289,434	4068364,167	127,235	-626	126,609
	21	8	64	2741,530	427292,928	4068362,218	127,261	-716	126,545
	21B	8	64	2741,530	427292,928	4068362,218	127,261	67	127,328
LLEGADA PILA 1	22	12	68	2745,530	427296,421	4068360,270	127,288	0	127,288
APOYO PILA 1	23	12	68	2745,530	427296,421	4068360,270	127,288	0	127,288
	24	16	72	2749,530	427299,915	4068358,322	127,316	-50	127,266
	25	20	76	2753,530	427303,408	4068356,374	127,346	-95	127,251
	26	24	80	2757,530	427306,902	4068354,425	127,378	-127	127,251
	27	28	84	2761,530	427310,395	4068352,477	127,411	-146	127,265
	28	32	88	2765,530	427313,889	4068350,529	127,445	-156	127,289
	29	36	92	2769,530	427317,382	4068348,581	127,482	-161	127,321
	30	40	96	2773,530	427320,876	4068346,633	127,519	-186	127,333
	31	44	100	2777,530	427324,369	4068344,684	127,558	-211	127,347
	32	48	104	2781,530	427327,863	4068342,736	127,599	-238	127,361
	33	52	108	2785,530	427331,356	4068340,788	127,641	-266	127,375
	34	56	112	2789,530	427334,849	4068338,840	127,684	-290	127,394

Tabla IV.3.- Resultados de la deformada teórica en el mamparo derecho durante el empuje.

DEFORMADA TEÓRICA EN PUNTA DE LANZAMIENTO, TABLERO IZQUIERDO
Coordenadas y Cota en el Eje Longitudinal del Tablero con el Eje del Mamparo Izquierdo

FASE DE EMPUJE	AVANCE			P.K. (m)	COORDENADAS EJE				
	Paso	Parcial	Acumul.		Coordenada X	Coordenada Y	Cota Rasante	Flecha (mm)	Cota Deformada
PRIMERO	1	0	0	2677,530	427240,247	4068399,154	127,037	0	127,037
(32 m)	2	4	4	2681,530	427243,740	4068397,206	127,019	-47	126,972
	3	8	8	2685,530	427247,234	4068395,258	127,001	-111	126,890
	4	12	12	2689,530	427250,727	4068393,309	126,985	-187	126,798
	5	16	16	2693,530	427254,221	4068391,361	126,971	-265	126,706
	6	20	20	2697,530	427257,714	4068389,413	126,958	-325	126,633
	7	24	24	2701,530	427261,208	4068387,465	126,946	-378	126,568
	8	28	28	2705,530	427264,701	4068385,516	126,953	-425	126,528
	9	32	32	2709,530	427268,195	4068383,568	126,966	-466	126,500
SEGUNDO	11	0	32	2709,530	427268,195	4068383,568	126,966	-469	126,497
(24 m)	12	4	36	2713,530	427271,688	4068381,620	126,981	-493	126,488
	13	8	40	2717,530	427275,182	4068379,672	126,998	-576	126,422
	14	12	44	2721,530	427278,675	4068377,724	127,016	-644	126,372
	15	16	48	2725,530	427282,169	4068375,775	127,036	-643	126,393
	16	20	52	2729,530	427285,662	4068373,827	127,057	-618	126,439
	17	24	56	2733,530	427289,156	4068371,879	127,079	-580	126,499
TERCERO	19	0	56	2733,530	427289,156	4068371,879	127,079	-596	126,483
(56 m)	20	4	60	2737,530	427292,649	4068369,931	127,103	-626	126,477
	21	8	64	2741,530	427296,143	4068367,982	127,129	-716	126,413
	21B	8	64	2741,530	427296,143	4068367,982	127,129	67	127,196
LLEGADA PILA 1	22	12	68	2745,530	427299,636	4068366,034	127,156	0	127,156
APOYO PILA 1	23	12	68	2745,530	427299,636	4068366,034	127,156	0	127,156
	24	16	72	2749,530	427303,130	4068364,086	127,184	-50	127,134
	25	20	76	2753,530	427306,623	4068362,138	127,214	-95	127,119
	26	24	80	2757,530	427310,117	4068360,189	127,246	-127	127,119
	27	28	84	2761,530	427313,610	4068358,241	127,279	-146	127,133
	28	32	88	2765,530	427317,104	4068356,293	127,313	-156	127,157
	29	36	92	2769,530	427320,597	4068354,345	127,350	-161	127,189
	30	40	96	2773,530	427324,091	4068352,397	127,387	-186	127,201
	31	44	100	2777,530	427327,584	4068350,448	127,426	-211	127,215
	32	48	104	2781,530	427331,078	4068348,500	127,467	-238	127,229
	33	52	108	2785,530	427334,571	4068346,552	127,509	-266	127,243

Tabla IV.4.- Resultados de la deformada teórica en el mamparo izquierdo durante el empuje.

Con los datos de las tablas anteriores se configuran las siguientes gráficas, en las que se aprecia la trayectoria teórica, que sigue la punta del lanzamiento del tablero izquierdo (mamparos derecho e izquierdo) durante su empuje, según los modelos de cálculo utilizados para el diseño del mismo. Se puede destacar que la representación se hace de forma exclusivamente altimétrica, dado que desde un punto de vista teórico

la trayectoria planimétrica es una alineación recta con la misma longitud que el viaducto y un acimut de 132,3859^g.

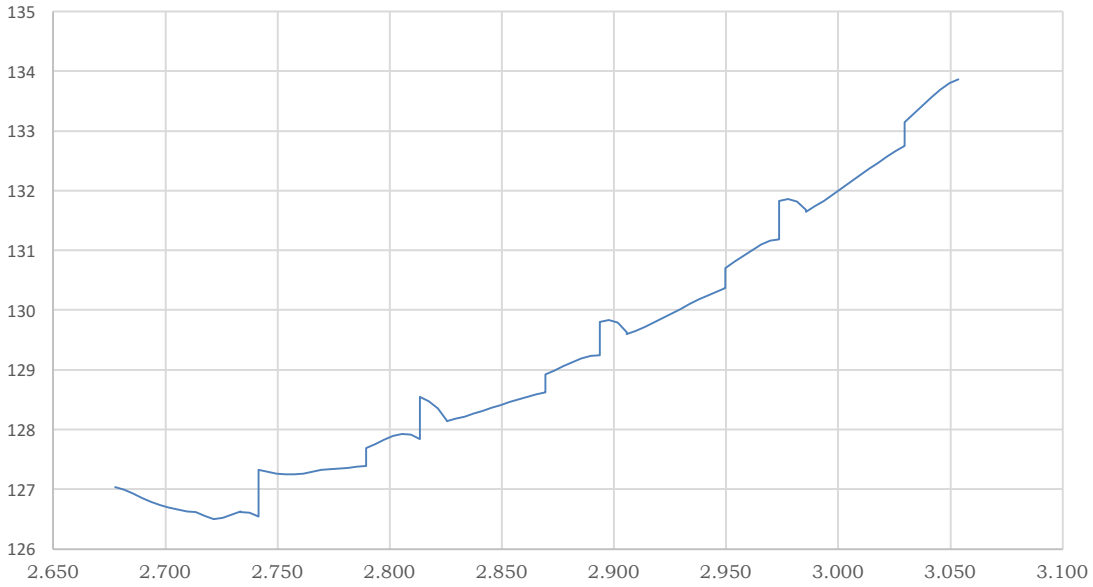


Figura IV.15.- Trayectoria del mamparo derecho durante la fase de empuje.

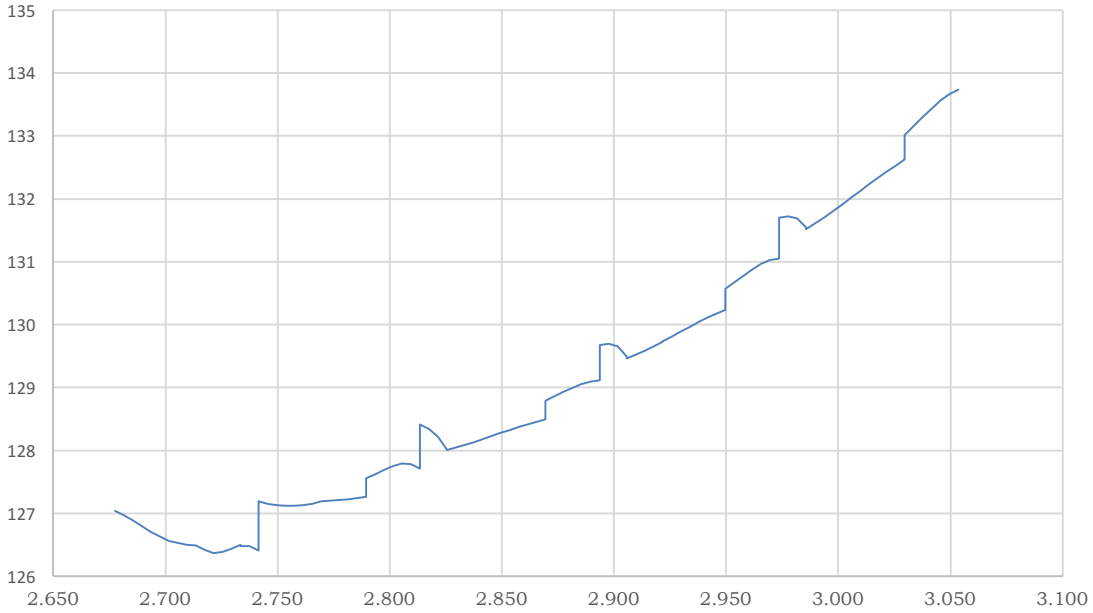


Figura IV.16.- Trayectoria del mamparo izquierdo durante la fase de empuje.

2.4.- EL CONTROL TOPOGRAFICO DURANTE EL EMPUJE DEL VIADUCTO DE LA MIEL

Dentro de los diferentes trabajos de topografía a realizar cabe diferenciar los trabajos previos correspondientes al replanteo de las instalaciones de empuje, apoyo y comprobación durante el montaje de cada tramo y los trabajos propios del lanzamiento correspondientes a todo el control necesario durante el mencionado lanzamiento.

2.4.1.- Controles topográficos previos.

2.4.1.1.- Control topográfico de la playa de montaje.

Entre los diferentes trabajos de replanteo durante la fabricación y colocación de los elementos auxiliares cabe destacar la ejecución de la playa de montaje, en la que hay tres partes diferenciadas:

- la zona desde el estribo hacia atrás de 24 metros en la que no se emplaza ningún elemento.
- la zona que sirve para el encofrado de las losas de negativos que va de los 24 a los 48 metros de longitud, sobre la que se colocan 4 apoyos deslizantes.
- la zona que va de los 48 a los 108 metros tras el estribo donde se montan los carriles para desplazamiento del bogie.

En la superficie de encofrado, de 24 metros de longitud y 6,60 metros de anchura entre ejes, se emplazan 4 apoyos deslizantes. La cota de hormigón de los dos apoyos situados a 24 metros del eje del estribo está a 705 milímetros por debajo de la rasante sin contraflecha que describe la platabanda inferior, de radio 10.703,957 para el patín más alto y 10.704,089 para el más bajo. La cota de hormigón de los dos apoyos situados a 48 metros del eje del estribo estará a 630 milímetros por debajo de la rasante sin contraflecha que describe la platabanda inferior.

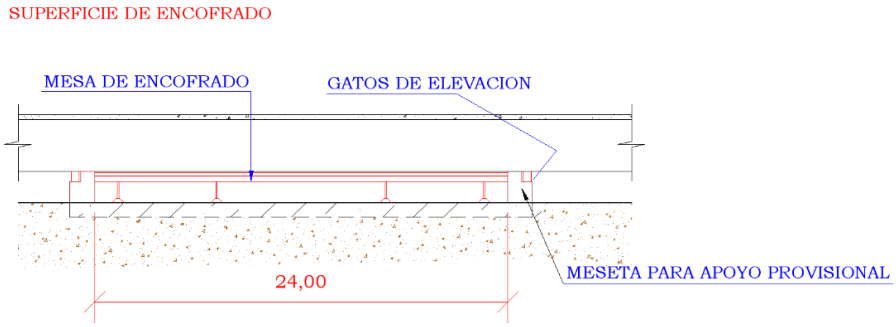


Figura IV.17.- Zona encofrado inferior.

La zona de carriles se compone de dos zapatas de hormigón de 2,50 metros de ancho, 250 milímetros de altura media y unos 60 metros de longitud. Ambas zapatas se sitúan centradas bajo los dos patines de apoyo de la estructura metálica, estando sus ejes separados 6,60 metros. Sobre cada zapata se coloca una pareja de carriles UNE-54 separados 1,515 metros entre ejes y también centrados respecto del eje de apoyo. La diferencia de cotas entre la zapata interior y exterior será de 132 milímetros a favor de la interior.

Para obtener las cotas de la playa de montaje, se parte de las cotas de prolongación tras el estribo de las curvas que describen las caras inferiores de las platabandas inferiores de la estructura metálica. A esta cota en cada punto se le resta la altura del bogie con neopreno (918 milímetros), del carril (159 milímetros) y de la zapata (250 milímetros), obteniendo una nueva alineación para la plataforma de la playa.

Una vez se tiene excavada la playa, se procede a la fabricación de las zapatas mediante el replanteo de la cota superior de las mismas cada cuatro metros medidos en el eje de trazado. La coronación de estas se encuentra 250 milímetros por encima de la playa.

Sobre dichas zapatas se replantean cada cuatro metros los bordes exteriores de los cuatro carriles obteniéndose ocho ejes paralelos que sirven para garantizar el correcto posicionamiento de los carriles en planta. Una vez colocados estos se marca la posición de los taladros para el anclaje de las mordazas, situándolos cada dos metros medidos en el eje de cada carril y en la zona de unión de tramos contiguos.

Tras colocar los pernos, se replantean los carriles para comprobar su correcta posición en planta y se calzan los carriles con cuñas hasta colocarlos en su cota teórica para luego ajustar el conjunto de mordaza más tuerca.

Por último se comprueba con nivel que la cota de los carriles en su eje es la correcta y que la separación entre cada pareja es la correcta, permitiendo la circulación de los bogies a lo largo de los sesenta metros. El hueco resultante entre la coronación de la zapata y la base de los carriles se rellena con mortero autonivelante para dar unidad al conjunto, dando por finalizado el montaje de los carriles.

2.4.1.2.- El control topográfico en el montaje de la estructura.

Durante las operaciones de montaje de los once tramos de estructura metálica en los siete ciclos previstos, los trabajos de topografía a realizar son:

- Colocación de apeos en planta y cota.
- Replanteo de la posición de las prelosas en cada tramo.
- Colocar marcas de avance cada cuatro metros en el eje en planta de la estructura.
- Medir el giro relativo que experimenta la sección trasera de cada tramo antes de desapear y después de lanzar.
- Comprobar la correcta alineación en planta de cada tramo con el anterior. Se miden cada tramo antes, después de soldar y después de lanzar.

A.- El control topográfico en la colocación de apeos.

Los apeos se situarán en las posiciones indicadas en el procedimiento, marcándose sobre la zapata de hormigón la cota a la que debe situarse la cabeza de dichos apeos respecto de la de coronación de los carriles. Una vez colocados sensiblemente a cota, se realizará el afine con nivel. Estos apeos se situarán paralelos bajo la zona de diafragmas que se indique.

B.- El control topográfico en la colocación de prelosas.

Antes de proceder a la colocación de las prelosas sobre la estructura metálica, se replantea la posición de las mismas sobre las platabandas superiores. Así se garantiza la correcta colocación de la prelosa teniendo en cuenta que las cuarenta y ocho primeras no se montan hasta el final.

C.- El control topográfico en las marcas de avance.

Para conocer en todo momento la distancia de avance del puente, se harán marcas en los dos bordes exteriores de los patines inferiores. Estas marcas hacen referencia a un avance de cuatro metros en planta en el eje de la estructura. Dicha medida de cuatro metros se toma como referencia para la obtención de los listados de flechas y coordenadas en planta durante el lanzamiento.

D.- El control topográfico del giro relativo.

Para la obtención de giro que experimenta la estructura en la sección trasera durante el lanzamiento, se realizará una medición consistente en la colocación de diez dianas reflectantes a lo largo de los últimos cuarenta metros de estructura, situándose cinco en el borde de la platabanda superior y cinco en el borde de la platabanda inferior. Una vez colocadas, se tomarán lecturas antes de desapear la estructura y una vez lanzado el tramo. Comparando las dos lecturas realizadas en cada punto, obtenemos el giro y la variación en cota que ha experimentado dicha sección. Conociendo este incremento de cota y este giro, sacamos la cota que deberán tener los apeos del tramo siguiente conociendo su cota teórica y añadiéndoles los dos valores obtenidos:

- El incremento provocado por el movimiento vertical del tramo lanzado, constante para todos los apeos.
- El incremento provocado por el giro, que dependerá de la distancia de cada apeo a la zona de unión.

Estos incrementos provocados por el giro y desplazamiento de la estructura son acumulativos.

E.- El control topográfico de la alineación en planta.

Una vez montado cada tramo, antes y después de soldar y después de lanzar, se realiza una comprobación en planta para asegurar el correcto alineamiento del mismo y su continuidad con el anterior.

Para ello, se comprueba la alineación del eje de una de las almas de la estructura metálica ya montada y lanzada, calculándose la desviación de la estructura. Conocida la desviación en planta se calcula la posición de los topes laterales del tramo nuevo a montar, asegurando la linealidad entre el tramo nuevo y los anteriores.

En cualquier caso, garantizando que el extremo lanzado está centrado con el eje longitudinal, la alineación será la adecuada, ya que la posición en planta de cada tramo a montar está garantizada al hacer coincidir los ejes longitudinales de las platabandas con los ejes longitudinales teóricos.

2.4.2.- El control topográfico en el lanzamiento del tablero.

Durante las operaciones de lanzamiento de los siete tramos de la estructura metálica, los trabajos de topografía a realizar son los siguientes:

- Comprobación de la desviación del frente en planta durante el avance.
- Comprobación de la deformada (flecha) que se produce durante el avance en el frente.

2.4.2.1.- El control topográfico en planta durante el lanzamiento.

Para la comprobación del correcto avance en planta durante el lanzamiento se coloca un prisma reflector en el cruce del eje longitudinal de la estructura con el eje del mamparo de estribo E2, que mediante técnicas clásicas (Estación Topográfica) permite determinar las coordenadas reales de dicho punto durante el empuje. Comparando dichas coordenadas con las obtenidas fruto del modelo de cálculo teórico establecido cada cuatro metros de avance en el eje proyectado en planta, se obtiene la desviación en planta de la punta de lanzamiento.

A partir de este valor se corrige la posible desviación producida mediante el tiro con una de las dos barras de la torre de tesado. Cabe decir que las mayores desviaciones en teoría se van a producir hasta la llegada a la primera pila, en estas fases el peso de la estructura no alcanza las 292 toneladas y el tiro total de las barras no supera las 21 toneladas, por lo que se puede trabajar con una sola barra sin miedo a que se rompa, dado que su tensión de rotura es de 182 toneladas.

Durante el lanzamiento el topógrafo dispone de un listado de coordenadas teóricas del eje para cada cuatro metros de avance, donde anotará las coordenadas reales y por comparación determina las correcciones que hay que hacer en la dirección en planta. Cabe reseñar que este proceso que es totalmente manual es donde incide la investigación propuesta dado que lo que se propone es la sustitución del prisma reflector por una antena GPS, lo que permitiría monitorizar de forma totalmente automática una maniobra tan delicada como lo que en sí mismo constituye el lanzamiento del tablero.



Imagen IV.15.- Vista general durante el lanzamiento.

2.4.2.2.- El control topográfico en alzado de la punta del lanzamiento.

La punta del tablero o de lanzamiento, al igual que sucede en planta, en alzado también hay que controlarla de forma muy especial, dado que las flechas que sufre el propio tablero durante el lanzamiento combinados con los tesados a los que se somete dicho tablero desde la torre de atirantamiento hacen que las flechas a lo largo del lanzamiento tengan valores muy variables y que se tengan que corregir constantemente, esto hace que un control inapropiado puede llevar la operación de lanzamiento fracaso, produciéndose efectos muy negativos.

Los métodos clásicos para llevar a cabo este control, aprovechan el prisma reflector dispuesto en la punta del tablero para determinar la cota real mediante nivelación trigonométrica (Estación Topográfica) y comparar dicha cota con la obtenida fruto del modelo teórico del lanzamiento, establecida cada cuatro metros. De forma que nuevamente se pueden corregir diferencias excesivas mediante la torre de atirantamiento, pero todo ello en un proceso totalmente manual.

Durante el lanzamiento el topógrafo dispone de un listado de flechas teóricas en el eje para cada cuatro metros de avance donde anotará las flechas reales. Cabe reseñar que este proceso que es totalmente manual es donde incide la investigación propuesta dado que lo que se propone es la sustitución del prisma reflector por una antena GPS, lo que permitiría monitorizar de forma totalmente automática una maniobra tan delicada como lo que en sí mismo constituye el lanzamiento del tablero.

Para el caso concreto del viaducto de la Miel se debe destacar que para sacar la flecha, a la lectura obtenida se le resta la que debería tener si fuera completamente rígida (rasante teórica de curva vertical de radio 10.700,643), y esta diferencia será la flecha producida, que se compara con la teórica. Aunque de forma general por simple comparación de cotas teóricas y reales también se puede obtener la desviación.

2.5.- CONTROL GEOMÉTRICO POR TÉCNICAS CLÁSICAS DURANTE EL EMPUJE.

2.5.1.- Introducción.

El fundamento para la resolución de controles geométricos por métodos clásicos ha sido desarrollado ampliamente en el capítulo II de esta tesis doctoral, en el cual se propone resolver mediante una auscultación geodésica la determinación de un pequeño movimiento. El nivel de exigencia instrumental y metodológica para obtener dichas precisiones no siempre es posible llevarlo a cabo en la fase de construcción, dado que los plazos y costes condicionan generalmente el devenir y ritmo de la propia obra. Además, para el caso objeto de investigación, la determinación de los movimientos planimétricos durante la fase de empuje, es muy difícil y costoso ubicar cuatro pilares de auscultación, con sus cuatro equipos, observadores, etc. para que

observen de forma simultánea y obtener los desplazamientos con precisiones del orden milimétrico. Algo similar ocurre con desplazamiento vertical en el que es inaceptable desde el punto de vista de seguridad, hacer una nivelación geométrica sobre el propio tablero a la vez que se le somete al empuje. Todo estos factores técnicos, económicos y de seguridad hicieron reconsiderar el procedimiento metológico e instrumental con el que llevar a cabo el control geométrico y máxime cuando las precisiones exigidas en este tipo de actuaciones son el orden centimétrico y no milimétrico como se considera para otro tipo de estructuras como pueden ser edificios, presas, etc.

Por todo lo anterior se plantea una toma de datos única con Estación Topográfica que mediante radiación y nivelación trigonométrica permita determinar coordenadas tridimensionales del prisma reflector que convenientemente anclado a la punta del tablero, registre el movimiento del propio tablero, tal y como se puede apreciar en la siguiente figura:

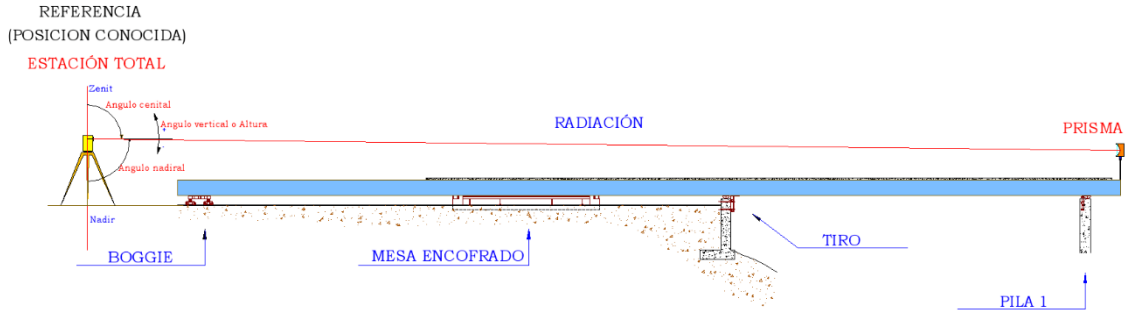


Figura IV.18.- Posición relativa de los elementos participantes en el control geométrico.

El principal condicionante afectado por esta metodología, más simple a todos los niveles, obviamente es la precisión. Pero también es cierto y además se justificará, que bien ejecutada consigue precisiones inferiores a los 5 milímetros, y por tanto, más que suficiente para el objeto de esta investigación.

Cabe reseñar que de los dos tableros lanzados en el viaducto de la Miel, la instalación del equipo GPS en la punta del tablero, se llevó a cabo en tablero izquierdo, por lo que el contraste solamente se puede llevar a cabo en dicho tablero.

2.5.2.- Elementos participantes.

2.5.2.1.- Red de pilares.

Tal y como se describe en el capítulo II de este documento, los pilares constituyen el lugar físico donde se ubica el instrumento topográfico con el que se llevan a cabo las observaciones. Su misión fundamental es garantizar que el punto-estación y referencia fuera siempre el mismo, eliminando errores típicos de estacionamiento, dirección, etc. para lo que además disponían de mecanismo de centrado forzoso mediante el correspondiente sistema de pernos roscados.

Aunque generalmente no hay preestablecidas unas dimensiones estándar para los pilares, se construyeron a modo de vértices geodésicos, incluso con dimensiones parecidas. Debido a las dificultades orográficas del lugar se dispusieron cinco pilares de auscultación, que se utilizaron tanto como punto estación como referencias externas para orientar angularmente la Estación Topográfica y comprobar su estabilidad.

En la siguiente figura se puede apreciar tanto la situación de cada uno de los pilares, como la dificultad de los accesos a los mismos, lo que entorpece los movimientos del observador durante la campaña de observación.

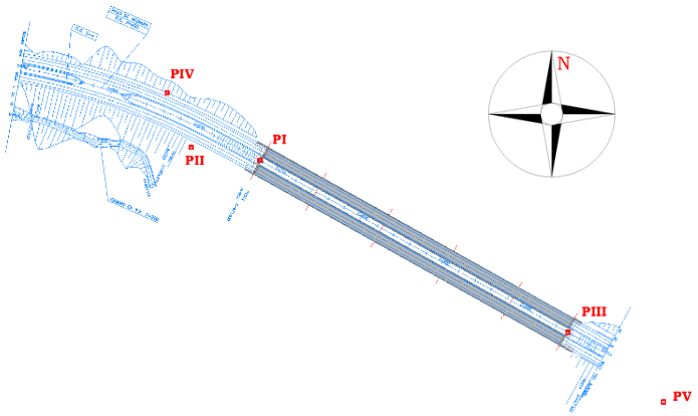


Figura IV.19.- Ubicación de los pilares de auscultación en el Viaducto de la Miel.

El diseño óptimo de la red de pilares es fundamental para la calidad posterior de los resultados y aunque este análisis se hizo antes de ubicar la red, hay que reconocer que las dificultades orográficas hicieron que el diseño de la red no fuera la más apropiada desde un punto de vista geométrico, aunque garantiza en todo momento la precisión buscada, materializándose de forma cómoda para la posterior tratamiento de datos, dado que los pilares PI y PIII se ubicaron en la mediana de la traza y a un metro del estribo E1 y E2 respectivamente. Las coordenadas de la red de pilares son:

PILAR	Coordenada X	Coordenada Y	Coordenada Z	USO
PI	427232,774	4068387,807	126,988	ET1
PII	427158,862	4068401,804	125,295	GPS
PIII	427562,908	4068203,699	134,008	ET2
PIV	427133,214	4068460,504	126,245	AUX1
PV	427665,646	4068129,229	135,488	AUX2

Tabla IV.5.- Coordenadas de la red de pilares existente en el entorno del viaducto de la Miel.

2.5.2.2.- Prisma reflector

El prisma reflector constituye el punto sobre el que se hacen las mediciones topográficas clásicas, su ubicó mediante la soldadura correspondiente, de forma rígida al tablero de lanzamiento, en el mismo punto en el que se determinaron de forma teórica los movimientos verticales de la estructura durante su fase de lanzamiento. En la siguiente figura se puede apreciar la ubicación exacta en la punta de lanzamiento.



Imagen IV.16.- Ubicación del prisma reflector en la punta del tablero.

Dada la imposibilidad de poner en el mismo punto el prisma reflector y la antena GPS se optó por ubicar el prisma en el eje del mamparo derecho y la antena GPS en el eje del mamparo izquierdo, se puede desatacar que ambos ejes se determinó la deformada teórica, con la que poder hacer el contraste de resultados.

En la siguiente figura se pueden apreciar las dimensiones existentes entre el eje del trazado del viaducto (Norma de Trazado 3.1-IC), también llamado el eje de la mediana y la ubicación del prisma centrado en el eje longitudinal del tablero con el eje del mamparo derecho, lugar en el que se ha establecido los valores de la deformada tal y como se veía en el epígrafe anterior.

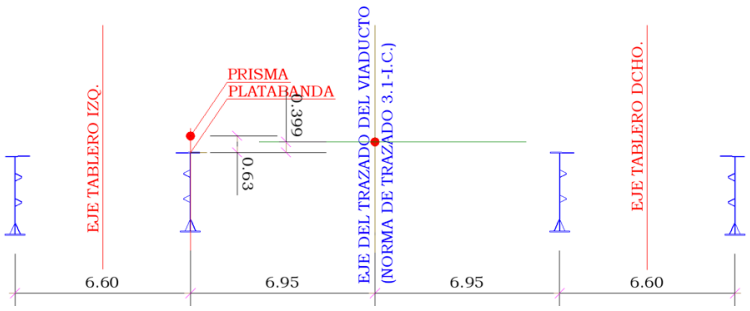


Figura IV.20.- Sección estructural del tablero con indicación de la posición del prisma.

2.5.2.3.- Estación Topográfica

En el capítulo II de este documento se explicó como la observación para llevar a cabo controles geométricos requieren observaciones angulares y distanciométricas, obtenidas con la mayor precisión que sea posible. Con esta premisa, el instrumental aconsejado de forma general para realizar mediciones angulares son los teodolitos de alta precisión (TAP) o al menos los de precisión (TP) con apreciaciones angulares menores al segundo sexagesimal, para las mediciones distanciométricas se considera necesario un instrumental que tenga incertidumbres en torno a $1\ mm + 1\ ppm$.

En este sentido el instrumento utilizado para el control del lanzamiento del tablero es una Estación Topográfica marca LEICA modelo TC2003, con las siguientes especificaciones técnicas:

- Precisión en la medida de ángulos horizontales y verticales: $0{,}5''$
- Sensibilidad del nivel (Compensador electrónico de doble eje): $0{,}3''$
- Aumentos del anteojo: $30x$
- Medición de distancias: $1\ mm + 1\ ppm$

En la siguiente imagen se puede apreciar dicho instrumento topográfico, el cual a través de una tarjeta de memoria es capaz de almacenar para posteriormente tratar informáticamente toda la información captada de forma automática, con la ventaja por una lado de incrementar el rendimiento de la toma de datos y por otro reducir sustancialmente el número errores groseros que se cometen al hacer el mismo proceso de forma manual.



Imagen IV.17.- Estación Topográfica utilizada en el control geométrico.

Las auscultaciones geodésicas requieren de una precisión exigente y por tanto el instrumental utilizado en ellas debe estar en condiciones óptimas de uso con sus

correspondientes revisiones, tanto de calibración como de limpieza, las cuales deben ser realizadas por personal técnico cualificado que pueda emitir sus certificados correspondientes.

2.5.3.- Observables, métodos de resolución y coordenadas.

Una vez definido el instrumental así como la metodología general de observación, las observaciones que se llevan a cabo a lo largo del proceso de lanzamiento del tablero consisten fundamentalmente en estacionar el instrumento topográfico en el pilar PI ubicado en el estribo E1, orientar el equipo con el pilar PIII, ubicado en el estribo 2, y determinar las respectivas distancias al eje de la mediana que la Estación Topográfica permite determinar automáticamente y el desnivel entre el eje secundario de la Estación y el prisma reflector, tal y como se puede apreciar en las siguientes figuras.

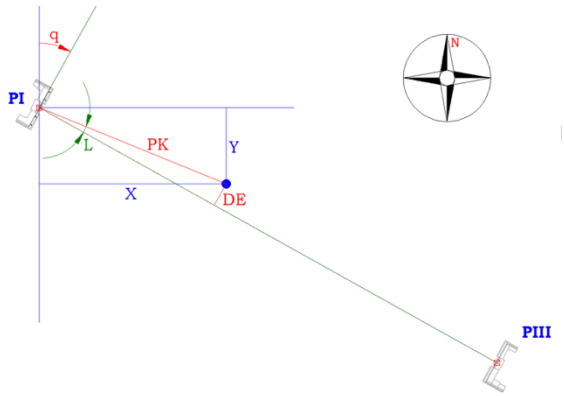


Figura IV.21.- Caracterización geométrica en planta de los observables.

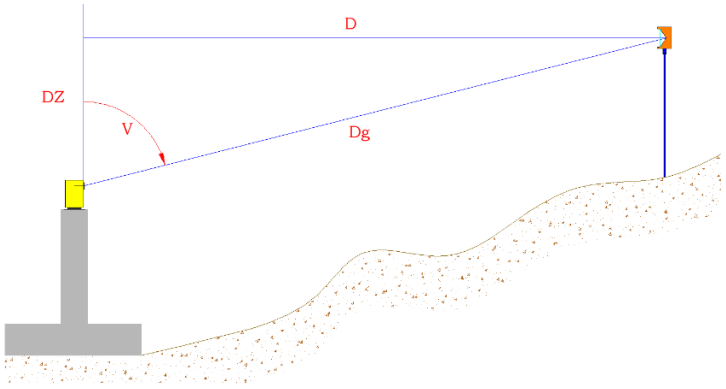


Figura IV.22.- Caracterización geométrica en alzado de los observables.

Con dichos observables obtener las coordenadas es sencillo aplicando las expresiones generales de la topografía:

$$L = \text{atan}\frac{PK}{DE} \quad [IV.1]$$

$$D_{PI}^{P} = \sqrt{PK^2 + DE^2} \quad [IV.2]$$

$$\theta_{PI}^{P} = \theta + 100 - L \quad [IV.3]$$

$$\Delta Z_{PI}^{P} = \frac{D_{PI}^{P}}{\tan V_{PI}^{P}} \quad [IV.4]$$

Siendo:

PK *la distancia del reflector al origen de la estructura a lo largo de la mediana*

DE *la distancia del reflector a la mediana a lo largo de la normal a la propia mediana*

Con lo que ya se pueden obtener las coordenadas de cualquier punto mediante las expresiones habituales:

$$X_P = X_{PI} + D_{PI}^P \sin\theta_{PI}^P$$
$$Y_P = Y_{PI} + D_{PI}^P \cos\theta_{PI}^P \qquad \text{[IV.5]}$$
$$Z_P = Z_{PI} + \Delta Z_{PI}^P$$

Cabe reseñar que este procedimiento permite obtener coordenadas de forma precisa, puesto que los principales errores se eliminan por el propio proceso de observación. La tolerancia planimétrica observando por el procedimiento descrito para el punto más desfavorable será:

- Error longitudinal, considerando centrado forzoso y distancias de observación máximas de 300 metros:

$$e_{longitudinal} = A(mm) + B(ppm) = 1\,mm + 1 \text{ ppm} = 1{,}3 \text{ mm} \qquad \text{[IV.6]}$$

- Error transversal, considerando centrado forzoso y un teodolito como el descrito anteriormente:

$$\varepsilon_T^H = \sqrt{\varepsilon_V^2 + \varepsilon_P^2 + \varepsilon_L^2} \qquad \text{[IV.7]}$$

donde:

$$\varepsilon_V = \frac{S}{12} = \frac{1}{12} = 0{,}08^{cc}$$
$$\varepsilon_P = \frac{K}{A}\left(1 + \frac{4A}{100}\right) = \frac{30}{30}\left(1 + \frac{4 \cdot 30}{100}\right) = 2{,}2^{cc}$$
$$\varepsilon_L = \frac{2}{3}a = \frac{2}{3}1{,}5 = 1^{cc}$$

y por lo tanto:

$$\varepsilon_T^H = \sqrt{0{,}08^2 + 2{,}2^2 + 1^2} = 2{,}42^{cc}$$

siendo:

$$e_t = \frac{d\,\varepsilon_T^H}{636.620} = \frac{300 \cdot 2{,}42}{636.620} = 1{,}1mm \qquad \text{[IV.8]}$$

Pudiéndose considerar que la tolerancia planimétrica para estas observaciones no sobrepase 1,3 milímetros. Altimétricamente sucede parecido, debido a que el procedimiento de observación también elimina las principales causas de error. Pudiéndose considerar:

$$e_t^{II} = D[\text{cotan}(V \pm \varepsilon_T^C) - \text{cotan}\,V] \qquad \text{[IV.9]}$$
$$e_t^{II} = 300[\text{cotan}(95 \pm 0{,}0011) - \text{cotan}\,95] = 0{,}005\,m$$

Dícese por tanto que a la hora de coger puntos mediante el procedimiento descrito puede esperarse que la tolerancia ronde valores de 2 milímetros para planimetría y 5 milímetros para altimetría, que aún no siendo una auscultación propiamente dicha, genera una precisión suficiente para el control geométrico que se pretende llevar a cabo.

De la observación propiamente dicha cabe poco que reseñar salvo que se tomó por el procedimiento descrito, en cada fase de empuje prevista se ubicó la Estación Topográfica en la base utilizada para la construcción del puente y desde ella se tomaron todos aquellos puntos que fueron posibles, dado que no siempre fue posible debido a la falta de visibilidad durante la operación de empuje o disponibilidad del equipo de topografía, dados los múltiples frentes de actuación que los equipos de topografía tenían en la obra.

A continuación se muestran tanto los observables como los resultados de operar con las expresiones definidas anteriormente para los puntos cogidos en el tablero izquierdo, dada la cantidad de puntos tomados, aproximadamente 370 puntos, y con el objeto de no alargar innecesariamente este documento, el resto de datos se pueden consultar en los ficheros digitales adjuntos a esta Tesis Doctoral.

OBSERVABLES, CÁLCULOS Y COORDENADAS ESTACIÓN TOPOGRÁFICA

Observables			Cálculos		Coordenadas		
PK	Dis Eje	Z prisma	Dis Prisma	Acimut	Coord X	Coord Y	Coord Z
2677,530	6,936	127,658	6,936	32,386	427237,025	4068393,378	127,031
2681,530	6,934	127,609	8,005	65,696	427240,518	4068391,428	126,982
2685,530	6,939	127,556	10,590	86,900	427244,014	4068389,484	126,929
2689,530	6,944	127,493	13,864	98,990	427247,510	4068387,540	126,866
2693,530	6,945	127,428	17,442	106,315	427251,004	4068385,593	126,801
2697,530	6,952	127,378	21,174	111,089	427254,500	4068383,651	126,751
2701,530	6,925	127,341	24,979	114,503	427257,981	4068381,679	126,714
2705,530	6,922	127,296	28,843	116,957	427261,473	4068379,728	126,669
2709,530	6,938	127,246	32,743	118,794	427264,974	4068377,794	126,619
2709,680	6,934	127,239	32,889	118,863	427265,103	4068377,717	126,612
2712,310	6,925	127,216	35,463	119,874	427267,396	4068376,428	126,589
2713,186	6,921	127,214	36,321	120,181	427268,159	4068375,998	126,587
2713,662	6,924	127,212	36,789	120,332	427268,576	4068375,769	126,585
2714,849	6,925	127,215	37,956	120,705	427269,613	4068375,192	126,588
2715,141	6,927	127,211	38,244	120,791	427269,869	4068375,051	126,584
2715,420	6,923	127,216	38,517	120,881	427270,111	4068374,912	126,589
2715,679	6,924	127,213	38,772	120,956	427270,338	4068374,786	126,586
2716,494	6,923	127,219	39,574	121,191	427271,049	4068374,389	126,592
2717,681	6,912	127,198	40,742	121,533	427272,080	4068373,801	126,571
2717,969	6,916	127,188	41,026	121,603	427272,334	4068373,664	126,561
2718,549	6,933	127,188	41,601	121,727	427272,849	4068373,396	126,561
2719,144	6,933	127,181	42,188	121,876	427273,368	4068373,107	126,554
2720,012	6,928	127,175	43,043	122,094	427274,124	4068372,680	126,548
2720,876	6,934	127,164	43,897	122,288	427274,881	4068372,264	126,537
2721,697	6,933	127,142	44,708	122,474	427275,598	4068371,863	126,515
2723,092	6,944	127,134	46,088	122,757	427276,822	4068371,193	126,507
2724,625	6,932	127,143	47,602	123,082	427278,155	4068370,436	126,516
2725,669	6,934	127,146	48,636	123,279	427279,067	4068369,930	126,519
2726,395	6,938	127,150	49,355	123,407	427279,703	4068369,579	126,523
2726,976	6,940	127,153	49,931	123,509	427280,212	4068369,298	126,526
2727,691	6,946	127,152	50,640	123,626	427280,839	4068368,955	126,525
2728,994	6,926	127,160	51,928	123,869	427281,967	4068368,303	126,533

Tabla IV.6.- Observables, cálculos y resultados de las observaciones con ET durante el empuje.

A la vista de los resultados obtenidos ya se puede trazar el camino real recorrido por el reflector, que a la vez se considera la punta de tablero, dado que son solidarios, durante la fase de lanzamiento. Además y al igual que con la deformada teórica, se puede construir una gráfica tanto planimétrica como altimétrica, tal y como se puede apreciar en la siguiente figura con el objeto de visualizar más fácilmente la trayectoria recorrida.

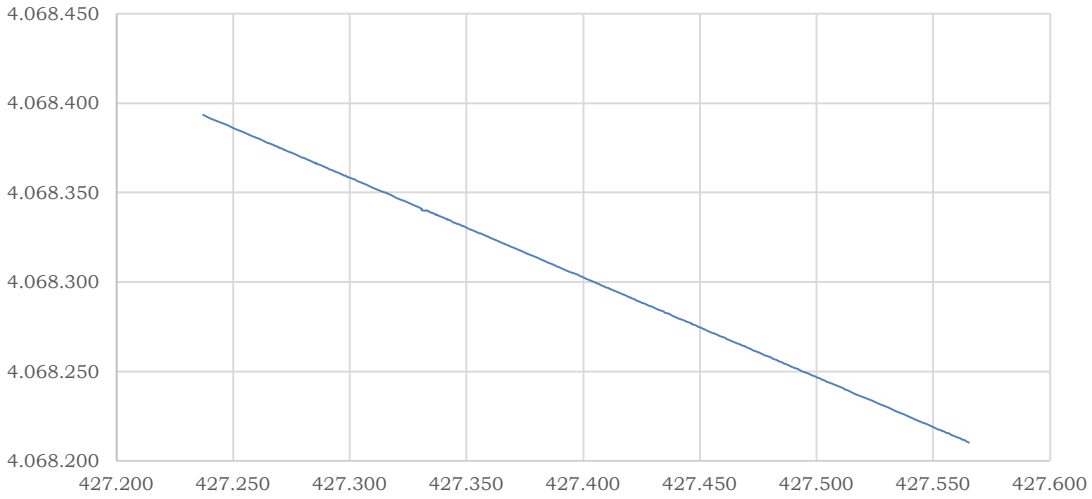


Figura IV.23.- Trayectoria planimétrica de la punta de tablero durante el empuje (ET).

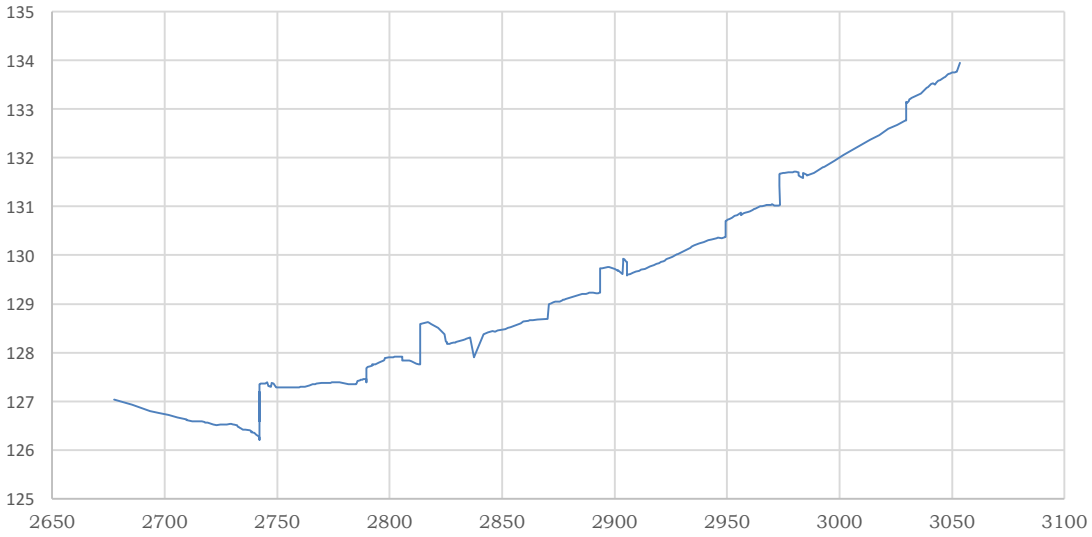


Figura IV.24.- Trayectoria altimétrica de la punta de tablero durante el empuje (ET).

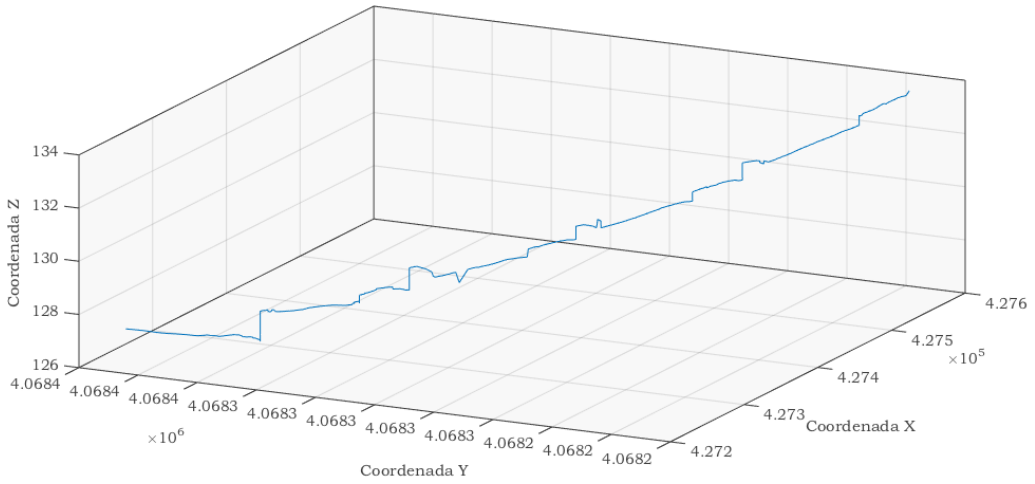


Figura IV.25.- Trayectoria tridimensional de la punta de tablero durante el empuje (ET).

2.6.- CONTROL GEOMÉTRICO MEDIANTE GPS DURANTE EL EMPUJE.

2.6.1.- Introducción.

La construcción en la obra civil ha sufrido una revolución desde la llegada del sistema GPS, multiplicándose las aplicaciones y aumentando paulatinamente la precisión de trabajo. El fundamento teórico relativo a los posicionamientos por métodos con GPS se ha desarrollado ampliamente en el capítulo III de esta tesis doctoral, en el cual se propone resolver el control geométrico por comparación directa de coordenadas teóricas y las obtenidas del sistema GPS.

El nivel de exigencia instrumental y metodológica para obtener las metas marcadas no siempre es posible llevarlo a cabo en la fase de construcción, dado que los plazos y costes condicionan generalmente el devenir y ritmo de la propia obra. Por todo lo anterior se plantea una toma de datos única, con dos equipos receptores que permitan determinar coordenadas tridimensionales de la antena, que convenientemente anclada a la punta del tablero, registre el movimiento del propio tablero, tal y como se puede apreciar en la siguiente figura:

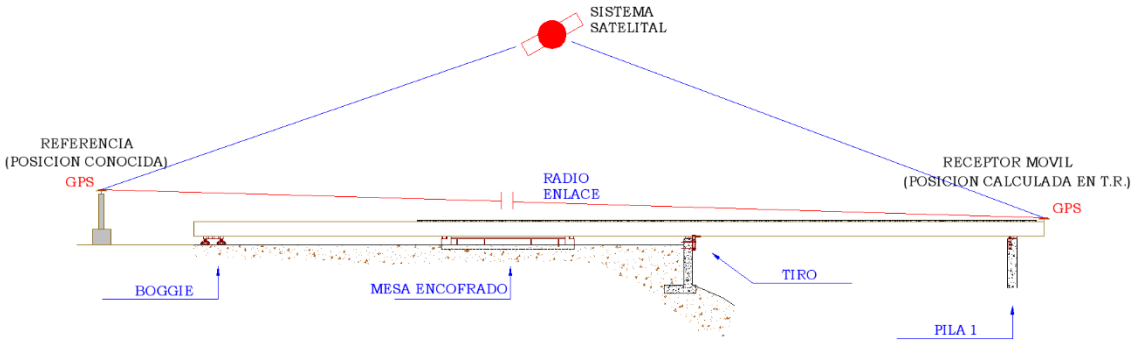


Figura IV.26.- Posición relativa de los elementos participantes en el control geométrico.

Conviene recordar que el objeto del control geométrico propuesto en esta investigación persigue determinar la trayectoria del tablero de un puente durante su lanzamiento con un doble objetivo, por un lado, garantizar que la geometría final sea la proyectada inicialmente, y por otro, y no menos importante, que durante dicha fase de empuje, las secciones estructurales se vean sometidas a esfuerzos iguales o menores a los que han sido previstos, esfuerzos provocados por su apoyo en pilas y por deformación en la punta de lanzamiento del tablero según las diferentes fases por las que va pasando. Para ello, en este laboratorio a escala real como es el tablero, se propone un control mediante observaciones GPS, en el que fundamentalmente un equipo se instala fuera de la estructura y radiotransmite la corrección diferencial a un segundo equipo que se ubica en la punta de tablero durante la fase de lanzamiento, obteniendo directamente las coordenadas como más tarde se justificará.

Cabe reseñar que de los dos tableros lanzados en el viaducto de la Miel, la instalación del equipo GPS en la punta del tablero, se llevó a cabo en tablero izquierdo, y no a lo largo de toda la longitud del tablero, por lo que el contraste solamente se puede llevar a cabo en dicho tablero y longitud.

2.6.2.- Elementos participantes.

2.6.2.1.- Red de pilares.

Para llevar a cabo el control geométrico mediante observaciones GPS, se utilizó la misma red de pilares que la empleada para los métodos clásicos, es más, la red de métodos clásicos se encuadraba en la general de toda la obra, que a su vez había sido debidamente enganchada y encuadrada con la red geodésica nacional.

De los cinco vértices empleados para el control geométrico clásico que pueden apreciarse en la tabla [IV.5], el pilar utilizado como punto estación del receptor encargado de hacer las veces de referencia y por tanto encargado de obtener la corrección diferencial y radiotransmitirla al receptor móvil, era el pilar II. En la siguiente imagen se puede apreciar el receptor observando desde dicho pilar.



Imagen IV.18.- Equipo GPS estacionado en el pilar II, referencia del Viaducto de la Miel.

2.6.2.2.- Antena receptora.

La antena receptora constituye el punto sobre el que se hacen las observaciones con GPS, se ubicó mediante la soldadura correspondiente, de forma rígida al tablero de lanzamiento, dada la imposibilidad física de ubicarla en el mismo punto que el prisma reflector, se optó por ubicarla en el eje longitudinal del tablero izquierdo con el mamparo izquierdo, teniéndose que determinar la corrección por bombeo de las cotas de la deformada teórica, obtenidas en base al mamparo derecho. En la siguiente figura se puede apreciar la ubicación exacta en la punta de lanzamiento.



Imagen IV.19.- Ubicación de la antena receptora en la punta del tablero.

En la siguiente figura se pueden apreciar las dimensiones existentes entre el eje del trazado del viaducto (Norma de Trazado 3.1-IC), también llamado el eje de la mediana y la ubicación del prisma centrado en el eje longitudinal del tablero con el eje del mamparo izquierdo, lugar en el que se ha establecido los valores de la deformada tal y como se veía en el epígrafe anterior.

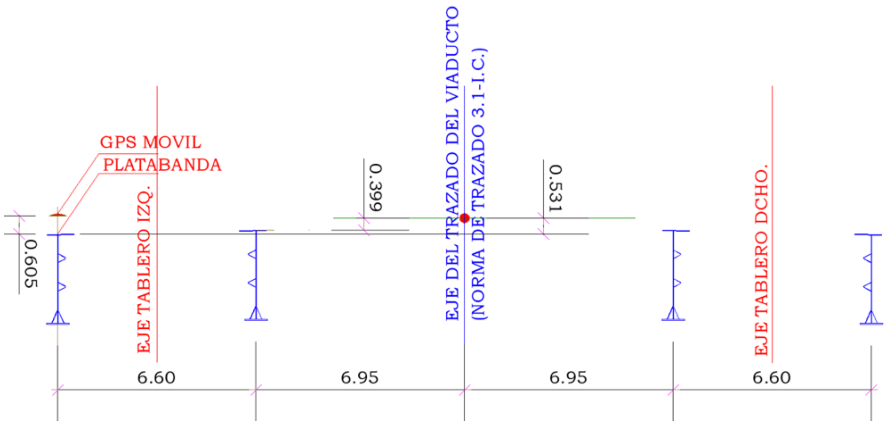


Figura IV.27.- Sección estructural del tablero con indicación de la posición de la antena.

2.6.2.3.- Instrumental.

Como se ha dicho en la introducción de este epígrafe, el instrumental empleado en la observación con GPS, se emplearon dos receptores:

- 1 Equipo referencia: Topcon Hiper LD L1 + L2 RTK.
- 1 Equipo móvil: Topcon Hiper LD L1 + L2, con antenas WIHP.

Los receptores marca Topcon, modelo Hiper, son receptores de doble frecuencia multifunción y multi-propósito diseñados para mercados de precisión, entendiendo mercados de precisión a equipos, subsistemas, componentes y software para topografía, construcción, mapeo comercial, ingeniería civil, agricultura de precisión y construcción en tierra y control de maquinaria.

El Hiper puede recibir y procesar señales tanto L1 como L2, mejorando la precisión de sus puntos y posiciones de levantamiento, permite el acceso a los satélites GPS (Constelación americana) y GLONASS (Constelación Rusa), es decir aumenta el número de satélites que pueden ser detectados por el propio receptor, mejorando de esta manera, la precisión de sus puntos. La doble frecuencia y las características de estos equipos se combinan obteniendo un sistema cinemático en tiempo real (RTK) preciso para líneas de base cortas y largas. En las siguientes imágenes puede apreciarse, en primera instancia al equipo referencia en disposición de observar en el punto referencia, y en la segunda al equipo correspondiente ubicado en la punta de tablero.



Imagen IV.20.- Equipo GPS móvil del Viaducto de la Miel.

Las principales especificaciones técnicas son las que se pueden apreciar en las tablas siguientes:

Componente	Detalles
TIPO DE RECEPTOR	
	Euro-112 GGD, definida activando el OAF correcto
	G-GPS L1
	GD-GPS L1/L2
	GG-GPS/GLONASS L1
	GGD-GPS/GLONASS L1/L2
ESPECIFICACIONES DE RASTREO	
Canales Estándar	20 L1 GPS
	L1/L2 GPS
	L1/L2 GLONASS
	L1/L2 GPS + L1/L2 GLONASS
	WAAS/EGNOS
Opcional	Días cenicienta
Señales rastreadas	L1/L2 C/A y Código P y Portadora
	WAAS/EGNOS

Tabla IV.7.- Especificaciones técnicas Topcon Hiper, tipo de receptor y rastreo.

Conexiones	
RADIO MODEM	
Amplio espectro	Transceptor de espectro ensanchado interno 915 MHz a 2,4 GHz
Radio modem UHF	Tx/Rx interno o externo
Modem GSM	Europa y Asia: 900/1800 MHz
	EEUU y Canadá: 900-1900 MHz
ESPECIFICACIONES DEL MODULO BLUETOOTH	
Tipo	Clase 2
Clases de servicios	Misceláneos
Perfiles soportados	LM, L2CAP, SDP, PPP
Cód. frec. Del país	Norteamérica y Europa

Tabla IV.8.- Especificaciones técnicas Topcon Hiper, radio módem y bluetooth.

Precisión del levantamiento	
Estático Estático-rápido	Para L1-L2: H: 3 mm + 1 pmm x D V: 3 mm + 1,4 pmm x D
	Para L1: H: 5 mm + 1,4 pmm x D V: 7 mm + 1,9 pmm x D
Cinemático	Para L1-L2: H: 10 mm + 1,5 pmm x D V: 15 mm + 2,0 pmm x D
	Para L1: H: 15 mm + 2,0 pmm x D V: 20 mm + 2,5 pmm x D
RTK	Para L1-L2: H: 10 mm + 1,5 pmm x D V: 15 mm + 2,0 pmm x D
	Para L1: H: 15 mm + 2,0 pmm x D V: 20 mm + 2,5 pmm x D
Arranque frío Arranque cálido Readquisición	< 60 segundos < 10 segundos < 1 segundo

Tabla IV.9.- Especificaciones técnicas Topcon Hiper, precisiones.

NMEA y DGPS	
NMEA	
Versión NMEA	Salida Vea. 2.1, 2.2. 2.3, 3.0
Mensajes	GGA, GLL, GNS, GRS, GSA, GST
	GSV, HDT, RMC, VTG, ZDA, ROT
Intervalo salida	Estándar 1 HZ / Opcional: 5-10-20 Hz
DGPS	
Form. corrección	RTCM SC104 Vez 2.2 o 2.3
Tipo mens. RTCM	1,3,9,31,32,34: seleccionable por el usuario
Intervalo proceso	Estándar 1 HZ / Opcional: 5-10-20 Hz
Int. Salida datos de correción RTCM	Estándar 1 HZ / Opcional: 5-10-20 Hz
Máscara elevación	0 a 90 grados, indepediente del registro de datos
DGPS Multibase	Modo de selección de corrección diferencial: más cercano, mixto, mejor (opcional)

Tabla IV.10.- Especificaciones técnicas Topcon Hiper, NMEA y DGPS.

Funciones de rastreo	
Reducción Multi-Path	Código y portadora
Configuración PLL/DLL	Ancho de banda, orden, ajustable
Config. del bucle de rastreo co-op	Encendido / Apagado. Modo estático. Ancho de banda de PLL individual. Ancho de banda de PL común.

Tabla IV.11.- Especificaciones técnicas Topcon Hiper, funciones de rastreo.

RTK	
Form. corrección	CMR2/CMR+ (compatible con Trimble)
	RTCM SC104 Vez 2.2 o 2.3
Tipo mens. RTCM	3,8,19,20,21,22: seleccionable por el usuario
RTK Inverso	Estará disponible en el futuro
Inicialización de la ambigüedad	OTF (L1, L1/L2)
Longitud de la línea base	Hasta 50 km en la mañana y tarde y hasta 32 km al mediodía
Tiempo de inicialización	5 seg. A 10 min. Dependiendo de la longitud de la línea base y de las condiciones multipath
Int. Salida datos de correción RTCM	Estándar 1 HZ / Opcional: 5-10-20 Hz
Elevación	0 a 90 grados, indepediente del registro de datos
Modo de solución	Retardo (sincronización)
	Extrapolación (no sincronizada)
Intervalo proceso	Estándar 1 HZ / Opcional: 5-10-20 Hz
Latencia	Modo de retardo: 20 mseg. a 20 seg.
	Extrapolación: 20 mseg. a 30 mseg.
Registro de datos sin procesar	El receptor puede registrar datos sin procesar en otro intervalo durante la operación RTK
Estado	Fijo, Flotante, DOP, Estado del Data Link, Latencia del Modem, Satélites comunes, % fij.
Resultados	Coordenadas RTK, HRMS, VRMS, Matriz. Cov.
Nivel de fijación de la ambigüedad	Umbrales seleccionables: Bajo 95% / Medio 99,5% / Alto 99,9%

Tabla IV.12.- Especificaciones técnicas Topcon Hiper, RTK.

Memoria y energía	
Memoria	
Memoria interna	Tarjeta flash compacta (no removible)
Capacidad	Estándar: 0 MB / Máxima: 1 GB
Tiempo de registro	53 horas (8 MB, 15 seg., L1/L2, 7 satélites)
Intervalo de regist.	0,05 a 86400 segundos
Energía	
Batería interna	Li-ion, 300 mAh, 7,4 V
Tamaño batería	132x35x18 mm
Peso batería	165 gramos
nº bat. Internas	2
Batería de cambio	Batería no descartable

Tabla IV.13.- Especificaciones técnicas Topcon Hiper, memoria y energía.

Tecnología	
	Rastreo Co-Op Rastreo de señal baja Mitigación avanzada multipath WAAS Parámetros ajustrables PLL y DLL

Tabla IV.14.- Especificaciones técnicas Topcon Hiper, tecnología.

2.6.3.- Observables, métodos de resolución y coordenadas.

La observación con GPS en tiempo real, tal y como se ha descrito en el capítulo III de éste documento, requiere dos equipos:

- El primero denominado referencia, se estaciona sobre el pilar II mediante un mecanismo de centrado forzoso que evita errores de estacionamiento. Dicho pilar se caracteriza porque tiene coordenadas conocidas en el Sistema de Referencia ED50 (sistema adoptado para toda la investigación), además de WGS84, lo que permite con su observación determinar la corrección diferencial que es radio trasmitida en tiempo real al segundo equipo.
- El segundo denominado móvil, se estaciona sobre la punta de tablero mediante el correspondiente perno debidamente soldado a la estructura, con el objeto de hacer ambos solidarios y conseguir que tanto la antena como el propio tablero sufran los mismos movimientos. Éste equipo se caracteriza por que obtiene la corrección diferencial vía radio y las aplica a sus observaciones, procediendo en primera instancia a un periodo de iniciación con el cálculo de las ambigüedades enteras mediante técnicas OTF (on the fly) que permiten su determinación en movimiento. Este tiempo inicial varía según el número de satélites, la configuración de éstos y la distancia entre el receptor fijo y el móvil, teniendo un valor habitual entre 1 y 2 minutos que en los receptores modernos puede rebajarse hasta pocos segundos. En segunda instancia pasa a llevar a cabo la medición de puntos, para lo cual es necesario la conexión por radio entre los dos receptores, de tal modo que pueda plantearse la ecuación de dobles diferencias. Para ello debe recibirse en el receptor móvil los datos de medición de diferencia de fase en el fijo. El control del empuje se realiza por tanto con medida de código y fase de tal manera que las precisiones obtenidas en el posicionamiento de la antena varían de 2 a 4 centímetros según la configuración de la constelación de satélites en cada momento.

De los observables con GPS se pueden destacar varias cuestiones que afectan a las observaciones realizadas:

- En la construcción del tablero derecho del viaducto de la Miel no se pudo llevar a cabo el contraste propuesto, debido a la imposibilidad de disponer de equipos GPS, con lo que el control geométrico se llevo a cabo exclusivamente mediante métodos topográficos clásicos.
- En la construcción del tablero izquierdo del viaducto de la Miel, se llevó a cabo el contraste propuesto, dado que sí se dispuso de equipos GPS. Aunque se debe reseñar que el inicio del viaducto está en el $p.k.2+677{,}53$ y su final en el $p.k.3+053{,}53$ y los equipos GPS solamente estuvieron operativos entre los $p.k.2+789{,}934$ y $p.k.2+988{,}710$. Esto genera que el contraste sólo se realizase en dicho tramo, en el que obviamente existen datos de la Estación Topográfica y de la antena GPS.
- Los equipos GPS permiten grabar datos automáticamente cada cierto tiempo $[1,2,3,10,15,20,\ldots segundos]$ y dado que se pretendían contrastar con datos tomados con Estación Topográfica se consideró oportuno grabar datos cada 20 segundos durante los procesos de empuje del tablero. Esto genera una nube de puntos muy densa, aproximadamente 6.900 puntos, que se sincronizan a través de la medida del tiempo con la Estación Topográfica.

Finalizado el trabajo de campo la gran cantidad de datos obtenida necesita una depuración y procesado de forma que se puedan obtener las coordenadas x,y,z de los puntos medidos. Una vez guardados por parte del receptor móvil las coordenadas de los puntos a lo largo de la trayectoria seguida durante el empuje del viaducto, se obtiene una nube de puntos en el sistema de referencia WGS84. Así es necesaria una transformación de coordenadas al sistema de coordenadas planas local y cota respecto del cero de referencia, de forma que puedan ser comparadas con las obtenidas mediante métodos clásicos. De este modo, los puntos obtenidos en el receptor móvil basta con aplicarle la transformación original para obtener las coordenadas en el sistema local de puntos grabados.

En el procedimiento de observación en tiempo real, los ficheros almacenados automáticamente por el equipo, son directamente las coordenadas de la posición de la antena cada 20 segundos, en el sistema de referencia establecido. Al margen de algunos parámetros más o menos representativos como pueden ser número de satélites, precisión esperada, fecha, hora, etc., los resultados de la observación, que generalmente se almacenan en un fichero con formato de intercambio denominado Rinex, se muestran de forma simplificada en la tabla siguiente, todo ello con el objeto de clarificar los observables captados.

nº pto	Coord_X	Coord_Y	Coord_Z	nº sat planta	nº sat cota	Precisión planta	Precisión cota	Altura antena	Fecha	hora	min	seg
1	427359,030	4068332,908	128,189	7	3	0,014	0,018	0,605	6/7/04	10	25	0
2	427359,019	4068332,900	128,174	7	3	0,014	0,017	0,605	6/7/04	10	25	15
3	427359,025	4068332,905	128,184	7	3	0,013	0,016	0,605	6/7/04	10	25	30
4	427359,025	4068332,905	128,169	7	3	0,012	0,016	0,605	6/7/04	10	25	45
5	427359,025	4068332,908	128,170	7	3	0,013	0,016	0,605	6/7/04	10	26	0
6	427359,023	4068332,903	128,167	7	3	0,013	0,017	0,605	6/7/04	10	26	15
7	427359,033	4068332,908	128,179	7	3	0,012	0,016	0,605	6/7/04	10	26	30
8	427359,030	4068332,908	128,169	7	3	0,015	0,017	0,605	6/7/04	10	26	45
9	427359,023	4068332,913	128,168	7	3	0,012	0,017	0,605	6/7/04	10	27	0
10	427359,029	4068332,909	128,170	7	3	0,013	0,017	0,605	6/7/04	10	27	15
11	427359,033	4068332,910	128,173	7	3	0,012	0,016	0,605	6/7/04	10	27	30
12	427359,031	4068332,908	128,173	7	3	0,013	0,017	0,605	6/7/04	10	27	45
13	427359,023	4068332,910	128,170	7	3	0,015	0,02	0,605	6/7/04	10	28	0
14	427359,022	4068332,912	128,173	7	3	0,013	0,017	0,605	6/7/04	10	28	15
15	427359,024	4068332,910	128,172	7	3	0,012	0,018	0,605	6/7/04	10	28	30

Tabla IV.15.- Observables GPS simplificados.

Tal y como se ha comentado anteriormente, el número de observables captados ronda los 6.900 puntos, lo que hace inviable la presentación en formato papel de los observables. En la tabla anterior se muestran los observables de 15 puntos, encontrándose el resto de datos en los ficheros en formato digital adjuntos a esta Tesis Doctoral.

En primera instancia se corrige la cota de la antena con la altura de ésta para determinar la cota del mamparo que es la que se tiene en la deformada teórica. En segunda instancia y con el objeto de poder comprobar la adecuada fusión de los datos a contrastar entre la Estación Topográfica y GPS, aunque se realiza a través de la hora de observación, se determina el Punto Kilométrico de los puntos observados con GPS que es un dato mucho más intuitivo, para lo que se procede de la siguiente forma:

- Con los incrementos de coordenadas entre el origen de la mediana y el punto cuestión se determina la distancia entre el Pk y el punto, distancia D en la siguiente figura.

$$D = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2} \qquad [IV.9]$$

- Con la diferencia de acimutes entre el Pk inicial y el punto cuestión (calculado por incremento de coordenadas) y el acimut de la alineación del viaducto (132,3859g) se determina Δα.

$$\Delta\alpha = \theta^P_{PK_{inicio}} - \theta_{VIADUCTO}$$

$$\theta^P_{PK_{inicio}} = \text{atan}\frac{\Delta X}{\Delta Y} \qquad [IV.10]$$

- Con la distancia D y el incremento angular Δα se calcula directamente el PK, tal y como se puede apreciar en la siguiente figura.

$$PK_p = D\cos\Delta\alpha \qquad [IV.11]$$

Tal y como se puede deducir de la siguiente figura

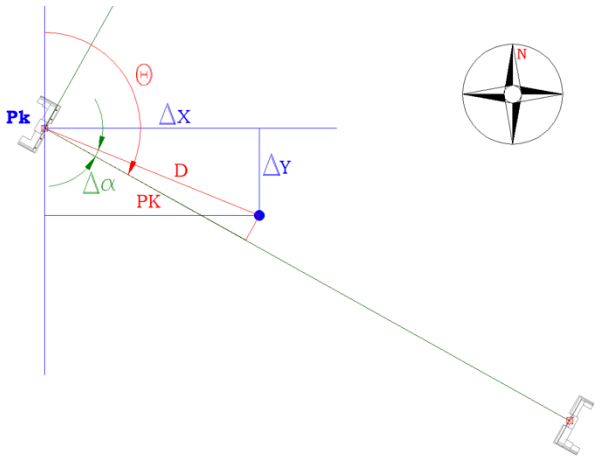


Figura IV.28.- Relación entre coordenadas y Punto Kilométrico.

Dado el gran volumen de datos obtenidos y con el objeto de agilizar los cálculos, se procesan los datos mediante una hoja de cálculo que permite implementar expresiones matemáticas aplicables de forma automática. En la siguiente tabla se puede apreciar los resultados y por tanto las coordenadas de los diferentes puntos recorridos por la antena durante la fase de empuje del tablero. Al igual que en tablas anteriores y dado el gran volumen de datos almacenados (6.900 puntos), en la siguiente tabla se pueden apreciar los 40 primeros puntos, pudiéndose comprobar los restantes en los ficheros adjuntos a esta Tesis Doctoral.

OBSERVABLES, CÁLCULOS Y COORDENADAS GPS

OBSERVABLES					CÁLCULOS PK				COORDENADAS GPS		
nº Punto	Altura Antena	Coord X	Coord Y	Coord Z	Distancia Mediana	Acimut Mediana	Variación Angular	PK	Coord X	Coord Y	Coord Z
1	0,605	427338,160	4068344,534	128,581	112,932	126,227	6,159	2789,934	427338,160	4068344,534	127,976
2	0,605	427338,154	4068344,537	128,585	112,925	126,227	6,159	2789,927	427338,154	4068344,537	127,980
1	0,605	427359,030	4068332,908	128,794	136,680	127,346	5,040	2813,782	427359,030	4068332,908	128,189
2	0,605	427359,019	4068332,900	128,779	136,674	127,352	5,034	2813,776	427359,019	4068332,900	128,174
3	0,605	427359,025	4068332,905	128,789	136,677	127,348	5,038	2813,779	427359,025	4068332,905	128,184
4	0,605	427359,025	4068332,905	128,774	136,677	127,348	5,038	2813,779	427359,025	4068332,905	128,169
5	0,605	427359,025	4068332,908	128,775	136,676	127,347	5,039	2813,778	427359,025	4068332,908	128,170
6	0,605	427359,023	4068332,903	128,772	136,676	127,350	5,036	2813,779	427359,023	4068332,903	128,167
7	0,605	427359,033	4068332,908	128,784	136,684	127,345	5,041	2813,785	427359,033	4068332,908	128,179
8	0,605	427359,030	4068332,908	128,774	136,680	127,346	5,040	2813,782	427359,030	4068332,908	128,169
9	0,605	427359,023	4068332,913	128,773	136,672	127,345	5,041	2813,774	427359,023	4068332,913	128,168
10	0,605	427359,029	4068332,909	128,775	136,679	127,346	5,040	2813,781	427359,029	4068332,909	128,170
11	0,605	427359,033	4068332,910	128,778	136,682	127,345	5,041	2813,784	427359,033	4068332,910	128,173
12	0,605	427359,031	4068332,908	128,778	136,681	127,346	5,040	2813,783	427359,031	4068332,908	128,173
13	0,605	427359,023	4068332,910	128,775	136,673	127,347	5,039	2813,775	427359,023	4068332,910	128,170
14	0,605	427359,022	4068332,912	128,778	136,672	127,346	5,040	2813,774	427359,022	4068332,912	128,173
15	0,605	427359,024	4068332,910	128,777	136,675	127,347	5,039	2813,777	427359,024	4068332,910	128,172
16	0,605	427359,027	4068332,911	128,777	136,677	127,346	5,040	2813,779	427359,027	4068332,911	128,172
17	0,605	427359,026	4068332,909	128,787	136,676	127,347	5,039	2813,778	427359,026	4068332,909	128,182
18	0,605	427359,024	4068332,910	128,797	136,674	127,346	5,040	2813,776	427359,024	4068332,910	128,192
19	0,605	427359,027	4068332,908	128,809	136,678	127,347	5,039	2813,780	427359,027	4068332,908	128,204
20	0,605	427359,027	4068332,910	128,802	136,677	127,346	5,040	2813,779	427359,027	4068332,910	128,197
21	0,605	427359,019	4068332,913	128,799	136,669	127,346	5,040	2813,771	427359,019	4068332,913	128,194
22	0,605	427359,025	4068332,909	128,803	136,676	127,347	5,039	2813,778	427359,025	4068332,909	128,198
23	0,605	427359,030	4068332,915	128,789	136,678	127,343	5,043	2813,780	427359,030	4068332,915	128,184
24	0,605	427359,039	4068332,913	128,786	136,687	127,342	5,044	2813,788	427359,039	4068332,913	128,181
25	0,605	427359,032	4068332,915	128,785	136,680	127,343	5,043	2813,781	427359,032	4068332,915	128,180
26	0,605	427359,025	4068332,913	128,787	136,674	127,345	5,041	2813,776	427359,025	4068332,913	128,182
27	0,605	427359,023	4068332,908	128,794	136,674	127,347	5,039	2813,776	427359,023	4068332,908	128,189
28	0,605	427359,019	4068332,907	128,790	136,671	127,349	5,037	2813,773	427359,019	4068332,907	128,185
29	0,605	427359,033	4068332,912	128,786	136,682	127,344	5,042	2813,783	427359,033	4068332,912	128,181
30	0,605	427359,030	4068332,918	128,774	136,677	127,342	5,044	2813,778	427359,030	4068332,918	128,169
31	0,605	427359,025	4068332,915	128,780	136,674	127,344	5,042	2813,775	427359,025	4068332,915	128,175
32	0,605	427359,028	4068332,914	128,761	136,676	127,344	5,042	2813,778	427359,028	4068332,914	128,156
33	0,605	427359,033	4068332,917	128,782	136,680	127,342	5,044	2813,781	427359,033	4068332,917	128,177
34	0,605	427359,041	4068332,923	128,750	136,685	127,337	5,049	2813,785	427359,041	4068332,923	128,145
35	0,605	427359,030	4068332,917	128,785	136,677	127,342	5,044	2813,778	427359,030	4068332,917	128,180
36	0,605	427359,024	4068332,909	128,808	136,675	127,347	5,039	2813,777	427359,024	4068332,909	128,203
37	0,605	427359,025	4068332,910	128,789	136,676	127,346	5,040	2813,778	427359,025	4068332,910	128,184
38	0,605	427359,027	4068332,912	128,799	136,676	127,345	5,041	2813,778	427359,027	4068332,912	128,194
39	0,605	427359,026	4068332,912	128,804	136,675	127,345	5,041	2813,776	427359,026	4068332,912	128,199
40	0,605	427359,028	4068332,916	128,803	136,675	127,343	5,043	2813,777	427359,028	4068332,916	128,198

Tabla IV.16.- Observables, cálculos y resultados de las observaciones GPS durante el empuje.

A la vista de los resultados obtenidos ya se puede trazar el camino real recorrido por la antena, que a la vez se considera la punta de tablero, dado que son solidarios, durante la fase de lanzamiento. Además y al igual que con la deformada teórica y los resultados de la Estación Topográfica, se puede construir una gráfica tanto planimétrica como altimétrica, tal y como se puede apreciar en la siguiente figura con el objeto de visualizar más fácilmente la trayectoria recorrida.

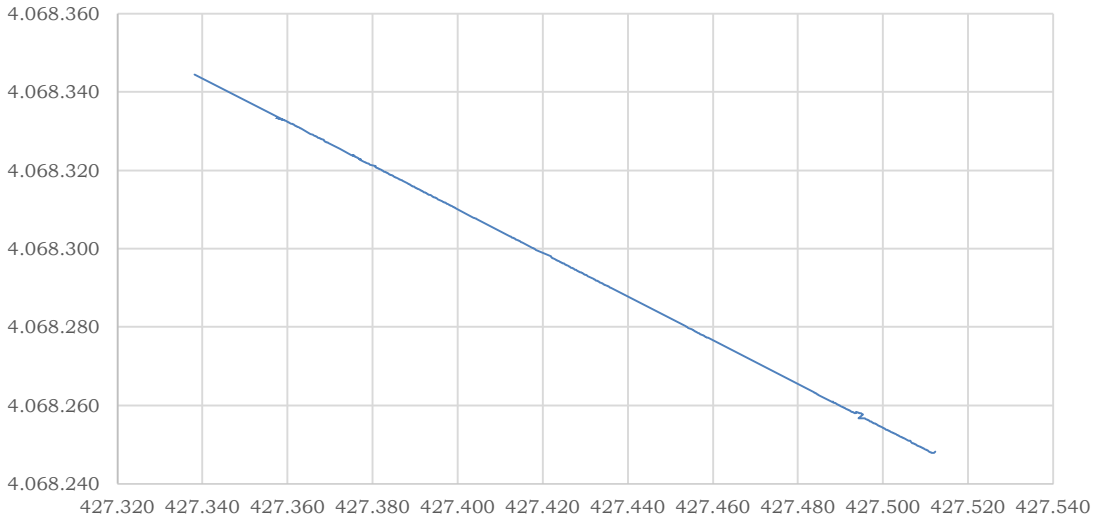


Figura IV.28.- Trayectoria planimétrica de la punta de tablero durante el empuje (GPS).

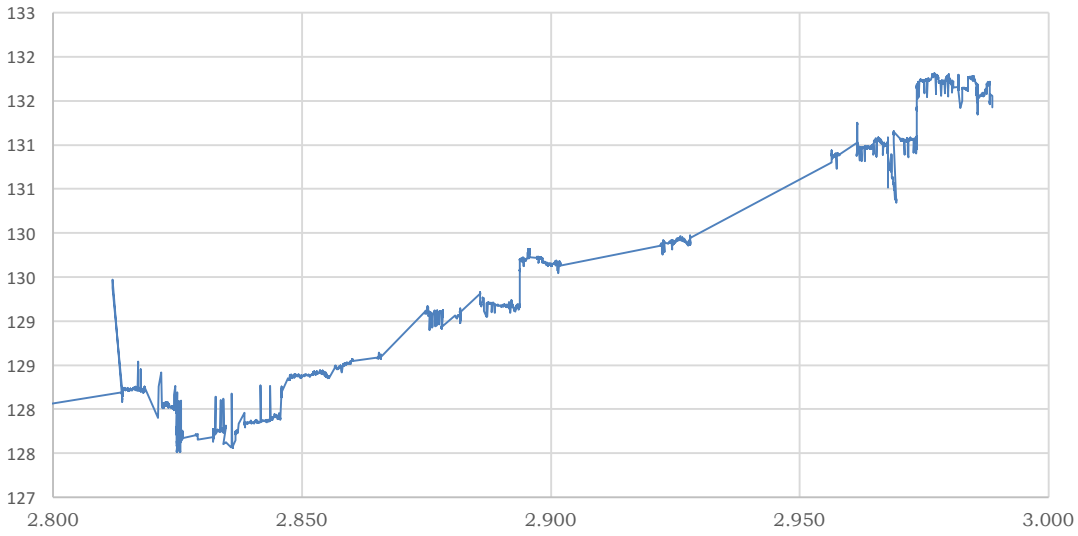


Figura IV.29.- Trayectoria altimétrica de la punta de tablero durante el empuje (GPS).

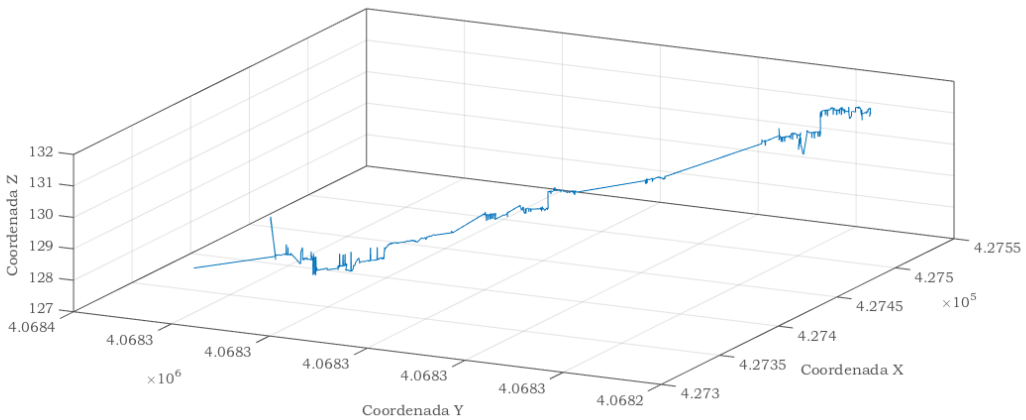


Figura IV.30.- Trayectoria tridimensional de la punta de tablero durante el empuje (GPS).

2.7.- CONTRASTE DE RESULTADOS.

2.7.1.- Introducción.

Una vez resueltas las coordenadas de los puntos que definen la trayectoria del tablero durante su fase de empuje, calculadas con diferentes instrumental y metodología, se plantea ahora la necesidad de contrastar los diferentes resultados obtenidos con el objeto de establecer si el instrumental y los métodos propuestos resuelven el problema planteado con los requerimientos de precisión marcados previamente.

En primera instancia se debe justificar lo que se debe y no se debe contrastar, en este sentido se tienen coordenadas de la deformada teórica del mamparo derecho e izquierdo, lugares donde se han ubicado el prisma reflector y la antena GPS respectivamente, y además se tienen las coordenadas obtenidas con la Estación Topográfica de la trayectoria real del mamparo derecho y con GPS de la trayectoria del mamparo izquierdo.

En este sentido, se puede destacar que tanto la deformada del mamparo derecho como el izquierdo, responden a un modelo teórico y que por tanto describen la trayectoria que debiera de tener el tablero durante la fase de empuje, pero obviamente no deja de ser un modelo teórico que tendrá que ver más o menos con la realidad dependiendo de la construcción del propio tablero así como del proceso de empuje. Dícese, en una situación ideal la trayectoria de los mamparos y la descrita por la Estación Topográfica y el GPS debieran de coincidir, aunque esto no sólo no sucede, sino que además se utiliza la deformada para guiar la trayectoria real del tablero durante la fase de empuje, generalmente mediante las indicaciones que hace el topógrafo al operador de tesado de la torre de atirantamiento, a medida que va determinando las flechas reales y contrastándolas con las admisibles.

Aún así, sucede que las deformadas se establecen de forma paralela y por tanto equidistantes en el espacio, convirtiéndose en las dos referencias que se pueden utilizar para determinar las diferencias entre las trayectorias establecidas con Estación Topográfica y GPS, dado que dichas trayectorias difieren en una distancia equivalente a la constante que hay entre el prisma reflector y la antena GPS y por tanto no se pueden contrastar directamente, dado que sus coordenadas son diferentes. Para conseguir el objeto fundamental de esta investigación se hace necesario, en primer lugar establecer las variaciones entre la trayectoria de la deformada teórica del mamparo derecho y la establecida con la Estación Topográfica, en segundo lugar las variaciones entre la trayectoria de la deformada teórica del mamparo izquierdo y la establecida con GPS, y para finalizar contrastar las variaciones obtenidas entre la Estación Topográfica y GPS con sus respectivas deformadas teóricas.

En esta línea, se propone un contraste de resultados por dos técnicas totalmente diferentes en cuanto a planteamiento, resolución y tipo de resultados obtenidos. El primero se propone que sea un contraste gráfico que permita visualizar los resultados de las técnicas a contrastar de forma rápida e intuitiva, aunque sus resultados sean poco menos que estimativos. En segundo lugar se propone tratar estadísticamente las variaciones de coordenadas con el objetivo de obtener unos resultados más impersonales y por tanto menos estimativos, aunque posiblemente menos visuales.

2.7.2.- Variaciones entre la deformada teórica y la Estación Topográfica.

Establecidas las coordenadas de la deformada teórica del mamparo derecho del tablero izquierdo del viaducto y las coordenadas de la trayectoria del prisma reflector sobre el mismo mamparo determinadas mediante Estación Topográfica, la diferencia entre dichas coordenadas determinan las variaciones entre las trayectorias de la deformada teórica y la Estación Topográfica, que a su vez representan el acomodo entre el proceso de empuje del tablero real y teórico. Como se ha dicho anteriormente

permiten guiar a los operadores durante la fase del empuje, que habitualmente siguen las directrices que marca el topógrafo que va indicando en base a las flechas teóricas y las reales como se deben producir los tesados de la torre de atirantamiento con el objeto de que no se produzcan diferencias notables entre ambos valores, aportando así las indicaciones necesarias para que el proceso se lleve a cabo de forma segura. Por tanto, esta comparación no permite determinar indicadores de calidad de la observación, sino indicadores del proceso de empuje del tablero.

Dado que la deformada teórica se establece únicamente cada cuatro metros y la Estación Topográfica determina coordenadas generalmente cada menos distancia, se lleva a cabo una interpolación lineal de las coordenadas de la deformada teórica a cada punto kilométrico establecido con Estación Topográfica, obteniendo así los pares de coordenadas buscados. En la siguiente tabla se pueden apreciar los valores de la deformada teórica interpolados y los determinados con la Estación Topográfica. Al igual que en tablas anteriores y con el objeto de no alargar innecesariamente este documento se muestran tan solo los primeros 50 de los 370 puntos observados, presentándose el resto en los ficheros en formato digital adjuntos a este documento.

CONTRASTE DEFORMADA - ESTACIÓN TOPOGRÁFICA							
Transformada Teórica ET				Coordenadas ESTACIÓN			
PK	X	Y	Z	PK	X	Y	Z
2677,53	427237,03	4068393,39	127,03	2677,53	427237,03	4068393,38	127,03
2681,53	427240,53	4068391,44	126,99	2681,53	427240,52	4068391,43	126,98
2685,53	427244,02	4068389,49	126,93	2685,53	427244,01	4068389,48	126,93
2689,53	427247,51	4068387,55	126,86	2689,53	427247,51	4068387,54	126,87
2693,53	427251,01	4068385,60	126,79	2693,53	427251,00	4068385,59	126,80
2697,53	427254,50	4068383,65	126,74	2697,53	427254,50	4068383,65	126,75
2701,53	427257,99	4068381,70	126,69	2701,53	427257,98	4068381,68	126,71
2705,53	427261,49	4068379,75	126,66	2705,53	427261,47	4068379,73	126,67
2709,53	427264,98	4068377,80	126,63	2709,53	427264,97	4068377,79	126,62
2709,53	427264,98	4068377,80	126,63				
2709,68	427265,11	4068377,73	126,63	2709,68	427265,10	4068377,72	126,61
2712,31	427267,41	4068376,45	126,62	2712,31	427267,40	4068376,43	126,59
2713,19	427268,17	4068376,02	126,62	2713,19	427268,16	4068376,00	126,59
2713,53	427268,47	4068375,86	126,62				
2713,66	427268,59	4068375,79	126,62	2713,66	427268,58	4068375,77	126,59
2714,85	427269,63	4068375,21	126,60	2714,85	427269,61	4068375,19	126,59
2715,14	427269,88	4068375,07	126,59	2715,14	427269,87	4068375,05	126,58
2715,42	427270,12	4068374,94	126,59	2715,42	427270,11	4068374,91	126,59
2715,68	427270,35	4068374,81	126,58	2715,68	427270,34	4068374,79	126,59
2716,49	427271,06	4068374,41	126,57	2716,49	427271,05	4068374,39	126,59
2717,53	427271,97	4068373,91	126,55				
2717,68	427272,10	4068373,83	126,55	2717,68	427272,08	4068373,80	126,57
2717,97	427272,35	4068373,69	126,55	2717,97	427272,33	4068373,66	126,56
2718,549	427272,857	4068373,411	126,541	2718,549	427272,849	4068373,396	126,561
2719,144	427273,376	4068373,122	126,534	2719,144	427273,368	4068373,107	126,554
2720,012	427274,135	4068372,699	126,523	2720,012	427274,124	4068372,680	126,548

Tabla IV.17.- Coordenadas de la deformada teórica del mamparo derecho y Estación Topográfica.

2.7.2.1.- Análisis gráfico entre la deformada teórica y la Estación Topográfica.

Establecidos las coordenadas de la trayectoria de la deformada teórica y de la Estación Topográfica se puede llevar a cabo una representación bidimensional o tridimensional de ambas trayectorias que permita posteriormente realizar el análisis gráfico de dichas trayectorias.

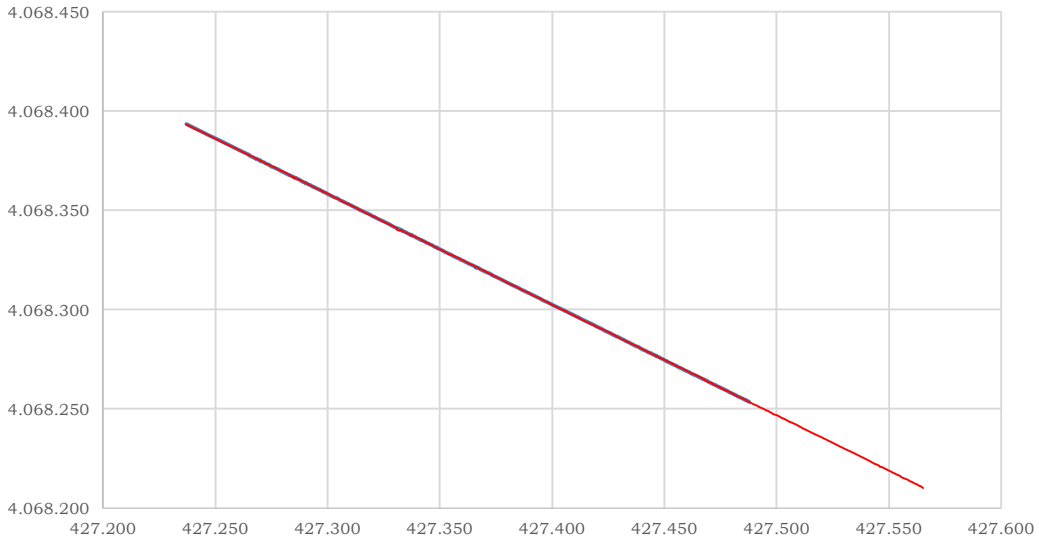


Figura IV.31.- Trayectorias teórica y Estación Topográfica planimétricas.

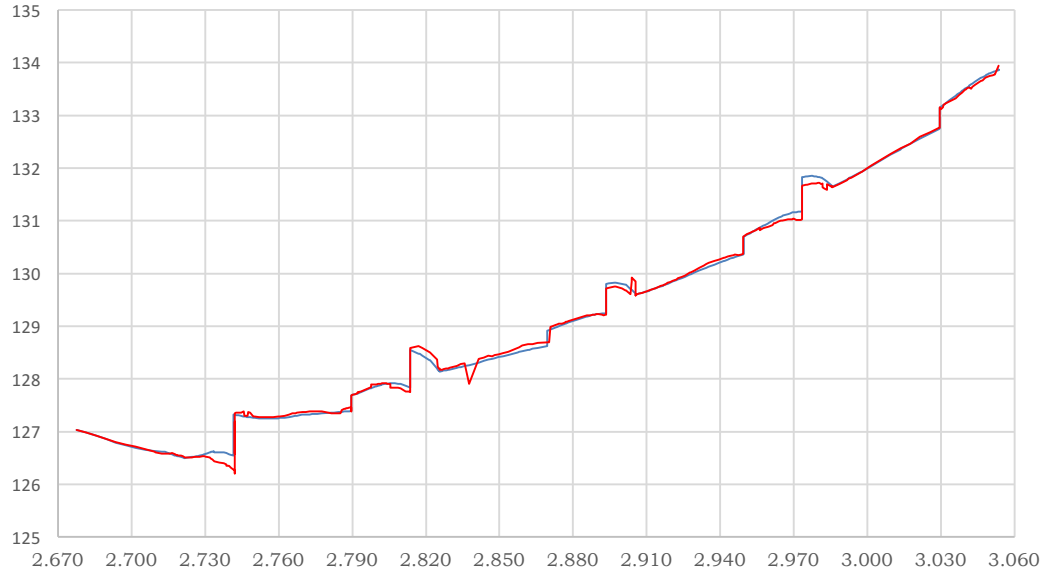


Figura IV.32.- Trayectorias teórica y Estación Topográfica altimétricas.

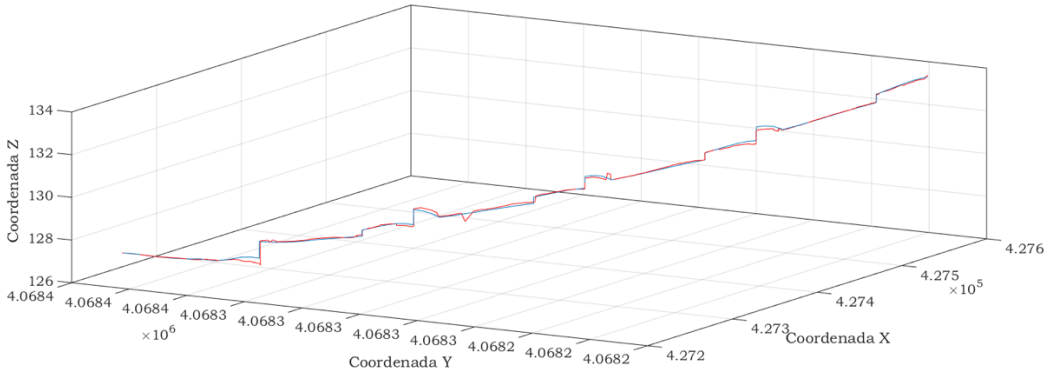


Figura IV.33.- Trayectorias teórica y Estación Topográfica 3D.

A la vista de las figuras anteriores, poco pero muy importante es lo que se puede decir, y es que a lo largo de la mayor parte del trazado la trayectoria real (determinada con la Estación Topográfica) está por encima de la trayectoria teórica. Es decir, que durante la fase de empuje del tablero, salvo en contadas ocasiones, la punta de nariz siempre ha sufrido flechas menores de las esperadas, lo que indica que el lanzamiento se ha hecho de forma segura.

2.7.2.2.- Análisis numérico entre la deformada teórica y la Estación Topográfica.

Para llevar a cabo el análisis numérico se hace necesario calcular las variaciones que se producen entre la trayectoria de la deformada y la trayectoria real determinada con la Estación Topográfica. Su determinación se hace por diferencia de las coordenadas de la deformada teórica y las obtenidas a los largo del empuje del tablero. Tal y como se puede apreciar en la siguiente tabla en la que nuevamente se muestran los primeros valores, aunque la diferencia de coordenadas se estableció para todos los puntos observados.

CONTRASTE DEFORMADA - ESTACIÓN TOPOGRÁFICA

Transformada Teórica ET				Coordenadas ESTACIÓN				Variaciones DEFORMADA - ESTACIÓN			
PK	X	Y	Z	PK	X	Y	Z	PK	ΔX	ΔY	ΔZ
2677,53	427237,03	4068393,39	127,03	2677,53	427237,03	4068393,38	127,03	2677,53	0,01	0,01	0,00
2681,53	427240,53	4068391,44	126,99	2681,53	427240,52	4068391,43	126,98	2681,53	0,01	0,01	0,01
2685,53	427244,02	4068389,49	126,93	2685,53	427244,01	4068389,48	126,93	2685,53	0,01	0,01	0,00
2689,53	427247,51	4068387,55	126,86	2689,53	427247,51	4068387,54	126,87	2689,53	0,00	0,01	-0,01
2693,53	427251,01	4068385,60	126,79	2693,53	427251,00	4068385,59	126,80	2693,53	0,00	0,00	-0,01
2697,53	427254,50	4068383,65	126,74	2697,53	427254,50	4068383,65	126,75	2697,53	0,00	0,00	-0,01
2701,53	427257,99	4068381,70	126,69	2701,53	427257,98	4068381,68	126,71	2701,53	0,01	0,02	-0,02
2705,53	427261,49	4068379,75	126,66	2705,53	427261,47	4068379,73	126,67	2705,53	0,01	0,02	-0,01
2709,53	427264,98	4068377,80	126,63	2709,53	427264,97	4068377,79	126,62	2709,53	0,01	0,01	0,01
2709,53	427264,98	4068377,80	126,63								
2709,68	427265,11	4068377,73	126,63	2709,68	427265,10	4068377,72	126,61	2709,68	0,01	0,01	0,02
2712,31	427267,41	4068376,45	126,62	2712,31	427267,40	4068376,43	126,59	2712,31	0,01	0,02	0,03
2713,19	427268,17	4068376,02	126,62	2713,19	427268,16	4068376,00	126,59	2713,19	0,01	0,03	0,03
2713,53	427268,47	4068375,86	126,62								
2713,66	427268,59	4068375,79	126,62	2713,66	427268,58	4068375,77	126,59	2713,66	0,01	0,02	0,03
2714,85	427269,63	4068375,21	126,60	2714,85	427269,61	4068375,19	126,59	2714,85	0,01	0,02	0,01
2715,14	427269,88	4068375,07	126,59	2715,14	427269,87	4068375,05	126,58	2715,14	0,01	0,02	0,01
2715,42	427270,12	4068374,94	126,59	2715,42	427270,11	4068374,91	126,59	2715,42	0,01	0,02	0,00
2715,68	427270,35	4068374,81	126,58	2715,68	427270,34	4068374,79	126,59	2715,68	0,01	0,02	0,00
2716,49	427271,06	4068374,41	126,57	2716,49	427271,05	4068374,39	126,59	2716,49	0,01	0,02	-0,02
2717,53	427271,97	4068373,91	126,55								
2717,68	427272,10	4068373,83	126,55	2717,68	427272,08	4068373,80	126,57	2717,68	0,02	0,03	-0,02
2717,97	427272,35	4068373,69	126,55	2717,97	427272,33	4068373,66	126,56	2717,97	0,02	0,03	-0,01
2718,549	427272,857	4068373,411	126,541	2718,549	427272,849	4068373,396	126,561	2718,549	0,008	0,015	-0,020
2719,144	427273,376	4068373,122	126,534	2719,144	427273,368	4068373,107	126,554	2719,144	0,008	0,015	-0,020
2720,012	427274,135	4068372,699	126,523	2720,012	427274,124	4068372,680	126,548	2720,012	0,011	0,019	-0,025
2720,876	427274,889	4068372,278	126,512	2720,876	427274,881	4068372,264	126,537	2720,876	0,008	0,014	-0,025

Tabla IV.18.- Variación de coordenadas de la deformada y Estación Topográfica.

Estableciendo unos valores estadísticos simples, dado que no tiene más trascendencia que intentar analizar cómo se produjo el empuje del tablero, se puede comprobar que la media de las desviaciones de las trayectorias tiene 3 milímetros en el eje de las X, 7 milímetros en el eje de las Y y 54 milímetros en el eje de las Z. Lo que da idea de la elevada coincidencia entre ambas trayectorias.

2.7.2.3.- Conclusiones del análisis entre la deformada teórica y la Estación Topográfica.

A la vista del análisis realizado entre ambas trayectorias, se pueden destacar los siguientes aspectos significativos:

- El proceso de empuje del tablero se ha realizado de una forma robusta dado que la flecha real prácticamente a lo largo de todo el proceso es menor que la flecha teórica.
- La precisión con la que se determinan la trayectoria de la Estación Topográfica es suficiente, dado que los valores de flechas son muchos mayores y por tanto más significativos que la tolerancia esperada.
- Aunque los datos de la Estación Topográfica y GPS no son comparables directamente, puesto que tanto el prisma reflector como la antena GPS están ubicados en lugares fisicamente diferentes, ya se tienen los datos de la estación topográfica referidos a una trayectoria ideal que posteriormente se puede trasladar la equidistancia que se considere necesaria.

2.7.3.- Variaciones entre la deformada teórica y GPS.

Establecidas las coordenadas de la deformada teórica del mamparo izquierdo del tablero izquierdo del viaducto y las coordenadas de la trayectoria de la antena GPS ubicada en el mismo mamparo, la diferencia entre dichas coordenadas determinan las variaciones entre las trayectorias de la deformada teórica y GPS, que a su vez representan el acomodo entre el proceso de empuje del tablero real y teórico. Como se ha dicho anteriormente de haber tenido la infraestructura instrumental adecuada, los datos GPS hubieran permitido nuevamente guiar a los operadores durante la fase del empuje, que habitualmente siguen las directrices que marca el topógrafo que va indicando en base a las flechas teóricas y las reales como se deben producir los tesados de la torre de atirantamiento, todo ello con el objeto de que no se produzcan diferencias notables entre ambos valores, aportando así las indicaciones necesarias para que el proceso se lleve a cabo de forma segura. El hecho de que el instrumental GPS fuera el instrumental propuesto, y por tanto no consolidado, hizo que las instrucciones que el topógrafo hace a los operadores las hiciera en base a los datos de la Estación Topográfica en vez de los datos GPS, al margen de que intentar tener resultados en tiempo real con GPS requería una infraestructura de hardware y software de la que no se disponía en la obra. Por tanto, esta comparación no permite determinar indicadores de calidad de la observación, sino indicadores del proceso de empuje del tablero.

Dado que la deformada teórica se establece únicamente cada cuatro metros y la Estación Topográfica determina coordenadas generalmente cada menos distancia, se lleva a cabo una interpolación lineal de las coordenadas de la deformada teórica a cada punto kilométrico establecido con Estación Topográfica, obteniendo así los pares de coordenadas Deformada–GPS, que posteriormente permiten ser contrastados con los que se tienen de la Estación Topográfica.

Dado que con GPS se graban datos cada 20 segundos en las correspondientes fases de empuje, en volumen de datos que se obtiene llega a los 6.900 puntos. Aunque dicha captura se puede considerar cuasi continua, también es cierto que no abarca a toda la longitud del viaducto, tal y como se dijo anteriormente la captura de observables va desde el pk 2+789,934 y pk 2+988,710, lo que genera que al cruzar los datos con los de la Estación Topográfica se reduzcan a 80 puntos objeto de análisis

En la siguiente tabla se pueden apreciar los valores de la deformada teórica interpolados, los datos de la deformada corregida por una excéntrica de 150 milímetros en el eje de las X, 65 milímetros en el eje de las Y, 1 milímetros en el eje de

las Z, todo ello debido a la imposibilidad de colocar la antena GPS en la intersección del mamparo izquierdo con la punta de tablero, y finalmente las coordenadas GPS de los mismos PK de los que se tienen con Estación Topográfica cuyo contraste es el objeto final de esta investigación. Como en tablas anteriores y dado el gran volumen de datos se muestran los primeros valores dejando el resto de valores para poder consultarse en los ficheros adjuntos a ésta Tesis Doctoral.

CONTRASTE DEFORMADA GPS											
TRANSFORMADA TEÓRICA GPS				TRANSFORMADA TEÓRICA GPS (Excentricidad)				COORDENADAS GPS INTERPOLADAS			
PK	X	Y	Z	PK	X	Y	Z	PK	X	Y	Z
2821,587	427366,062	4068328,990	128,221	2821,587	427365,912	4068329,055	128,220	2821,587	427365,838	4068329,069	128,372
2824,444	427368,557	4068327,599	128,071	2824,444	427368,407	4068327,664	128,070	2824,444	427368,365	4068327,728	128,230
2824,881	427368,939	4068327,386	128,048	2824,881	427368,789	4068327,451	128,047	2824,881	427368,767	4068327,551	128,073
2825,188	427369,207	4068327,236	128,032	2825,188	427369,057	4068327,301	128,031	2825,188	427368,969	4068327,277	128,086
2825,420	427369,410	4068327,123	128,020	2825,420	427369,260	4068327,188	128,018	2825,420	427369,172	4068327,164	128,083
2825,412	427369,403	4068327,127	128,020	2825,412	427369,253	4068327,192	128,019	2825,412	427369,167	4068327,171	128,086
2825,530	427369,506	4068327,070	128,014	2825,530	427369,356	4068327,135	128,013				
2825,530	427369,506	4068327,070	128,011	2825,530	427369,356	4068327,135	128,010				
2825,598	427369,565	4068327,036	128,012	2825,598	427369,415	4068327,101	128,010	2825,598	427369,328	4068327,078	128,043
2825,606	427369,572	4068327,033	128,012	2825,606	427369,422	4068327,098	128,010	2825,606	427369,335	4068327,074	128,059
2826,729	427370,553	4068326,486	128,022	2826,729	427370,403	4068326,551	128,021				
2827,177	427370,944	4068326,267	128,026	2827,177	427370,794	4068326,332	128,025				
2828,230	427371,864	4068325,755	128,036	2828,230	427371,714	4068325,820	128,035				
2829,298	427372,797	4068325,234	128,046	2829,298	427372,647	4068325,299	128,045				
2829,530	427372,999	4068325,121	128,048	2829,530	427372,849	4068325,186	128,047				
2829,576	427373,039	4068325,099	128,048	2829,576	427372,889	4068325,164	128,047				
2832,597	427375,678	4068323,628	128,079	2832,597	427375,528	4068323,693	128,077	2832,597	427375,485	4068323,734	128,130
2833,530	427376,493	4068323,173	128,088	2833,530	427376,343	4068323,238	128,087				
2833,582	427376,538	4068323,148	128,089	2833,582	427376,388	4068323,213	128,087	2833,582	427376,346	4068323,251	128,109
2834,168	427377,050	4068322,862	128,095	2834,168	427376,900	4068322,927	128,094	2834,168	427376,852	4068322,954	128,120
2835,851	427378,520	4068322,043	128,115	2835,851	427378,370	4068322,108	128,113	2835,851	427378,285	4068322,062	128,175
2837,530	427379,986	4068321,225	128,134	2837,530	427379,836	4068321,290	128,133				
2837,538	427379,993	4068321,221	128,134	2837,538	427379,843	4068321,286	128,133				
2841,530	427383,480	4068319,277	128,180	2841,530	427383,330	4068319,342	128,179				
2841,638	427383,574	4068319,224	128,181	2841,638	427383,424	4068319,289	128,180	2841,638	427383,393	4068319,329	128,268
2843,638	427385,321	4068318,250	128,208	2843,638	427385,171	4068318,315	128,207	2843,638	427385,144	4068318,359	128,272
2845,530	427386,973	4068317,328	128,234	2845,530	427386,823	4068317,393	128,233				

Tabla IV.19.- Coordenadas de la deformada teórica del mamparo izquierdo y GPS.

2.7.3.1.- Análisis gráfico entre la deformada teórica y GPS.

Establecidas las coordenadas de la trayectoria de la deformada teórica y de la GPS se puede llevar a cabo una representación bidimensional o tridimensional de ambas trayectorias que permita posteriormente realizar el análisis gráfico de dichas trayectorias.

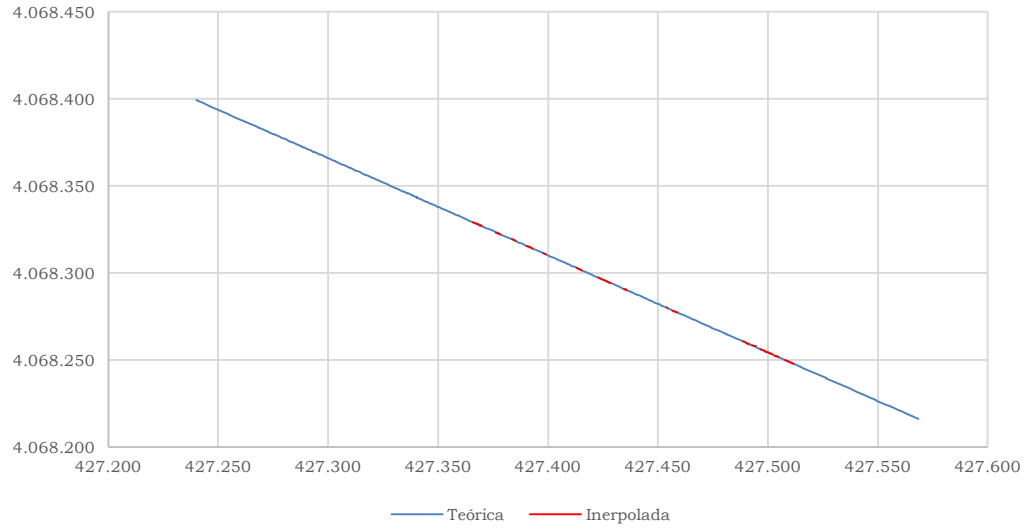


Figura IV.34.- Trayectorias teórica y GPS planimétricas.

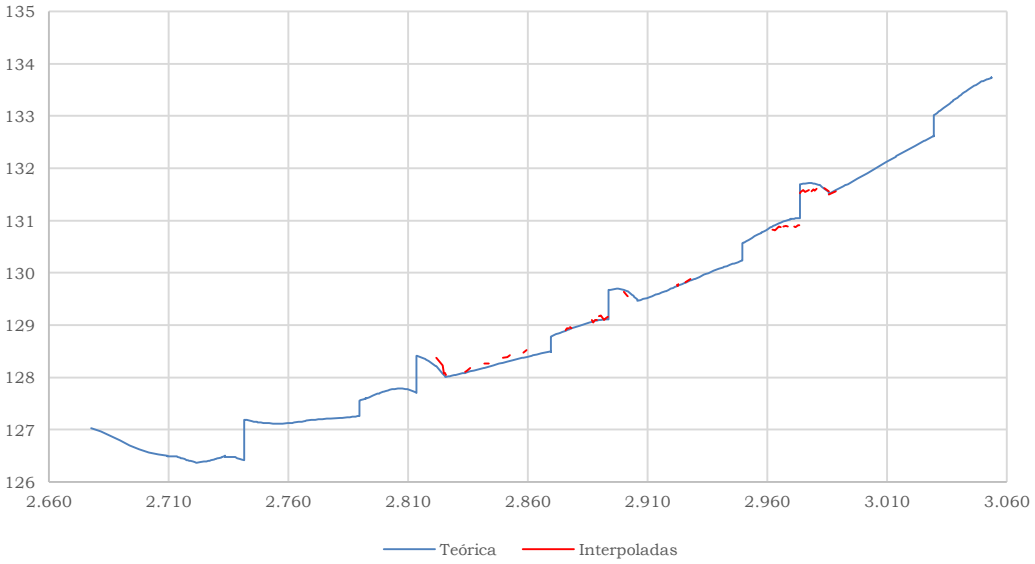


Figura IV.35.- Trayectorias teórica y GPS altimétricas.

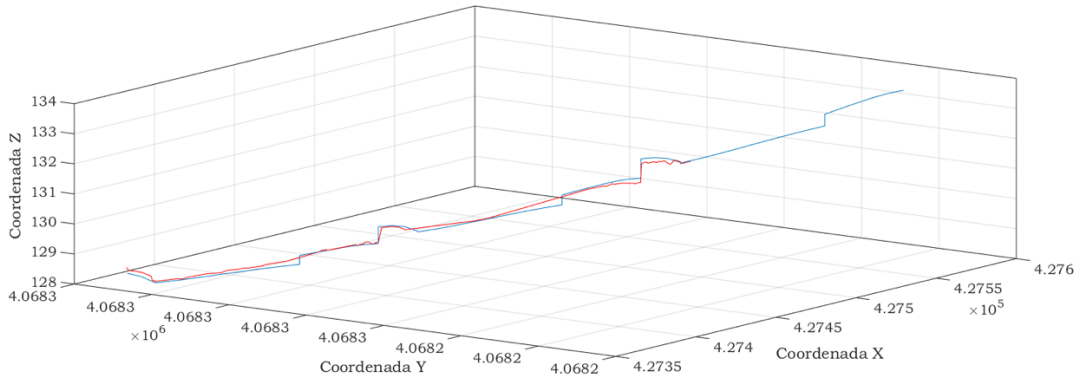


Figura IV.36.- Trayectorias teórica y GPS 3D.

A la vista de las figuras anteriores, poco se puede decir, en primer lugar que la coincidencia entre la trayectoria teórica y la obtenida con GPS es muy parecida lo que hace indicar que nuevamente el proceso de empuje se ha producido de forma adecuada y segura, en segundo lugar algo obvio y ya conocido y es que con GPS se tiene poca información debido a que el sistema no funciono a lo largo de todo el proceso de empuje.

2.7.3.2.- Análisis numérico entre la deformada teórica y GPS.

Para llevar a cabo el análisis numérico se hace necesario calcular las variaciones que se producen entre la trayectoria de la deformada y la trayectoria real determinada con la antena GPS. Su determinación se hace por diferencia de las coordenadas de la deformada teórica y las obtenidas a los largo del empuje del tablero. Tal y como se puede apreciar en la siguiente tabla en la que nuevamente se muestran los primeros valores, aunque la diferencia de coordenadas se estableció para todos los puntos observados.

CONTRASTE DEFORMADA GPS											
TRANSFORMADA TEÓRICA GPS (Excentricidad)				COORDENADAS GPS INTERPOLADAS				Variaciones DEFORMADA - GPS			
PK	X	Y	Z	**PK**	**X**	**Y**	**Z**	**PK**	**ΔX**	**ΔY**	**ΔZ**
2817,058	427361,957	4068331,261	128,350	2817,058	427361,922	4068331,362	128,537	2817,058	0,034	-0,101	-0,187
2817,530	427362,369	4068331,031	128,342								
2817,539	427362,377	4068331,027	128,341	2817,539	427362,340	4068331,121	128,452	2817,539	0,037	-0,094	-0,111
2818,473	427363,192	4068330,572	128,314								
2821,530	427365,862	4068329,083	128,223								
2821,587	427365,912	4068329,055	128,220	2821,587	427365,838	4068329,069	128,372	2821,587	0,074	-0,014	-0,152
2824,444	427368,407	4068327,664	128,070	2824,444	427368,365	4068327,728	128,230	2824,444	0,042	-0,064	-0,160
2824,881	427368,789	4068327,451	128,047	2824,881	427368,767	4068327,551	128,073	2824,881	0,022	-0,100	-0,026
2825,188	427369,057	4068327,301	128,031	2825,188	427368,969	4068327,277	128,086	2825,188	0,089	0,024	-0,056
2825,420	427369,260	4068327,188	128,018	2825,420	427369,172	4068327,164	128,083	2825,420	0,088	0,024	-0,065
2825,412	427369,253	4068327,192	128,019	2825,412	427369,167	4068327,171	128,086	2825,412	0,086	0,021	-0,067
2825,530	427369,356	4068327,135	128,013								
2825,530	427369,356	4068327,135	128,010								
2825,598	427369,415	4068327,101	128,010	2825,598	427369,328	4068327,078	128,043	2825,598	0,087	0,023	-0,033
2825,606	427369,422	4068327,098	128,010	2825,606	427369,335	4068327,074	128,059	2825,606	0,087	0,023	-0,048
2826,729	427370,403	4068326,551	128,021								
2827,177	427370,794	4068326,332	128,025								
2828,230	427371,714	4068325,820	128,035								
2829,298	427372,647	4068325,299	128,045								
2829,530	427372,849	4068325,186	128,047								
2829,576	427372,889	4068325,164	128,047								
2832,597	427375,528	4068323,693	128,077	2832,597	427375,485	4068323,734	128,130	2832,597	0,043	-0,041	-0,053
2833,530	427376,343	4068323,238	128,087								
2833,582	427376,388	4068323,213	128,087	2833,582	427376,346	4068323,251	128,109	2833,582	0,043	-0,039	-0,022
2834,168	427376,900	4068322,927	128,094	2834,168	427376,852	4068322,954	128,120	2834,168	0,048	-0,027	-0,026
2835,851	427378,370	4068322,108	128,113	2835,851	427378,285	4068322,062	128,175	2835,851	0,085	0,045	-0,062
2837,530	427379,836	4068321,290	128,133								
2837,538	427379,843	4068321,286	128,133								
2841,530	427383,330	4068319,342	128,179								

Tabla IV.20.- Variación de coordenadas de la deformada y GPS.

Estableciendo unos valores estadísticos simples, dado que no tiene más trascendencia que intentar analizar cómo se produjo el empuje del tablero, se puede comprobar que la media de las desviaciones de las trayectorias tiene 1 milímetro en el eje de las X, 2

milímetros en el eje de las Y y 12 milímetros en el eje de las Z. Lo que da idea de la elevada coincidencia entre ambas trayectorias.

2.7.3.3.- Conclusiones del análisis entre la deformada teórica y GPS.

A la vista del análisis realizado entre ambas trayectorias, se pueden destacar los siguientes aspectos significativos:

- Aunque no se tiene información a lo largo de todo el proceso de empuje, en las zonas en las que se tiene información se puede decir que el proceso de empuje del tablero se ha realizado de una forma robusta dado que la flecha real prácticamente a lo largo de todo el proceso es menor que la flecha teórica.
- La precisión con la que se determinan la trayectoria GPS es suficiente, dado que los valores de flechas son muchos mayores y por tanto más significativos que la tolerancia esperada.
- Aunque los datos de la Estación Topográfica y GPS no son comparables directamente, puesto que tanto el prisma reflector como la antena GPS están ubicados en lugares físicamente diferentes, ya se tienen los datos de la antena referidos a una trayectoria ideal que posteriormente se puede trasladar la equidistancia que se considere necesaria.

2.7.4.- Contraste entre resultados de la Estación Topográfica y GPS.

Determinadas las variaciones de coordenadas entre las trayectorias determinadas con Estación Topográficas, GPS y sus correspondientes deformadas, ahora sí que se pueden establecer las variaciones entre las trayectorias de la Estación Topográfica y GPS. Todo ello debido a que las deformadas correspondientes no dejan de ser más que dos trayectorias equidistantes a lo largo de todo el trazado y por tanto, al establecer las variaciones entre las observadas y las teóricas es lo mismo que unificar el origen de comparación.

Cabe reseñar que este es precisamente el objetivo fundamental de la investigación tal cual se plantea, dado que dependiendo de los resultados de este contraste se invalidará o no tanto el instrumental GPS como su metodología de observación.

También es importante antes de llevar a cabo el contraste tener en cuenta que considerando la trayectoria de la Estación Topográfica como el patrón con el que se contrasta la trayectoria GPS, la primera tiene una incertidumbre calculada en el epígrafe anterior y que demostraba tener del orden de 2 milímetros en planimetría y 5 milímetros en altimetría, lo que con diferencias de ese orden se podría hablar de equipos semejantes, validando por tanto el instrumental y la metodología GPS propuestos.

En la tabla siguiente se pueden apreciar, en primera instancia las variaciones de las trayectorias entre la deformada teórica y la obtenida con Estación Topográfica, y en segunda instancia las variaciones de las trayectorias entre la correspondiente deformada teórica y la obtenida con GPS. Dado el número de valores obtenidos, aproximadamente 80, y para no alargar el documento se muestran los primeros 40 dejando el resto para poder ser consultados en los ficheros adjuntos a esta Tesis Doctoral.

CONTRASTE ESTACIÓN GPS							
Variaciones DEFORMADA - ESTACIÓN				**Variaciones DEFORMADA - GPS**			
PK	**ΔX**	**ΔY**	**ΔZ**	**PK**	**ΔX**	**ΔY**	**ΔZ**
2817,058	-0,031	-0,055	-0,142	2817,058	0,034	-0,101	-0,187
2817,539	-0,031	-0,055	-0,137	2817,539	0,037	-0,094	-0,111
2821,587	-0,026	-0,047	-0,150	2821,587	0,074	-0,014	-0,152
2824,444	-0,017	-0,030	-0,170	2824,444	0,042	-0,064	-0,160
2824,881	-0,011	-0,019	-0,055	2824,881	0,022	-0,100	-0,026
2825,188	-0,009	-0,017	-0,051	2825,188	0,089	0,024	-0,056
2825,420	-0,004	-0,007	-0,045	2825,420	0,088	0,024	-0,065
2825,412	-0,002	-0,004	-0,052	2825,412	0,086	0,021	-0,067
2825,598	-0,001	-0,002	-0,050	2825,598	0,087	0,023	-0,033
2825,606	-0,006	-0,010	-0,032	2825,606	0,087	0,023	-0,048
2832,597	-0,007	-0,013	-0,041	2832,597	0,043	-0,041	-0,053
2833,582	-0,004	-0,008	-0,048	2833,582	0,043	-0,039	-0,022
2834,168	-0,008	-0,014	-0,055	2834,168	0,048	-0,027	-0,026
2835,851	0,003	0,006	-0,056	2835,851	0,085	0,045	-0,062
2841,638	-0,002	-0,003	-0,064	2841,638	0,031	-0,040	-0,088
2843,638	-0,005	-0,010	-0,069	2843,638	0,027	-0,044	-0,065
2845,576	-0,011	-0,019	-0,070	2845,576	0,030	-0,033	-0,054
2848,012	-0,008	-0,014	-0,056	2848,012	0,027	-0,033	-0,105
2849,614	0,005	0,010	-0,051	2849,614	0,044	0,001	-0,091
2851,375	-0,001	-0,001	-0,053	2851,375	0,040	-0,001	-0,090
2852,466	0,008	0,015	-0,055	2852,466	0,039	-0,003	-0,107
2853,571	0,006	0,011	-0,061	2853,571	0,038	-0,002	-0,088
2858,104	-0,004	-0,007	-0,092	2858,104	0,010	-0,044	-0,092
2859,345	-0,018	-0,032	-0,106	2859,345	0,013	-0,036	-0,127
2865,548	0,002	0,004	-0,091	2865,548	0,035	0,016	-0,152
2875,608	0,022	0,039	-0,023	2875,608	0,031	0,028	-0,003
2876,164	0,019	0,035	-0,026	2876,164	0,034	0,033	-0,030
2876,728	0,015	0,026	-0,025	2876,728	0,033	0,033	-0,028
2877,001	0,016	0,029	-0,032	2877,001	0,027	0,022	-0,025
2877,541	0,015	0,026	-0,027	2877,541	0,030	0,029	-0,036
2878,117	0,010	0,018	-0,029	2878,117	0,020	0,011	-0,001
2886,653	-0,004	-0,008	-0,010	2886,653	0,006	-0,002	-0,031
2887,232	-0,006	-0,011	-0,004	2887,232	0,003	-0,007	0,016
2888,107	-0,009	-0,017	-0,006	2888,107	0,000	-0,010	-0,021
2888,696	-0,008	-0,014	-0,006	2888,696	0,000	-0,009	-0,014
2889,571	-0,008	-0,015	0,001	2889,571	-0,002	-0,012	-0,076
2890,459	-0,011	-0,020	0,006	2890,459	-0,004	-0,015	-0,082
2891,832	-0,002	-0,003	0,021	2891,832	0,001	-0,004	0,012
2892,528	0,006	0,011	0,030	2892,528	0,002	-0,001	-0,028
2893,216	0,001	0,002	0,021	2893,216	0,009	0,014	-0,044
2893,531	0,003	0,006	0,582	2893,531	-0,002	-0,006	0,541

Tabla IV.21.- Variaciones de las deformadas con Estación Topográfica y GPS respectivamente.

Establecidas las variaciones de coordenadas entre las deformadas teóricas correspondientes y las trayectorias de la Estación Topográfica y GPS, se pueden determinar ya la diferencia entre las trayectorias de la Estación Topográfica y GPS, por diferencia de variaciones, tal y como se puede apreciar en la siguiente tabla en la que al igual que la tabla anterior, se muestran los primeros valores dejando el resto para poder ser consultados en los ficheros en formato digital.

CONTRASTE ESTACIÓN GPS												
Variaciones DEFORMADA - ESTACIÓN				Variaciones DEFORMADA - GPS				Diferencia de Vectores ET-GPS				
PK	ΔX	ΔY	ΔZ	PK	ΔX	ΔY	ΔZ	PK	ΔX	ΔY	ΔZ	Dist
2817,058	-0,031	-0,055	-0,142	2817,058	0,034	-0,101	-0,187	2817,058	-0,065	0,046	**0,045**	**0,079**
2817,539	-0,031	-0,055	-0,137	2817,539	0,037	-0,094	-0,111	2817,539	-0,068	0,039	**-0,027**	**0,078**
2821,587	-0,026	-0,047	-0,150	2821,587	0,074	-0,014	-0,152	2821,587	-0,100	-0,033	**0,002**	**0,106**
2824,444	-0,017	-0,030	-0,170	2824,444	0,042	-0,064	-0,160	2824,444	-0,059	0,034	**-0,010**	**0,068**
2824,881	-0,011	-0,019	-0,055	2824,881	0,022	-0,100	-0,026	2824,881	-0,033	0,081	**-0,029**	**0,087**
2825,188	-0,009	-0,017	-0,051	2825,188	0,089	0,024	-0,056	2825,188	-0,098	-0,041	**0,005**	**0,106**
2825,420	-0,004	-0,007	-0,045	2825,420	0,088	0,024	-0,065	2825,420	-0,092	-0,031	**0,020**	**0,097**
2825,412	-0,002	-0,004	-0,052	2825,412	0,086	0,021	-0,067	2825,412	-0,089	-0,025	**0,015**	**0,092**
2825,598	-0,001	-0,002	-0,050	2825,598	0,087	0,023	-0,033	2825,598	-0,088	-0,025	**-0,018**	**0,092**
2825,606	-0,006	-0,010	-0,032	2825,606	0,087	0,023	-0,048	2825,606	-0,093	-0,034	**0,016**	**0,099**
2832,597	-0,007	-0,013	-0,041	2832,597	0,043	-0,041	-0,053	2832,597	-0,050	0,028	**0,012**	**0,057**
2833,582	-0,004	-0,008	-0,048	2833,582	0,043	-0,039	-0,022	2833,582	-0,047	0,031	**-0,027**	**0,056**
2834,168	-0,008	-0,014	-0,055	2834,168	0,048	-0,027	-0,026	2834,168	-0,056	0,013	**-0,029**	**0,058**
2835,851	0,003	0,006	-0,056	2835,851	0,085	0,045	-0,062	2835,851	-0,081	-0,039	**0,005**	**0,090**
2841,638	-0,002	-0,003	-0,064	2841,638	0,031	-0,040	-0,088	2841,638	-0,033	0,036	**0,024**	**0,049**
2843,638	-0,005	-0,010	-0,069	2843,638	0,027	-0,044	-0,065	2843,638	-0,032	0,035	**-0,004**	**0,047**
2845,576	-0,011	-0,019	-0,070	2845,576	0,030	-0,033	-0,054	2845,576	-0,041	0,014	**-0,016**	**0,043**
2848,012	-0,008	-0,014	-0,056	2848,012	0,027	-0,033	-0,105	2848,012	-0,035	0,019	**0,049**	**0,040**
2849,614	0,005	0,010	-0,051	2849,614	0,044	0,001	-0,091	2849,614	-0,038	0,009	**0,040**	**0,039**
2851,375	-0,001	-0,001	-0,053	2851,375	0,040	-0,001	-0,090	2851,375	-0,041	0,001	**0,037**	**0,041**
2852,466	0,008	0,015	-0,055	2852,466	0,039	-0,003	-0,107	2852,466	-0,030	0,018	**0,052**	**0,035**
2853,571	0,006	0,011	-0,061	2853,571	0,038	-0,002	-0,088	2853,571	-0,032	0,013	**0,027**	**0,034**
2858,104	-0,004	-0,007	-0,092	2858,104	0,010	-0,044	-0,092	2858,104	-0,014	0,038	**0,000**	**0,040**
2859,345	-0,018	-0,032	-0,106	2859,345	0,013	-0,036	-0,127	2859,345	-0,031	0,004	**0,021**	**0,031**
2865,548	0,002	0,004	-0,091	2865,548	0,035	0,016	-0,152	2865,548	-0,032	-0,011	**0,062**	**0,034**
2875,608	0,022	0,039	-0,023	2875,608	0,031	0,028	-0,003	2875,608	-0,010	0,012	**-0,020**	**0,015**
2876,164	0,019	0,035	-0,026	2876,164	0,034	0,033	-0,030	2876,164	-0,014	0,002	**0,004**	**0,014**
2876,728	0,015	0,026	-0,025	2876,728	0,033	0,033	-0,028	2876,728	-0,019	-0,007	**0,003**	**0,020**
2877,001	0,016	0,029	-0,032	2877,001	0,027	0,022	-0,025	2877,001	-0,011	0,006	**-0,007**	**0,013**
2877,541	0,015	0,026	-0,027	2877,541	0,030	0,029	-0,036	2877,541	-0,016	-0,002	**0,009**	**0,016**
2878,117	0,010	0,018	-0,029	2878,117	0,020	0,011	-0,001	2878,117	-0,011	0,006	**-0,028**	**0,012**
2886,653	-0,004	-0,008	-0,010	2886,653	0,006	-0,002	-0,031	2886,653	-0,010	-0,006	**0,020**	**0,012**
2887,232	-0,006	-0,011	-0,004	2887,232	0,003	-0,007	0,016	2887,232	-0,009	-0,004	**-0,020**	**0,010**
2888,107	-0,009	-0,017	-0,006	2888,107	0,000	-0,010	-0,021	2888,107	-0,010	-0,006	**0,015**	**0,011**
2888,696	-0,008	-0,014	-0,006	2888,696	0,000	-0,009	-0,014	2888,696	-0,008	-0,005	**0,008**	**0,009**

Tabla IV.22.- Variaciones de las deformadas de la Estación Topográfica y GPS.

Dada la dificultad de mostrar gráficamente las diferencias obtenidas entre ambas trayectorias y el número de puntos que en los que se realiza el contraste, a continuación se realiza un tratamiento estadístico de los resultados que pretende evidenciar la diferencia entre los resultados finales obtenidos.

Para ello se somete individualmente a las variaciones de X, Y, Z y Distancia planimétrica a la prueba de normalidad de Anderson-Darling, para posteriormente establecer valores significativos como son la media, desviación estándar, varianza, asimetría, curtosis e intervalos de confianza, tal y como se puede apreciar en las siguientes imágenes generadas por la aplicación informática MINITAB.

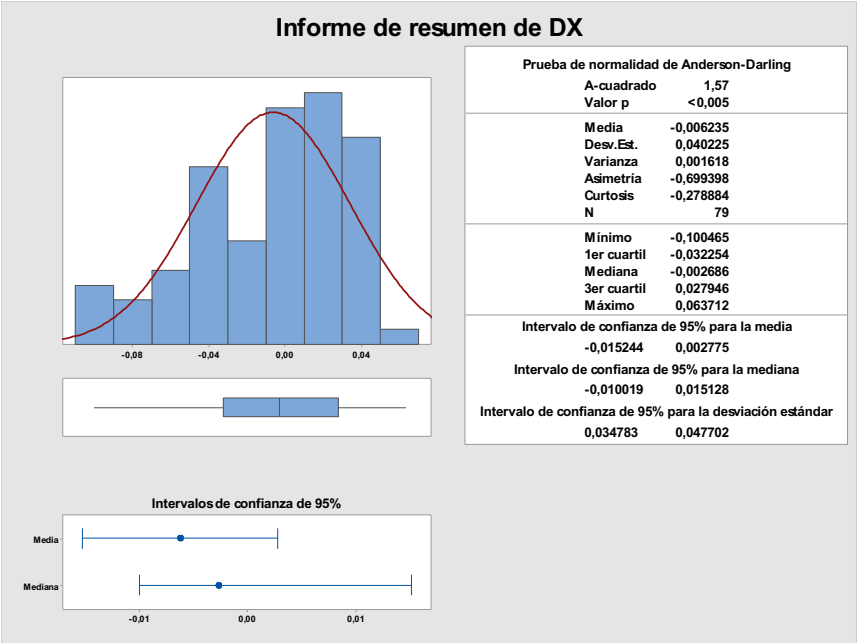


Imagen IV.21.- Tratamiento estadístico de las variaciones de coordenada X.

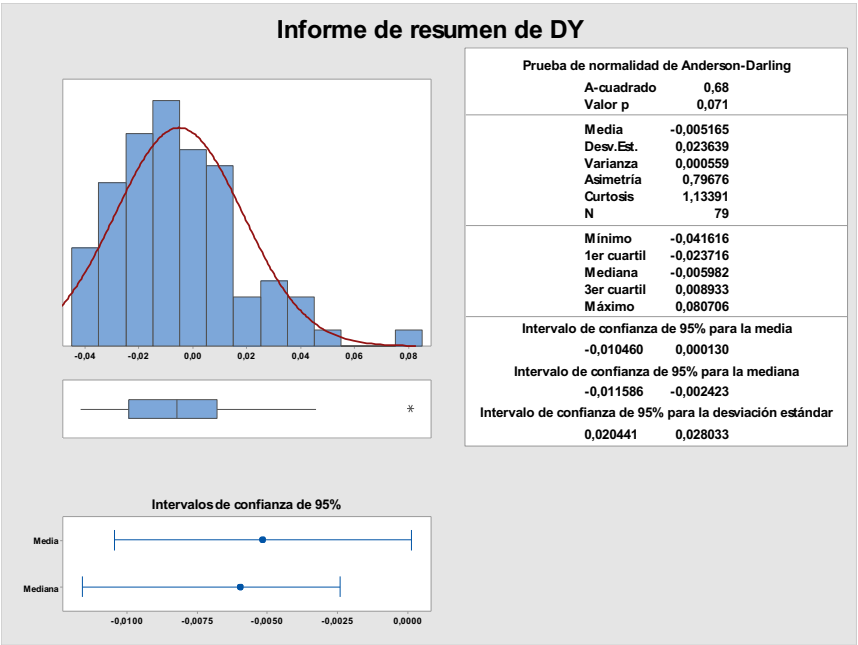


Imagen IV.22.- Tratamiento estadístico de las variaciones de coordenada Y.

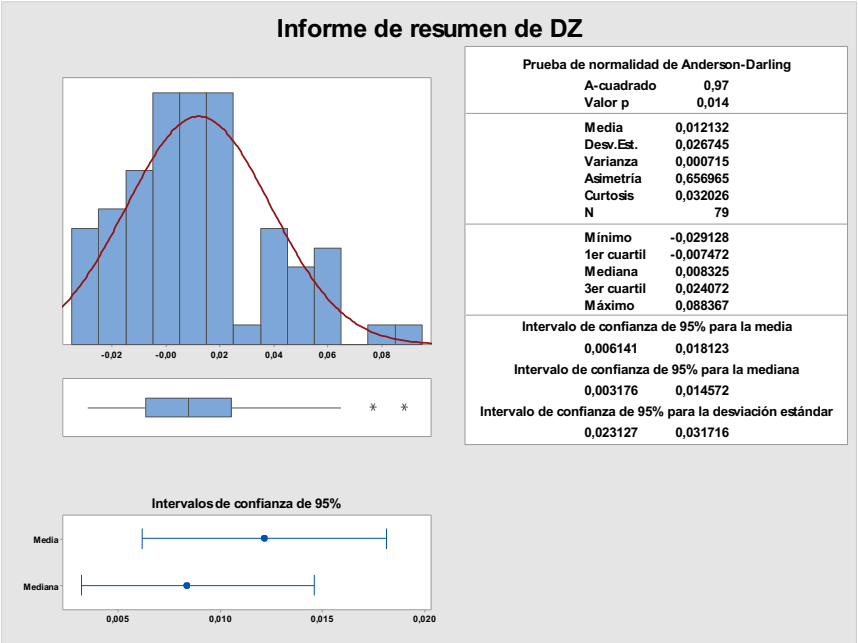


Imagen IV.23.- Tratamiento estadístico de las variaciones de coordenada Z.

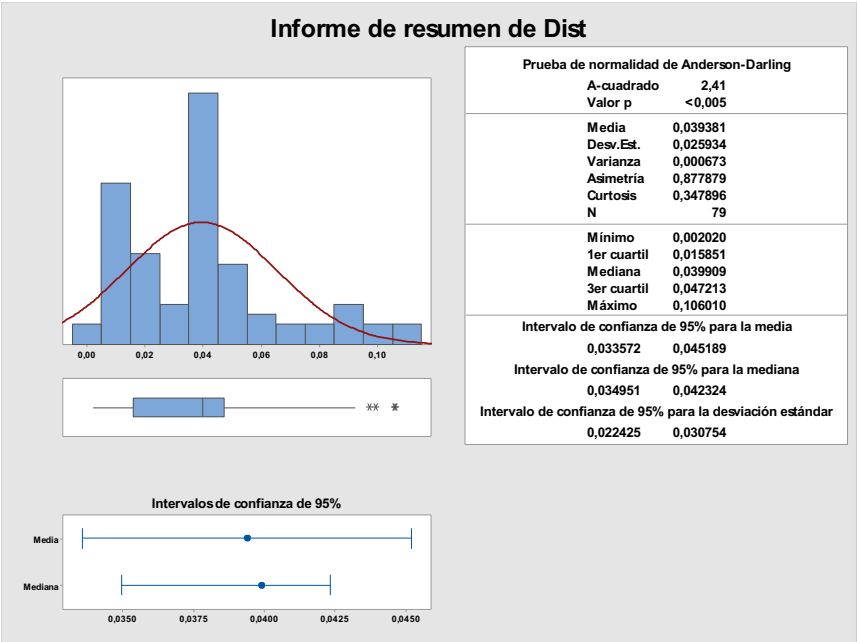


Imagen IV.24.- Tratamiento estadístico de las diferencias planimétricas.

A la vista del tratamiento estadístico de las variaciones se puede decir que 39 mm con una desviación estándar de 26 mm en planimetría y 12 mm con una desviación estándar de 27 mmm en altimetría. Parece obvio que los resultados son un poco peores que los obtenidos con Estación Topográfica y deformada teórica. A continuación se analizan y justifican los resultados obtenidos



Imagen IV.25.- Tablero empujado con control mediante Estación Topográfica y GPS.

En el proyecto de empuje se establecen las precisiones con las que se deben determinar las deformadas reales, en el caso objeto de investigación se cifra en el entorno de los 15 mm en planimetría y 30 mm de altimetría. La interpretación de estos resultados requiere repasar dos hechos fundamentales:

- Parece extraño que GPS dé más precisión altimétrica que planimétrica, cuando en general se sabe que eso no es así. La justificación pasa por el hecho de que durante la observación de la trayectoria patrón, obtenida mediante Estación Topográfica, el topógrafo tienda más a cuidar el observable altimétrico (flechas), que es el que puede producir un problema durante el empuje, que el observable planimétrico que sabe que está más o menos garantizado por las guías laterales que tiene el tablero cuando es empujado. Es decir, que la desviación de la observación planimétrica es muy probable que esté producida más por las desviación de la trayectoria patrón que por la precisión del instrumental.
- Dado que la precisión exigida puede encajar con la incertidumbre producida por las observaciones GPS, si éstas se deseasen mejorar se debiera de filtrar el ruido y el sesgo de modelo. Además, sería necesario controlar otros factores, que degradan notablemente la precisión de las observaciones: multitrayecto, difracciones y geometría de los satélites. Incluso mejorar los modelos de medidas de las observaciones tipo Sigma-D, filtros de Kalman en la resolución de las diferencias dobles que tienen en cuenta la existencia de un movimiento lento y pequeña magnitud.

2.8.- NUEVA LÍNEA DE INVESTIGACIÓN.

Al tratar de investigar sobre la posible mejora de los resultados GPS, fundamentalmente mediante la modelización de curvas que describiesen el modelo cuasi-continuo descrito por la antena, en el entorno del punto kilométrico en el que se encuentra el punto medido con la Estación Topográfica y obtener así coordenadas más precisas, el doctorando se encontró con zonas, correspondientes al momento de empuje con velocidad nula, en los que se grababan multitud de puntos en el mismo p.k. y con una apreciable variabilidad altimétrica.

Esto se puede apreciar en la siguiente gráfica, donde en esos momentos en los que no habiendo empuje y por tanto teniendo que estar el tablero también parado, el GPS, programado para grabar posiciones cada 20 segundos, capta posiciones altimétricas variables alrededor del punto medio obtenido como extrapolación de la trayectoria general. En ella se puede ver como se distribuyen altimétricamente los puntos alrededor, en este caso, de una curva de grado cuatro, ajustada con todos los puntos

tomados por el GPS, entre el $p.k.2831{,}398$ *a* $p.k.2833{,}969$.

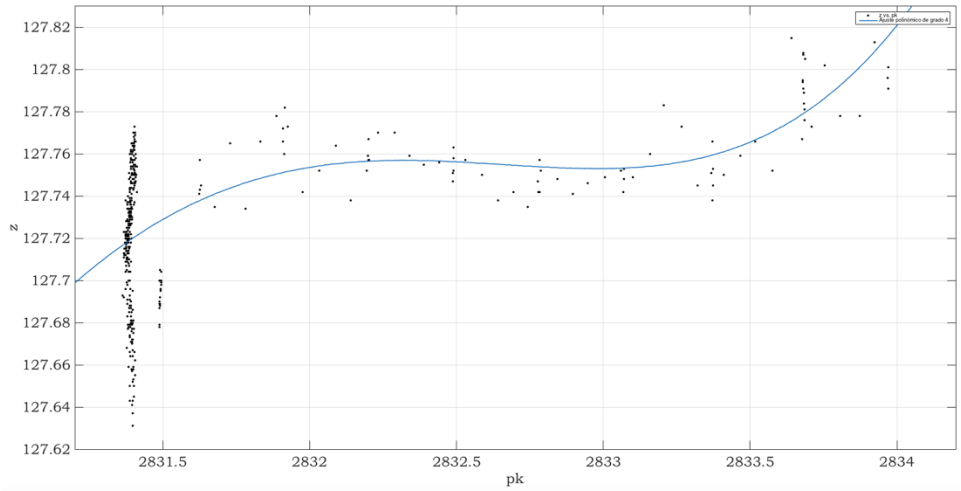


Figura IV.37.- Perfil longitudinal de los puntos determinados con GPS.

Este movimiento en torno al punto de equilibrio se intuye que es debido al movimiento vibratorio natural de la punta del tablero, siendo capaz el GPS de grabarlo y por tanto ser susceptible de realizar, a partir de estos datos GPS, un estudio vibrométrico para la caracterización modal de la estructura, es decir la obtención de sus frecuencias naturales, sus modos de vibración así como el amortiguamiento modal.

Es importante decir que en estos momentos de estatismo planimétrico, los movimientos altimétricos que si eran recogidos por el GPS al ser una lectura continua, no lo eran por la estación topográfica, ya que son movimientos muy lentos.

Parece claro por tanto, que este instrumental y metodología propuestos, pueden valer para analizar un aspecto fundamental, la vibración del puente que comparándola con la teórica permite contrastar su comportamiento dinámico.

Para finalizar ocurre además que el modo de vibración de una estructura es único y por tanto un aspecto característico de la estructura. Aprovechando este aspecto teórico, parece que se está ante una situación ideal de comprobar la estructura a escala real en cada momento de su empuje, es decir, se puede realizar una Prueba de Carga Dinámica de la misma a la vez que se construye y por tanto ser capaces de detectar cualquier anomalía en el mismo momento que se está construyendo.

A la vista de todo lo anterior surge una nueva línea de investigación que buscaría llegar a obtener los parámetros dinámicos fundamentales de la estructura, para contrastarla con las teóricas y validar la estructura o no. Ahora bien, en este tipo de estructuras, durante su proceso constructivo con alta flexibilidad, y por eso es capaz el GPS de realizar dichas mediciones, los periodos de vibración suelen ser superiores a los 10 segundos, y se tiene un inconveniente con los datos obtenidos en el viaducto de la Miel, tomados cada 20 segundos, no siendo válidos ya que deben estar tomados con una frecuencia del entorno del segundo.

3.- CONTROLES GEOMÉTRICOS DINÁMICOS.

3.1.- INTRODUCCIÓN.

Del análisis de los datos observados con el GPS en el empuje del Viaducto de la Miel, durante el proceso de filtrado de los mismos para modelizar la trayectoria seguida por la punta del tablero en su lanzamiento y hacer el contraste con la obtenida con los datos observados mediante técnicas clásicas se observa que el número de datos obtenidos con la observación GPS frente a los observados con Estación Topográfica es muy superior. Además conocido que el proceso de empuje no es continuo, sino que tiene periodos en el que está parado y en los que el GPS sin embargo sigue tomando datos, se llega a obtener tablas del tipo a la mostrada en el apartado anterior (Figura IV.37].

Este tipo de gráficas obtenidas son las que inducen a profundizar en su estudio y relacionarlas con toda la parte técnica expuesta en (Cap. II – Apdo.[8]) y (Cap. III – Apdo.[4]), para su análisis espectral y correlación con el comportamiento dinámico de la estructura.

En realidad el GPS está tomando datos de forma continua sobre la posición de la punta de lanzamiento, puntos que se toman a lo largo del tiempo, incluso cuando el empuje está parado. Por lo tanto, lo que se obtiene es un registro discreto de posiciones tomadas a intervalos regulares de tiempo, tal y como se desarrolla de forma teórica en (Cap. III – Apdo.[4.4]), con la pretensión de realizar un análisis de esta información adicional que da la medida en continuo para, no sólo controlar los parámetros tradicionales de empuje, sino completar la información de la construcción del tablero durante el proceso de empuje mediante un tratamiento adicional adecuado de la información obtenida en los campos de la dinámica y del análisis frecuencial.

3.2.- ENCUADRE Y DESCRIPCIÓN GENERAL DEL NUEVO PUENTE SOBRE LA BAHÍA DE CADIZ.

A la vista de las gráficas anteriores, centrando el trabajo en el momento en el que el puente está parado, esta información parece que puede valer para analizar un aspecto fundamental, y es la vibración del puente y compararla con la teórica para contrastar su comportamiento.

Tal y como se ha visto en el capítulo III de esta Tesis, el modo de vibración de una estructura es único, es decir que independientemente de las coacciones estructurales que tenga el modo de vibracion es un aspecto característico de la estructura.

Aprovechando este aspecto teórico, parece que se está ante una situación ideal de comprobar la estructura a escala real en cada momento de su empuje, es decir, se puede realizar una Prueba de Carga Dinámica en cada una de las fases constructivas de la misma y por tanto ser capaces de detectar cualquier anomálía en el mismo momento en el que se está construyendo.

El problema surge, tras analizar los datos tomados durante el empuje del Viaducto de la Miel, con el intervalo de tiempo con el que se han tomado los datos, ya que éste ha sido de veinte segundos, intervalo mayor que el propio periodo fundamental del tablero. Por este motivo, se busca un nuevo laboratorio a escala real, con una situación similar a la del viadcuto de la Miel durante su empuje del tablero y donde se puedan obtener datos similares pero, ahora sí, con un periodo adecuado para poder obtener las características pretendidas de la estructura.

El nuevo laboratorio elegido es el nuevo Puente sobre la Bahía de Cádiz, con un sistema constructivo distinto, pero con el mismo fenómeno pretendido durante la construcción de su tablero. De este puente se disponen datos GPS cada segundo de la punta de lanzamiento así como los modelos en elementos finitos para poder contrastar las propiedades obtenidas.

3.2.1.- Descripción general.

El proyecto del Nuevo Acceso a Cádiz, cuyo elemento más emblemático es el Puente sobre la Bahía, aprobado por el Ministerio de Fomento el 31 de Julio de 2006 e inaugurado el 24 de septiembre de 2015, tiene como objetivos primordiales la mejora de las comunicaciones con el centro de la ciudad de Cádiz, la integración del casco histórico en el complejo social y urbano de la Bahía de Cádiz y el favorecimiento y consolidación del desarrollo del Puerto de la Ciudad, reduciendo además el flujo de vehículos pesados circulante, en su mayor parte relacionados con el Puerto, por las arterias lineales principales de la capital gaditana.

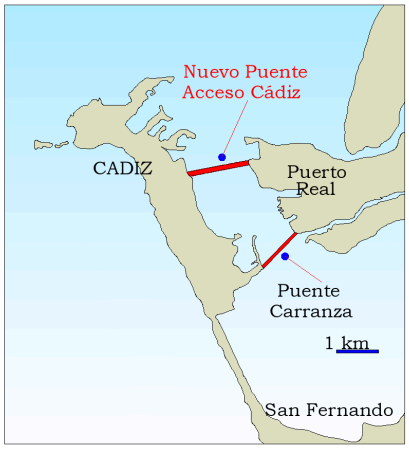


Imagen IV.26.- Situación general del puente de Cádiz.

La obra consiste en un tramo de autovía, en su totalidad de nuevo trazado, que constituye una segunda entrada a Cádiz desde la AP-4, reforzando el primer e histórico acceso por el Puente de Carranza, inaugurado en 1969.

3.2.2.- Descripción de la estructura.

El tablero del Puente sobre la Bahía aloja una calzada de autovía de cuatro carriles (dos en cada sentido de la circulación) y una plataforma reservada al tráfico tranviario que en inicio podría desempeñar funciones de carril bus.



Imagen IV.27: Vista aérea del nuevo puente de Cádiz finalizado (ACL Diseño y Cálculo de Estructuras).

La longitud total de la obra es de 5.001 metros, desde su inicio en Cádiz hasta su término en Puerto Real. Más del 80% de toda la longitud del tramo se desarrolla en forma de puente o viaducto lo que constituye una singularidad que ilustra el desempeño técnico tan exigente que ha reclamado la obra.

El tramo en puente tiene 3.157 metros de longitud y está constituido por 37 pilas, las 12 primeras sobre el mar. Entre las pilas destacan los dos pilonos principales del puente, las pilas 12 y 13, con la característica forma de diávolo. Desde la 1 a la 17, el resto de pilas tienen la tipología "palmera", y de la 18 en adelante se transforman en porticadas para permitir el paso bajo ellas.

Teniendo en cuenta el soporte, la sección y la tipología del tablero, el conjunto del puente se puede agrupar en cuatro partes:

- Tramo de acceso a Cádiz, de 654 metros de longitud y vanos de 75 metros de luz; que ha sido construido por el procedimiento de empuje desde tierra, procedimiento similar al utilizado en el viaducto de la Miel.
- Tramo desmontable, de 150 metros, que permitirá el eventual paso de embarcaciones con gálibo poco usual, superior a 69 metros.
- Tramo atirantado, que se desarrolla durante 1.180 metros y cuyo vano principal tiene una luz entre torres de 540 metros, dejando un gálibo libre bajo tablero de 69 metros
- Tramo final de hormigón, de 1.182 metros, ejecutado sobre cimbra y con luces máximas de 75 metros; y que se desarrolla enteramente sobre el Polígono Industrial de La Cabezuela.

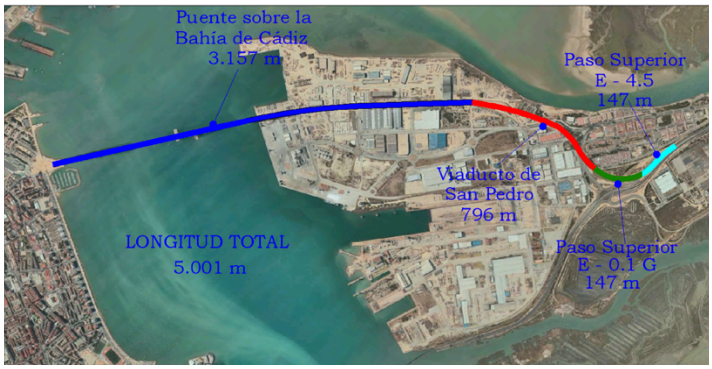


Imagen IV.28: Estructuras encuadradas en la obra (ACL Diseño y Cálculo de Estructuras).

Finalizado el Puente sobre la Bahía se desprenden del tronco unos ramales para formar un enlace que conecta la autovía con el Polígono Industrial. Este tramo comprende 258 metros y se dispone sobre terraplén contenido por muros de suelo reforzado minimizando la ocupación de la zona industrial.

A continuación el trazado acomete un nuevo viaducto, denominado Viaducto del Río San Pedro, cuya longitud es de 796 metros, y cuya planta presenta curva y contra curva para mejor liberación de los viales que se desarrollan en su sombra: vías de enlace con la N-443 y Barriada del Río San Pedro.

Una vez termina el Viaducto del Río San Pedro se ubica el tramo final con un enlace que establece la conexión con la N-443, y donde se ejecutan dos pasos elevados.

3.2.3.- Descripción del Viaducto sobre la Bahía.

Esta estructura discurre tanto sobre la Bahía de Cádiz como sobre el Polígono Industrial de La Cabezuela, en Puerto Real. Tiene 3.157 metros de longitud, lo que le supone ser el puente carretero más largo construido en España, y el segundo más largo si incluimos también en esta lista los tramos ferroviarios, precisamente por detrás del Viaducto de El Portal asimismo situado en la provincia de Cádiz.

3.2.3.1.- Pilas y cimientos.

El Viaducto se apoya en 37 pilas, de las cuales las 12 primeras emergen del mar. Entre éstas destacan los dos pilonos principales del puente, pilas 12 y 13, de forma romboidal y que comprenden el vano principal atirantado. El resto de las pilas se clasifica en dos tipologías distintas: desde la 1 a la 17 presentan forma de "palmera", mientras que a partir de la pila 18 y hasta la 37 se transforman en pórticos para permitir el paso de una vía del Polígono bajo el tablero.

El fuste de los pilonos 12 y 13 nace en su base en una sección hexagonal de 14,5 metros de anchura, reduciéndose ésta en altura hasta que comienza el rombo formado por brazos inclinados, de 85.76 metros de altura y 42 metros de anchura, por cuyo ojal pasa el tablero. En la parte alta del rombo, cuando los brazos se juntan de nuevo, se yergue un mástil recto de otros 56 metros de altura, distribuyéndose los tirantes a uno y otro lado de él.

El primer pilono principal (pila 12) se ubica en el agua, y su altura total es de 180.6 metros, lo que la convierte en la más alta de España, seguida por los pilonos del Puente de Rande en Vigo, con 119 m; y en la séptima más alta de Europa. El segundo pilono principal (pila 13) tiene una altura ligeramente menor, de 178.7 metros



Imagen IV.29: Pilono principal en construcción (ACL Diseño y Cálculo de Estructuras).

El primer tramo vertical de los pilonos principales, cuya sección es hueca, se ha ejecutado con un encofrado autotrepante convencional, hasta el arranque de los dos fustes inclinados. Estos últimos precisan de la instalación de una imponente estructura metálica auxiliar para soporte de los encofrados y del peso del hormigón fresco, la cual por sí misma merecería independientemente el carácter de singular.

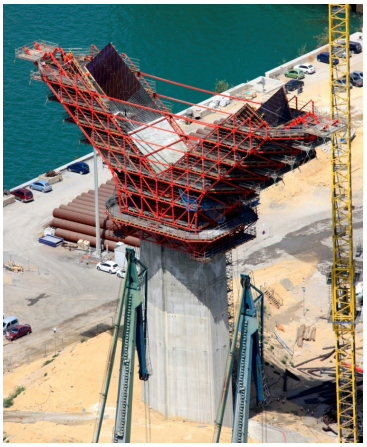


Imagen IV.30: Estructura metálica de soporte del encofrado de los fustes inclinados en pila 13 (ACL).

Una vez ejecutada la viga riostra horizontal sobre la que se apoya el tablero, se instalaron sendos encofrados trepantes en los fustes que cierran el rombo de la pila y que parten desde la riostra, utilizando apuntalamientos provisionales entre ellos para su estabilización. Por último se construyeron las trepas del mástil vertical simultáneamente al montaje de la estructura metálica interior que sirve de soporte al anclaje de los tirantes.

La pila 13 constituye, una vez finalizada la ejecución del Viaducto, en el punto donde se fijarán los más de 2.300 metros de tablero continuo existente entre el tramo desmontable y el tramo final de hormigón. Adicionalmente, y sólo en la hipótesis de sismo, la pila 12 ayudará a resistir los efectos del mismo gracias a la instalación de una batería de amortiguadores que únicamente se activarán en tal circunstancia.

Dada la escasa competencia de los depósitos cuaternarios y rellenos localizados en los estratos más superficiales del suelo, todas las cimentaciones de la obra se han ejecutado mediante pilotes de entre 1 y 2 metros de diámetro, empotrados en su punta en las arenas cementadas y conglomerados resistentes conocidos en Cádiz como "roca ostionera". Los pilotes de las cimentaciones localizadas en el interior de la bahía se construyeron mediante hinca de camisa metálica desde una pontona flotante, actividad que obligó a una precisión máxima y a una gran maestría en el manejo de medios marítimos. En el pilono P13 se instalaron 56 pilotes de dos metros de diámetro, lo que constituye la mayor cimentación de este tipo ejecutada en España.

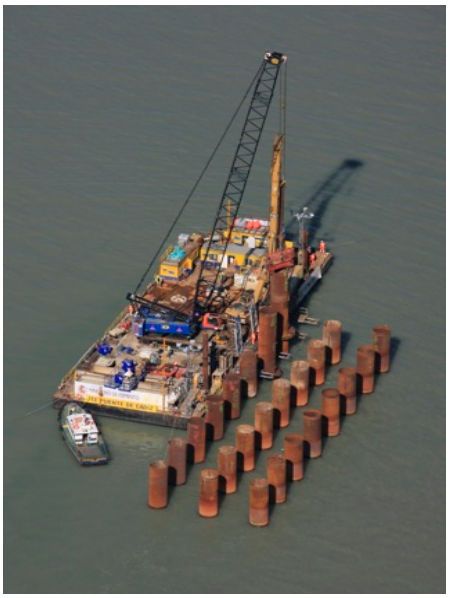


Imagen IV.31: Ejecución de pilotes en mar (ACL Diseño y Cálculo de Estructuras).

Es digno de destacar el procedimiento constructivo empleado para la ejecución de los encepados de las pilas inmersas en el agua y en concreto el de la pila 12, por las vastas dimensiones que comprende. En efecto, para poder acometer los trabajos en seco por debajo del nivel del mar se hizo necesario diseñar y construir un conjunto de recintos estancos metálicos que mediante cabrias se trasladaron al emplazamiento de las pilas y posteriormente se fondearon en su ubicación definitiva enhebrándose con las camisas metálicas de los pilotes previamente ejecutados. Finalmente se ejecutó una losa de hormigón sumergido en el fondo de los cajones, recogiendo las cabezas de los pilotes, y se procedió al achique de los recintos donde ya se pudieron ejecutar en seco los encepados y fustes de las pilas.

El mayor de los recintos estancos, correspondiente a la pila 12, tiene una superficie en planta de 1839 metros cuadrados, equivalente a dos campos de futbol sala. Dentro del mismo cabría el volumen de 7 piscinas olímpicas.



Imagen IV.32: Traslado del recinto estanco de la pila 12 (ACL Diseño y Cálculo de Estructuras)

Para la ejecución del pilono 13 fue necesario realizar, paralela al mar, una pantalla de contención de hormigón armado, completando los otros tres lados del recinto de excavación con tablestacas para proceder a la excavación, ferrallado y hormigonado del encepado.



Imagen IV.33: Excavación del encepado de la pila 13 (ACL Diseño y Cálculo de Estructuras)

La cimentación del resto de pilas, ya en tierra, se ha realizado con un equipo convencional de perforación de pilotes, si bien la excavación de los encepados ha requerido el auxilio de la hinca de tablestacas recuperables arriostradas mediante marcos metálicos.

3.2.3.2.- Tablero.

Atendiendo a la tipología del tablero, el conjunto del Puente sobre la Bahía puede dividirse en 4 tramos:

- Tramo de acceso a Cádiz: Es un tablero recto de tipología mixta (acero y hormigón) y 645 metros de longitud, ejecutado mediante empuje desde Cádiz.
- Tramo desmontable: Entre las pilas 9 y 10 se ha proyectado un tablero isostático de 150 metros de luz, cuyo objeto es permitir, previo desmontaje, el eventual paso de embarcaciones cuyo gálibo vertical sea mayor de 69 metros, máximo existente bajo el tramo atirantado. Este tramo es el de mayores dimensiones del mundo en su tipología y está ejecutado enteramente en acero.
- Tramo atirantado: También de tipología mixta, como el tramo de acceso a Cádiz, está situado sobre la canal de entrada a la Bahía, y su longitud es de 1.180 metros entre vano principal de 540 metros de luz y vanos de compensación. Es el puente de mayor luz de España y el tercero de Europa, y el segundo puente marítimo del mundo de mayor altura sobre el mar, después

del Puente colgante de Verrazano Narrows a la entrada de Nueva York e inmediatamente antes del famoso Golden Gate de San Francisco.

- Tramo final: Con una longitud similar al atirantado (1.182 metros) y luces máximas de 75 metros está enteramente construido en hormigón pretensado.

	TRAMO METÁLICO			TRAMO HORMIGÓN
DESCRIPCIÓN	Acceso a Cádiz	Puente Desmontable	Puente Atirantado	Tramo Final
REPARTO DE VANOS	45 + (8x75)	150 m. de luz	120 + 200 + 540 + 200 + 120	(4x75) + 68+ (4x62) + 54 + (12x40) + 32
TIPOLOGÍA SECCIÓN	Mixta	Metálica	Mixta	Hormigón Pretensado

Tabla IV.23: Zonificación del Nuevo Puente sobre la Bahía de Cádiz (ACL Diseño y Cálculo de Estructuras)

El canto del tablero es constante de tres metros en toda su longitud, a excepción de los últimos quinientos metros donde se reduce hasta dos metros, ya que las luces entre pilas también disminuyen en esta zona.

Por otro lado, la anchura tiene variaciones a lo largo de todo su recorrido en función de la tipología del tramo, si bien es cierto que se puede tomar como anchos tipo el del tramo atirantado (36.3 metros) y el del viaducto de hormigón (35.2 metros). La superficie total de tablero podría alojar 15 campos de fútbol de tamaño reglamentario.

La estructura metálica que materializa el Viaducto de acceso a Cádiz se ha fabricado en taller, dividida en tramos de manera que pueda realizarse su transporte por carretera hasta las instalaciones de la obra, donde se ha procedido al montaje y soldadura de las dovelas que conforman el puente.

3.2.3.3.- Tramo de acceso a Cádiz.

Para la ejecución de este tramo, y siguiendo el criterio recogido en el Proyecto, se ha optado por el empuje de la estructura metálica desde tierra. Para ello, se ha debido acondicionar un parque de empuje en una península ganada al mar, y sobre el mismo instalar el sistema de gatos horizontales que proporcionan la fuerza motriz para deslizar el tablero que se va ejecutando. La punta de avance del tablero ha precisado de su estabilización mediante un sistema de atirantamiento provisional, con el fin tanto de limitar tensiones en los vanos extremos como de controlar la deformada de la punta a la llegada y paso por pilas.



Imagen IV.34: Empuje del tramo de acceso a Cádiz (ACL Diseño y Cálculo de Estructuras)

Una vez finalizado el lanzamiento de todo el tramo se procedió a hormigonar por fases la losa superior del tablero, con ayuda de elementos prefabricados, convirtiendo finalmente la sección metálica en mixta.

3.2.3.4.- Tramo desmontable.

El tramo desmontable es el comprendido entre las pilas 9 y 10. Se trata de un tablero isostático de 150 m de longitud total, simplemente apoyada en sus extremos y construido totalmente en estructura metálica. El ensamblado se realizó en tierra, por

lo que para su instalación sobre pilas tuvo que realizarse primero un complicado transporte por tierra, un posterior embarque en pontona , después un transporte marítimo hasta su emplazamiento y por último un complejo izado a cabeza de pilas donde descansará sobre sus apoyos. El transporte por tierra se realizó por medio de módulos de transporte multiruedas con una capacidad de carga de hasta 6.000 toneladas. El peso total del tablero metálico es de unas 4000 toneladas y considerando la carga muerta, el peso final en servicio ronda las 5000 toneladas.

La maniobra de izado se realizó mediante 4 puntos de tiro ubicados en los voladizos de unas estructuras previamente instaladas en cabeza de las pilas P9 y P10. Concretamente se dispone de dos puntos de izado por pila, constando cada uno de dos unidades de izado de 850 toneladas de capacidad (1700 t/punto).

3.2.3.5.- Tramo atirantado.

Constituye la parte más singular del Viaducto. Los 1.180 metros de tablero que lo configuran se distribuyen en 5 vanos de los cuales el central es el de mayor luz, con 540 metros

Los tirantes se anclan, además de en el tablero, en el mástil superior de las pilas 12 y 13. El sistema se configura con doble plano cuasi paralelo de tirantes y disposición en arpa con tendencia convergente, instalándose en cada pilono 44 parejas para sumar un total de 176 tirantes, con potencias comprendidas entre 31 y 85 cordones, y capaces de transmitir fuerzas en servicio de hasta 1000 toneladas por tirante.

El procedimiento constructivo es de una elevada complejidad y dificultad, sobrepasándose muchas veces los umbrales o límites de la práctica constructiva reconocida para esta tipología de viaductos. En primera fase se han montado 52 metros de tablero a cada lado de la torre por avance en voladizo, con dovelas de hasta 20 metros, lo que constituye un record en lo que concierne a longitud de dovelas izadas. Los medios auxiliares que se han utilizado para el izado de estos elementos, cabrias y grúas, son también prácticamente únicos en su género. Una vez montada la última de estas dovelas, se instalaron y tesaron las primeras parejas de tirantes para a continuación ejecutar la losa de hormigón superior del tablero. Durante estas operaciones, y hasta el tesado de los primeros tirantes, el tablero estuvo provisionalmente empotrado a la pila con el fin de asegurar su estabilidad.



Imagen IV.35: Ejecución del primer avance en voladizo en pila 13 (ACL Diseño y Cálculo de Estructuras)

Una vez ejecutados los 52 metros de tablero en voladizo se elevaron y colocaron los denominados carros de izado, que se encargarán de alzar el resto de las dovelas, también de 20 metros de longitud y pesos de hasta 450 toneladas. El tablero se construye con dovelas que son transportadas hasta su posición de izado (con

pontonas en el caso de que la sombra del izado caiga sobre mar). Una vez posicionada la dovela, el carro de izado, situado en el extremo del tablero, procede a su elevación hasta colocar la dovela en su lugar definitivo. El ciclo de cada dovela se continua con una secuencia de tesados de tirantes, ejecución de losa y retesados de regulación, así hasta las 63 dovelas atirantadas existentes.

Casos singulares de izado e instalación de dovelas lo constituyen los pasos del tablero por las pilas 11 y 14, y por supuesto el cierre en clave o montaje de la dovela central del vano principal que rematará el tramo atirantado.



Imagen IV.36: Izado de dovelas con carros (ACL Diseño y Cálculo de Estructuras)

La extrema singularidad y magnitud de los carros de izado merece una explicación más detallada de los mismos. El extraordinario peso de las dovelas, derivado de su longitud de 20 metros, ha motivado un diseño hiperbólico de los medios auxiliares en general y en concreto de los carros, de los cuales lógicamente se han fabricado cuatro unidades. Cada uno de los carros tiene una longitud de 50 metros, de los cuales 30 metros vuelan más allá del tablero. Están formados por dos celosías longitudinales paralelas de 8 metros de canto y separadas 20 metros entre sí.

Dados los elevados esfuerzos que soportan, existen numerosos arriostramientos que aseguran la estabilidad de su estructura. En otros viaductos de la misma tipología, con dovelas de menor longitud y peso, es común el uso de cabestrantes más convencionales para el izado de las dovelas, lo que no ha sido posible en el Nuevo Puente Sobre la Bahía por las particularidades y condicionantes ya comentados.



Imagen IV.37: Tramo atirantado en plena ejecución (ACL Diseño y Cálculo de Estructuras)

3.2.3.6.- Tramo de hormigón final.

El tablero de hormigón pretensado constituye la parte final del Viaducto sobre la Bahía de Cádiz. Todo el tablero de hormigón es hiperestático y continuo incluso con el viaducto atirantado con el que se conecta rígidamente entre las pilas 14 y 15. Comprende dos partes de sección transversal diferenciada:

- Tramo de sección cajón: Abarca 9 vanos, desde la pila P15 hasta la pila P24. Las longitudes de los vanos son de $(5x75 + 68 + 4x62)$ metros. La sección transversal consiste en una sección cajón tricelular de 35.2 metros de ancho y 3.00 metros de canto, con almas centrales de 65 cm. de espesor, y alas de espesor variable con un mínimo de 30 cm.

  Es evidente que la sección del tablero es muy esbelta $\left(\frac{L}{h} = 25\right)$ y sobre todo audaz en el sentido de que en un afán de aligeramiento (lógico debido a las grandes luces en relación al canto) todo el cortante y todo el pretensado deben transitar por almas estrechas. En correspondencia, las cuantías de acero de pretensado son muy altas y el trazado de las vainas complejo. De hecho, la tipología de cajón pretensado ejecutado in situ sobre cimbra ha sido llevada en este viaducto al límite, tanto en lo que corresponde a las longitudes de vano, como al ancho y canto del tablero, y a la extrema finura de las almas.

  La sección transversal se ejecuta en dos fases: en primer lugar se hormigona un núcleo central de 14.25 metros de ancho en secuencia en todos los vanos, para en una segunda fase acometer la ejecución de los voladizos laterales, de 9.475 metros de ancho en cada borde. Para esta segunda fase se utilizará un carro de hormigonado.

- El tramo de sección aligerada: Comprende 13 vanos, desde la pila P25 hasta el estribo E2. Las longitudes de los vanos son de $(13x40 + 31{,}75)$ metros. La sección transversal consiste en una sección tipo losa aligerada de anchura variable y canto de 2.00 metros. Aquí la esbeltez del tablero es típica $\left(\frac{L}{h} = 20\right)$ y por lo tanto constituye una sección de ejecución mucho más convencional que la del tramo en sección cajón. La sección transversal se hormigona en una única fase.

3.2.3.7.- Resumen de las cifras más significativas de la obra.

CIFRAS DE LA OBRA			
ESTRUCTURAS		**MOVIMIENTO DE TIERRAS**	
Acero B500S	30.521.513 kg	Excavación	440.193 m³
Acero pretensado	2.430.640 kg	Terraplén	706.678 m³
Acero tirantes	2.329.462 kg	**TRATAMIENTOS DEL TERRENO**	
Acero estructural S355	38.801.213 kg	Columnas de grava	180.000 m
Hormigón	1.650.000 m³	Drenes mecha	88.907 m
Pilotes Ø 1 m	1.381 m	**OTROS**	
Pilotes Ø 1.25 m	5.135 m	Tablestacas metálicas	37.000 m²
Pilotes Ø 1.5 m	2.477 m	Duques de Alba	2.500 m
Pilotes Ø 2 m	10.788 m	MBC	124.320 t

Tabla IV.24: Cifras más significativas de la obra.

3.3.- EL CONTROL GEOMÉTRICO CLÁSICO DEL TRAMO ATIRANTADO.

3.3.1.- Antecedentes y objeto.

El tramo atirantado del puente sobre la Bahía, se ha ejecutado mediante un proceso constructivo por voladizos sucesivos equilibrados a partir de las torres. Este proceso requiere un control geométrico exhaustivo durante cada una de sus fases

constructivas, de forma que una vez finalizada la estructura, compuesta básicamente por el tablero metálico y los tirantes desde las torres de atirantamiento, la rasante se ajuste a la definida como definitiva en proyecto.

Este procedimiento hace que la estructura, en voladizo de luz creciente a ambos lados de las torres, sea extremadamente flexible durante todo este tiempo que dura el proceso hasta el cierre en clave, siendo por tanto muy sensible a las solicitaciones a las que puede estar sometida. Este segundo aspecto lleva a que el control geométrico del mismo, durante todo el proceso constructivo, sea una parte fundamental del mismo, teniendo que utilizar instrumentos topográficos de alta precisión así como un diseño de los puntos a tomar adecuado.

Los modelos de cálculo en cada una de las fases determinan una estimación de los desplazamientos y giros en puntos críticos de la estructura así como la geometría definitiva una vez concluida la fase de construcción del tramo atirantados colocada la dovela de cierre.

De este modo, en cada fase de comprobación, el modus operandi desde el punto de vista de control geométrico se basa en partir del conocimiento de la rasante definitiva así como de los movimientos parciales y acumulados en cada una de las etapas de construcción. A partir de éstas se define una cota de montaje para cada una de las dovelas de forma que se pueda alcanzar la geometría final de proyecto.

Una vez más conviene centrarse sobre la elevada flexibilidad de la estructura durante todo el proceso constructivo en voladizo, ya que obliga y condiciona la forma de montaje de las dovelas en función de las solicitaciones exteriores que existan en cada momento, sobre todo lo relativo en cuanto a sobrecargas existentes así como la temperatura en las diferentes partes del tablero en cada momento. Esto viene motivado porque la situación a la que se debe colocar una determinada dovela depende de forma directa de todo lo que haya ocurrido en el tramo ya construido hasta ese momento, por tanto, una variación de las condiciones reales con respecto a las consideradas, puede llevar a que la cota a la que se coloque dicha dovela así como los tramos sucesivos no sea la adecuada, de aquí la importancia del conocimiento de cada una de las variables que intervienen en la determinación adecuada de la geometría de posicionamiento definitivo.

Además, el modelo de cálculo utilizado da una estimación de posiciones con una bondad que habrá que comprobar con el modelo a escala real, que es el puente en construcción, y en concreto en este, durante el izado de cada una de las dovelas, de forma que puede ser necesario un reajuste del modelo una vez observado y analizado su comportamiento real.

De forma complementaria, y no menos importante, en esta tipología de puentes, en el que el tablero es atirantado, el control geométrico en la fase de tesado de los tirantes aporta una comprobación adicional de la carga aplicada en los mismos a la que proporcionan los equipos de tesado, permitiendo, en el caso que fuera necesario realizar leves modificaciones en la carga de los mismos si fuera necesario.

3.3.2.- Variables a considerar.

La planificación de un control geométrico adecuado y preciso, requiere del conocimiento de diferentes acciones que pueden actuar sobre la estructura y provocar desplazamientos sobre ella. Esto requiere una toma de datos mediante diferentes dispositivos de instrumentación definidos en el proyecto y en los procedimientos específicos de construcción del puente.

3.3.2.1.- Efectos térmicos.

La variación térmica puede afectar a los principales elementos constitutivos del puente de forma significativa. De este modo, para determinar la afección sobre los diferentes elementos hay que tener en cuenta los siguientes aspectos:

A.- Torre de atirantamiento:

Por un lado se conoce la temperatura a lo largo de todas la torre a partir de las sondas de temperatura instaladas en ella. A partir del estudio de las temperaturas en función de las sondas comparadas, se puede conocer si existe gradiente térmico así como su dirección, ya sea en la dirección paralela al eje del tablero como en la perpendicular al mismo.

B.- Tablero:

El tablero puede sufrir un gradiente térmico vertical, entre la losa superior y el acero inferior de la sección, superior al considerada en proyecto según la IAP-11 que es de $15^{o}\,C$.

Del mismo modo, puede producirse transversalmente por diferencia de temperatura entre los dos extremos longitudinales del tablero, valor obtenido a partir de las sondas térmicas situadas en ambos bordes.

C.- Tirantes:

Las sondas térmicas en los tirantes se disponen en dos tirantes de cada una de las torres, por lo tanto un total de cuatro, de forma que se pueda contrastar con respecto a la temperatura de cálculo acorde a la normativa.

Esta comparativa frente a los diferentes valores de referencia conducirá a una comparación con los teóricos de forma que puede ser necesario una corrección topográfica de cotas y desplazamientos en cada una de las operaciones. Las operaciones determinantes para estas correcciones se marcan principalmente en el izado de dovelas y en las fases de tesado de tirantes.

3.3.2.2.- Sobrecargas en el tablero.

Las sobrecargas sobre el tablero son móviles y de valor no constante, en definitiva cambiantes e impredecibles, con lo que no se pueden definir a priori unos valores tipo de corrección, debido a la amplitud de la casuística y por lo tanto sería inoperativo.

Por este motivo, al menos en las fases de construcción más críticas en las que se marque un control topográfico, es necesario la definición de un mapa de sobrecargas que se vayan a situar sobre el tablero.

La más clara en este apartado se sitúa en el izado de todas y cada una de las dovelas ya que en esta fase hay que comprobar la geometría del tablero así como la cota de montaje, ya que un error en esta fase no es posible corregirlo posteriormente.

3.3.3.- Procedimientos de control.

Es objeto del presente apartado definir un procedimiento a seguir en cada una de las situaciones en que debe realizarse el control geométrico del tablero, siendo éstas las siguientes:

El control geométrico del tablero se realiza en las siguientes fases:

- Izado y montaje de dovela
- Controles intermedios durante el ciclo
- Tesado de los tirantes.

Y se debe organizar con instrumentos que permitan realizar lecturas adecuadas tanto en las torres como en el tablero.

En el tablero se colocan prismas a ambos lados del mismo coincidiendo con la posición de los diafragmas transversales. Estos diafragmas están cada diez metros, por tanto habrá dos prismas cada diez metros y cuatro en la dovela a izar, colocados en los extremos del segundo y cuarto diafragma de la misma.

En las torres es necesario conocer las coordenadas de la cabeza, siendo necesario disponer puntos de lectura adicionales a lo largo del mástil vertical en las caras de las que salen los tirantes.

3.3.3.1.- Montaje de la dovela.

En el momento de izado de la dovela, ésta debe tener los cuatro prismas referidos en el apartado anterior. La posición de los prismas debe ser conocida con exactitud, si bien debido a las posibles interferencias y condiciones de trabajo cambiantes en cada una de las mismas, puede tener una posición provisional, referenciados a los diafragmas o a los extremos de la dovela. Una vez colocada y soldada la dovela al resto de la estructura en su posición definitiva, en caso de haber sido prismas provisionales se sustituyen por los definitivos en la posición descrita en el apartado anterior, siendo los utilizados en las fases constructivas posteriores.

Cada ciclo constructivo comienza con el izado de la dovela, teniendo en ese momento los datos de posición del tablero al final del ciclo de la dovela anterior, estando el carro en posición de izado pero sin tener la carga de la siguiente dovela a izar.

En este momento, conocida la posición del final del tablero construido, se puede conocer el posible error geométrico acumulado hasta ese momento por comparación con la deformada obtenida por los modelos de cálculo para esta posición en concreto, siendo el punto de partida para el análisis de desplazamientos parciales generados en cada operación que se realice en el ciclo.

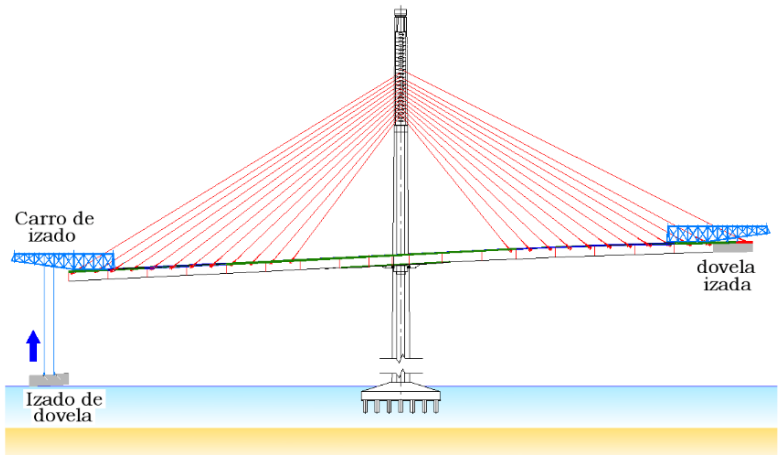


Figura IV.38: Croquis del montaje de la dovela

Con estas premisas, el proceso a seguir para el control geométrico durante el izado de la dovela es el que se expone a continuación:

A.- Comprobación de las sobrecargas.

Previo al comienzo de la operación de izado, se debe comprobar que sobre el tablero no hay más sobrecargas o acciones a las consideradas previamente en el mapa de sobrecargas prediseñado.

En lo referente a cargas móviles, ya sean las grúas, camiones o el carro de izado, deben estar estáticas o con la configuración de traslación.

B.- Control topográfico.

Habiendo comprobado las sobrecargas, tanto en su distribución física como en valor, el siguiente paso es realizar la comprobación geométrica de los prismas de las dovelas izadas en fases anteriores así como los de la torre correspondiente. Estas lecturas serán la referencia para evaluar los desplazamientos parciales que se van a producir en las diferentes operaciones consecutivas del ciclo en marcha.

Adicionalmente, hay que comprobar la alineación del tablero para ver si es totalmente perpendicular al eje teórico o si por el contrario hubiera alguna desviación. A estos efectos, se consideran despreciables los gradientes locales entre dos dovelas consecutivas.

C.- Comienzo de la operación de izado.

Con el inicio de la operación de izado, se llevan a cabo los siguientes controles:

- *Control de variables y sobrecargas.* Una vez izada la dovela y cuando está situada a la altura definitiva del tablero previamente ejecutado, se debe proceder a la medición de las variables térmicas consideradas previamente así como una comprobación adicional de que no existen sobrecargas no previstas en el tablero.
- *Lectura topográfica.* Conocidas las variables predefinidas, se procede a la lectura de los prisma de las dovelas previas y los situados en la torre.
- *Definición de la cota de izado.* Tomados estos datos, se calcula la cota a la que deben quedar cada uno de los prismas de la dovela izada, para poder así hacer la fijación provisional de la misma. Estas cotas, habrán de ser corregidas con las variables térmicas obtenidas conforme a los parámetros de corrección respecto a las cotas teóricas, en caso de ser necesario, y así adaptarlas a las condiciones de la obra.

D.- Ejecución de las soldaduras.

Con el inicio de la ejecución de las soldaduras, se llevan a cabo los siguientes controles:

- *Verificación de cota previo al descuelgue de la dovela desde el carro.* Finalizados los trabajos de soldadura, se procede de nuevo a la lectura de los cuatro prismas de la dovela izada, con el objeto de comprobar que durante todo este proceso, soldadura, no ha habido desplazamientos imprevistos. Hay que tener en cuenta además, que el proceso de soldadura se prolonga durante varios días, con lo que las comprobaciones intermedias y finales, hay que realizarlas con las oportunas correcciones en función de las condiciones térmicas, es decir, las posibles variaciones de temperatura.
- *Verificación de cota con la dovela liberada del carro.* Una vez fijada al tablero y liberada del carro, se procede de nuevo a la lectura de los prisma de la misma y poder así comprobar, por diferencia con las lecturas anteriores, si el descenso en la punta ha sido el teórico.

3.3.3.2.- Control geométrico durante el ciclo.

Durante el ciclo completo, y como medida adicional de control, se realizan lecturas topográficas del tablero y de la torre en los periodos intermedios entre los diferentes tesados así como inicio y fin de ciclo. De esta manera se comprobará la bondad del modelo en el caso de obtener los resultado esperados o la detección de posibles anomalías debido a numerosos factores como pueden ser la densidad del hormigón, sobrecargas diferentes a las previstas, etc.

En toda comprobación geométrica del tablero se miden las variables definidas anteriormente considerando y registrando las sobrecargas existentes, tanto en disposición como en cuantificación de la misma, de forma que el contraste sea el adecuado.

Ahora bien, para que esta comprobación no sea un punto de parada, durante las fases intermedias del ciclo no se realiza lectura sobre todos los prismas existentes en la torre y tablero, sino exclusivamente sobre la dovela que se está colocando y la anterior.

De forma general los controles a realizar son los siguientes:

- Toma de datos sobre los cuatro prismas de la dovela que se está izando y anterior, así como los dos superiores de la torre. La periodicidad de esta lectura es diaria a una hora prefijada cada mañana. Esta es la que permitirá analizar la evolución de las variables térmicas así como los posibles efectos sobre la estructura.
- Toma de datos de todos los prismas, una vez finalizada la colocación de las losas prefabricadas.
- Toma de datos de todos los prismas, una vez finalizado el hormigonado de las juntas y zonas in situ.
- Toma de datos de todos los prismas, una vez que el carro esté colocado sobre el carril que le lleva al frente del tablero.
- Toma de datos de todos los prismas, una vez que el carro esté colocado en el frente del tablero, aún sobre los carriles de traslación.
- Toma de datos del carro una vez fijado en la posición de izado.
- Toma de datos una vez finalizado el tesado de la primera pareja de tirantes de la dovela, antes de proceder al izado de la siguiente dovela, donde se tomarán todos los prismas del tablero y de la torre, para poder así analizar la geometría del tramo completo.

3.3.3.3.- Tesado de tirantes.

Durante los escalones de carga realizados en el tesado de cada una de las parejas de tirantes es necesario realizar un control geométrico del tablero y de las torres. De esta forma, tras el análisis de los mismos, se podrá conocer si los desplazamientos en las torres y el tablero se ajustan a lo establecido previamente en el modelo, o detectar posibles anomalías que pudieran aparecer durante la puesta en carga de los tirantes.

Este control realizado, supone una comprobación alternativa de la carga final que tiene el tirante, ya que si los resultados geométricos reproducen lo esperado en el modelo, quiere decir que la carga de los tirantes es la prevista, dada la relación biunívoca entre carga del tirante y desplazamientos.

El proceso de tesado, al igual que el de la soldadura, es largo en el tiempo, por lo que al igual que se hizo con ésta última, es necesario realizar comprobaciones de la variabilidad térmica previamente a la toma de datos topográficos, de forma que si hay variación térmica, se puedan introducir las correcciones necesarias al sistema de medida dentro de los contrastes realizados. Por el mismo motivo explicado de es largo en el tiempo, los tesados siempre comienzan a primera hora de la mañana para que la primera lectura de control sea con los mínimos efectos térmicos posibles.

El procedimiento para el control topográfico durante el tesado de los tirantes es:

- Antes del comienzo del tesado se toman los prismas de la dovela sobre la que se está trabajando y la anterior además de los ubicados en la torre.
- En cada escalón de tesado hay que proceder a la toma de lecturas de los mismos prismas anteriores. Estos datos geométricos se comparan con la tensión del tirante, y así comprobar la bondad del modelo o si hay que introducir variaciones al plan de tesado previsto.

- Al finalizar el tesado de nuevo se tomarán lecturas de los prismas indicados anteriormente con el objeto de verificar la geometría final del tablero y de la torre.

3.4.- LA INSTRUMENTACIÓN ADICIONAL DEL TRAMO ATIRANTADO.

3.4.1.- Introducción.

Durante la construcción del puente sobre la Bahía de Cádiz se instaló un sistema completo de instrumentación estática y dinámica, que ha servido por un lado como apoyo al control geométrico expuesto en el apartado anterior, que se puede resumir en cuanto a las actuaciones a realizar como:

- Mediciones para el control de la dovela a izar y montar.
- Mediciones de la situación de las torres.
- Medición de alzado y planta del tablero completo.
- Movimientos extremos del tablero debidos a las condiciones meteorológicas y otras variables.

Válido para completar la información necesaria en la comprobación del modelo de cálculo previsto durante la construcción y por otro lado sirve como base para la monitorización permanente posterior que un puente de estas características requiere.

Estos sensores han aportado información para poder monitorizar el proceso constructivo en sus parámetros más relevantes: fuerzas, tensiones, temperaturas y movimientos.

La instrumentación colocada para este objetivo ha sido:

- Extensómetros
- Clinómetros en diferentes secciones de los pilonos
- Bandas extensométricas en la losa de hormigón del tablero y en secciones metálicas
- Termómetros en las torres y en el tablero
- Células de carga en tirantes.

De este modo, los datos disponibles durante la construcción del puente han sido los aportados principalmente por los sistemas instalados en las pilas 12 y 13, complementados por una serie de sensores dinámicos compuestos por acelerómetros situados en los pilonos y en el tablero así como anemómetros y veletas.

3.4.2.- Instrumentación para la obtención de valores estáticos.

El puente durante su construcción está sometido a diferentes esfuerzos provocados por el propio proceso constructivo así como efectos externos. Durante la fase de construcción, los datos que se toman están enfocados a medidas para obtener, analizar y contrastar resultados en el campo de la estática.

Esta instrumentación, está compuesta por los siguientes elementos:

- Sondas térmicas:
- Extensómetros:
- Bandas extensométricas:

Todos estos sensores, están conectados a dos estaciones, situadas en las pilas 12 y 13, donde se van recopilando todos los datos de forma automática, sin necesidad de

operadores y con una periodicidad prefijada. El software desarrollado cuenta con los siguientes soportes, desarrollado por Kinesia Ingeniería:

- Análisis gráfico para la visualización y comparación de trazas históricas.
- Análisis multivariante para la elaboración de modelos explicativos del comportamiento estructural.
- Análisis estadístico para la confección de histogramas y para la extracción de máximos y mínimos que contrastar con las especificaciones del eurocódigo.
- Análisis de sección, para la obtención de esfuerzos a partir de deformaciones unitarias.
- Análisis de punto elástico, para la obtención de tensiones principales y tangenciales a partir de rosetas extensométricas.

Las variables a considerar para la distribución de sensores han sido:

- Temperatura con el fin de controlar el gradiente térmico. Las medidas se toman a primera hora de la mañana para obtener datos absolutos.
- Sobrecargas en el tablero, con el objetivo de asegurar que su valor y situación corresponden con el modelo de cálculo y poder comparar con las mediciones.
- Viento.
- Peso de los cables y peso del tablero.
- Módulos de elasticidad en el hormigón de la torre y del tablero así como en el acero de los cables y tablero.
- Fuerza en los tirantes
- Geometría en cuanto a la situación de los tirantes, la verticalidad de las torres y la longitud de las dovelas.
- Efectos no lineales de fisuración, reológicos, …

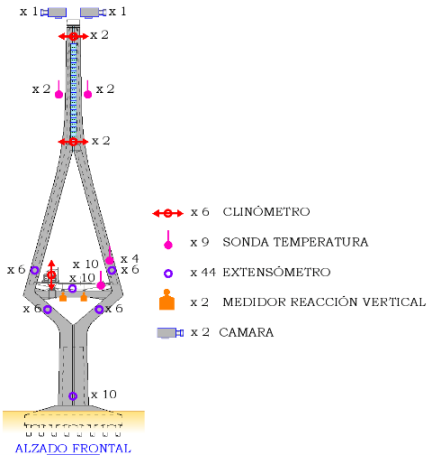


Figura IV.39: Distribución de sensores en la Pila 13. (ACL)

De este modo, la distribución de sensores en el puente, en función de los parámetros o esfuerzos que se desea medir es la siguiente:

- Movimientos en torre: Se instrumentan tres secciones de la torre con dos clinómetros en cada sección, longitudinal y transversal, lo que proporciona un total de seis clinómetros.

- Esfuerzos en base de la torre: Se instrumenta la sección de arranque de la torre (sobre el encepado) con diez extensómetros.
- Esfuerzos en brazos de la torre: Se instrumenta una sección transversal de cada uno de los cuatro brazos que forman el rombo de la torre con seis extensómetros por sección, que son un total de 24 extensómetros.
- Esfuerzos en travesaño de la torre: Se instrumenta la sección transversal de centro de luz con diez extensómetros.
- Reacción sobre el travesaño de la torre: Se miden los dos aparatos de apoyo tipo pot del tablero sobre el travesaño.
- Flexión longitudinal del tablero: Se instrumentan cuatro secciones transversales del tablero a razón de 16 bandas extensométricas por sección, siendo por tanto un total de 64 bandas extensométricas.
- Flexión transversal del tablero: Se instrumenta una sección del tablero, junto con un diafragma, con diez bandas extensométricas para analizar el reparto transversal de tensiones.
- Temperatura ambiente: Se instrumenta un punto de medida de temperatura ambiente en recinto protegido de la radiación solar y con ventilación mecánica forzada. El sistema dispone de un sensor de flujo de aire de forma que pueda verificarse el correcto funcionamiento del motor de ventilación.
- Temperatura en tablero: Se instrumenta una sección transversal del tablero (incluida losa de hormigón) con cinco sondas de temperatura para caracterizar los gradientes térmicos vertical y horizontal (transversal).
- Temperatura en tirantes: Se instrumentan dos tirantes, uno de gran longitud y otro corto, con una sonda de temperatura cada uno.
- Temperaturas en torre: Se instrumentan los dos brazos largos del rombo de la torre con cuatro sondas de temperatura cada uno, siendo en total ocho.
- Fuerzas en tirantes: Se instrumenta uno de cada cuatro tirantes con una célula de carga monotorón, lo que necesita un total de 22 células de carga.
- Presiones de tesado: Se utilizarán dos sondas de presión para controlar la fuerza ejercida por los gatos de tesado.

RESUMEN DE SENSORES PARA VALORES ESTATICOS	
Clinómetros	6
Extensómetros en sección de hormigón armado	44
Bandas extensométricas en sección de acero estructural	74
Aparatos de apoyo tipo POT	2
Fuerzas en tirantes	22
Termómetros	16
Flujo de aire	1
Presión en gatos de tesado	2

Tabla IV. 25: Resumen de sensores instalados para la obtención de valores estáticos.

3.4.3.- Instrumentación para la obtención de valores dinámicos.

La instrumentación para la obtención de valores dinámicos en el Puente de la Bahía de Cádiz, se preveía su uso en fase de explotación. Sólo se empezaron a usar durante la fase de construcción a partir del problema surgido durante el izado de una dovela, en el que coincidentes el periodo de oleaje y el periodo fundamental del tablero, éste entra en resonancia y hay que abortar la maniobra de izado. De este modo los

previstos en la fase de explotación son 44 sensores repartidos en las diferentes partes del puente en función de los factores que se pretende controlar:

- Vibraciones en las torres: se instrumentan dos secciones de cada una de las torres con dos acelerómetros, sección longitudinal y transversal, luego en total ocho acelerómetros.
- Vibraciones en tablero: se instrumentan cinco secciones, una en vano izquierdo, tres en vano central y una en vano derecho, con dos acelerómetros por sección, ambos verticales, total diez acelerómetros.
- Vibraciones en tirantes: se instrumentan dos tirantes, uno alto y otro bajo, de cada una de las arpas de tirantes, total 16 acelerómetros.
- Viento en torres: se instrumentan las dos coronaciones de las torres con una anemómetro/veleta cada una, total dos anemómetros/veleta.
- Viento en tablero: se instrumentan tres puntos del tablero (vano izquierdo, vano central y vano derecho) con 1 anemómetro/veleta cada uno, total tres anemómetros/veleta.

RESUMEN DE SENSORES PARA VALORES DINAMICOS	
Acelerómetros	34
Anemómetros	5
Veletas	5

Tabla IV.26: Resumen de sensores instalados para la obtención de valores dinámicos.

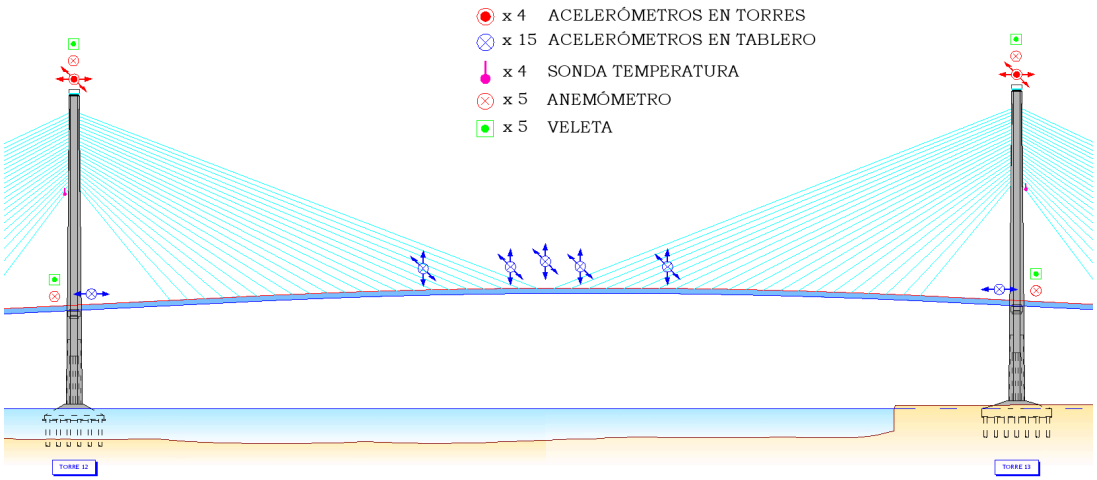


Figura IV.40: Resumen de sensores instalados para la obtención de valores dinámicos.

3.4.4.- Conclusiones a partir de la instrumentación.

El nuevo Puente de la Bahía de Cádiz ha tenido durante su ejecución un soporte instrumental que ha ayudado a monitorizar el proceso constructivo en sus parámetros más relevantes: fuerzas, tensiones, temperaturas y movimientos. Para ello, ha contado con sendos sistemas de adquisición de datos instalados, respectivamente, en las pilas P12 y P13, que han recogido las señales de los sensores dispuestos a tal efecto en las áreas de influencia de las mismas.

Durante la construcción, ambos sistemas han funcionado independientemente, como así lo eran también las dos semiestructuras que conforman el tramo atirantado del puente. Se plantean en este documento las bases de cómo debería adaptarse el sistema instrumental y qué conocimiento debería aportar durante la vida en servicio de la estructura o, al menos, durante los primeros años de la misma.

Es claro que una instrumentación tan potente como la que tiene el Puente de la Bahía arroja una información exhaustiva que hay que canalizar, procesar y analizar para extraer el conocimiento estructural que interesa de cara a su explotación y conservación.

3.5.- EL CONTROL GEOMÉTRICO POR TECNICAS CLÁSICAS DURANTE EL IZADO.

3.5.1.- Introducción.

El control geométrico del izado durante la construcción se realiza con Estación Topográfica, si bien se cuenta con un GPS de apoyo en la maniobra. La ubicación de la Estación se opta por situarla en una ménsula en el canto de la riostra en su lado más oriental, entre la placa correspondiente al tope longitudinal definitivo y la placa del gato de traslación situado a la derecha del eje de avance del puente.

Esta ubicación permite visualizar la trayectoria completa de la dovela desde el comienzo del izado en la pontona hasta su situación definitiva para el ajuste milimétrico de la misma.

Espacialmente la dovela se controla geométricamente desde cinco puntos fijados rígidamente a la misma, cuidadosamente elegidos de forma que sean visibles en todo momento, ya sea en la trayectoria de aproximación como en la colocación definitiva. En estos cinco puntos se instalan cinco prismas de 360º, que tienen la característica de poder ser medidos desde cualquier ángulo sin tener que estar orientados hacia el aparato. Este aspecto es importante ya que la dovela está en continuo movimiento además de ser inaccesible en toda la maniobra.

3.5.2.- Elementos participantes.

3.5.2.1.- Red de pilares y bases.

Han sido determinados por un posicionamiento estático GPS en dos de ellos, el hito situado en los pórticos de montaje y el prisma situado en los dados de hormigón que hay a la entrada de las instalaciones de la cabezuela. Para el cálculo de estas coordenadas se pusieron sendas antenas GPS durante dos horas, además se utilizaron las antenas fijas de la oficina (referencia) y la de la UCA. La precisión alcanzada en esta observación es de 2 mm. El resto de bases se han radiado desde el propio hito de los pórticos orientando a los dados de la entrada por medio de una observación de series automáticas en círculo directo e inverso.

Este método permite la máxima precisión ya que de una forma automática el aparato hace 16 series de medidas en círculo directo e inverso y con la puntería automática. Con los resultados de estas series se puede decir que el error en coordenadas x y z es de orden milimétrico.

Para la comprobación de la posición real del conjunto de la riostra con todos sus elementos (topes, guías, chapas, etc.), una vez calculada la posición de la consola, se tomaran las seis bases que han servido para su replanteo. Esto produce una idea de los desplazamientos instantáneos de la posición real de la riostra con respecto a la teórica, debidos a soleamiento y gradiente térmico. Con estos valores se corrigen, si fuera necesario, las coordenadas objetivo de las diferentes fases.

Para el control del asiento diferencial de las orugas de la grúa se disponen tres prismas con el objeto de determinar su desnivel longitudinal y trasversal absoluto a lo largo de las diferentes fases. La tolerancia para el asiento diferencial es de 5 por 1000.

El procedimiento en sí consiste en el estacionamiento del aparato en la consola. Mediante la observación al mayor número de base se calcularan las coordenadas mediante intersección inversa. Todo este proceso es automático mediante el programa Geomos Monitor de Leica.

BASE	X	Y	Z	OBSERVACIÓN
HITO GPS	745.961.841	4.045.822.992	11.042	ESTATICO
BR-02 GPS	746.186.054	4.045.729.113	7.865	ESTATICO
BR-02	746.186.056	4.045.729.112	7.976	RADIADO
BR-03	746.066.631	4.045.564.798	5.588	RADIADO
PILA-14	745.949.420	4.045.873.013	8.733	RADIADO
PILA-15	746.067.841	4.045.894.239	7.927	RADIADO
BR-01	745.939.090	4.045.940.372	6.923	RADIADO
FAROLA-1	746.042.657	4.045.710.796	7.221	RADIADO
FAROLA-2	746.077.784	4.045.630.242	5.935	RADIADO
FAROLA-3	746.111.202	4.045.538.033	5.761	RADIADO

Tabla IV.27: Coordenadas de la red de pilares y bases en el sistema de referencia ED50.

Este programa, también utilizado en la auscultación de las pilas en el empuje del tablero VAC, se encarga de memorizar la posición de cada uno de los prismas situados en la dovela y refrescarla con cada ciclo de mediciones. De esta manera se puede seguir con precisión milimétrica el movimiento de la dovela en el espacio. Las coordenadas son trasmitidas desde la base datos de Geomos al programa también de Leica Alignment Monitoring donde serán analizadas en tiempo real. Este análisis se puede enfocar de dos formas, a través de un recorrido previamente definido donde se indica la situación de cada prisma por PK, distancia lateral y desnivel, pudiendo así verificar si la dovela esta girada y si sigue la trayectoria adecuada. La otra forma es por objetivo, es decir se le define una posición determinada y se establecen los diferenciales xyz de cada posición tomada, todo ello en tiempo real.

3.5.2.2.- Estación Topográfica.

En este sentido el instrumento utilizado para el control del lanzamiento del tablero es una Estación Topográfica marca LEICA modelo TS I 1", con número de serie 161336, con las siguientes especificaciones técnicas:

- Precisión en la medida de ángulos horizontales y verticales: $1^{"}$
- Sensibilidad del nivel (Compensador electrónico de doble eje): $0{,}3^{"}$
- Aumentos del anteojo: $30x$
- Medición de distancias: $1\ mm + 1\ ppm$

Dicha Estación es motorizada y cuenta con el sistema ATR de puntería automática. Adicionalmente cuenta con una cámara coaxial al objetivo que permite transmitir imágenes y video georreferenciados a través de una conexión Wimax, wifi de largo alcance, y poder así comunicarse con la oficina de obra.

En la siguiente imagen se puede apreciar dicho instrumento topográfico, el cual a través de una tarjeta de memoria es capaz de almacenar para posteriormente tratar informáticamente toda la información captada de forma automática, con la ventaja por una lado de incrementar el rendimiento de la toma de datos y por otro reducir sustancialmente el número errores groseros que se cometen al hacer el mismo proceso de forma manual.



Imagen IV.38: Leica TS I 1"

3.5.2.3.- Prisma reflector

Dado que la estación utilizada cuenta con reconocimiento automático de objetivo (ATR) y tecnología de bloqueo automatizada, el prisma más adecuado para ella es uno que funcione en todas direcciones, dado que no es posible durante la maniobra orientar el mismo hacia la estación.

El prisma utilizado es el Leica GRZ122, de 360º, consta de seis cuerpos prismáticos triples de vidrio ensamblados firmemente, cada uno de los cuales es similar a un prisma circular pero más pequeño y con las esquinas ligeramente pulidas.

La precisión obtenida con este prisma es normalmente de 2 mm o incluso mejor.



Imagen IV.39: Prisma de Leica GRZ1222 de 360º

3.5.2.4.- Maniobra topográfica.

Las operaciones topográficas a realizar durante la maniobra izado tienen las siguientes fases, desarrolladas para el posicionamiento de la dovela 0 en la pila 13, pero que son extrapolables a cualquier otra dovela.

Fase 1: Nivelación de la dovela una vez elevada unos centímetros de la sustentación.

Con otra estación topográfica Leica TS-30, esta vez conectada a la oficina a través de radio se posiciona la pieza con su peralte y pendiente correspondientes. Como es muy difícil predecir la situación se hace calculando desniveles entre combinaciones de los cinco prismas dos a dos. Los desniveles teóricos se calculan de la posición teórica de la Fase 3, es decir, la posición encima de la riostra.

nº	X	Y	Z
33198	745.752.811	4.045.822.864	61.734
33199	745.750.746	4.045.830.885	61.773
33398	745.762.524	4.045.825.129	61.412
33399	745.760.293	4.045.833.958	61.508
33498	745.767.568	4.045.825.566	61.242

Tabla IV.28: Puntos de control de la dovela 0 en la pila 13. Fase 1.

Actuando sobre los gatos de los cables se llegara a una situación paralela a la teórica con una tolerancia de $\pm 5\ mm$.

Fase 2.- Elevación de la pieza hasta la cota de desplazamiento de la grúa.

Como será imposible ver los prismas desde la riostra o desde el suelo, para poder conocer la cota de la pieza se colocará una antena GPS en la parte superior de la dovela que da idea aproximada de "cuanto falta" para la posición teórica.

nº	X	Y	Z
33198	745.781.918	4.045.830.129	61.734
33199	745.779.853	4.045.838.150	61.773
33398	745.791.631	4.045.832.394	61.412
33399	745.789.400	4.045.841.223	61.508
33498	745.796.675	4.045.832.831	61.242

Tabla IV.29: Puntos de control de la dovela 0 en la pila 13. Fase 2.

Cuando la dovela alcance la altura necesaria ya se tienen los prismas a la vista de la estación topográfica situada en el canto de la riostra. En este momento se lleva a cabo un estacionamiento y su correspondiente posicionamiento por el método de intersección inversa y una primera ronda de lecturas a los cinco prismas, determinando la posición real de la dovela con respecto a la teórica. El dato que interesa determinar es si la dovela esta cruzada con respecto al eje de traslación.

Fase 3.- Avance de la grúa con la pieza.

A continuación se sigue el movimiento de los cinco prismas, analizándolos por la trayectoria de manera que se pueda detectar cualquier anomalía en el transito. Una vez llegados al emboquille de la guía se volverá a ver los desniveles entre los prismas con el objeto de detectar alguna posible alteración en la nivelación teórica de la pieza. Después de realizada esta comprobación se seguirá el movimiento a tiempo real hasta el próximo objetivo que es una posición 100 mm más alta de la final.

nº	X	Y	Z
33198	745.752.811	4.045.822.864	61.734
33199	745.750.746	4.045.830.885	61.773
33398	745.762.524	4.045.825.129	61.412
33399	745.760.293	4.045.833.958	61.508
33498	745.767.568	4.045.825.566	61.242

Tabla IV.30: Puntos de control de la dovela 0 en la pila 13. Fase 3.

Con las coordenadas de los puntos en la fase 2 y 3 se calculan los ejes de trayectoria de cada prisma.

Fase 4.- Posado sobre los gatos de la pieza.

Una vez cargado el peso de la dovela sobre la riostra, se lleva a cabo un nuevo estacionamiento y su correspondiente posicionamiento por el método de intersección inversa. Se comprueba la posición alcanzada por la dovela comparándola con la teórica. Con los gatos de traslación se corregirá la posición hasta que coincida. La

medición es continua, aproximadamente cada minuto se observa y calcula nuevamente la posición de cada prisma con una precisión milimétrica. En este caso el análisis se efectúa por objetivo, es decir, se intentará alcanzar las coordenadas xyz teóricas.

nº	X	Y	Z
33198	745.752.811	4.045.822.864	61.605
33199	745.750.746	4.045.830.885	61.644
33398	745.762.524	4.045.825.129	61.283
33399	745.760.293	4.045.833.958	61.379
33498	745.767.568	4.045.825.566	61.113

Tabla IV.31: Puntos de control de la dovela 0 en la pila 13. Fase 4.

Fase 5.- Elevación de la dovela 5 mm.

Se seguirá este movimiento hacia las coordenadas objetivo.

nº	X	Y	Z
33198	745.752.811	4.045.822.864	61.610
33199	745.750.746	4.045.830.885	61.649
33398	745.762.524	4.045.825.129	61.288
33399	745.760.293	4.045.833.958	61.384
33498	745.767.568	4.045.825.566	61.118

Tabla IV.32: Puntos de control de la dovela 0 en la pila 13. Fase 5.

Fase 6.- Paso del 3% al 5% de pendiente.

Se seguirá este movimiento hacia las coordenadas objetivo.

nº	X	Y	Z
33198	745.752.815	4.045.822.865	61.771
33199	745.750.751	4.045.830.886	61.812
33398	745.762.520	4.045.825.128	61.250
33399	745.760.290	4.045.833.958	61.346
33498	745.767.559	4.045.825.564	60.980

Tabla IV.33: Puntos de control de la dovela 0 en la pila 13. Fase 6.

Fase 7.- Elevación a la posición final.

Se seguirá este movimiento hacia las coordenadas objetivo.

nº	X	Y	Z
33198	745.752.815	4.045.822.865	61.776
33199	745.750.751	4.045.830.886	61.817
33398	745.762.520	4.045.825.128	61.255
33399	745.760.290	4.045.833.958	61.351
33498	745.767.559	4.045.825.564	60.985

Tabla IV.34: Puntos de control de la dovela 0 en la pila 13. Fase 7

La tolerancia en la colocación final de la pieza, es decir, la correspondiente a esta Fase 7, es de $\pm 20\ mm$ en planta y $\pm 15\ mm$ en alzado.

3.6.- CONTROL GEOMÉTRICO DINÁMICO MEDIANTE TECNICAS GPS.

3.6.1.- Introducción.

Durante la construcción del Puente de la Bahía de Cádiz, a partir de las conclusiones obtenidas en el empuje del viaducto de la Miel, así como todo los expresado en los apartados anteriores, se puede concluir que:

- Durante el proceso constructivo del tablero del viaducto de la Miel, a partir de los datos y gráficas obtenidas en los momentos el los que no hay empuje y por tanto el tablero debiera de estar parado, se intuye que se podría estudiar el comportamiento dinámico del puente a partir de dichos datos observados con GPS.
- Se utiliza, por los motivos expuestos, un nuevo laboratorio como es el Puente de la Bahía de Cádiz, en el que el GPS se ha utilizado como instrumento de apoyo y por tanto de manera secundaria, no confiándole el control geométrico durante la construcción en lo que al tablero atirantado se refiere.
- El puente de la Bahía de Cádiz, aun siendo uno de los más singulares del mundo en su tipología, tiene una instrumentación durante la construcción de su tablero enfocada a obtener datos para un análisis estático, confiando la bondad de la geometría a una Estación Topográfica de alta precisión.
- La instrumentación y toma de datos necesarios para una análisis dinámico en este puente se deja para la fase de explotación, salvo datos que se toman a partir del fenómeno de resonancia comentado en (Cap. IV – Apdo.[3.4.3]). Es decir, no estaba previsto un control dinámico del puente durante sus fases de construcción.
- En puente atirantados puede ser comprensible confiar a una Estación Topográfica de precisión el control geométrico del avance, ya que el propio proceso constructivo marca la fijación de una dovela, en este caso izada desde el mar, contra la anterior fijada y ya formando parte del tablero. Sin embargo, en puentes empujados, objeto principal de esta tesis, este proceso se realiza en la playa de montaje, y ha quedado demostrado que el control geométrico durante el lanzamiento se puede confiar perfectamente a instrumentación basada exclusivamente en GPS.

Cabe recordar que en el viaducto de la Miel el objeto del control geométrico se centraba en determinar la trayectoria del tablero durante el empuje con un doble objetivo, el primero el de garantizar la geometría final del mismo, y el segundo, controlar en la fase de empuje que las secciones no se vean sometidos a esfuerzos para los que no habían sido previamente previstos. Todo esto se proponía hacer mediante observaciones con GPS.

La búsqueda del nuevo laboratorio, se debe a la pretensión de poder realizar observaciones que sirvan como controles geométricos completos que sirvan para realizar el control geométrico inicialmente planteado pero también un control dinámico de la estructura en tiempo real durante la construcción, aspecto de suma importancia para detectar cualquier daño o anomalía de la estructura en esta fase, sin tener que esperar a pruebas posteriores una vez finalizada la estructura.

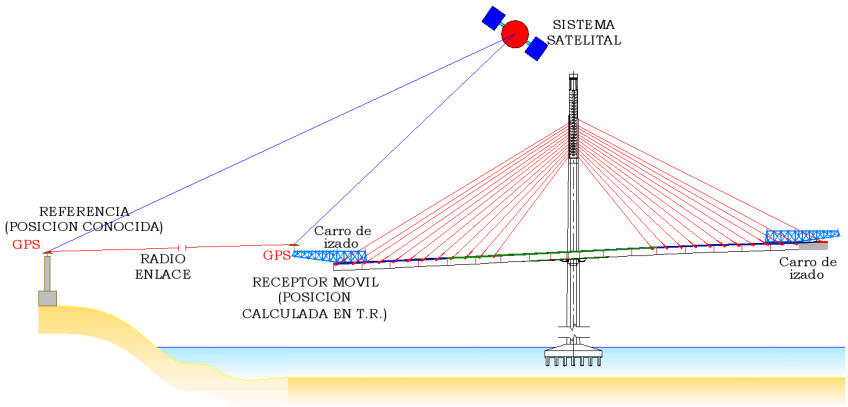


Figura IV.41.- Esquema GPS utilizado durante la construcción del Puente de Cádiz.

Este análisis parece factible, ya que se dan todas las circunstancias previstas en todo lo explicado en el capítulo III en torno al Análisis Modal Operacional en esta fase de constructiva: la alta flexibilidad de la estructura por un lado, periodos suficientemente grandes como para ser captados por observaciones GPS y una excitación exterior ambiental, el viento, sin tener que recurrir a excitaciones forzadas.

Cabe reseñar que del tablero ejecutado por avance en voladizo en el viaducto de la Bahía de Cádiz, la instalación del equipo GPS se realiza en el carro de izado, y se dispone de datos a lo largo de periodos de tiempo en días puntuales

3.6.2.- Elementos participantes.

3.6.2.1.- Red de pilares.

Para la realización de los trabajos detallados en los epígrafes anteriores, en la observación con GPS se ha utilizado un equipo de tierra denominado como antera de referencia, situada en la oficina de obra y enganchada a la red de pilares general de toda la obra que a su vez había sido debidamente enganchada y encuadrada con la red geodésica nacional.



Imagen IV.40.- Equipo GPS de referencia situado en la oficina de obra.

En la figura anterior, se puede ver el referido pilar, utilizado como punto estación del receptor y encargado de hacer las veces de referencia y por tanto encargado de obtener la corrección diferencial y radiotransmitirla al receptor móvil.

Se trata de un receptor de doble frecuencia con las siguientes coordenadas:

REFERENCIA	X	Y	Z
PEPA	7.473.319.225	4.045.843.693	86.376

Tabla IV.35: Coordenadas del GPS de referencia.

3.6.2.2.- Antena receptora.

La antena receptora, que constituye el punto sobre el que se hacen las observaciones con GPS, se ubicó en el carro de izado, situado en el frente de avance del puente. En la siguiente figura se puede apreciar la ubicación de la misma en la punta de lanzamiento.



Imagen IV.41.- Situación del prisma en el avance del tablero.

Pudiéndose ver en el siguiente esquema la situación del mismo en el carro de izado.

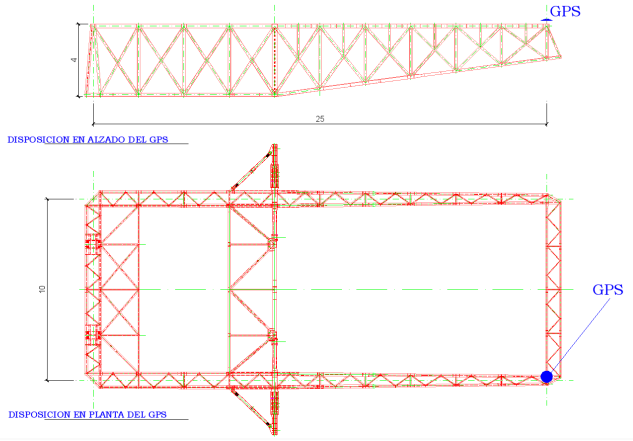


Figura IV.42.- Situación del GPS en carro de izado.

3.6.2.3.- Instrumental.

Se trata de un receptor de auscultación GNSS de alta precisión, en concreto el Leica GMX902 GG. Es una serie diseñada y construida para las aplicaciones de auscultación en tiempo real, con lo que es un equipo ideal para el fin que se persigue en la esta investigación.

Es por tanto una gama de receptores capaces de recibir señal de los satélites GPS, GLONASS y Galileo, específicamente desarrollados para el control de estructuras sensibles como es el caso del puente objeto de este laboratorio. Facilita datos brutos precisos GPS/GLONASS L1/L2 con frecuencia de hasta 20 Hz y ha sido diseñado y construido para las aplicaciones de auscultación en tiempo real.

Este instrumental empleado tiene las siguientes especificaciones técnicas:

Código diferencial
La precisión de la línea base con una solución de código diferencial para levantamientos estáticos y cinemáticos es de 25 cm.

Fase diferencial en post-proceso	
Línea base normal con GMX902 GG/GMX902 GNSS más AS10	
Estático	
Horizontal	Vertical
5 mm +0,5 ppm	10 mm + 0,5 ppm
Línea base largas con GMX902 GG/GMX902 GNSS más AS25	
Estático	
Horizontal	Vertical
3 mm +0,5 ppm	6 mm + 0,5 ppm

Fase diferencial en tiempo real	
GMX902 GG/GMX902 GNSS más AS10	
Estático	
Horizontal	Vertical
5 mm +0,5 ppm	10 mm + 0,5 ppm

Tabla IV.36.- Especificaciones técnicas Leica GMX900.

La antena empleada es la Leica AS10, Antena triple frecuencia. Compatible con GPS, GLONASS, Galileo, Compass y señales SBAS. En la siguiente imagen se puede apreciar exteriormente dichos instrumentos topográficos, así como su disposición en el laboratorio objeto de estudio:



Imagen IV.42.- Leica GMX900 y antena Leica AS10

3.6.3.- Observables, coordenadas y métodos de resolución.

La observación con GPS en tiempo real, desarrollada de forma extensa en el capítulo III de este documento, requiere dos equipos:

- El primero denominado referencia, se estaciona sobre un pilar ubicado en la oficina de la obra, mediante un mecanismo de centrado forzoso que evita errores de estacionamiento. Dicho pilar se caracteriza porque tiene coordenadas conocidas en el Sistema de Referencia ED50 (sistema adoptado para toda la investigación), además de WGS84, lo que permite con su observación determinar la corrección diferencial que es radio trasmitida en tiempo real al segundo equipo.
- El segundo denominado móvil, se estaciona sobre el carro de izado de dovelas, mediante el correspondiente tubo debidamente soldado a la estructura, con el objeto de hacer ambos solidarios y conseguir que tanto la antena como el propio tablero sufran los mismos movimientos. Éste equipo se caracteriza por que obtiene la corrección diferencial vía radio y las aplica a sus observaciones, procediendo en primera instancia a un periodo de iniciación con el cálculo de las ambigüedades enteras mediante técnicas OTF (on the fly) que permiten su determinación en movimiento. Este tiempo inicial varía según el número de satélites, la configuración de éstos y la distancia entre el receptor fijo y el móvil, teniendo un valor habitual entre 1 y 2 minutos. En segunda instancia pasa a llevar a cabo la medición de puntos, para lo cual es necesario la conexión por radio entre los dos receptores, de tal modo que pueda plantearse la ecuación de dobles diferencias. Para ello debe recibirse en el receptor móvil los datos de medición de diferencia de fase en el fijo. El control geométrico se realiza por tanto con medida de código y fase de tal manera que las precisiones obtenidas en el posicionamiento de la antena varían de 0,5 a 2 centímetros según la configuración de la constelación de satélites en cada momento.

De los observables con GPS se pueden destacar varias cuestiones que afectan a las observaciones realizadas:

- Los equipos GPS permiten grabar datos automáticamente cada cierto tiempo $[1, 2, 3, 10, 15, 20, \ldots segundos]$ y dado que en este nuevo ensayo se pretende realizar un análisis dinámico del tablero, se tienen datos cada segundo. Esto genera una nube de puntos muy densa, aproximadamente 4.861 puntos.
- Los datos obtenidos corresponden a las coordenadas del puente que más adelante se detallan, observando datos en un mismo punto sin avance del tablero.

Finalizado el trabajo de campo la gran cantidad de datos obtenida necesita una depuración y procesado de forma que se puedan obtener las coordenadas x, y, z de los puntos medidos. Una vez guardados por parte del receptor móvil las coordenadas de los puntos, se obtiene una nube de puntos en el sistema de referencia WGS84. En este caso, no es necesaria ninguna transformación de coordenadas al sistema de coordenadas planas local y cota respecto del cero de referencia, ya que se trata de

realizar una análisis principalmente de la variación de cotas con respecto a un punto de referencia.

En el procedimiento de observación en tiempo real, los ficheros almacenados automáticamente por el equipo, son directamente las coordenadas de la posición de la antena cada segundo, en el sistema de referencia establecido. Al margen de algunos parámetros más o menos representativos como pueden ser número de satélites, precisión esperada, fecha, hora, etc., los resultados de la observación, que generalmente se almacenan en un fichero con formato de intercambio denominado Rinex, se muestran de forma simplificada en la tabla siguiente, todo ello con el objeto de clarificar los observables captados.

COORDENADAS UTM Y ALTITUD				
nº Punto	**Coord X**	**Coord Y**	**Coord Z**	**Fecha**
P13TAB029	745.307,178	4.045.435,558	119,704	15/9/14 14:03
P13TAB030	745.307,181	4.045.435,562	119,702	15/9/14 14:03
P13TAB031	745.307,179	4.045.435,560	119,702	15/9/14 14:03
P13TAB032	745.307,178	4.045.435,559	119,704	15/9/14 14:03
P13TAB033	745.307,181	4.045.435,561	119,701	15/9/14 14:03
P13TAB034	745.307,181	4.045.435,560	119,699	15/9/14 14:03
P13TAB035	745.307,180	4.045.435,559	119,703	15/9/14 14:03
P13TAB036	745.307,179	4.045.435,558	119,703	15/9/14 14:03
P13TAB037	745.307,179	4.045.435,560	119,706	15/9/14 14:03
P13TAB038	745.307,177	4.045.435,557	119,704	15/9/14 14:03
P13TAB039	745.307,178	4.045.435,558	119,707	15/9/14 14:03
P13TAB040	745.307,180	4.045.435,561	119,706	15/9/14 14:03
P13TAB041	745.307,181	4.045.435,561	119,705	15/9/14 14:04
P13TAB042	745.307,181	4.045.435,561	119,704	15/9/14 14:04
P13TAB043	745.307,179	4.045.435,560	119,706	15/9/14 14:04
P13TAB044	745.307,180	4.045.435,560	119,702	15/9/14 14:04
P13TAB045	745.307,180	4.045.435,559	119,702	15/9/14 14:04
P13TAB046	745.307,177	4.045.435,557	119,707	15/9/14 14:04
P13TAB047	745.307,178	4.045.435,559	119,703	15/9/14 14:04
P13TAB048	745.307,181	4.045.435,562	119,702	15/9/14 14:04
P13TAB049	74.530,718	4.045.435,560	119,702	15/9/14 14:04

Tabla IV.37.- Coordenadas UTM y altitud en la dovela P-12 (losa 11 D).

Tal y como se ha comentado anteriormente, el número de observables captados ronda los 4.800 puntos, lo que hace inviable la presentación en formato papel de los observables. En la tabla anterior se muestran los observables de 50 puntos, encontrándose el resto de datos en los ficheros en formato digital adjuntos a esta Tesis Doctoral.

Para analizar los datos dentro del análisis dinámico pretendido, ya que los datos se toman en un punto fijo planimétricamente, basta con tratar la cota que se obtiene directamente del GPS, obteniéndose directamente la tabla que se adjunta, correspondiente a los datos:

Los datos que se tienen corresponden al día 27 de septiembre de 2014, de los cuales se adjunta los datos de localización en el tablero:

Día: 27 de setiembre de 2014

Hora de inicio: 10:33:18

Hora de finalización: 12:21:03

Número de datos observados: 4.861 observaciones

Intervalo de tiempo entre datos consecutivos: 1 segundo

Coordenadas del tablero:

x = 745423.7524

y = 4045737.1247

z = 82.0921

De este modo, un ejemplo de los datos que van a servir para hacer el análisis dinámico son los que se presentan en la siguiente tabla:

EPOCA Y COTA GPS PARA ANALISIS DINAMICO								
Obs.	**Epoca**	**Coord Z**	**Obs.**	**Epoca**	**Coord Z**	**Obs.**	**Epoca**	**Coord Z**
1	10:33:18	84,2051	29	10:33:46	84,1981	57	10:34:16	84,2191
2	10:33:20	84,1931	30	10:33:48	84,1791	58	10:34:18	84,2041
3	10:33:20	84,1781	31	10:33:49	84,1721	59	10:34:19	84,2001
4	10:33:22	84,1671	32	10:33:50	84,1661	60	10:34:20	84,1981
5	10:33:22	84,1631	33	10:33:51	84,1591	61	10:34:21	84,1981
6	10:33:22	84,1631	34	10:33:52	84,1661	62	10:34:23	84,2091
7	10:33:25	84,1721	35	10:33:53	84,1841	63	10:34:24	84,2131
8	10:33:25	84,1881	36	10:33:54	84,2041	64	10:34:25	84,2181
9	10:33:26	84,2031	37	10:33:55	84,2421	65	10:34:26	84,2211
10	10:33:27	84,2271	38	10:33:56	84,2571	66	10:34:28	84,2211
11	10:33:28	84,2291	39	10:33:57	84,2661	67	10:34:29	84,2181
12	10:33:29	84,2291	40	10:33:58	84,2691	68	10:34:30	84,2151
13	10:33:31	84,2211	41	10:33:59	84,2671	69	10:34:31	84,2121
14	10:33:31	84,2071	42	10:34:00	84,2601	70	10:34:32	84,2101
15	10:33:33	84,1961	43	10:34:01	84,2451	71	10:34:34	84,2131
16	10:33:33	84,1801	44	10:34:02	84,2251	72	10:34:35	84,2161
17	10:33:34	84,1631	45	10:34:03	84,2041	73	10:34:36	84,2201
18	10:33:36	84,1501	46	10:34:04	84,1831	74	10:34:37	84,2241
19	10:33:36	84,1451	47	10:34:05	84,1701	75	10:34:39	84,2331
20	10:33:36	84,1451	48	10:34:06	84,1641	76	10:34:40	84,2371
21	10:33:39	84,1601	49	10:34:07	84,1621	77	10:34:41	84,2431
22	10:33:39	84,1811	50	10:34:08	84,1711	78	10:34:42	84,2451
23	10:33:40	84,1991	51	10:34:09	84,1831	79	10:34:43	84,2451
24	10:33:42	84,2161	52	10:34:10	84,1971	80	10:34:45	84,2351
25	10:33:42	84,2291	53	10:34:12	84,2251	81	10:34:46	84,2271
26	10:33:43	84,2321	54	10:34:13	84,2321	82	10:34:47	84,2161
27	10:33:45	84,2271	55	10:34:14	84,2341	83	10:34:48	84,2101
28	10:33:46	84,2121	56	10:34:15	84,2291	84	10:34:50	84,1991

Tabla IV.38.- Epoca y cota GPS para análisis dinámico.

3.7.- CONTRASTE DE RESULTADOS.

3.7.1.- Introducción.

Los datos obtenidos en la punta de lanzamiento, tomados en intervalos de 1 segundo ponen de manifiesto la variación continua que sufre la posición en cota de la punta de avance, movimiento lógico y relacionado con todo lo expuesto en el apartado (Cap III – Apdo. [4]).

En el caso del proceso constructivo llevado a cabo en el Puente de Cádiz, y perfectamente aplicable y extrapolable al Viaducto de La Miel, se tienen, durante la construcción, estructuras extremadamente flexibles y por tanto con unos movimientos en la punta de avance significativos para los que el GPS es un instrumento muy válido para obtener su posición de forma continua independientemente de las condiciones

climatológicas, del momento del día y sin dependencia alguna del elemento humano, aspecto este último que sería complejo dadas las complicaciones que llevaría trabajar en los puntos de toma con garantías plenas de seguridad.

Con estos datos obtenidos mediante auscultación GPS, se pretende estudiar su aplicación dentro del análisis dinámico durante la construcción de puentes, caso del puente de Cádiz con un voladizo importante durante su construcción y por tanto de alta flexibilidad.

Para ello, a diferencia de los datos obtenidos en el Viaducto de la Miel, en el que el intervalo de toma de datos fue de 20 segundos, se ha tenido la precaución de tomarlos cada segundo, de forma que se cumple la primera premisa de que el intervalo de tiempo sea del al menos la décima parte del periodo, pretendiendo lo que en el capítulo III se exponía al pretender un avance en la investigación del alcance que se pueda obtener de los datos conseguidos con GPS, en estructuras en fase de construcción y dentro del campo del análisis dinámico, para su posible uso como alternativa, sin más instalaciones de las que ya tiene la propia obra y no tener que recurrir a personal especializado en la misma, incorporándolo dentro de los trabajos normales de topografía y control de calidad de la obra, y por lo tanto la propuesta de uso como alternativa del GPS frente a tradicionales acelerómetros, ya que las experiencias previas en este campo, han demostrado que el GPS puede medir el desplazamiento con precisión dentro de un cierto rango de amplitud y frecuencia.

3.7.2.- Datos esperados.

Las medidas se realizan bajo la excitación de la estructura con cargas medioambientales, y por tanto, se está dentro del campo del Análisis Modal Operacional, sin tener que recurrir a excitaciones externas forzadas, aspecto que haría inviable el proceso pretendido.

Esta excitación ambiental hace que el puente vibre de manera que el GPS es capaz de captar estos movimientos, dada la flexibilidad que tienen estos tableros durante la construcción, ya sea el de la Bahía de Cádiz del cual se tienen los datos y perfectamente aplicable a tipologías como la del viaducto de la Miel durante su empuje.

De esta manera, las observaciones del GPS corresponden por tanto a desplazamientos en cota de la punta de lanzamiento, datos que pueden servir para el estudio dinámico de la estructura.

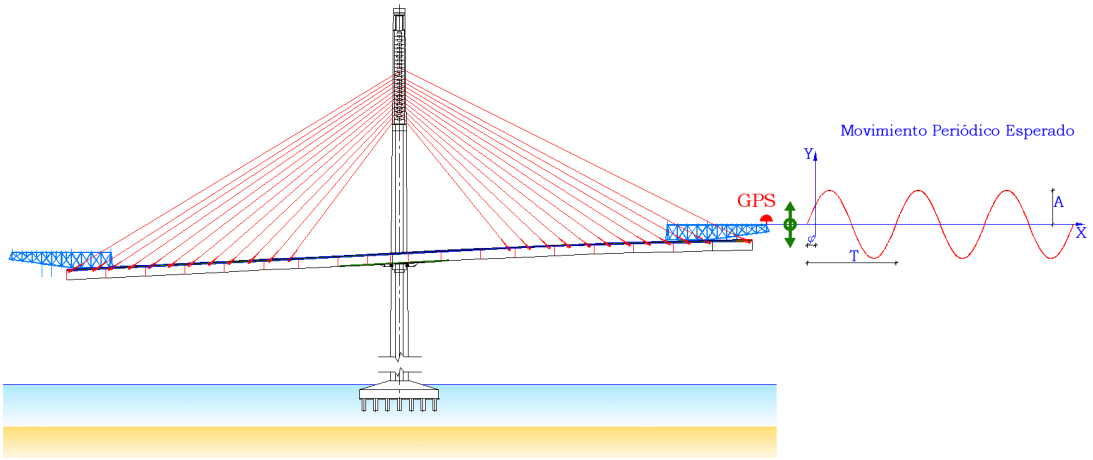


Figura IV.43.- Movimiento esperado en la punta de avance.

Tradicionalmente, este tipo de estudios dinámicos se realiza a partir de los datos observados con acelerómetros, midiendo por tanto aceleraciones. Ambas magnitudes,

desplazamientos y aceleraciones, son equivalentes a través de las leyes de Newton, pudiendo ser más ventajoso la lectura de desplazamientos para evitar así el error que produce la doble integración necesaria si se parte de las aceleraciones.

Como ya se ha comentado anteriormente, las estructuras vibran de forma continua según frecuencias y formas modales conocidas, y éstas se pueden obtener a partir de las medidas que se realicen.

De esta manera, es necesario el tratamiento de estos datos obtenidos, desplazamientos, para comprobar si son válidos para obtener las características dinámicas del tablero, siendo necesario para ello realizar en los siguientes apartados un análisis que parta del dominio del tiempo y vaya al dominio de la frecuencia para poder realizar el contraste oportuno con el modelo de cálculo obtenido del puente en idénticas situaciones.

Cumplidas estas premisas, se pasa en primer lugar a la representación de los datos obtenidos para comprobar, en el dominio del tiempo, si se trata de una función periódica, como cabría esperar según el esquema esperado y representado en la figura anterior.

3.7.3.- Procesado de los datos de campo en el dominio del tiempo.

De las observaciones GPS realizadas el día 27 desde las 10:33:18 hasta las 12:21:03, se obtienen un total de 4.861 observaciones, tomadas a intervalos de un segundo, siendo las características de la observación las siguientes [dovela P-12 (losa 11-D)].

Hora de inicio: 10:33:18

Hora de finalización: 12:21:03

Número de datos observados: 4.861 observaciones.

Intervalo entre observaciones: 1 segundo.

Estas observaciones, se pueden representar en un diagrama cartesiano, en el que la coordenada z obtenida por el GPS se enfrenta al tiempo en dicho diagrama, de forma que se pueda realizar un análisis inicial.

De esta manera se obtiene el gráfico que se puede ver a continuación, como serie discreta de las 4.861 observaciones obtenidas:

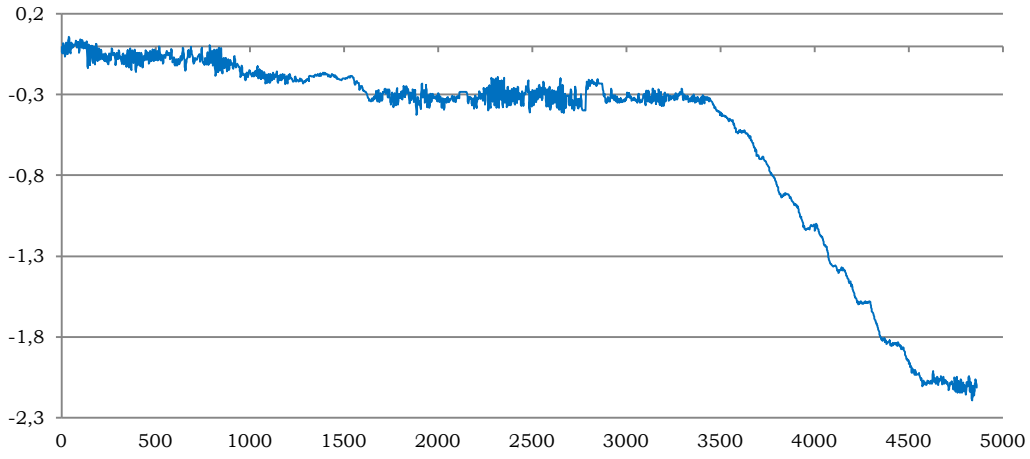


Figura IV.44.- Cota relativa de la punta de lanzamiento a lo largo del tiempo.

A la vista del gráfico, se pueden ver cinco zonas perfectamente diferenciadas, que habrá que analizar por separado, zonas que a grandes rasgos se podrían resumir:

- Zona 1: Desde el inicio hasta la época 11:05:49, correspondiente a 1.280 observaciones, donde parece que el movimiento en la punta del tablero es libre y por tanto el de la frecuencia natural, salvo actuaciones puntuales, debidas a diferentes operaciones que se dan en la obra, como pueden ser la llegada puntual de camiones, grúas, colocación de ferralla, hormigonados, ráfagas de viento, etc.
- Zona 2: Desde la época 11:05:51 hasta la época 11:13:08, donde sus 256 observaciones muestran movimientos de la cabeza heterogéneos, debido a fuerzas externas sobre la cabeza, como pudieran ser tesado de tirantes, ráfagas de viento, etc., que hacen que la cabeza no vibra de forma natural.
- Zona 3: Desde la época 11:13:10 hasta la época 11:51:47, donde sus 1792 puntos muestran un comportamiento similar al expresado en la zona 1.
- Zona 4: Desde la época 11:51:48 hasta la época 12:1540, 1152 observaciones donde se aprecia que la cabeza del tablero sufre un descenso acusado del entorno de los 2 metros, producido seguramente por el izado de la siguiente dovela situada en la barcaza.
- Zona 5: Desde la época 12:16:08 hasta la época 12:21:03, 256 observaciones que son suficientes para, que una vez que la dovela se ha independizado de la barcaza y es solidaria con el puente, vuelve a un movimiento oscilatorio homogéneo.

De forma resumida, estos tramos comentados se puede ver en la siguiente tabla:

ZONIFICACIÓN PARA ANÁLISIS DE DATOS				
Zona	**Epoca inicial**	**Epoca final**	**Cota media**	**nº datos**
Zona 1	10:33:18	11:05:49	84,113	1280
Zona 2	11:05:51	11:13:08	84,017	256
Zona 3	11:13:10	11:51:47	83,895	1792
Zona 4	11:51:48	12:15:40	82,998	1152
Zona 5	12:16:08	12:21:03	82,114	256

Tabla IV.39.- Zonificación de observables discretos GPS.

De este modo, el análisis de los datos habrá que realizarlo por zonas de forma independiente, sacando el periodo fundamental en cada una de ellas y en los casos en los que no haya fuerzas externas puntuales que lo alteren, es decir, en la zona 1, en la zona 3 y en la zona 5, comprobar, si el periodo es similar al obtenido en el modelo y si éste vuelve a ser el mismo cuando dejan de actuar las fuerzas externas forzadas sobre el tablero ya que como se ha explicado en el capítulo III, en una estructura es muy importante tener en cuenta que el periodo es intrínseco a ella y que independientemente de la amplitud, el periodo siempre es constante, de aquí que el periodo es un dato muy potente que va a permitir realizar un Análisis Modal Operacional en fase de construcción para estructuras evolutivas, a partir de la excitación ambiental, en concreto el viento, a través de una auscultación con GPS, y con el objetivo de identificar sus parámetros modales (formas modales, frecuencias naturales y amortiguamiento) y así poder contrastar la bondad del modelo con la que se está ejecutando la obra en cuanto a sus principales parámetros estructurales. Todo ello gracias a tratar con estructuras evolutivas, es decir, una estructura que se va construyendo por fases, fases en la que la flexibilidad es alta.

3.7.3.1.- Análisis en el dominio del tiempo de la Zona 1.

Con el objetivo de acotar adecuadamente los datos que no están sometidos a fuerzas externas en la Zona 1, y con el objeto del posterior análisis con el algoritmo adecuado que como se verá tendrá que contar con conjuntos de datos que cumplan 2^n, se han

cogido conjuntos de datos correlativos de datos de 128 observaciones [2^7], de la que se puede obtener la siguiente tabla con una subzonificación dentro de la zona 1.

SUBZONIFICACIÓN PARA ANÁLISIS DE DATOS DE LA ZONA 1

Zona	Epoca inicial	Epoca final	Cota media	nº datos
Zona 1-1	10:33:18	10:35:44	84,209	128
Zona 1-1	10:35:45	10:46:17	84,155	128
Zona 1-1	10:46:18	10:48:39	84,139	128
Zona 1-1	10:48:41	10:51:02	84,139	128
Zona 1-1	10:51:04	10:53:27	84,136	128
Zona 1-2	10:53:27	10:55:49	84,138	128
Zona 1-3	10:55:50	10:58:10	84,119	128
Zona 1-4	10:58:12	11:00:33	84,061	128
Zona 1-5	11:00:34	11:02:55	84,025	128
Zona 1-5	11:02:57	11:05:49	84,006	128

Tabla IV.40.- Subzonificación de Zona 1 de observables discretos GPS .

Si se representan los datos correspondientes a la zona 1-1, limitando a 512 datos, 2^9, por condicionante del algoritmo, se obtiene una gráfica homogénea. En concreto corresponde a datos las 10:33:18 hasta las 10:51:02.

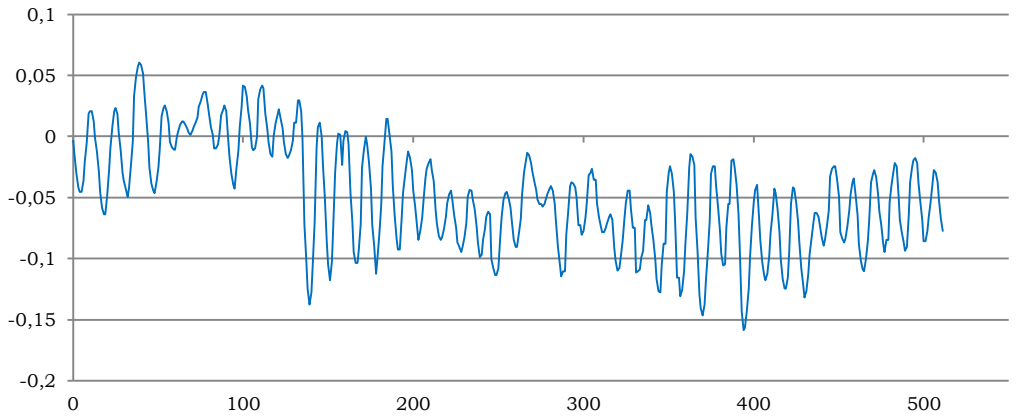


Figura IV.45.- Serie temporal desde las 10:33:18 hasta las 10:51:02 del día 24/09/14.

Que si se cogen de esta gráfica las últimas 128 observaciones se obtiene, correspondientes al último tramo de la zona 1-1 se obtiene la siguiente gráfica, igualmente homogénea:

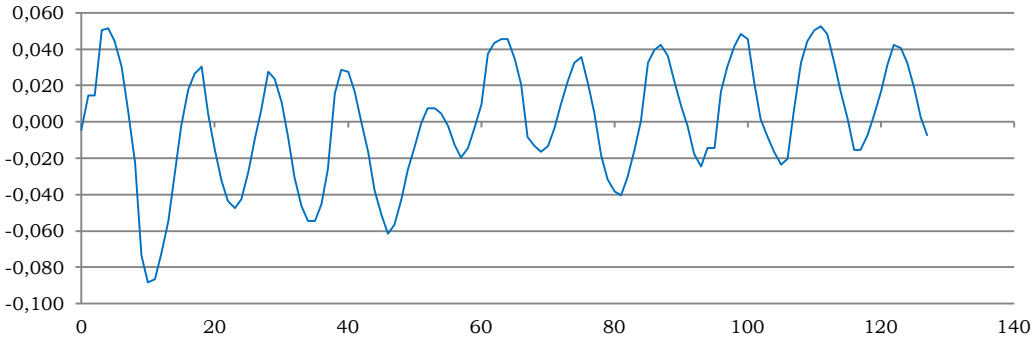


Figura IV.46.- Serie temporal desde las 10:48:41 hasta las 10:51:02 del día 24/09/14.

Posteriormente desde las 10:53:27 hasta las 10:55:49 viene una zona que gráficamente se puede ver en la siguiente gráfica:

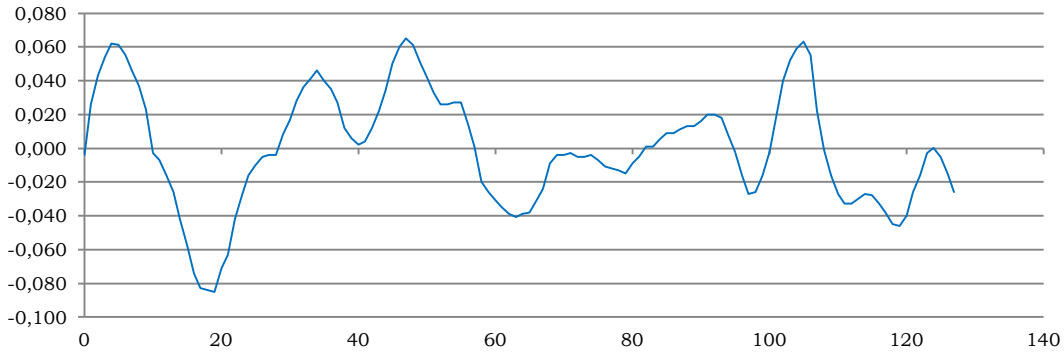


Figura IV.47.- Serie temporal desde las 10:53:27 hasta las 10:55:49 del día 24/09/14.

Esta zona 1-2, por algunos de los motivos expuestos anteriormente es heterogénea y por lo tanto no habrá de ser considerada para considerar sus posibles conclusiones en el campo de la frecuencia.

La siguiente zona 1-3, vuelve a guardar homogeneidad, en concreto entre la época 10:55:50 y la 10:58:10, como se puede ver en la gráfica siguiente:

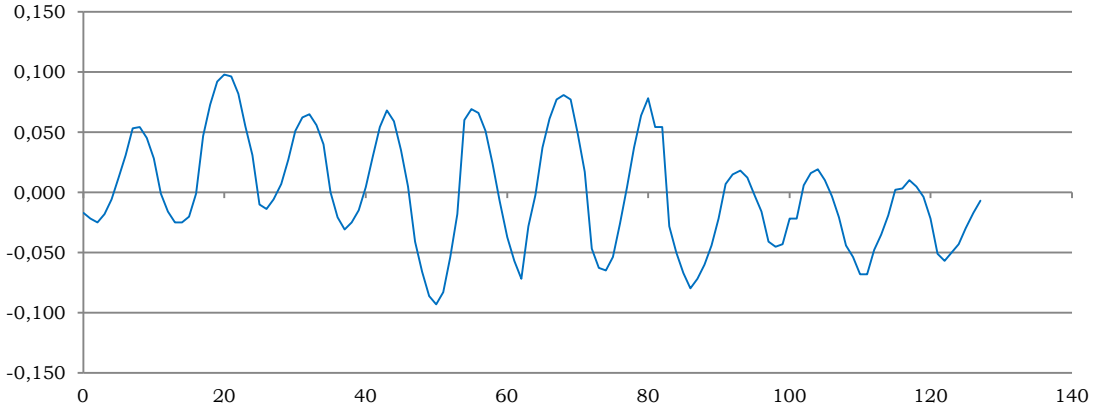


Figura IV.48.- Serie temporal desde las 10:55:50 hasta las 10:58:10 del día 24/09/14.

De nuevo en la siguiente época se vuelve heterogénea, zona 1-4, 10:58:12 a 11:00:33:

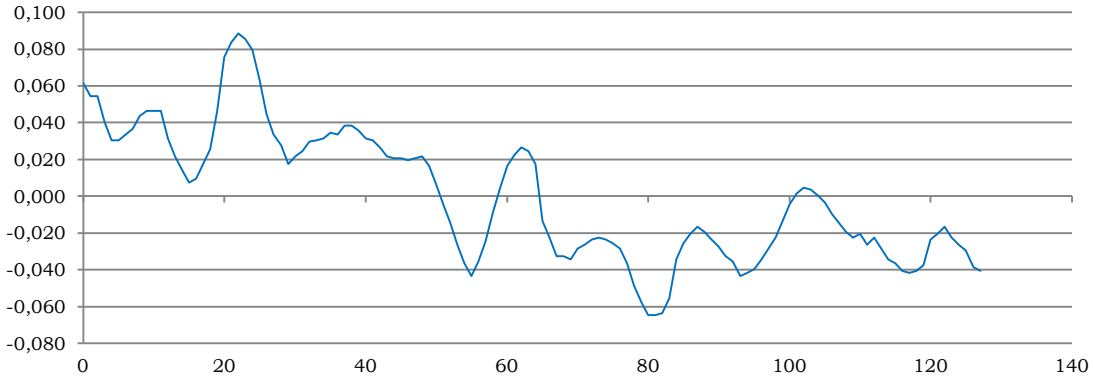


Figura IV.49.- Serie temporal desde las 10:58:12 hasta las 11:00:33 del día 24/09/14.

Para finalmente acabar el tramo con una zona homogénea, zona 1-5, desde la época 11:00:34 a la época 11:05:59:

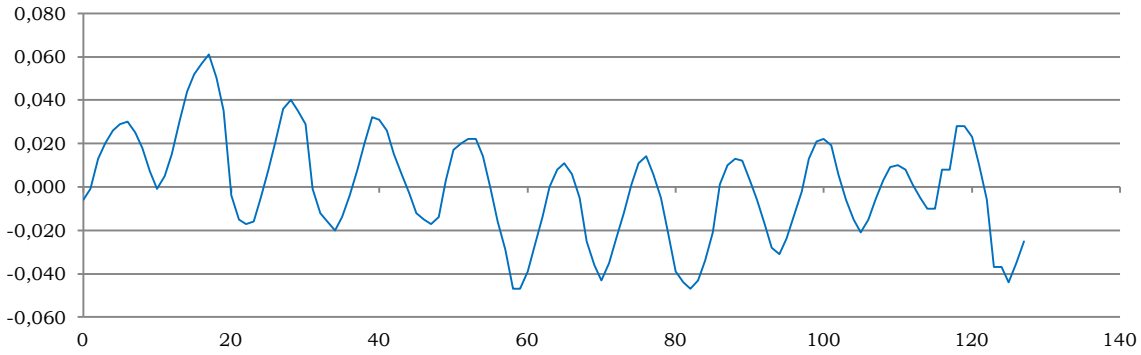


Figura IV.50.- Serie temporal desde las 11:00:34 hasta las 11:05:59 del día 24/09/14.

De este modo, dentro de la Zona 1, se pueden subdividir cinco zonas en los que lógicamente se obtendrán resultados diferentes. Ahora bien la tendencia a primera vista del gráfico, muestra el cabeceo del tablero típico de una onda sinusoidal, donde están incluidas en la representación todas las frecuencias, siendo la principal la del voladizo. Este análisis se realizará sólo para las zonas homogéneas.

3.7.3.2.- Análisis en el dominio del tiempo de la Zona 3.

Con el mismo objetivo marcado en la Zona 1, en esta zona se puede ver en la siguiente tabla la subzonificación:

SUBZONIFICACIÓN PARA ANÁLISIS DE DATOS DE LA ZONA 3

Zona	Epoca inicial	Epoca final	Cota media	nº datos
Zona 3-1	11:13:10	11:15:35	83,898	128
Zona 3-1	11:15:36	11:18:00	83,899	128
Zona 3-1	11:18:02	11:20:27	83,882	128
Zona 3-2	11:20:29	11:22:53	83,897	128
Zona 3-3	11:22:54	11:26:28	83,894	128
Zona 3-3	11:26:29	11:29:06	83,910	128
Zona 3-3	11:29:08	11:31:45	83,905	128
Zona 3-3	11:31:46	11:34:15	83,890	128
Zona 3-4	11:34:15	11:37:42	83,884	128
Zona 3-4	11:37:44	11:41:19	83,932	128
Zona 3-5	11:41:20	11:43:58	83,881	128
Zona 3-5	11:44:22	11:47:00	83,891	128
Zona 3-5	11:47:00	11:49:36	83,895	128
Zona 3-5	11:49:09	11:51:47	83,878	128

Tabla IV.41.- Subzonificación de Zona 3 de observables discretos GPS .

Haciendo el mismo análisis, pero sin presentar las gráficas por no hacer el documento extremadamente extenso encontrándose las mismas en la documentación en soporte informático adjunto a este documento, se pueden dar como subzonas homogéneas la 3-1, 3-3 y 3-5.

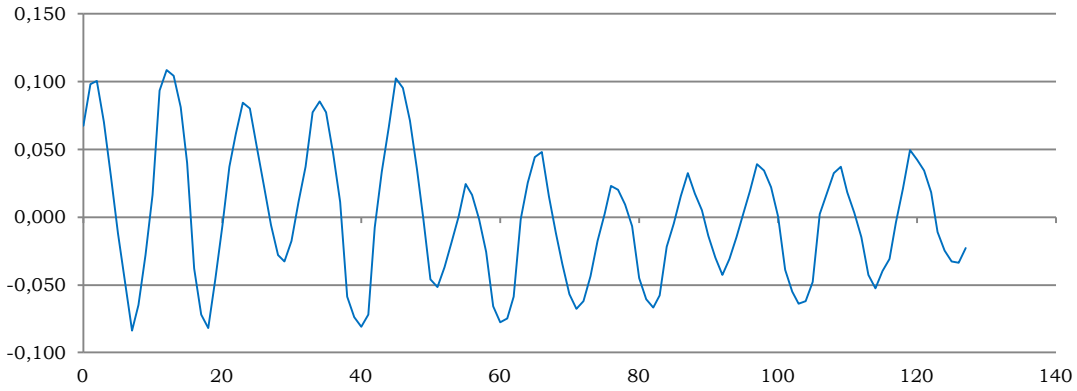


Figura IV.51.- Serie temporal desde las 10:26:29 hasta las 11:29:06 del día 24/09/14.

3.7.3.3.- Análisis en el dominio del tiempo de la Zona 5.

Del mismo modo en la Zona 5 se obtiene la siguiente tabla, completamente homogénea:

SUBZONIFICACIÓN PARA ANÁLISIS DE DATOS DE LA ZONA 5

Zona	Epoca inicial	Epoca final	Cota media	nº datos
Zona 5-1	12:16:08	12:18:47	3:05:35	128
Zona 5-1	12:18:24	12:21:03	2:24:07	128

Tabla IV.42.- Subzonificación de Zona 5 de observables discretos GPS .

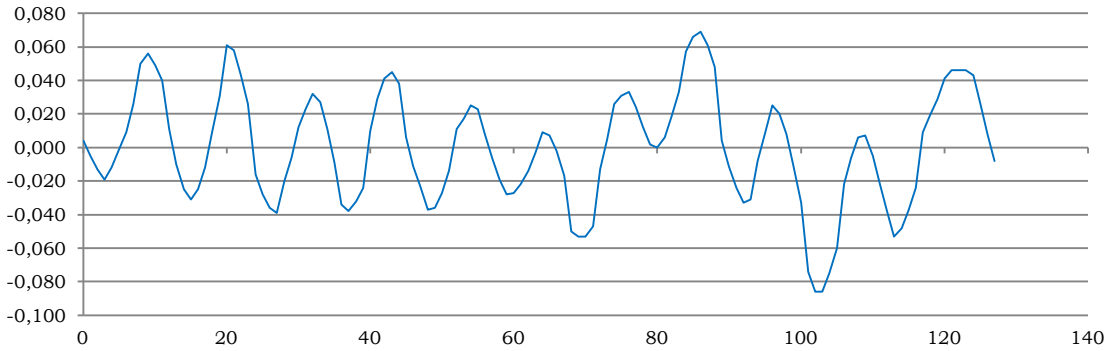


Figura IV.52.- Serie temporal desde las 12:18:24 hasta las 12:21:03 del día 24/09/14.

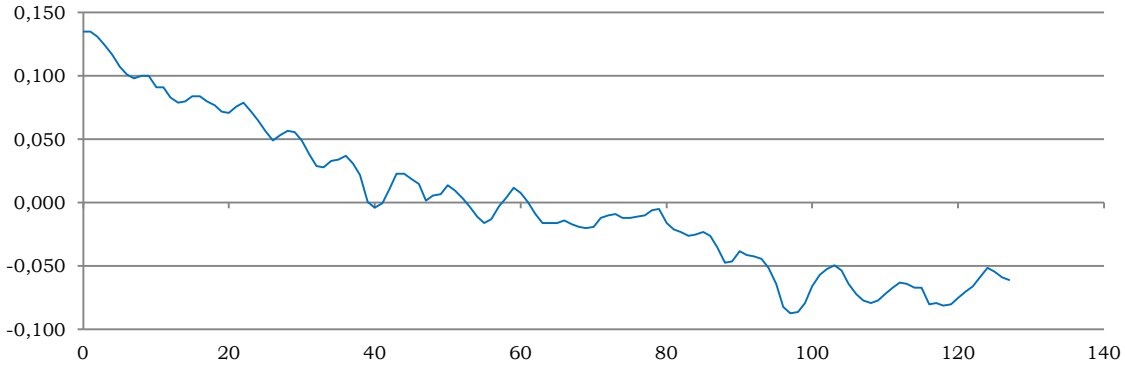


Figura IV.53.- Serie temporal desde las 12:13:01 hasta las 12:15:40 del día 24/09/14.

3.7.4.- Transformación de los datos al dominio de la frecuencia.

3.7.4.1.- Introducción.

La transformación al dominio de la frecuencia, tal y como se explicó en (Cap. III – Apdo.[4.4]), el dominio de la frecuencia, descompone el movimiento periódico del frente del tablero en sus frecuencias fundamentales.

El significado de un dominio al otro se entiende adecuadamente, en la siguiente figura que se repite de la ya expuesta en el anterior capítulo.

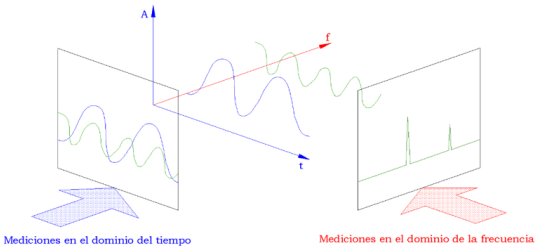


Figura IV.54.- Significado del dominio temporal y la frecuencia.

Y el paso de uno a otro dominio se realiza a través de la Transformada de Fourier, que obtiene la información frecuencial de una función conocida a lo largo del tiempo, como es el caso de esta tesis, en la que se conoce la variación de la posición en cota del frente de avance a lo largo del tiempo.

3.7.4.2.- Análisis espectral de las series de datos discretas obtenidas.

Los datos obtenidos mediante observación GPS corresponden a un registro de datos discreto en la punta de avance obtenidos a intervalos iguales Δt.

$$\Delta t = 1\ segundo$$

De esta forma el periodo de muestreo T_s coincide con Δt

$$\Delta t = T_s = 1\ segundo$$

y por lo tanto la frecuencia de muestreo:

$$f_s = \frac{1}{T_s} = 1\ segundo^{-1}$$

Con estas premisas, en el intervalo considerado, se puede definir con los datos obtenidos una función continua de N datos en un intervalo finito, repitiendo aquí lo expresado en (Cap. 3 – Apdo.[4.4.4]) dada la importancia que tiene este tratamiento adecuado de los datos en el presente capítulo.

$$\eta(t) = [\eta(t_1), \eta(t_2), \eta(t_3), \dots, \eta(t_N)]$$

siendo los instantes de toma de datos

$$t = [t_1, t_2, t_3, \dots, t_n]$$

Con los condicionantes expresados para [III.237], $\eta(t)$ se puede expresar como

$$\eta(t) \approx \sum_{n=-\frac{N}{2}}^{+\frac{N}{2}} d_n e^{i\omega_n t} = a_0 + \sum_{n=1}^{+\frac{N}{2}} [a_n \cos(\omega_n t) + b_n \sin(\omega_n t)]$$

donde:

$$a_0 = \frac{1}{N\Delta t} \sum_{j=1}^{N} \Delta t\ \eta_{t_j}$$

$$a_n = \frac{2}{N\Delta t}\sum_{j=1}^{N} \Delta t\ \eta_{t_j}\ \cos\left(\frac{2\pi jn}{N}\right)$$

$$b_n = \frac{2}{N\Delta t}\sum_{j=1}^{N} \Delta t\ \eta_{t_j}\ \sin\left(\frac{2\pi jn}{N}\right)$$

Dentro de la serie de datos, el periodo mínimo y máximo detectable vendrá a través de las siguientes expresiones:

$$T_{min} \Longrightarrow \frac{1}{2\Delta t} = \frac{N}{2(t_N - t_1)} = f_{máx}$$

$$T_{máx} \Longrightarrow \frac{1}{(t_N - t_1)} = f_{mín}$$

Y cada frecuencia se da para:

$$\omega_n = \frac{2\pi n}{t_N - t_1}\ para\ n \in \left[1, \frac{N}{2}\right]$$

El objetivo se fijó en obtener el espectro de energía, y tomando la ecuación [III.245], se llega a la transformada rápida de Fourier.

$$\eta(t_j) = \sum_{n=-\frac{N}{2}}^{+\frac{N}{2}} d_n e^{\frac{inj}{N}}$$

En esta expresión se puede diferenciar las frecuencias positivas de las negativas de forma que:

$$\eta(t_j) = d_0 + \sum_{n=1}^{+\frac{N}{2}} d_n e^{\frac{inj}{N}} + \sum_{n=-\frac{N}{2}}^{-1} d_n e^{\frac{inj}{N}}$$

Si se sustituye n por $-n$ no se pierde de nuevo ningún tipo de generalidad resultando:

$$\eta(t_j) = d_0 + \sum_{n=1}^{+\frac{N}{2}} d_n e^{\frac{inj}{N}} + \sum_{n=1}^{+\frac{N}{2}} d_{-n} e^{-\frac{inj}{N}}$$

Reemplazando n por $(N - n)$

$$\eta(t_j) = d_0 + \sum_{n=1}^{+\frac{N}{2}} d_n e^{\frac{inj}{N}} + \sum_{n=\frac{N}{2}}^{N-1} d_{n-N} e^{-\frac{i(N-n)j}{N}}$$

Dado que j es un número entero, de las propiedades de los números complejos, se tiene que:

$$e^{-\frac{i(N-n)j}{N}} = e^{\frac{i-nj}{N}}$$

Y por tanto:

$$\eta(t_j) = \sum_{n=0}^{N-1} h_n e^{\frac{inj}{N}}$$

siendo:

$$h_n = \begin{cases} d_n & si\ n \in \left[1, \frac{N}{2} - 1\right] \\ a_0 & si\ n = 0 \\ a_{\frac{N}{2}} & si\ n = \frac{N}{2} \\ d_{n-N} & si\ n \in \left[\frac{N}{2} - 1, N - 1\right] \end{cases}$$

3.7.4.3.- La transformada de Fourier con Microsoft Excel.

En el apartado anterior, a partir de los datos obtenidos con las observaciones GPS, se han representado las cotas en el eje Y, a lo largo del tiempo, representado en el eje X. A partir de estos datos, representados en el dominio del tiempo, se pretende pasar al dominio de la frecuencia mediante la transformada rápida de Fourier.

Esta transformación se puede realizar con un algoritmo implementado en Microsoft Excel, que se explica de forma detallada en los siguientes pasos, para de forma ordenada poder obtener los datos adecuados:

A.- Habilitación del complemento adecuado.

Para poder utilizar este algoritmo debe estar habilitado, y por tanto instalar el complemento adecuado para ello en las Herramienta en Análisis de Datos.

B.- Etiquetado de columnas

Las observaciones obtenidas se deben poner en columnas, siendo la primera la correspondiente al tiempo, y la segunda la de los datos obtenidos, que en este caso corresponde a la cota (z) medida por el GPS en cada instante en el frente de avance.

El resto de columnas que van a ser necesarias a medida que se vayan tratando los datos son la frecuencia FFT, la magnitud FFT y número complejo FFT, obteniendo por tanto un total de cinco columnas.

A: Time

B: Data

C: FFT frecuencia

D: FFT magnitud

E: FFT complejo

C.- Los datos a importar, determinación de la frecuencia de muestreo y ajuste del número de muestras.

Los datos obtenidos con el control GPS, en cuanto a la cota del tablero, se deben introducir en la columna B: data, siendo D el número de datos totales observados, que en este caso se tiene:

Día 27/09/14: 4.861 datos -> D=4.861

El intervalo de tiempo entre datos consecutivos es de 1 segundo, con lo que el tiempo t en segundos de lectura es en este caso t= D x 1 segundo = D segundos

por lo tanto la frecuencia de muestreo:

$$f_s = \frac{D}{t} = 1\ dato/segundo$$

El uso de la herramienta implementada en Microsoft Excel para la obtención de la transformada de Fourier, tiene la limitación de que el número de datos tratados debe ser potencia de dos, es decir, 2^n siendo $n \in [1,2,3,4,\dots]$, de forma que generalmente habrá mayor precisión a mayor valor del número n.

Al número de datos se le denomina *sa* que en este caso, para los datos del ejemplo con los datos obtenidos en este día es:

$$sa = 1024$$

D.- Determinación del número complejo FFT Complejo

Para ello es necesario utilizar el algoritmo de Microsoft Excel con los siguientes pasos:

Datos ⟹ Análisis de Datos

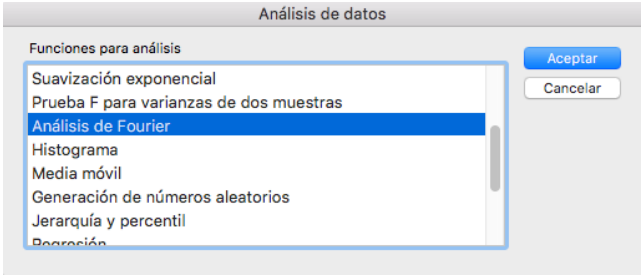


Imagen IV.43.- Selección del Análisis de Fourier en Excel.

Seleccionando el rango de datos que se pretende estudiar, en un número 2^n, de forma que se obtenga mediante el algoritmo la transformada de Fourier correspondiente, que es un número complejo asociado a cada cota cota del tablero obtenida en la observación.

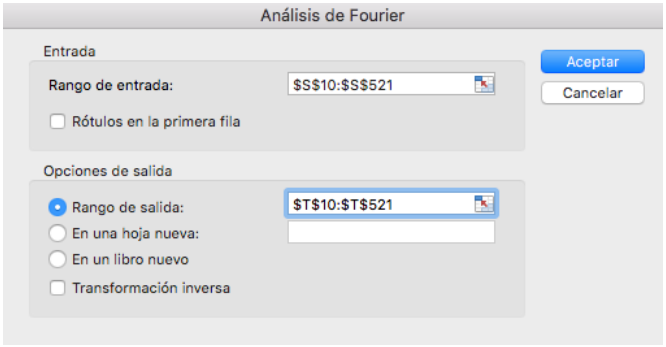


Imagen IV.44.- Selección del rango de entrada y salida para análisis de Fourier en Excel.

El rango de salida se puede seleccionar, siendo en este caso en una columna al lado de los datos iniciales.

Los datos tipo obtenidos una vez aplicado el algoritmo son los que se adjuntan en la siguiente tabla:

Elevación	Transformada Fourier
-0,005554688	0,687211698542176+0,17633980507959i
0,018445312	0,306628690746075+0,341121800460852i
0,020445312	-2,02073773401911E-002-0,872274072107332i
0,020445312	-1,06700640474259+0,783382596109652i
0,012445312	-2,64916838739672E-003+0,170833987202914i
-0,001554688	0,906345124207238+0,5264832866878O1i
-0,012554688	-0,305849618439517-1,87803717621681i

Tabla IV.43.- Datos obtenidos al aplicar la transformada de Fourier con Excel.

E.- Determinación del módulo del número complejo FFT magnitud.

En el siguiente paso se calcula el módulo del número complejo, al cual hay que afectarle de un coeficiente de valor $\frac{2}{as}$, ya que los números complejos obtenidos están

expresado en forma polar afectados por este coeficiente, por tanto el módulo se calcula conforme a:

=2/as*IM.ABS(E2)

Módulo
0,002771389
0,00179171
0,003408235
0,005170717
0,0006674
0,004094388
0,00743273

Tabla IV.44.- Determinación del módulo del número complejo obtenido.

F.- Determinación de la frecuencia FFT frecuencia.

Para ello hay que hacer las siguientes consideraciones:

- La primera celda de la frecuencia debe ser siempre 0.
- La segunda celda de FFT frecuencia es: 1 * fs / sa
- La tercera celda 2 * fs/sa
- Y así seguido …

Frecuencia
0,01171875
0,013671875
0,015625
0,017578125
0,01953125
0,021484375
0,0234375

Tabla IV.45.- Determinación de la frecuencia.

El esquema general por tanto queda del siguiente modo:

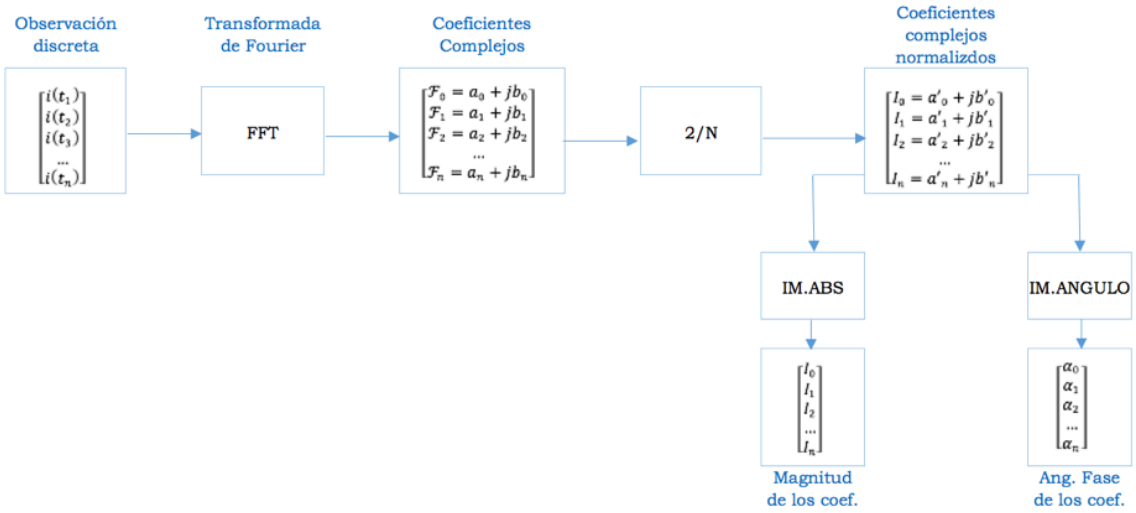


Figura IV.55.- Esquema del proceso general para obtención de la frecuencia.

3.7.4.4.- Procesado de los datos de campo en el dominio de la frecuencia.

Igualmente se ha explicado la formulación matemática para transformar datos de series temporales desde el domino del tiempo al domino de la frecuencia, a través de la transformada de Fourier.

En (Cap. III – Apdo.[3.7.3]) se ha llegado a que los datos se pueden dividir claramente en tres zonas exentas de fuerzas externas y que por tanto pueden considerarse dentro de los parámetros explicados para el OMA.

El siguiente paso por tanto será, a partir del algoritmo explicado en el apartado anterior, analizar por zonas las frecuencias obtenidas para su posterior contraste con el obtenido de los modelos de cálculo del puente.

El proceso del análisis se va a realizar sobre los periodos de tiempo marcados en (Cap. III – Apdo.[3.7.3]) que se han determinado como homogéneos, y que a continuación se resume:

ZONAS HOMOGÉNEAS DE ESTUDIO

Zona	Epoca inicial	Epoca final
Zona 1-1	10:33:18	10:35:44
Zona 1-1	10:35:45	10:46:17
Zona 1-1	10:46:18	10:48:39
Zona 1-1	10:48:41	10:51:02
Zona 1-1	10:51:04	10:53:27
Zona 1-2	10:53:27	10:55:49
Zona 1-3	10:55:50	10:58:10
Zona 1-4	10:58:12	11:00:33
Zona 1-5	11:00:34	11:02:55
Zona 1-5	11:02:57	11:05:49
Zona 3-1	11:13:10	11:15:35
Zona 3-1	11:15:36	11:18:00
Zona 3-1	11:18:02	11:20:27
Zona 3-2	11:20:29	11:22:53
Zona 3-3	11:22:54	11:26:28
Zona 3-3	11:26:29	11:29:06
Zona 3-3	11:29:08	11:31:45
Zona 3-3	11:31:46	11:34:15
Zona 3-4	11:34:15	11:37:42
Zona 3-4	11:37:44	11:41:19
Zona 3-5	11:41:20	11:43:58
Zona 3-5	11:44:22	11:47:00
Zona 3-5	11:47:00	11:49:36
Zona 3-5	11:49:09	11:51:47
Zona 5-1	12:16:08	12:18:47
Zona 5-1	12:18:24	12:21:03

Tabla IV.46.- Zonas homogéneas de estudio.

A.- Análisis en el dominio de la frecuencia de la Zona 1.

ANALISIS DE FOURIER PARA SERIE DISCRETA DE DATOS

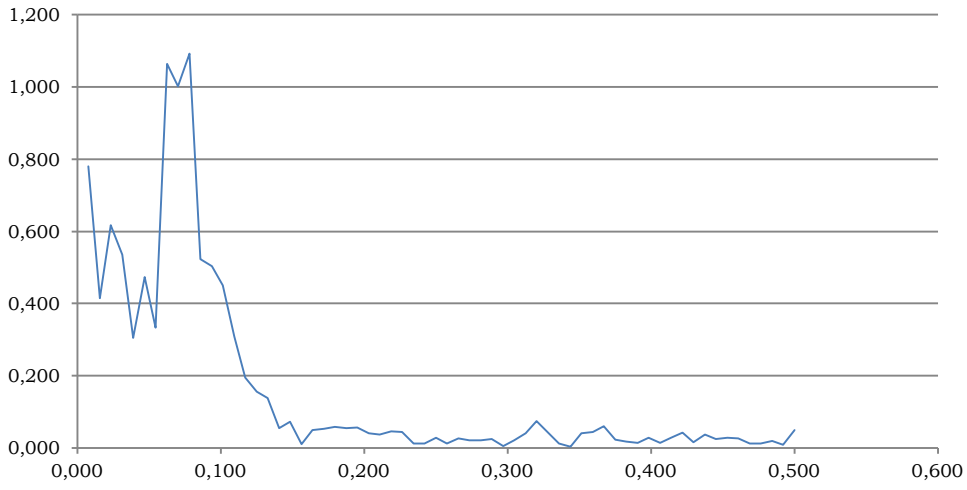
Numero de datos de la serie: 128
Media aritmética de la serie: 84,209
Fecha: 27/9/14

Frecuencia:	**0,078**	**Hz**
Período:	**12,8**	**seg**

Epoca inicial: 10:33:18
Epoca final: 10:35:44

Tiempo	Epoca	Serie	Elevación	Transformada Fourier	Frecuencia	Módulo	Periodo
0	10:33:18	84,205	-0,004	0	0,000	0,000	
1	10:33:20	84,193	-0,016	-0,537967+0,564347i	0,008	0,780	128,000
2	10:33:20	84,178	-0,031	-0,084609+0,405434i	0,016	0,414	64,000
3	10:33:22	84,167	-0,042	-0,002291+0,618003i	0,023	0,618	42,667
4	10:33:22	84,163	-0,046	-0,184062-0,503246i	0,031	0,536	32,000
5	10:33:22	84,163	-0,046	-0,240348-0,187093i	0,039	0,305	25,600
6	10:33:25	84,172	-0,037	-0,009303+0,472813i	0,047	0,473	21,333
7	10:33:25	84,188	-0,021	-0,045721-0,330851i	0,055	0,334	18,286
8	10:33:26	84,203	-0,006	-1,043988+0,205610i	0,063	1,064	16,000
9	10:33:27	84,227	0,018	0,156484+0,989874i	0,070	1,002	14,222
10	10:33:28	84,229	0,020	1,030022+0,363128i	0,078	1,092	12,800
11	10:33:29	84,229	0,020	-0,489550+0,185011i	0,086	0,523	11,636
12	10:33:31	84,221	0,012	-0,144416-0,482020i	0,094	0,503	10,667
13	10:33:31	84,207	-0,002	0,110829-0,437459i	0,102	0,451	9,846
14	10:33:33	84,196	-0,013	0,309229-0,009226i	0,109	0,309	9,143
15	10:33:33	84,180	-0,029	0,136328-0,140627i	0,117	0,196	8,533
16	10:33:34	84,163	-0,046	0,147903+0,047234i	0,125	0,155	8,000
17	10:33:36	84,150	-0,059	0,137578-0,004347i	0,133	0,138	7,529
18	10:33:36	84,145	-0,064	-0,001479-0,054204i	0,141	0,054	7,111
19	10:33:36	84,145	-0,064	-0,008441-0,071951i	0,148	0,072	6,737
20	10:33:39	84,160	-0,049	0,009740-0,004826i	0,156	0,011	6,400
21	10:33:39	84,181	-0,028	0,047054+0,018049i	0,164	0,050	6,095
22	10:33:40	84,199	-0,010	0,023436-0,046925i	0,172	0,052	5,818
23	10:33:42	84,216	0,007	-0,017428+0,056046i	0,180	0,059	5,565
24	10:33:42	84,229	0,020	0,024269+0,049480i	0,188	0,055	5,333
25	10:33:43	84,232	0,023	0,038436-0,042008i	0,195	0,057	5,120

FRECUENCIA - AMPLITUD



ANALISIS DE FOURIER PARA SERIE DISCRETA DE DATOS

Numero de datos de la serie: 128

Media aritmética de la serie: 84,155

Fecha: 27/9/14

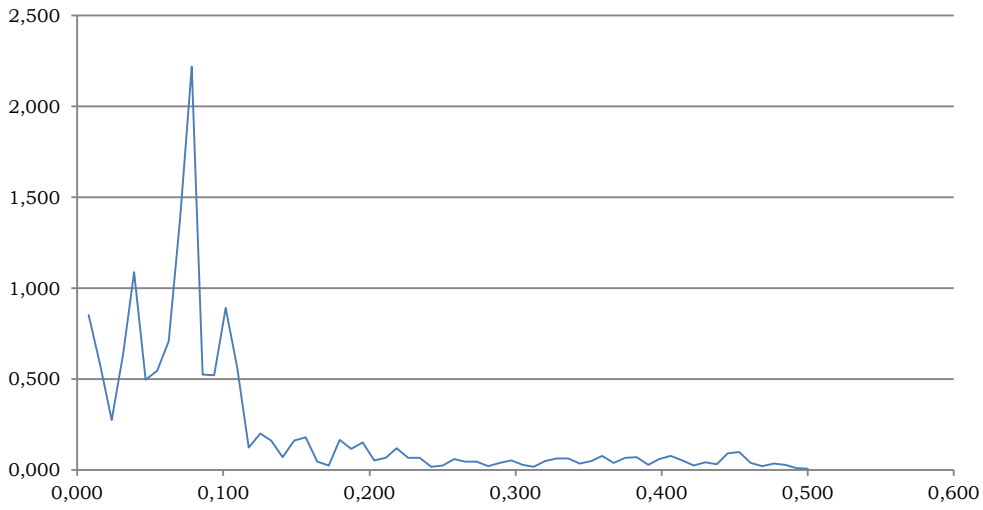
Frecuencia:	**0,078**	**Hz**
Período:	**12,8**	**seg**

Epoca inicial: 10:35:45

Epoca final: 10:46:17

Tiempo	Epoca	Serie	Elevación	Transformada Fourier	Frecuencia	Módulo	Periodo
0	10:35:45	84,1971	0,042	0	0,000	0,000	
1	10:35:46	84,2051	0,050	-0,377249-0,765598i	0,008	0,853	128,000
2	10:35:48	84,2201	0,065	0,319877-0,482628i	0,016	0,579	64,000
3	10:43:18	84,2201	0,065	0,266662-0,064026i	0,023	0,274	42,667
4	10:43:19	84,2381	0,083	0,625614-0,143592i	0,031	0,642	32,000
5	10:43:20	84,2381	0,083	0,739219-0,798017i	0,039	1,088	25,600
6	10:43:21	84,2291	0,074	0,392114-0,302891i	0,047	0,495	21,333
7	10:43:22	84,2071	0,052	0,511704-0,195635i	0,055	0,548	18,286
8	10:43:24	84,1371	-0,018	0,685743-0,177628i	0,063	0,708	16,000
9	10:43:25	84,1071	-0,048	0,999750-0,964428i	0,070	1,389	14,222
10	10:43:26	84,0841	-0,071	-1,445734-1,681944i	0,078	2,218	12,800
11	10:43:27	84,0711	-0,084	0,354672+0,386069i	0,086	0,524	11,636
12	10:43:28	84,0811	-0,074	-0,507523+0,114739i	0,094	0,520	10,667
13	10:43:29	84,1031	-0,052	-0,499799+0,736155i	0,102	0,890	9,846
14	10:43:30	84,1381	-0,017	0,005338+0,563333i	0,109	0,563	9,143
15	10:43:32	84,1991	0,044	0,115095+0,041221i	0,117	0,122	8,533
16	10:43:33	84,2161	0,061	-0,142033-0,144548i	0,125	0,203	8,000
17	10:43:34	84,2201	0,065	-0,161090+0,013195i	0,133	0,162	7,529
18	10:43:35	84,2091	0,054	0,020421+0,069322i	0,141	0,072	7,111
19	10:43:36	84,1851	0,030	0,160126-0,022566i	0,148	0,162	6,737
20	10:43:37	84,1581	0,003	0,036649-0,176095i	0,156	0,180	6,400
21	10:43:39	84,1221	-0,033	-0,023329-0,039063i	0,164	0,045	6,095
22	10:43:40	84,1041	-0,051	-0,016389+0,019933i	0,172	0,026	5,818
23	10:43:41	84,0911	-0,064	0,132872+0,097666i	0,180	0,165	5,565
24	10:43:42	84,1061	-0,049	0,093688-0,067181i	0,188	0,115	5,333
25	10:43:43	84,1341	-0,021	-0,010068-0,152870i	0,195	0,153	5,120

FRECUENCIA - AMPLITUD



ANALISIS DE FOURIER PARA SERIE DISCRETA DE DATOS

Numero de datos de la serie: 128

Media aritmética de la serie: 84,139

Fecha: 27/9/14

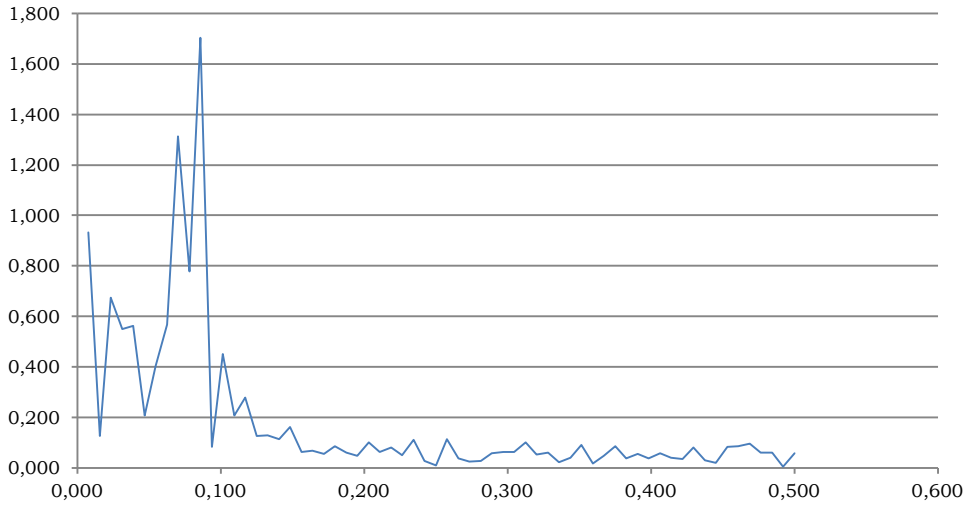
Frecuencia:	**0,086**	**Hz**
Período:	**11,6**	**seg**

Epoca inicial: 10:46:18

Epoca final: 10:48:39

Tiempo	Epoca	Serie	Elevación	Transformada Fourier	Frecuencia	Módulo	Periodo
0	10:46:18	84,1581	0,020	0	0,000	0,000	
1	10:46:19	84,1501	0,012	0,326906-0,874259i	0,008	0,933	128,000
2	10:46:20	84,1391	0,001	0,035947-0,121748i	0,016	0,127	64,000
3	10:46:22	84,1241	-0,014	-0,031779-0,672732i	0,023	0,673	42,667
4	10:46:23	84,1181	-0,020	-0,486805-0,255734i	0,031	0,550	32,000
5	10:46:23	84,1181	-0,020	0,030517+0,562527i	0,039	0,563	25,600
6	10:46:25	84,1291	-0,009	-0,134738+0,159218i	0,047	0,209	21,333
7	10:46:26	84,1411	0,003	0,105354+0,388847i	0,055	0,403	18,286
8	10:46:27	84,1611	0,023	-0,341575+0,455075i	0,063	0,569	16,000
9	10:46:28	84,1791	0,041	-0,806737+1,035622i	0,070	1,313	14,222
10	10:46:29	84,1891	0,051	-0,730550-0,265880i	0,078	0,777	12,800
11	10:46:30	84,1951	0,057	0,783384-1,511269i	0,086	1,702	11,636
12	10:46:32	84,1931	0,055	0,039710-0,074624i	0,094	0,085	10,667
13	10:46:33	84,1871	0,049	0,448540-0,042696i	0,102	0,451	9,846
14	10:46:34	84,1801	0,042	0,195399-0,070163i	0,109	0,208	9,143
15	10:46:35	84,1721	0,034	0,158767-0,228507i	0,117	0,278	8,533
16	10:46:36	84,1651	0,027	0,049243-0,118213i	0,125	0,128	8,000
17	10:46:37	84,1571	0,019	0,082321-0,100005i	0,133	0,130	7,529
18	10:46:38	84,1531	0,015	0,056306-0,100187i	0,141	0,115	7,111
19	10:46:39	84,1531	0,015	0,133679-0,094099i	0,148	0,163	6,737
20	10:46:40	84,1511	0,013	0,051056-0,040116i	0,156	0,065	6,400
21	10:46:42	84,1531	0,015	0,057908+0,037643i	0,164	0,069	6,095
22	10:46:43	84,1571	0,019	-0,019844-0,051940i	0,172	0,056	5,818
23	10:46:44	84,1621	0,024	-0,000043-0,087938i	0,180	0,088	5,565
24	10:46:45	84,1661	0,028	0,046075-0,041774i	0,188	0,062	5,333
25	10:46:46	84,1681	0,030	0,041139-0,028015i	0,195	0,050	5,120

FRECUENCIA - AMPLITUD



ANALISIS DE FOURIER PARA SERIE DISCRETA DE DATOS

Numero de datos de la serie: 128

Media aritmética de la serie: 84,139

Fecha: 27/9/14

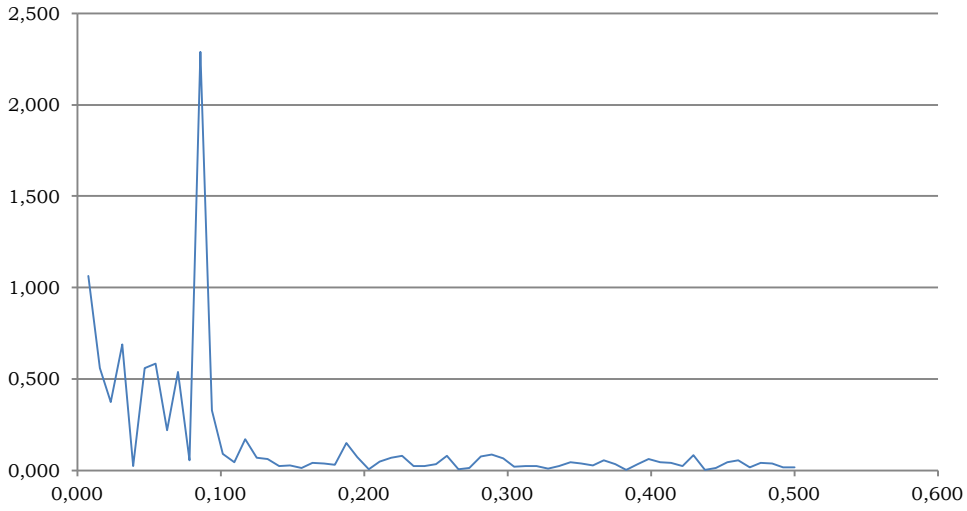
Frecuencia:	**0,086**	**Hz**
Período:	**11,6**	**seg**

Epoca inicial: 10:48:41

Epoca final: 10:51:02

Tiempo	Epoca	Serie	Elevación	Transformada Fourier	Frecuencia	Módulo	Periodo
0	10:48:41	84,1341	-0,004	0	0,000	0,000	
1	10:48:42	84,1531	0,015	0,121277+1,056599i	0,008	1,064	128,000
2	10:48:42	84,1531	0,015	0,415996+0,375282i	0,016	0,560	64,000
3	10:48:44	84,1891	0,051	-0,235241+0,289589i	0,023	0,373	42,667
4	10:48:45	84,1901	0,052	0,640416+0,256976i	0,031	0,690	32,000
5	10:48:46	84,1831	0,045	0,005160-0,023886i	0,039	0,024	25,600
6	10:48:47	84,1691	0,031	0,559155-0,050044i	0,047	0,561	21,333
7	10:48:48	84,1451	0,007	0,483878-0,326074i	0,055	0,583	18,286
8	10:48:49	84,1161	-0,022	0,080813-0,205169i	0,063	0,221	16,000
9	10:48:50	84,0651	-0,073	0,463435-0,272083i	0,070	0,537	14,222
10	10:48:52	84,0501	-0,088	0,008664-0,056552i	0,078	0,057	12,800
11	10:48:53	84,0521	-0,086	-2,194549-0,644718i	0,086	2,287	11,636
12	10:48:54	84,0661	-0,072	-0,298321+0,137722i	0,094	0,329	10,667
13	10:48:55	84,0841	-0,054	-0,090027-0,009940i	0,102	0,091	9,846
14	10:48:56	84,1101	-0,028	-0,032487-0,029453i	0,109	0,044	9,143
15	10:48:57	84,1361	-0,002	-0,155647+0,068551i	0,117	0,170	8,533
16	10:48:58	84,1561	0,018	-0,039355+0,056213i	0,125	0,069	8,000
17	10:48:59	84,1651	0,027	0,003404-0,063435i	0,133	0,064	7,529
18	10:49:00	84,1691	0,031	-0,013620+0,018186i	0,141	0,023	7,111
19	10:49:02	84,1431	0,005	0,019736+0,018305i	0,148	0,027	6,737
20	10:49:03	84,1241	-0,014	0,011388-0,008699i	0,156	0,014	6,400
21	10:49:04	84,1061	-0,032	0,029137-0,030033i	0,164	0,042	6,095
22	10:49:05	84,0951	-0,043	0,010556+0,038030i	0,172	0,039	5,818
23	10:49:06	84,0911	-0,047	-0,001346-0,031340i	0,180	0,031	5,565
24	10:49:07	84,0961	-0,042	-0,020625-0,148023i	0,188	0,149	5,333
25	10:49:08	84,1111	-0,027	-0,071046+0,014557i	0,195	0,073	5,120

FRECUENCIA - AMPLITUD



ANALISIS DE FOURIER PARA SERIE DISCRETA DE DATOS

Numero de datos de la serie: 128

Media aritmética de la serie: 84,136

Fecha: 27/9/14

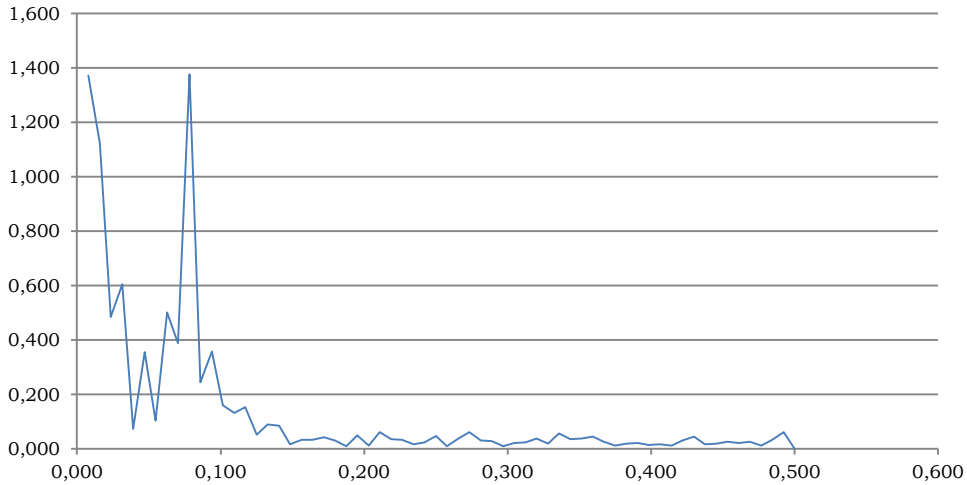
Frecuencia:	**0,078**	**Hz**
Período:	**12,8**	**seg**

Epoca inicial: 10:51:04

Epoca final: 10:53:27

Tiempo	Epoca	Serie	Elevación	Transformada Fourier	Frecuencia	Módulo	Periodo
0	10:51:04	84,1181	-0,018	0	0,000	0,000	
1	10:51:05	84,1191	-0,017	-0,588388-1,239484i	0,008	1,372	128,000
2	10:51:06	84,1251	-0,011	1,119830-0,055404i	0,016	1,121	64,000
3	10:51:07	84,1371	0,001	0,323946-0,360941i	0,023	0,485	42,667
4	10:51:08	84,1531	0,017	-0,145550-0,586745i	0,031	0,605	32,000
5	10:51:09	84,1791	0,043	0,036254+0,061993i	0,039	0,072	25,600
6	10:51:10	84,1921	0,056	-0,256172-0,244684i	0,047	0,354	21,333
7	10:51:12	84,2081	0,072	-0,069884+0,076901i	0,055	0,104	18,286
8	10:51:12	84,2081	0,072	-0,463167-0,191677i	0,063	0,501	16,000
9	10:51:14	84,1991	0,063	-0,372786-0,104652i	0,070	0,387	14,222
10	10:51:15	84,1811	0,045	-1,279792+0,506492i	0,078	1,376	12,800
11	10:51:16	84,1571	0,021	0,107127-0,221020i	0,086	0,246	11,636
12	10:51:17	84,1261	-0,010	0,210305+0,287914i	0,094	0,357	10,667
13	10:51:18	84,1221	-0,014	0,134139+0,089110i	0,102	0,161	9,846
14	10:51:19	84,1191	-0,017	-0,000097+0,130982i	0,109	0,131	9,143
15	10:51:21	84,1181	-0,018	0,151738+0,018813i	0,117	0,153	8,533
16	10:51:21	84,1241	-0,012	0,050506-0,005364i	0,125	0,051	8,000
17	10:51:23	84,1421	0,006	0,084733-0,026315i	0,133	0,089	7,529
18	10:51:24	84,1501	0,014	0,081861+0,023789i	0,141	0,085	7,111
19	10:51:24	84,1501	0,014	0,001843+0,016011i	0,148	0,016	6,737
20	10:51:27	84,1561	0,020	-0,021226+0,026024i	0,156	0,034	6,400
21	10:51:28	84,1541	0,018	0,003268+0,032395i	0,164	0,033	6,095
22	10:51:28	84,1441	0,008	-0,040655+0,015074i	0,172	0,043	5,818
23	10:51:29	84,1321	-0,004	0,022809-0,020902i	0,180	0,031	5,565
24	10:51:31	84,1221	-0,014	0,000346+0,008700i	0,188	0,009	5,333
25	10:51:31	84,1131	-0,023	0,008711+0,049361i	0,195	0,050	5,120

FRECUENCIA - AMPLITUD



ANALISIS DE FOURIER PARA SERIE DISCRETA DE DATOS

Numero de datos de la serie: 128

Media aritmética de la serie: 84,138

Fecha: 27/9/14

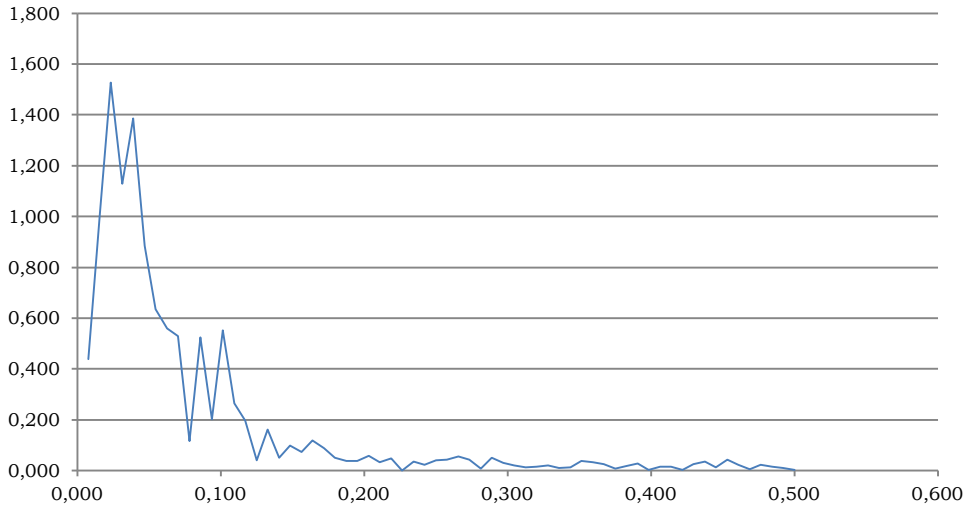
Frecuencia:	**0,023**	**Hz**
Período:	**42,7**	**seg**

Epoca inicial: 10:53:27

Epoca final: 10:55:49

Tiempo	Epoca	Serie	Elevación	Transformada Fourier	Frecuencia	Módulo	Periodo
0	10:53:27	84,1341	-0,004	0	0,000	0,000	
1	10:53:29	84,1641	0,026	-0,406293-0,167079i	0,008	0,439	128,000
2	10:53:30	84,1811	0,043	-0,553821+0,844545i	0,016	1,010	64,000
3	10:53:31	84,1921	0,054	1,418789-0,567270i	0,023	1,528	42,667
4	10:53:32	84,2001	0,062	0,486170-1,018888i	0,031	1,129	32,000
5	10:53:33	84,1991	0,061	0,957834-1,000211i	0,039	1,385	25,600
6	10:53:34	84,1931	0,055	-0,134898-0,872957i	0,047	0,883	21,333
7	10:53:35	84,1841	0,046	-0,190507+0,604962i	0,055	0,634	18,286
8	10:53:36	84,1751	0,037	-0,554917-0,062602i	0,063	0,558	16,000
9	10:53:37	84,1611	0,023	-0,357685-0,389270i	0,070	0,529	14,222
10	10:53:39	84,1351	-0,003	-0,041517-0,106915i	0,078	0,115	12,800
11	10:53:40	84,1311	-0,007	0,509784+0,124399i	0,086	0,525	11,636
12	10:53:41	84,1221	-0,016	-0,200460-0,030101i	0,094	0,203	10,667
13	10:53:42	84,1121	-0,026	-0,548297+0,055939i	0,102	0,551	9,846
14	10:53:43	84,0961	-0,042	-0,233516-0,123358i	0,109	0,264	9,143
15	10:53:44	84,0811	-0,057	-0,170716-0,097538i	0,117	0,197	8,533
16	10:53:45	84,0641	-0,074	-0,037799+0,010485i	0,125	0,039	8,000
17	10:53:46	84,0551	-0,083	-0,027216-0,159892i	0,133	0,162	7,529
18	10:53:47	84,0541	-0,084	-0,048874-0,006319i	0,141	0,049	7,111
19	10:53:48	84,0531	-0,085	0,023466-0,096055i	0,148	0,099	6,737
20	10:53:50	84,0671	-0,071	-0,070950-0,016829i	0,156	0,073	6,400
21	10:53:51	84,0751	-0,063	0,009343-0,117621i	0,164	0,118	6,095
22	10:53:52	84,0961	-0,042	-0,008479-0,088956i	0,172	0,089	5,818
23	10:53:53	84,1101	-0,028	-0,016994-0,046781i	0,180	0,050	5,565
24	10:53:54	84,1221	-0,016	-0,035126-0,012665i	0,188	0,037	5,333
25	10:53:55	84,1281	-0,010	-0,036868+0,001547i	0,195	0,037	5,120

FRECUENCIA - AMPLITUD



ANALISIS DE FOURIER PARA SERIE DISCRETA DE DATOS

Numero de datos de la serie: 128

Media aritmética de la serie: 84,119

Fecha: 27/9/14

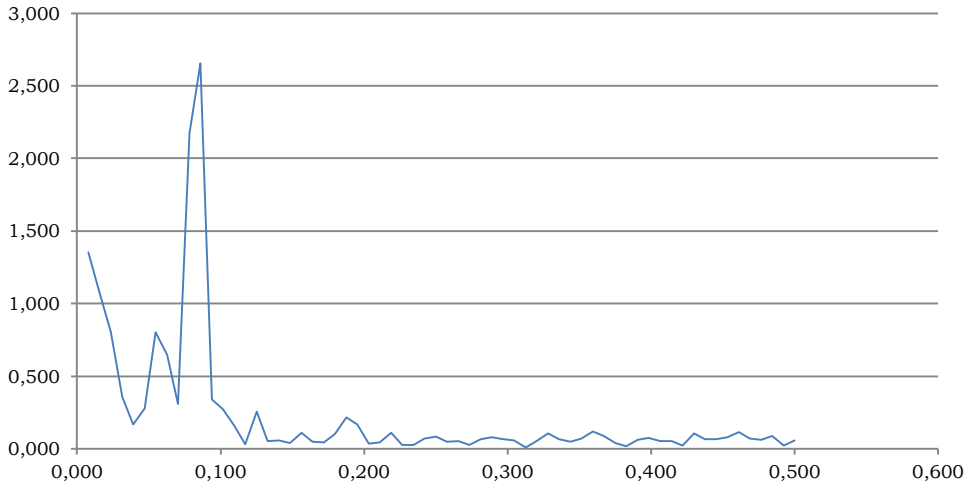
Frecuencia:	**0,086**	**Hz**
Período:	**11,6**	**seg**

Epoca inicial: 10:55:50

Epoca final: 10:58:10

Tiempo	Epoca	Serie	Elevación	Transformada Fourier	Frecuencia	Módulo	Periodo
0	10:55:50	84,1021	-0,017	0	0,000	0,000	
1	10:55:51	84,0971	-0,022	-0,135301-1,344919i	0,008	1,352	128,000
2	10:55:52	84,0941	-0,025	-0,196376-1,049987i	0,016	1,068	64,000
3	10:55:53	84,1011	-0,018	-0,783384+0,195488i	0,023	0,807	42,667
4	10:55:54	84,1131	-0,006	0,208061-0,290485i	0,031	0,357	32,000
5	10:55:55	84,1311	0,012	-0,045908+0,161023i	0,039	0,167	25,600
6	10:55:56	84,1501	0,031	0,136521+0,244379i	0,047	0,280	21,333
7	10:55:58	84,1721	0,053	-0,255757-0,760998i	0,055	0,803	18,286
8	10:55:59	84,1731	0,054	-0,262717-0,593918i	0,063	0,649	16,000
9	10:56:00	84,1641	0,045	-0,287651+0,114864i	0,070	0,310	14,222
10	10:56:01	84,1471	0,028	-1,104825-1,871998i	0,078	2,174	12,800
11	10:56:02	84,1181	-0,001	1,012494+2,455187i	0,086	2,656	11,636
12	10:56:03	84,1031	-0,016	0,334256+0,064033i	0,094	0,340	10,667
13	10:56:04	84,0941	-0,025	0,203752+0,184279i	0,102	0,275	9,846
14	10:56:05	84,0941	-0,025	0,108290+0,118049i	0,109	0,160	9,143
15	10:56:06	84,0991	-0,020	-0,006584+0,031943i	0,117	0,033	8,533
16	10:56:07	84,1181	-0,001	0,197945+0,159702i	0,125	0,254	8,000
17	10:56:09	84,1661	0,047	-0,040389+0,035063i	0,133	0,053	7,529
18	10:56:10	84,1921	0,073	0,027726+0,048395i	0,141	0,056	7,111
19	10:56:11	84,2111	0,092	0,038039-0,002410i	0,148	0,038	6,737
20	10:56:12	84,2171	0,098	-0,036874+0,102669i	0,156	0,109	6,400
21	10:56:13	84,2151	0,096	-0,039797-0,025178i	0,164	0,047	6,095
22	10:56:14	84,2011	0,082	0,034489-0,028648i	0,172	0,045	5,818
23	10:56:15	84,1741	0,055	-0,076677+0,065351i	0,180	0,101	5,565
24	10:56:16	84,1501	0,031	0,046980-0,210772i	0,188	0,216	5,333
25	10:56:18	84,1091	-0,010	-0,135317+0,102102i	0,195	0,170	5,120

FRECUENCIA - AMPLITUD



ANALISIS DE FOURIER PARA SERIE DISCRETA DE DATOS

Numero de datos de la serie: 128

Media aritmética de la serie: 84,061

Fecha: 27/9/14

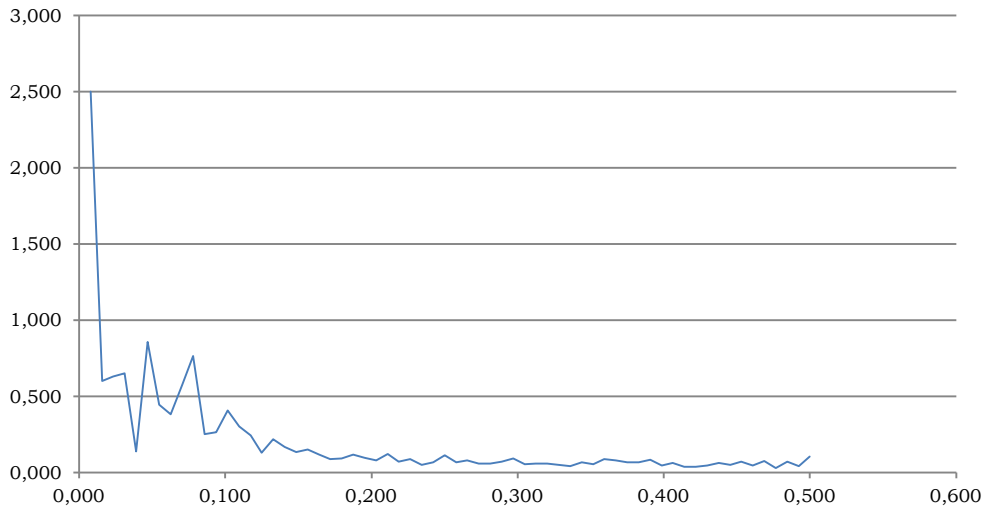
Frecuencia:	**0,008**	**Hz**
Período:	**128,0**	**seg**

Epoca inicial: 10:58:12

Epoca final: 11:00:33

Tiempo	Epoca	Serie	Elevación	Transformada Fourier	Frecuencia	Módulo	Periodo
0	10:58:12	84,1221	0,062	0	0,000	0,000	
1	10:58:13	84,1151	0,055	0,903130-2,329099i	0,008	2,498	128,000
2	10:58:13	84,1151	0,055	-0,458558-0,385693i	0,016	0,599	64,000
3	10:58:15	84,1011	0,041	-0,403162-0,484178i	0,023	0,630	42,667
4	10:58:16	84,0911	0,031	0,426041-0,492326i	0,031	0,651	32,000
5	10:58:17	84,0911	0,031	0,124681-0,062824i	0,039	0,140	25,600
6	10:58:19	84,0941	0,034	0,812961-0,275310i	0,047	0,858	21,333
7	10:58:19	84,0971	0,037	-0,171660-0,411397i	0,055	0,446	18,286
8	10:58:21	84,1041	0,044	-0,362340-0,127656i	0,063	0,384	16,000
9	10:58:21	84,1071	0,047	-0,324042-0,476081i	0,070	0,576	14,222
10	10:58:23	84,1071	0,047	0,269840+0,713669i	0,078	0,763	12,800
11	10:58:23	84,1071	0,047	0,062319-0,242444i	0,086	0,250	11,636
12	10:58:25	84,0921	0,032	0,241797-0,105687i	0,094	0,264	10,667
13	10:58:26	84,0821	0,022	0,123225-0,390222i	0,102	0,409	9,846
14	10:58:27	84,0751	0,015	-0,046901-0,298595i	0,109	0,302	9,143
15	10:58:28	84,0681	0,008	0,093499-0,224278i	0,117	0,243	8,533
16	10:58:30	84,0701	0,010	0,082607-0,099761i	0,125	0,130	8,000
17	10:58:31	84,0781	0,018	0,065842-0,207464i	0,133	0,218	7,529
18	10:58:31	84,0861	0,026	0,117743-0,117145i	0,141	0,166	7,111
19	10:58:33	84,1071	0,047	0,029005-0,131481i	0,148	0,135	6,737
20	10:58:34	84,1361	0,076	0,094786-0,119298i	0,156	0,152	6,400
21	10:58:35	84,1441	0,084	0,035247-0,111345i	0,164	0,117	6,095
22	10:58:36	84,1491	0,089	0,053600-0,070632i	0,172	0,089	5,818
23	10:58:37	84,1461	0,086	0,024818-0,090665i	0,180	0,094	5,565
24	10:58:38	84,1401	0,080	0,107227-0,048415i	0,188	0,118	5,333
25	10:58:39	84,1241	0,064	0,034833-0,090099i	0,195	0,097	5,120

FRECUENCIA - AMPLITUD



ANALISIS DE FOURIER PARA SERIE DISCRETA DE DATOS

Numero de datos de la serie: 128

Media aritmética de la serie: 84,025

Fecha: 27/9/14

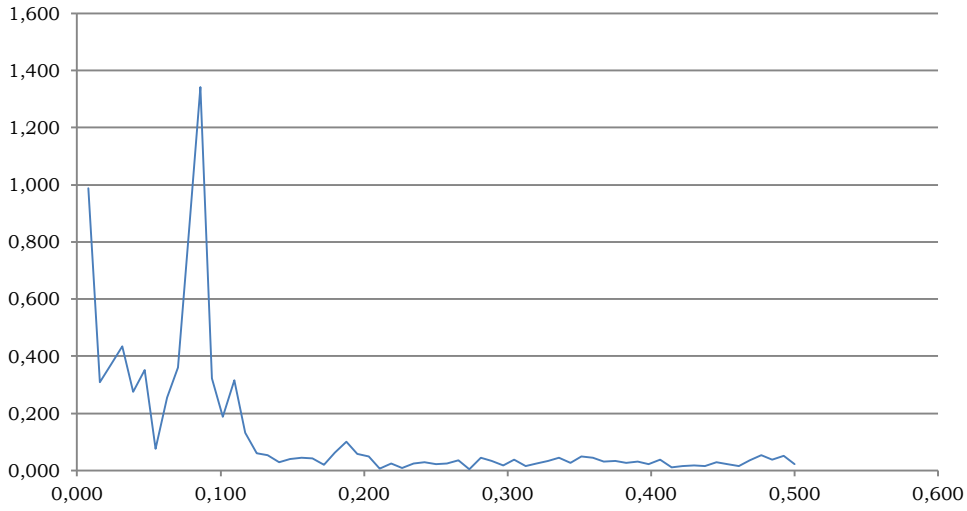
Frecuencia:	**0,086**	**Hz**
Período:	**11,6**	**seg**

Epoca inicial: 11:00:34

Epoca final: 11:02:55

Tiempo	Epoca	Serie	Elevación	Transformada Fourier	Frecuencia	Módulo	Periodo
0	11:00:34	84,0191	-0,006	0	0,000	0,000	
1	11:00:35	84,0241	-0,001	0,713398-0,681874i	0,008	0,987	128,000
2	11:00:37	84,0381	0,013	-0,290543-0,106659i	0,016	0,310	64,000
3	11:00:38	84,0451	0,020	-0,192042-0,316749i	0,023	0,370	42,667
4	11:00:39	84,0511	0,026	-0,342069-0,268648i	0,031	0,435	32,000
5	11:00:40	84,0541	0,029	-0,243158+0,129642i	0,039	0,276	25,600
6	11:00:41	84,0551	0,030	-0,317939-0,149802i	0,047	0,351	21,333
7	11:00:42	84,0501	0,025	-0,073595+0,014752i	0,055	0,075	18,286
8	11:00:43	84,0431	0,018	-0,094539-0,236686i	0,063	0,255	16,000
9	11:00:44	84,0321	0,007	0,114935-0,341594i	0,070	0,360	14,222
10	11:00:45	84,0241	-0,001	0,646578-0,566307i	0,078	0,860	12,800
11	11:00:47	84,0301	0,005	-1,285250-0,386663i	0,086	1,342	11,636
12	11:00:48	84,0401	0,015	-0,000660-0,322022i	0,094	0,322	10,667
13	11:00:49	84,0551	0,030	0,161685+0,097114i	0,102	0,189	9,846
14	11:00:50	84,0691	0,044	0,314302+0,032768i	0,109	0,316	9,143
15	11:00:51	84,0771	0,052	0,108113+0,076100i	0,117	0,132	8,533
16	11:00:52	84,0821	0,057	0,053941+0,027586i	0,125	0,061	8,000
17	11:00:53	84,0861	0,061	0,037146+0,038771i	0,133	0,054	7,529
18	11:00:54	84,0751	0,050	0,029490+0,003258i	0,141	0,030	7,111
19	11:00:55	84,0601	0,035	0,020796+0,033762i	0,148	0,040	6,737
20	11:00:57	84,0211	-0,004	0,014682+0,041741i	0,156	0,044	6,400
21	11:00:58	84,0101	-0,015	0,038191+0,017125i	0,164	0,042	6,095
22	11:00:59	84,0081	-0,017	0,019585-0,005270i	0,172	0,020	5,818
23	11:01:00	84,0091	-0,016	0,040424-0,046980i	0,180	0,062	5,565
24	11:01:01	84,0201	-0,005	-0,077749-0,065309i	0,188	0,102	5,333
25	11:01:02	84,0331	0,008	-0,013416+0,055553i	0,195	0,057	5,120

FRECUENCIA - AMPLITUD



ANALISIS DE FOURIER PARA SERIE DISCRETA DE DATOS

Numero de datos de la serie: 128

Media aritmética de la serie: 84,006

Fecha: 27/9/14

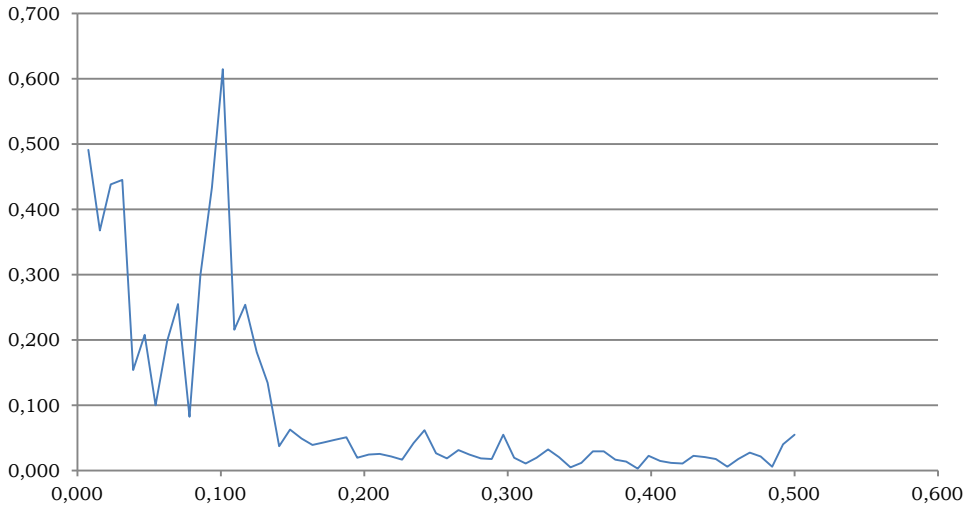
Frecuencia:	**0,102**	**Hz**
Período:	**9,8**	**seg**

Epoca inicial: 11:02:57

Epoca final: 11:05:49

Tiempo	Epoca	Serie	Elevación	Transformada Fourier	Frecuencia	Módulo	Periodo
0	11:02:57	84,0131	0,007	0	0,000	0,000	
1	11:02:57	84,0251	0,019	0,029106-0,490368i	0,008	0,491	128,000
2	11:02:59	84,0281	0,022	0,238033-0,280596i	0,016	0,368	64,000
3	11:03:00	84,0181	0,012	-0,352461-0,259457i	0,023	0,438	42,667
4	11:03:00	84,0181	0,012	0,341017+0,286020i	0,031	0,445	32,000
5	11:03:02	84,0021	-0,004	-0,118707-0,098507i	0,039	0,154	25,600
6	11:03:03	83,9971	-0,009	0,010248-0,207657i	0,047	0,208	21,333
7	11:03:04	84,0001	-0,006	-0,089995+0,044182i	0,055	0,100	18,286
8	11:03:05	84,0091	0,003	-0,163423+0,111436i	0,063	0,198	16,000
9	11:03:06	84,0191	0,013	0,228813-0,111683i	0,070	0,255	14,222
10	11:03:07	84,0291	0,023	0,081362-0,009397i	0,078	0,082	12,800
11	11:03:08	84,0341	0,028	-0,047397+0,295203i	0,086	0,299	11,636
12	11:03:09	84,0361	0,030	0,428796-0,060879i	0,094	0,433	10,667
13	11:03:11	84,0281	0,022	0,002098-0,614553i	0,102	0,615	9,846
14	11:03:11	84,0211	0,015	-0,202634+0,073317i	0,109	0,215	9,143
15	11:03:13	84,0021	-0,004	-0,071591-0,243704i	0,117	0,254	8,533
16	11:03:14	83,9961	-0,010	-0,121933-0,133690i	0,125	0,181	8,000
17	11:03:16	83,9961	-0,010	0,105889-0,082830i	0,133	0,134	7,529
18	11:03:16	84,0041	-0,002	-0,031934-0,018966i	0,141	0,037	7,111
19	11:03:17	84,0121	0,006	0,051865-0,035636i	0,148	0,063	6,737
20	11:03:18	84,0241	0,018	-0,034905-0,034121i	0,156	0,049	6,400
21	11:03:19	84,0301	0,024	0,036735-0,013086i	0,164	0,039	6,095
22	11:03:20	84,0351	0,029	-0,042629-0,006326i	0,172	0,043	5,818
23	11:03:22	84,0321	0,026	0,008664-0,046008i	0,180	0,047	5,565
24	11:03:23	84,0221	0,016	-0,047581-0,017157i	0,188	0,051	5,333
25	11:03:24	84,0141	0,008	0,016364-0,010241i	0,195	0,019	5,120

FRECUENCIA - AMPLITUD



A la vista el análisis de cada uno de los tramos estudiados de 128 observaciones cada uno se pueden resumir los datos en la siguiente tabla:

ANALISIS DE FOURIER PARA SERIE DISCRETA DE DATOS						Zona 1
Zona	**Epoca inicial**	**Epoca final**	**Cota media**	**nº datos**	**Frecuencia (Hz)**	**Período (seg.)**
Zona 1-1	10:33:18	10:35:44	84,209	128	0,078	12,8
Zona 1-1	10:35:45	10:46:17	84,155	128	0,078	12,8
Zona 1-1	10:46:18	10:48:39	84,139	128	0,086	11,6
Zona 1-1	10:48:41	10:51:02	84,139	128	0,086	11,6
Zona 1-1	10:51:04	10:53:27	84,136	128	0,078	12,8
Zona 1-2	10:53:27	10:55:49	84,138	128	0,023	42,7
Zona 1-3	10:55:50	10:58:10	84,119	128	0,086	11,6
Zona 1-4	10:58:12	11:00:33	84,061	128	0,008	128,0
Zona 1-5	11:00:34	11:02:55	84,025	128	0,086	11,6
Zona 1-5	11:02:57	11:05:49	84,006	128	0,102	9,8

Tabla IV.47.- Parámetros dinámicos obtenidos en la zona 1

A la vista de los periodos obtenidos del puente, se puede apreciar como hay momentos temporales que hay que desechar para obtener la frecuencia fundamental ya que los datos han sido distorsionados por las causas expuestas previamente, que recordando pueden ser: entrada de grúas, manipulación de cargas, entrada de camiones, hormigonado, ráfagas de viento, …

Si estos datos obtenidos se representan en una gráfica de dispersión se aprecia lo comentado:

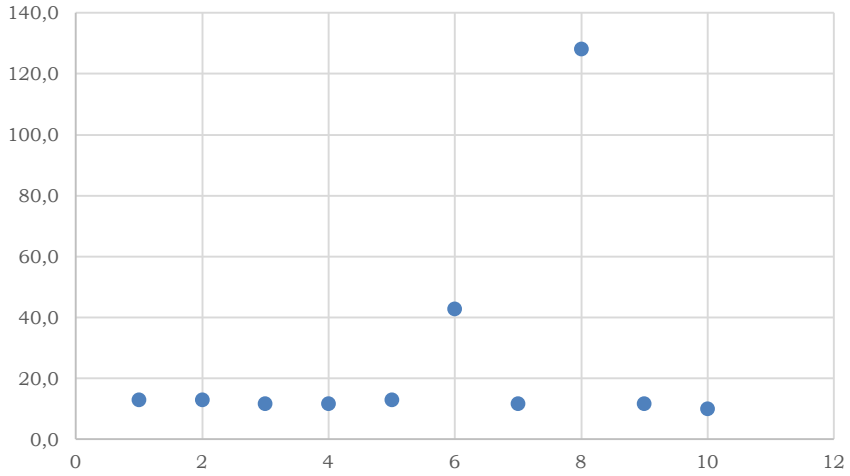


Figura IV.56.- Gráfico de dispersión del periodo en la zona 1.

A la vista de este gráfico se puede concluir que hay dos momentos que hay que desechar para la obtención del periodo del tablero, [10:53:27 a 10:55:49] y [10:58:12 a 11:00:33], y por otro lado que la zona 1-1 se puede hacer una análisis de Fourier con más datos con el objeto de obtener más precisión en el resultado. Para ello en el siguiente cálculo se puede ver los resultados obtenidos con un total de 512 datos correspondientes al periodo [10:33:18 a 10:53:27].

ANALISIS DE FOURIER PARA SERIE DISCRETA DE DATOS

Numero de datos de la serie: 512

Media aritmética de la serie: 84,209

Fecha: 27/9/14

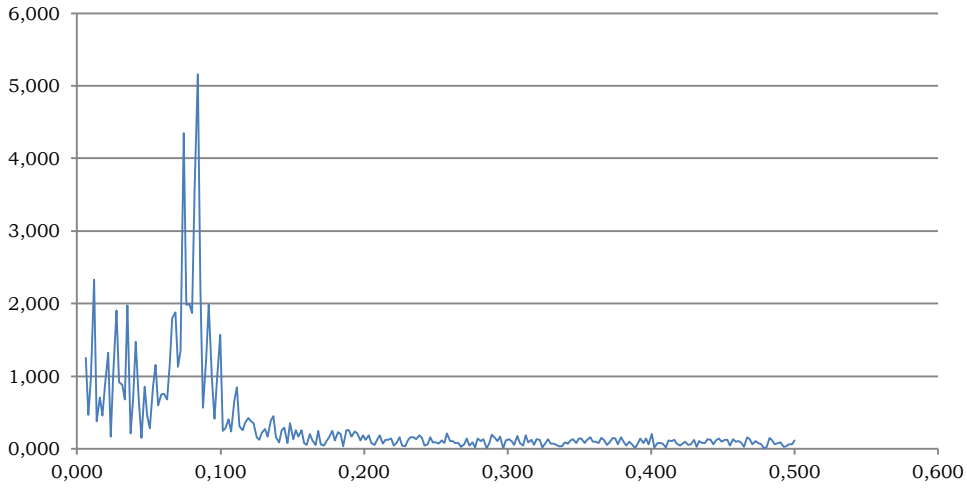
Frecuencia:	**0,074**	**Hz**
Período:	**13,5**	**seg**

Epoca inicial: 10:33:18

Epoca final: 10:51:02

Tiempo	Epoca	Serie	Elevación	Transformada Fourier	Frecuencia	Módulo	Periodo
3	10:33:22	84,1671	-0,042	-1,241461-0,178785i	0,006	1,254	170,667
4	10:33:22	84,1631	-0,046	-0,467033-0,018910i	0,008	0,467	128,000
5	10:33:22	84,1631	-0,046	0,615078+0,754486i	0,010	0,973	102,400
6	10:33:25	84,1721	-0,037	-0,867183-2,156882i	0,012	2,325	85,333
7	10:33:25	84,1881	-0,021	-0,362171+0,112490i	0,014	0,379	73,143
8	10:33:26	84,2031	-0,006	0,687212+0,176340i	0,016	0,709	64,000
9	10:33:27	84,2271	0,018	0,306629+0,341122i	0,018	0,459	56,889
10	10:33:28	84,2291	0,020	-0,020207-0,872274i	0,020	0,873	51,200
11	10:33:29	84,2291	0,020	-1,067006+0,783383i	0,021	1,324	46,545
12	10:33:31	84,2211	0,012	-0,002649+0,170834i	0,023	0,171	42,667
13	10:33:31	84,2071	-0,002	0,906345+0,526483i	0,025	1,048	39,385
14	10:33:33	84,1961	-0,013	-0,305850-1,878037i	0,027	1,903	36,571
15	10:33:33	84,1801	-0,029	0,782936-0,471251i	0,029	0,914	34,133
16	10:33:34	84,1631	-0,046	0,595163-0,645595i	0,031	0,878	32,000
17	10:33:36	84,1501	-0,059	0,662946-0,139735i	0,033	0,678	30,118
18	10:33:36	84,1451	-0,064	-1,976372+0,048279i	0,035	1,977	28,444
19	10:33:36	84,1451	-0,064	0,131318-0,168398i	0,037	0,214	26,947
20	10:33:39	84,1601	-0,049	0,534549-0,446469i	0,039	0,696	25,600
21	10:33:39	84,1811	-0,028	-1,373704-0,538041i	0,041	1,475	24,381
22	10:33:40	84,1991	-0,010	-0,623879-0,131304i	0,043	0,638	23,273
23	10:33:42	84,2161	0,007	-0,074227-0,133081i	0,045	0,152	22,261
24	10:33:42	84,2291	0,020	0,807229+0,279096i	0,047	0,854	21,333
25	10:33:43	84,2321	0,023	0,333341+0,301183i	0,049	0,449	20,480
26	10:33:45	84,2271	0,018	-0,244662+0,148198i	0,051	0,286	19,692
27	10:33:46	84,2121	0,003	-0,000303-0,859574i	0,053	0,860	18,963
28	10:33:46	84,1981	-0,011	1,055216-0,463713i	0,055	1,153	18,286

FRECUENCIA - AMPLITUD



B.- Análisis en el dominio de la frecuencia de la Zona 3

Realizando el mismo proceso para cada subtramo predefinido en el tramo 3 y no exponiendo aquí los cálculos ya que se adjuntan en la documentación anexa en soporte informático, se llega al siguiente cuadro:

ANALISIS DE FOURIER PARA SERIE DISCRETA DE DATOS						Zona 3
Zona	**Epoca inicial**	**Epoca final**	**Cota media**	**nº datos**	**Frecuencia (Hz)**	**Período (seg.)**
Zona 3-1	11:13:10	11:15:35	83,898	128	0,070	14,2
Zona 3-1	11:15:36	11:18:00	83,899	128	0,086	11,6
Zona 3-1	11:18:02	11:20:27	83,882	128	0,078	12,8
Zona 3-2	11:20:29	11:22:53	83,897	128	0,008	128,0
Zona 3-3	11:22:54	11:26:28	83,894	128	0,094	10,7
Zona 3-3	11:26:29	11:29:06	83,910	128	0,094	10,7
Zona 3-3	11:29:08	11:31:45	83,905	128	0,094	10,7
Zona 3-3	11:31:46	11:34:15	83,890	128	0,086	11,6
Zona 3-4	11:34:15	11:37:42	83,884	128	0,008	128,0
Zona 3-4	11:37:44	11:41:19	83,932	128	0,008	128,0
Zona 3-5	11:41:20	11:43:58	83,881	128	0,094	10,7
Zona 3-5	11:44:22	11:47:00	83,891	128	0,094	10,7
Zona 3-5	11:47:00	11:49:36	83,895	128	0,094	10,7
Zona 3-5	11:49:09	11:51:47	83,878	128	0,102	9,8

Tabla IV.48.- Parámetros dinámicos obtenidos en la zona 3.

Igualmente a lo ocurrido en la zona 1, se puede apreciar como hay momentos temporales que hay que desechar para obtener la frecuencia fundamental ya que los datos han sido distorsionados por las causas ya expuestas.

Si estos datos obtenidos se representan en una gráfica de dispersión se aprecia lo comentado:

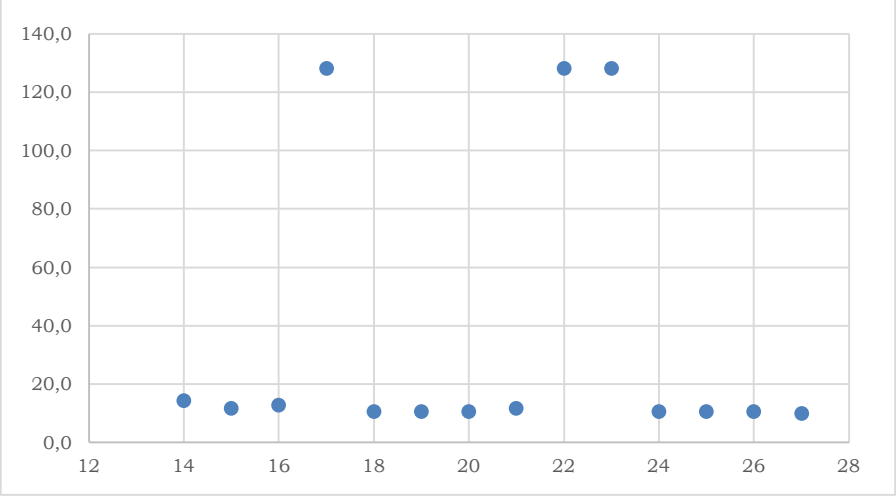


Figura IV.57.- Gráfico de dispersión del periodo en la zona 1.

A la vista de este gráfico se puede concluir que hay tres momentos que hay que desechar para la obtención del periodo del tablero, [11:20:29 a 11:22:53] y [11:34:15 a 11:41:19], y por otro lado que hay dos periodos en los que se puede hacer un análisis de Fourier con más datos con el objeto de obtener más precisión en el resultado. Para ello en el siguiente cálculo se puede ver los resultados obtenidos con un total de 512 datos correspondientes al periodo [11:22:54 a 11:34:15].

ANALISIS DE FOURIER PARA SERIE DISCRETA DE DATOS

Numero de datos de la serie: 512

Media aritmética de la serie: 83,898

Fecha: 27/9/14

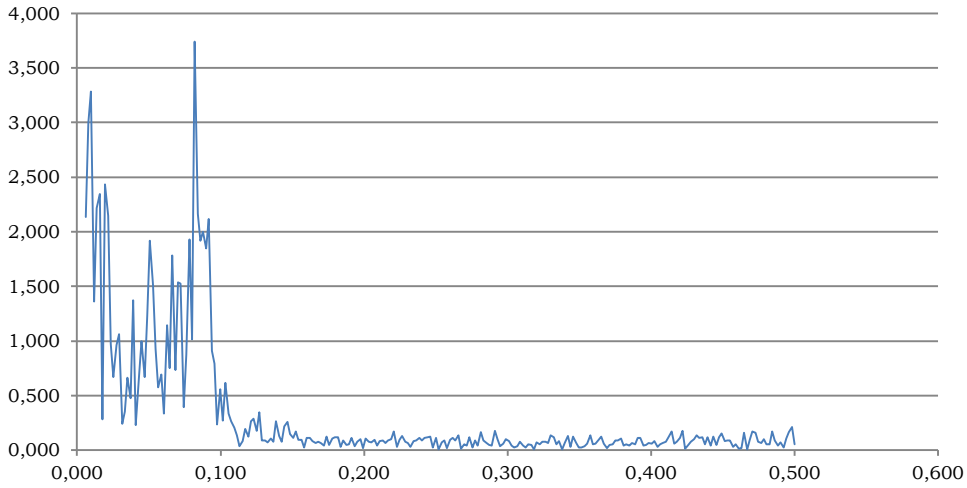
Frecuencia:	**0,082**	**Hz**
Período:	**12,2**	**seg**

Epoca inicial: 11:13:10

Epoca final: 11:22:53

Tiempo	Epoca	Serie	Elevación	Transformada Fourier	Frecuencia	Módulo	Periodo
0	11:13:10	83,8801	-0,018	-2,215000	0,000	2,215	
1	11:13:11	83,8791	-0,019	1,967817-2,589009i	0,002	3,252	512,000
2	11:13:12	83,8831	-0,015	1,321454+1,223974i	0,004	1,801	256,000
3	11:13:13	83,8911	-0,007	0,627308+2,041762i	0,006	2,136	170,667
4	11:13:14	83,9011	0,003	-2,101419-2,133740i	0,008	2,995	128,000
5	11:13:15	83,9121	0,014	-2,996621+1,343808i	0,010	3,284	102,400
6	11:13:16	83,9231	0,025	0,364981+1,310076i	0,012	1,360	85,333
7	11:13:18	83,9281	0,030	-2,212702+0,080451i	0,014	2,214	73,143
8	11:13:19	83,9221	0,024	1,932412-1,325604i	0,016	2,343	64,000
9	11:13:20	83,9111	0,013	-0,277738+0,053009i	0,018	0,283	56,889
10	11:13:21	83,8991	0,001	1,969765-1,431460i	0,020	2,435	51,200
11	11:13:22	83,8861	-0,012	-1,695755-1,317047i	0,021	2,147	46,545
12	11:13:23	83,8741	-0,024	0,940721+0,258381i	0,023	0,976	42,667
13	11:13:24	83,8651	-0,033	-0,454010-0,488921i	0,025	0,667	39,385
14	11:13:26	83,8671	-0,031	-0,830301-0,489767i	0,027	0,964	36,571
15	11:13:27	83,8801	-0,018	0,908671-0,552623i	0,029	1,064	34,133
16	11:13:28	83,9041	0,006	-0,239364+0,029872i	0,031	0,241	32,000
17	11:13:29	83,9191	0,021	0,059425+0,346394i	0,033	0,351	30,118
18	11:13:30	83,9321	0,034	0,657102+0,093124i	0,035	0,664	28,444
19	11:13:31	83,9381	0,040	-0,055020-0,469270i	0,037	0,472	26,947
20	11:13:32	83,9371	0,039	0,864355+1,064035i	0,039	1,371	25,600
21	11:13:33	83,9271	0,029	0,225811-0,052019i	0,041	0,232	24,381
22	11:13:35	83,8901	-0,008	0,382579+0,544041i	0,043	0,665	23,273
23	11:13:36	83,8751	-0,023	-0,214560-0,974859i	0,045	0,998	22,261
24	11:13:37	83,8681	-0,030	0,011336+0,668574i	0,047	0,669	21,333
25	11:13:38	83,8641	-0,034	-1,108661-0,538864i	0,049	1,233	20,480

FRECUENCIA - AMPLITUD



C.- Análisis en el dominio de la frecuencia de la Zona 5

Realizando el mismo proceso para cada subtramo predefinido en el tramo 5 y no exponiendo aquí los cálculos ya que se adjuntan en la documentación anexa en soporte informático, se llega al siguiente cuadro:

ANALISIS DE FOURIER PARA SERIE DISCRETA DE DATOS						Zona 5
Zona	**Epoca inicial**	**Epoca final**	**Cota media**	**nº datos**	**Frecuencia (Hz)**	**Período (seg.)**
Zona 5-1	12:16:08	12:18:47	82,129	128	0,086	11,6
Zona 5-1	12:18:24	12:21:03	82,100	128	0,094	10,7

Tabla IV.49.- Parámetros dinámicos obtenidos en la zona 5.

En este caso, en ambos periodos la frecuencia fundamental es similar, tal y como se puede apreciar igualmente en el siguiente gráfico de dispersión:

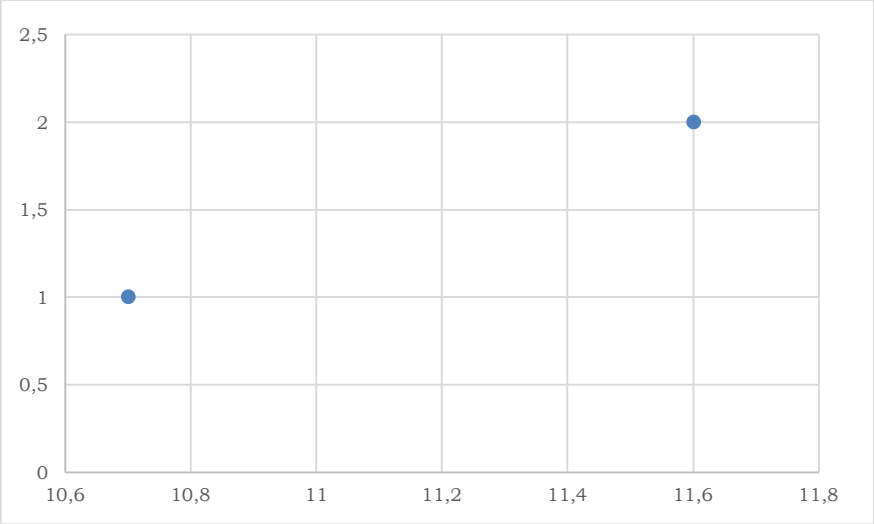


Figura IV.58.- Gráfico de dispersión del periodo en la zona 5.

A la vista de este gráfico se puede concluir que se puede hacer un análisis de Fourier con más datos con el objeto de obtener más precisión en el resultado. Para ello en el siguiente cálculo se puede ver los resultados obtenidos con un total de 256 datos correspondientes al periodo [12:16:08 a 12:21:03].

ANALISIS DE FOURIER PARA SERIE DISCRETA DE DATOS

Numero de datos de la serie: 256

Media aritmética de la serie: 82,132

Fecha: 27/9/14

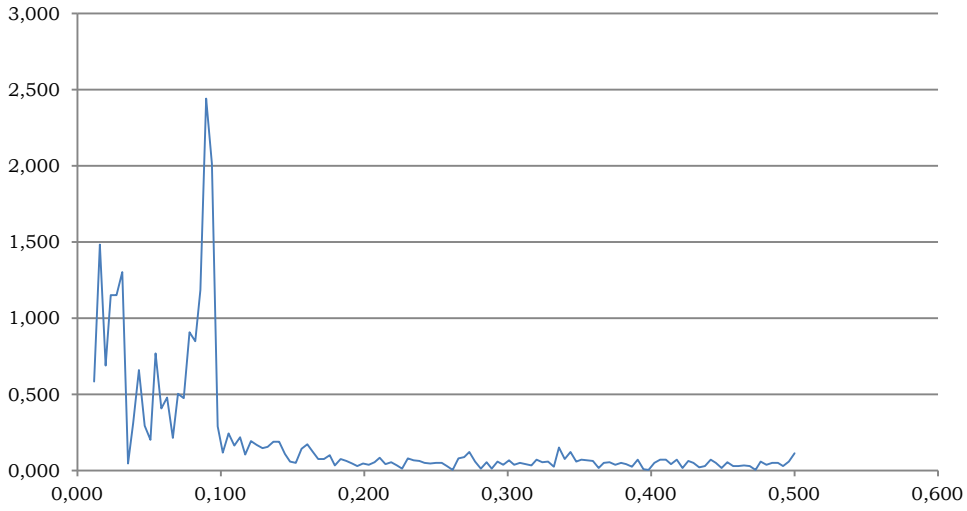
Frecuencia:	**0,090**	**Hz**
Período:	**11,1**	**seg**

Epoca inicial: 12:15:44

Epoca final: 12:21:03

Tiempo	Epoca	Serie	Elevación	Transformada Fourier	Frecuencia	Módulo	Periodo
0	12:15:44	82,1261	-0,006	-4,096000	0,000	4,096	
1	12:15:45	82,1341	0,002	0,395479-2,936037i	0,004	2,963	256,000
2	12:15:46	82,1361	0,004	-0,300208-1,000657i	0,008	1,045	128,000
3	12:15:48	82,1371	0,005	-0,211749-0,541951i	0,012	0,582	85,333
4	12:15:49	82,1281	-0,004	0,302163-1,449814i	0,016	1,481	64,000
5	12:15:50	82,1221	-0,010	0,167107-0,670106i	0,020	0,691	51,200
6	12:15:52	82,1161	-0,016	1,084668+0,380577i	0,023	1,149	42,667
7	12:15:53	82,1151	-0,017	0,316585+1,104317i	0,027	1,149	36,571
8	12:15:54	82,1151	-0,017	-0,087796+1,297819i	0,031	1,301	32,000
9	12:15:55	82,1241	-0,008	-0,043075-0,017776i	0,035	0,047	28,444
10	12:15:57	82,1321	0,000	-0,144627+0,274827i	0,039	0,311	25,600
11	12:15:58	82,1351	0,003	0,639536-0,157727i	0,043	0,659	23,273
12	12:15:59	82,1361	0,004	0,155698+0,247656i	0,047	0,293	21,333
13	12:16:00	82,1371	0,005	0,141458-0,140795i	0,051	0,200	19,692
14	12:16:01	82,1361	0,004	-0,586855-0,498531i	0,055	0,770	18,286
15	12:16:03	82,1261	-0,006	0,009469+0,406834i	0,059	0,407	17,067
16	12:16:04	82,1211	-0,011	-0,361260+0,316894i	0,063	0,481	16,000
17	12:16:05	82,1181	-0,014	0,085284+0,198227i	0,066	0,216	15,059
18	12:16:06	82,1171	-0,015	-0,375558+0,334374i	0,070	0,503	14,222
19	12:16:08	82,1311	-0,001	-0,125447+0,457200i	0,074	0,474	13,474
20	12:16:09	82,1441	0,012	-0,738729+0,525727i	0,078	0,907	12,800
21	12:16:10	82,1591	0,027	-0,404823-0,746251i	0,082	0,849	12,190
22	12:16:11	82,1751	0,043	-0,652335+0,986749i	0,086	1,183	11,636
23	12:16:13	82,1961	0,064	0,333931-2,415845i	0,090	2,439	11,130
24	12:16:14	82,1941	0,062	1,712870-1,056922i	0,094	2,013	10,667
25	12:16:15	82,1851	0,053	-0,227185+0,180540i	0,098	0,290	10,240

FRECUENCIA - AMPLITUD



3.7.5.- Datos modales extraídos del modelo de elementos finitos.

3.7.5.1.- Introducción.

La simulación del comportamiento del puente, tanto en su fase definitiva como en cada una de las fases constructivas se puede realizar mediante el método de los elementos finitos. Estos métodos son aplicables para todas las tipologías estructurales tanto en comportamiento lineal como no lineal.

En el caso del comportamiento no lineal al que se refiere este apartado, se efectúa una discretización espacial del puente en elementos finitos, con lo que se obtiene un modelo de N-Grados de Libertad, siendo N un número discreto, así como una discretización temporal en diferentes momentos temporales.

De este modo, se trata de realizar un análisis ya sea por integración directa de todo el modelo completo o bien mediante análisis modal, teniendo en todo caso que resolver el sistema de ecuaciones diferenciales planteado en el capítulo III según la fórmula [III.209]:

$$p(t) = [K]y + [C]\frac{dy}{dt} + [m]\frac{d^2y}{dt^2}$$

pudiéndose afrontar su resolución desde diferentes formas de análisis, ya sea desde su análisis en el dominio del tiempo o en el dominio de la frecuencia.

Ambas formas de resolución son equivalentes y el utilizar uno u otro depende de los parámetros que se quiera obtener.

3.7.5.2.- Datos modales extraídos del modelo de elementos finitos.

El software utilizado para determinar las frecuencias propias del puente ha sido Sofistik, el cual es un software completo integrado de modelización, análisis mediante elementos finitos, optimización estructural, etc., teniendo la característica adicional de modelizar el diseño en sus diferentes fases constructivas.

Este software utilizado dispone de dos programas para resolver problemas dinámicos:

- DYNA: programa autónomo para análisis lineales dinámicos y de sismo.
- ASE(Módulos 1/2): programa para Frecuencias propias y el método de integración temporal.

Según los datos del modelo del puente para la posición del 27 de septiembre de 2014 en la losa 11 D P-12 antes del bloqueo, realizado con dicho programa Sofistik, y para la posición en estudio se obtienen los datos que se muestran en la siguientes gráficas y que son los que se utilizarán para el contraste con los obtenidos del análisis espectral anterior.

A.- Forma modal 1: Flexión de la torre.

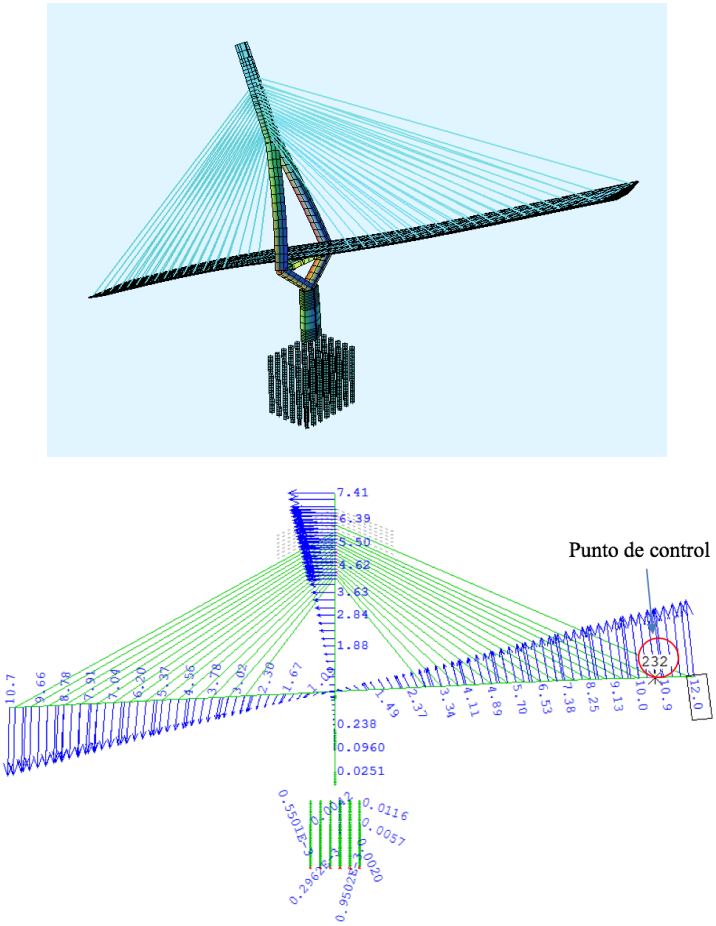


Figura IV.59.- P 12 Forma modal Flexión de la torre; f=0,075 Hz.

B.- Forma modal 2: Torsión de la torre. f=0,090 Hz

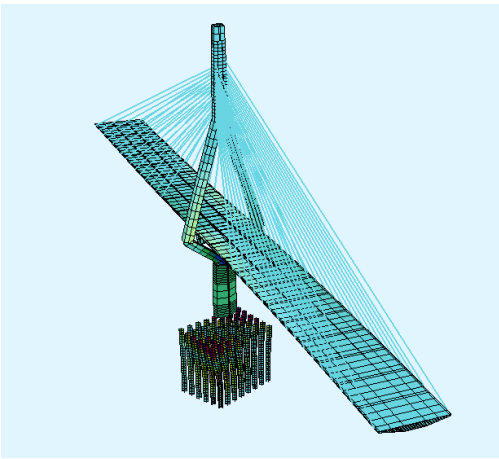


Figura IV.60.- P 12 Forma modal Torsión de la torre; f=0,090 Hz.

Los datos obtenidos para esta posición es de una frecuencia fundamental de periodo 13,33 segundos.

3.8.- VARIACIONES ENTRE EL MODELO TEÓRICO Y GPS.

Para analizar los valores obtenidos del periodo propio del tablero calculados a partir del análisis de las observaciones GPS en el dominio de la frecuencia, se comparan éstos con el periodo fundamental del tablero proporcionado por el modelo de elementos finitos citado en (Cap. IV – Apdo.[3.7.5]).

En el análisis se divide el procesado de datos en las mismas zonas homogéneas que se han estudiado anteriormente, a saber: Zona 1, 3 y 5, de las cuales se resumen en las siguientes tablas los resultados obtenidos.

Zona 1:

Del análisis de esta zona, con paquetes de 128 observaciones sobre los que se aplica la transformada de Fourier, se obtienen los siguientes datos de frecuencia y periodo. Estas zonas elegidas se han considerado suficientemente homogéneas:

ZONA 1			
Zona	**nº datos**	**Frecuencia (Hz)**	**Período (seg.)**
Zona 1-1	128	0,078	12,8
Zona 1-1	128	0,078	12,8
Zona 1-1	128	0,086	11,6
Zona 1-1	128	0,086	11,6
Zona 1-1	128	0,078	12,8
Zona 1-3	128	0,086	11,6
Zona 1-5	128	0,086	11,6
Zona 1-5	128	0,102	9,8

Tabla IV.50.- Datos obtenidos del análisis frecuencial en la Zona 1 con 128 observaciones.

Los resultados obtenidos y mostrados en la tabla anterior, se pueden considerar válidos frente al teórico de los 13,33 segundos obtenidos en el modelo de elementos finitos, dado que las diferencias se consideran pequeñas, menores del 10% establecido en el proyecto. Estas diferencias pueden ser debidas a la propia incertidumbre de la observación GPS, así como a las diferencias constructivas que pueden existir entre el proyecto teórico y el real , que obviamente generaría error en el cálculo de elementos finitos y que más adelante se explicará con detalle.

Si en vez de analizar 128 datos se analizan 512 datos, todo ello pensando que a mayor número de datos se produce mayor consistencia en el resultado, los resultados que se obtienen son los que se pueden apreciar en la tabla siguiente para la zona 1-1:

ZONA 1			
Zona	**nº datos**	**Frecuencia (Hz)**	**Período (seg.)**
Zona 1-1	512	0,074	13,47

Tabla IV.51.- Datos obtenidos del análisis frecuencial en la Zona 1-1 con 512 observaciones.

Cabe reseñar que como era de esperar los resultados de frecuencia y periodo no coinciden, siendo en este caso un poco mayores que haciendo análisis con un menor número de datos. Esto posiblemente se deba a las causas citadas anteriormente que producen incertidumbre y que vuelven a ser plenamente válidas para este análisis. Aún así, los resultados obtenidos fruto de las observaciones GPS vuelven a estar en el margen del 10% máximo de desviación que se permite en proyecto. Por tanto el análisis vuelve a considerar los resultados obtenidos con GPS como admisibless frente al modelo establecido con el cálculo de elementos finitos, validando nuevamente el instrumental y metodología propuesta.

Zona 3:

Del análisis de esta zona, con paquetes de 128 observaciones sobre los que se aplica la transformada de Fourier, se obtienen los siguientes datos de frecuencia y periodo. Estas zonas elegidas se han considerado suficientemente homogéneas:

ZONA 3			
Zona	**nº datos**	**Frecuencia (Hz)**	**Período (seg.)**
Zona 3-1	128	0,070	14,2
Zona 3-1	128	0,086	11,6
Zona 3-1	128	0,078	12,8
Zona 3-3	128	0,094	10,7
Zona 3-3	128	0,094	10,7
Zona 3-3	128	0,094	10,7
Zona 3-3	128	0,086	11,6
Zona 3-5	128	0,094	10,7
Zona 3-5	128	0,094	10,7
Zona 3-5	128	0,094	10,7
Zona 3-5	128	0,102	9,8

Tabla IV.52.- Datos obtenidos del análisis frecuencial en la Zona 3 con 128 observaciones.

A la vista de los resultados obtenidos, se pueden considerar válidos frente al teórico de los 13,33 segundos obtenidos en el modelo de elementos finitos.

Si se muestran los datos correspondientes a un total de 512 datos, correspondientes a la zona 3-3 se obtiene:

ZONA 3			
Zona	**nº datos**	**Frecuencia (Hz)**	**Período (seg.)**
Zona 3-3	512	0,082	12,2

Tabla IV.53.- Datos obtenidos del análisis frecuencial en la Zona 3-3 con 512 observaciones.

Zona 5:

Del análisis de esta zona, con paquetes de 128 observaciones sobre los que se aplica la transformada de Fourier, se obtienen los siguientes datos de frecuencia y periodo. Estas zonas elegidas se han considerado suficientemente homogéneas:

ZONA 5			
Zona	**nº datos**	**Frecuencia (Hz)**	**Período (seg.)**
Zona 5-1	128	0,086	11,6
Zona 5-1	128	0,094	10,7

Tabla IV.54.- Datos obtenidos del análisis frecuencial en la Zona 5-1 con 128 observaciones.

A la vista de los resultados obtenidos, se pueden considerar válidos frente al teórico de los 13,33 segundos obtenidos en el modelo de elementos finitos.

Si se muestran los datos correspondientes a un total de 256 datos, correspondientes a la zona 5-1 se tiene:

ZONA 5			
Zona	**nº datos**	**Frecuencia (Hz)**	**Período (seg.)**
Zona 5-1	128	0,090	11,1

Tabla IV.55.- Datos obtenidos del análisis frecuencial en la Zona 5-1 con 256 observaciones.

En todos los resultados obtenidos como valor del periodo fundamental del tablero, las diferencias con el teórico se consideran encuadradas dentro de los rangos normales, ya que el tablero en construcción así como el pilono que lo sustenta está afectado por diferentes circunstancias que justifican esta pequeña diferencia en cada uno de los casos, a saber:

- Una pequeña diferencia se puede atribuir a la propia incertidumbre de la observación GPS.
- Por otro lado, en todo obra construida existe cierta discrepancia entre el proyecto teórico y la obra realmente ejecutada, lo que llevaría a pequeñas variaciones con los valores extraídos del modelo teórico. Esto se puede entender según los argumentos expuestos en los siguientes puntos:
    - Los modos de vibración de una estructura dependen de la masa y de la rigidez de la misma, de forma que a más masa mayor periodo de vibración de la misma y a más rigidez menor periodo de vibración.
    - En el modelo de cálculo se asume una rigidez, obtenida de los diferentes parámetros y materiales de la misma.
    - Sin embargo en obra hay multitud de variables que hacen que estos parámetros teóricos varíen, siendo estos nuevos parámetros los que dan la características intrínsecas de la estructura, en este caso el periodo. Por ejemplo:
        - La inercia del tablero varía enormemente si la losa está fisurada o no. En el caso de estas estructuras evolutivas, la losa, debido a las alternancias de signo en los esfuerzos, se puede ir fisurando conforme avanza la misma. Esto llevaría por tanto a una importante variación en la rigidez del tablero con respecto al teórico, puesto que es complicado establecer con fiabilidad en un análisis previo la longitud de losa que puede fisurarse, la rigidez a atribuir a la losa fisurada y la influencia de la retracción del hormigón en la extensión y gradación de la fisuración.
        - Otro aspecto que se puede dar fácilmente en el hormigonado de la losa del tablero, es que haya una desviación de 1-3 centímetros de espesor de hormigón, lo que conlleva un aumento/disminución de la masa, que en el caso de losas de pequeño espesor (como en puentes mixtos) constituye un porcentaje de masa no despreciable.
        - Otro factor que puede ser determinante en las diferencias encontradas es la forma de ejecución de la cimentación del pilono, que como se ha explicado en (Cap. IV. Apdo.[3.2.3.1]) es mediante pilotes con medios marítimos y en un terreno conocido a través de ensayos geotécnicos que igualmente sacan parámetros solamente aproximados de la realidad, y casi siempre en rigidez. Esto puede llevar a diferencias entre la rigidez considerada en el modelo y la real de comportamiento del terreno. En este caso la rigidez de la cimentación del pilono es un dato fundamental para la obtención del periodo del tablero.
        - Otro aspecto, y no menos importante, es que durante la construcción del frente, hay maquinaria pesada que es necesario que acceda al mismo para realizar diferentes operaciones: grúas, cubas de hormigón, ….

Todos estos aspectos comentados, entre otros, conduce a que éstas diferencias existentes entre el periodo obtenido del modelo y el obtenido a través de las observaciones con GPS con su correspondiente análisis de Fourier para series discretas de datos, se puede decir que tanto el instrumental como metodología

propuesta en esta investigación son válidos porque son capaces de determinar las frecuencias fundamentales de la estructura, con una incertidumbre menor del 10%.

El análisis de los datos se ha realizado por zonas independientes, obteniendo el periodo fundamental en cada una de ellas y muy especialmente en aquellos casos en los que no hay acciones externas (sólo cuando las cargas excitadoras son las cargas ambientales), es decir, en las zonas 1, 3 y 5.

Además, en los casos en los que ha habido acciones externas (zonas 2 y 4), se ha comprobado, que el periodo de la estructura volvía a ser el teórico una vez pasado un espacio de tiempo razonable.

Como ya se ha expuesto anteriormente, en una estructura es muy importante tener en cuenta que el periodo es intrínseco a ella y que independientemente de la amplitud, el periodo siempre es constante en vibraciones libres o cuasilibres.

Por ello, se ha comprobado la potencia que tiene el periodo a la hora de realizar el Análisis Modal Operacional en estructuras evolutivas durante sus diferentes fases de construcción, gracias a la alta flexibilidad de las mismas en estas fases.

De hecho, la realización de este análisis ha permitido identificar el periodo propio de vibración del puente, a partir exclusivamente de cargas ambientales (viento), contrastándolo de forma satisfactoria con el obtenido del modelo de cálculo.

Cabe reseñar que el análisis de los resultados frente a otro instrumental no se ha llevado a cabo porque ni si quiera una estructura tan singular como puede ser el nuevo puente sobre la Bahía de Cádiz tiene previsto el instrumental necesario para ello durante su fase de construcción. Con lo que se refuerza la tesis en el sentido de que la técnica propuesta en esta investigación no sólo faculta llevar a cabo el control geométrico clásico de la estructura, sino que a la vez proporciona observables que permiten llevar a cabo un control dinámico de la estructura durante la fase de construcción, algo que actualmente no se hace ni siquiera en estructuras singulares, y que además reporta una información histórica de la estructura que es tremendamente interesante para la fase de explotación y que dado el coste de implementación es fácilmente asumible aunque sea para estructuras no tan relevantes como puede ser la analizada. Aún así, de aquí surge una nueva línea de investigación centrada en llevar a cabo este análisis entre el instrumental y metodología GPS con otro instrumental que se pueda proponer, así como otra encaminada a fijar los criterios para aunar observables por número y zonas.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.

1.- INTRODUCCIÓN.

La presente Tesis, titulada "Contraste metodológico e instrumental en el control geométrico de puentes por empuje de tablero durante su construcción" tiene como objeto analizar los actuales instrumentos y métodos topográficos utilizados en la actualidad para el control geométrico durante la construcción de estructuras evolutivas, entendiendo éstas como estructuras que se van construyendo por fases y en concreto para los puentes empujados, así como proponer otro instrumental y sus correspondientes metodologías (GPS), con el objeto de mejorar la metodología y por ende los resultados con respecto a los obtenidos con la técnica actualmente empleada.

Cabe reseñar que, la propia evolución de la investigación ha llevado al investigador a incurrir en campos que no estaban inicialmente previstos, pudiendo asociar de una forma profunda la geodesia con el análisis dinámico de estructuras, aspecto que el investigador cree que es la principal aportación de esta Tesis, habiendo convertido cada una de las fases de la investigación en un proceso motivado en el ámbito científico y personal.

En esta línea, el presente capítulo se centra en analizar las principales conclusiones y futuras líneas de investigación que emanan del trabajo realizado por el autor de esta Tesis y que puedan servir de referencia para otros investigadores. Así, dado que la investigación intenta contrastar el instrumental y las metodologías clásicas con las que se pueden proponer con GPS, y que fruto de la investigación surge una nueva aplicación no desarrollada actualmente pero que en un futuro próximo puede transformar profundamente los controles geométricos que en la actualidad se realizan durante la construcción de estructuras evolutivas de forma que los datos obtenidos se analicen en tiempo real tanto en el campo de la estática como de la dinámica, el esquema con el que se presentan las conclusiones y las futuras líneas de investigación es el mismo para ambas metodologías.

De este modo, en primera instancia se analizan los controles geométricos que actualmente se llevan a cabo por métodos clásicos (Estación Topográfica). Una vez realizada la investigación se destacan lo que a modo de ver del autor de esta Tesis se pueden considerar los puntos fuertes y débiles de ésta técnica, todo ello con el objeto de plantear otro instrumental y metodología (GPS) que permita la subsanación de los puntos débiles manteniendo las fortalezas iniciales.

En segunda instancia, y en base a la investigación realizada en el entorno del instrumental y métodos GPS para llevar a cabo este tipo de controles geométricos, se resaltan nuevamente los puntos fuertes y débiles de esta técnica, contrastándolos con los de los métodos clásicos. Aunque las conclusiones se centran en los pros y contras del instrumental y metodologías propuestas en general, cabe reseñar que una de las aportaciones más relevantes de la investigación se centra especialmente en la precisión con la que se es capaz de llevar a cabo este tipo de controles con la técnica propuesta.

En tercera y última instancia, derivada de la investigación centrada en los movimientos producidos en torno al punto de equilibrio en la punta de lanzamiento del tablero cuando la velocidad de empuje es nula, se establecen las posibilidades de la técnica propuesta para aprovechar integralmente los observables captados vía GPS y utilizarles en una nueva aplicación que actualmente no se tiene constancia de que se esté aplicando.

Finalmente el capítulo hace referencia a lo que a modo de ver del investigador pueden ser las futuras líneas de investigación, que, como no puede ser de otra forma, se derivan de la investigación realizada y pretenden dirigir el esfuerzo a realizar en futuros trabajos que puedan plantear otros investigadores para dar continuidad a las líneas abiertas en la presente Tesis Doctoral. En este sentido cabe reseñar que como en todo proceso de investigación, y ésta no ha sido diferente, se han ido generando

nuevas líneas no contempladas inicialmente y que llegado el momento el autor tuvo que truncar, con el objeto de cumplir el trámite de presentar la Tesis, pero con las que le hubiese encantado continuar, dada la inquietud científica que provoca siempre la apertura de nuevas líneas de investigación.

2.- CONCLUSIONES.

2.1.- CONTROLES GEOMÉTRICOS CLÁSICOS.

En la actualidad están desarrollados métodos que permiten llevar a cabo controles geométricos clásicos sobre todo tipo de estructuras que durante la fase de explotación así lo requieren. El método se denomina habitualmente Auscultación Geodésica y para alcanzar precisiones de orden milimétrico tiene un nivel de exigencia de elementos participantes, instrumental y observacional difícilmente viable durante la fase de construcción. Esta metodología además genera el inconveniente de requerir una serie de cálculos que hacen inviable muchas veces la toma de decisiones en tiempo real. Todo ello supone un auténtico inconveniente dado que el control geométrico durante la fase de lanzamiento requiere de indicaciones ágiles y precisas por parte del responsable del control geométrico al responsable del empuje, con el objeto de ir controlando la deformada en la punta de lanzamiento según las pautas marcadas en el preceptivo proyecto de empuje.

Las cuestiones anteriores hacen que surjan otras alternativas más simples en cuanto a metodología, instrumental, observaciones, etc. que sacrificando parte de la precisión, sean capaces de resolver en tiempo real la determinación de los movimientos buscados y que en base a una comparación simple, puedan determinar las indicaciones que el topógrafo debe transmitir al responsable del empuje. El método tradicionalmente empleado para el control geométrico durante el empuje de tableros de puente se lleva a cabo mediante un prisma reflector que se ubica en la punta de lanzamiento, emplazado de forma solidaria al tablero, de forma que a través de una única Estación Topográfica y observando desde un pilar con mecanismo de centrado forzoso, permite determinar la trayectoria de la punta de tablero durante todo el proceso y controlar las diferencias con la trayectoria teórica previamente definida en el precitado proyecto de empuje, ya que la flecha debe estar acotada dentro de los márgenes preestablecidos y que en ningún momento se sobrepasen para así evitar sobretensiones en la estructura que podrían llevar a la plastificación de esas secciones del tablero más solicitadas.

Este procedimiento, que actualmente se lleva a cabo cuando se pretende realizar un control geométrico de puentes o viaductos en fase de construcción, tienen una serie de puntos fuertes que la metodología propuesta (GPS) debiera conservar, para que cumpliendo con dichas fortalezas la haga competitiva con las metodologías actuales.

Los principales puntos fuertes de las metodologías clásicas son:

- La Metodología es viable desde un punto de vista de recursos, dado que desaparece la necesidad de tener que emplear dos pilares, dos Estaciones Topográficas con sus correspondientes observadores, etc. convirtiéndola en asumible durante la fase de construcción dado que sólo requiere de un equipo topográfico.
- Información en tiempo real, este procedimiento de control geométrico permite realizar los cálculos sin software específico, lo que faculta en tiempo real al topógrafo llevar a cabo la comparativa entre el resultado real y el teórico e ir dando las indicaciones oportunas al responsable del empuje.
- Tolerancias por debajo de la precisión exigida: tal y como se ha determinado en el capítulo IV de ésta investigación, los rangos de tolerancia en controles geométricos clásicos son fácilmente alcanzables los 2 y 5 milímetros para posicionamientos planimétricos y altimétricos respectivamente, mientras que la precisión exigida en el proyecto de empuje eran 15 y 30 milímetros respectivamente, lo que da idea de que la precisión es perfectamente asumible con la técnica propuesta por métodos clásicos.

Este procedimiento, que actualmente se lleva a cabo cuando se pretende realizar un control geométrico de puentes o viaductos en fase de construcción, tienen una serie de puntos débiles que se deberían corregir en su planteamiento y que desde luego la metodología propuesta (GPS) debiera paliar con el objeto de hacerla más atractiva y conseguir su plena implantación.

De este modo los principales puntos débiles de las metodologías clásicas son:

- Metodología fuertemente dependiente del observador, lo que genera por un lado costes, y por otro la posibilidad del error humano, lo que es más grave. Todo ello sin posibilidad de comprobación, dado que el número de instrumentos, las observaciones y la propia metodología no lo permiten.
- Captación de información discreta, tal y como se puede apreciar en el viaducto de la Miel se tienen aproximadamente 390 puntos de información contrastable con el modelo de deformación teórica en una estructura que mide 370 metros de longitud, lo que viene a representar una información discreta de aproximadamente un punto de control cada metro, pudiendo considerarse adecuado pero que puede ser mejorable.
- Control geométrico de la totalidad del frente de avance del tablero, cuya anchura supera habitualmente los doce metros. Habitualmente se coloca un único prisma en la punta del tablero empujado, lo que sólo permite obtener información relativa a ese punto del tablero. Ahora bien, la flecha en punta se controla con dos puntos de tiro y el tablero puede sufrir torsiones y/o efectos similares que no se podrían detectar. De esta manera la información obtenida puede ser suficiente para el objetivo inicial y tradicionalmente perseguido, pero darse otros fenómenos que no se controlan con dicha información. Esta circunstancia se puede solventar con la colocación de más de un prisma, pero no se tendrían datos en el mismo instante salvo multiplicando el número de instrumentos y observadores proporcionalmente al número de prismas.

A la vista de las ventajas e inconvenientes de la técnica propuesta para llevar a cabo controles geométricos clásicos, parece obvio que la nueva metodología e instrumental propuesto debiera eliminar en gran medida, o por lo menos en parte, los inconvenientes descritos, pero conservando las ventajas de los métodos clásicos. Por todo esto y con el objeto de salvar estos inconvenientes, se propuso en esta investigación suplir los métodos e instrumentos clásicos por la técnica de los Sistemas de Posicionamiento Global, desarrollados y contrastados en los capítulos III y IV de esta investigación.

2.2.- CONTROLES GEOMÉTRICOS CON GPS.

A la vista del planteamiento hecho a lo largo del capítulo III de esta investigación, en el que se justifica la viabilidad teórica para realizar controles geométricos mediante técnicas de observación GPS, en el capítulo IV se procede a llevar a cabo un contraste con datos reales tomados durante el proceso de empuje del Viaducto de la Miel. Durante la planificación de la construcción de dicho viaducto y a la vista de los controles necesarios marcados en el proyecto de empuje, se planteó la posibilidad de realizar el control geométrico en la punta de lanzamiento combinando técnicas clásicas y GPS, dado que en aquel momento (años 2004 y 2005) el GPS en tiempo real se empezaba a utilizar en obra, aunque únicamente en otros tajos con menos responsabilidad en la precisión requerida, como era el control de la ejecución del movimiento de tierras, sin embargo no era conocido ni utilizado en control geométrico de estructuras.

El procedimiento propuesto para realizar controles geométricos en puentes empujados en su fase de construcción con técnicas de observación GPS, contrastado en el capítulo IV de esta investigación, tiene las siguientes fortalezas, que se mantienen e incluso mejoran respecto a las ventajas de los métodos clásicos:

- La Metodología no sólo es viable desde un punto de vista de recursos, sino que además supone una mejora, dado que, aunque el instrumental pueda ser un poco más caro, es necesario disponer de dos equipos GPS (referencia y móvil), desaparece la necesidad de emplear personal. Obviamente el sistema requiere un proceso de implementación y mantenimiento para lo que sí es necesario contar con personal, pero para la fase de observación, que es sin duda alguna la más larga y por tanto la más costosa, no precisa requerimiento de medios humanos, lo que en el cómputo general hace que el consumo de recursos sea menor.
- Información en tiempo real, este procedimiento de control geométrico permite realizar los cálculos a través de un hardware específico que no sólo permite la solución en tiempo real, sino que además con los recursos apropiados permite la monitorización continua del proceso y que sea el propio responsable del empuje el que vaya haciendo el control y las correcciones necesarias.
- Las desviaciones obtenidas se encuentran en el orden de la precisión exigida, tal y como se ha determinado en el capítulo IV de ésta investigación, rondando en el control geométrico con GPS valores de 40 y 15 milímetros para posicionamientos planimétricos y altimétricos respectivamente, mientras que la precisión exigida en el proyecto de empuje eran 15 y 30 milímetros respectivamente como se expuso en el apartado anterior. Al respecto es importante reseñar dos cuestiones:
    - Planimétricamente, como ya se ha comentado anteriormente, es posible que se haya introducido una fuente de error en el propio contraste debido más a la propia observación clásica que en la observación GPS propiamente dicha. Pero aún así y aunque el valor esté por encima de la precisión exigida hay que asumir que es un valor más que tolerable y corregible con los gatos de empuje y con la seguridad adicional de los topes laterales, lo que da idea de que la precisión es perfectamente asumible con la técnica propuesta por métodos clásicos.
    - Altimetricamente, que es sin duda alguna, la fuente de error más preocupante, analizando la tipología del control y los efectos que se pueden producir durante la fase de empuje, la desviación está por debajo de la precisión exigida, lo que garantiza la viabilidad técnica del proceso con el que se propone llevar a cabo el propio control.

En este sentido cabe reseñar que las fortalezas enumeradas para los métodos clásicos, no sólo son mantenidas por las técnicas GPS sino que además son mejoradas. A continuación se analizan las debilidades de los métodos clásicos, con el objeto de poder determinar si el comportamiento de la técnica GPS frente a dichas debilidades permite la corrección de éstas:

- Metodología totalmente independiente del observador, dado que el observador ni siquiera es necesario durante la fase de observación, salvo para las fases de implementación y mantenimiento. Esto genera por un lado la reducción de costes, reducción de riesgo de accidentes y por otro evita la posibilidad del error humano.
- Captación de información continua, tal y como se puede apreciar en el viaducto de la Miel se tienen aproximadamente 6900 puntos de información contrastables con el modelo de deformación teórica en una estructura que mide 370 metros de longitud, correspondiendo aquellos a una longitud de tablero de 200 metros. Lo anterior viene a representar una información cuasi continua dado que se tienen más de 30 puntos de control por cada metro, cuando en los métodos clásicos se tenía un punto por metro aproximadamente, lo que obviamente mejora los datos clásicos. En este sentido se puede destacar

además la capacidad del GPS para observar hasta 1 punto por segundo, aunque en el caso objeto de análisis se grabaron datos cada 20 segundos, con lo que la continuidad incluso puede ser mucho mayor.

- Otra debilidad de los procedimientos para realizar controles geométricos clásicos, se refiere a la dificultad existente para poner más de un prisma reflector y poder detectar efectos de torsión en el frente de empuje. Habitualmente se coloca un único prisma reflector en la punta del tablero, dadas las dificultades que el observador tiene para observar a dos puntos de forma simultánea. Sin embargo con GPS se pueden instalar todas las antenas receptoras que se deseen en los puntos más estratégicos, dado que al no necesitar observadores la fusión de datos se hará de forma automática a través del tiempo. Esto permite obtener información de todos aquellos puntos en los que se considere necesario estudiar la estructura.

Para realizar el contraste entre los procedimientos a llevar a cabo en controles geométricos clásicos y con GPS, se llega al análisis de las ventajas e inconvenientes que demuestra que las técnicas propuestas con GPS, no solamente son igualmente válidas, sino que además mejoran una serie de puntos débiles que los métodos e instrumental clásicos tienen. De este modo, se puede decir de forma simplista que esta es la principal conclusión de la Tesis Doctoral y que da respuesta al objeto planteado inicialmente en la investigación.

Así, puede asegurarse que el objetivo inicialmente planteado en la Tesis se ha cumplido, ya que la metodología e instrumental objeto del contraste ha superado las pruebas que confirman la idoneidad de su uso para el control geométrico de puentes construidos por procedimiento de empuje, pudiendo sustituir las clásicas y complicadas auscultaciones geodésicas planimétricas y altimétricas, o en su defecto los métodos derivados que se vienen haciendo históricamente en la construcción de puentes empujados, por una única técnica (GPS) que reporta los mismos resultados pero con una serie de fortalezas que los métodos clásicos no poseen.

Además, como consecuencia de la monitorización continua mediante instrumental GPS, se ha detectado un movimiento oscilatorio en la punta de lanzamiento en los intervalos de tiempo en el que la velocidad de lanzamiento era nula, aspecto que llevó a la ampliación de las líneas de investigación de esta Tesis Doctoral, centrándose esta segunda línea en el estudio dinámico del tablero. Dado que los datos del viaducto de la Miel estaban tomados cada 20 segundos y era inviable redefinir la captura de dichos datos dado que la obra estaba finalizada, se establece un nuevo ensayo, en este caso en el nuevo puente de la Bahía de Cádiz, en el que la toma datos GPS se realiza cada segundo, con el objeto de analizar la posibilidad de llevar a cabo un Análisis Modal Operacional en fase de construcción para estructuras evolutivas, a partir de la excitación ambiental, en concreto el viento, a través de una auscultación con GPS, y con el objetivo de identificar sus parámetros modales (formas modales, frecuencias naturales y amortiguamiento) y así poder contrastar la bondad del modelo para cada fase de construcción de la obra en cuanto a sus principales parámetros estructurales, todo ello fundamentado en que el periodo de una estructura es intrínseco a ella y que independientemente de la amplitud, el periodo siempre es constante.

2.3.- CONTROLES GEOMÉTRICOS DINÁMICOS CON GPS.

Con los observables tomados mediante GPS en el nuevo puente de la Bahía de Cádiz con un intervalo de un segundo, se ha demostrado que se puede realizar una comprobación dinámica de la estructura, aprovechando la potencia que el dato del periodo de la misma tiene, e irrumpiendo por tanto en el análisis dinámico del puente. El método de resolución se realiza mediante un análisis espectral, dado que los datos obtenidos, cota-tiempo, representan una función en el dominio del tiempo, que, utilizando la transformada de Fourier, se pasa al dominio de la frecuencia, obteniendo los parámetros modales de la estructura.

Por tanto, se realiza un Análisis Modal Operacional en fase de construcción de estructuras evolutivas, a partir de la excitación ambiental (viento), partiendo de los observables GPS, que permiten determinar los parámetros modales de la estructura, que posteriormente son comparados con los del modelo de cálculo teórico en cada fase.

Esta nueva metodología propuesta genera una serie de fortalezas entre las que se pueden destacar las más relevantes:

- Se mejora el control del proceso constructivo debido, en primer lugar, a la existencia de un mayor número de datos, pues la monitorización es continua, de calidad contrastada. En segundo lugar, toda esa información se puede procesar en tiempo real.
- Este tipo de controles se pueden llevar a cabo debido a que a la gran flexibilidad se relaciona con frecuencias bajas (periodos altos), y por tanto hace que sea factible medir movimientos donde casi siempre se han medido velocidades y aceleraciones. De este modo, disponer de estos observables en este tipo de estructuras en fase de construcción permite una comprobación de las secciones en situaciones extremas, aportando, sin coste adicional ya que se puede incorporar el método a las labores propias de la topografía de obra, una mayor garantía de seguridad estructural y por tanto conseguir una estructura de calidad contrastada.
- El procedimiento propuesto, contrastada su validez, abre un nuevo campo dentro de la vibrometría, análisis modal operacional, en la construcción de puentes empujados u otras tipologías similares, con múltiples ventajas:
    - No tiene incremento de coste frente a la instrumentación tradicionalmente utilizada para el control de la construcción de puentes empujados, la Estación Topográfica.
    - Determinada la validez del método vibrométrico propuesto, permite llevar a cabo un análisis de toda la estructura y no sólo el punto donde se mide como pasaba con la Estación Topográfica, que limita sus resultados a meras conclusiones geométricas.
    - El método propuesto no se considera destructivo y por lo tanto es totalmente inocuo para la estructura.
    - Al aprovechar las cargas ambientales (viento) no hay que incorporar ningún elemento excitador externo, que incrementaría el coste de la operativa y podría sobrecargar la estructura. De este modo se está siempre en el campo del OMA y no del EMA.
    - Igualmente, abre un nuevo campo con mucha proyección en la ingeniería civil, salvando los problemas de escala comentados en el capítulo III, y que cuenta con una amplia experiencia en otros campos de la ingeniería como son la aeronáutica y la industrial.
- Existen muchas referencia en relación a la obtención de los parámetros modales de una estructura, aunque en la mayoría de las ocasiones en estructuras en servicio, casi siempre con observaciones obtenidas con acelerómetros y en muy pocas ocasiones con GPS, siendo por tanto esta propuesta novedosa.
- La aplicación de esta técnica sobre estructuras evolutivas, lo convierte en un ensayo ideal. Permite por un lado obtener información con un instrumental (GPS), que es necesario y que se utiliza habitualmente en la obra, lo que libera de tener que adquirir un instrumental específico adicional, y por otro que reporta información adicional desde la concepción de la estructura para el análisis dinámico adecuado, pudiendo constituir una base histórica de la estructura.

- De este modo, los datos así observados permiten diagnosticar la Salud Estructural (Health Monitoring) del tablero gracias a un análisis vibrométrico continuo, ya que este análisis se basa en que una estructura vibra continuamente (bajo excitación ambiental) según sus frecuencias y formas modales conocidas, de forma que si la estructura está afectada de alguna manera por una daño estructural, sus parámetros modales divergerán con respecto a los teóricos. Así por tanto la discordancia en los modos es la que servirá para identificar, cuantificar y localizar el posible daño a partir de los datos GPS tomados de forma discreta a lo largo del tiempo y de los cuales se extraen los datos vibrométricos.

- La obtención de datos dinámicos en el dominio del tiempo, es decir, a partir de la obtención de datos de desplazamiento, tiene ventajas frente a la forma tradicional de realizarlo que es mediante medida de aceleraciones:
  - A priori se evita la doble integración necesaria desde las aceleraciones, consiguiendo a priori más precisión, aunque este extremo debiera ser confirmado como una futura línea de investigación, tal y como se detallará posteriormente.
  - La metodología propuesta evita el trabajo con acelerómetros, siempre son susceptibles de dar problemas en obra debido a la infraestructura que requieren para su correcto funcionamiento (cantidad de cableados, sensibilidades, personal especializado, etc.).

- En el empuje de puentes con torre de atirantamiento, frente a los que se empujan con frente de nariz, se realiza un mayor control de flechas de manera activa, por lo que se hace aún más importante tener conocimiento de las flechas en tiempo real y de manera continua.
- La construcción de puentes o viaductos siempre viene condicionada por el coste de construcción y explotación del mismo, en el que influyen los materiales, la mano de obra, los gastos generales, el proceso constructivo, el beneficio y los costes de conservación, y es precisamente en este último donde esta Tesis aporta dentro del OMA la posibilidad de ahorrar costes.
- Esta forma de control geométrico durante la construcción evolutiva de puentes flexibles, permite realizar pruebas de carga consecutivas a lo largo de toda la obra. Tanto pruebas de carga estáticas, donde los resultados dependen de la rigidez como pruebas de carga dinámicas, donde los resultados dependen de la masa tanto como de la rigidez. Dicho de otro modo, el control geométrico de esta forma diseñado, está realizando simultáneamente un control de flechas y de vibraciones, comprobando características de rigidez y de masa.

  Abundando en lo anterior, la prueba de carga estática sólo comprueba la rigidez y además focalizada solo en los vanos más próximos al punto de medida. Por el contrario, la prueba de carga dinámica integra el comportamiento de toda la estructura, proporcionando conocimiento en tiempo real, sin que haya que esperar a la prueba de carga dinámica preceptiva final del puente para detectar el posible daño, siendo entonces mucho más complicado de localizar, ya que si la comprobación se va haciendo en fases constructivas, sabe inmediatamente el escalón donde no cumple, lo que es un dato fundamental para obtener el origen o causa del fallo.

  Así, con el control de flechas se comprueba la rigidez de la estructura y con las vibraciones se comprueba la rigidez y la masa. Quiere esto decir que en el caso de que se obtenga, por ejemplo, una flecha coincidente con la teórica y una vibración discordante con la prevista se estará ante un problema de masa y no de rigidez.

Esto permite hacer una comprobación de cada una de los segmentos o fases de la estructura a medida que se va ejecutando y por tanto se tiene conocimiento del grado de bondad de las mismas. Al poder conocer y comprobar, como estructura evolutiva, en cada una de las fases el periodo de vibración respecto al teórico, se tiene una historia de todas las fases constructivas y por lo tanto se tiene caracterizada la bondad del modelo y de la correcta ejecución de todas esas fases constructivas, de tal manera que si en cualquier momento se produce una diferencia entre el periodo de vibración teórico y el real, se sabe en tiempo real que existe alguna anomalía durante la construcción, por ejemplo, una sección con error de ejecución, una soldadura deficientemente ejecutada, un exceso de hormigón en la losa, etc., es decir se tiene un alto grado de control durante la ejecución.

- Igualmente esta propuesta de control geométrico, sin incremento de coste como se ha expuesto, daría un valor añadido durante la construcción que ni siquiera en puentes singulares en la actualidad se prevén las comprobaciones dinámicas durante la construcción, dejando éstas para la fase de explotación.

Los resultados obtenidos validan plenamente el procedimiento, y equivale a realizar una prueba de carga dinámica de cada una de los segmentos o fases de la estructura, sin más datos ni más coste que los obtenidos mediante GPS. Permitiendo realizar de forma simultánea el empuje del puente sin tener que recurrir a Estación Topográfica, pero obteniendo la información adicional necesaria para llevar a cabo el OMA. Es decir, conseguir con menos coste, más información, lo que reporta la auténtica aportación de esta investigación, dado que en actualmente no se llevan a cabo este tipo de controles.

3.- FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.

3.1.- LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN CENTRADAS EN LOS SISTEMAS GPS.

La principal línea de investigación que se sugiere a la vista de la investigación realizada en la presente Tesis Doctoral, va en la línea de mejorar la precisión con la que se determinan las coordenadas GPS en tiempo real. En este sentido cabe reseñar que para mejorar la precisión de los posicionamientos con GPS se debiera filtrar el ruido y el sesgo de modelo. Además, sería necesario controlar otros factores, que degradan notablemente la precisión de las observaciones: multitrayecto, difracciones y geometría de los satélites. Incluso mejorar los modelos de medidas de las observaciones tipo Sigma-D, filtros de Kalman en la resolución de las diferencias dobles que tienen en cuenta la existencia de un movimiento lento y pequeña magnitud. Dado que en ésta investigación se parte del dato bruto, tal y como es almacenado por el receptor, y el planteamiento era trabajar en tiempo real, no se ha investigado sobre tal posibilidad, aunque también es previsible que cuanto mejor se tomen los observables, mejor serán los resultados y por tanto más precisión se obtendrá en las determinaciones planteadas.

3.2.- LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN CENTRADAS EN EL CONTROL GEOMÉTRICO.

Las principales líneas de investigación que se pueden sugerir y que emanan de ésta investigación se pueden aglutinar en:

- Actualmente las investigaciones en el Control Geométrico de este tipo de estructuras se ciñen al análisis de uno o como mucho dos puntos de las estructura, en este sentido es muy fácil disponer de más de una antena receptora que pueda informar de todos los puntos que se deseen, pero en este sentido se hace necesario el diseño de los puntos que se pretende observar con el objeto de diseñar la red de antenas receptoras que se deben ubicar en la estructura para controlar no sólo la flecha sino posibles efectos de torsión, giros, etc. Este fenómeno puede ser muy peligroso durante la fase de empuje y actualmente no se considera confiando todo el proceso al análisis de un solo punto, por lo que la línea de investigación se sustentaría por sí misma.

- Contraste entre los resultados obtenidos con GPS y con Acelerómetros para el establecimiento de las frecuencias fundamentales del OMA, todo ello debido a que en esta investigación el contraste se ha centrado entre los resultados obtenidos con GPS y el modelo teórico de cálculo. Este contraste que debiera ratificar lo propuesto en esta investigación no se pudo realizar porque aún siendo una estructura tan simbólica como lo es nuevo puente de la Bahía de Cádiz, no dispuso de acelerómetros durante su fase de construcción, lo que da idea de la innovación de la propuesta realizada. Aún así convendría abrir una nueva línea que al igual que en esta investigación se han contrastado los resultados de dos mediciones con instrumental y metodologías diferentes (Estación Topográfica y GPS) lo hiciera para (GPS y Acelerómetro).

- Una estructura vibra de forma continua según frecuencias y formas modales conocidas. Éstas se pueden obtener, para su posterior contraste con los valores teóricos obtenidos de los modelos de cálculo utilizados en el dimensionamiento de la estructura, a través de diferentes mediciones realizadas sobre la estructura real. En el caso de esta Tesis, se ha obtenido la frecuencia fundamental de una estructura evolutiva a partir de observables captados con GPS, sin embargo se podría estudiar una nueva línea de investigación para la obtención del factor de amortiguamiento de la estructura.

Todas estas líneas de investigación se proponen como futuras debido a que en la actualidad no se tiene constancia de que otros investigadores estén trabajando en ellas, pero que una vez que se encuentren debidamente implementadas, se convertirán

en una técnica habitual que permita tener más información de las grandes estructuras sin coste adicional e incluso con un ahorro de costes, lo que sin duda alguna garantizará su implementación en el tiempo.

FUENTES DE INFORMACIÓN.

1.- LIBROS

[ABRAM-72] ABRAMOVICH, M.; STEGUN, I. (1972). "Handbook of mathematical functions". Dover Publicantions, Inc. New York.

[ARENA-84] ARENAS, J.J., APARICIO, A.C. (1984). "Estribos de puente de tramo recto". Universidad de Santander. E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Santander.

[ARTIG-01] ARTIGAS, M. (2001). "Filosofía de la ciencia". Eunsa S.A. Pamplona. España.

[AUSTI-89] AUSTIN, B. (1989). "Topografía aplicada a la construcción". Editorial Limusa, S.A. México.

[AVILA-01] AVILA ACOSTA, R.B.: Metodología de la investigación. Cómo elaborar la tesis y/o investigación. Lima 2001, Estudios y ediciones R.A.

[BAVAR-79] BAVARESCO, Aura M.: La técnica de la investigación. Cincinnatti, Ohio 1979, South-Western.

[BEHAR-08] BEHAR RIVERO, DANIEL (2008). "Metodología de la Investigación". Ediciones Shalom.

[BENDA-80] BENDAT, J., PIERSOL, A. (1980). "Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis". John Wiley & Sons, NY.

[BLAXT-04] BLAXTER, L., HUGHES, C. y TIGHT, M.: Cómo se hace una investigación. México 2004. Barcelona 2004, Gedisa.

[BOCHE-06] BOCHER, M. (1906). "Introduction to the Theory of Fourier's Series". Annals of Mathematics. Second series, vol. 7, No. 3.

[BOOTH-01] BOOTH, W.C., COLOMB, G.G. y WILLIAM, J.M.: Cómo convertirse en un hábil investigador. Barcelona 2001, Gedisa.

[BOLLE-09] BOLLER, C., CHANG, F.-K., FUJINO, Y. (2009). "Encyclopedia of Structural Health Monitoring". John Wiley & Sons. NY.

[BRACE-99] BRACEWELL, R. (1999) "The Fourier Transform & Its Applications". McGraw-Hill Science/Engineering/Math; 3 edition. Nueva York.

[BUNGE-04] BUNGE, M. (2004). "La investigación científica. Su estrategia y filosofía". Siglo XXI Editores. Mexico.

[CAMPOS-09] CAMPOS ARENAS, Agustín: Métodos mixtos de investigación. Bogotá 2009, Ed. Magisterio.

[CARSL-05] CARSLAW, H. (2005). "Introduction to the theory of Fourier's series and integrals". Ann Arbor, University of Michigan Library. Michigan.

[CASTA-96] CASTAÑEDA JIMÉNEZ, Juan: Métodos de investigación (II). México 1996, McGraw-Hill.

[CEGAR-01] CEGARRA SÁNCHEZ, José: Metodología de la investigación científica y tecnológica. Madrid 2001, Díaz de Santos (ediciones).

[CHUEC-82] CHUECA, M. (1982). "Topografía". Editorial Dossat, S.A. Madrid.

[CHUEC-94] CHUECA, M. et al. (1994). "Redes topográficas y locales". Servicio de Publicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia.

[CHURC-93] CHURCHILL, R., WARD, J. "Fourier series and boundary value problems". Fifth Edition. McGraw-Hill, Inc. Nueva York.

[CLOUG-95] CLOUGH, R., PENZIEN, J. (1995). "Dynamics of structures". Computers & Structures Inc. Berkeley.

[ECO-02] ECO, Humberto: Cómo se hace una tesis. Barcelona 2002, Gedisa.

[EXPOS-81] EXPOSITO, J. (1981). "Topografía mecánica y de estructuras". CEAC. Madrid.

[EWINS-00] EWINS, D. (2000) "Modal Testing: theory, practice and application". Research Studies Press, U.K.

[FAN-05] FAN, H. (2005). "Theoretical Geodesy". Royal Institute of Technology. Stockholm.

[FAN-05] FAN, H. (2005). "Theory of Errors and Least Squares Adjustment". Royal Institute of Technology. Stockholm.

[FERRE-91] FERRER, R.; PIÑA, B. (1991). "Introducción a la Topografía". Servicio de Publicaciones de la E.T.S.I. de Caminos, Canales y Puertos de Santander.

[FERRE-91] FERRER, R.; PIÑA, B. (1991). "Instrumentos topográficos". Servicio de Publicaciones de la E.T.S.I. de Caminos, Canales y Puertos de Santander.

[FERRE-91] FERRER, R.; PIÑA, B. (1991). "Metodologías topográficas". Servicio de Publicaciones de la E.T.S.I. de Caminos, Canales y Puertos de Santander.

[FERRE-91] FERRER, R.; PIÑA, B. (1991). "Topografía de proyectos y obras". Servicio de Publicaciones de la E.T.S.I. de Caminos, Canales y Puertos de Santander.

[FERRE-91] FERRER, R. et al. (1991). "Distanciometría electrónica de alta precisión". Servicio de Publicaciones de la E.T.S.I. de Caminos, Canales y Puertos de Santander.

[FERRE-92] FERRER, R. (1992). "Mediciones en torno a pequeños desplazamientos que se producen en estructuras y suelos de marcado interés en la Ingeniería Civil (presas, muros, taludes, ...)". Servicio de Publicaciones de la E.T.S.I. de Caminos, Canales y Puertos de Santander.

[FERRE-92] FERRER, R. et al. (1992). "Topografía aplicada a la Ingeniería Civil". Servicio de Publicaciones de la E.T.S.I. de Caminos, Canales y Puertos de Santander.

[FERRE-92] FERRER, R.; PIÑA, B. (1992). "Geodesia geométrica". Servicio de Publicaciones de la E.T.S de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Santander.

[FERRE-96] FERRER, R.; PIÑA, B. (1996). "Topografía aplicada a la Ingeniería". Instituto Geográfico Nacional de Madrid.

[FERRE-98] FERRER, R.; VALVERDE, A. (1998) "Cartografía, Geodesia y Fotogrametría". Servicio de Publicaciones de la E.T.S.I. de Caminos, Canales y Puertos de Santander.

[FERRE-00] FERRER, R., PIÑA, B. (2000). "Topografía aplicada". Servicio de Publicaciones de la E.T.S.I. de Caminos, Canales y Puertos de Santander.

[FRAIL-12] FRAILE MORA, J., GARCIA GUTIERREZ, P., FRAILE ARDANUY, J. (2012). "Instrumentación aplicada a la ingeniería". Ibergaceta Publicaciones S.L.. Madrid.

[GOMEZ-09] GÓMEZ, Marcelo M.: Introducción a la metodología de la investigación científica. Córdoba 2009, Ed. Brujas.

[GÖHLE-92] GÖHLER, B., PEARSON, B. (2000). "Incrementally launched bridges. Design and Construction". Ernst - Sohn. Australia.

[GUAZM-04] GUAZMAYÁN RUIZ, Carlos: Introducción a la investigación científica. Bogotá 2004, Ed. Magisterio.

[HAROL-83] HAROLD I. BROWN (1983). "La nueva filosofía de la Ciencia". Editorial Tecnos. Madrid.

[HERRE-12] HERRERO UCEDA, E., HERRERO UCEDA, M. (2012) "Mi Extremadura. La cultura rural". Editorial Elam. Madrid.

[HOFMA-01] HOFMANN-WELLENHOF, B., LICHTENEGGER, H., COLLINS, J. (2001). "Global positioning system: theory and practice". Springer – Verlag. Viena.

[HOFMA-08] HOFMANN-WELLENHOF, B., LICHTENEGGER, H., WASLE, E. (2008). "GNSS-Global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, GALILEO and more". Springer – Verlag. Viena.

[HOWEL-01] HOWELL, K. (2001). "Principles of Fourier analysis". CRC Press 1 edition. Manchester.

[JAMES-11] JAMES, J. (2011). "A student's guide to Fourier transform". Cambridge University Press; 3 edition. Cambridge.

[LATOR-03] LATORRE, A., DEL RINCON, D., ARNAL, J. (2003). "Bases metodológicas de la investigación educativa". Ediciones Experiencia. Barcelona.

[LEICA-06] LEICA GEOSYSTEMS (2006). "Leica ScanStation HDS3000, Manual de Usuario". Edita Leica Geosystems.

[LEICK-04] LEICK, A., RAPOPORT, L., TATARNIKOV, D. (2004). "GPS Satellite Surveying". John Wiley & Sons. Nueva Jersey.

[LOPEZ-93] LOPEZ-CUERVO, S. (1993). "Topografía". Mundi-prensa. Madrid.

[MARTI-00] MARTIN ASÍN, F. (2008). "Geodesia y cartografía matemática". Paraninfo. Madrid.

[MARTI-87] MARTIN, L. (1987). "Topografía y replanteos". Editorial Romargraf. Barcelona.

[MEDIN-03] MEDINA, R., CASTILLO, S. (2003). "Metodologías para la realización de proyectos de investigación y tesis doctorales". Editorial Universitas S.A. Madrid.

[MORIT-84] MORITZ, H. (1984). "Sistemas de referencia en Geodesia". Curso de

Geodesia Superior. (Instituto de Astronomía y Geodesia). Madrid.

[MUSSI-87] MUSSIO, L. (1987). "Estrategias de cálculo del método de colocación y ejemplos calculados". IV Curso de Geodesia Superior. (Instituto Geográfico Nacional). Madrid.

[OJEDA-84] OJEDA, J. L. (1984). "Métodos topográficos y oficina técnica". Edición del autor. Madrid.

[ORAN-74] ORAN, E. (1974). "The fast Fourier transform". Prentice-Hall Inc, Englewood Cliffs, New Jersey.

[ORTEG-64] ORTEGA Y GASSET, J. (1964). "Obras completas – Tomo V". Revista de Occidente. Madrid.

[PAPOU-62] PAPOULIS, A. (1962). "The Fourier integral and its applications". McGraw-Hill Book Company, Inc. Nueva York.

[PRICE-85] PRICE, J. (1985). "Fourier techniques and applications". Plenum Press. New York.

[PORTE-90] PORTER, M.E. (1990). "The Competitive Advantage of Nations". Free Press. New York.

[ROSIG-02] ROSIGNOLI, M. (2002). "Bridge launching". Thomas Teldford. Universidad de Michigan.

[RUEGE-90] RUEGER, J. M. (1990). "Electronic distance measurement: An introduction". Springer Verlag. New York, USA.

[SANDO-82] SANDOVER, J.A. (1982). "Topografía". Editorial Continental. México.

[SANSO-87] SANSO, F. (1987). "Problemas de contorno de la Geodesia Física". IV Curso de Geodesia Superior. (Instituto de Astronomía y Geodesia). Madrid.

[SANSO-05] SANSO, F.; GIL, A. (2005). "Geodetic deformation monitoring from geophysical to engineering roles". Editions Springer Verlag. Jaén.

[SANTO-88] SANTOS, A. (1988). "Topografía y replanteo de obras de Ingeniería". Edición del Colegio de Ingenieros Técnicos en Topografía de Madrid.

[SANTO-93] SANTOS, A. (1993). "Replanteo y control de presas de embalse". Edición del Colegio de Ingenieros Técnicos en Topografia de Madrid.

[SCHUM-78] SCHUMPETER, J. (1978). "Teoría del desenvolvimiento económico". Fondo de Cultura Económica. Mexico.

[SEEBE-93] SEEBER, G. (1993). "Satellite Geodesy Foundations, Methods and Applications". Wlater de Gruyter. Berlín, New York.

[SEVIL-87] SEVILLA, M.J. (1987). "Colocación mínimos cuadrados". IV Curso de Geodesia Superior. (Instituto de Astronomía y Geofísica). Madrid.

[SEVIL-87] SEVILLA, M.J. (1987)."Introducción al problema clásico de Molodensky". IV Curso de Geodesia Superior. (Instituto de Astronomía y Geodesia). Madrid.

[SERVI-56] SERVICIO GEOGRAFICO DEL EJERCITO (1956). "Complementos de geodesia matemática". S.G.E. Madrid.

[SIERR-86] SIERRA, R. (1986). "Tesis doctorales y trabajos de investigación científica". Editorial Thomson. Madrid.

[SUMDA-80] SUMDAKOV, Y.A. (1980). "Trabajos geodésicos en la construcción de grandes obras industriales y altos edificios". Editorial Mir. Moscú.

[TORGE-83] TORGE, W. (1983). "Geodesia". Ediciones Diana Técnico. México.

[TORRE-07] TORRES BARDALES, C. (2007). "Orientaciones Básicas de Metodología de Investigación Científica". Editorial San Marcos. Lima.

[TORRO-08] TORROJA MIRET, E. (2008) "Razón y ser de los tipos estructurales". Editorial Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid.

[UNIVE-08] UNIVERSIDAD DE LIMA - Fondo Editorial (2008). Guía para el desarrollo de proyectos de investigación, Lima.

[VALDE-93] VALDES, F. (1993). "Topografía". CEAC. Madrid.

[WALTH-99] WALTHER, R., HOURIET, B., ISLER, W., MOIA, P., KLEIN, J.F. (1999). "Cable stayed bridges". Thomas Telford. Londres.

[WOLFG-83] WOLFGANG, J. (1983). "Geodesia". Editorial Diana. México.

2.- ARTÍCULOS.

[ALONS-02] ALONSO, M. et al. (2002). "Levantamiento de la cúpula de la Basílica del Monasterio de San Lorenzo de El Escorial. Aplicación experimental de la estación total de lectura directa". Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos en Topografía de Madrid. Topografía y Cartografía, Nº110, pp:19-33.

[BAARD-68] BAARDA, W. (1968). "A Testing Procedure for Use in Geodetic Networks". Neth. Geodetic Commision, Nº5.

[BAARD-77] BAARDA, W. (1977). "S-Transformations and Criterium Matrices". Neth. Geodetic Commision, New Series, 5, No. 1.

[BRAVO-05] BRAVO, A. (2005). "Topografía de alta definición HDS: Aplicaciones y entregas". Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos en Topografía de Madrid. Topografía y Cartografía, Nº128, pp: 56-62.

[CELEB-99] CELEBI, M., PRESCOTT, W., STEIN, R., HUDNUT, K., BEHR, J., WILSON, S. (1999). "GPS Monitoring of dynamic behaviour of long period structures". Earthquake Spectra, Volume 15, nº 1.

[COOLE-65] COOLEY, J., TUKEY, J. (1965) "An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series". Mathematics of Computation, 19(90), 297-301.

[RODRIG-10] RODRIGUES, C., ARMINDO, C.F., FIGUEIRAS, J. (2010). "Development of a long-term monitoring system based on FBG sensors applied to concrete bridges". Engineering Structures 32 – ScienceDirect Elsevier.

[CHAN-06] CHAN, T.H.T., TAM, H.Y., CHAN, P.C.L. (2006). "Vertical displacement measurements for highway bridge using optical devices/sensors. A preliminary study". Department of Civil and Structural Engineering. The Hong Kong Polytechnic Univesity. Hung Hom. Kowloon. Hong Kong.

[CUNHA-06] CUNHA, A., CAETANO, E. (2006) "Experimental Modal Analysis of Civil Engineering Structures". Sound and Vibration, 6(40), 12-20.

[DELUI-05] DE LUIS RUIZ, J.M. et al. (2005). "Geodesic inspections using distance measurements. Application to La Cohilla Dam (Cantabria, Spain)". Geodetic deformation monitoring: from geophysical to engineering roles. Pp: 270-277.

[FRITZ-09] FRITZEN, C.P., KRAEMER, P. (2009). "Self-diagnosis of Smart structures based on dynamical properties". Department of Mechanical Engineering, University of Siegen, 57076 Siegen, Germany.

[HUDNU-98] HUDNUT, K., BEHR, J. (1998). "Continuous GPS monitoring of Structural Deformation at Pacoima Dam, California". Seismological Research Letters vol. 69 No. 4 pp. 299-308.

[KALOO-14] KALOOP, M.R., KIM, D. (2014). "GPS-structural health monitoring of a long span bridge using neural network adaptive filter". Survey Review. Vol- 46. Nº 334.

[KOGAN-08] KOGAN, M.G., KIM, W., BOCK, Y., SMYTH, W. (2008). "Load Response on a Large Suspension Bridge during the NYC Marathon Revealed by GPS and Accelerometers". Seismological Research Letters Volume 79, Number 1 - January/February 2008

[OGAJA-01] OGAJA, C., RIZOS, C., WANG, J., BROWNJOHN, J.(2001), "A dynamic GPS system for on-line structural monitoring". Satellite Navigation and Positioning Group School of Geomatic Engineering, University of New South Wales Sydney NSW 2052 AUSTRALIA

[PSIMO-07] PSIMOULIS, P., PYTHAROULI, S., KARAMBALIS, D., STIROS, S. (2007), "Potencial of global positioning system (GPS) to measure freuencies of oscillations of engineering structures". Deparment of Civil Engineering, Geodesy Laboratory, Patras University. Greece.

[PSIMO-11] PSIMOULIS, P., STIROS, S. (2011), "A supervised learning computer-based algorithm to derive the amplitude of oscilations of structures using noisy GPS and Robotic Theodolites (RTS) records". Deparment of Civil Engineering, Geodesy Laboratory, Patras University. Greece.

[TINGH-12] TING-HUA, Y., LI, H., GU, M. (2012). "Recent research and applications of GPS-based monitoring technology for high-rise structures". STRUCTURAL CONTROL AND HEALTH MONITORING.

[SUN-00] SUN G.Q.; RANSON, K.J. (2000). "Modeling LIDAR returns from forest canopies". IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Nº38, pp: 2617-2626.

[UTRIL-07] UTRILLAS, J.L.; SANCHEZ, F.J. (2007). "Reflexiones sobre seguridad y auscultación en presas de materiales sueltos". Ingeniería Civil, Nº144, pp: 111-116.

[VOSSE-03] VOSSELMAN, G. (2003). "3D reconstruction of roads and trees for city modeling". International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vil.34, Part. 3/W13, pp: 231-236. Alemania.
[WEICH-90] WEICHEL, H. (1990). "Laser beam propagation in the atmosphere". SPIE Optical Engineering Press. 98 pages.

[XIAOJ-06] XIAOJING, L., RIZOS, C., GE, L., AMBIKAIRAJAH, E., TAMURA, Y., YOSHIDA, A. (2006). "Building Monitors. The Complementary Characteristics of GPS and Accelerometers in Monitoring Structural Deformation". INSIDE GNSS.

3.- CONGRESOS.

[ABDEL-1985] ABDEL-GHAFFAR, A. M., SCANLAN, R. H. (1985) "Ambient Vibration Studies of the Golden Gate Bridge: I. Suspended Structure and II. Pier-Tower Structure". ASCE Journal of Engineering Mechanics, 111(4), 463-499.

[ALAMP-98] ALAMPALLI, H. (1998). "Influence of in-service Environmental on Modal Parameters". International Modal Analysis Conference, Santa Barbara, CA, USA.

[BIHTE-10] BIHTER, E. (2010). "Evaluation of High-Precision Sensors in Structural Monitoring". SENSORS 2010, 10, 10803-10827

[BRINC-07] BRINCKER, R., ANDERSEN, P., JACOBSEN, N. (2007). "Automated Frequency Domain Decomposition for Operational Modal Analysis". 25 th International Modal Analysis Conference, Orlando, Florida, USA.

[BRINC-00] BRINCKER, R., ZHANG, L., ANDERSEN, P. (2000) "Modal Identification from Ambient Responses Using Frequency Domain Decomposition". 18 th International Modal Analysis Conference, San Antonio, USA.

[BROWN-07] BROWNJOHN, J. (2007). "Structural Health Monitoring of Civil Infrastructures". Philosophical Transactions of The Royal Society A, 365(1851), 589-622.

[CANTIE-05] CANTIENI, R. (2005). "Experimental Methods used in System Identification of Civil Engineering Structures". International Operational Modal Analysis Conference, Copenhagen, Denmark.

[CUNHA-06] CUNHA, A., CAETANO, E., MAGALHAES, F., MOUTINHO, C. (2006)." From input-output to output-only modal identification of civil engineering structures". Structural Assessment Monitoring and Control. Final report 2006.

[LAROC-05] LAROCCA, A.P., SCHAAL, R., SANTOS, M., LANGLEY, R. (2005). "Dynamic Monitoring of Structures at the Millimeter Level: GPS versus Displacement Transducers and Accelerometers – A Summary ". ION GNSS 18th Interntational Technical Meeting of the Satellite Division. Long Beach, CA.

[LAROC-06] LAROCCA, A.P., SCHAAL, R., SANTOS, M., LANGLEY, R. (2006). "Analyzing the Dynamic Behavior of Suspension Bridge Towers Using GPS". ION GNSS 19th Interntational Technical Meeting of the Satellite Division. Forth Worth. TX.

[XIAOJ-04] XIAOJING, L. (2004). "The Advantage of an Integrated RTK-GPS System in Monitoring Structural Deformation". Journal of Global Positioning Systems. Vol. 33, No.1-2:191-199.

[XIAOJ-06] XIAOJING, L., RIZOS, C., GE, L., AMBIKAIRAJAH, E., TAMURA, Y., YOSHIDA, A. (2006). "Full-scale structural monitoring using an integrated GPS and accelerometer system". GPS Solut (2006) 10:233-247.

[BOROS-02] BOROSCHEK, R.L., SOTO, P. (2002). "Variación de las propiedades dinámicas de un edificio instrumentado en sismos leves y moderados". VIII Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica, Valparaíso, Abril, 2002.

[BOROS-04] BOROSCHEK, R.L. (2004). "Some Characteristics of Strong Motion Records on Structures that Exhibited Permanent Displacements". COSMOS Workshop on Strong Motion Record Processing, Pacific Earthquake Engineering Research Center, California,

Mayo 26 – 27, 2004.

[BOROS-04] BOROSCHEK, R.L., COMTE, D. (2004). "Time-Frequency Characteristics of the 2001 Southern Peru, Mw=8.4, Earthquake". Paper No. 287,13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C., Canada, August 1-6, 2004

[CELEB-07] CELEBI, M. (2007). "Health monitoring of buildings using threshold drift ratios - now an established method". The 3rd International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure Vancouver, British Columbia, Canada November 13-16, 2007

[CELEB-00] CELEBI, M. (2000). "GPS in dynamic monitoring of long-period structures". 12WCEE 2000 : 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, Sunday 30 January - Friday 4 February 2000.

[CHASE-07] CHASE, J.G., SINGH-LEVETT, I., HANN, C.E., CHEN, X. (2007). "Real Time Integral-Based Structural Health Monitoring". The 2nd International Conference on Sensing Technology ICST 2007.

[DELUI-05] DE LUIS, J.M. et al. (2005). "Geodesic inspections using distance measurements. Application to La Cohilla Dam (Cantabria, Spain)". International Symposium of Geodetic deformation monitoring: from geophysical to engineering roles. Jaén.

[GARCIA-93] GARCIA-ASENJO, L. (1993). "Descripción, aplicaciones y uso de un equipo básico de DGPS en tiempo real". Topografía y Cartografía, vol. 9, nº 56.

[GOMEZ-04] GÓMEZ, R.et al. (2004). "Las nuevas tecnologías en el modelado y representación geométrica tridimensional". Congreso de Topografía y Cartografía TOP-CAR. Madrid.

[GORTE-02] GORTE, B. (2002). "Segmentation of TIN structured surface models". Joined Conference on Geospatial Theory, Proccesing and Applications. Canadá.

[IAVAR-03] IAVARONE, A., VAGNERS, D. (2003). "Sensor Fusion: Generating 3D by Combining Airborne and Tripod-Mounted LIDAR data". FIG Working Week. Paris, France.

[LINDE-05] LINDENBERGH, N.; RABBANI, T. (2005). "Análisis de la exactitud del Leica HDS3000 y viabilidad de la supervisión de deformación del túnel Roderik". Workshop Laser Scanning 2005.

[LUO-08] LUO, D. et al. (2008). "Identifying planar features by integrating point cloud and images". International Conference on Earth Observation Data Processing and Analysis (ICEODPA).

[MATSU-06] MATSUDA, H., SHIMIZU, N. (2006). "Assessment of rock slope stability based on the three-dimensional continuous displacement monitoring by Global Positioning System". International Journal of the Japanese Committee for Rock Mechanics. Volume 2. Number 1. October, 2006. pp. 17-20.

[PSIMO-13] PSIMOULIS, P., STIROS, S. (2013), "Measuring Deflections of a Short-Span Railway Bridge Using a Robotic Total Station". Journal of Bridge Engineering.

[REMON-85] REMONDI, B.W. (1985). "Global positioning system carrier phase. Description and use". Bulletin Geodesique, nº 59.

[RIZOS-08] RIZOS, C., LI, X., GE, L., TAMURA, Y., YOSHIDA, A. (2008). "How far could GPS go in monitoring structural response to wind events?". LNEC, 12-15 de Mayo. Lisboa 2008.

[SINGH-09] SINGH-LEVETT, I., HANN, C.E., DEAM, B.L., MANDER, J.B., CHASE, G. (2009). "Real-Time System Identification of a Nonlinear Four-Story Steel Frame Structure—Application to Structural Health Monitoring". IEEE SENSORS JOURNAL, VOL. 9, NO. 11, NOVEMBER 2009.

[SHINO-06] SHINOZUKA, M., LEE, J.J., CHO, S., YUN, C., LEE, C., LEE, W. (2006). "Evaluation of Bridge Load Carrying Capacity Based on Dynamic Displacement Measurement Using Real-time Image Processing Techniques". STEEL STRUCTURE.

[YOUSO-13] YOUSOK, K., CHOI, S.W, KIM, S., PARK, J.H., SOHN, H.G., PARK, H.S. (2013). "Evaluation of Stiffness Changes in a High-Rise Building by Measurements of Lateral Displacements Using GPS Technology". SENSORS 2013, 13, 15489-15503.

4.- CURSOS Y SEMINARIOS.

[ALVAR-05] ALVAREZ, J., LORENTE, G., FALCÓN, S., TARQUIS, F., ARCEDIANO, C., MARTÍN, M., LUCAS, C., PATIÑO, M., SIERRA, P. (Marzo 2005) "Curso de estructuras de obra civil". Dirección Técnica de Dragados. Nerja.

[BRINC-08] BRINCKER, R. (2008). "Recent advances of Operational Modal Analysis and applications in Structural Health Monitoring Part one (OMA)". Aalborg University. Dinamarca.

[LAROC-03] LAROCCA, A.P., SCHAAL, R., SANTOS, M. (2003). "The Use of GPS in Civil Engineering as a Tool for Monitoring Structural Oscillations of Bridges". Monitoring displacements by GPS Technology. Aplications on Engineering.

[PEREZ-96] PEREZ GUTIERREZ, M. (1996). "Geodesia espacial". Universidad de Salamanca.

[TARQU-05] TARQUIS, F. (Marzo 2005). "Los puentes, su ejecución". Dirección técnica de Dragados. Nerja.

5.- TESIS DOCTORALES

[CARRIE-09] CARRIERI, M. (2009). "Comparing different strategies for mining settlements measurements with GPS". Universidad Politécnica de Cataluña. Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartografía y Geofísica. Barcelona

[DELUI-09] DE LUIS RUIZ, JULIO M. (2009). "Contraste en la ejecución de auscultaciones geodésicas por métodos clásicos y con láser escáner.". Universidad de Cantabria. Departamento de Ingeniería Geográfica y Técnicas de Expresión Gráfica. Santander.

[PERED-10] PEREDA GARCIA, RAUL (2010). "Definición y corrección de las fuentes de incertidumbre en las batimetrías de detalle. Análisis de las lecturas de ecosonda y los modelos digitales de fondos sumergidos". Universidad de Cantabria. Departamento de Ingeniería Geográfica y Técnicas de Expresión Gráfica. Santander.