

---

**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA  
Y TÉCNICAS DE EXPRESIÓN GRÁFICA**



**TESIS DOCTORAL**

***Contraste en la ejecución de  
auscultaciones geodésicas por  
métodos clásicos y con láser escáner.***

**Autor:**

**JULIO MANUEL DE LUIS RUIZ**

**Director:**

**BENJAMÍN PIÑA PATÓN**

**Santander, Diciembre de 2009**

---

**CAPÍTULO III**  
**EL NUEVO MARCO DE RESOLUCIÓN MEDIANTE**  
**TECNOLOGÍA LÁSER ESCÁNER.**



## 1.- INTRODUCCIÓN.

Para solucionar un gran número de problemas prácticos existentes en muchas áreas de la actividad humana, es habitual realizar medidas para crear modelos del mundo real, a partir de los cuales es posible conseguir un cierto conocimiento sobre los objetos que son medidos y plantear la mejor solución posible para el problema suscitado. Por tanto, se puede asegurar que las informaciones geométrica y temática, obtenidas en el proceso de modelado, forman la base para la toma de decisiones adecuadas. Puesto que la realidad es tridimensional, la captura de la información también lo ha de ser y más hoy, cuando el nivel del desarrollo técnico ha permitido procesar y visualizar eficientemente datos tridimensionales.

Por otro lado, es especialmente importante adquirir la información de forma rápida, precisa y con costes mínimos. Para ello, hay que tener en cuenta que los métodos topográficos tradicionales, por ejemplo, estaciones topográficas o GPS (tiempo real), tienen la limitación de permitir sólo la captura de información discreta. Sin embargo, las estaciones topográficas modernas ofrecen la opción de la “exploración”, barriéndose en este caso la superficie con los puntos automáticamente espaciados por el propio sistema, lo que permite acelerar en cierta medida el trabajo de la toma de datos. Los métodos fotogramétricos basados en técnicas digitales son más eficientes, empleándose en la actualidad en la grabación del patrimonio cultural y exámenes arquitectónicos, pero todavía tienen algunas deficiencias, como por ejemplo, el retraso temporal que genera el hecho de que el proceso de la imagen y la orientación son necesarios antes de que el modelo pueda ser utilizado o la dificultad de captación de datos de campo que tienen cuando las condiciones externas se vuelven desfavorables (iluminación escasa, polvo, etc.).

Todo esto justifica la necesidad de implantar una nueva técnica que permita la medida directa y continua sobre objetos de forma tridimensional, y que además cumpla con los condicionantes descritos en el párrafo anterior. Así, a finales de los 90, se empieza a desarrollar una técnica denominada exploración con láser terrestre, que emplea el mismo principio utilizado en la exploración aerotransportada con láser, usada desde mediados de los 90. El valor de la distancia que un explorador láser terrestre puede observar a un punto se determina midiendo el tiempo transcurrido entre la emisión de una señal láser y la detección del regreso de dicha señal, devuelta por la propia superficie del punto.

La aparición de nuevas tecnologías modifica sustancialmente los métodos de trabajo y, por tanto, los resultados, siendo éstos notablemente más satisfactorios. El láser escáner modifica la concepción de levantamiento tridimensional al obtener mediante barrido láser miles de puntos en un corto espacio de tiempo con excelentes precisiones. En base a un escaneado tridimensional de los objetos existentes en el terreno, los productos derivados de la toma de datos son múltiples con precisiones en la posición relativa de los puntos de entre 5 y 10 milímetros, a una distancia menor de 100 metros, dependiendo de la densidad de escaneado y distancia al objeto. La identificación de puntos homólogos en los distintos escaneados por cambio de posición del instrumento se puede hacer, además de con puntos de control sobre el mismo objeto, con escaneados más densos, incluso menores de 1 centímetro de cuadrícula, no siendo necesario el estacionamiento en bases conocidas, pudiéndose realizar éste de forma libre.

Habitualmente se modeliza a partir de nubes de puntos codificados o identificados mediante croquis, y que representan los detalles característicos del territorio u objetos. En el caso de los barredores láser, el barrido por lo general es indiscriminado y, al mismo tiempo, se obtiene una nube de puntos de densidades impensables hasta hace poco tiempo (una fachada de un edificio de 60 x 20 metros, puede suponer una nube de 15 millones de puntos con información posicional y radiométrica), con lo que se

tiene garantizada la captura íntegra del objeto, aunque se dificulta aparentemente el proceso de modelización, debido a la dificultad de interpretación y manejo de tal cantidad de información.

El láser escáner permite la adquisición masiva de datos, configurando hoy en día una tecnología en plena expansión. Analizando estos equipos y metodologías de forma somera se puede apreciar un cambio notable en los principales fundamentos en los que se apoya la clásica representación del territorio. La topografía clásica y la fotogrametría adoptan, por tanto, un enfoque totalmente diferente con la aparición en escena de estas técnicas e instrumentos, como en su día lo hicieron las estaciones topográficas o la fotogrametría digital. Los exploradores topográficos mediante barrido láser vienen a cubrir en parte el hueco que no pudo ocupar la fotogrametría terrestre, al tiempo que suponen una evolución de las estaciones topográficas y, por tanto, de las técnicas topográficas, cuyo fundamento tiene un cien por cien de validez con esta nueva tecnología. En efecto, de cara al levantamiento, todos los aspectos relativos a la planificación, señalización, georreferenciación, transformaciones geométricas, temática, etc., continúan siendo aspectos relativos a la captura de la información espacial.

Este tipo de instrumentos permite obtener una captura de puntos masiva, generando un modelo continuo y tridimensional del territorio independientemente de los criterios del operador. El láser escáner es un sistema de medida y barrido que no necesita contacto directo con el modelo, obteniendo ángulos, distancia y el valor de la reflectancia (factor de reflexión) de la superficie donde incide. El trabajo en post-proceso permite sumar modelos (diferentes nubes de puntos), refinamiento y tratamiento de la información espacial, modelado y salida gráfica o información alfanumérica. El láser escáner obtiene una precisión relativa del orden milimétrico de forma automática, rápida y cómoda, reduciendo así el tiempo de trabajo en campo.

La gestión de la información se garantiza en términos de velocidad de procesado, ligado a la revolución del hardware y diferentes técnicas y algoritmos de compresión, rastreo, etc., implementados en los paquetes de modelización, no siendo en la actualidad excesivamente complejo el manejo de nubes de alta densidad y tamaño. Esto vale de igual modo para el modelizado de la nube de puntos, con la evolución de los algoritmos de tratamiento en espacios tridimensionales que permitan la geometrización de formas, depuración y eliminación de ruido, ajuste de entidades gráficas tridimensionales básicas y complejas, etc. Por tanto, el aspecto clave en el futuro desarrollo y utilización de los barredores láser está ligado a la evolución del software, el cual en la actualidad permite manejar y modelizar la nube de puntos en formatos tridimensional o bidimensional clásico, por lo que hay que empezar a olvidar las técnicas de representación clásicas y pensar exclusivamente en espacios virtuales tridimensionales, que permitan fácilmente cualquier tipo de representación convencional.

La aplicación de esta nueva tecnología se presenta como la mejor alternativa para cubrir las expectativas de rapidez y comodidad en la captura de observables que posibilite el desarrollo de bases de datos realmente fieles, que permita conservar en formato digital la información suficiente para el mantenimiento e incluso la reconstrucción del objeto tomado. Los sistemas de medición láser 3D se dividen en dos grupos atendiendo al sistema utilizado para la medida de distancias:

- El primer grupo utiliza técnicas indirectas. Un haz láser fuertemente colimado recorre el blanco, mientras una cámara sigue los movimientos del haz sobre el modelo y calcula el paralaje de cada punto, obteniendo la distancia escáner-objeto. Este tipo de observación genera precisiones en la medida de distancias en el entorno de las décimas de milímetro a base de sacrificar el alcance que en la mayor parte de los casos oscila entre 2 y 4 metros.
- El segundo grupo se fundamenta en los sistemas directos de medida, la mayoría de los cuales utilizan distanciómetros basados en un concepto denominado “tiempo de vuelo” de

un pulso de luz emitido por un láser que es reflejado al incidir sobre el blanco. Estableciendo el retardo entre la emisión y la recepción de la señal se calcula la distancia al objeto o punto cuestión con unos alcances que para 100 metros consiguen precisiones entre 3 y 4 milímetros.

Se puede considerar que los sistemas de medición láser 3D, basados en el tiempo de vuelo, se pueden equiparar a estaciones topográficas motorizadas y con equipos de medida de distancias sin prisma. El equipo realiza un barrido automático midiendo distancias sobre un patrón previamente definido en el que unos codificadores determinan además los ángulos horizontales y verticales de la proyección de pulso, obteniéndose con los valores angulares y la distancia establecida las coordenadas locales de cada punto observado.

Para la mayoría de las situaciones, un solo escaneo no suele producir un modelo completo del objeto. Para ello se realizan múltiples escaneos, en muchas direcciones diferentes, y que tienen que ser introducidos en un sistema común de referencia, un proceso que se llama generalmente la alineación, uniéndose para crear un modelo completo.

El uso de sistemas láser escáner terrestres para la realización de levantamientos cartográficos y no cartográficos, desde laderas o minas a cielo abierto a levantamientos arquitectónicos, es cada vez más usual en el ámbito topográfico. Por ello, se cree que es fundamental conocer el comportamiento y la precisión real que ofrecen estos sistemas láser ante diferentes condiciones de trabajo, como son la distancia al objeto, el ángulo de incidencia sobre el elemento a levantar y el tipo de material que lo constituye (color-textura), todo ello para un determinado tipo de láser (longitud de onda determinado).

La auténtica limitación de estos procedimientos no está en el equipo o método de trabajo, sino en la capacidad del ser humano para interpretar representaciones tridimensionales, lo que obliga a realizar un verdadero esfuerzo por parte de los usuarios para entender los resultados que se obtienen.

El instrumental que se pretende describir en la presente memoria configura la base sobre la que se cimentarán en breves años los procedimientos a emplear en el control de todo tipo de estructuras, tan habitual en la actualidad, pero realizado por técnicas clásicas. Este tipo de técnicas basadas en este instrumental tienen como principales ventajas la captura continua y directa de la información que permite determinar la geometría tridimensional del objeto. Otras ventajas pueden ser las siguientes:

- Drástica reducción de los tiempos de observación de los datos de campo y, por tanto, de los costes, además de una ejecución mucho más rápida de la representación del objeto.
- Posibilidad para examinar objetos y áreas remotamente, evitando así problemas de accesibilidad o peligrosidad en la captura de la información.
- Posibilidad de escanear objetos muy complejos, donde las técnicas tradicionales no son capaces de generar una información continua tan precisa.
- La captura de los datos de campo son en gran medida independientes de la iluminación ambiental, por lo que se puede explorar de noche.
- La posibilidad de representar “todo” lo que hay en el lugar en el momento de la toma de datos.

El uso de estas técnicas generalmente mejora considerablemente el flujo de trabajo y la calidad de un proyecto en cuanto a su producto final se refiere. Al ser en sí mismo una herramienta que examina muy eficientemente la geometría del objeto, el escaneado láser terrestre revela su capacidad máxima al combinar los resultados con técnicas tradicionales, como supone la integración de cámaras fotográficas con el escáner, lo que permite trazar modelos tridimensionales con modelado de texturas altamente detallados.

Las técnicas de escaneado con equipos láser se pueden emplear en trabajos de alta precisión, como puede ser la supervisión de la deformación en estructuras o similares. Como con cualquier técnica basada en la observación de datos de campo puede ver sus resultados empeorados si los errores provenientes de diferentes causas no son controlados. Puesto que la calidad de los datos en estas técnicas es influenciada por una gran cantidad de factores, es difícil predecir la tolerancia admisible y establecer un modelo de propagación de error, dándose además la circunstancia que al ser una nueva técnica no todos estos factores se han investigado suficientemente hasta ahora, y así la compilación del supuesto del error para las técnicas de exploración con láser está por determinar.

En la actualidad, la precisión del explorador está limitada por los errores sistemáticos instrumentales, lo que implica tener que calibrar el equipo adecuadamente antes de su utilización. Una definición formal del término “calibración” viene dada en el vocabulario internacional de términos básicos y generales en metrología: *“Conjunto de operaciones que establecen, en unas condiciones especificadas, la relación que existe entre los valores indicados por un instrumento o sistema de medida, o los valores representados por una medida materializada y los correspondientes valores conocidos de una magnitud medida. (BIPM 1993)”*.

La calibración de un explorador láser se realiza con los siguientes objetivos básicos:

- Identificación de los errores sistemáticos significativos (parámetros de calibración) en el instrumento.
- Descripción cuantitativa de la exactitud realizable con un instrumento concreto.

Debido a la reciente aparición de este conjunto de técnicas en las que se determina la distancia desde un emisor láser a un objeto o superficie utilizando un haz láser pulsado, no se dispone de un glosario de términos básicos internacionalmente aceptados; aún así, existe una serie de abreviaturas comúnmente aceptadas en la comunidad investigadora:

- TLS: Viene a reflejar todo lo que está en el entorno de escaneado con láser terrestre 3D. Exploración con láser terrestre: *“Uso de un dispositivo terrestre que utiliza un láser para medir los coordenadas 3D, de una región dada de la superficie o de un objeto, de forma continua, automática y estructurada”*.
- ALS: Viene a reflejar todo lo que está en el entorno del escaneado con láser aerotransportado, siendo el más representativo el LIDAR (Laser Imaging Detection And Ranging) que permite el cálculo de la distancia al objeto midiendo el tiempo de retraso entre la emisión del pulso y su detección a través de la señal reflejada.
- TOF: Explorador láser pulsado basado en la determinación de las distancias mediante un mecanismo denominado tiempo de vuelo (Time Of Flight).

En la década de los años 80 aparecieron en escena las estaciones topográficas, en la de los 90 fueron los sistemas de posicionamiento global y en la presente han sido los láser escáner los equipos que han

revolucionado las técnicas de observación y representación del territorio, quedando mucho por hacer en los años venideros, puesto que aunque se han conseguido avances notables en estas disciplinas, todavía quedan por desarrollar todas las metodologías enfocadas al sinfín de usos que se pueden dar a estos equipos.

## 2.- FUNDAMENTO DE LA MEDICIÓN CON RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA.

### 2.1.- LA NATURALEZA DE LA LUZ.

La naturaleza de la luz ha sido un tremendo enigma para el hombre desde sus orígenes. Aproximadamente 500 a.c. los griegos creían que la visión era causada por partículas que emitían los cuerpos luminosos y que posteriormente llegaban al ojo. Sin embargo, filósofos como Platón, Euclides y Tolomeo, creían que era justo lo contrario, es decir, que las partículas salían del ojo para llegar al objeto observado. Alhazen, en Arabia, estaba convencido de que el punto de vista de Aristóteles, que representaba al grupo de los griegos, era el correcto. Se empezó a imponer la teoría que la luz salía de los objetos y al penetrar en el ojo producía la sensación visual.

Isaac Newton (1642-1727) pensó con muy buenos argumentos científicos que la luz estaba formada por corpúsculos de diferentes tamaños y velocidades, que inducían vibraciones en el medio en el que se propagaba la luz, de acuerdo con su tamaño y velocidad. Sin embargo, siempre le quedó la duda de si la luz era en realidad una partícula o una onda, pues conocía los fenómenos de la difracción y de la doble refracción, que no podía explicar.

Francesco Maria Grimaldi (1618-1663) dejó que la luz del sol penetrase en un cuarto oscuro a través de un pequeño agujero en una cartulina, después hizo pasar esta luz a través de otra cartulina perforada, con dimensiones que midió muy cuidadosamente. Descubrió que la luz proyectaba una mancha mayor que la esperada si la propagación de la luz fuera rectilínea, tal y como se muestra en la siguiente figura.

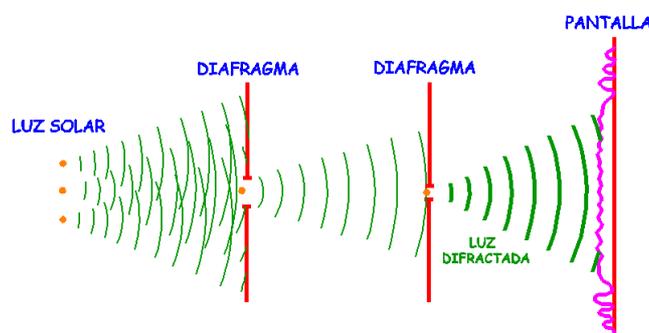


Figura Número III.1.- Experimento que demuestra el fenómeno de la difracción.

Christian Huygens (1629-1695), en 1678 postuló que la naturaleza de la luz era ondulatoria, explicando además la reflexión, la refracción, la interferencia y la difracción, aunque sólo de forma cualitativa.

Robert Hooke (1635-1703), en 1665 descubrió el fenómeno de la interferencia al observar los colores brillantes que surgen en las pompas de jabón y las películas de aceite en agua. Hooke propuso que la luz se propagaba en ondas transversales, introduciendo así el concepto de polarización de la luz, con el que se podía explicar la doble refracción, aunque con los conocimientos de la época era muy difícil de entender.

Thomas Young (1773-1829), describió en 1801 algunos experimentos, entre los cuales el más importante era el de la doble rendija, con lo que demostró la existencia de la interferencia de la luz,

convirtiéndose en uno de los principales defensores de la teoría ondulatoria de la luz, que por aquella época prácticamente había quedado en el olvido. Realizó investigaciones sobre la visión en color, postulando que ésta es debida a que en el ojo existen tres tipos diferentes de receptores, cada uno de ellos sensible a un color diferente: rojo, amarillo o azul, a los que llamó colores primarios, permaneciendo vigente esta teoría con pocas modificaciones hasta hace relativamente poco tiempo.

Etienne-Louis Malus (1775-1812), en 1809 descubrió la polarización de la luz por medio de la reflexión al observar que la luz, al reflejarse en vidrio o agua, presentaba el mismo fenómeno que cada una de las dos imágenes que aparecían por birrefringencia al pasar a través del Espato de Islandia. Este fenómeno consiste en que, al ser observadas las imágenes a través de un segundo trozo de Espato de Islandia, la imagen aparece o desaparece según su orientación. A este fenómeno se le llamó polarización.

Augustin Fresnel (1788-1827), en 1823 realizó el establecimiento definitivo de una teoría ondulatoria transversal de la luz con procedimientos más formales, todo ello en base a los trabajos tanto teóricos como prácticos desarrollados por él mismo. Con su teoría se explicaban todos los fenómenos luminosos hasta entonces conocidos.

Armand Hippolyte Louis Fizeau (1819-1896), en 1849 midió por primera vez de forma directa la velocidad de propagación de la luz. León Foucault probó experimentalmente en 1850 que la velocidad de la luz es menor en un medio denso que en el vacío, obteniendo que el factor en el que se reduce esta velocidad al entrar en un cuerpo transparente es justamente el valor del índice de refracción. Así, se puede calcular el índice de refracción mediante la siguiente expresión:

$$n = \frac{C}{V} \quad \text{[III.1]}$$

donde:

C.- velocidad de la luz en el vacío.

V.- velocidad de la luz en el medio.

James Clerk Maxwell (1831-1879), en 1864 y con la teoría ondulatoria aceptada, planteó su teoría electromagnética de la luz, con la que probó que la luz es una onda electromagnética transversal de la misma naturaleza que las ondas de radio, que aún no se habían descubierto. Tuvo tanto éxito con su teoría que pudo explicar cualitativa y cuantitativamente todos los fenómenos luminosos conocidos entonces y aún predecir otros más. Lo más interesante fue que obtuvo el valor de la velocidad en el vacío calculándola teóricamente a partir de constantes eléctricas conocidas del vacío. En la siguiente figura se puede apreciar la geometría de las diferentes ondas.

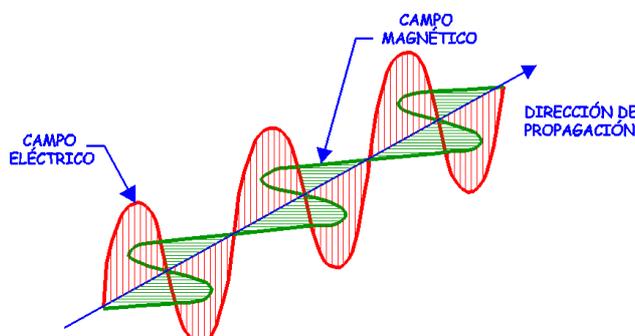


Figura Número III.2.- Onda luminosa con el campo eléctrico vertical y el magnético horizontal.

Un cuerpo cualquiera sometido a calentamiento se caracteriza porque emite radiación, que se caracteriza por las longitudes de onda que se encuentran en todo el espectro posible, dependiendo dicha radiación tanto de la temperatura de calentamiento como del tipo de material del que esté hecho el cuerpo. Si un cuerpo, bien sea por su color o por su forma, absorbe toda la energía luminosa que le llega, se denomina en física "*cuerpo negro*". Ahora bien, el espectro de la radiación luminosa emitida por un cuerpo negro depende solamente de su temperatura y no del material del que esté hecho. Esta distribución o espectro tiene la forma representada en la siguiente figura.

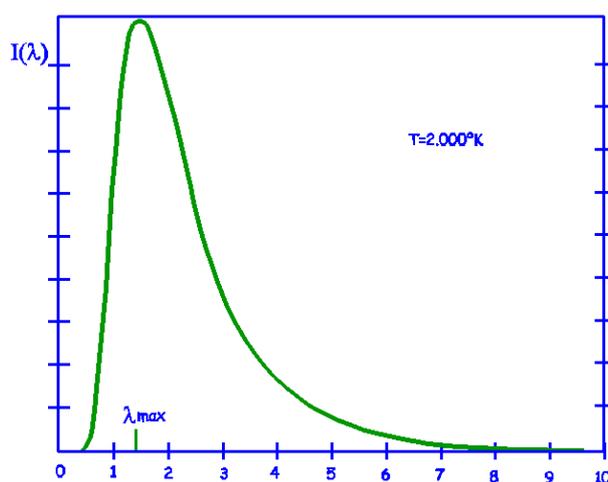


Figura Número III.3.- Espectro de emisión del cuerpo negro, longitud de onda en micras.

Max Planck (1858-1947), en 1895 envió un artículo a la Physical Society de Berlín, en el que exponía una explicación exacta de la forma del espectro de la radiación del cuerpo negro. Esta teoría incluía un concepto revolucionario: el "*cuánto*" de energía luminosa, más tarde denominado "*fotón*", cuyo concepto no dejaba de ser una mera necesidad matemática, para poder obtener el resultado correcto de su teoría, aunque no pudo darle la interpretación física correcta. Según este concepto, la cantidad más pequeña en la que se puede fragmentar o dividir la energía luminosa tiene un valor que depende de la frecuencia  $\nu$ , según la relación:

$$E = h \cdot \nu \quad \text{[III.2]}$$

donde:

h.- constante universal de Planck.

$\nu$ .- frecuencia.

Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894), descubridor de las ondas de radio, encontró también el efecto fotoeléctrico, que consiste en la expulsión de electrones de un metal cuando incide un haz luminoso sobre él. La energía cinética de los electrones expulsados era tanto mayor cuanto mayor era la frecuencia de la luz que iluminaba el metal. Ninguna teoría física de la época podía explicar este fenómeno. La explicación satisfactoria tanto cualitativa como cuantitativa de este efecto la proporcionó Albert Einstein, quien postuló que la luz está formada por unas partículas a las que G. N. Lewis llamó fotones en 1923. Los fotones tienen una energía que depende de la frecuencia, de la misma manera que los cuantos de Planck. Esta teoría completaba muy bien la de la radiación del cuerpo negro de Planck. Con esto quedaba bien cimentado por primera vez el concepto de fotón.

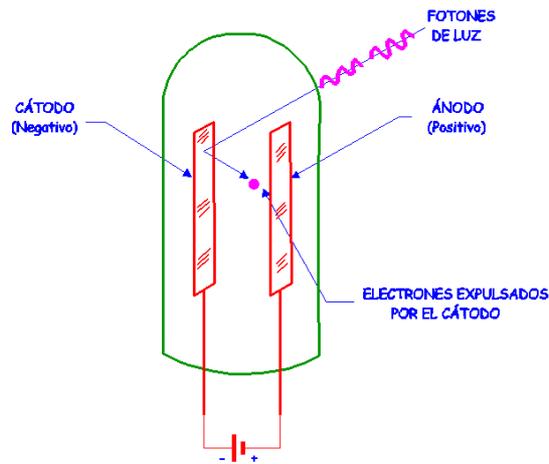


Figura Número III.4.- Efecto fotoeléctrico.

Se presentaba entonces una doble vía para explicar la naturaleza de la luz muy difícil de concebir, pues no podía ser una onda y al mismo tiempo una partícula. El francés Louis Victor de Broglie (1892-1987) trató de resolver el enigma afirmando que onda y corpúsculo son dos manifestaciones diferentes del mismo ente, que se presentaban según las circunstancias del experimento. Con ello predecía que los electrones que se suponían que eran partículas, bajo ciertas circunstancias se manifestaban como ondas. Broglie afirmó que la longitud de onda de la onda asociada a una partícula está dada por:

$$\lambda = h/p \quad \text{[III.3]}$$

donde:

h.- constante universal de Planck.

p.- momento lineal de la partícula.

Ahora se sabe que todas las ondas electromagnéticas son de la misma naturaleza y que sólo difieren entre sí por su longitud de onda. La siguiente figura muestra el espectro electromagnético completo, con sus longitudes de onda aproximadas. La dualidad onda-fotón persiste hasta la fecha, pudiendo así hablar de la radiación electromagnética tanto en términos de una onda como de un flujo de fotones. El fotón contiene la cantidad más pequeña de energía  $E$  que se puede aislar de esta radiación, la frecuencia  $\nu$ , y están relacionadas por  $E = h \nu$ . Cuanto más grande es la longitud de onda, más pequeña es la frecuencia y, por lo tanto, más pequeña la energía  $E$  del fotón. Debido a ello, mientras más grande sea la longitud de onda, más difícil es detectar el fotón individualmente.

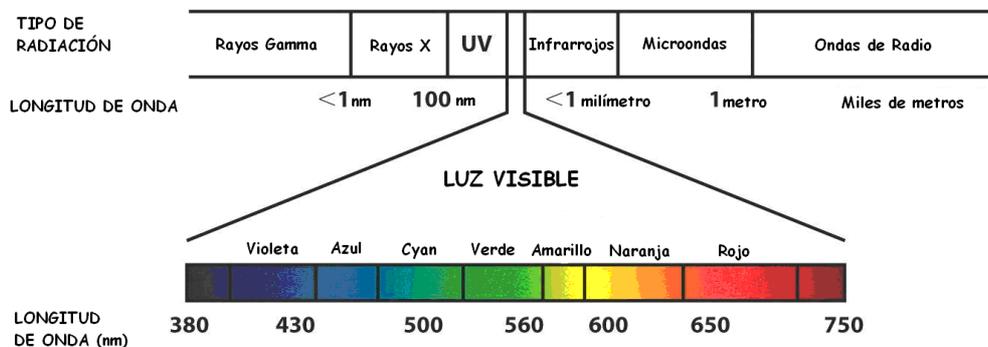


Figura Número III.5.- Espectro electromagnético.

Analizando la evolución histórica que ha tenido el conocimiento de la naturaleza de la luz, se desprende que en ciertos experimentos se puede tratar a la luz como una onda transversal, mientras que en otros es necesario considerarla como un flujo de partículas llamadas fotones, cuya energía individual depende de la frecuencia de la onda. Sin embargo, en la gran mayoría de los casos, sobre todo en aquellos en los que interviene la metrología, es suficiente utilizar el concepto de onda transversal.

Dado el carácter introductorio de este apartado, conviene recordar varios conceptos y definiciones relacionados con las ondas antes de profundizar en el conocimiento de la luz cuando se comporta como una onda. Uno de ellos es la longitud de onda  $\lambda$ , que es la distancia entre dos crestas o dos valles consecutivos, como se muestra en la siguiente figura. La frecuencia  $\nu$  es el número de oscilaciones en un segundo, es decir el número de crestas que pasan por un lugar en un segundo.

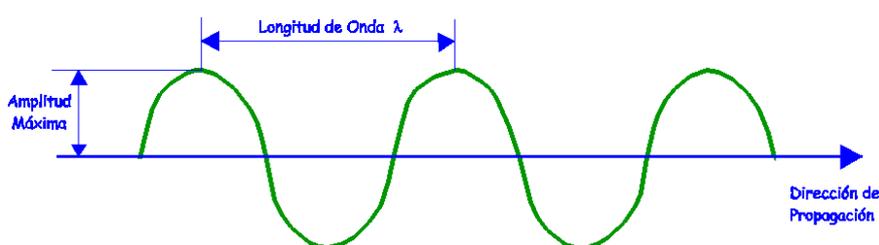


Figura Número III.6.- Parámetros elementales de la onda electromagnética.

Estas dos cantidades no son independientes, sino que están relacionadas entre sí por la velocidad  $V$ , con la que se propaga la radiación electromagnética. Si el medio en el que viaja la radiación es el vacío, esta velocidad se representa por  $C$ , y tiene un valor de 299.792 kilómetros por segundo. La distancia de la Tierra a la Luna es aproximadamente de 384.400 kilómetros, por lo que la luz la atraviesa en poco más de un segundo. Otra manera de imaginar la magnitud de la velocidad de la luz es pensar que esta distancia corresponde aproximadamente a ocho vueltas alrededor de la Tierra. La fórmula que relaciona estos tres conceptos básicos de una onda es:

$$V = \lambda \cdot \nu \quad \text{[III.4]}$$

donde:

$\lambda$ .- longitud de onda.

$\nu$ .- frecuencia.

$V$ .- velocidad.

Cuanto más grande sea la longitud de onda, menor es la frecuencia, y viceversa. La longitud de onda tiene diferentes valores según el color de la luz, pero va desde aproximadamente 350 nanómetros para el violeta hasta 650 nanómetros para el rojo. Recordando ahora que 1 nanómetro es  $10^{-9}$  metros, se puede ver que estas longitudes de onda son de 3,5 y 6,5 diezmilésimos de milímetro, que son obviamente longitudes muy pequeñas.

## 2.2.- DEFINICIÓN DE LÁSER.

El láser, cuyo nombre proviene del inglés Light Amplification Stimulated Emission of Radiation (amplificación de luz por emisión estimulada de radiación), ha revolucionado todos los sistemas de medición de distancias. Cuando se descubrió, se constató inmediatamente que era un instrumento con

grandes posibilidades de aplicación, surgiendo por accidente, ya que las investigaciones iban encaminadas en otra dirección, motivo por el que siempre se dijo que fue la solución en busca de un problema que resolver.

El láser es simplemente una fuente luminosa con dos propiedades muy especiales e importantes en su radiación, que técnicamente reciben los nombres de *coherencia espacial* y *coherencia temporal*. Para explicar el primer término “coherencia espacial”, se considera una fuente luminosa muy pequeña denominada puntual, que emite luz cuyos frentes de onda son esféricos y concéntricos con dicho punto. Si se coloca una lente convergente frente a esta fuente luminosa, a una distancia mayor que su distancia focal, tal y como se muestra en la siguiente figura, se aprecia que la onda se refracta, haciéndose ahora el haz luminoso convergente a un punto después de esta lente.

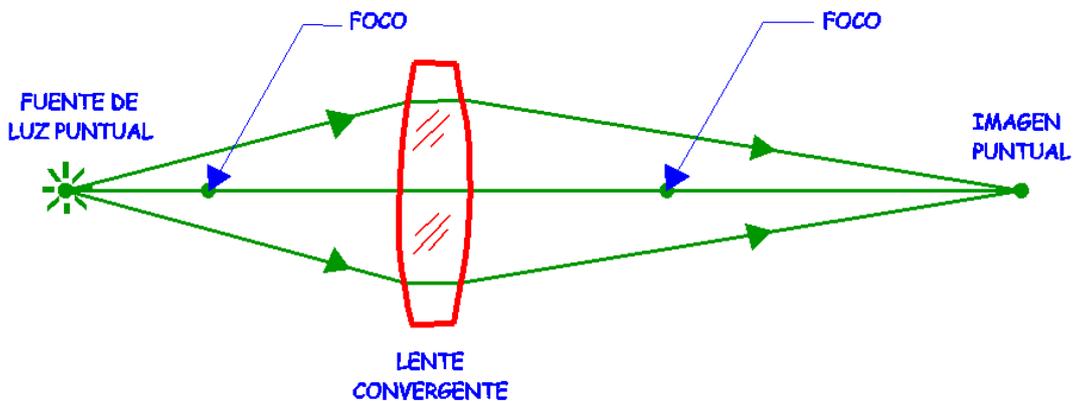


Figura Número III.7.- Lente convergente frente a una fuente luminosa puntual.

El supuesto anterior es absolutamente ideal, puesto que en la práctica las fuentes luminosas puntuales no existen, ya que por pequeñas que sean tienen un tamaño finito, motivo por el que las fuentes luminosas reales no emiten una sola onda con frentes de onda esféricos, sino una multitud, cada una de ellas saliendo de un punto diferente sobre la fuente. Al colocar ahora la lente convergente frente a esta fuente de luz extendida, la energía luminosa ya no se concentra en un punto infinitamente pequeño después de la lente, como en el experimento anterior. Lo que se obtiene es simplemente una imagen de la fuente luminosa, como se muestra en la siguiente figura.

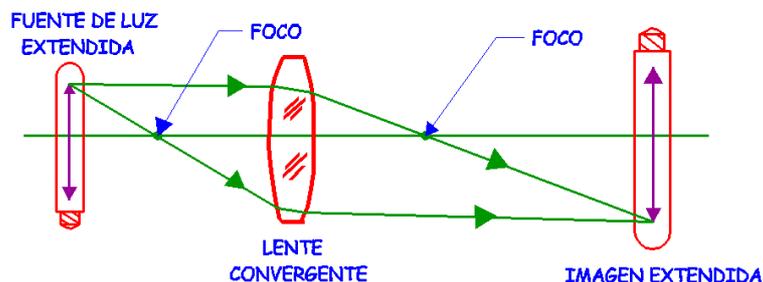


Figura Número III.8.- Lente convergente frente a una fuente luminosa extendida.

Volviendo al caso ideal en el que la fuente luminosa fuera puntual, y colocándola en el foco de una lente convergente, tal y como se muestra en la siguiente figura, la luz debería salir entonces de la lente en un haz de rayos paralelos entre sí, como también se muestra a continuación.

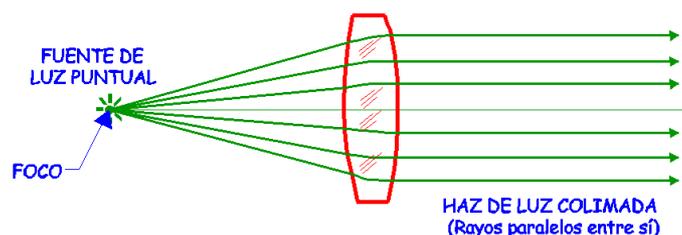


Figura Número III.9.- Lente convergente con una fuente luminosa puntual colocada en su foco anterior.

En la vida real, al no ser puntuales las fuentes luminosas, la luz no saldrá como un haz de rayos paralelos, sino como una multitud de haces, todos viajando en diferentes direcciones, como se muestra en la siguiente figura. De esta manera se esparce la energía luminosa en forma de un cono divergente. Se dice que la fuente infinitamente pequeña o puntual tiene una coherencia espacial perfecta, mientras que la extendida la tiene muy pobre.

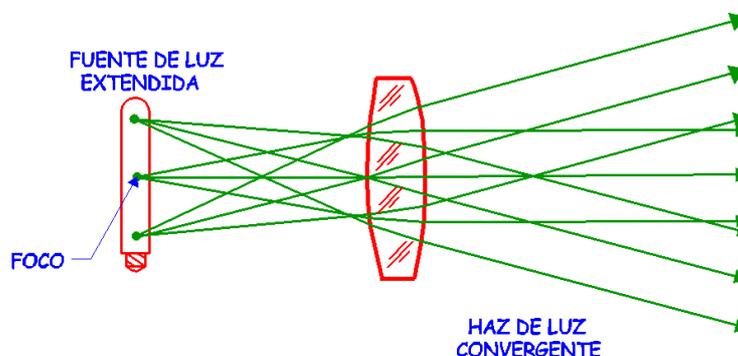


Figura Número III.10.- Lente convergente con una fuente luminosa extendida colocada en su foco anterior.

Son muchas las situaciones en las que es necesario tener una gran coherencia espacial: para tener un frente de onda único en interferometría, para concentrar la energía luminosa en un punto muy pequeño a fin de obtener una densidad de energía muy alta, o para enviar el haz luminoso a gran distancia. Se puede obtener una fuente luminosa de gran coherencia espacial colocando simplemente una hoja de papel aluminio con una perforación muy pequeña hecha con una aguja sobre una fuente de luz extendida; sin embargo, con este procedimiento, se reduce considerablemente la intensidad luminosa. Otro procedimiento consiste en alejar la fuente una gran distancia, hasta que ya no se le aprecie ningún tamaño, sino que se le vea como un punto, como es el caso de las estrellas. Así también se reduce la intensidad luminosa de manera considerable. La luz de un láser tiene una coherencia espacial casi perfecta, sin ningún sacrificio de su intensidad.

Por otro lado la “coherencia temporal” tiene que ver con la cantidad de colores que emite la fuente luminosa simultáneamente, es decir, con el grado de monocromaticidad. Por ejemplo, una fuente de luz blanca no es nada monocromática, pues emite todos los colores del arco iris al mismo tiempo. La luz emitida por un foco rojo o de cualquier otro color sería menos policromática porque contiene luz de varios colores cercanos al rojo, por ejemplo, naranja e infrarrojo. Una fuente de luz bastante monocromática se puede obtener mediante varios procedimientos basados en los fenómenos de la dispersión de la luz en un prisma, en el de la difracción en una rejilla de difracción o en el de la interferencia en los filtros de interferencia, basándose todos estos métodos en la eliminación de los colores indeseados, pero de ninguna manera refuerzan el deseado. Por lo tanto, el haz de luz se hace

sumamente débil. Mientras más monocromático sea un haz luminoso, se dice que tiene más coherencia temporal. En cambio, la luz de un láser tiene coherencia temporal casi perfecta, es decir, tiene una alta monocromaticidad.

### 2.3.- EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL LÁSER.

La historia del láser se remonta al año 1916, cuando Albert Einstein estudió y predijo el fenómeno de emisión estimulada en los átomos, según el cual un átomo que recibe luz de la misma longitud de onda de la que puede emitir es estimulado a radiarla en ese instante.

El siguiente trabajo fundamental para la evolución posterior del láser fue el del bombeo óptico, desarrollado a principios de la década de los cincuenta por Alfred Kastler (1902-1984), basado en técnicas de resonancia ópticas, y que fue desarrollado con la colaboración de su alumno Jean Brossel, de L'École Normale Supérieure de París, y fructificó con el descubrimiento de métodos para subir el nivel energético de los átomos; es decir, métodos para que los electrones de los átomos suban al nivel deseado, utilizando efectos de resonancia óptica.

Charles H. Townes (1915- ) se encontraba en la ciudad de Washington el mes de abril de 1951 para asistir a una reunión científica, cuando se le ocurrió un método para producir microondas usando el fenómeno de la emisión estimulada, basándose en la predicción de Einstein y en los estudios sobre bombeo óptico que realizó Alfred Kastler. La comprobación de su idea se la propuso como trabajo de tesis doctoral a su alumno James P. Gordon, en la Universidad de Columbia. Tres años les costó construir, con la colaboración de Herbert Zeiger, un dispositivo que amplificaba microondas mediante emisión estimulada, al que llamaron máser.

En la otra parte del planeta, y sin tener ninguna conexión con Townes, Nicolai G. Basov (1922-2001) y Aleksandr M. Prokhorov (1916-2002) obtuvieron resultados similares en el Instituto Levedev de Moscú. Townes, Basov y Prokhorov compartieron el premio Nobel de Física en 1964. En septiembre de 1957, Townes y su colega Arthur Schawlow, comenzaron a pensar en el problema de construir ahora otro dispositivo similar al máser, pero que emitiera luz en lugar de microondas. Es interesante conocer la anécdota de que Townes solicitó una patente para artefactos que emitieran luz por el mecanismo de emisión estimulada, logrando construir finalmente Theodore H. Maiman el láser en 1960 en los laboratorios de investigación de la compañía aérea Hughes.

### 2.4.- FUNDAMENTO CIENTÍFICO DEL LÁSER.

Para entender el fenómeno de emisión estimulada hay que recordar que la luz es emitida y absorbida por los átomos mediante dos mecanismos llamados “emisión” y “absorción”, respectivamente. Si el electrón de un átomo está en una órbita interior, puede pasar a una exterior solamente si absorbe energía del medio que lo rodea, generalmente en la forma de un fotón luminoso, denominándose este proceso “absorción”, y se produce tal y como se puede apreciar en la siguiente figura:



Figura Número III.11.- Proceso atómico de absorción.

Si el electrón se encuentra en una órbita exterior, puede caer a una órbita interior si pierde energía, lo cual puede suceder mediante la emisión de un fotón luminoso, denominándose este proceso emisión y se puede producir mediante dos procedimientos diferentes, de forma espontánea o estimulada. En ambos procesos la frecuencia  $\nu$  de la onda absorbida o emitida está determinada por la magnitud  $E$  de la energía emitida o absorbida, según la relación obtenida por Planck [II.2].

Cuando un electrón está en una órbita exterior también se dice que está en un estado superior, no pudiendo permanecer así un tiempo demasiado grande, sino que tiende a caer al estado inferior, emitiendo un fotón, después de un tiempo sumamente corto, menor que un microsegundo, al que se denomina vida media del estado. Es por esto que este proceso de emisión se conoce como emisión espontánea.



Figura Número III.12.- Proceso atómico de emisión espontánea.

Existe una segunda forma de emisión de luz por un átomo, llamada emisión estimulada, que se representa en la siguiente figura, y que consiste en si un electrón está en el estado superior y recibe un fotón de la misma frecuencia del que emitiría si bajara al nivel inferior, desestabilizará a este átomo, induciéndolo a emitir inmediatamente, existiendo después de esta emisión estimulada dos fotones en lugar de uno, el que estimuló y el estimulado. Naturalmente, para que la emisión estimulada tenga lugar se requiere que el electrón permanezca en el estado superior un tiempo suficientemente largo para darle oportunidad al fotón estimulador a que llegue al átomo. Por esta razón, el proceso de emisión estimulada es más fácil si el nivel superior tiene una vida media relativamente larga.



Figura Número III.13.- Proceso atómico de emisión estimulada.

La energía que necesita un electrón para subir al estado superior no necesariamente se manifiesta bajo la forma de fotón luminoso. También puede absorber la energía que se le comunique mediante otros mecanismos, como por ejemplo, mediante una colisión con otro átomo. Si se suben constantemente los electrones de un átomo al estado superior mediante un mecanismo cualquiera, éstos caerán espontáneamente al estado inferior emitiendo luz. A este proceso se le conoce con el nombre de "bombeo óptico". La emisión de luz es entonces un proceso en el que todos los átomos del cuerpo participan, pero en forma independiente y totalmente desincronizada. Dicho de otro modo, las fases de las ondas no tienen ninguna relación entre sí o, lo que es lo mismo, las crestas de estas ondas no están alineadas, como se muestra a continuación.

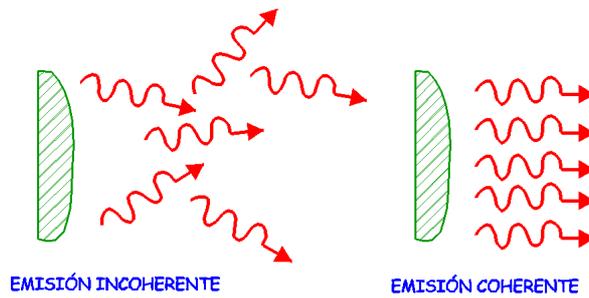


Figura Número III.14.- Emisiones incoherente y coherente de fotones de una fuente de luz extendida.

Como los átomos tienden a tener constantemente los electrones en el estado o nivel inferior, lo que logra el bombeo óptico es que la mayoría de los electrones se encuentren constantemente en el nivel superior, denominándose este proceso “inversión de la población”, siendo absolutamente indispensable para que se produzca la emisión láser. Considerando un material, tal y como se muestra en la siguiente figura, sujeto a bombeo óptico a fin de que sus electrones regresen constantemente al nivel superior, en el que se puede suponer que la vida media de este estado superior es lo suficientemente larga como para permitir la emisión estimulada, se hace incidir sobre el material un fotón de la frecuencia adecuada para provocar la emisión estimulada, lo que produce una reacción en cadena que genera que en la salida se tendrán no uno, sino una multitud de fotones, es decir, se habrá conseguido amplificar la luz mediante el mecanismo de emisión estimulada.



Figura Número III.15.- Amplificación de luz por medio de emisión estimulada.

A fin de que éste sea un proceso continuo, se puede colocar a la entrada un espejo totalmente reflector y a la salida un espejo semitransparente, para que una parte de los fotones que salgan regresen y sigan así provocando la emisión estimulada. Naturalmente, la duda surge al intentar entender cómo se puede ahora introducir al láser el primer fotón disparador de la emisión estimulada, no siendo necesario, puesto que tarde o temprano se acaba produciendo un fotón por emisión espontánea. El dispositivo se puede apreciar en la siguiente figura.

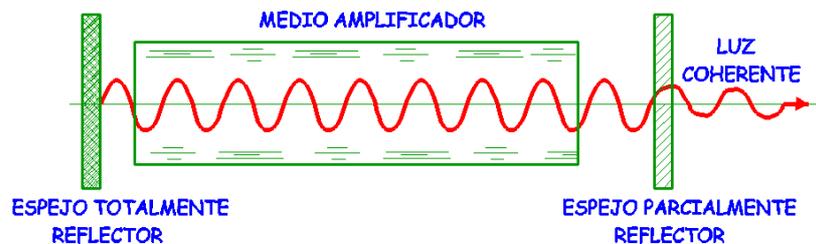


Figura Número III.16.- Empleo de espejos para la retroalimentación de la luz y construcción de láseres.

## 2.5.- TIPOS DE LÁSERES.

En 1960 Maiman construyó el primer láser con una barra de rubí aproximadamente de un centímetro de diámetro, rodeada de una lámpara de xenón en forma de hélice. Los extremos de la barra de rubí habían sido recubiertos con unas películas reflectoras a fin de que actuaran como espejos. El bombeo óptico de los átomos de cromo del rubí se efectuaba mediante una descarga luminosa muy intensa proporcionada por la lámpara de xenón, como se muestra en la siguiente figura. El láser entonces emitía una descarga muy rápida e intensa de luz roja. Este tipo de láser no era continuo sino pulsado o intermitente.

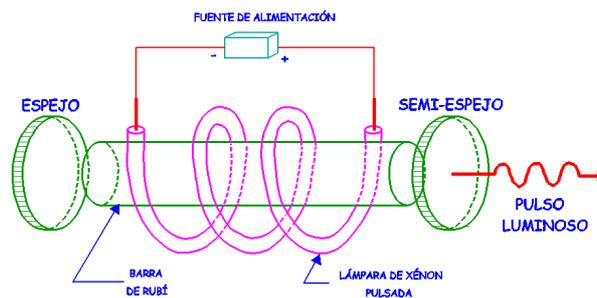


Figura Número III.17.- Esquema del láser de rubí.

Ese mismo año Arthur Schawlow construyó el primer láser de gas, el ahora sumamente popular láser de helio-neón, este láser consta de un tubo de vidrio que tiene en su interior una mezcla de los gases helio y neón, como se muestra en la siguiente figura. Los átomos que producen la emisión láser son los del neón, mientras que el helio tiene por misión producir colisiones entre los átomos de helio y los del neón, para que la energía del choque sea absorbida por los átomos del neón, produciendo así el bombeo óptico. A fin de provocar estas colisiones se establece una corriente eléctrica dentro del gas, por medio de dos electrodos. Al igual que el equipo anterior, en los extremos del tubo se colocan los espejos para retroalimentar el láser.

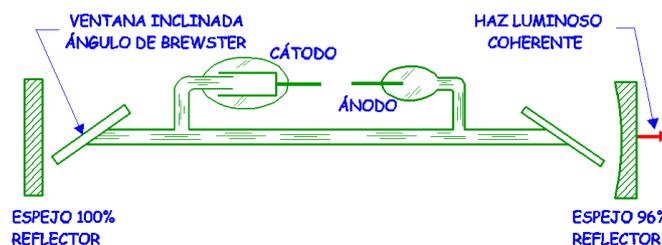


Figura Número III.18.- Esquema del láser de helio-neón.

Los principales tipos de láseres que existen se pueden clasificar en continuos o pulsados, de baja potencia o de alta potencia, según el color de la luz que emiten o según el material del que están hechos. A continuación se mencionarán brevemente algunos de los principales láseres, clasificándolos según el estado del material que se usa como medio amplificador.

### 2.5.1.- LÁSERES DE GAS.

Una gran familia de láseres utiliza un gas o mezcla de gases como medio activo, lográndose la excitación por un flujo de corriente eléctrica por el gas, siendo sin duda los láseres más comunes y útiles. El siguiente cuadro muestra algunos de ellos, con sus principales características.

<i>Sistema</i>	<i>Elemento Activo</i>	<i>Región Espectral o Color</i>	<i>Forma de Operación</i>	<i>Potencia Típica</i>
He-Ne	Neón	Rojo- Verde-Infrarrojo	Continua	10 mW
He-Cd	Cadmio	Violeta y ultravioletas	Continua	10 mW
He-Se	Selenio	Verde	Continua	10 mW
Ar <sup>+</sup>	Argón	Verde y Azul	Continua o pulsada	10 W
Kr <sup>+</sup>	Kriptón	Rojo	Continua o pulsada	10 W
CO <sub>2</sub> -N <sub>2</sub> -He	CO <sub>2</sub>	Infrarrojo	Continua o pulsada	100 W o más

Tabla Número III.1.- Principales propiedades de los láseres de gas.

Los primeros tres láseres tienen mucho en común. En éstos, el helio tiene como función ayudar en el proceso del bombeo óptico. El elemento activo es el neón en el primero, el vapor de cadmio en el segundo y el vapor de selenio en el tercero. El primero de estos láseres es el más popular. Estos láseres se construyen con un tubo de vidrio con dos electrodos internos para mantener una descarga eléctrica a través del gas.

Una segunda categoría de láseres de gas son los de gas ionizado, por ejemplo, los de argón y kriptón ionizados. Estos láseres requieren de una corriente muy grande, del orden de varios amperes, para poder ionizar el gas y producir la inversión de población. La corriente tan alta impone muchas restricciones de tipo práctico que no tienen los otros láseres. Por ejemplo, es necesario el enfriamiento por agua, y el tubo debe tener una construcción muy específica y compleja. Además, la vida de estos láseres es corta, comparada con la de los otros láseres de gas. A cambio de estas desventajas, la potencia es grande, del orden de varios watts.

El láser de dióxido de carbono funciona con niveles de energía moleculares en lugar de atómicos. La potencia es tan alta que puede cortar muy fácilmente una gran variedad de materiales. Por ello, sus aplicaciones industriales son muy grandes.

### 2.5.2.- LÁSERES SÓLIDOS.

Esta familia de láseres utiliza materiales de vidrio o sólido cristalino, como por ejemplo el rubí y neodimio. En la siguiente tabla se muestra los principales láseres sólidos.

<i>Sistema</i>	<i>Elemento Activo</i>	<i>Región Espectral o Color</i>	<i>Forma de Operación</i>	<i>Potencia Típica</i>
Rubí	Cromo	Rojo	Pulsada	----
Nd <sup>3+</sup> YAG	Neodimio	Infrarrojo	Continua o pulsada	1 W
Nd-Vidrio	Neodimio	Infrarrojo	Pulsada	----
Ga-As	Arseniuro de Galio	Infrarrojo	Continua o pulsada	1 W
Semiconductor Silicio	Kriptón	Infrarrojo	Continua o pulsada	10 W

Tabla Número III.2.- Principales propiedades de los láseres sólidos.

El láser de rubí, como ya se ha descrito anteriormente, fue el primer láser en inventarse. El rubí se caracteriza por ser óxido de aluminio cristalino, donde algunos átomos de aluminio se reemplazan por iones de cromo, que son los elementos activos, usándose una lámpara helicoidal de xenón pulsada para excitar este láser. Como el pulso de la lámpara de xenón debe ser muy intenso, se dispara por medio de un banco de capacitores. Este láser es pulsado, aunque se pueden obtener pulsos dobles, separados menos de un microsegundo, con el fin de emplearlos en interferometría.

El láser de  $\text{Nd}^{3+}\text{YAG}$  (del inglés: *NeodimiumYttrium Aluminum Garnet*) tiene como elemento activo el neodimio hospedado en una barra de YAG. Al igual que el láser de rubí, se excita con una lámpara de xenón pulsada.

El láser semiconductor, a diferencia de los otros sólidos, se excita con una corriente eléctrica, y puede ser tanto pulsado como continuo, siendo el haz luminoso infrarrojo, con una longitud de onda de 900 nanómetros, teniendo forma de abanico al salir del láser, con una divergencia angular de alrededor de ocho grados. Se caracteriza por ser muy compacto y permitir la modularización de información que puede ser transmitida de forma relativamente sencilla, aunque su coherencia no es muy alta, siendo el dispositivo ideal para comunicaciones por fibras ópticas, además de ser el más empleado en reproductores de sonido y la lectura de discos ópticos para ordenadores.

### **2.5.3.- LÁSERES LÍQUIDOS.**

Como su nombre lo indica, en estos láseres el medio activo es líquido, utilizando generalmente una solución de tintes complejos como medio activo, por lo general moléculas orgánicas grandes con gran peso molecular. El tinte se disuelve en un disolvente orgánico como alcohol metílico, obteniendo así un líquido como medio activo. La gran ventaja de estos láseres es que se pueden sintonizar a cualquier color deseado, desde el infrarrojo hasta el ultravioleta, según el colorante que se use. En cambio, tienen la gran desventaja de que su excitación tiene que hacerse con el haz coherente de otro láser, como el de argón.

### **2.5.4.- LÁSERES DE ELECTRONES LIBRES.**

En 1977 se desarrollaron por primera vez láseres que emplean para producir radiación haces de electrones, no ligados a átomos, que circulan a lo largo de un campo magnético variable. En la actualidad están adquiriendo importancia como instrumentos de investigación. Su frecuencia se puede regular, como ocurre con los láseres de colorante, y en teoría, un pequeño número podría cubrir todo el espectro, desde el infrarrojo hasta los rayos X.

### **2.5.5.- LÁSER ATÓMICO.**

En enero de 1997, un equipo de físicos estadounidenses anunció la creación del primer láser compuesto de materia en vez de luz. Del mismo modo que en un láser de luz cada fotón viaja en la misma dirección y con la misma longitud de onda que cualquier otro fotón, en un láser atómico cada átomo se comporta de la misma manera que cualquier otro átomo, formando una “onda de materia” coherente.

Los científicos confían en las numerosas e importantes aplicaciones potenciales de los láseres atómicos, aunque presenten algunas desventajas prácticas frente a los láseres de luz debido a que los átomos están sujetos a fuerzas gravitatorias e interaccionan unos con otros de forma distinta a como lo hacen los fotones. En la actualidad no existe tecnología que permita emplear este fundamento en el tipo de observaciones necesarias en el campo profesional tratado en esta tesis.

## 2.6.- LOS LÁSERES COMO INSTRUMENTOS DE MEDIDA.

Una de las grandes aplicaciones de los equipos láser desde sus inicios fueron las medidas interferométricas, donde realmente el campo de trabajo ha sido tremendamente amplio debido a la diversidad de equipos y gama de distancias a medir, todo ello con la gran ventaja que tiene el láser de poseer alta coherencia espacial y temporal lo que permite que las medidas se puedan realizar de forma sencilla y precisa. Al margen de la medida interferométrica, se pueden considerar las siguientes aplicaciones metrológicas que, aún no siendo las únicas, pueden servir de ejemplo de lo que es capaz de hacer un equipo láser.

- *En construcción*, aprovechando la propagación rectilínea de la luz, se puede usar la luz visible del láser de helio-neón para una gran variedad de trabajos, como por ejemplo para replanteos, alineación de túneles, caminos, surcos de cultivo, etc. También se pueden trasladar cotas mediante nivelación geométrica y con elementos auxiliares se pueden comprobar alineaciones perpendiculares, horizontales e incluso verticales.
- *En Topografía*, se fabrican desde aproximadamente 1970 instrumentos que basados en un láser de helio-neón, tienen como propósito medir distancias. Para ello se coloca el instrumento en un extremo de la distancia a medir y en el otro extremo un prisma reflector. Así colocados instrumento y reflector, el láser envía pulsos luminosos muy rápidos, que recorren el trayecto a medir dos veces, de ida y de regreso. Al regresar la luz, un dispositivo electrónico dentro del mismo instrumento determina la distancia recorrida por la luz, por el tiempo que tardaron en ir y venir los pulsos luminosos.
- *En Astronomía*, hoy día es posible medir la distancia de la Tierra a la Luna con una exactitud de unos cuantos centímetros. Con este objetivo los viajeros de la nave Apolo 11 colocaron sobre la superficie de la Luna un sistema de prismas reflectores. Dada la gran distancia (aproximadamente 384.000 Km.), los pulsos del láser se enviaron con un láser de rubí instalado en un telescopio astronómico. Con este método no solamente se ha medido la distancia con muy pequeño margen de error, sino que además se han podido detectar pequeñas variaciones en esta distancia, lo que de otra manera hubiera sido imposible.
- *En control de calidad*, el láser combinado con técnicas interferométricas es el instrumento más exacto que existe para medir distancias pequeñas, debido a que el láser tiene la fuente de luz ideal para cualquier experimento interferométrico, porque si bien es cierto que se hace interferometría desde muchos años, incluso antes de que el láser existiera, pero no en forma tan simple, cómoda y precisa como se puede hacer ahora.

### 3.- APLICACIÓN A LOS LÁSER ESCÁNER ACTUALES.

#### 3.1.- EXPLORADORES LÁSER TERRESTRES (TLS).

Un sistema de exploración por láser terrestre requiere de los siguientes componentes:

- Unidad de exploración.
- Unidad de control.
- Fuente de energía.
- Trípode y montaje.

Aún así, el componente principal de un láser escáner terrestre es la unidad de exploración habitualmente denominado explorador o cabeza de explorador y, que a su vez, está conformado por los siguientes elementos básicos:

- Telémetro.
- Unidad de desviación del haz o rayo láser.

##### 3.1.1.- TELÉMETRO LÁSER.

Antes de iniciar el análisis de los componentes y la descripción pormenorizada de un equipo láser escáner, parece lógico realizar una breve descripción de las principales características del rayo láser utilizado por estos medidores de distancia.

###### 3.1.1.1.- PROPIEDADES DEL HAZ LÁSER.

Inicialmente, el rayo láser es emitido de forma divergente, pero cuando se propaga lejos del emisor, concretamente en la primera multiplicación del haz, éste converge a un diámetro mínimo denominado cintura del haz, caracterizado por encontrarse a una distancia muy corta del emisor.



Figura Número III.19.- Definición de la cintura del haz de un rayo láser.

Posteriormente, el haz diverge de forma inversamente proporcional al diámetro del haz de cintura. Por lo tanto, el diámetro del primer haz es generalmente expansivo pasando posteriormente a un régimen especial de lentes, esencialmente un telescopio invertido, consistente en una distancia focal corta a una lente divergente y una distancia focal larga con otra lente convergente en este caso, de la cual ya sale colimado, tal y como se puede apreciar en la siguiente figura.

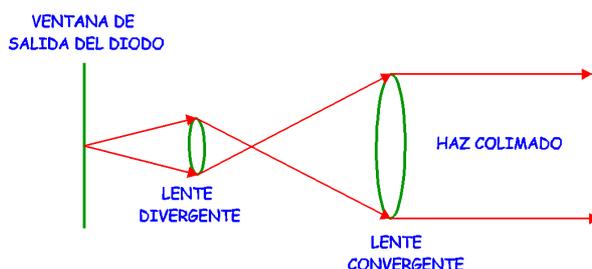


Figura Número III.20.- Amplificador del rayo láser [PRIC-89].

El radio del haz sin expandir  $W(R)$  a la distancia  $R$  del explorador se puede calcular mediante la siguiente expresión [WEIC-90]:

$$W(R) = W_0 \sqrt{1 + \left( \frac{\lambda \cdot R}{\pi \cdot W_0^2} \right)^2} \quad \text{[III.5]}$$

$W_0$  es el radio del haz de cintura y  $\lambda$  es la longitud de onda del láser. El radio del haz expandido y colimado viene dado por la ecuación [Ibid]:

$$W_{\text{exp}} = \frac{f_2}{f_1} \cdot W(R) = K \cdot W(R) \quad \text{[III.6]}$$

donde están las distancias focales  $f_1$  y  $f_2$  de las lentes divergente y convergente, respectivamente, del amplificador del haz láser.

El perfil del rayo radiado en la dirección ortogonal a la propagación del haz se puede modelar según Gauss, aunque en realidad estos perfiles son más complejos, por ejemplo, para los láseres sólidos la asimetría de la radiación hace mucho más difícil la determinación de dicho perfil. Existen tres definiciones ampliamente utilizadas sobre el comportamiento Gaussiano del diámetro del haz basado en el flujo radiante incluido el haz envolvente.

- $D_{0,5}$  .- Diámetro del rayo envolvente que contenga el 50% de la energía radiada del haz.
- $D_{1/e^2}$  .- Diámetro que contiene el  $1/e^2$  (13.5%) de la energía radiante total del haz. Esta definición es muy común, aunque también es habitual la siguiente.
- $D_{1/e^8}$  .- Diámetro que contiene el  $1/e^8$  de la energía radiante total del haz.

Estas definiciones se ilustran en la siguiente figura, en la que la radiación normalizada en cada sección normal al eje del haz se define dividiendo la radiación en esa sección por la radiación máxima del haz. El radio relativo  $k$  del haz se obtiene dividiendo el radio del haz por la desviación estándar de la distribución de la radiación.

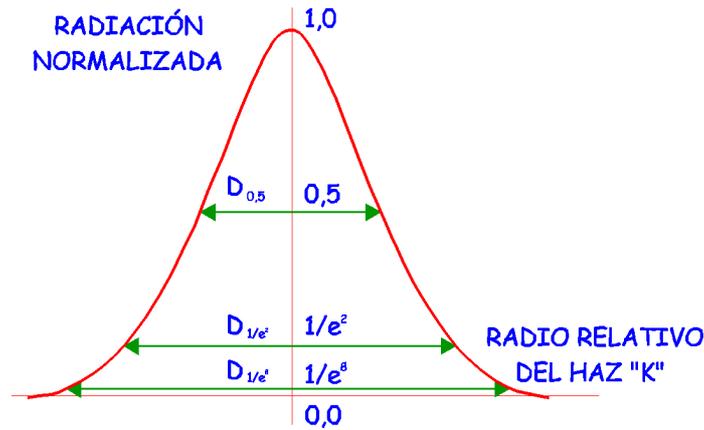


Figura Número III.21.- Diferentes definiciones del diámetro del haz, no escalar [MARS-85].

La medida de la divergencia del haz, también denominada ángulo de la divergencia del haz o campo visual instantáneo (IFOV), se establece mediante la siguiente expresión matemática:

$$\gamma = Ka \cdot \frac{\lambda}{D} \quad \text{[III.7]}$$

donde D es el diámetro de la lente,  $\lambda$  la longitud de onda de la luz láser, y Ka es una constante determinada por la función de iluminación de la abertura:

$Ka = 4/\pi$  para aberturas de la radiación gaussianas con diámetro  $1/e^2$ .

$Ka = 2,44$  para aberturas de la radiación uniforme [WEHR-99].

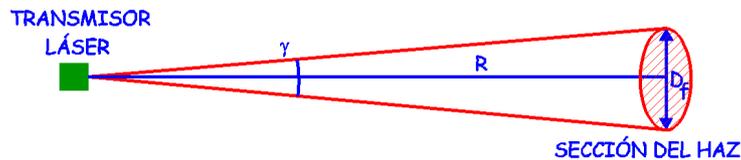


Figura Número III.22.- Concepto del ángulo de la divergencia del haz.

Según la ecuación [III.7], los telémetros que emplean radiación en la banda del infrarrojo tienen mayor campo visual que los que emiten luz visible. En esta misma ecuación se puede observar que solamente los haces teóricos de Gauss tienen el ángulo divergente del haz. Para los rayos láser reales, con secciones en la radiación más complicadas, el ángulo de la divergencia del haz es más grande, además la amplitud del rayo tiende también a aumentar con la potencia del láser. El diámetro  $D_f$  de la sección del haz en la superficie del objeto se puede calcular con la ecuación [III.5] o mediante la relación geométrica simplificada que se deduce de la figura anterior:

$$D_f = 2 \cdot R \cdot \tan\left(\frac{\gamma}{2}\right) \approx R \cdot \gamma \quad \text{[III.8]}$$

donde  $\gamma$  es el ángulo de la divergencia del haz en radianes y R es la distancia.

### 3.1.1.2.- PRINCIPIOS Y COMPONENTES DE UN TELÉMETRO.

Un telémetro pulsado del láser consiste en:

- *Un transmisor.* Láser en estado sólido o diodo de láser semiconductor.
- *Canal del receptor.* Detector, amplificadores y control de ganancia automático AGC.
- *Componentes electrónicos para medir el tiempo.* Equipo de discriminar el tiempo y equipo de medida del tiempo con convertidor digital TDC.
- *La óptica del transmisor y del receptor.*

En la siguiente figura se puede apreciar el diagrama de bloques de un telémetro pulsado típico en el mercado.

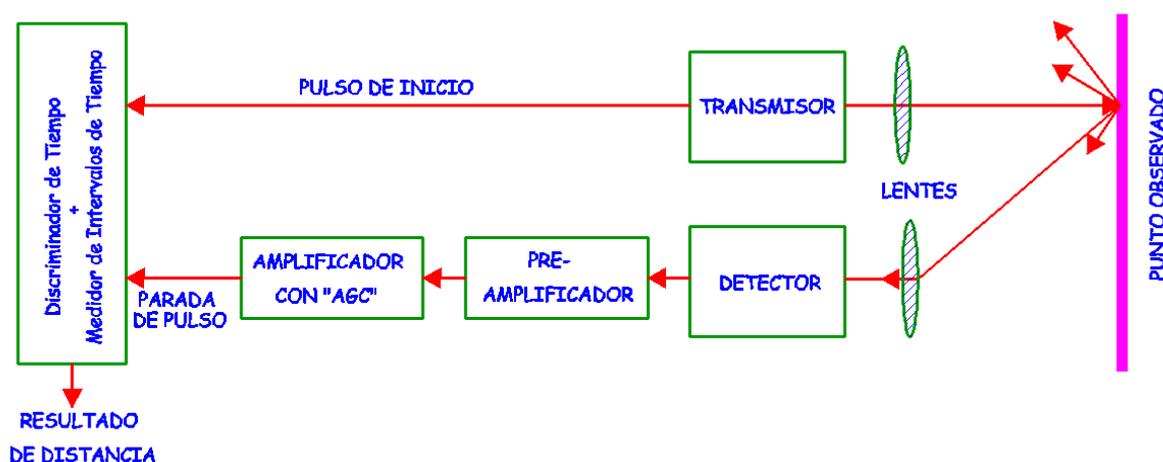


Figura Número III.23.- Diagrama de bloque de un telémetro pulsado del láser.

Los láseres utilizados en la mayor parte de los exploradores funcionan en el rango de longitudes de onda entre 500 y 1500 nanómetros y las frecuencias de repetición del pulso (PRF) habituales están en el orden de 1 a 10 kilociclo. Por ejemplo, el PRF máximo de los telémetros empleados en los exploradores Leica HDS2500 y Leica HDS3000 son 1 kilociclo y 4 kilociclos, respectivamente [LEIC-06]. El detector se utiliza para la localización de la señal devuelta por la superficie objeto, utilizándose normalmente como detectores fotodiodos dinámicos de alta sensibilidad, que son capaces de medir entre 4 y 10 veces el rango de distancias que puede medir un fotodiodo de baja sensibilidad, por supuesto en condiciones similares.

El principio de la medición con láser pulsado puede describirse en las siguientes fases: El transmisor del láser emite un pulso corto, que se encuentra dividido en dos porciones, una de las cuales se envía al receptor, momento en el que se inicia la medida del tiempo con el correspondiente dispositivo de medida y otra se envía al objeto. Al alcanzar la superficie del objeto explorado, el pulso láser es devuelto y parte de la señal inicial vuelve al detector, la energía radiante del pulso se convierte en corriente eléctrica y la relación entre la energía transmitida ( $P_T$ ) y recibida ( $P_R$ ) del láser se describe por la siguiente ecuación:

$$P_R = \frac{\pi \cdot \rho \cdot D^2}{(4 \cdot R)^2} \cdot P_T \cdot \eta_{atm} \cdot \eta_{sys} \quad \text{[III.9]}$$

donde  $\rho$  es el coeficiente de reflexión difuso de la superficie del objeto ( $0 < \rho < 1$ ),  $D$  es el diámetro de la lente del receptor,  $R$  es la distancia al objeto,  $\eta_{atm}$  y  $\eta_{sys}$  son los factores de transmisión atmosféricos y del sistema respectivamente, que explican las pérdidas en la propagación del haz a través de la óptica y de la atmósfera. Es importante analizar esta relación [JELA-92], puesto que la cantidad de la energía recibida es función de la relación señal-ruido (SNR) y la precisión que se alcanza al medir con estos equipos se puede obtener en base a esta ecuación u otras similares establecidas por otros autores. En esta expresión se asume que la energía del láser devuelta sigue una distribución Lambertiana. Otra asunción absolutamente común, es que la energía del láser en la puntería se encuentra extendida [HOVA-88], en cuyo caso la ecuación anterior queda como sigue:

$$P_R = \frac{\pi \cdot \rho \cdot D^2}{2 \cdot (4 \cdot R)^2} \cdot P_T \cdot \eta_{atm} \cdot \eta_{sys} \quad \text{[III.10]}$$

Ya se ha mencionado que solamente una parte de la energía emitida del láser vuelve al explorador, demostrando las ecuaciones anteriormente citadas que la energía recibida por el láser es una pequeña fracción de la energía transmitida (reducida por el factor  $1/R^2$ ), y que además depende de los cambios en la reflexión del objeto o superficie escaneada. Debido a este hecho, la dinámica del pulso recibido se ajusta a la de la unidad de medida del tiempo por medio del control de aumento automático (AGC).

Una vez detectado el regreso de la porción del pulso láser devuelto por la superficie, se amplifica la señal y se envía al discriminador de tiempo, que realiza la sincronización con la unidad de medida del tiempo. La sincronización se hace relativa a un punto específico del pulso, normalmente en el borde principal del mismo, que es más escarpado [THIE-04], lo que puede verse de diversas formas; la más sencilla se realiza mediante la fijación de un valor constante para el nivel de llegada de la señal, de manera que cuando éste llega a un umbral previamente fijado, la unidad de medida del tiempo se para. Una desventaja de este método es la alta dependencia en la medida de la distancia por parte de la reflexión sobre la superficie del objeto ya que una señal devuelta demasiado fuerte conlleva alcances cortos, y viceversa, debido a las diferencias de tiempo que se producen al pasar el umbral predeterminado. Este problema se suele superar empleando una técnica denominada fracción de la constante de discriminación (CFD), que permite fraccionar el umbral instantáneo basándose en el nivel de llegada de la señal y cuyo uso permite eliminar errores al determinar el tiempo de vuelo por las variaciones de amplitud y forma del pulso de vuelta.

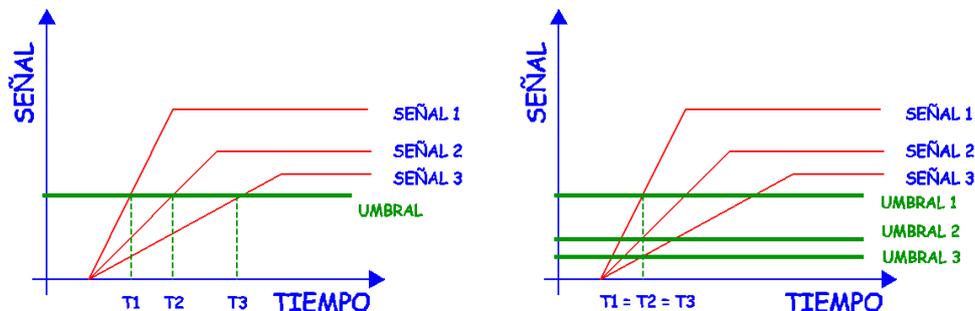


Figura Número III.24.- Izqda: técnica del umbral constante. Dcha: técnica de fraccionamiento del umbral.

Otro enfoque interesante en la sincronización se basa en el procesado de señales digitales en lugar de analógicas. En este caso, el pulso de vuelta se convierte a digital después de una amplificación logarítmica en el receptor, el índice del muestreo es de 100 megaciclos, y la distancia al blanco se resuelve mediante la determinación de una parábola con los datos obtenidos.

El intervalo  $t$  del tiempo entre la emisión del pulso y la recepción de la señal devuelta del haz es medido con el TDC, contando el número de impulsos en un oscilador de alta frecuencia con una técnica que permite la cuenta digital junto con método análogo de interpolación, obteniéndose la distancia a la superficie como sigue:

$$R = c \cdot \frac{t}{2} \quad \text{[III.11]}$$

donde  $R$  es la distancia al blanco y  $c$  es la velocidad de propagación de la radiación electromagnética en el medio, siendo, por tanto, la determinación de la distancia de los láseres pulsados proporcional a la medida del tiempo  $t$ :

$$\Delta R = c \cdot \frac{\Delta t}{2} \quad \text{[III.12]}$$

Todo lo anterior indica que el problema básico en la construcción de un láser pulsado pasa por la definición de un mecanismo que permita la medición del intervalo de tiempo con toda la precisión posible. Por ejemplo, para medir distancias de 1 milímetro es necesario poder registrar tiempos del orden:

$$t = \frac{2 \cdot R}{c} \approx \frac{2 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 10^8} \approx 6,67 \cdot 10^{-12} \text{ seg.} \quad \text{[III.13]}$$

Por lo tanto, para conseguir precisiones milimétricas en la medida de distancias, la exactitud de la medida del intervalo del tiempo se debe acercar a 7 picosegundos. Tales órdenes de precisión se pueden alcanzar mediante el circuito integrado del interpolador tiempo-intervalo usado por ejemplo en exploradores tipo HDS de Leica.

El máximo rango de ambigüedad para telémetros láser pulsados, depende de los siguientes factores:

- Capacidad de interpolación del TDC.
- Reflexión superficial del objeto.
- Energía del láser.
- Transmisión atmosférica.
- Divergencia del haz.
- Sensibilidad del detector.

La ventaja de la medición con láser pulsado es el alto nivel de energía transmitida, lo que permite alcanzar una relación señal-ruido suficiente para medir distancias de hasta varios cientos de metros

con precisiones de orden centimétrico [THIE-04]. La desventaja radica en la dificultad para detectar la época de llegada del pulso láser reflejado debido a la naturaleza cambiante del umbral óptico y de la atenuación atmosférica.

### 3.1.2.- UNIDAD DE DESVIACIÓN DEL RAYO LÁSER.

Para proporcionar medidas tridimensionales del objeto o territorio, el rayo láser utiliza la unidad de desviación, siendo el elemento principal de esta unidad un espejo que proporciona la desviación del haz con respecto a la dirección vertical, y a veces en una dirección horizontal. Normalmente se emplean tres tipos de espejos diferentes [INGE-06]:

- Espejos planos rotativos.
- Espejos poligonales rotativos.
- Espejos oscilantes.

Los fabricantes no siempre especifican claramente el tipo de espejo que utiliza el explorador; es más, no siempre proporcionan la descripción técnica del mecanismo de exploración. Aún así, hay que reconocer que no existe bibliografía que describa adecuadamente los espejos planos cuyo único detalle técnico es que tiene una inclinación de 45°. Los otros dos tipos de espejos están lo suficientemente descritos en la literatura actual.

#### 3.1.2.1.- ESPEJOS POLIGONALES.

Estos elementos ópticos se encuentran rotando con tres o más caras reflexivas, utilizándose habitualmente espejos prismáticos [MARS-04], donde las caras están paralelas, equidistantes y lejos del eje de rotación central. Este tipo de espejos es el más económico de fabricar y se puede hacer de aluminio, plástico, cristal o berilio; además, se pueden pegar capas ópticas muy finas sobre las superficies de las caras para mejorar su reflexión y/o mejorar su perdurabilidad.

El explorador poligonal es un espejo poligonal integrado con un motor y un sistema del cojinete, sujetándose el espejo directamente al eje del rotor. Habitualmente los motores no utilizan escobillas y los cojinetes pueden ser aerostáticos o aerodinámicos.

Las ventajas de estos espejos son la alta velocidad y la disponibilidad de amplios ángulos de exploración que consiguen, requiriendo el buen funcionamiento del explorador propiedades muy estables y fiables del rotor con respecto a la fuerza y temperatura de trabajo, y que además el material del rotor sea homogéneo. Los espejos poligonales se utilizan en exploradores con el ángulo vertical máximo de exploración, el cual se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$\theta = \frac{720^\circ \cdot C}{n_{facets}} \quad \text{[III.14]}$$

donde  $n_{facets}$  es el número de caras del polígono y  $C$  es el cociente del tiempo activo de la exploración y el tiempo total, suele estar comprendido entre el 30 y el 90%. Al máximo ángulo de la exploración también se le denomina ángulo óptico de la exploración. En estos equipos la tasa alcanzable de escaneado, es decir, el número de líneas escaneadas por segundo, puede calcularse aplicando la siguiente ecuación:

$$f_{SC} = n_{facets} \cdot v \quad \text{[III.15]}$$

donde  $v$  es la velocidad de rotación en revoluciones por segundo.

### 3.1.2.2.- ESPEJOS OSCILANTES.

Estos espejos son planos, y oscilan, en una frecuencia constante, entre dos posiciones angulares (máxima y mínima), conducidas por un motor controlado por un generador. El ángulo instantáneo en la exploración del espejo oscilante se determina por el esfuerzo de torsión aplicado a él mismo y se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$\theta(t) = \frac{\theta_{\max}}{2} \cdot \text{Sen}(\omega \cdot t) \quad \text{[III.16]}$$

donde  $\theta_{\max}$  es el ángulo máximo de exploración,  $\omega$  es la frecuencia de oscilación del espejo y  $t$  es el tiempo. Los espejos se pueden hacer de aluminio, aleaciones de hierro, titanio, berilio, entre otros. El espejo oscilante se utiliza, por ejemplo, en el explorador Leica HDS3000.

Dependiendo de la posición de la lente en la proyección de la imagen con respecto al espejo, se definen las dos configuraciones más ampliamente utilizadas en exploración con espejos poligonales y oscilantes [MARS-04]:

- *Exploración Pre-objetiva.*- El haz primero es desviado por el espejo y después reflejado por una lente o un espejo curvo. La ventaja que tiene es que el plano focal es realmente plano, pero como desventaja citar que requiere ópticas relativamente complejas.
- *Exploración Post-objetiva.*- El haz primero pasa con las imágenes ópticas y luego es desviado por el espejo. La ventaja que tiene es que requiere ópticas relativamente sencillas, pero como desventaja utiliza planos focales curvos.

Debido a la propiedad intelectual del diseño del escáner, es difícil que el fabricante establezca la configuración empleada en los diferentes equipos existentes en el mercado. [MARS-04] afirmó que la configuración de los equipos post-objetivo es más apropiada para láseres escáner. Un examen visual de la deflexión del haz permite concluir que en los equipos Leica HDS2500 y 3000 emplean este tipo de configuración. En las siguientes figuras se puede apreciar el esquema funcional de los dos principales mecanismos de exploración.

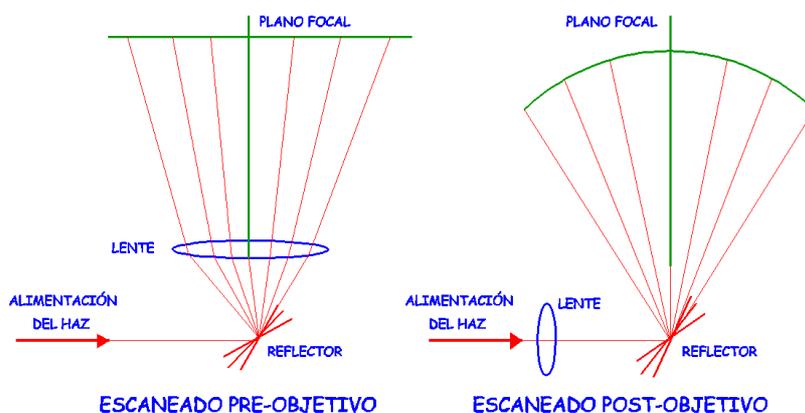


Figura Número III.25.- Esquemas funcionales más empleados en exploradores láser (Alzado).

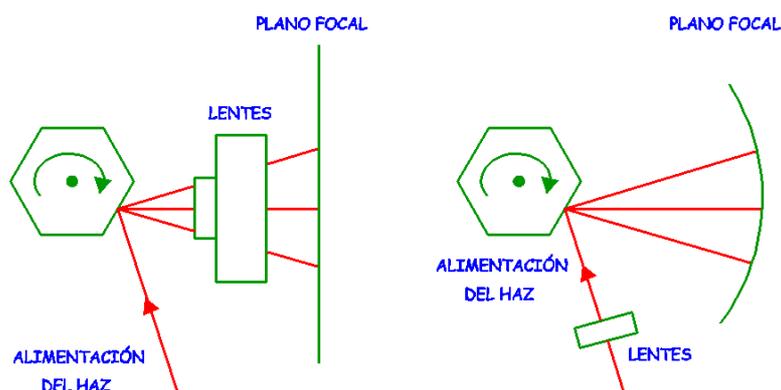


Figura Número III.26.- Esquemas funcionales más empleados en exploradores láser (Planta).

En la exploración poligonal y oscilante la posición angular instantánea del espejo es leída por un sensor de posición angular de alta resolución. En la exploración poligonal, es normalmente un codificador óptico y en la exploración oscilante un transductor de posición capacitivo, por lo tanto, la posición del espejo se convierte en un sistema digital. En la exploración poligonal, una función adicional del codificador supervisa la velocidad del polígono, siendo necesaria esta supervisión para la colocación exacta de los puntos del láser (“píxeles”) a lo largo de la línea de escaneado, generando el codificador pulsos de precisión, uno por píxel, que corresponden a cierta cantidad (en arco de segundo) de la rotación del eje de rotor. La frecuencia y la fase de los pulsos del codificador se comparan con las de una señal estable de la referencia, siendo esta comparación la que produce una señal del error que se utiliza para ajustar la velocidad del polígono, denominándose esta técnica bucle en fase del bloqueo [MARS-04].

La unidad de desviación del haz permite mediante la medición de corrientes eléctricas de dos réplicas consecutivas de la señal, generadas por los espejos (planos o curvos) o por un espejo oscilante y un servomecanismo, la desviación del rayo láser en direcciones horizontales (acimut) y verticales (elevación), lo que puede lograrse mediante dos procedimientos diferentes [GORD-04]:

- Las desviaciones horizontales y verticales se consiguen por los espejos que oscilan alrededor de los ejes verticales y horizontales del instrumento; el resto de la cabeza del explorador se encuentra inmóvil durante el proceso de captura de la imagen. Los exploradores que utilizan este principio se llaman “de cabeza fija” y se caracterizan por tener una superficie de exploración limitada, por ejemplo el explorador láser Leica HDS2500 es de 40°x40°.
- La desviación vertical se consigue mediante un espejo que gira y la horizontal con la ayuda de un servomotor, permitiendo a la cabeza del explorador rotar incrementalmente sobre el eje vertical. Aunque constructivamente son difíciles de materializar, tienen la posibilidad de girar hasta 360° en horizontal, denominándoseles habitualmente “panorámicos” o “de cabeza rotatoria”.

Para escanear objetos o superficies por los procedimientos descritos anteriormente, se obtienen grandes nubes de puntos, incluso millones de puntos, regularmente espaciados y de forma que la densidad de puntos (resolución del muestreo) se puede fijar a priori en los equipos de observación, por ejemplo Leica HDS2500 puede alcanzar a coger puntos cada 0,25 milímetros a 50 metros del objeto. A pesar de las altas resoluciones que son capaces de aplicar los equipos, no es razonable explorar objetos con la resolución más alta que el diámetro del punto láser en la superficie. Además, se sabe que a partir de un cierto punto la resolución del muestreo no mejora perceptiblemente la exactitud de

los datos, sino que simplemente aumenta el volumen de datos a adquirir y el tiempo de resolución de la transformación [IAVA-02].

Cada punto se define por las coordenadas esféricas ( $r, \varphi, \theta$ ) o por las coordenadas cartesianas ( $x, y, z$ ) en el sistema cartesiano del explorador y una variable cuantitativa que refleja el valor de la intensidad. Aunque los datos brutos son las coordenadas esféricas, la mayoría de las herramientas informáticas para el procesado de datos proporcionan coordenadas cartesianas en la salida de datos, que se pueden tratar como observables. En la siguiente figura es posible apreciar el principio de exploración empleado por estos equipos.

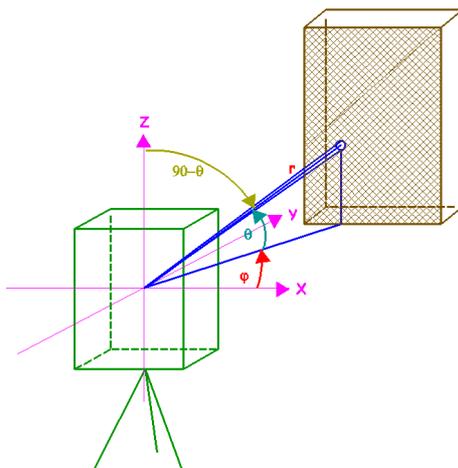


Figura Número III.27.- El principio de la exploración del rayo láser.

Para terminar la descripción de todo el equipo que conforma el explorador láser se describen a continuación y de forma somera otros componentes de los equipos TLS como son:

- La unidad de control, normalmente es un ordenador portátil con el software de exploración, utilizándose para controlar el proceso de grabación de los datos de la exploración y que debido a la gran cantidad de datos que se suelen recoger en las exploraciones, deben disponer de gran capacidad de almacenaje y tratamiento de datos.
- La fuente de energía para el explorador puede ser una o varias baterías, bien del propio fabricante o incluso de coche (12V), proporcionando los fabricantes generalmente energía solamente para el explorador, por lo que se requieren, además, batería y cargador para la unidad de control.
- Aunque en usos estáticos el explorador se puede estacionar sobre el suelo o cualquier otra superficie adecuadamente acondicionada, también se puede instalar en un trípode o en un pilar con centrado forzoso, tal y como se pretende llevar a cabo en la presente investigación.

### 3.2.- DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE MEDIDA.

La exploración de un objeto con un único posicionamiento del instrumento se observa según los principios generales descritos anteriormente, detallándose a continuación el procedimiento de medida con TLS pormenorizadamente.

### 3.2.1.- PLANTEAMIENTO DE LA MEDIDA.

El procedimiento para llevar a cabo una observación con TLS sigue siendo un procedimiento abierto y sin reglas o estándares preestablecidos hasta ahora. Sin embargo, como en cualquier tipo de medida, requiere una planificación previa que permita capturar la información necesaria sobre el objeto explorado. En [IAVA-02] se propone el primer flujo de trabajo serio que se puede llevar a cabo para realizar el escaneado de un objeto, con los siguientes pasos:

- Definición del área a examinar e investigación preliminar de dicho área. Cuando se examinan las áreas grandes, una herramienta útil es la exploración preliminar del objeto o el área en baja resolución, lo que posibilita la generación de un mapa de contorno aproximado del lugar, que se puede utilizar más adelante para planificar el procesado.
- Definición de la resolución y de la exactitud prevista de la nube de puntos, dependiendo del tipo de exigencia final del producto. Basándose en la exploración previa, que permite obtener la dimensión aproximada del objeto, y la escala a la que se pretende obtener la representación, se puede deducir el tamaño mínimo del punto para que éste sea perceptible en su representación.
- Selección del explorador a emplear, en función del tipo y las condiciones de la observación que se deba realizar, pudiéndose elegir dentro de una muy variada gama de equipos diseñados y comercializados por los fabricantes. Este paso no siempre es posible ya que habitualmente el equipo no se puede ir cambiando en función de las necesidades del trabajo, debido fundamentalmente a su elevado coste económico.
- La ubicación ideal para los posibles estacionamientos del escáner debe garantizar la cobertura y exactitud requeridas, por lo que se propone, antes de iniciar la observación, calcular el diámetro de la huella del haz para asegurar que se alcanza la resolución requerida y hacer posteriores chequeos para comprobar la cobertura.
- Elección de los puntos básicos para la georreferenciación, lugares que se deben caracterizar por su adecuada localización, visibilidad y configuración geométrica.
- Después de realizar los pasos anteriores, se puede estimar de forma aproximada el volumen de datos a capturar y dimensionar la capacidad de almacenamiento y procesado de datos de los equipos informáticos anejos al explorador.

### 3.2.2.- EXPLORACIÓN.

Antes de empezar la exploración, el operador debe estacionar el instrumento en la localización predeterminada, definir la parte del objeto o zona de la superficie que se pretende capturar y seleccionar las opciones necesarias en el software de la exploración, como por ejemplo, resolución del muestreo, modo de la exactitud, número de exploraciones, formato de datos, etc. Una vez comenzada la exploración, el operador puede seguir el proceso en la pantalla del ordenador portátil, almacenándose los datos, una vez que ésta finaliza, en un archivo del proyecto previamente especificado. La rutina exacta de la exploración varía a partir del tipo de explorador y software.

### 3.2.3.- REGISTRO Y GEORREFERENCIACIÓN.

Los objetos habitualmente examinados con un explorador láser suelen ser grandes y de forma compleja, por lo que se deben realizar varias exploraciones en diversas ubicaciones del instrumento.

Las nubes de puntos se obtienen en cada ubicación del instrumento y se refieren al sistema cartesiano interno del explorador. Para un explorador “panorámico”, este sistema cartesiano se puede describir como:

- Origen, centro electroóptico del explorador.
- Eje Z, eje vertical o de rotación del instrumento.
- Eje Y, eje óptico del instrumento con dirección arbitrario, por ejemplo, se puede hacer coincidir aproximadamente con el norte magnético.
- Eje X, normal al plano OZY y pasando por el origen en sentido directo.

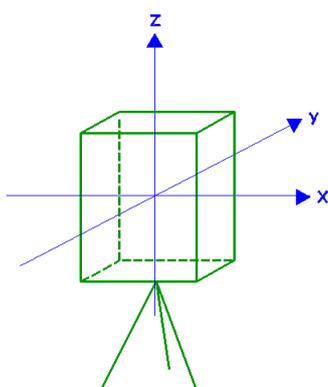


Figura Número III.28.- El sistema coordenado interno de un explorador láser.

Se puede observar que debido a las diferencias en el diseño del explorador, los diversos fabricantes de exploradores tienen pequeñas diferencias en la definición del sistema cartesiano del instrumento. Por ejemplo, el origen cartesiano del explorador Callidus 1.1 “es el punto de la intersección del eje de rotación horizontal y vertical”, en el explorador Leica HDS2500, “el origen está en el punto cero de las medidas de la distancia”, y no coincide con el generador de haces [HARV-04]. Lo que si se puede asumir es que el “eje de rotación horizontal” es el eje de la rotación del espejo poligonal u oscilante y el “eje de rotación vertical” es el eje de la rotación de la cabeza de la exploración, que puede ser coincidente con el eje Z.

Para obtener una representación completa del objeto explorado, las nubes de puntos (exploraciones) se deben transformar primero a un sistema coordenado común, es decir, al sistema coordenado de una exploración elegida. Este procedimiento se llama el registro y permite la combinación de las diferentes exploraciones mediante un conjunto de transformaciones que se realizan individualmente sobre el resto.

Para poder integrar los datos TLS en otros datos georreferenciados espacialmente se tienen que transformar las nubes de puntos registradas con el sistema referencial elegido o impuesto, denominándose este procedimiento georreferenciación y aunque muy a menudo se establecen sistemas de referencia cartográficos locales, también se pueden emplear sistemas de referencia cartográficos de amplio contexto, como puede ser la proyección UTM. En la mayor parte de los proyectos no se desea obtener datos en un marco geodésico predefinido, lo que permite considerar al registro como una georreferenciación, haciéndose este registro-georreferenciación generalmente en paralelo a la observación y existiendo dos procedimientos diferentes, dependiendo del diseño del explorador.

### 3.2.3.1.- GEORREFERENCIACIÓN DIRECTA.

En este procedimiento, el explorador estaciona en un punto de coordenadas conocidas, adecuadamente centrado, nivelado y orientado con una referencia externa. La información de la posición y de la orientación, así como la altura del instrumento, se pueden incorporar en el software del explorador antes de la exploración. Los exploradores que permiten este tipo de georreferenciación se deben equipar de un nivel (compensador electrónico de ejes), de un telescopio para avistar la orientación, de equipamiento para el centrado óptico, y de una marca para medir la altura del instrumento. La posición del explorador se puede determinar con una estación topográfica total o un receptor GPS. Por ejemplo, el explorador de Callidus 1.1 se equipa con un adaptador que permite colocar en la tapa del explorador un prisma reflector o un receptor GPS. En ausencia del telescopio, si el explorador se nivela exactamente, su orientación puede ser calculada usando las coordenadas “externas” de su centro y de la referencia externa explorada con la resolución precisa. Este procedimiento es el que incorporan los equipos Leica HDS3000 [LICH-04].

La georreferenciación directa se considera el método más útil debido fundamentalmente a que permite eludir requisitos absolutamente exigentes en la geometría de los puntos de control empleados, además evita tener que superponer diversas nubes de puntos. Actualmente existen muchos instrumentos en el mercado que incorporan elementos para nivelar, orientar y centrar el explorador; sin embargo, la nivelación estricta no siempre es posible debido a la ausencia de los compensadores de doble eje. Idealmente, un sistema de la exploración debe poder utilizar otras alternativas de georreferenciación diferentes a la que se acaba de analizar [GORD-04].

### 3.2.3.2.- GEORREFERENCIACIÓN INDIRECTA.

En este caso, la georreferenciación se realiza basándose en una transformación 3D, caracterizada por las siguientes propiedades:

- Las nubes de puntos capturadas en disposiciones adyacentes del explorador se superponen en parejas. Para ello se colocan usando por lo menos 3 puntos de unión que se puedan identificar fácilmente y que se encuentren uniformemente distribuidos por la superficie a registrar. Posteriormente, el conjunto de las nubes de puntos registradas se transforma en el sistema coordinado externo usando al menos tres puntos de control con coordenadas conocidas en el sistema referencial dado. Los puntos de control pueden coincidir con algunos de los puntos de unión o pueden ser diferentes de ellos.
- Las nubes de puntos separadas se pueden transformar directamente en el sistema coordinado objeto usando las coordenadas de los puntos de control en dicho sistema referencial. Por lo menos se requieren 3 puntos de control en cada exploración. No se precisa ninguna superposición entre las exploraciones adyacentes; sin embargo, son necesarios más puntos de control que en el caso anterior, empleándose este procedimiento a modo de examen adicional y teniendo el inconveniente de agregar costes adicionales al proyecto.

A continuación se detallan diversos procedimientos de georreferenciación:

#### **A.- Puntos observados.**

En este caso, se utiliza la transformación de Helmert, que permite la transformación de coordenadas entre el explorador y el sistema referencial externo:

$$X_e = \Delta X + \mu \cdot R_i^e \cdot X_i \quad [\text{III.17}]$$

donde  $X_e$  y  $X_i$  son las coordenadas en el sistema externo ( $X_e$ ) y sistema interno del explorador ( $X_i$ ),  $\Delta X$  [ $X_o$ ,  $Y_o$ ,  $Z_o$ ] es el vector de traslación (centro de coordenadas en el sistema externo e interno),  $\mu$  es el factor de escala de posicionamiento y  $R_i^e$  es la matriz de rotación entre los dos sistemas coordenados, que es función de los ángulos de la rotación sobre las tres ejes cartesianos, ( $\omega$ ,  $\phi$ ,  $\kappa$ ) o ( $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$ ). Cuando se tienen tres o más puntos de control, se pueden calcular los siete parámetros de la transformación de Helmert ( $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta Z$ ,  $\mu$ ,  $\omega$ ,  $\phi$ ,  $\kappa$ ) así como sus desviaciones estándar estimadas en ajuste de mínimos cuadrados. Los parámetros calculados se utilizan para la georreferenciación de las nubes de puntos según el modelo funcional proporcionado en la ecuación anterior.

Las coordenadas de los puntos de control, en el sistema referencial predefinido, se pueden determinar con una estación topográfica total, GPS o fotogramétricamente, siendo estas técnicas altamente precisas y permitiendo la posterior georreferenciación. Al observar puntos, la cuestión más relevante es determinar correctamente las coordenadas, con toda la exactitud posible.

### B.- Puntos comunes.

Como se ha mencionado anteriormente, también es posible utilizar características morfológicas comunes, como por ejemplo, bordes de ventanas, cornisas etc. como puntos de control, debiendo identificar estas características manualmente por el operador durante el procesado de los datos y los resultados obtenidos suelen ser más pobres que empleando el método de los puntos observados debido a las siguientes causas:

- Los puntos comunes en diversas nubes de puntos no se componen de puntos idénticos, pudiendo generar incertidumbres milimétricas la determinación del diámetro de los círculos debido a la divergencia del rayo láser.
- La identificación de puntos comunes es algo subjetiva, especialmente en exploraciones muy inclinadas.

Por las razones anteriormente descritas, existen autores hoy día que no recomiendan utilizar este método para el registro o superposición.

### C.- Combinación de superficies.

Este procedimiento requiere emparejar las áreas superpuestas por nubes de puntos adyacentes, conduciendo la redundancia generada a una solución más óptima que usando puntos discretos [BARB-01]. Generalmente los paquetes de software que gestionan los datos capturados por exploradores láser, utilizan algoritmos que emparejan áreas de las superficies escaneadas.

Los algoritmos que emparejan superficies se basan habitualmente en un método iterativo denominado “*punto más cercano (ICP)*”, según el cual la referencia de la nube de puntos se modela como una superficie aislada, realizándose entonces el emparejado reduciendo al mínimo la suma de las distancias entre la nube puntos y la superficie modelada [PFEI-04].

### 3.2.4.- PROCESADO PREVIO Y MODELADO DE LOS DATOS.

Las nubes de puntos “crudas” no se deben utilizar directamente en el procesado de datos, debido fundamentalmente a dos cuestiones simples:

- Contienen ruido (coches, gente transitando a través de la trayectoria de la exploración, etc.) que debe ser eliminado o filtrado mediante procesos estadísticos.
- Los datos de la exploración que se pretenden superponer son redundantes y deben ser reducidos.

El proceso previo de reducción de los datos minimiza el tamaño del archivo y acelera el proceso de modelado de los mismos mediante algoritmos matemáticos. Se debe realizar antes de la georreferenciación, de modo que la calidad del modelado no se vea afectada por vacíos eventuales de datos. Después se formaliza el modelado en el que se obtiene una representación tridimensional del objeto cuestión, estando vigentes actualmente muchas investigaciones que analizan los procedimientos para modelar objetos. Generalmente existen dos procedimientos totalmente diferentes que se emplean según el uso que se pretenda dar al modelo:

- Primitivas geométricas apropiadas a las nubes de puntos (planos, paralelepípedos, esferas, cilindros etc.). Usadas para modelar los objetos que consisten en elementos con formas geométricas regulares, por ejemplo instalaciones industriales. En los últimos tiempos se ha mejorado mucho en la generación automática de algoritmos. Una ventaja obvia de este método es la reducción considerable de datos.
- Triangulación. Se produce un acoplamiento triangular, que aproxima de cerca la superficie de las nubes del punto. La densidad del acoplamiento puede ser controlada dependiendo de la complejidad de la superficie. Este método es muy flexible y conveniente para cualquier objeto, especialmente para éstos que tienen forma irregular que no se puede aproximar primitivas geométricos como, por ejemplo, muchos objetos arquitectónicos y monumentos históricos.

Al realizar el modelado es importante guardar los datos de campo originales en el correspondiente expediente, de forma que en cualquier momento se puedan rescatar y consultar, lo que evita problemas ante casos de pérdida o mala interpretación de los propios datos. El flujo de trabajo que se recomienda llevar a cabo en procedimientos de modelación de datos es el que se detalla a continuación:

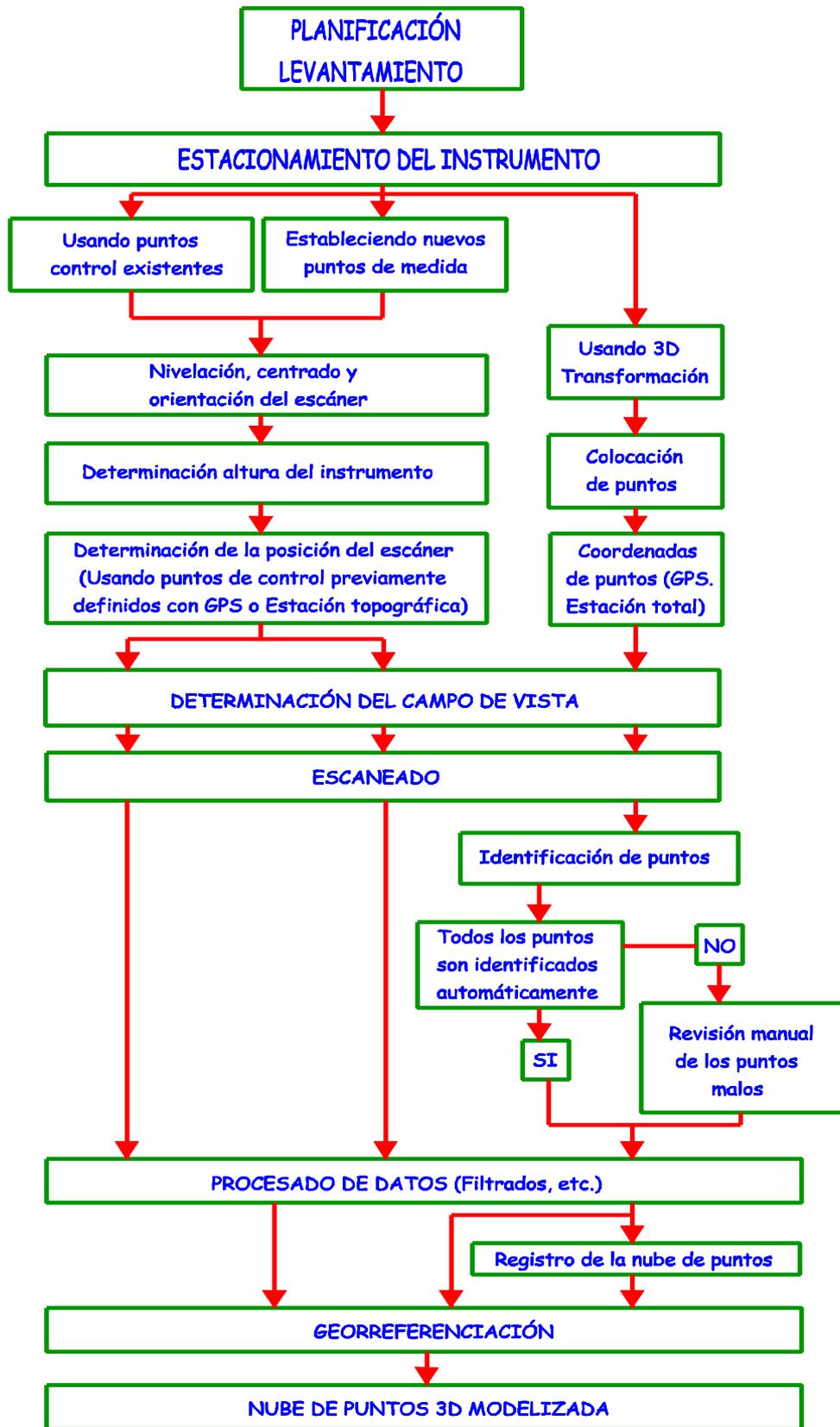


Figura Número III.29.- Flujo de trabajo a seguir en escaneados con láser terrestre.

## 4.- FUENTES DE ERROR EN MEDIDAS CON LÁSER.

### 4.1.- INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS DE LAS FUENTES DE ERROR.

Como todas las técnicas de medida que se conocen en la actualidad, las medidas TLS son imperfectas y cuando se analizan los errores que surgen en la representación que se pretende llevar a cabo, aparecen las fuentes de error que producen dicha imperfección. Un análisis pormenorizado de todas estas fuentes y de los errores obtenidos realmente, proporciona una base sólida sobre la que cimentar la evaluación de la calidad, necesaria en todo procedimiento de medida.

Para establecer la calidad del funcionamiento de un explorador láser, se requiere detallar los datos técnicos que definen el sistema de medida; sin embargo, se determinan en unas condiciones de exploración y procesado de datos difícilmente reproducibles en un proceso normal de escaneado de un objeto o parte del territorio y máxime cuando en la mayor parte de los casos no son ni siquiera proporcionadas por el fabricante, lo que dificulta enormemente la adecuada interpretación de dichos datos.

Además, existe una cierta confusión en cuanto a conceptos como “exactitud”, “precisión” y “resolución”, ya que aunque puedan parecer conceptos parecidos, son totalmente diferentes. [IAVA-02] proporciona una buena explicación de los mismos en el contexto TLS, detallándose a continuación dicha exposición como base sobre la que se pretende cimentar el análisis de las fuentes de error que se producen en estas observaciones.

- *Exactitud.*- Se define exactitud como el grado de acuerdo entre una medida y el verdadero valor de la cantidad medida, marcando el mejor indicador de calidad en los datos. Por ejemplo, la exactitud vertical se considera “el principal criterio para especificar la calidad de los datos digitales de la elevación”, se puede distinguir:
  - Exactitud modelada.- Se deriva del modelo generado de la nube de puntos y excede normalmente la exactitud de la medida del sistema.
  - Exactitud de la medida de la línea de fondo.- Determina la calidad en las medidas de la distancia extraídas de una nube de puntos.

Puesto que TLS esencialmente es una técnica superficial de medida y el modelado 3D es generalmente el producto final de la exploración láser, la exactitud modelada se puede establecer como el indicador más relevante de la calidad de la información obtenida por medio de la exploración, reflejo del nivel de la conformidad entre el modelo y el del mundo real.

Además, se deben distinguir claramente los conceptos que habitualmente se mezclan, “datos” e “información”, siendo los datos los resultados de las medidas. En el caso de TLS los datos son la nube de puntos del objeto explorado, y la información es el modelo 3D, una vez procesados los mismos. Una indicación de la calidad de éstos, puede ser la “exactitud de las coordenadas 3D” de los puntos que conforman la nube, debiendo observar que los conceptos de la “calidad de los datos” y “del funcionamiento del explorador láser” están correlacionados. En el presente trabajo, el interés se centra en el conocimiento de la exactitud, en la determinación de las coordenadas en el sistema geodésico externo de coordenadas.

- *Precisión.*- Se denomina precisión al grado de capacidad de repetición en una medida. Este parámetro se suele mezclar habitualmente con la exactitud en las especificaciones del sistema. La precisión se puede aplicar en:
  - Informaciones en bruto.
  - Datos procesados.
  - Modelos 3D.

La precisión de los componentes individuales del explorador láser (telémetro láser, unidad de desviación del haz, etc.) se suele publicar generalmente en las especificaciones técnicas del fabricante. Existen dos tipos de precisión:

- Precisión en una sola medida.
- Precisión de un promedio de medidas.

La precisión de las coordenadas 3D de un punto perteneciente a una nube de puntos transformada en el sistema coordenado externo se puede expresar mediante la expresión [BALT-99]:

$$\sigma_{3D} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \dots + \sigma_n^2} \quad \text{[III.18]}$$

donde  $\sigma_i$  es el error individual asociado a diferentes fuentes que se planteen. En la ecuación anterior se asume que no existe correlación entre los errores individuales, obteniéndose una estimación más real de la precisión a partir de la siguiente matriz de varianzas-covarianzas.

$$C_{3D} = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_y^2 & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_z^2 \end{bmatrix} \quad \text{[III.19]}$$

Esta matriz se puede obtener mediante la propagación de los errores individuales asociados a las diversas fuentes que influyen en la exactitud de los datos [LICH-04]. Si todos los errores sistemáticos significativos que influyen en las medidas de TLS son corregidos para la determinación de los errores estándar y en su cálculo se tiene en cuenta el error estándar  $C_{3D}$  o la matriz  $C_{3D}$ , entonces las ecuaciones anteriores establecen la exactitud de las coordenadas del punto 3D.

- *Resolución.*- Se define la resolución como el tamaño del detalle más pequeño perceptible para un explorador, existiendo en TLS dos tipos de resoluciones que priman sobre las demás:
  - Resolución de la distancia, se puede describir como el cambio mínimo en la distancia que es capaz de percibir un explorador.
  - Resolución angular, se puede describir como el tamaño de la característica más pequeña perceptible en la superficie homogénea.

Analizando las consideraciones anteriores se detecta que la “exactitud del modelo 3D” es el parámetro más válido para la evaluación del funcionamiento de las técnicas TLS, puesto que permite comparar los resultados del modelo virtual con el modelo real existente en la tierra. Los algoritmos de modelado 3D permiten mejorar considerablemente la exactitud, aunque su papel no debe ser sobrestimado, ya que éstos no pueden solucionar todos los problemas, ni generar calidad en un modelado cuyos observables no tengan calidad suficiente. Además, los algoritmos de modelado son “cajas-negras” muy difíciles de analizar a priori, ya que ni los propios fabricantes suelen dar datos sobre ellos.

El interés de este trabajo se centra en la investigación de los factores que influyen en el proceso de medida y calidad de los datos. El indicador elegido es “la exactitud en la medida de la línea de fondo” de los puntos que conforman la nube, puesto que el conocimiento de la exactitud de puntos individuales permite teóricamente derivar las estimaciones de la exactitud para la nube de puntos empleando las técnicas de propagación del error.

#### 4.2.- CLASIFICACIÓN DE LOS ERRORES DE MEDIDA CON TLS.

Analizando el epígrafe anterior se detecta que la investigación de las fuentes de error en medidas TLS es algo realmente complicado debido a la gran cantidad de factores que existen y que están totalmente correlacionados. La complejidad se incrementa debido al hecho de que los exploradores láser varían en su diseño, de forma que las longitudes de onda, las desviaciones del haz, etc., cambian de unos equipos a otros. Además, el diseño de los exploradores láser es absolutamente complejo en cuanto a componentes eléctricos, electrónicos y mecánicos, lo que también contribuye al error total. Todo ello, combinado con los diferentes procedimientos de georreferenciación que se pueden llevar a cabo, directos o indirectos, fuerzan a tener que estructurar las diversas fuentes de error en una medida realizada con láser pulsado, para que el análisis sea lo más efectivo posible. En esta investigación los grupos de fuentes de error se estructuran atendiendo a la siguiente clasificación:

- Instrumental.
- Objeto-relacionado.
- Ambiental.
- Metodológico.

Esta clasificación adoptada por [STAI-05] no es la única, por ejemplo [LICH-04] clasifica las fuentes de error en dos grandes grupos:

- Internos (fuentes propias del instrumento).
- Externos (se pueden incluir todo tipo de fuentes ajenas al instrumento).

Otra clasificación posible se basa en los observables que se toman en una medición con TLS y, por tanto, los errores que afectan a dichos observables:

- Errores de la distancia.
- Errores angulares (direcciones horizontales y verticales).

Cada uno de estos errores es causado por una variedad de factores instrumentales, metodológicos, ambientales, etc. En el presente trabajo, y debido al objeto del mismo, se pretende profundizar más en

la identificación de las fuentes que en los efectos del propio error. Además, es interesante resaltar el alto grado de automatización que existe en la observación con TLS, lo que sin duda genera la reducción a la mínima expresión de los errores relacionados con el observador. Tal es así que ni se ha incluido en la clasificación de fuentes, aunque estos errores pueden ser más significativos en la etapa de procesado de datos.

#### 4.3.- ERRORES INSTRUMENTALES.

Estos errores son atribuibles al diseño del explorador y a sus especificaciones técnicas, pudiéndose distinguir dos grupos:

- *Fundamentales.* Es decir, inherentes a la física de la desviación del telémetro y de la unidad del haz láser. Estos errores son debidos a las limitaciones naturales del láser empleado en la exploración, no pudiendo ser eliminados mediante diferentes técnicas constructivas.
- *Específicos.* Es decir, son errores específicos al hardware del explorador, incluyendo el telémetro del láser una unidad de desviación y errores en los haces. Estos errores se pueden potenciar o reducir a la mínima expresión mejorando el diseño del sistema o mediante la calibración.

Los errores sistemáticos merecen especial atención en estos instrumentos que, a diferencia de los instrumentos tradicionales, se comportan como cajas negras que no pueden ser controladas ni ajustadas por el usuario siguiendo procedimientos estandarizados. Obviamente, la exactitud de la medida de un explorador láser se encuentra limitada por cada uno de sus componentes, discutiéndose a continuación la influencia de cada uno de ellos.

##### 4.3.1.- ERRORES EN EL TELÉMETRO DEL LÁSER.

Los errores en la medida de la distancia son influenciados por un gran número de fuentes de error, estudiándose a continuación por separado los errores accidentales y sistemáticos.

###### 4.3.1.1.- ERRORES ACCIDENTALES.

Los errores accidentales se pueden analizar para la determinación de ángulos y distancias:

- Los errores accidentales que permiten definir la precisión en la medida de la distancia se determinan mediante la siguiente expresión matemática:

$$\sigma_r = \frac{c}{2} \cdot \frac{0,35}{B \cdot SNR \cdot \sqrt{n}} \quad \text{[III.20]}$$

donde:

*c.*- es la velocidad de propagación de la radiación electromagnética.

*n.*- es el número de medidas a llevar a cabo.

*B.*- es la anchura de banda del pulso que mide el tiempo.

*SNR.*- es la relación señal-ruido de la señal.

- Los errores accidentales que permiten determinar la precisión en la medida de la distancia en base a la medición de los ángulos se define mediante la siguiente expresión:

$$\sigma_{beam} = \pm \frac{\gamma}{4} \quad [III.21]$$

donde  $\gamma$  es la divergencia del haz ya definida anteriormente.

#### 4.3.1.2.- ERRORES SISTEMÁTICOS.

La exactitud de la distancia obtenida con el telémetro láser se limita por los siguientes errores sistemáticos:

- *No linealidad del instrumento.*
- *Tiempo del camino.* Error producido en el discriminador del tiempo debido a las variaciones del mismo que se originan en el pulso con el que se determinan la amplitud y forma.
- *Desviación en la medida del tiempo electrónica.* Debido a variaciones de temperatura.
- *Error cero.* Discrepancia entre el cero eléctrico y cero mecánico en el explorador debido al cableado y componentes electrónicos.
- *Error del factor de escala.* Factor de escala aplicable a la medida de distancias.
- *Píxeles mezclados.* Se producen debido a la divergencia del rayo láser, de forma que si el rayo láser incide en el borde del objeto, una porción de dicho rayo se refleja en la superficie mientras que otra porción deja el objeto.

De acuerdo con la discusión anteriormente citada, el modelo matemático de los errores instrumentales en un telémetro de un explorador láser puede ser escrito tal y como se detalla en la siguiente ecuación (RUEGER, 1990):

$$\Delta r_{inst} = a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot e^{-a_3 \cdot T} + \Delta r_{walk} + (m_0 + m_1 \cdot t + m_2 \cdot t^2 + m_3 \cdot t^3) \cdot r + (b \cdot y) \cdot r + (c \cdot e^{-c_1 \cdot t}) \cdot r + d_1 \cdot r^2 + d_2 \cdot r^3 + d_3 \cdot r^4 + d_4 \cdot r^5 + \dots \quad [III.22]$$

donde  $\Delta r_{inst}$  es el error en la medida de distancia,  $r$  es la distancia medida,  $t$  es la temperatura,  $T$  es el tiempo transcurrido desde el momento en el que se encendió el instrumento,  $y$  es el número de los años pasados desde la compra del explorador, siendo el resto coeficientes que se obtienen del proceso de calibración del instrumento. Los dos primeros términos son los componentes dependientes de la constante y de la temperatura del error cero, respectivamente. El tercer término es la desviación de las distancias que es el componente del calentamiento de la constante aditiva.  $\Delta r_{walk}$  es el error en la medida de distancia debido al tiempo del camino. Los términos desde  $m_0$  hasta  $m_3$  son los factores de posicionamiento. El término  $b$  explica el efecto de envejecimiento del instrumento,  $c$  y  $c_1$  son los coeficientes que explican los efectos de dependencia entre la distancia y el calentamiento. Finalmente, los cuatro términos desde  $d_1$  hasta  $d_4$  son coeficientes de dependencia de la distancia para corregir los errores no lineales en el telémetro láser.

La exactitud en la medición de una distancia medida con explorador láser, y considerando errores instrumentales exclusivamente, se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} \sigma_{r\text{ acc inst}}^2 = & \sigma_r^2 + \sigma_{a_0}^2 + \sigma_{a_1}^2 \cdot t^2 + \sigma_{\Delta r_{walk}}^2 + (\sigma_{a_2}^2 \cdot e^{-2a_3 T} + \sigma_{a_3}^2 \cdot a_2^2 \cdot T^2 \cdot e^{-2a_3 T}) + \\ & + (\sigma_{m_0}^2 + \sigma_{m_1}^2 \cdot t^2 + \sigma_{m_2}^2 \cdot t^4 + \sigma_{m_3}^2 \cdot t^6) \cdot r^2 + \sigma_b^2 \cdot y^2 \cdot r^2 + \\ & (\sigma_c^2 \cdot e^{-2c_1 t} + \sigma_{c_1}^2 \cdot c^2 \cdot t^2 \cdot e^{-2c_1 t}) \cdot r^2 + \sigma_{d_1}^2 \cdot r^4 + \sigma_{d_2}^2 \cdot r^6 + \sigma_{d_3}^2 \cdot r^8 + \sigma_{d_4}^2 \cdot r^{10} \end{aligned} \quad [\text{III.23}]$$

donde  $\sigma_{r\text{ acc inst}}$  es el rango de exactitud,  $\sigma_r$  es el ruido de la distancia medida y el resto de los términos se refiere a los errores estándar en la determinación de los coeficientes de la ecuación [III.22].

### 4.3.2.- ERRORES EN LA UNIDAD DE DESVIACIÓN DEL HAZ.

La adquisición de las nubes de puntos con alta densidad de los mismos se alcanza con la combinación del telémetro con la unidad de desviación del haz, que conforman los exploradores láser, tal y como se conocen hoy día. Este componente introduce otra fuente de errores instrumentales, la influencia en la exactitud de la precisión en la medida del ángulo, que, a diferencia de la exactitud en la distancia, no ha sido bien investigada debido a la dificultad de su evaluación.

En este epígrafe se describen las principales fuentes de error que surgen en este componente del explorador, según la clasificación de las unidades de desviación del haz. Primero se detallarán los errores pertenecientes al diseño poligonal y posteriormente a los oscilantes, debido a que el análisis de los errores específicos de los exploradores que emplean los espejos rotativos es muy difícil de hacer por la falta de información que existe, incluso del diseño del propio espejo. Para finalizar se reseñarán los errores que pueden ser comunes a ambos tipos de unidades de desviación del haz láser.

#### 4.3.2.1.- EXPLORADORES POLIGONALES.

La primera fuente del error en un explorador poligonal son las imperfecciones del espejo rotativo, debido a las propias limitaciones de fabricación del instrumento. Según [MARS-04], estas fuentes de error se pueden estructurar en seis grandes bloques:

- *Variación del ángulo cara a cara.* Variación en el ángulo entre las normales de las caras adyacentes en el polígono, situándose la tolerancia entre valores próximos a 10" - 30".
- *Error piramidal.* Variación media del ángulo deseado entre la cara y la superficie del espejo dato del polígono, siendo la tolerancia típicamente 1'.
- *Variación del eje a la cara (FAV).*
- *Variación del radio de la cara.* Distancia del centro del polígono a la cara dentro de un polígono. La tolerancia es típicamente  $\pm 25 \mu\text{m}$ .
- *Figura superficial.* Dependiendo de la técnica de fabricación, la superficie de la cara puede ser esférica o cilíndrica. Las tolerancias típicas para la cara superficial son  $\lambda/8$  -  $\lambda/10$ , donde  $\lambda$  es la longitud de onda del láser.
- *Aspereza superficial.* Debido a los defectos superficiales de la cara se produce dispersión de rayo láser incidente.

#### 4.3.2.2.- EXPLORADORES OSCILANTES.

La exactitud de un explorador oscilante se determina por sus componentes, estando de una lado el motor, cuyos principales problemas son la histéresis y la no alineación del galvanómetro, y por otro lado se encuentran los errores en los espejos cuyas principales causas son, según [MARS-04]:

- *Deformaciones del espejo.* Resultado de un diseño de montaje incorrecto.
- *Distorsiones de la superficie del espejo.* Debido a los esfuerzos de torsión.
- *Deformaciones térmicas de la superficie del espejo.* Producidas por la conducción del calor de la radiación del láser entrante a la superficie del espejo.
- *La erosión gradual de la capa reflexiva de la superficie del espejo.* Consecuencia de su interacción con las partículas de polvo suspendido en el aire.
- *Falta de planicidad de la superficie del espejo.* Debido a las limitaciones de la fabricación.

#### 4.3.2.3.- ERRORES COMUNES A AMBOS TIPOS.

Se analizan ahora los errores que son comunes a los dos tipos de unidades de desviación del haz, anteriormente descritos. El primero se sustenta en la exactitud angular alcanzada por un explorador, la cual está limitada por la calidad de los sensores de posición angular que determinan las lecturas para las direcciones horizontales y los ángulos verticales. A continuación se detallan algunos de los parámetros que determinan el error en los transductores angulares, especialmente empleados en los exploradores oscilantes:

- *Exactitud.*
- *Estabilidad de temperatura.*
- *Falta de estabilidad en la referencia.*
- *Ganancia de estabilidad.*
- *Relación señal/ruido.*
- *Resolución.*

El segundo de los posibles errores en la unidad de desviación del haz, se puede describir mediante el modelo de error usado en escaneados con láser aerotransportado, puesto que los exploradores terrestres y los aerotransportados utilizan principios similares en la exploración:

- *Error cero.* Constante añadida al ángulo vertical medido, que corresponde al error vertical del índice en la estación topográfica y cuya causa puede ser una falta de alineación del espejo mecánico y del codificador.
- *Error de escala.* Linealmente dependiente del ángulo medido y cuyo origen puede ser una falsa ganancia de control que se produce dentro del convertidor de analógico a digital o del codificador.

#### 4.3.3.- ERRORES AXIALES.

Aunque el modelo geométrico de la estación topográfica no se puede aplicar íntegramente al explorador láser debido a las diferencias en el diseño mecánico, puede ser utilizado como el primer paso para desarrollar el modelo del error en el explorador. Un explorador se caracteriza por tener los siguientes ejes:

- *Eje vertical.* Para un explorador panorámico, éste es el eje de rotación de la cabeza de la exploración en el cual el rayo láser se mueve en la dirección vertical.
- *Eje de la colimación.* Si se asume que el rayo láser es divergente y de forma cónica, éste es el eje que pasa a través del centro del espejo de la exploración y del centro del punto láser en la superficie del objeto.
- *Eje horizontal.* Eje de rotación del espejo de la exploración.

Debido a las tolerancias de la fabricación, estos ejes no se alinean perfectamente y como consecuencia de esta situación aparecen los siguientes errores:

- *Error de colimación (c).* El ángulo entre el eje de colimación y el eje horizontal debe ser normal, medido en el plano que contiene a ambos ejes. Cualquier variación con respecto al ángulo normal, tanto por exceso como por defecto, se considera error de colimación.
- *Error del eje horizontal (i).* El ángulo entre el eje horizontal y el eje vertical debe ser normal, medido en el plano que contiene a ambos ejes. Cualquier variación con respecto al ángulo normal, tanto por exceso como por defecto, se considera error de colimación.

#### 4.4.- ERRORES RELACIONADOS CON EL OBJETO.

Este grupo de errores se asocia a los objetos que son explorados, siendo la principal fuente de los mismos la reflexión de la superficie del objeto. Puesto que TLS es una técnica que examina la reflexión, implica que los resultados en la medida de distancia dependen fuertemente de la reflexión, en gran parte afectada por la SNR. La reflexión se puede definir como el cociente entre la energía reflejada y la incidente del láser, y es función de los factores siguientes:

- *Características materiales del objeto.* Tales como constante dieléctrica, permeabilidad magnética y conductividad.
- *Color de la superficie del objeto.*
- *Longitud de onda del láser.*
- *Ángulo de incidencia del rayo láser.* Disminuyendo la desviación estándar de la distancia medida con el aumento del ángulo de incidencia.
- *La aspereza superficial.* Habitualmente combinada con la longitud de onda y el ángulo de incidencia del rayo con la superficie objeto de escaneado.
- *Polarización del objeto.*

- *Temperatura de la superficie.* Al explorar un objeto en un ambiente industrial caliente, la radiación de fondo inducida en la superficie reduce SNR y así la precisión de las medidas de la distancia [MÄÄT-93].
- *Humedad de la superficie.*

La relación entre la intensidad de las radiaciones emitida y reflejada de la superficie está comúnmente descrita por el modelo geométrico de reflexión Lambertiana en óptica:

$$I = \frac{\rho \cdot \text{Cos}\beta}{R^2} \quad \text{[III.24]}$$

donde I es la intensidad del rayo láser reflejado,  $\rho$  es el coeficiente de reflexión difuso de la superficie,  $\beta$  es el ángulo de la incidencia del haz y R es la distancia al objeto.

La dependencia de la distancia medida por un telémetro láser por la reflexión superficial se denomina interferencia de la distancia/reflexión y está demostrado que la distancia medida a las superficies con diversa reflexión, en la misma distancia al explorador, es diferente. Las superficies con alta reflexión (es decir brillantes) arrojan medidas más fiables y más exactas de la distancia que con la reflexión baja (oscuras), debido a que una porción más grande de la energía del láser es reflejada de nuevo al sensor, es decir, mejora la relación señal-ruido.

#### 4.5.- ERRORES AMBIENTALES.

Los factores ambientales, tales como temperatura ambiente, presión, humedad relativa, iluminación, vibración etc., son importantes en TLS y contribuyen al error de medida, introduciendo variabilidad difícil de controlar. En las siguientes líneas se pretende realizar un análisis de la influencia de estos factores en las medidas con láser escáner.

##### 4.5.1.- ERRORES CAUSADOS POR LA INFLUENCIA DE LA ATMÓSFERA.

La exactitud en la medida de la distancia depende también del conocimiento riguroso de la velocidad de propagación del rayo láser. Esta velocidad depende de índice de refracción del aire, que es función de la temperatura (t), de la presión (p), de la humedad relativa (h) y del contenido de CO<sub>2</sub>. Una de las expresiones que se vienen utilizando para la determinación de este índice para condiciones ambiente específicas, es la siguiente ecuación, caracterizada por ser muy parecida a la popular ecuación adoptada por EDLEN en 1966, que sirve para regiones cercanas al infrarrojo visible y cercano [RUEG-90].

$$(n_{prop} - 1) = (n_{s \tan d} - 1) \cdot \frac{273,15 \cdot p}{(273,15 + t) \cdot 1013,25} - \frac{11,27 \cdot 10^{-6}}{(273,15 + t)} \cdot P_w \quad \text{[III.25]}$$

donde  $n_{prop}$  es el índice de refracción del grupo para las condiciones específicas [dadas por t (°C) y p (mbar)],  $n_{stand}$  es el índice de refracción del grupo para las condiciones estándares (t=0°C, p=1013,25 mbar y contenido del CO<sub>2</sub> de 300 ppm):

$$10^6 (n_{s \tan d} - 1) = 287,604 + 3 \cdot 1,6288 \cdot \sigma^2 + 5 \cdot 0,0136 \cdot \sigma^4 \quad \text{[III.26]}$$

donde  $\sigma = 1/\lambda$  se da en micras. La exactitud total del  $n_{prop}$  calculada con la ecuación [III.25] está dentro de 1 ppm [Ibid]. La exactitud de la resolución del índice de refracción del aire está limitada por la incertidumbre en la determinación de las condiciones atmosféricas, definiéndose su influencia mediante la expresión [Ibid]:

$$dn_{prop} \cdot 10^6 = -1,00 \cdot dt + 0,28 \cdot dp - 0,04 \cdot dP_w \quad [III.27]$$

donde  $dn_{prop}$ ,  $dt$ ,  $dp$  y  $dP_w$  son diferenciales (en las unidades anteriormente definidas) del índice de refracción del grupo, de la temperatura, de la presión y de la presión parcial del vapor de agua, respectivamente.

Recientemente, ecuaciones más modernas para los índices refractivos de la fase y del grupo del aire, para la región visible e infrarrojo próximo y cercano (300 - 1690 nanómetro), han sido desarrolladas por [CIDD-99] basadas en una revisión crítica de las fórmulas existentes. Estas ecuaciones, en parte, han sido incorporadas en el software usado con los exploradores Leica HDS. Solamente la temperatura y la presión pueden ser incorporadas, mientras que la humedad relativa se asume para ser el 60% y el contenido en CO<sub>2</sub> de 450 ppm. El índice de refracción del grupo del aire se calcula como sigue [CIDD-96]:

$$(n_{prop} - 1) = \frac{\rho_a}{\rho_{gaxs}} \cdot (n_{gaxs} - 1) + \frac{\rho_w}{\rho_{gws}} \cdot (n_{gws} - 1) \quad [III.28]$$

donde  $n_{prop}$  es el índice de refracción del grupo en el aire,  $\rho_a$  y  $\rho_{gaxs}$  son la densidad del aire seco para condiciones reales y estándares respectivamente,  $\rho_w$  y  $\rho_{gws}$  son la densidad del vapor de agua puro para condiciones reales y estándares respectivamente,  $n_{gaxs}$  y  $n_{gws}$  son los índices refractivos del grupo para aire seco y vapor de agua puro en condiciones estándares respectivamente. La incertidumbre de la determinación del índice de refracción con las fórmulas de [CIDD-99] se acerca a valores del orden de 0,06 a 0,15 ppm. Según lo descrito anteriormente, los límites prácticos de la exactitud vienen impuestos por la incertidumbre en la determinación de la presión y temperatura. Las ventajas de las fórmulas de CIDDOR comparadas con la fórmula de EDLEN son las siguientes:

- Se basan en parámetros físicos y sus correspondientes unidades.
- Son válidas para todas las gamas de longitud de onda empleadas en exploradores láser modernos y para todas las condiciones atmosféricas prácticas.
- Generan la posibilidad de explicar la variación del contenido del CO<sub>2</sub> debido a los cambios de las condiciones atmosféricas locales o generales.

Existe otro factor importante que no se tiene en cuenta en estas expresiones, producido generalmente en atmósferas no estándares, como pueden ser ambientes industriales, y que es el vapor de diferentes materias que haga cambiar significativamente el índice de refracción, incluso del orden de 0,1-0,2 ppm [CIDD-96]. Un ejemplo de la magnitud del efecto en el índice de refracción son las 1,9 ppm que varía dicho índice cuando se mide en el interior de fábricas industriales [RUEG-90]. Puesto que la exploración láser se emplea a menudo en ambientes hostiles, este efecto debe ser tenido en cuenta.

Los rangos de operación de los exploradores láser son esencialmente cortos, como mucho se suelen medir unos cientos de metros, lo que da mayor flexibilidad en la opción de la ecuación apropiada para el cómputo del índice de refracción del aire, los cuáles expresados relativamente son despreciables para distancias pequeñas, no siendo así en distancias grandes. Para las distancias de hasta algunos

cientos de metros, es suficiente medir los parámetros atmosféricos solamente en la estación del instrumento [Ibid]. Para distancias más largas, del orden de 1 kilómetro, que puede ser medido, por ejemplo, con los exploradores Riegl LMS-Z420i e ILRIS-3D, las fórmulas de CIDDOR pueden ser más apropiadas.

Sabiendo el índice de refracción del grupo  $n_{prop}$  del aire, se puede calcular la primera corrección de la velocidad a la distancia medida con la fórmula de [RUEG-90]:

$$\Delta r_{refr.ind.} = \frac{n_{ref} - n_{prop}}{n_{prop}} \cdot r \quad [III.29]$$

donde  $n_{ref}$  es el índice de refracción “referencia” del aire usado por el explorador y puede ser calculado con los ajustes por defecto de los parámetros atmosféricos usados en el software para un explorador particular. En el programa Cyclone empleado por Leica, los parámetros usados por defecto son 20°C y 1013,25 mbar para la temperatura y presión, respectivamente, y la humedad relativa y el contenido del CO<sub>2</sub> según lo mencionado anteriormente.

#### 4.5.2.- INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES ATMOSFÉRICAS ADVERSAS EN LA MEDIDA.

Todo lo descrito anteriormente se produce cuando el escáner láser se emplea en condiciones de observación favorables o, por lo menos, no adversas, cambiando la situación notablemente cuando las condiciones son adversas, ya que se puede reducir considerablemente la calidad de los datos. Se consideran condiciones adversas en TLS cuando se observa con calima, niebla o lluvia, no considerándose desfavorable la nieve, porque generalmente los escáneres ni siquiera miden con temperaturas bajo cero, salvo algunos equipos puntuales como puede ser el Riegl LMS-210ii que puede observar hasta -10°C.

Tal y como se ha descrito anteriormente, la propagación del rayo láser a través de la atmósfera da lugar al debilitamiento de la señal, efecto caracterizado por el coeficiente de atenuación, definido en la siguiente ecuación:

$$I_R = \frac{I_O}{R^2} \cdot e^{-\gamma R} \quad [III.30]$$

donde  $I_O$  e  $I_R$  son la intensidad emitida y transmitida respectivamente,  $R$  es la distancia y  $\gamma$  el coeficiente de atenuación, que se computa como sigue [WEIC-90]:

$$\gamma = \alpha_m + \beta_m + \alpha_a + \beta_a \quad [III.31]$$

donde  $\alpha$  y  $\beta$  son los coeficientes de absorción y dispersión respectivamente, denotando  $m$  y  $a$  “molécula” y “aerosol”.

La atenuación depende de la longitud de onda y es más significativa para las longitudes de onda visibles, como por ejemplo 532 nanómetros en los exploradores Leica HDS2500 y Leica HDS3000 que para el infrarrojo cercano, por ejemplo los 905 nanómetros en Callidus 1.1. Dentro del intervalo de la longitud de onda de 500-1500 nanómetros, para una distancia de 100 m al nivel del mar, el coeficiente de atenuación para las condiciones atmosféricas favorables se acerca a valores del orden de 0,28 ( $\eta_{atm} = 97\%$ ) y 0,16 ( $\eta_{atm} = 98\%$ ), respectivamente [JELA-92]. Para la calima y la niebla, cuando

Los radios de las partículas presentes en el aire son del orden de 500 nanómetros, el comportamiento no es el mismo que para la lluvia debido al gran tamaño de las gotas de agua. La presencia de la calima o de la niebla conduce a un aumento significativo del coeficiente de atenuación, por ejemplo, para distancias de observación del orden de 100 metros y una calima media (visibilidad 5 kilómetros), el coeficiente de atenuación varía entre cerca de 0,85 y 0,47 para los intervalos de longitud de onda mencionados anteriormente, siendo la atenuación más fuerte para distancias más largas.

#### **4.5.3.- INTERFERENCIA DE LA RADIACIÓN.**

La radiación externa producida por fuentes como lámparas, la luz solar, etc. puede interferir en la precisión de las medidas de distancia si es considerablemente fuerte comparada con la energía detectada del láser, que se concentra en una banda de frecuencia muy estrecha [BOEH-05]. La cantidad de radiación que interfiere se puede reducir mediante un filtro óptico colocado delante de la lente del receptor o entre la lente y el detector [MÄÄT-93]. El problema de la radiación que interfería puede ser evitado explorando de noche; sin embargo, esto genera otros problemas como la pérdida de puntos con la cámara fotográfica.

#### **4.6.- ERRORES METODOLÓGICOS.**

El siguiente grupo de causas pretende establecer los errores debidos a la metodología empleada en el proceso de exploración. Se pueden mencionar fuentes de error tales como la densidad del láser (que depende de la resolución de muestreo elegida del explorador) y distancia al objeto [STAI-05]. Conviene observar que el último factor también fue mencionado en apartados anteriores, cuando se analizaron los errores en el telémetro láser, con respecto a la distancia de operación máxima del explorador. Así mismo hay errores asociados a la georreferenciación de la nube de puntos que, como ya se ha descrito anteriormente, puede ser directa o indirecta.

##### **4.6.1.- ERRORES METODOLÓGICOS EN GEORREFERENCIACIÓN INDIRECTA.**

A continuación se analiza la propagación del error para los dos primeros pasos de la georreferenciación indirecta, descrita en apartados anteriores, y basada en el uso de los puntos de lazo y control. Las ecuaciones han sido determinadas por [BALI-04] y la notación empleada es la siguiente:

$X_i$ .- Coordenadas de la nube de puntos en el sistema coordenado del explorador, específico para cada exploración.

$X_g$ .- Coordenadas de los puntos en el sistema "global", en el cual se colocan las nubes trasladadas al punto estación.

$X_e$ .- Coordenadas de los puntos en el sistema coordenado externo.

$R_{ig}$ ,  $R_{ge}$ ,  $R_{ie}$ .- Matrices de rotación, son función de los ángulos  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  y  $\alpha_3$  sobre los ejes  $x, y, z$  respectivamente, entre el sistema del explorador y el sistema global respectivamente.

$\Delta X_{ig}$ ,  $\Delta X_{ge}$ ,  $\Delta X_{ie}$ .- Vectores de traslación entre el sistema del explorador y el sistema global externo, respectivamente.

$\mu$ .- Factor de escala entre el sistema del explorador y el sistema global externo, respectivamente.

En el primer paso del registro, el vector coordenado  $X_i$  de un punto  $j$  en el sistema del explorador y su matriz  $C_{X_i}$  de varianzas-covarianzas es dado por las siguientes ecuaciones:

$$X_i = \begin{bmatrix} x_j \\ y_j \\ z_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_j \cdot \cos \varphi_j \cdot \cos \theta_j \\ r_j \cdot \text{sen} \varphi_j \cdot \cos \theta_j \\ r_j \cdot \text{sen} \theta_j \end{bmatrix} \quad [\text{III.32}]$$

$$C_{X_i} = J \cdot C_{inst} \cdot J^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_j}{\partial r_j} & \frac{\partial x_j}{\partial \varphi_j} & \frac{\partial x_j}{\partial \theta_j} \\ \frac{\partial y_j}{\partial r_j} & \frac{\partial y_j}{\partial \varphi_j} & \frac{\partial y_j}{\partial \theta_j} \\ \frac{\partial z_j}{\partial r_j} & \frac{\partial z_j}{\partial \varphi_j} & \frac{\partial z_j}{\partial \theta_j} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_r^2 & & \\ & \sigma_\varphi^2 + \sigma_{beam}^2 & \\ & & \sigma_\theta^2 + \sigma_{beam}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial x_j}{\partial r_j} & \frac{\partial x_j}{\partial \varphi_j} & \frac{\partial x_j}{\partial \theta_j} \\ \frac{\partial y_j}{\partial r_j} & \frac{\partial y_j}{\partial \varphi_j} & \frac{\partial y_j}{\partial \theta_j} \\ \frac{\partial z_j}{\partial r_j} & \frac{\partial z_j}{\partial \varphi_j} & \frac{\partial z_j}{\partial \theta_j} \end{bmatrix}^T = \quad [\text{III.33}]$$

$$C_{X_i} = J \cdot C_{inst} \cdot J^T = \begin{bmatrix} \sigma_{x_j}^2 & \sigma_{x_j y_j} & \sigma_{x_j z_j} \\ \sigma_{y_j x_j} & \sigma_{y_j}^2 & \sigma_{y_j z_j} \\ \sigma_{z_j x_j} & \sigma_{z_j y_j} & \sigma_{z_j}^2 \end{bmatrix}$$

En las ecuaciones anteriores, el  $r_j$ ,  $\varphi_j$ ,  $\theta_j$  es la distancia, dirección horizontal y el ángulo vertical medidos del punto  $j$  en la nube de puntos, respectivamente  $\sigma_r^2$ ,  $\sigma_\varphi^2$ ,  $\sigma_\theta^2$ , son sus variaciones respectivas, que pueden ser obtenidas mediante las especificaciones del fabricante,  $\sigma_{beam}$  es la incertidumbre debido a la amplitud de rayo, calculada en la ecuación [III.21]. A partir de estos datos el procedimiento es el siguiente:

- Transformación  $X_i \rightarrow X_g$

$$X_g = \Delta X_{ig} + R_{ig} \cdot X_i \quad [\text{III.34}]$$

- La matriz de varianzas-covarianzas de las coordenadas  $X_i$  es:

$$C_{X_g} = J_p^{ig} \cdot C_p^g \cdot (J_p^{ig})^T + R_{ig} \cdot C_{X_i} \cdot R_{ig}^T \quad [\text{III.35}]$$

donde  $C_p^g$  es la matriz de varianzas-covarianzas de los parámetros de la transformación Helmert  $P_{ig} = [\Delta X_{ig}^T, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3]^T$  entre el explorador y el sistema global, y

$$J_P^{ig} = \frac{\partial X_g}{\partial P_{ig}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial X_g}{\partial \Delta X_{ig}} & \frac{\partial X_g}{\partial \Delta Y_{ig}} & \frac{\partial X_g}{\partial \Delta Z_{ig}} & \frac{\partial X_g}{\partial \alpha_1} & \frac{\partial X_g}{\partial \alpha_2} & \frac{\partial X_g}{\partial \alpha_3} \\ \frac{\partial Y_g}{\partial \Delta X_{ig}} & \frac{\partial Y_g}{\partial \Delta Y_{ig}} & \frac{\partial Y_g}{\partial \Delta Z_{ig}} & \frac{\partial Y_g}{\partial \alpha_1} & \frac{\partial Y_g}{\partial \alpha_2} & \frac{\partial Y_g}{\partial \alpha_3} \\ \frac{\partial Z_g}{\partial \Delta X_{ig}} & \frac{\partial Z_g}{\partial \Delta Y_{ig}} & \frac{\partial Z_g}{\partial \Delta Z_{ig}} & \frac{\partial Z_g}{\partial \alpha_1} & \frac{\partial Z_g}{\partial \alpha_2} & \frac{\partial Z_g}{\partial \alpha_3} \end{bmatrix} \quad [\text{III.36}]$$

- Transformación  $X_g \rightarrow X_e$

$$X_e = \Delta X_{ge} + \mu \cdot R_{ge} \cdot X_g \quad [\text{III.37}]$$

Combinando las ecuaciones [III.34] y [III.37] se obtiene:

$$X_e = \Delta X_{ge} + \mu \cdot R_{ge} \cdot (\Delta X_{ig} + R_{ig} \cdot X_i) \quad [\text{III.38}]$$

- La matriz de la varianzas-covarianzas de los coordenadas Xe se expresa de la siguiente forma:

$$C_{X_e} = J_p^{ge} \cdot C_p^e \cdot (J_p^{ge})^T + \mu^2 \cdot R_{ge} \cdot C_{X_g} \cdot R_{ge}^T = \\ C_{X_e} = J_p^{ge} \cdot C_p^e \cdot (J_p^{ge})^T + \mu^2 \cdot R_{ge} \cdot (J_p^{ig} \cdot C_p^g \cdot (J_p^{ig})^T + R_{ig} \cdot C_{X_i} \cdot R_{ig}^T) \cdot R_{ge}^T \quad [\text{III.39}]$$

donde:

$$J_p^{ge} = \frac{\partial X_e}{\partial P_{ge}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial X_e}{\partial \Delta X_{ge}} & \frac{\partial X_e}{\partial \Delta Y_{ge}} & \frac{\partial X_e}{\partial \Delta Z_{ge}} & \frac{\partial X_e}{\partial \mu} & \frac{\partial X_e}{\partial \alpha'_1} & \frac{\partial X_e}{\partial \alpha'_2} & \frac{\partial X_e}{\partial \alpha'_3} \\ \frac{\partial Y_e}{\partial \Delta X_{ge}} & \frac{\partial Y_e}{\partial \Delta Y_{ge}} & \frac{\partial Y_e}{\partial \Delta Z_{ge}} & \frac{\partial Y_e}{\partial \mu} & \frac{\partial Y_e}{\partial \alpha'_1} & \frac{\partial Y_e}{\partial \alpha'_2} & \frac{\partial Y_e}{\partial \alpha'_3} \\ \frac{\partial Z_e}{\partial \Delta X_{ge}} & \frac{\partial Z_e}{\partial \Delta Y_{ge}} & \frac{\partial Z_e}{\partial \Delta Z_{ge}} & \frac{\partial Z_e}{\partial \mu} & \frac{\partial Z_e}{\partial \alpha'_1} & \frac{\partial Z_e}{\partial \alpha'_2} & \frac{\partial Z_e}{\partial \alpha'_3} \end{bmatrix} \quad [\text{III.40}]$$

Aquí,  $C_p^e$  es la matriz de varianzas-covarianzas de los parámetros de la transformación Helmert  $P_{ge} = [\Delta X_{ge}^T, \mu, \alpha'_1, \alpha'_2, \alpha'_3]^T$  entre los sistemas globales y externos. En esta expresión sólo se incluyen los errores de la georreferenciación y los instrumentales.

En el segundo paso se procede a la georreferenciación indirecta, procedimiento en el que todas las nubes de puntos son transformadas directamente en el sistema externo de la siguiente manera:

$$X_e = \Delta X_{ie} + \mu \cdot R_{ie} \cdot X_i \quad [\text{III.41}]$$

La matriz de varianzas-covarianzas de las coordenadas Xe es:

$$C_{X_e} = J_p^{ie} \cdot C_p^e \cdot (J_p^{ie})^T + \mu^2 \cdot R_{ie} \cdot C_{X_i} \cdot R_{ie}^T \quad [\text{III.42}]$$

donde:

$$J_p^{ie} = \frac{\partial X_e}{\partial P_{ie}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial X_e}{\partial \Delta X_{ie}} & \frac{\partial X_e}{\partial \Delta Y_{ie}} & \frac{\partial X_e}{\partial \Delta Z_{ie}} & \frac{\partial X_e}{\partial \mu} & \frac{\partial X_e}{\partial \alpha''_1} & \frac{\partial X_e}{\partial \alpha''_2} & \frac{\partial X_e}{\partial \alpha''_3} \\ \frac{\partial Y_e}{\partial \Delta X_{ie}} & \frac{\partial Y_e}{\partial \Delta Y_{ie}} & \frac{\partial Y_e}{\partial \Delta Z_{ie}} & \frac{\partial Y_e}{\partial \mu} & \frac{\partial Y_e}{\partial \alpha''_1} & \frac{\partial Y_e}{\partial \alpha''_2} & \frac{\partial Y_e}{\partial \alpha''_3} \\ \frac{\partial Z_e}{\partial \Delta X_{ie}} & \frac{\partial Z_e}{\partial \Delta Y_{ie}} & \frac{\partial Z_e}{\partial \Delta Z_{ie}} & \frac{\partial Z_e}{\partial \mu} & \frac{\partial Z_e}{\partial \alpha''_1} & \frac{\partial Z_e}{\partial \alpha''_2} & \frac{\partial Z_e}{\partial \alpha''_3} \end{bmatrix} \quad [\text{III.43}]$$

siendo  $C_p^e$  la matriz de varianzas-covarianzas de los parámetros de la transformación de Helmert  $P_{ie} = [\Delta X_{ie}^T, \mu, \alpha''_1, \alpha''_2, \alpha''_3]^T$  entre el explorador y los sistemas externos.

La precisión de la transformación se deteriora cuando los puntos de control son co-lineales y/o cuando están situados lejos del explorador. Los puntos se deben distribuir uniformemente sobre la superficie explorada, con una buena variación de profundización y la cercanía de los puntos al explorador mejorará la solución de la transformación. Un aumento del número de puntos sobre los tres puntos mínimos requeridos mejora normalmente la calidad de la georreferenciación, aunque después de agregar un cuarto punto el aumento no es excesivamente significativo, para el incremento de trabajo que se genera durante la exploración y la posterior coordinación [GORD-04].

#### 4.6.2.- ERRORES METODOLÓGICOS EN GEORREFERENCIACIÓN DIRECTA.

En el procedimiento de georreferenciación directa, se determina la posición y la orientación del explorador independientemente, y posteriormente las coordenadas de todos los puntos de la nube en el sistema externo. El explorador se puede dirigir y centrar hacia un punto de control conocido, del que se mide la altura; por otra parte, la posición del explorador (nivelado de forma precisa previamente) se puede determinar con una estación total o un receptor GPS. La orientación del explorador puede ser resolver mediante dos procedimientos [LICH-04]:

- Si el explorador está equipado con un anteojo, orientando dicho anteojo al punto de control.
- Con la exploración, en alta resolución de muestreo y la identificación automática de los puntos y sus correspondientes coordenadas en el sistema externo.

Las coordenadas de un punto de la nube en el sistema externo se obtienen [Ibid]:

$$X_e = X_{scanner} + \mu \cdot R_{ie}(\alpha_3) \cdot X_i \quad [\text{III.44}]$$

donde  $X_{scanner}$  son las coordenadas originales en el sistema coordinado del explorador,  $\mu$  es el factor de escala y  $R_{ie}(\alpha_3)$  es la matriz de la rotación entre los dos sistemas. En el caso presente, es función solamente del acimut ( $\alpha_3$ ) de la estación del explorador al punto empleado en la orientación. No hay que olvidar que el equipo se debe nivelar de forma precisa mediante un compensador de eje dual.

La precisión total de la georreferenciación directa del punto, en la nube de puntos, viene definida por la matriz varianza- covarianza que se puede determinar mediante la siguiente expresión [RESH-06]:

$$C_{X_e} = C_{scanner} + \mu^2 \cdot \left[ R_{ie}(\alpha_3) \cdot J(C_{inst} + C_{set}) \cdot J^T \cdot (R_{ie}(\alpha_3))^T + \sigma_{\alpha_3}^2 \cdot \frac{\partial X_e}{\partial \alpha_3} \cdot \left( \frac{\partial X_e}{\partial \alpha_3} \right)^T \right] \quad [III.45]$$

donde la matriz de varianzas-covarianzas  $C_{inst}$  se define como sigue:

$$C_{inst} = diag(\sigma_r^2, \sigma_\varphi^2 + \sigma_{beam}^2, \sigma_\theta^2 + \sigma_{beam}^2) \quad [III.46]$$

y el resto de los términos ya fueron previamente explicados. Como en la discusión de la georreferenciación indirecta, se asume que solamente están presentes los errores debido a la georreferenciación e instrumentales.

#### 4.7.- EL MODELO DEL ERROR DE TLS.

A continuación se presenta un modelo de error construido sobre los modelos de error para la georreferenciación directa e indirecta descritos por [GORD-04], posteriormente modificados para explicar los errores adicionales no tenidos en cuenta previamente. El indicador de calidad de los datos se encuentra en la exactitud de los coordenadas 3D de un punto en el sistema coordenado externo, descrita por la matriz  $C_X$  de varianzas-covarianzas.

Antes de la determinación de la matriz  $C_X$  se deben corregir los observables, distancia, direcciones horizontales y ángulos verticales, para todos los errores sistemáticos significativos. Las correcciones a la distancia explican los errores instrumentales, objeto-relacionados y ambientales. La corrección para los errores instrumentales se puede calcular con la ecuación:

$$\Delta r_{inst} = a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot e^{-a_3 \cdot T} + \Delta r_{walk} + (m_0 + m_1 \cdot t + m_2 \cdot t^2 + m_3 \cdot t^3) \cdot r + (b \cdot y) \cdot r + (c \cdot e^{-c_1 \cdot t}) \cdot r + d_1 \cdot r^2 + d_2 \cdot r^3 + d_3 \cdot r^4 + d_4 \cdot r^5 + \dots \quad [III.47]$$

El error estándar de la primera corrección de la velocidad se puede conseguir con la propagación de error aplicada en la ecuación [III.29], obteniéndose:

$$\sigma_{refr.ind.} = \frac{\sigma_n}{n_{prop}} \cdot r \quad [III.48]$$

donde  $\sigma_n$  es el error estándar en la determinación del índice de refracción del aire y el resto de los términos fueron explicados anteriormente. La corrección total  $\Delta r_{corr}$  a la distancia medida se calcula tal y como se describe en la siguiente ecuación:

$$\Delta r_{corr} = -\Delta r_{inst} - \Delta r_{reflect} + \Delta r_{refr.ind.} - \Delta r_{mult.rest} \quad [III.49]$$

donde  $\Delta r_{inst}$ ,  $\Delta r_{reflect}$ ,  $\Delta r_{mult.rest}$  son las compensaciones a la distancia medida debido a los errores instrumentales, la reflexión y las múltiples reflexiones del objeto respectivamente, y  $\Delta r_{refr.ind.}$  es la primera corrección de la velocidad. El rango total de la exactitud se puede calcular con la siguiente expresión:

$$\sigma_{r\ acc}^2 = \sigma_{r\ acc\ inst}^2 + \sigma_{reflect}^2 + \sigma_{refr.ind.}^2 + \sigma_{mult.ret.}^2 \quad [III.50]$$

donde  $\sigma_{raccinst}$  es el rango de exactitud que se determina por los errores únicamente instrumentales, pudiéndose calcular con la ecuación [III.23],  $\sigma_{reflect}$ ,  $\sigma_{mult.ret}$  son los errores estándar del offsets y  $\Delta r_{reflect}$ ,  $\sigma_{mult.rest}$  y  $\sigma_{refr.ind.}$  es el error estándar del  $\Delta r_{refr.ind.}$  calculado con la ecuación [III.48].

Las correcciones a las direcciones horizontales ( $\Delta\varphi_{corr}$ ) y a los ángulos verticales ( $\Delta\theta_{corr}$ ) explican los errores sistemáticos instrumentales. Se pueden calcular como sigue:

$$\Delta\varphi_{corr} = -\left(\frac{c}{\cos\theta_{scan}} + i \cdot \tan\theta_{scan}\right) \quad [III.51]$$

$$\Delta\theta_{corr} = -(\theta_o + \theta_{scan} \cdot \delta\theta) \quad [III.52]$$

donde  $c$ ,  $i$ ,  $\theta_o$  son la colimación del eje horizontal, el índice vertical y los errores verticales de la escala respectivamente, y  $\varphi_{scan}$  y  $\theta_{scan}$  son el ángulo horizontal y el vertical medido, respectivamente. Las exactitudes de las direcciones horizontales y verticales corregidas pueden ser calculadas como sigue:

$$\sigma_{\varphi_{acc}}^2 = \sigma_{\varphi}^2 + \frac{\sigma_c^2}{\cos^2\theta_{scan}} + \tan^2\theta_{scan} \cdot \sigma_i^2 \quad [III.53]$$

$$\sigma_{\theta_{acc}}^2 = \sigma_{\theta}^2 + \sigma_{\theta_o}^2 + \theta_{scan}^2 \cdot \sigma_{\delta\theta}^2 \quad [III.54]$$

donde  $\sigma_{\varphi}$  y  $\sigma_{\theta}$  son el ruido en las direcciones horizontales y ángulos verticales respectivamente, asumiendo que para su determinación se tienen en cuenta principalmente las características de los sensores de posición angular:  $\sigma_c$ ,  $\sigma_i$ ,  $\sigma_{\theta_o}$  y  $\sigma_{\delta\theta}$  que son los errores estándar en la determinación de la colimación, del eje horizontal, del índice vertical y de los errores verticales de la escala, respectivamente.

Si se asume que todos los errores sistemáticos se han corregido, se puede definir la matriz  $C_x$  de varianzas-covarianzas que proporciona un cálculo de la exactitud. Para la georreferenciación indirecta se determina mediante la expresión desarrollada por [RESH-06]:

- Cuando las exploraciones son múltiples, primero se combinan en una nube “global” de puntos, que entonces se transformará en el sistema externo, tal y como se describe en la ecuación [III.38]:

$$C_{X_e} = J_p^{ge} \cdot C_p^e \cdot (J_p^{ge})^T + \mu^2 \cdot R_{ge} \cdot C_{X_g} \cdot R_{ge}^T = \quad [III.55]$$

$$C_X = J_p^{ge} \cdot C_p^e \cdot (J_p^{ge})^T + \mu^2 \cdot R_{ge} \cdot (J_p^{ig} \cdot C_p^g \cdot (J_p^{ig})^T + R_{ig} \cdot J(C_{inst} + C_{env}) \cdot J^T \cdot R_{ig}^T) \cdot R_{ge}^T$$

- Cuando las exploraciones son múltiples, se transforman por separado en el sistema externo, como se describe en la ecuación [III.41]:

$$C_X = J_p^{ie} \cdot C_p^e \cdot (J_p^{ie})^T + \mu^2 \cdot R_{ie} \cdot C_{X_i} \cdot R_{ie}^T = J_p^{ie} \cdot C_p^e \cdot (J_p^{ie})^T + \mu^2 \cdot R_{ie} \cdot J(C_{inst} + C_{env}) \cdot J^T \cdot R_{ie}^T \quad [III.56]$$

Para georreferenciación directa, la matriz  $C_x$  se obtiene de la expresión [III.45]:

$$C_X = C_{scanner} + \mu^2 \cdot \left[ R_{ie}(\alpha_3) \cdot J(C_{inst} + C_{env} + C_{set}) \cdot J^T \cdot (R_{ie}(\alpha_3))^T + \sigma_{\alpha_3}^2 \cdot \frac{\partial X_e}{\partial \alpha_3} \cdot \left( \frac{\partial X_e}{\partial \alpha_3} \right)^T \right] \quad [III.57]$$

En las ecuaciones [III.55] y [III.57], se calculan las matrices de varianzas-covarianzas  $C_{inst}$  y  $C_{env}$  como sigue:

$$C_{inst} = \begin{bmatrix} \sigma_{r_{acc}}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\varphi_{acc}}^2 + \sigma_{beam}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\theta_{acc}}^2 + \sigma_{beam}^2 \end{bmatrix} \quad [III.58]$$

donde  $\sigma_{r_{acc}}$ ,  $\sigma_{\varphi_{acc}}$  y  $\sigma_{\theta_{acc}}$  son las precisiones de la distancia, dirección horizontal y del ángulo de la vertical, calculados en las ecuaciones [III.50], [III.53] y [III.54] respectivamente, y  $\sigma_{beam}$  es la incertidumbre debido a la amplitud de rayo, que se puede calcular con la ecuación [III.21]. Se debe observar que puesto que se obtienen los parámetros de Helmert usando las coordenadas de los puntos en el explorador y los sistemas externos, el error de la reducción del punto se incluye en las matrices de varianzas-covarianzas de los parámetros de Helmert [III.55] y [III.56]. En la ecuación [III.57] está la matriz Cset, en la que se tiene en cuenta la orientación hecha sin antejo, mediante exploración a un punto con alta resolución.

$$C_{env} = \begin{bmatrix} \sigma_{vibr\_r}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\sigma_{r\_wander}^2}{2} + \sigma_{vibr\_hor}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\sigma_{r\_wander}^2}{2} + \sigma_{vibr\_vert}^2 \end{bmatrix} \quad [III.59]$$

donde  $\sigma_{r\_wander}^2$  es la variación radial del haz, definido en la siguiente ecuación:

$$\sigma_{r\_wander}^2 = 1,83 \cdot C_n^2 \cdot \lambda^{-1/6} \cdot R^{17/6} \quad [III.60]$$

$\sigma_{vibr\_r}$ ,  $\sigma_{vibr\_hor}$  y  $\sigma_{vibr\_vert}$  son los errores accidentales de la distancias y dirección horizontal y vertical respectivamente inducidos por la vibración.

El modelo del error en TLS descrito por las ecuaciones [III.55] y [III.56] se basa en los resultados obtenidos por [GORD-04] y son, sin duda alguna, la referencia utilizada para determinar hoy día el error en observaciones con láser escáner. Reshetyuk en su tesis doctoral titulada “*Investigation and calibration of pulsed TOF terrestrial laser scanners*” defendida en el Royal Institute of Technology de Estocolmo en Octubre de 2006, establece una combinación de ambas en la ecuación [III.57] que actualmente es la que más se está utilizando.

