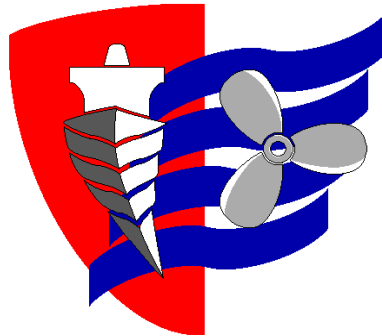


ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

**DISEÑO Y DESARROLLO DE UN EQUIPO Y
SOFTWARE PARA LA MEDIDA Y ANÁLISIS
DE VIBRACIONES EN MÁQUINAS**

***DESIGN AND DEVELOPMENT OF AN
EQUIPMENT AND ITS SOFTWARE FOR
VIBRATION MEASUREMENT AND ANALYSIS
ON MACHINERY***

Para acceder al Título de Grado en

INGENIERÍA MARÍTIMA

Autor: Héctor de los Ojos Barroso

Director: Alfredo Girón Portilla

Julio – 2020

A mi familia, novia y amigos

ÍNDICE

Resumen	9
Palabras clave	9
Summary	10
Keywords	10
1. Planteamiento del problema.....	12
1.1. General.....	12
1.1.1. Título	12
1.1.2. Destinatario	12
1.1.3. Objeto del proyecto	12
1.2. Parámetros a medir-monitorizar	13
2. Fundamentos teóricos	15
2.1. Vibraciones	15
2.1.1. Historia.....	15
2.1.2. ¿Qué son las vibraciones?.....	19
2.1.3. Parámetros que definen las vibraciones	19
2.1.4. Tipos de vibraciones	20
2.2. Aceleración, velocidad y desplazamiento	22
2.3. Dominio de tiempo y frecuencia.....	24
2.4. Medida de vibraciones	25
2.4.1. La importancia de la medida y estudio de las vibraciones	25
2.4.2. Transductores de vibración.....	26
2.4.3. Análisis espectral	34
2.4.3.1. Que espectro debemos elegir en el análisis	38
2.5. Vibraciones en maquinaria y mantenimiento	39
2.5.1. Fallos detectables mediante vibración en máquinas.....	39

2.5.1.1. Desequilibrio	39
2.5.1.2. Desalineamiento	41
2.5.1.3. Excentricidad del rotor	43
2.5.1.4. Eje doblado o rotor inclinado.....	44
2.5.1.5. Fallos en cojinetes	45
2.5.1.6. Fallos en rodamientos.....	48
2.5.1.7. Fallos en engranajes-reductoras.....	53
2.5.1.8. Resonancia.....	57
2.5.1.9. Fallos en correas de transmisión y poleas.....	59
2.5.1.10. Problemas en motores eléctricos	64
2.5.1.11. Problemas en máquinas alternativas	69
2.5.1.12. Piezas sueltas o aflojadas.....	71
2.5.1.13. Rozamiento del rotor o partes giratorias	72
2.5.2. Fenómenos de fluidos en la maquinaria	73
2.5.2.1. Frecuencia de paso de paleta.....	73
2.5.2.2. Cavitación	74
2.5.2.3. Turbulencias	75
2.5.3. Carta de Rathbone.....	76
2.5.4. Normativa.....	77
2.5.4.1. Norma ISO 10816	78
2.5.4.1. Norma ISO 2372	92
2.6. Vibraciones en buques	92
2.6.1. Normativa.....	93
2.6.1.1. Norma ISO 6954	93
2.6.1.2. Norma ISO 4867	95
3. Elección de elementos para el desarrollo.....	102

3.1.	Unidad electrónica- hardware	102
3.1.1.	Sensor de medida.....	103
3.1.2.	Microcontrolador/procesador	106
3.1.3.	Conexión USB	109
3.1.4.	Regulación de tensión	111
3.1.5.	Conversión de niveles lógicos.....	113
3.2.	Software.....	115
3.3.	Encapsulado	116
3.4.	Otros	116
3.4.1.	Tornillería de sujeción PCB-caja.....	116
3.4.2.	Cable Micro-USB	116
3.4.3.	Núcleos de ferrita.....	117
3.4.4.	Imanes de fijación	118
4.	Desarrollo	120
4.1.	Introducción	120
4.2.	Hardware	120
4.2.1.	Sensor de medida.....	120
4.2.2.	Microcontrolador	121
4.2.2.1.	Carga de Bootloader	122
4.2.2.2.	Programación del microcontrolador	123
4.2.3.	Conexión USB	129
4.2.4.	Regulación de tensión	130
4.2.5.	Conversión de niveles lógicos.....	131
4.2.6.	Diseño del circuito impreso	133
4.3.	Software.....	136
4.3.1.	Introducción	136

4.3.2.	Comunicación	136
4.3.3.	Recepción de datos	137
4.3.4.	Procesamiento de señal.....	139
4.3.5.	Calibración	142
4.3.6.	Almacenamiento provisional de datos	144
4.3.7.	Reprocesamiento de datos y filtrado de señal	146
4.3.8.	Creación de espectros FFT y análisis de picos.....	148
4.3.9.	Obtención de otros resultados	150
4.3.10.	Análisis de normas.....	151
4.3.11.	Guardado de datos y creación de reportes	153
4.3.12.	Apertura de documentos.....	161
4.4.	Encapsulado	164
4.4.1.	Introducción	164
4.4.2.	Diseño.....	166
4.5.	Calibración antes de puesta en servicio	168
5.	Fabricación.....	172
5.1.	Planos.....	172
5.2.	Lista de componentes electrónicos.....	181
5.3.	Archivos de fabricación de la PCB.....	181
5.4.	Fabricación de las carcasas protectoras.....	182
5.5.	Programa del microcontrolador.....	186
6.	Presupuesto	190
6.1.	Presupuesto desglosado en partidas.....	190
6.1.1.	Componentes electrónicos.....	191
6.1.2.	Otros componentes.....	192
6.1.3.	Fabricación del circuito impreso.....	192

6.1.4.	Fabricación de las cajas protectoras.....	193
6.1.5.	Diseño y desarrollo del instrumento	194
6.1.6.	Soldadura, ensamblado de componentes y montaje	194
6.2.	Balance final del presupuesto	195
7.	Pliego de condiciones	197
8.	Manual.....	199
8.1.	Primeros pasos.....	199
8.2.	Inicialización del programa	199
8.3.	Descripción de pantallas del programa.....	200
8.3.1.	Modo Offline.....	201
8.3.2.	Modo Online.....	201
8.3.3.	Aceleración, Velocidad y desplazamiento	202
8.3.4.	Resultados	203
8.3.5.	ISO 10816.....	204
8.3.6.	Guardado de datos	205
8.4.	Conexión al dispositivo y desconexión	205
8.5.	Lectura de datos y calibración	206
8.6.	Toma de datos.....	208
8.7.	Análisis espectral.....	209
8.8.	Evaluación de resultados.....	210
8.9.	Evaluación en normas ISO	212
8.10.	Guardado de datos.....	214
8.11.	Apertura de datos para reprocesado	218
8.12.	Requisitos mínimos del PC.....	219
9.	Anexos	221
9.1.	Anexo I-Presupuestos de fabricación de PCB	221

10.	Bibliografía	224
10.1.	Libros, seminarios y documentos	224
10.2.	Normativa y sociedades de clasificación	224
10.3.	Páginas web	225
10.4.	Hojas de características de componentes empleados	226
10.5.	Otros.....	226

RESUMEN

En este trabajo, se desarrolla un instrumento electrónico conectable mediante USB a un PC dedicado a la medición y análisis de vibraciones en partes no rotativas de máquinas mediante el software también desarrollado en este proyecto.

El software (compatible con Windows 7, Windows 8 y Windows 10 de 64 bits), es capaz de analizar vibraciones en un rango de 0 a 1100Hz en los tres ejes ortogonales, mostrando los niveles característicos de amplitud vibratoria en términos de aceleración, velocidad y desplazamiento: Valores RMS, pico, pico-pico y medio.

También dispone de la capacidad de análisis de vibraciones en el dominio de frecuencias, pudiendo de este modo encontrar posibles fallos o averías en equipos de forma anticipada, gracias a las funciones de análisis de determinación de los valores de amplitud, en términos RMS o pico que este software incluye, lo que permite identificar picos en frecuencias específicas, así como la determinación de armónicos con exactitud.

Además, incluye un filtro de frecuencias, que permite analizar en un determinado rango de las mismas, obteniendo los valores anteriormente citados, en el rango de frecuencias deseado.

Asimismo, dispone de la opción de determinación del estado del equipo de acuerdo a la norma ISO 10816 y su nivel de vibración.

Finalmente, el software es capaz de guardar los datos en forma de reporte en formato Word y/o en Excel para su posterior reprocesamiento, así como del guardado de gráficas.

PALABRAS CLAVE

Datalogger, FFT, Vibración, RMS, análisis, ISO 10816, ISO 2372

SUMMARY

This project shows the development of an electronic instrument that can be connected via USB to a PC dedicated to the measurement and analysis of vibrations in non-rotating parts of machines using the developed software.

The software (compatible with Windows 7, Windows 8 and Windows 10 x64), is capable of analyzing vibrations in a range from 0 to 1100Hz in the three orthogonal axes, showing the characteristic levels of vibration amplitude in terms of acceleration, speed and displacement: RMS, peak, peak-peak and mean values.

It also has the ability to analyze vibrations in the frequency domain, thus being able to find possible failures or breakdowns in equipment in advance, working with the analysis functions for determining amplitude values, in terms of RMS or peak that this software includes, allowing to identify peaks in specific frequencies, as well as the determination of harmonics with precision.

In addition, it includes a frequency filter, which allows analyzing in a certain range of them, obtaining the aforementioned values, in the desired frequency range.

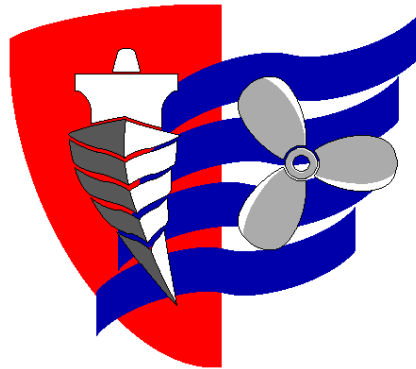
It also has the option of determining the state of the equipment according to ISO 10816 and its level of vibration.

Finally, the software is capable of saving the data in a report in Word format, and/or in Excel for subsequent reprocessing, as well as saving graphs.

KEYWORDS

Datalogger, FFT, Vibration, RMS, analysis, ISO 10816, ISO 2372

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

TRABAJO FIN DE GRADO
INGENIERÍA MARÍTIMA

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. GENERAL

1.1.1.TÍTULO

Diseño y desarrollo de un equipo y software para la medida y análisis de vibraciones en máquinas.

1.1.2.DESTINATARIO

El destinatario del presente proyecto es la Escuela Técnica Superior de Náutica de la Universidad de Cantabria, donde se presentará como Trabajo Fin de Grado al objeto de obtener el título de Grado en Ingeniería Marítima.

1.1.3.OBJETO DEL PROYECTO

El objeto de este proyecto es desarrollar un equipo para la medición de las vibraciones en máquinas y buques, así como un software capaz de guardar y analizar estos datos permitiéndonos con ello encontrar posibles fallos de tipo mecánico en los equipos.

Asimismo, permite identificar qué estado de vibración se encuentra el equipo en base a la norma ISO 10816 correspondiente.

El software debe ser capaz de crear un reporte en formato Word, con toda la información de los datos de vibraciones, y un análisis de la norma correspondiente, así como las gráficas en el dominio de tiempo y frecuencia.

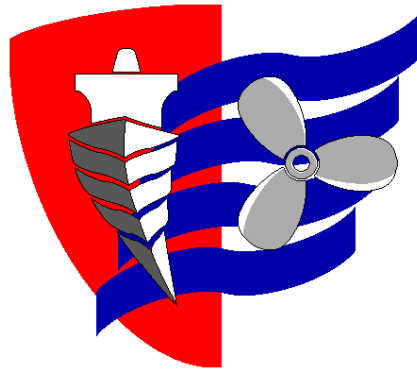
TRABAJO FIN DE GRADO
INGENIERÍA MARÍTIMA

1.2. PARÁMETROS A MEDIR-MONITORIZAR

Para la correcta caracterización de las vibraciones, este instrumento mide y monitoriza la aceleración, a partir de la cual, determina la velocidad y el desplazamiento producido, y los cuales son también monitorizados.

Asimismo, realiza las operaciones necesarias para el cálculo de valores medios, RMS, pico, y pico-pico. También genera espectros de vibración en el dominio de frecuencias, para poder encontrar posibles anomalías de funcionamiento en los equipos a través de las funciones de análisis.

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. VIBRACIONES

2.1.1. HISTORIA

El ser humano comienza a mostrar interés vibración en el momento que se crearon los primeros instrumentos musicales.

El sistema actual musical tiene origen en la civilización de la Grecia antigua, considerando al matemático y filósofo griego Pitágoras (582-507 a. C.) la primera persona que estudió la música desde un punto de vista científico. Éste realizó diferentes experimentos con un aparato llamado monocordio, el cual disponía de una sola cuerda, tres puentes de madera (dos de los mismos-el 1 y el 3 fijos-, y otro móvil-el 2- de la ilustración). Dicha cuerda se mantenía tensión gracias a un peso que colgaba de la misma.

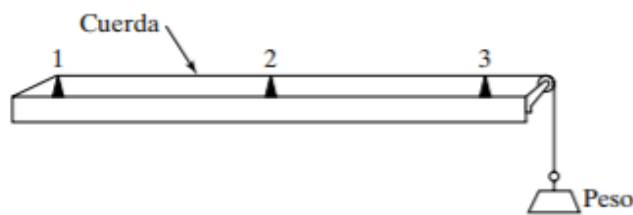


Figura 2.1-Monocordio^[1]

En sus experimentos, Pitágoras determinó que sometiendo a la misma tensión dos cuerdas de las mismas características, pero diferentes longitudes, la de menor longitud emite una nota más alta que la otra. Asimismo, si la cuerda más larga es el doble de la corta, la cuerda corta emitirá una nota con una octava por encima de la otra.

En el año 132, en China, un historiador y astrónomo llamado Zhang Heng creó lo que es considerado el predecesor del sismógrafo (ver Figura 2.2). Este estaba hecho de bronce fundido y un diámetro de ocho chi (un chi equivale a 23,7 cm) y tenía forma jarrón. Dentro de este había un mecanismo compuesto por un grupo de ocho palancas que apuntaban a ocho direcciones diferentes unidas a un péndulo. En la parte externa de este instrumento había ocho

cabezas de dragón, las cuales tenía una bola de bronce en la boca. Debajo de cada dragón había una rana con la boca abierta hacia arriba, de modo que, si se producía un terremoto, el péndulo se inclinaría en la dirección del mismo activando la palanca de la cabeza del dragón correspondiente y provocando con ello que la boca del dragón se abra, cayendo la bola a la boca de la rana dispuesta debajo. Al caer esta bola se producía un ruido se conocía la existencia de un terremoto y la dirección del mismo.



Figura 2.2-Predecesor del sismógrafo^[19]

Cabe añadir como anécdota, que en una ocasión una de las bolas cayó sin que las personas percibieran ningún terremoto en el lugar donde estaba instalado este artilugio. Al cabo de unos días, llegaron noticias de un terremoto en Kasu (situado a 600 km y en la dirección indicada por el artilugio).

A pesar de todo, como se describe al principio, es el predecesor del sismógrafo, no el primer sismógrafo debido a que este instrumento detectaba los terremotos y la procedencia, pero no los cuantificaba.

En 1636, el matemático y teólogo Mario Merenne (1588-1648 y considerado el padre de la acústica), publicó primer informe correcto sobre la vibración de cuerdas en su libro *Harmonie universelle* (Armonía universal). Este midió y estudió la frecuencia de vibración de la cuerda larga pronosticando la frecuencia de vibración más corta de iguales características.

TRABAJO FIN DE GRADO
INGENIERÍA MARÍTIMA

Galileo Galilei (1564-1642), estudió, y realizó escritos de la relación entre frecuencia, longitud, tensión y densidad de una cuerda vibratoria. No pudiendo publicar sus Leyes hasta 1638 por órdenes del inquisidor de Roma, hecho por el cual se le considera a Galileo el descubridor de las Leyes de las cuerdas vibratorias y no a Mersenne, plasmando sus ideas en una obra llamada *“Discorsi e dimostrazione matematiche in torno a due nuove scienze”* (*Diálogos sobre dos nuevas ciencias*), en la que analizó los cuerpos vibratorios describiendo el fenómeno de la resonancia y la dependencia de la frecuencia de la vibración con respecto a la longitud de un péndulo simple.

Posteriormente Robert Hooke (1635-1703) determinó la relación entre la frecuencia de vibración de una cuerda y el tono que produce.

Joseph Sauveur (1653-1716), estudió el fenómeno de las formas de modo y encontró que una cuerda tensa que vibra puede tener frecuencias de vibración más altas que la frecuencia de vibración simple de la cuerda, descubriendo que las altas frecuencias son múltiplos enteros de la vibración simple y denominando **armónicos** a las altas frecuencias y **frecuencia fundamental** a la frecuencia de vibración simple.

Isaac Newton (1642-1727), en su segunda ley del movimiento escribe como derivar las ecuaciones de movimiento un cuerpo vibratorio.

Brook Taylor (1685-1731), halló en 1713 la solución teórica de la cuerda vibratoria. La frecuencia natural de la vibración obtenida con la ecuación de movimiento de Taylor es acorde a los valores experimentales de Galileo y Mersenne. Aunque el procedimiento de Taylor se perfeccionó con la aparición de las derivadas parciales en las ecuaciones de movimiento de Daniel Bernuolli (1700-1782), Jean D'Alembert (1717-1783) y Leonard Euler (1707-1783).

El principio de superposición fue comprobado con las ecuaciones dinámicas de Daniel Bernuolli y publicadas por la academia Berlinesa en 1755, siendo corroborada por Fourier en 1822 en su obra *Analytical Theory of Heat*.

La vibración en vigas fue estudiada por primera vez por Euler y Bernuolli.

TRABAJO FIN DE GRADO
INGENIERÍA MARÍTIMA

Charles Coulomb en 1784 realizó estudios sobre torsionales de un cilindro de metal suspendido con un cable, para el estudio de la vibración torsional.

En 1850 Kirchoff, demostró las condiciones límites para la vibración de placas.

En 1877, Lord Baron Rayleigh, publicó un libro sobre la teoría del sonido, la cual es una obra importante acerca de vibraciones y sonido.

Frahm, en 1902 investigó acerca de la vibración torsional en el diseño de hélices de buques de vapor.

Otros investigadores modernos sobre la teoría de vibraciones son Stodola, De Laval, Timoshenko y Mindlin.

En 1892 se empezó a desarrollar la teoría matemática de vibraciones no lineales por Poincaré y Lyapunov. Pero no fue hasta 1920 mediante Duffing y van der Pol cuando aparecieron las primeras soluciones a la teoría de vibraciones no lineales.

Éstos métodos mejoraron en 1920 por Taylor con la introducción de la función de correlación y a comienzos de la década de 1930 con el estudio de la densidad espectral por Wiener y Khinchin, siendo aplicables al ámbito de la ingeniería entre 1943 1945 unos artículos de Lin y Rice.

Hasta la década de 1950, los estudios de vibración se realizaban utilizando modelos con unos pocos grados de libertad, hasta que aparecieron las computadoras, las cuales facilitaban la labor de cálculo de sistemas complejos. Asimismo, el desarrollo del método del elemento finito presentado por Turner, Clough, Martín y Topp en 1956 facilitó el uso de estas computadoras para realizar análisis de vibración con muchos más grados de libertad.

2.1.2. ¿QUÉ SON LAS VIBRACIONES?

Una vibración es una deformación de un objeto o partícula en la que hay un movimiento oscilatorio alrededor de un punto de equilibrio. La posición o punto de equilibrio es a la que se llega cuando la fuerza que actúa sobre el sistema es cero.

En las oscilaciones hay un movimiento alrededor de la posición de equilibrio y hay energía potencial gravitatoria y energía cinética, mientras que en la vibración hay además energía potencial elástica debido a que se produce una deformación.

Tanto las oscilaciones como las vibraciones se prolongan en el tiempo mediante un proceso de conversión entre los diferentes tipos de energía.

Los parámetros que caracterizan las vibraciones son la frecuencia, la amplitud y la fase.

2.1.3. PARÁMETROS QUE DEFINEN LAS VIBRACIONES

La **frecuencia** es el número de ciclos que realiza el sistema por unidad de tiempo y se representa por la letra f , siendo su unidad de medida en tema internacional el Hercio o Hertz (Hz). Es la inversa al periodo de vibración.

Asimismo, la **amplitud** de la vibración se puede medir de tres modos diferentes:

- **Amplitud Pico:** es la distancia desde el punto de equilibrio hasta el punto máximo de la onda.
- **Amplitud pico a pico:** es la distancia desde la cresta negativa a una positiva. En una forma de onda simétrica, como el de una sinusoidal, el valor pico a pico es dos veces el valor pico.
- **Amplitud Raíz del promedio de los cuadrados (RPC)**, también nombrada como **RMS** siglas en inglés “Root mean square”: es la media cuadrática o, dicho de otro modo, la raíz cuadrada del promedio de los cuadrados de los valores de la onda. En una onda sinusoidal el valor RMS es igual a $\sqrt{2} = 0,707$ multiplicado por el valor pico. Este valor es

proporcional al área interna que forman las curvas de vibración, haciendo de los picos negativos, picos positivos. Indica la cantidad de energía que hay en la onda, por lo que en Europa es la medida más empleada, mientras que en América la amplitud Pico es la que se emplea.

$$RMS = \sqrt{\left(\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2\right)}$$

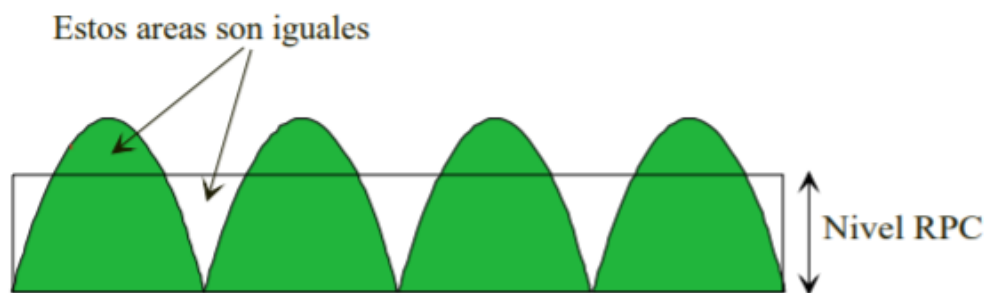


Figura 2.3-Representación gráfica del nivel RMS^[3]

La **fase** es una medida angular que indica el desfase angular entre dos oscilaciones. La unidad de medida es el radián. Si dos movimientos tienen la misma frecuencia o velocidad angular reciben el nombre de sincrónicos

2.1.4. TIPOS DE VIBRACIONES

Se pueden establecer diferentes criterios para la clasificación de la vibración atendiendo a diferentes criterios:

- Según el tipo de movimiento en torno de la posición de referencia.
- Atendiendo origen de esa vibración.
- Si se produce o no disipación de energía durante la oscilación.
- Según el comportamiento de la vibración

Según el primer criterio para la clasificación de las vibraciones (**tipo de movimiento en torno a la posición de referencia**), hay dos grupos de vibraciones:

- **Vibraciones periódicas o determinísticas:** el movimiento oscilatorio en torno a la posición de referencia se repite cada cierto periodo de tiempo definido.
- **Vibraciones aleatorias o no determinísticas:** el movimiento oscilatorio se produce de forma aleatoria e irregular, sin repetirse las características de este movimiento.

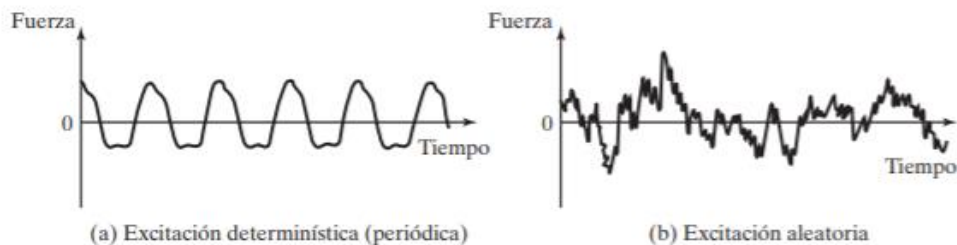


Figura 2.4- Vibración periódica (izquierda) y vibración aleatoria (derecha) ^[1]

Una vibración es armónica cuando se puede representar por una función matemática. Esto es habitual cuando la amplitud inicial del movimiento es pequeña siendo el periodo del movimiento independiente al de la amplitud.

Una vibración es anarmónica cuando las amplitudes iniciales del movimiento son muy grandes y se caracterizan porque el periodo depende de la amplitud y no pueden ser representados por funciones.

Según el **origen de la vibración**, hay:

- **Vibraciones libres:** se producen cuando el sistema o partícula se separa de la posición de equilibrio y se mueve libremente. La frecuencia de vibración libre del sistema recibe el nombre de frecuencia natural.
- **Vibraciones forzadas:** se producen cuando el movimiento es forzado por una perturbación externa (habitualmente una fuerza repetitiva). La

frecuencia de vibración asociada a un sistema excitado periódicamente recibe el nombre de frecuencia forzada. Éste tipo de vibraciones es el que aparece en máquinas como motores. En caso de que la frecuencia de la fuerza externa coincida con una de las frecuencias naturales sistema, se produce lo que se conoce como resonancia, lo que provoca asimismo aumentos de la oscilación, facilitando la aparición de averías.

Según la **pérdida o disipación energética**, se pueden clasificar en:

- **Vibraciones amortiguadas:** se producen cuando en cada ciclo el sistema pierde energía mediante disipación, lo que produce una disminución progresiva de la amplitud.
- **Vibraciones no amortiguadas:** No se pierde ni disipa energía durante la oscilación.

Atendiendo al **comportamiento de la vibración**:

- **Lineal:** Cuando todos los componentes del sistema vibratorio (resorte, masa y amortiguador) se comportan de forma lineal. En este caso el principio de superposición es válido.
- **No lineal:** Alguno de los componentes del sistema vibratorio no se comporta de modo lineal, no siendo el principio de superposición válido.

2.2. ACELERACIÓN, VELOCIDAD Y DESPLAZAMIENTO

Una fuerza es el origen de una vibración y es el primer evento que sucede en el tiempo. La respuesta a estas fuerzas son los movimientos, los cuales se pueden describir en forma de desplazamiento, velocidad o aceleración y a las cuales nos referiremos como amplitud de la vibración.

El desplazamiento es la forma en la que nosotros habitualmente percibimos el movimiento, pero también la aceleración o la velocidad son cantidades válidas para describir un movimiento.

Se ha descrito anteriormente una fuerza es el primer evento que sucede en el tiempo y con ello posteriormente van sucediendo el movimiento, velocidad y

aceleración se van produciendo diferentes retardos entre fases, lo que se traduce en un retardo de fase de 90° entre el desplazamiento y velocidad, y de 180° entre desplazamiento y aceleración.

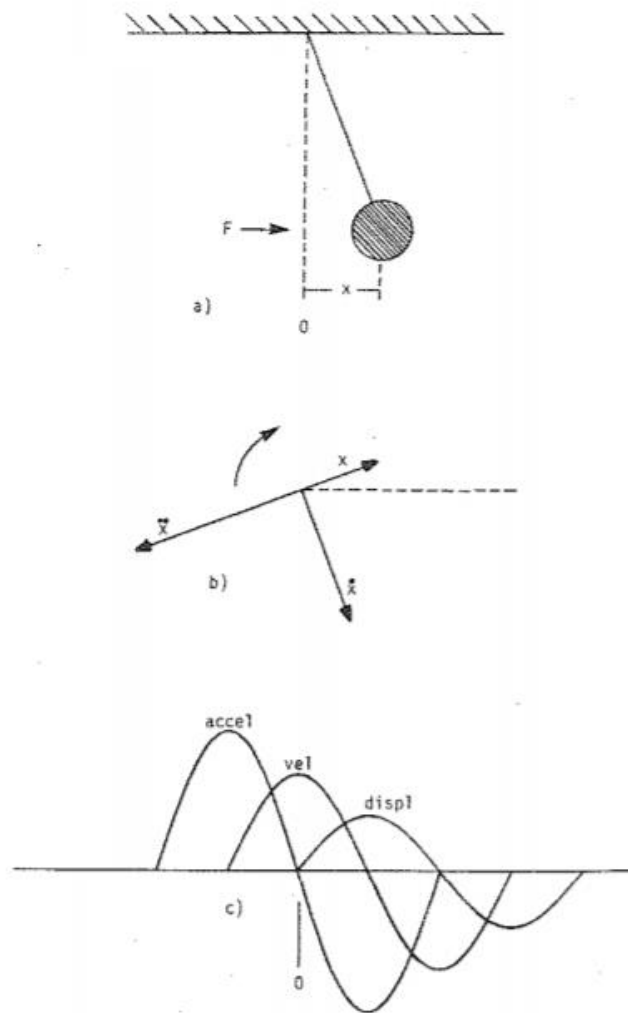


Figura 2.5-a. Una fuerza crea movimiento- b. Diagrama fasor de desplazamiento, velocidad y aceleración - c. Ondas senoidales de desplazamiento, velocidad y aceleración ^[2]

La velocidad es la derivada del desplazamiento respecto al tiempo, mientras que la aceleración es la primera derivada de la velocidad o la segunda derivada del desplazamiento respecto al tiempo. Matemáticamente:

$$\text{Desplazamiento} \rightarrow x = x_0 \cdot \cos(\omega t)$$

$$\text{Velocidad} \rightarrow \dot{x} = \frac{\partial x}{\partial t} = -x_0 \cdot \omega \cdot \sin(\omega t)$$

$$\text{Aceleración} \rightarrow \ddot{x} = \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = -x_0 \omega \cdot \cos(\omega t)$$

En donde:

X = desplazamiento en cualquier momento t

X0 = el mayor desplazamiento

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$$

f = frecuencia (ciclos por segundo– hertz – Hz)

t = tiempo (segundos).

2.3. DOMINIO DE TIEMPO Y FRECUENCIA

El concepto típico de una gráfica de vibración es en el **dominio del tiempo** (amplitud: en el eje vertical, respecto al tiempo en el horizontal).

Sin embargo, hay otra forma de observar gráficamente las vibraciones: en el **dominio de las frecuencias**, lo que es lo mismo que tener la amplitud en el eje vertical, pero la frecuencia en el horizontal en lugar del tiempo.

Jean Baptiste Fourier descubrió que todas las ondas armónicas pueden ser descompuestas en otras ondas más pequeñas, las cuales habitualmente tiene diferentes amplitudes y frecuencias. En la Figura 2.6, se observan dos ondas combinadas gráficamente, se suman las ondas senoidales de diferente frecuencia (a), dando como resultante la onda b. En d se ve representada esta combinación en el dominio del tiempo, y en e, en el dominio de frecuencia.

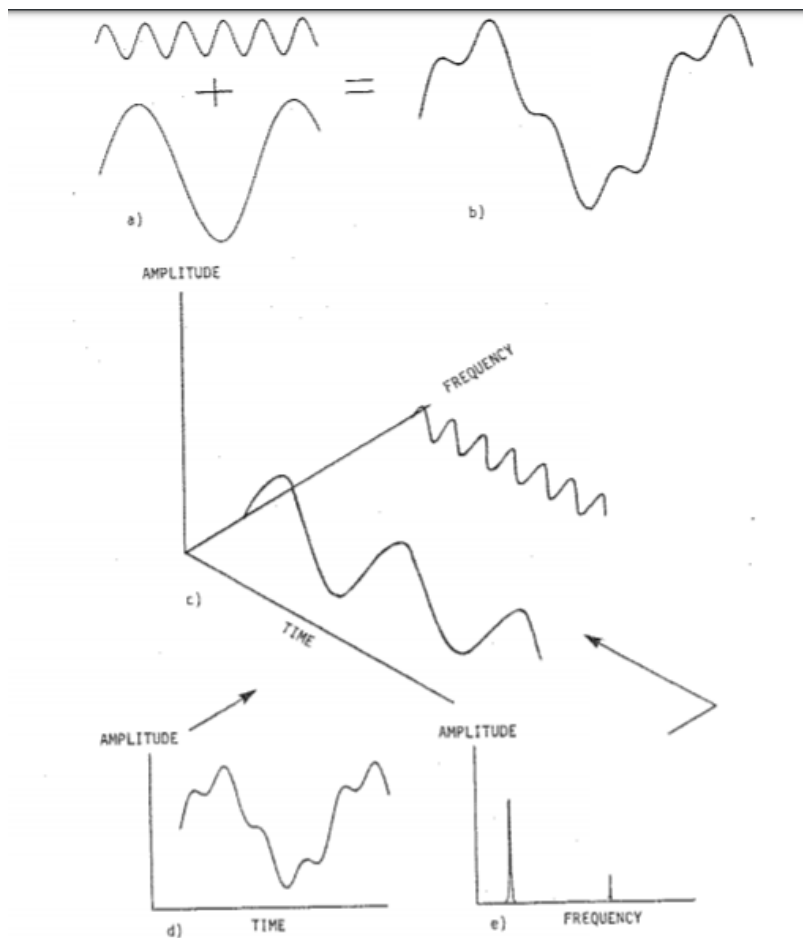


Figura 2.6-Suma de dos ondas senoidales de distinta frecuencia y representación en el dominio de tiempo y frecuencias^[2]

2.4. MEDIDA DE VIBRACIONES

2.4.1.LA IMPORTANCIA DE LA MEDIDA Y ESTUDIO DE LAS VIBRACIONES

La mayoría de los sucesos físicos implican vibración directa o indirectamente. Por ejemplo, el sonido, el cual consiste ondas las cuales oímos gracias a la vibración producida en el tímpano.

En el ámbito de la maquinaria, es importante diseñar los equipos y sus soportes acorde a las vibraciones que se pueden producir en ellos.

Además, es importante la monitorización periódica o continua de las vibraciones, las cuales en funcionamiento siempre existen dentro de unos

límites reducidos en condiciones operacionales normales. Pero que pueden verse incrementadas debido a desequilibrios, desalineamiento, falta de apriete en algunas piezas... Lo que consecuentemente puede provocar fallos de mayor calibre en los equipos.

Asimismo, en el ámbito de la construcción es importante diseñar las estructuras de modo que se eviten problemas de vibración causados por fenómenos externos (seísmos, o viento, por ejemplo).

Cabe destacar que, si la frecuencia natural de la vibración de una estructura o máquina coincide con la de excitación externa, aparece el efecto de la resonancia, el cual produce graves daños tanto a maquinaria, como a cualquier estructura que lo sufra.

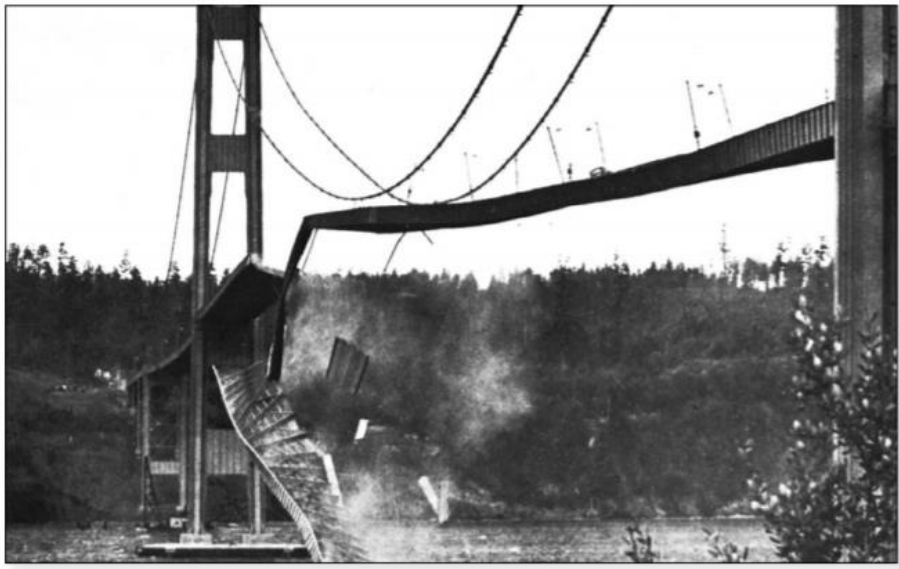


Figura 2.7-Puente de Tacoma Narrows colapsado a causa de vibraciones inducidas por el viento (Fotografía de F.N. Farquharson) ^[1]

Cabe destacar también, que una vibración mecánica genera ruido, el cual puede reducir las condiciones de confort si ésta es excesiva.

2.4.2. TRANSDUCTORES DE VIBRACIÓN

El transductor de vibraciones es un dispositivo que produce una señal eléctrica análoga a la vibración que soporta.

Los transductores de vibración se pueden clasificar en:

- Sensores de velocidad
- Sensores de proximidad
- Sensores de aceleración o acelerómetro

El **transductor de velocidad** es un transductor de uso común para la monitorización de vibraciones en máquinas rotativas. Éste fue uno de los primeros transductores que fue diseñados y consiste en una bobina de alambre que rodea a un imán y sujeto por un muelle, de forma que con el movimiento que se produce en el sensor, el imán crea un campo magnético sobre la bobina, produciendo una señal eléctrica proporcional a esta velocidad.

Suelen emplearse de modo estacionario en equipos, siendo necesario sobre calibración habitualmente cada año.

Debido al efecto de la gravedad, hay diferentes tipos de transductores, dependiendo de si el empleo va a ser en horizontal o en vertical.

Sus principales ventajas es su facilidad de instalación, ya que no necesita alimentación externa, siendo sus principales desventajas su gran tamaño, su sensibilidad a frecuencias indeseadas, no es válido para partes móviles, así como es sensible a campos magnéticos externos.

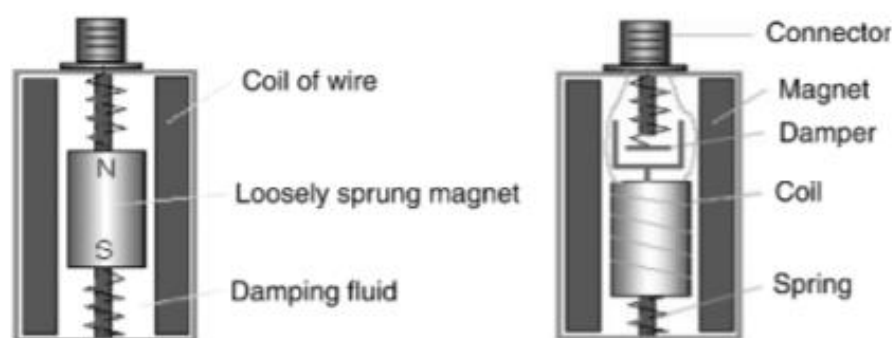


Figura 2.8-Dos modelos de transductores de velocidad: Con bobina dentro de imán y con imán dentro de la bobina^[4]

Los **acelerómetros** son sensores de medida inercial convierten el movimiento mecánico en una señal de voltaje la cual es proporcional a la aceleración de

la vibración. Estos sensores miden un movimiento con respecto a una masa siguiendo la tercera ley del movimiento de Newton también conocida como principio de acción y reacción: “para cada acción existe una reacción igual y opuesta”.

Habitualmente se emplean cuatro tipos de montaje diferente: adherido algún pegamento especial tipo epoxi, imanes (planos o de varios apoyos) en sondas de mano, o roscados.

Hay básicamente dos tipos acelerómetros:

- **Efecto piezoeléctrico**
- **MEMS**

Los ***acelerómetros de efecto piezoeléctrico*** consisten básicamente en un cristal piezoeléctrico un pequeño peso encapsulados en una cápsula metálica. Cuando se produce una vibración, el cristal es empujado con mayor o menor fuerza por la masa, lo que genera una pequeña carga proporcional al efecto de la vibración y se mide en pico-Coulomb por g (pC/g) en donde g es la aceleración de la gravedad, estos sensores habitualmente incluyen un amplificador de carga (en caso contrario habría que instalarlo externamente) y el cual está carga a una tensión proporcional en milivoltios por g. Estos sensores no pueden ser calibrados.

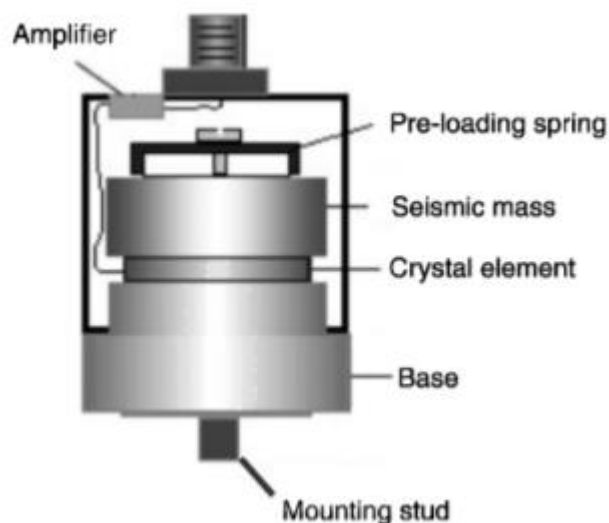


Figura 2.9-Acelerómetro^[4]

Los **acelerómetros MEMS (Microelectromechanical systems)** están relacionados con la nanotecnología, concretamente con la micro-mecatrónica y los micro sistemas.

Cualquier sistema tipo MEMS está formado por componentes de silicio, polímeros, metales, y materiales cerámicos con un tamaño de entre 1 y 100 μm .

Hay básicamente diferentes tipos de transductores de este tipo entre los que destacan los capacitivos, piezoeléctricos, ópticos, o térmicos.

Se caracterizan básicamente por su reducido tamaño y su bajo consumo eléctrico.

Los acelerómetros MEMS más empleados son los de tipo capacitivo debido a que tienen múltiples ventajas respecto a los otros como es gran sensibilidad, bajo nivel de ruido, buena linealidad, así como introducen un error mínimo por las variaciones de temperatura. Asimismo, este tipo de acelerómetros pueden combinar en un solo sensor la medida de las aceleraciones en las tres direcciones o ejes (X, Y, Z), lo que implica también una disminución del coste al poder realizar todas estas medidas desde un mismo sensor.

Estos acelerómetros capacitivos convierten el desplazamiento que se produce por la aceleración en sus pequeñas masas internas que los componen en cambios de capacitancia, los cuales son transformados en variaciones de tensión.

Estos sensores están compuestos de una especie de peine sujeto a una masa interna (parte móvil), así como otros peines en la parte fija, los cuales son empleados para la medición de los desplazamientos y aceleraciones en los ejes X e Y. Debido al desplazamiento producido, habrá mayor o menor superficie de contacto entre el peine móvil y los fijos, lo cual creará una capacitancia proporcional a la misma e inversamente proporcional a la separación que hay entre los mismos, y produciendo una diferencia de tensión entre +V y -V.

Dependiendo de la forma de toma de medidas, según el sentido del desplazamiento, se puede diferenciar entre acelerómetros de cambio de superficie y acelerómetros de detección de cambio de espaciado

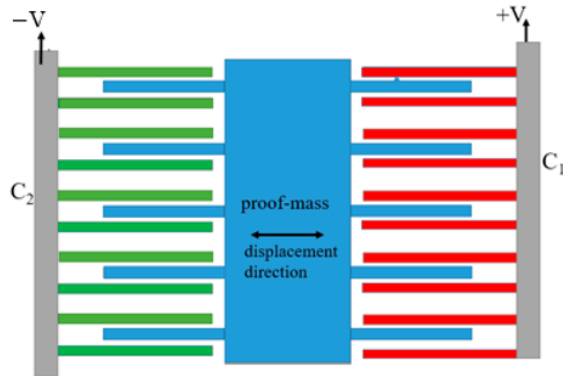


Figura 2.10-Acelerómetro de cambio de superficie^[5]

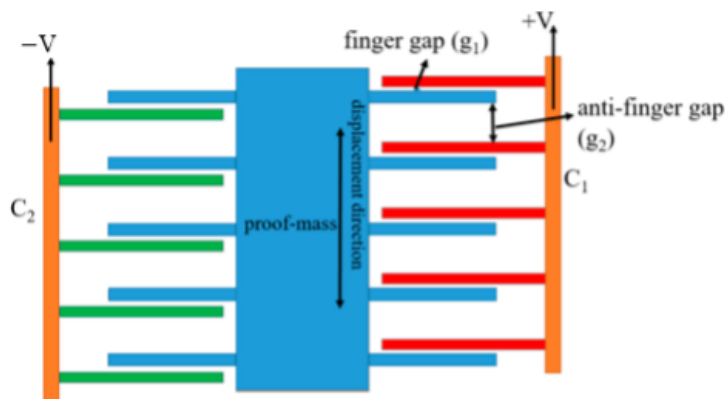


Figura 2.11-Acelerómetro de cambio de espaciado^[5]

Los dos anteriores acelerómetros tienen el mismo esquema eléctrico equivalente:

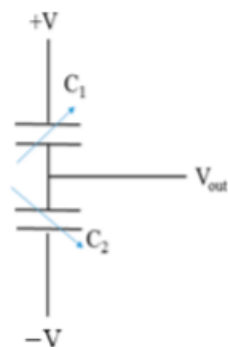


Figura 2.12-Esquema equivalente de los acelerómetros de cambio de superficie y de cambio de espaciado^[5]

Existe también otra disposición, la cual tiene peines intermedios, y eléctricamente hablando crea un puente diferencial capacitivo. Esto mejora la sensibilidad. Recibe el nombre de acelerómetro diferencial de cambio de espaciado.

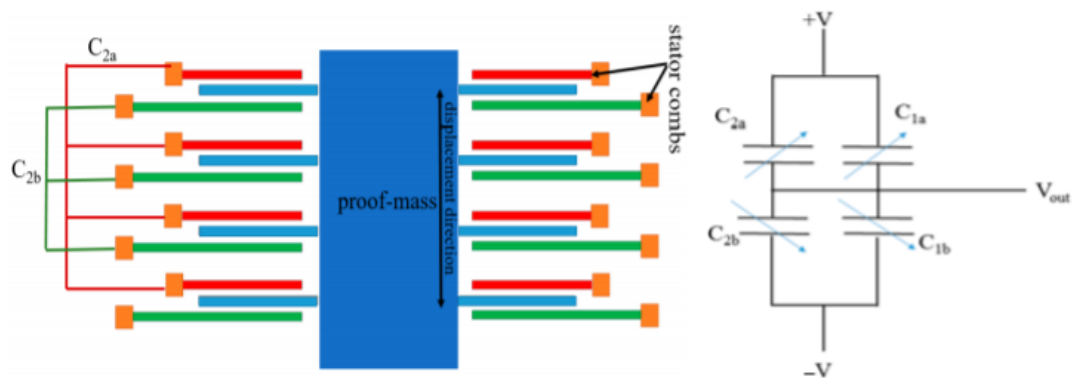


Figura 2.13-Acelerómetro diferencial de cambio de espaciado y esquema eléctrico equivalente^[5]

Éstas disposiciones anteriormente explicadas se sitúan en un acelerómetro de forma perpendicular y del siguiente modo:

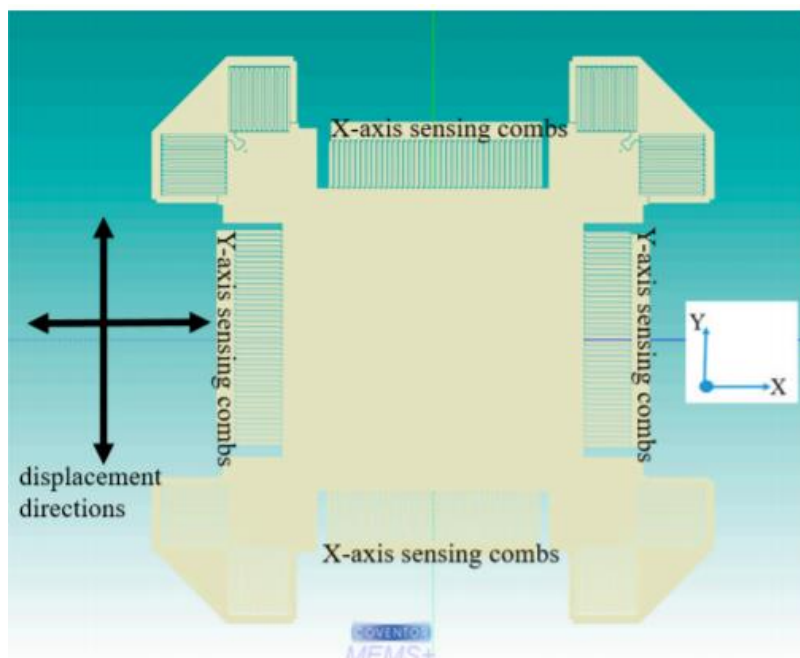


Figura 2.14--Acelerómetro diferencial de cambio de espaciado para medida en dos ejes^[5]

Para la medida de la aceleración fuera del plano horizontal X-Y, o lo que es lo mismo, en el eje Z en el cual influye la fuerza de la gravedad, la disposición empleada es una masa móvil separado por pequeñas cámaras de aire y la cual está dispuesta entre dos electrodos fijos, lo cual crea una diferencia de capacidad entre los dos electrodos.

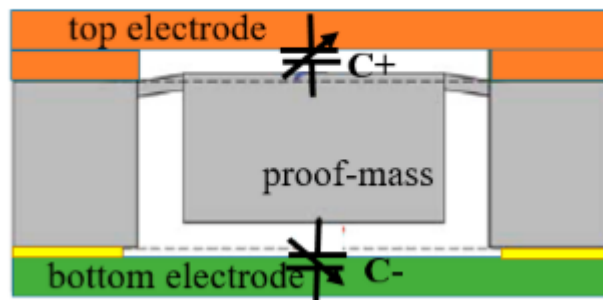


Figura 2.15-Acelerómetro para mediciones verticales de doble electrodo^[5]

También existe una disposición para la medida de la aceleración del eje Z, que mide estas aceleraciones de forma torsional y con un único electrodo.

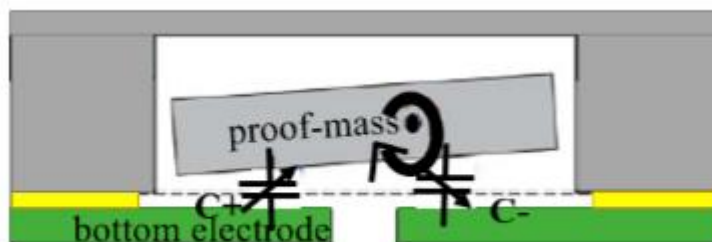


Figura 2.16-Acelerómetro para mediciones verticales de torsión y simple electrodo^[5]

Esta disposición se coloca conjunta a la anterior en un dispositivo Nano tecnológico, lo cual forma un sensor compacto y de pequeño tamaño, así como con un reducido consumo eléctrico.

Los **sensores de proximidad**, también conocidos de desplazamiento o transductores de corrientes de Foucault se caracterizan por ser los únicos transductores capaces de medir el desplazamiento de un eje respecto a las partes fijas que lo sostiene (como cojinetes).

Un sistema de este tipo está compuesto del sensor, cable y un oscilador demodulador. Éste oscilador genera una señal de alta frecuencia que se envía a través del cable hasta el sensor lo cual provoca la generación de corrientes de Foucault en la superficie del eje.

Éste sensor envía de vuelta al demodulador esta señal descomponiéndose en este en una señal de corriente alterna y otra de continua, siendo la primera proporcional a la separación del sensor y el eje, mientras la alterna es proporcional a la vibración que hay en este.

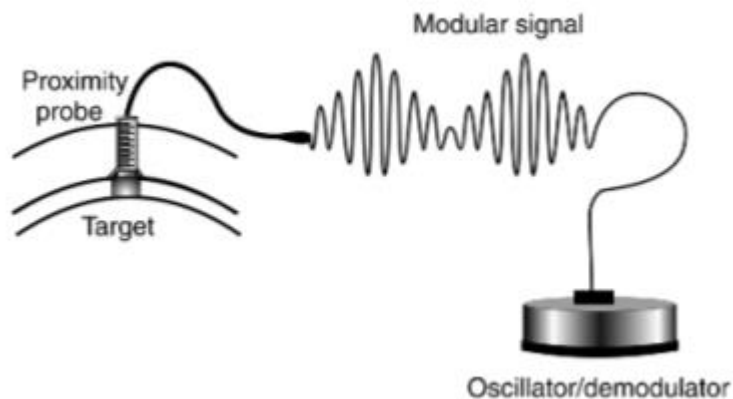


Figura 2.17-Principio de funcionamiento del transductor de proximidad^[4]

Estos sensores pueden tener un montaje tanto interno, externo o mixto (lo que significa que están en una parte interna, pero se tiene acceso desde el exterior al mismo) y deben ser montados de forma perpendicular al centro del eje.

En caso de instalar más de un sensor de este tipo, deben instalarse al menos a 90° uno del otro debido a que las señales de alta frecuencia que emite el transductor tienen una forma de cono de aproximadamente 45°.

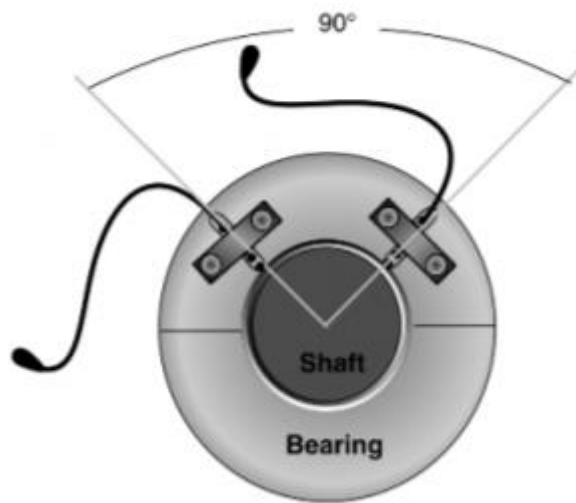


Figura 2.18-Disposición de dos transductores de proximidad en un mismo eje (vista frontal) ^[4]

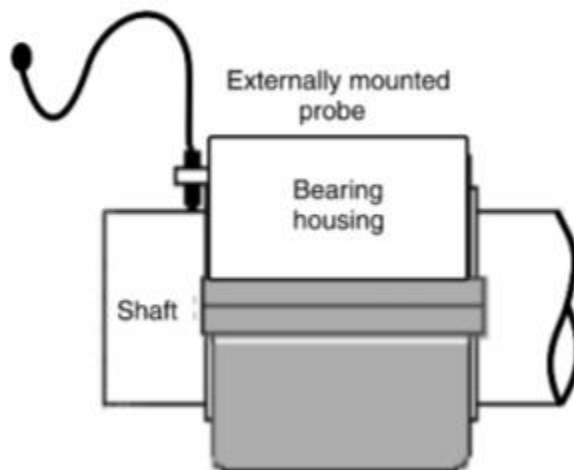


Figura 2.19-Disposición de transductor de proximidad externo en un eje (vista lateral) ^[4]

Éste tipo de sensores pueden y deben ser calibrados.

2.4.3. ANÁLISIS ESPECTRAL

Para realizar un análisis espectral, se emplea la transformada rápida de Fourier, conocida también como FFT, la cual convierte las señales en el dominio del tiempo, al dominio de la frecuencia. La señal eléctrica producida por el sensor fruto de la vibración, debe pasar por diferentes etapas, así como prestar preciar atención a ciertos criterios hasta poder realizar esta transformada de un modo satisfactorio.

En primer lugar, hay que tener precaución con la **frecuencia de muestreo**, puesto que es imposible leer y almacenar infinitos datos en el tiempo. Al tomar un número definido de muestras o puntos discretos, la señal debe ser reconstruida para hacerla análoga a la de la vibración producida. Para evitar problemas, nos ceñimos al teorema de muestreo de Nyquist, el cual indica que la frecuencia de muestreo debe ser al menos del doble del mayor componente de frecuencia de nuestro interés. En caso contrario se obtienen obtener señales indeseadas, produciéndose un fenómeno que se conoce como aliasing.

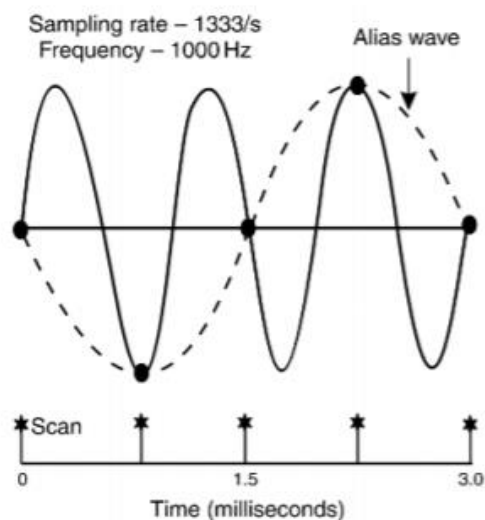


Figura 2.20-Aliasing generado debido a una frecuencia de muestreo reducida^[4]

Con el empleo de sensores analógicos, se debe prestar especial atención a los **convertidores analógico digitales**. Cuantos más bits tengan estos, mayor precisión tendrá en la medida.

Después de la conversión analógico-digital, debe aplicarse lo que se conoce como **ventana**, esto es, debido a que se toman muestras cada cierto periodo de tiempo definido, aparecerían discontinuidades en la señal. La ventana, una porción de señal de un tiempo definido y la interpola para medida sucesivas forzando las muestras tomadas a tener un valor cero al principio y al fin del tiempo de muestreo (o lo que es lo mismo el tiempo de la ventana)

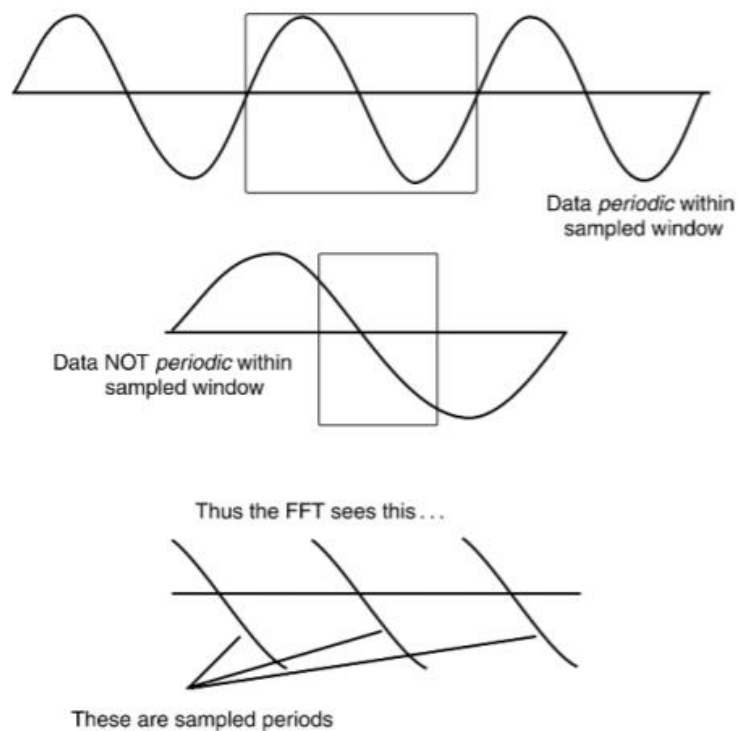


Figura 2.21-Principio de funcionamiento de la función de ventana^[4]

Existen diferentes funciones de ventana, siendo las más empleadas en el análisis de vibración:

- Rectangular
- Parte superior lisa
- Hanning
- Hamming
- Kaiser Bessel
- Blackman
- Barlett

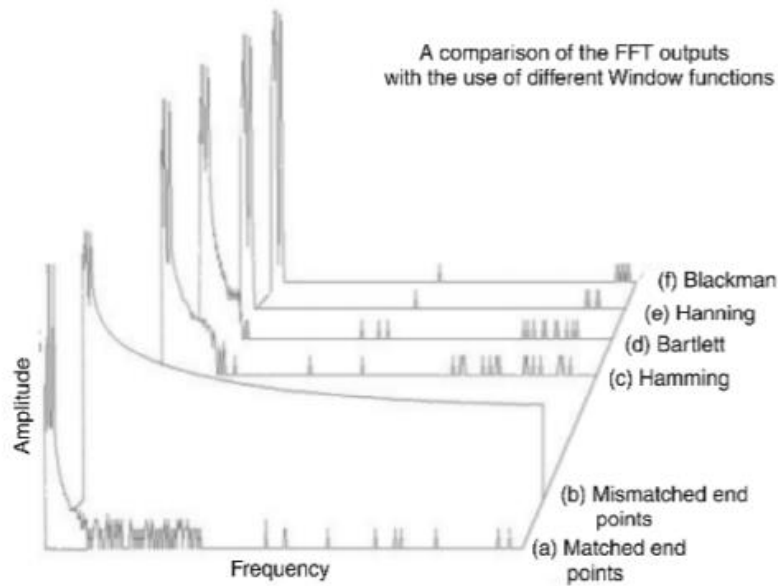


Figura 2.22-Comparativa de las salidas del espectro con la aplicación de los distintos tipos de funciones de ventana^[4]

El **número de muestras** también es importante dado que, a mayor número de muestras se obtendrá una mejor resolución en los picos de la transformada de Fourier.

El promediado también es importante, ya que mejora la repetitividad de los resultados, así como elimina en gran medida el ruido. Hay diferentes tipos de promediado:

- **Promediado lineal:** se toman sucesivos espectros FFT y son añadidos uno sobre el otro, para posteriormente ser dividido entre el número de veces que ha sido añadido.
- **Promediado exponencial:** el espectro tomado en último lugar es el que mayor importancia tiene matemáticamente a la hora de realizar el promedio. Éste se emplea habitualmente para ver sucesos de vibración que suceden lentamente.
- **Promediado síncrono en el tiempo:** emplea una señal síncrona con la máquina (habitualmente un pulso una foto célula o un pickup electromagnético) para realizar el promedio en el dominio del tiempo

- **Peak hold:** el valor pico obtenido en cada análisis se va almacenando y posteriormente son mostrados todos en conjunto. Se emplea habitualmente para vibraciones transientes.

2.4.3.1. QUE ESPECTRO DEBEMOS ELEGIR EN EL ANÁLISIS

La norma general a la hora de analizar un espectro de vibraciones, es elegir el espectro con una superficie más horizontal, lo que nos dará un mayor rango dinámico de medidas.

Una de las grandes ventajas de los acelerómetros es que la señal eléctrica puede ser integrada, obteniendo los valores de velocidad y desplazamiento.

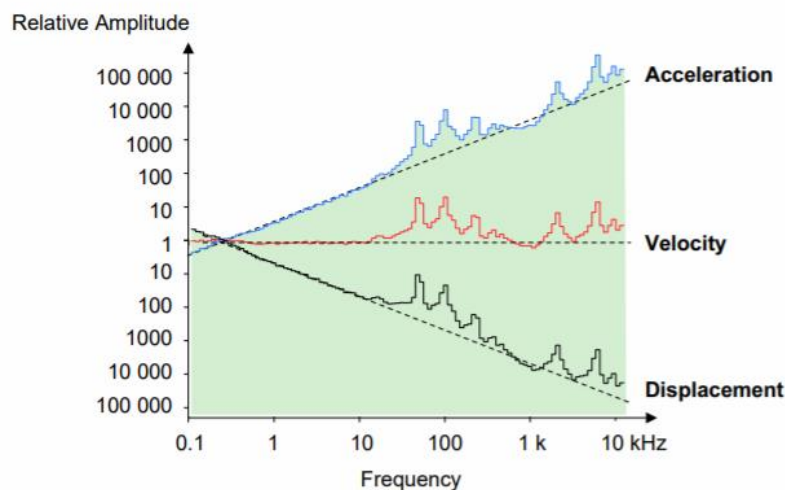


Figura 2.23-Apariencia habitual de los espectros de aceleración, velocidad y desplazamiento^[6]

Generalmente el de velocidad es el más plano, pero no siempre es así, pueden darse otros casos como se muestra a continuación, por lo que, de ser posible, habría que elegir otro de los dos espectros restantes.

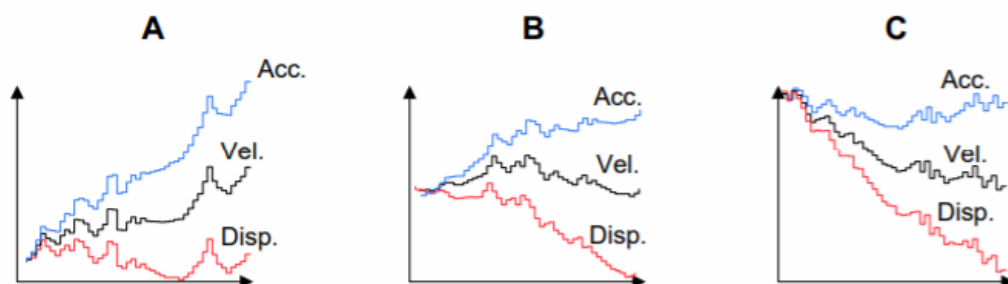


Figura 2.24-Ejemplos de espectris en distintas medidas: A-Se debería elegir el desplazamiento; B-Se debería escoger la velocidad; C-Se debe escoger la aceleración^[6]

2.5. VIBRACIONES EN MAQUINARIA Y MANTENIMIENTO

Solamente una máquina perfecta, durante su operación, no generará vibración. Esto es imposible dado que no se puede crear una máquina mecánica “perfecta”, ya que existen unas tolerancias a la hora de diseño y fabricación de las piezas que conforman la máquina, por lo que, aunque una máquina esté en perfectas condiciones, siempre generará vibración.

Dentro del **mantenimiento predictivo** de una máquina, además de realizar análisis de aceite, medida de temperaturas, control de desgastes entre otros, es importante también realizar análisis de vibraciones para conocer el estado mecánico de la máquina, anticipándonos a posibles fallos de grandes magnitudes, como es el caso de roturas por fatiga, cambios constantes y evitables de rodamientos o cojinetes, mal funcionamiento del equipo, o en el caso más extremo, que el equipo no tenga la vida útil de funcionamiento que debería.

Asimismo, las vibraciones también crean situaciones de confort indeseables debido tanto a las vibraciones en sí mismo como el ruido que estas pueden generar.

Mediante el análisis del espectro de vibración en el dominio de frecuencia o bien analizando el nivel de vibración general se pueden detectar fallos en las máquinas.

2.5.1. FALLOS DETECTABLES MEDIANTE VIBRACIÓN EN MÁQUINAS

2.5.1.1. DESEQUILIBRIO

Es la mayor causa de vibración y la de más fácil diagnóstico, y se produce cuando el centro de masas de una parte rotativa no coincide con el centro de rotación. Esta puede venir dada por entre otras cosas por diferente densidad del material, tolerancias de diseño y fabricación, desgaste, acciones de mantenimiento, como cambio de rodamientos, acoplamientos... Y cualquier hecho que pueda interferir en las condiciones de la parte rotativa.

El desequilibrio se produce cuando el eje de rotación de la máquina (eje de rotación del rotor suponiendo su libertad de giro sin rodamientos) no coincide con el eje geométrico (eje físico central del rotor).

El desequilibrio se aprecia en el espectro como una frecuencia de vibración axial y radial igual a la velocidad de giro con una amplitud proporcional al desequilibrio y al cuadrado de la velocidad de rotación.

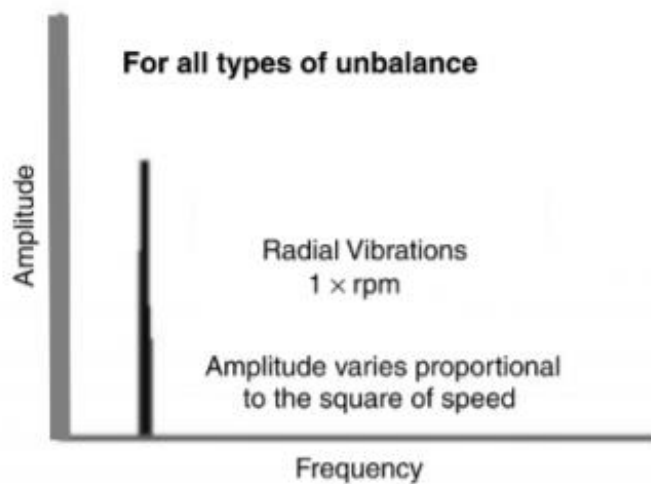


Figura 2.25-Espectro FFT de desequilibrio^[4]

Un ejemplo práctico se muestra a continuación, con un ventilador con una velocidad de giro de 875 rpm.

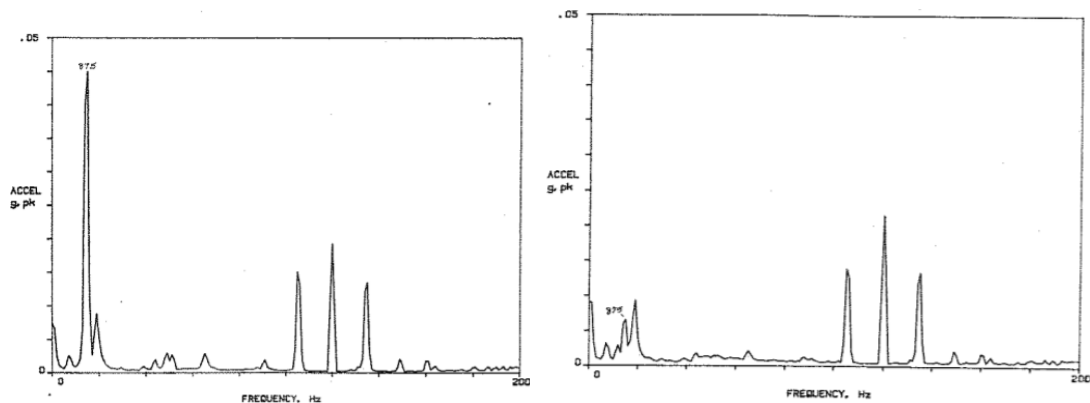


Figura 2.26-Espectro de un ventilador con desequilibrio (Izquierda)-Espectro del mismo ventilador tras corregir el desequilibrio (derecha) ^[2]

2.5.1.2. DESALINEAMIENTO

El desalineamiento en ejes es una condición que se produce cuando dos ejes que están acoplados no tienen el mismo eje de rotación, por lo que se puede distinguir entre desalineamiento angular y desalineamiento en paralelo.

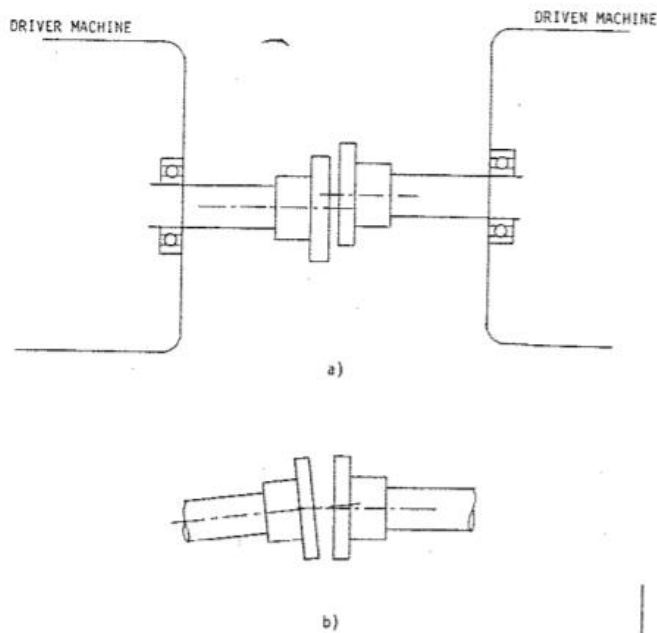


Figura 2.27-Desalineamiento paralelo (a) y desalineamiento angular (b) ^[2]

En **desalineamientos angulares**, se creará una vibración axial en la máquina fundamentalmente a la frecuencia de giro, asimismo también se pueden crear armónicos de segundo y tercer orden.

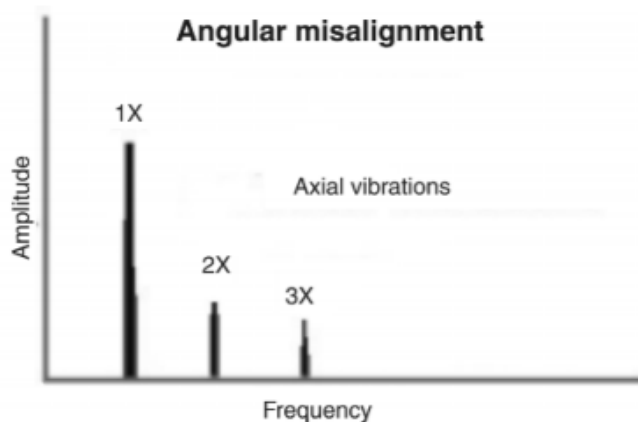


Figura 2.28-Espectro FFT típico para desalineamiento ^[4]

En **desalineamientos paralelos**, en cada revolución del eje, se producen dos golpes de vibración de modo radial:

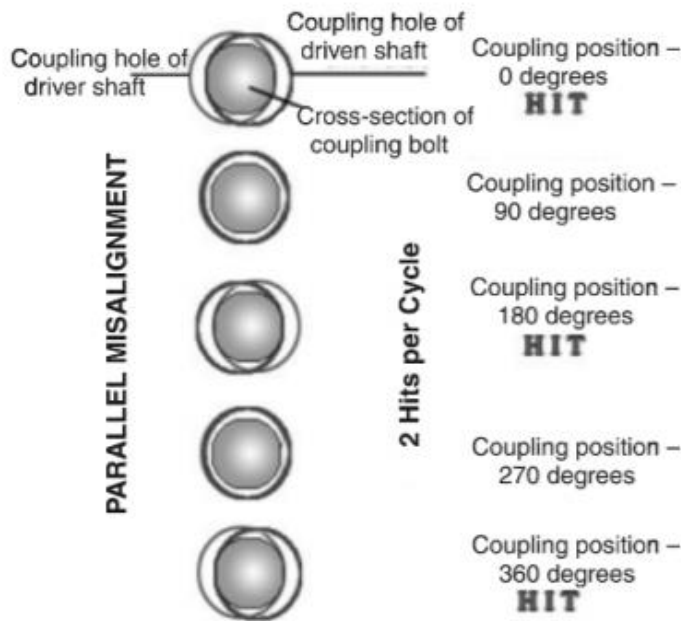


Figura 2.29-Golpes radiales en dalineamientos paralelos^[4]

Por lo tanto, se obtendrá un espectro similar al del desalineamiento angular, con la diferencia de que el segundo armónico de la frecuencia de giro es el predominante debido a los dos golpes de vibración por cada revolución.

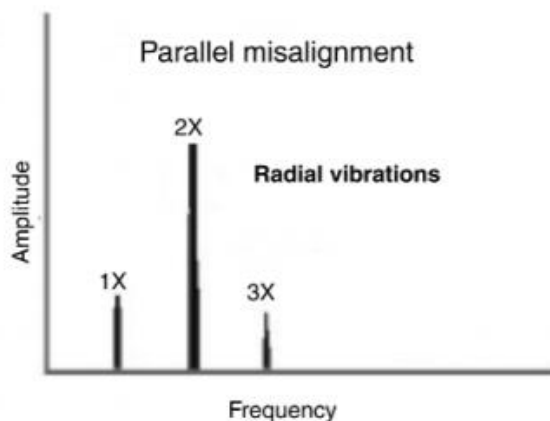


Figura 2.30-Espectro FFT de desalineamiento paralelo^[4]

Para ver reducido este efecto, es por lo que se emplean acoplamientos flexibles entre dos ejes.

Éste tipo de fenómeno implica desgastes en rodamientos, cojinetes, ejes y acoplamientos.

Habitualmente no se encuentra un desalineamiento angular o paralelo puro, sino una mezcla de ambos. Es por ello por lo que en el espectro de análisis, hay que prestar atención simplemente en la aparición o no de armónicos de la velocidad de giro del eje.

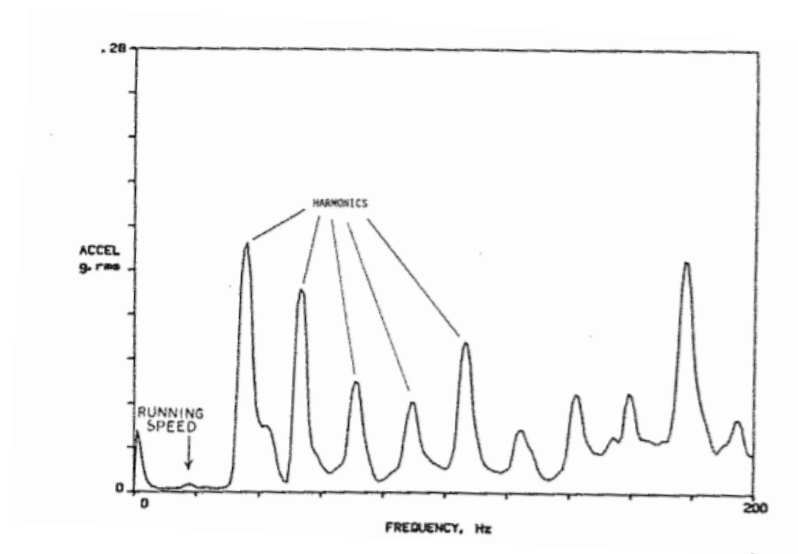


Figura 2.31-Espectro de un motor de 150HP acoplado al ventilador de tiro de una caldera. La velocidad de giro es de 18.2Hz. Los equipos están balanceados correctamente, pero los armónicos muestran desalineamiento.^[2]

2.5.1.3. EXCENRICIDAD DEL ROTOR

Cuando el eje de rotación de un rotor no coincide con el eje con el eje geométrico de una polea, rodamiento, engranaje, cojinete, etc. se dice que hay una excentricidad entre ambos. En el momento que estos giran, se produce una vibración radial a la frecuencia de giro del elemento excéntrico, variando la amplitud con la carga.

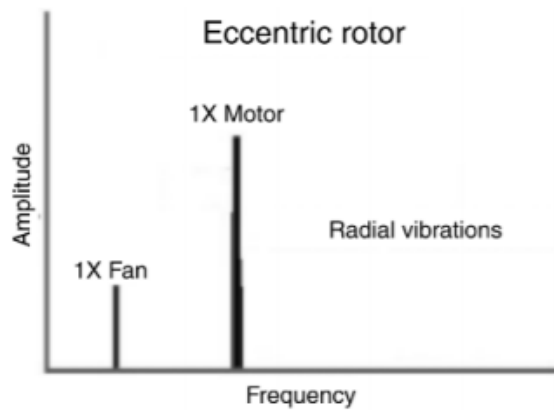


Figura 2.32-Gráfica típica de excentricidad del rotor. Ejemplo ficticio de ventilador movido a través de una correa^[4]

2.5.1.4. EJE DOBLADO O ROTOR INCLINADO

Éste tipo de fallos puede ocurrir en motores que están parados durante largos periodos de tiempo. Después de varios meses parado, el eje del rotor puede sufrir una deflexión permanente debido al peso del conjunto del rotor. Es por ello, que para los motores que estén almacenados sin uso, se recomienda almacenarlos con el eje en posición vertical.

En este caso, tanto las vibraciones axiales como radiales son elevadas.

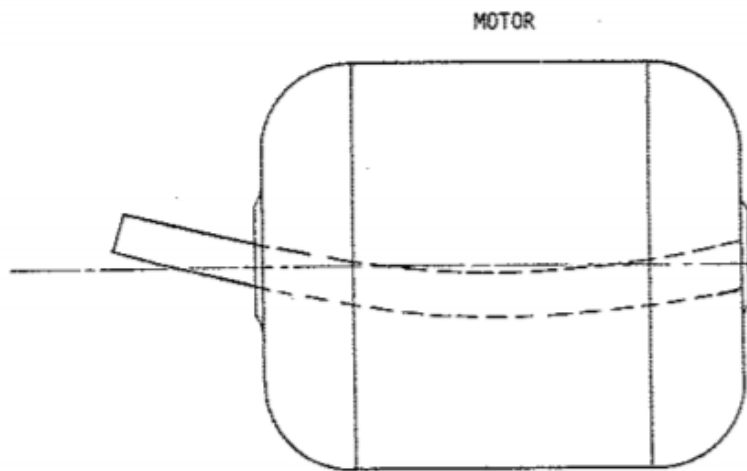


Figura 2.33- Eje doblado. Rotor inclinado^[2]

El espectro habitualmente tiene la componente de la velocidad de giro del eje, así como su armónico 2X. La amplitud en la velocidad de giro del eje se verá incrementada cuanto más próximo esté el eje doblado respecto al centro, mientras su armónico se verá incrementado cuando la parte del eje doblada está más próxima a uno de los extremos que lo sustenta.

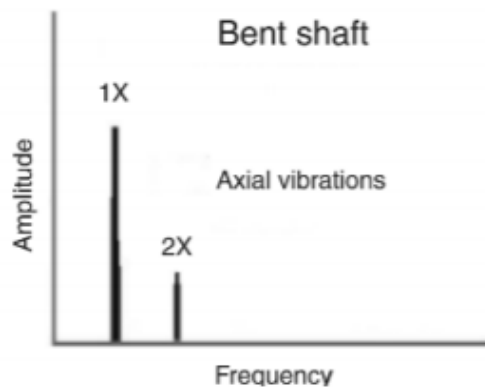


Figura 2.34- Espectro FFT de un motor con eje doblado en la zona próxima al centro^[4]

2.5.1.5. FALLOS EN COJINETES

Un **desgaste en los cojinetes** se verá reflejado en el espectro como una serie armónicos que podrían llegar a ser del orden de 20X. Esto es debido a una reducción de la capa de aceite debido al mayor espacio entre el eje y el cojinete.

Las vibraciones en este caso, son de tipo radial.

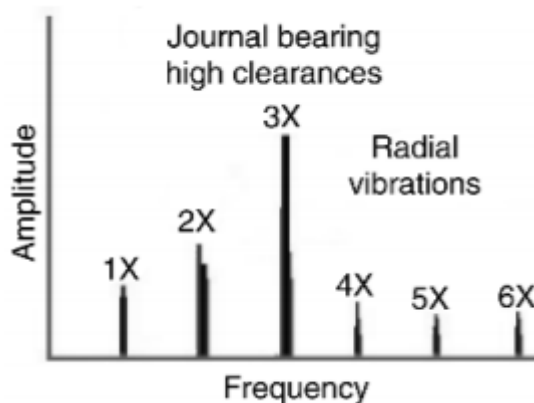


Figura 2.35- Espectro FFT producido por desgaste en los cojinetes^[4]

El **remolino de aceite** es un fenómeno de inestabilidad del aceite lubricante que se produce en cojinetes lubricados con aceite presurizado que funcionan a altas velocidades y con poca carga.

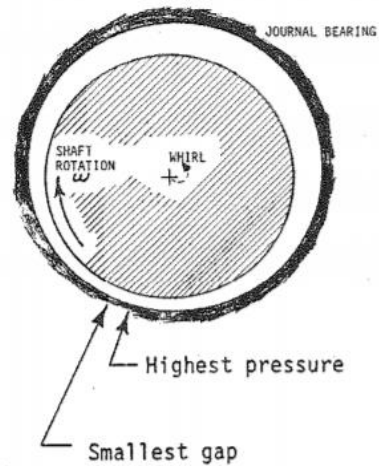


Figura 2.36-Remolino de aceite^[2]

Se forma porque la capa de aceite que se encuentra entre el eje y el cojinete tiene una presión mayor de la que debería en algunas zonas debido a que el centro de giro del eje no coincide totalmente con el cojinete formándose una cuña de aceite en el interior.

Éste fenómeno tiene una frecuencia de entre 0,42 y 0,48 veces la frecuencia de giro del eje.

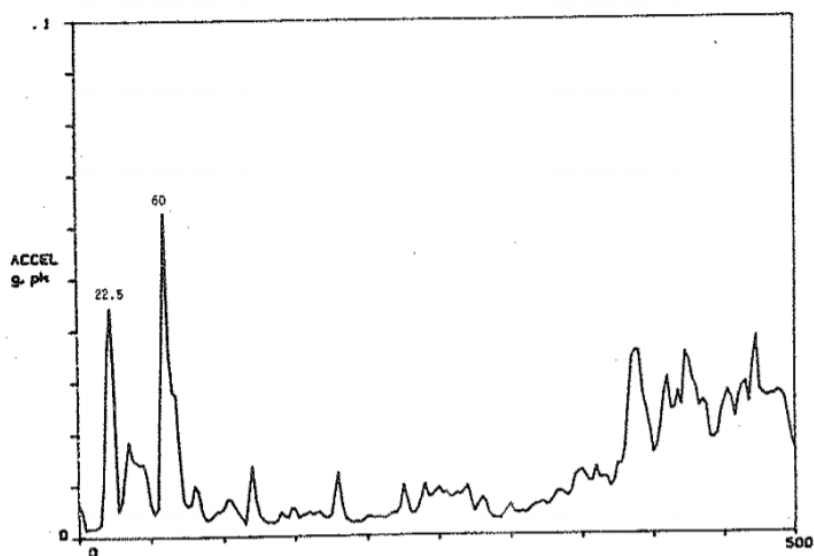


Figura 2.37-Espectro FFT de un motor mostrando remolino de aceite a 22.5Hz^[2]

Éste fenómeno se ve incrementado cuando el espacio entre el cojinete y el eje va aumentando.

A medida que este problema se va incrementando, va aumentando la fricción

La solución es incrementar la carga del cojinete, lo que habitualmente requiere un cambio de modelo de los mismos o un cambio de la presión y velocidad de aceite.

El **latigazo de aceite** también llamado **rotura de la cuña de aceite** es un caso severo del remolino de aceite y se produce cuando en un remolino de aceite, se produce la rotura de la cuña de aceite, quedando el eje en contacto con el cojinete, y si además la frecuencia del remolino coincide con la velocidad crítica del rotor, se produce resonancia (latigazo de aceite) y el efecto vibratorio se ve incrementado.

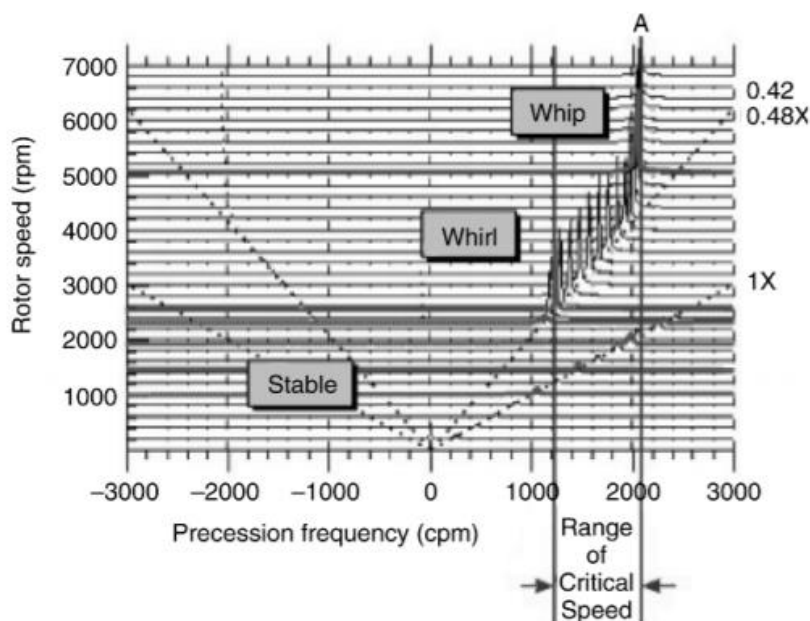


Figura 2.38-Remolino y latigazo de aceite mostrados en espectro de cascada^[4]

La velocidad de remolino de aceite quedará limitada a la velocidad crítica del rotor, aunque la velocidad del rotor se incremente, tal como se puede apreciar en Figura 2.38, cuya velocidad crítica será la zona limitada por A.

TRABAJO FIN DE GRADO
INGENIERÍA MARÍTIMA

El **latigazo seco** se produce debido a falta de lubricación, lo cual induce a un incremento de fricción, con su consecuente vibración, habitualmente en altas frecuencias y un alto desgaste en las zonas de contacto eje-cojinete.

2.5.1.6. FALLOS EN RODAMIENTOS

Llevando un control de las vibraciones de los equipos, se puede predecir un pequeño daño o defecto en el rodamiento antes de que este cause mayores problemas. Las principales causas de fallos en rodamientos son entre otras: contaminación (incluyendo la humedad), sobre esfuerzos, falta de lubricación o fallos de fabricación.

Todos los rodamientos de bolas tienen unas frecuencias específicas de vibración, los cuales son únicos los cuales son:

- **Frecuencia fundamental de funcionamiento (FTF-Fundamental train frequency)**
- **Frecuencia de giro de la bola (BSF-Ball spin frequency/BS-Ball spin)**
- **Frecuencia en la pista externa (BPFO-Ball pass frequency outer/OR-Outer race)**
- **Frecuencia en la pista interna (BPFI-Ball pass frequency inner/IR- Inner race)**

$$FTF = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos \phi \right] \cdot rps$$

$$BSF = \frac{P_d}{2B_d} \cdot \left[1 - \left(\frac{B_d}{P_d} \right)^2 \cdot (\cos \phi)^2 \right] \cdot rps$$

$$BPFO = N \cdot (FTF)$$

$$BPFI = \frac{N}{2} \left[1 + \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos \phi \right] \cdot rps$$

En donde (ver Figura 2.39):

B_d : diámetro de las bolas del rodamiento

P_d : distancia entre los centros de las bolas extremas.

N : número de bolas

ϕ : ángulo de contacto entre la bola del rodamiento y las pistas.

rps: revoluciones por segundo (Hz)

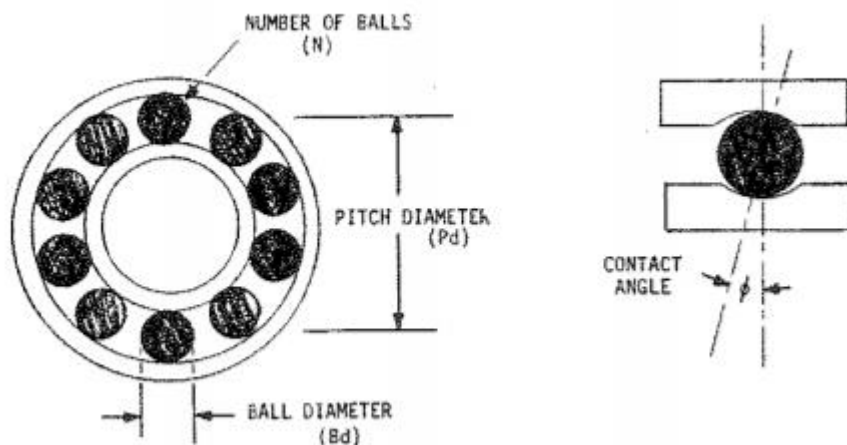


Figura 2.39- Parámetros necesarios para el cálculo de las frecuencias del rodamiento^[2]

Cabe destacar por ello, que a partir de un espectro de vibraciones FFT, se puede determinar el número de bolas que tienen internamente un rodamiento:

$$N = rps - \left[\frac{BPFI + BPFO}{rps} \right]$$

Éstos valores son teóricos, cada fabricante tiene todos estos datos en forma de coeficientes tabulados, específicos para cada modelo de rodamiento. Por esto pueda haber discrepancias en un mismo modelo de rodamiento de diferentes fabricantes, ya que pueden diferir algunas características internas del mismo.

TRABAJO FIN DE GRADO				
INGENIERÍA MARÍTIMA				

	FTF	BS	OR	IR
FAG 6311	0.378	1.928	3.024	4.976
SKF 6311	0.382	2.003	3.057	4.943
NTN 6311	0.384	2.040	3.072	4.928

Figura 2.40-Coeficientes de frecuencia de un rodamiento tipo 6311 de tres fabricantes diferentes^[2]

Las frecuencias del rodamiento se obtienen multiplicando los coeficientes por la velocidad de giro del eje.

En caso de no disponer de estas tablas de los fabricantes, se puede realizar una aproximación de estos valores mediante las siguientes fórmulas:

$$FTF = 0,4 \cdot rps$$

$$OR = 0,4 \cdot rps \cdot N$$

$$IR = 0,6 \cdot rps \cdot N$$

En donde N es el número de bolas que tiene internamente el rodamiento, aunque solamente estas fórmulas tienen un error menor al 2% cuando el número de bolas es menor de 12, posteriormente este error se va incrementando.

Se recomienda la colocación del acelerómetro situado en la posición superior, centrado y de modo vertical del acelerómetro, viéndose en el eje vertical (Z) los mejores resultados, debido a que la zona de carga del rodamiento está centrada en 45° en la parte inferior del mismo.

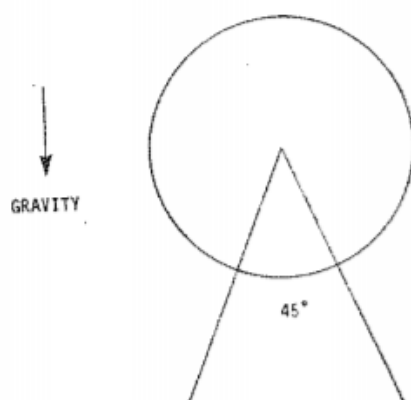


Figura 2.41-Zona de carga de un rodamiento^[2]

Se muestra un ejemplo con un rodamiento SKF del tipo 6311, a una velocidad de giro de 1715 RPM:

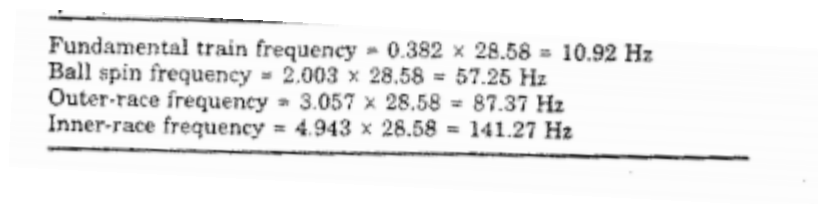


Figura 2.42-Frecuencias del rodamiento SKF 6311 a una velocidad de 1715rpm (28,58Hz) ^[2]

Un espectro de un rodamiento dañado, puede mostrar una aceleración excesiva radial en alguno de sus puntos de frecuencia de análisis.

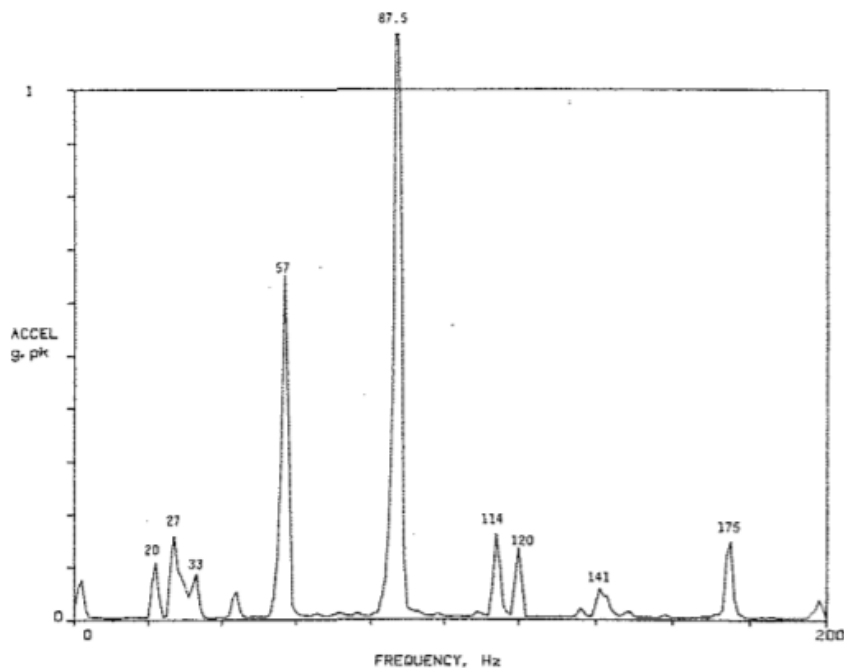


Figura 2.43-Espectro de vibración de un rodamiento NSK 6311 a 1715 RPM ^[2]

Por lo que se puede concluir que, con la amplitud de las vibraciones, se puede determinar el estado del rodamiento, ya que, estas frecuencias descritas anteriormente siempre van a encontrarse cualquier rodamiento, aunque sea totalmente nuevo. Asimismo, en estados avanzados de deterioro de los rodamientos, se apreciará también ruido aleatorio en altas frecuencias.

Por ello, también se pueden determinar fallos en rodamientos analizando la gráfica de vibraciones dentro del dominio del tiempo, dentro de la cual, se

aprecian pulsos de impacto de gran amplitud cada cierto tiempo (Figura 2.44), en lugar de una gráfica uniforme (Figura 2.45).

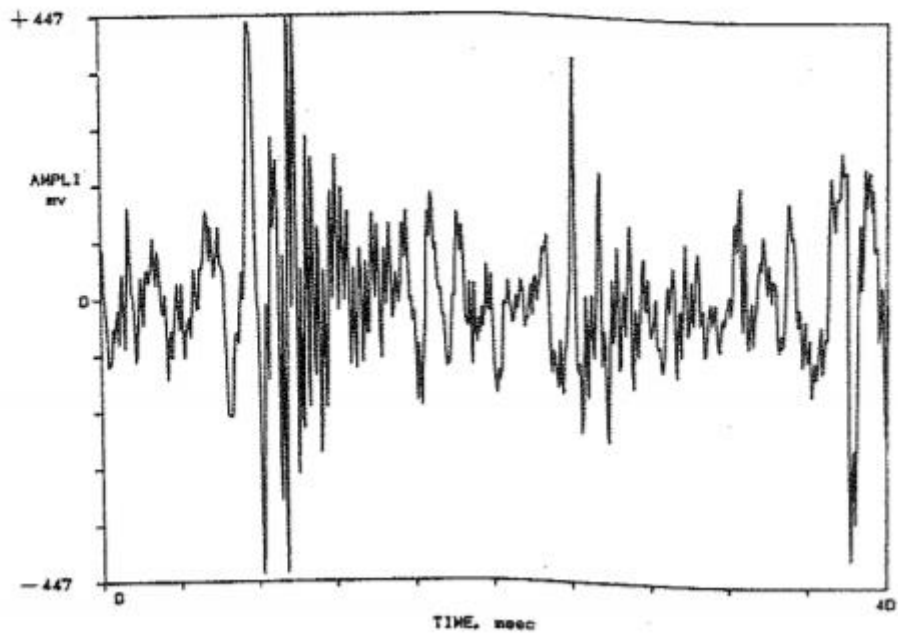


Figura 2.44-Pulsos de impacto en un rodamiento dañado [2]

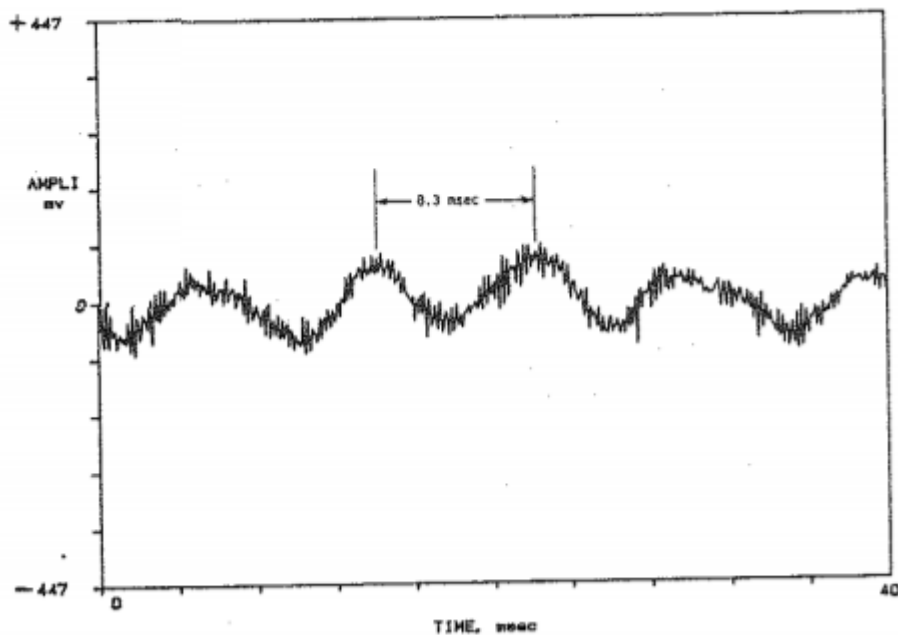


Figura 2.45-Rodamiento sin daños. No se aprecian pulsos de impacto [2]

Otro factor apreciable relacionado con las vibraciones en el rodamiento, es el desalineamiento de los mismos dentro de su cajera, lo cual es apreciable en el espectro de vibración en un espectro similar al desalineamiento descrito en

TRABAJO FIN DE GRADO
INGENIERÍA MARÍTIMA

el apartado 2.5.1.2, ya que produce un desalineamiento en el eje con respecto a rodamiento

2.5.1.7. FALLOS EN ENGRANAJES-REDUCTORAS

Los engranajes son un grupo de piezas rotativas las cuales transmiten potencia de un eje de rotación a otro.

Un engranaje es una pieza compuesta por una rueda rodeada de varios dientes o piñones, los cuales, presentan un contacto con el piñón adyacente para transmitirle este movimiento. Debido a este contacto se producen fuerzas en los mismos: una deflexión en el momento en que los dientes están en contacto, para posteriormente sufrir un rebote en el momento que no hay carga, lo que provoca una acumulación de daños por fatiga.

Un parámetro importante a conocer en el análisis de frecuencias en engranajes es el GMF (gear mesh frequency), el cual viene dado por:

$$GMF = n \cdot rps$$

En donde:

n: número de dientes en el engranaje

rps: velocidad de giro del piñón en Hz

Éste parámetro es de vital importancia, dado que, en el espectro del dominio de frecuencias, aparecerá siempre representado (incluyendo sus bandas laterales) junto a la frecuencia de giro del conjunto de la caja de engranajes, pudiendo incluir su armónico, así como la velocidad de giro del mismo piñón.

En el análisis de vibración de rodamientos de corte recto, hay que prestar atención a la dirección radial, mientras en uno helicoidal, será en la axial (ver Figura 2.46).

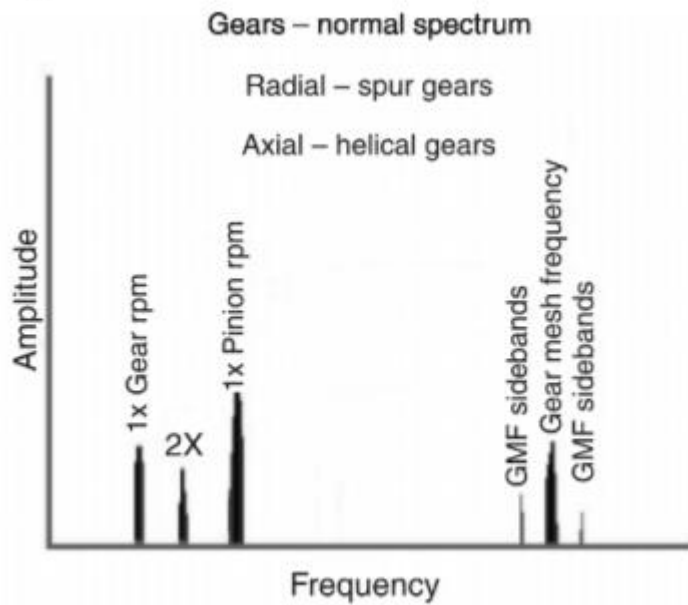


Figura 2.46-Espectro normal de una caja de engranajes o reductora^[4]

Habitualmente la primera fase de deterioro de un engranaje, viene dada por el **desgaste** de uno o varios de los dientes, un indicador de lo mismo es una aparición de la frecuencia natural de los engranajes, junto a bandas laterales a su alrededor (ver Figura 2.47). La amplitud de las bandas laterales es el mejor indicador de desgaste.

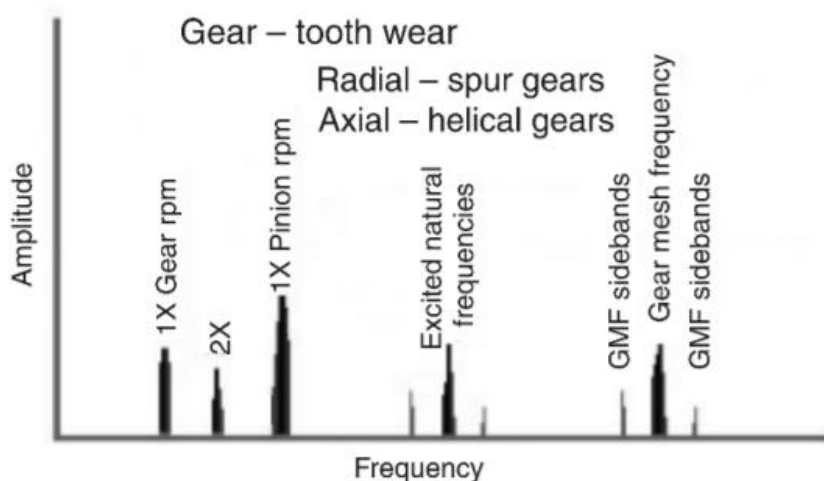


Figura 2.47-Desgaste en diente o dientes de la reductora^[4]

Cuando hay una **rotura en uno de los dientes de un engranaje**, se apreciará una perturbación en una gráfica del dominio del tiempo como una amplitud en modo de pulso que se mostrará cada periodo de giro ($1/\text{rps}$), o lo que es lo mismo un incremento de la amplitud a la misma frecuencia de giro que el engranaje en el dominio de la frecuencia.

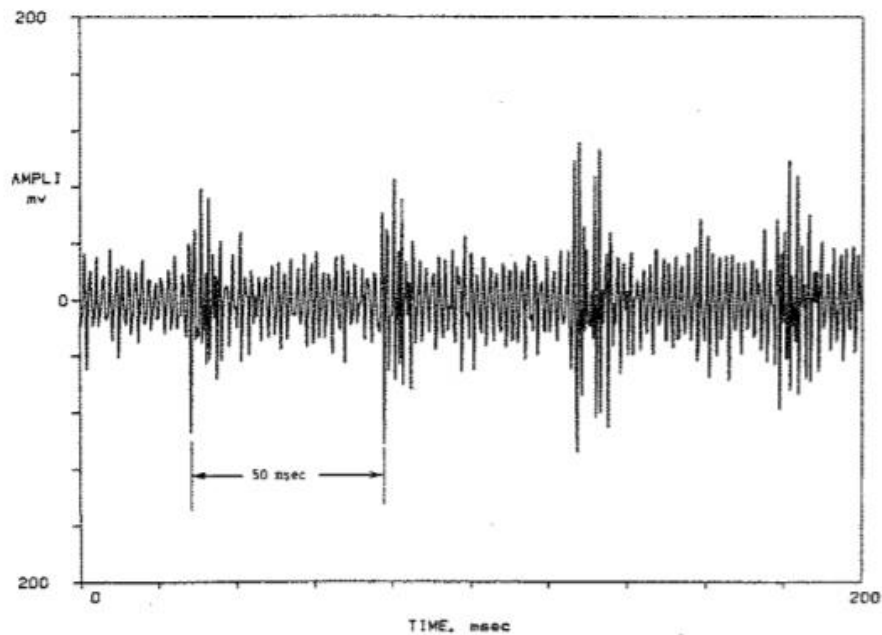


Figura 2.48-Diente roto de un engranaje visto en el dominio del tiempo. Ejemplo de un engranaje de 30 dientes girando a 1200rpm^[2]

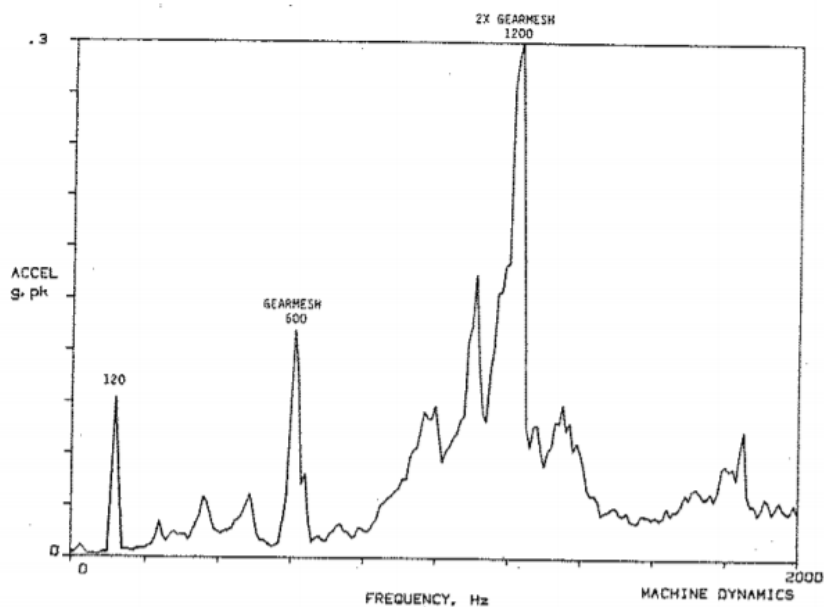


Figura 2.49- Diente roto de un engranaje visto en el dominio de frecuencias. Ejemplo de un engranaje de 30 dientes girando a 1200rpm-Caso representado en la anterior figura en el dominio del tiempo^[2]

En caso de haber más de un diente dañado, aparecerían estas oscilaciones de modo más repetitivo:

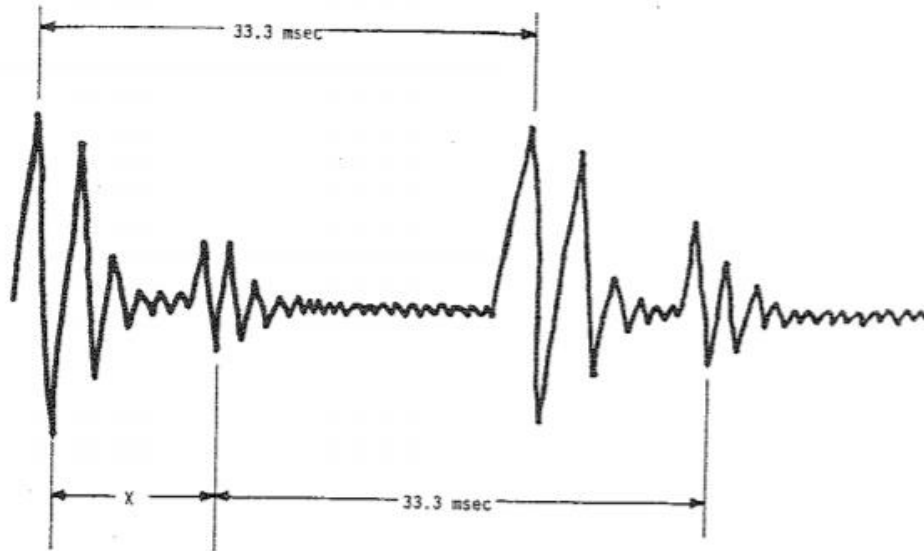


Figura 2.50-Caso hipotético de dos dientes dañados en un mismo engranaje girando a 1800RPM^[2]

En el caso de un **desalineamiento** del engranaje, habitualmente excita los armónicos de segundo o tercer orden del GMF:

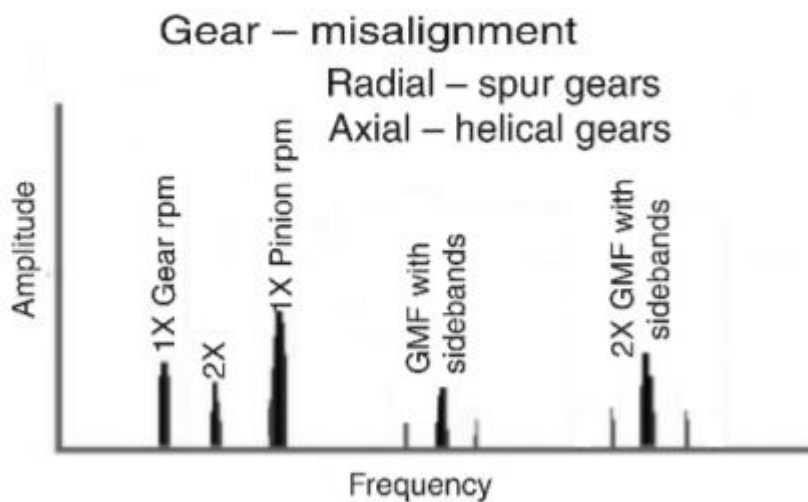


Figura 2.51-Espectro generado por desalineamiento en un engranaje^[4]

2.5.1.8. RESONANCIA

Es la condición que se produce cuando una fuerza aplicada sobre un equipo genera una vibración en la frecuencia natural del equipo o una parte del mismo, produciendo así una amplificación de esta. Habitualmente esta fuerza viene producida del desequilibrio residual producido en una máquina rotativa que forma parte del equipo o turbulencias producidas en los fluidos internos de la máquina, y es sufrida por partes fijas en mayor medida que en las móviles o rotativas

Esta fuerza se transmite a través de la estructura de la máquina en forma de una fuerza vibratoria, y si se encuentra con alguna parte estructural de la máquina que tiene una frecuencia de vibración natural igual a la anterior, se inducirá el efecto de la resonancia, el cual puede incrementar entre 10 y 100 veces la amplitud de la fuerza, dependiendo del amortiguamiento.

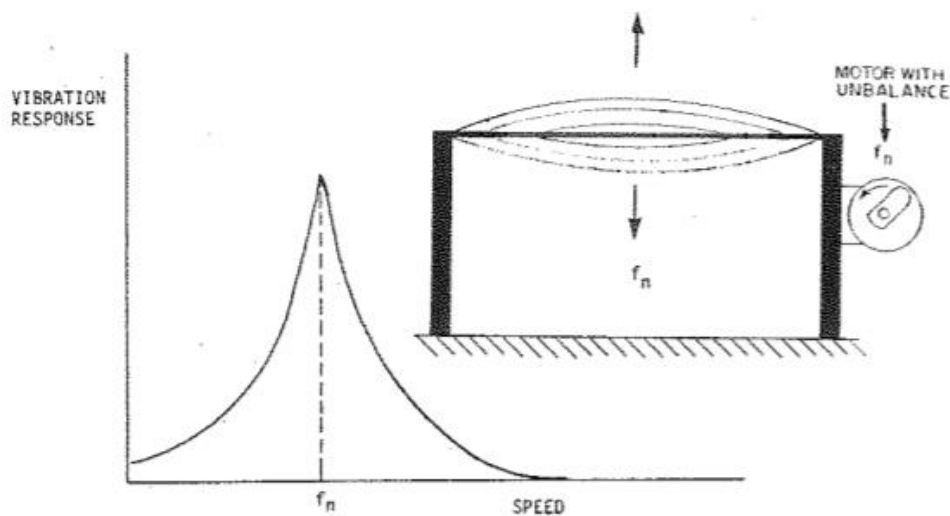


Figura 2.52-Fenómeno de resonancia^[2]

La frecuencia natural cualquier objeto viene definida por sus componentes de masa, amortiguamiento y rigidez.

Existe un método para calcular la frecuencia natural de cualquier objeto denominado prueba de impacto, en el cual se fija un sensor de vibración en el equipo o pieza que se quiere medir, y mediante un martillo de impacto se golpea, tomando las muestras.

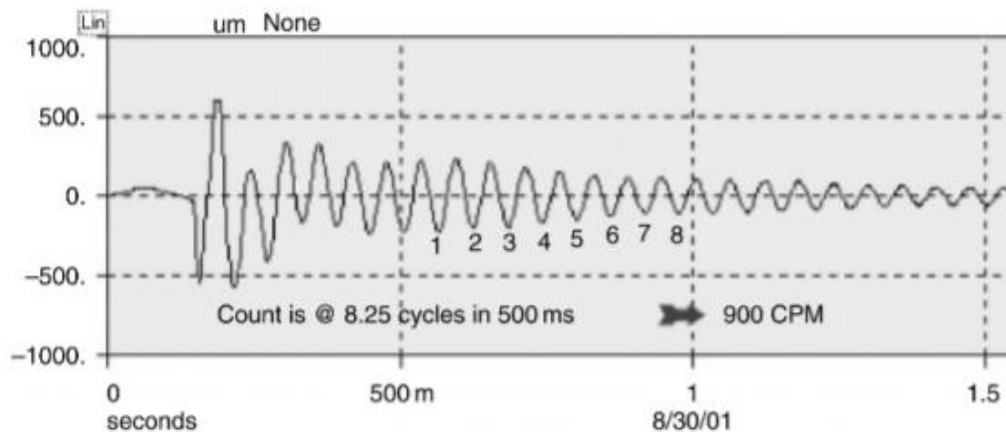


Figura 2.53-Prueba de impacto representada la amplitud en el dominio de tiempo^[4]

En el ejemplo anterior, se observa que tras el impacto se producen unas vibraciones libres a la frecuencia natural, para posteriormente reducirse logarítmicamente.

Se puede realizar una estimación de la frecuencia natural mediante una gráfica en el dominio del tiempo (a mayor tiempo de análisis, mayor precisión). En el momento descrito anteriormente, cuando comienza a reducirse la amplitud, se comienza el recuento de los ciclos. Como se aprecia en la gráfica del dominio del tiempo (Figura 2.53), se producen 8,25 ciclos en 500 ms, lo que indica que la frecuencia natural en esta prueba es de 990 ciclos por minuto o lo que es lo mismo 16,5 Hz.

Sin embargo, si se analiza el espectro del dominio de las frecuencias con mayor precisión de la prueba anterior, se obtiene el pico de resonancia en 1046 ciclos por minuto, o lo que es lo mismo, 17,43 Hz (Figura 2.54).

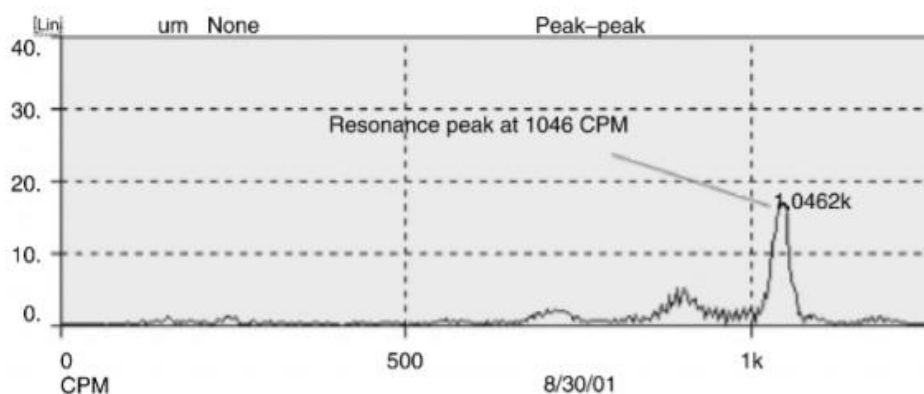


Figura 2.54-Prueba de impacto representada la amplitud en el dominio de frecuencia^[4]

El conocimiento de las frecuencias de resonancia de las distintas partes que componen la máquina, es importante debido a que, si esas frecuencias aparecen en el espectro de frecuencias con la máquina en funcionamiento, es una confirmación de resonancia.

Otro indicio de resonancia es que, observando el espectro de la máquina y efectuando cambios de velocidad en la misma, se producirán variaciones en los picos de resonancia, sin variar la frecuencia de los mismos.

2.5.1.9. FALLOS EN CORREAS DE TRANSMISIÓN Y POLEAS

Una correa **aflojada, desgastada o inapropiada para su polea**, creará frecuencias de tipo sub-armónico con respecto a la velocidad de giro de las poleas. Se crearán asimismo armónicos de la frecuencia de la correa de segundo orden habitualmente, pudiendo obtener armónicos de tercer y cuarto orden de esta frecuencia. También se producen amplitudes inestables con un aumento general del nivel.

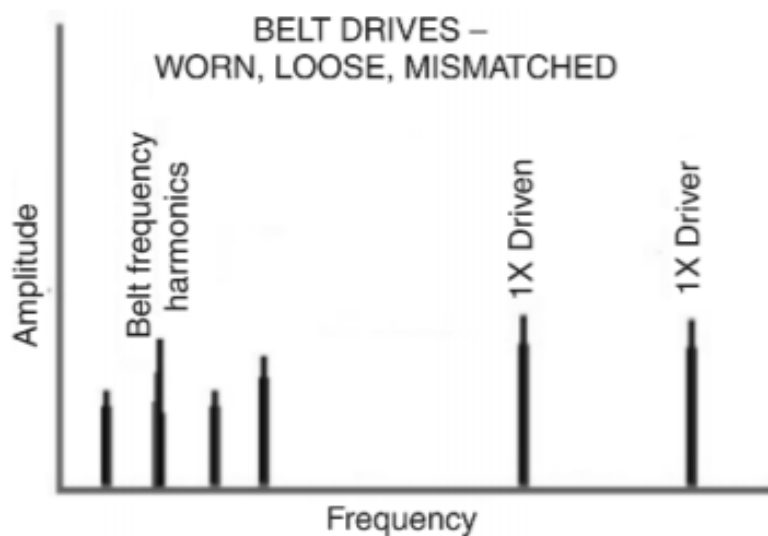


Figura 2.55-Espectro del dominio de frecuencia de fallos en correas^[4]

La frecuencia de la correa viene determinada por la ecuación siguiente:

$$Frecuencia\ de\ la\ correa(Hz) = \frac{\pi \cdot rps \cdot d}{l}$$

En donde:

l: longitud de la correa

rps : Velocidad de giro de la polea (Hz)

d : diámetro primitivo

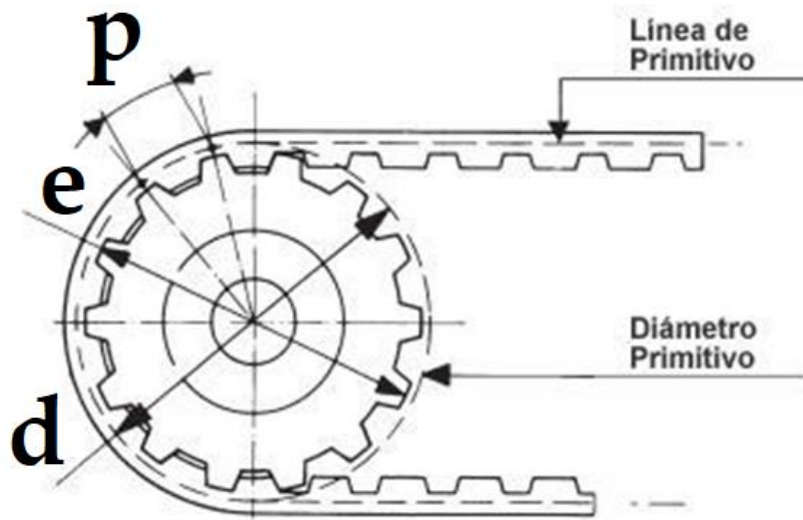


Figura 2.56-Parámetros de polea dentada [18-editado]

La longitud de la correa se obtiene de:

$$l = (2 \cdot L) + \left[\pi \cdot \frac{D_D + D_d}{2} \right] + \left[\frac{(D_D - D_d)^2}{4 \cdot L} \right]$$

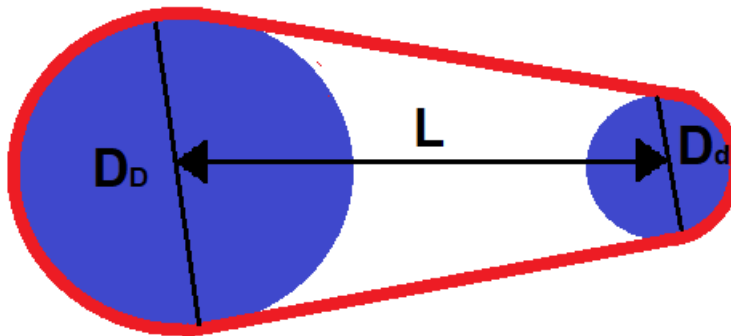


Figura 2.57-Parámetros para el cálculo de la longitud de una correa - Fuente propia

En donde:

D_D : diámetro primitivo de la polea mayor

D_d : diámetro primitivo de la polea menor

L : distancia entre centros de poleas

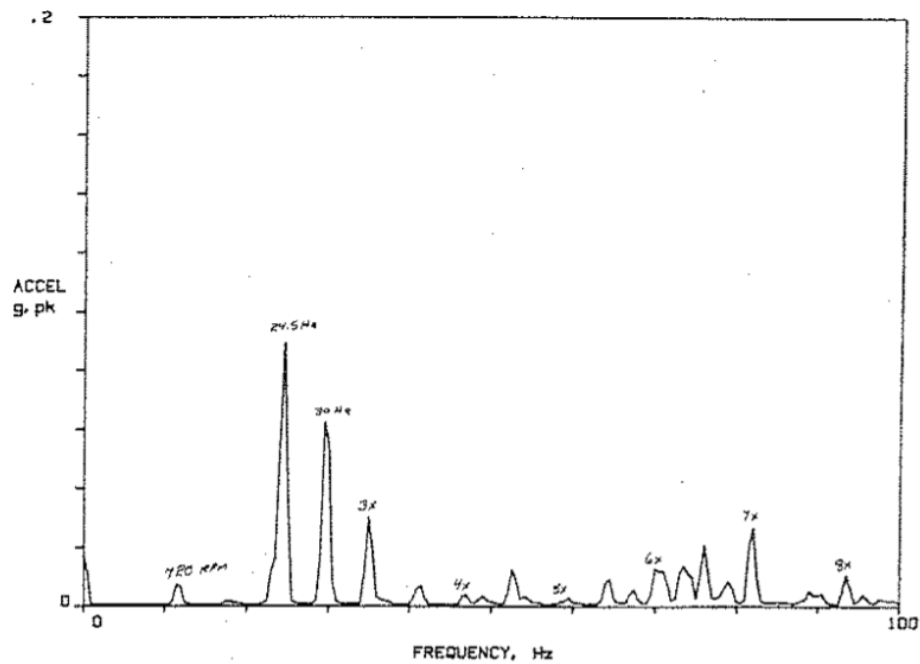


Figura 2.58-Espectro FFT de una correa en buen estado de funcionamiento^[2]

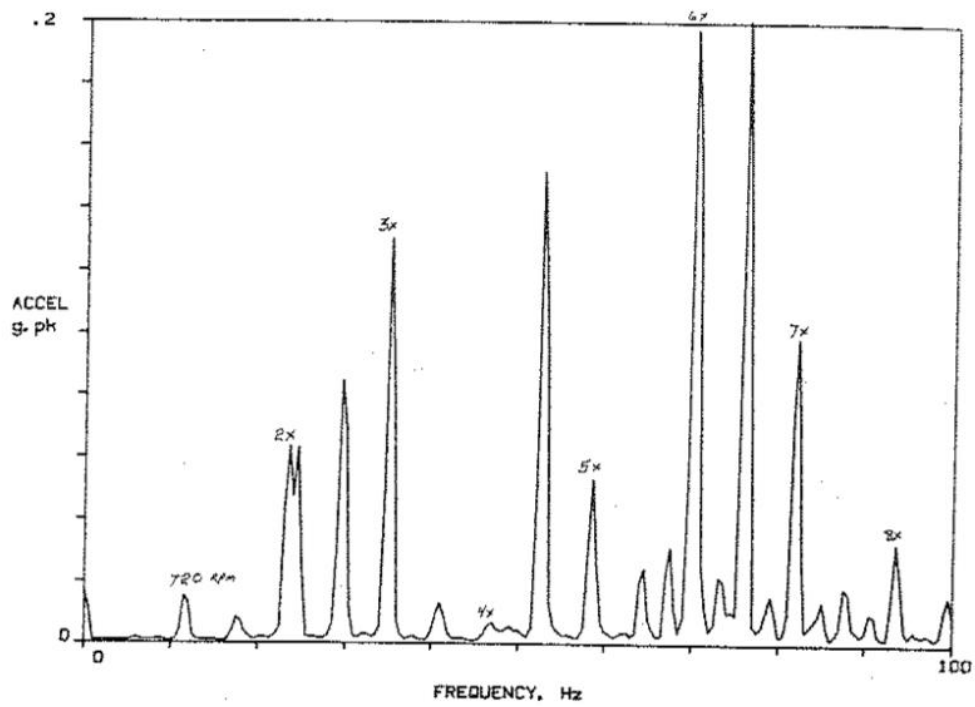


Figura 2.59-Ejemplo de espectro FFT de correa en mal estado, en las mismas condiciones de funcionamiento que la ilustrada en la Figura 2.58^[2]

Se puede apreciar el contenido de $\frac{1}{2}$ de armónico en la correa dañada, así como del segundo al octavo armónico de la frecuencia la correa.

Un **desalineamiento entre la correa y la polea** también genera vibraciones y puede ser de tres tipos diferentes:

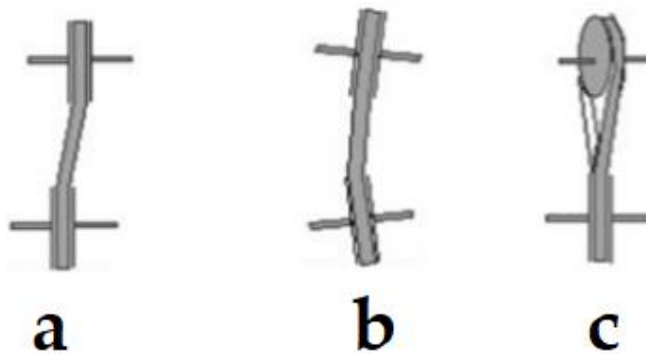


Figura 2.60-Tipos de desalineamiento en correas: a-Desfase; b-Dedo de pie de paloma; c-Desalineamiento angular. El caso b y c son considerados como desalineamientos angulares^[4]

Además de fuertes vibraciones en dirección axial y con la misma frecuencia de giro de la polea dañada, este desalineamiento crea desgaste excesivo tanto en correas como en poleas.

El ratio de las amplitudes y frecuencias observadas en el espectro de la polea conductora y conducida en esta situación depende del lugar de toma de la medida siendo proporcional a la masa y a la rigidez del sistema.

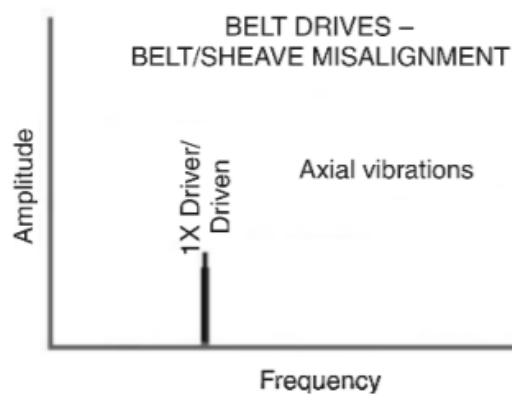


Figura 2.61-Vibración producida por desalineamiento de la roldana^[4]

Una **polea excéntrica o desequilibrada** (de forma ovalada o con el orificio del eje no concéntrico al diámetro de la polea), generará un espectro de vibración igual al anterior, aunque con vibraciones de tipo radial.



Figura 2.62-Poleas excéntricas^[4]

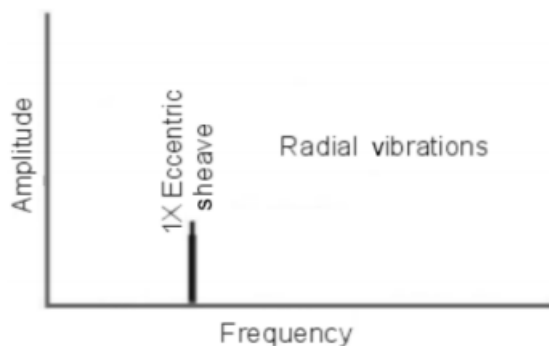


Figura 2.63-Espectro FFt de roldana excéntrica^[4]

Se puede producir **resonancia en la correa** cuando la frecuencia natural de la correa es próxima a la del motor o el eje a la que está acoplado radialmente.

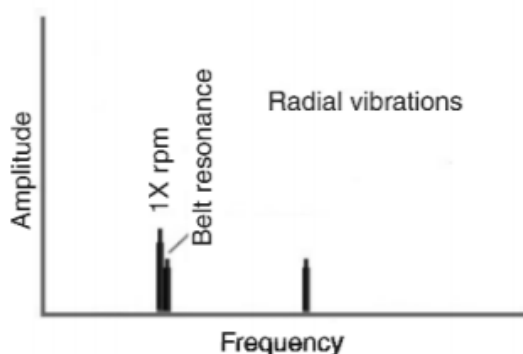


Figura 2.64-Resonancia en correas^[4]

Esto habitualmente se resuelve mediante la modificación de la tensión de la correa o incluyendo algún dispositivo tensor, o bien cambiando alguna

TRABAJO FIN DE GRADO
INGENIERÍA MARÍTIMA

característica de las poleas como el diámetro o el peso o bien cambiando directamente el tipo de correa.

2.5.1.10. PROBLEMAS EN MOTORES ELÉCTRICOS

Además de las vibraciones de naturaleza mecánica descritas anteriormente (fallos en rodamientos, excentricidades en el rotor...), Las máquinas eléctricas pueden presentar otros problemas de naturaleza electromagnética, los cuales también pueden verse reflejados en el espectro de vibración.

Se puede diferenciar entre un problema de tipo eléctrico o uno mecánico en este tipo de máquinas, midiendo las vibraciones en funcionamiento y, desconectándose de la electricidad en el equipo pueden darse dos situaciones:

- **La vibración es alta, pero se reduce progresivamente:** se deberá a un problema de tipo mecánico
- **Se produce una caída abrupta de la vibración en el momento que se desconecta la máquina del suministro eléctrico:** indica un problema de tipo eléctrico

Éstos problemas de tipo eléctrico que se pueden detectar mediante la vibración de un equipo, se producen por un desequilibrio de los campos magnéticos y las fuerzas inducidas por ellos sobre el rotor o el estator.

Generalmente este tipo de vibraciones, generan amplitudes anormales a la misma frecuencia que la velocidad de giro del equipo, por lo que se pueden confundir con el desequilibrio.

Los daños producidos en el rotor, se detectarán mediante una vibración de tipo radial debido al desequilibrio electromagnético producido.

Para poder comprender el espectro de frecuencias de vibraciones de tipo eléctrico, es importante conocer las siguientes frecuencias y parámetros:

$$f_L = \text{frecuencia de línea}$$

$$f_s = \text{frecuencia de deslizamiento} = \frac{2 \cdot f_L}{P} - rps$$

$$f_p = \text{frecuencia de paso de polo} = f_s \cdot P$$

$$RBPF = \text{Frecuencia de paso de barra en rotor} = N \cdot rps$$

$$CPF = \text{frecuencia de paso por bobina de estátor} = n \cdot rps$$

$$n = p \cdot (\text{número de bobinas en cada polo})$$

$$p = \text{Número de polos en el estator}$$

$$P = \text{Número de polos en el rotor}$$

$$N = \text{Número de barras del rotor}$$

$$rps = \text{Velocidad de giro (Hz)}$$

Una barra **del rotor rota o dañada, un cortocircuito en el laminado del rotor o una mala unión entre las barras del rotor y anillos rozantes**, creará una vibración con dos componentes: una componente a la velocidad de giro (rps) y sus bandas laterales a la frecuencia de paso de polo (Figura 2.65), pudiéndose crear armónicos de estos (Figura 2.66).

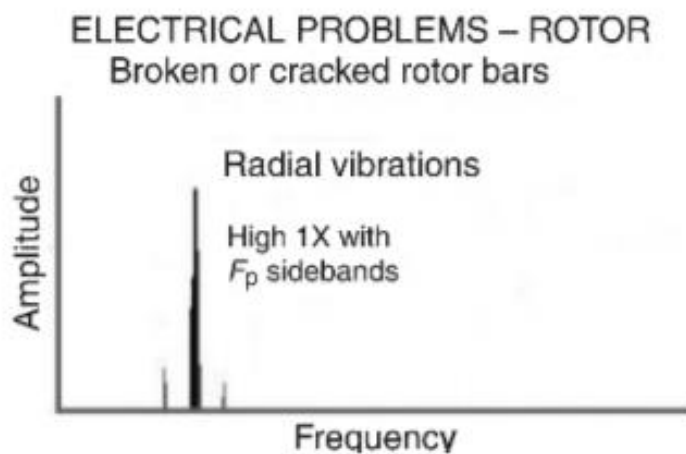


Figura 2.65-Espectro FFT de un motor con las barras del rotor dañadas, con un nivel alto de amplitud a la velocidad de giro y bandas laterales a la frecuencia de paso de polo^[4]

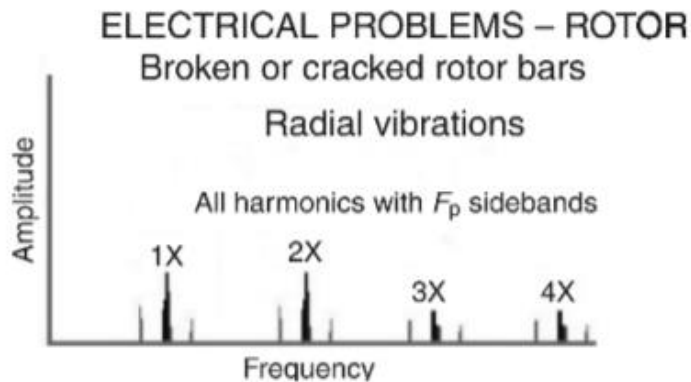


Figura 2.66-Espectro FFT de un motor con las barras del rotor dañadas, con armónicos de la velocidad de giro y bandas laterales a la frecuencia de paso de polo^[4]

Unas **barras del rotor aflojadas** se verán reflejadas en el espectro de frecuencias como una amplitud en la frecuencia del paso de barra del rotor (RBPF) y sus bandas laterales al doble de frecuencia de línea. pudiéndose llegar a la situación en la que se crean altos niveles de amplitud en el armónico 2X del RBPF, mientras en la frecuencia del RBPF hay una menor amplitud.

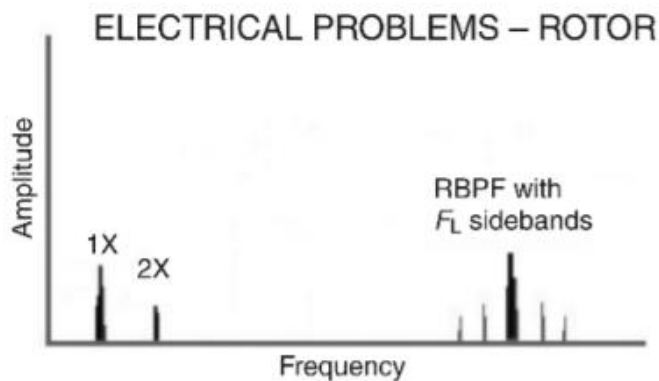


Figura 2.67-Frecuencia de paso de barra del rotor^[4]

Un **rotor excéntrico**, también crea un efecto electromagnético, el cual genera vibraciones y pueden ser apreciables en el espectro de frecuencias: la frecuencia de paso de polo, aparece a bajas frecuencias. En torno a la banda de la velocidad de giro (rps) aparecerán unas bandas laterales de valor $\pm 2X$ la frecuencia de deslizamiento debido a la variación de distancias generadas entre rotor y estator debido a la excentricidad. Finalmente se producirán unas

vibraciones pulsantes debido al espacio de aire entre rotor y el estator variable con un valor del doble de la frecuencia de línea y con unas bandas laterales del valor de la frecuencia de paso de polo.

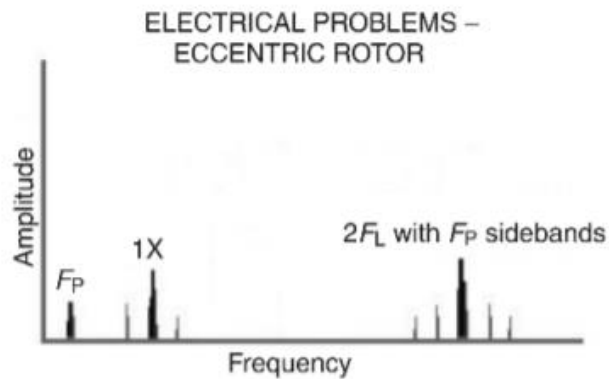


Figura 2.68-Rotor excéntrico^[4]

Un fallo en **las bobinas o en los laminados del estator**, generará vibraciones radiales al doble de la frecuencia de línea.

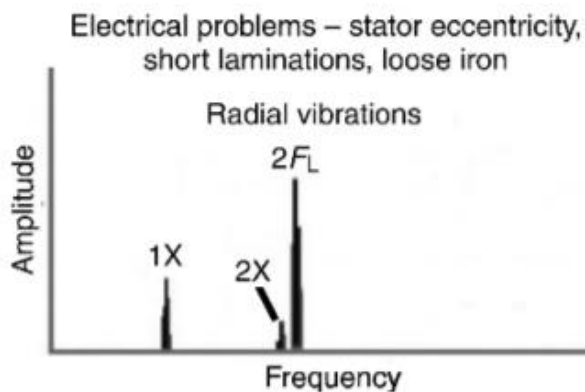


Figura 2.69-Espectro FFT típico de fallos en el estátor^[4]

Una **bobina aflojada en el estator de un motor síncrono**, generará vibraciones a la frecuencia de paso por bobina del estator (CPF) y estará rodeada por las bandas laterales a la frecuencia rps.

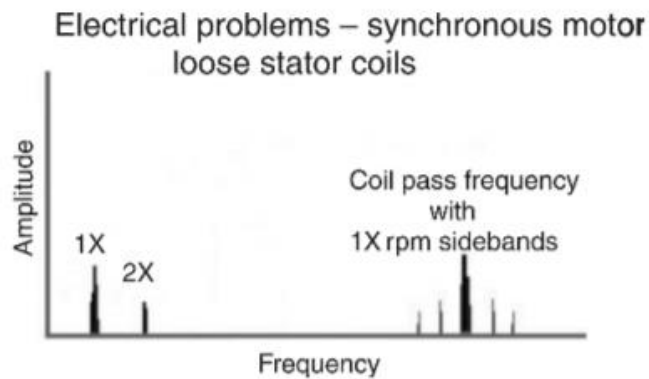


Figura 2.70-Bobinado aflojado en motor síncrono^[4]

Problemas como **conectores sueltos o dañados**, se aprecian en el espectro de frecuencias como una amplitud excesiva en el doble de frecuencia de línea, teniendo asimismo bandas laterales espaciadas a un tercio de la frecuencia de línea.

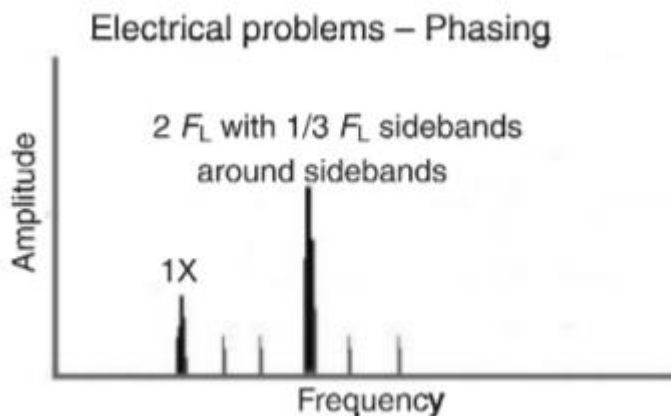


Figura 2.71-Problema en conectores o de fase^[4]

En **motores eléctricos de corriente continua**, se pueden detectar defectos tales como bobinas rotas o dañadas, rectificadores controlados de silicio (SCR) dañados o conexiones sueltas, cuando se aprecian grandes amplitudes a la frecuencia de disparo de rectificador controlado de silicio ($6 \cdot f_L$)

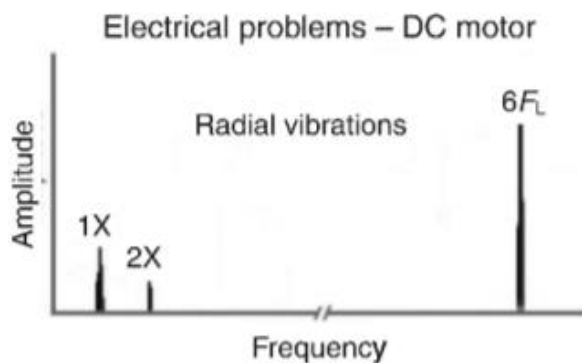


Figura 2.72-Fallos en motores eléctricos de corriente continua^[4]

2.5.1.11. PROBLEMAS EN MÁQUINAS ALTERNATIVAS

La maquinaria alternativa en rasgos generales, genera más vibración que la maquinaria rotativa. Por este motivo se hace más complicado el análisis el espectro de vibración de este tipo de máquinas.

En el espectro de vibración de una máquina alternativa, habrá siempre altas vibraciones a la frecuencia de giro del equipo, así como también armónicos, las cuales son generadas por la presión de gas cilindros, así como por el desequilibrio producido por el movimiento de las bielas.

En los motores de cuatro tiempos además se apreciará un pico de vibración a la mitad de la velocidad de giro debido a que el eje de levas gira a la mitad de velocidad que el cigüeñal.

Por todo esto, se determinará que hay un problema solamente cuando la amplitud de la vibración sea excesiva, lo que nos puede indicar problemas tales como fallos de compresión, fallos de inyección, fallos en las válvulas, etc.

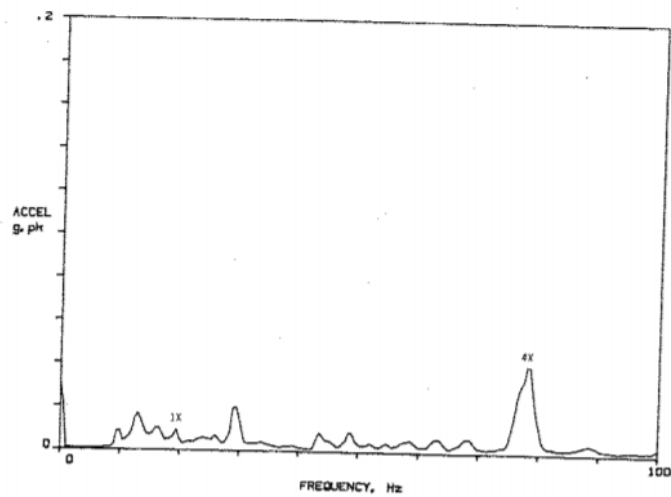


Figura 2.73-Espectro de vibración de un motor de gas a 1170rpm, con un funcionamiento normal^[2]

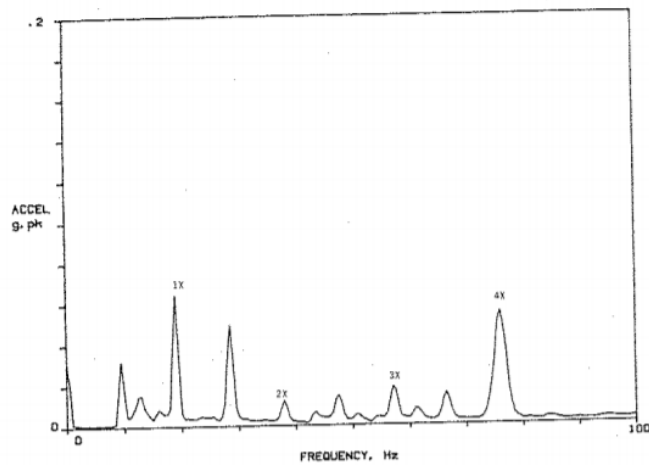


Figura 2.74-Fallo en un cilindro en el mismo motor descrito en la Figura 2.73^[2]

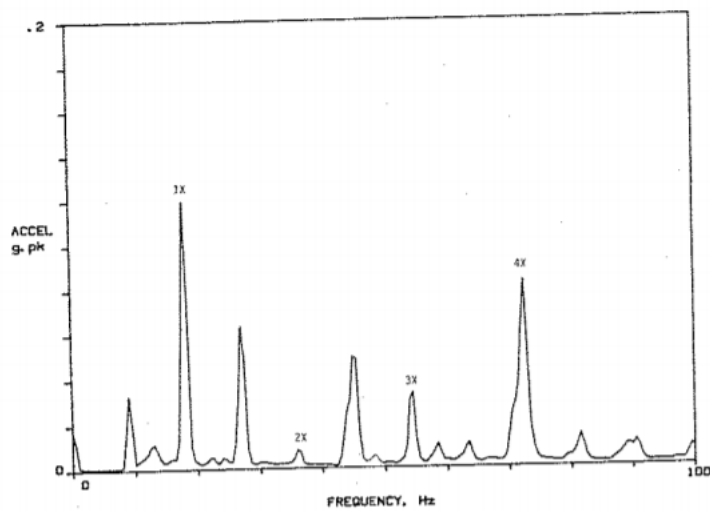


Figura 2.75-Fallo en dos cilindros en el mismo motor descrito en la Figura 2.73 y la Figura 2.74^[2]

2.5.1.12. PIEZAS SUELTAS O AFLOJADAS

Este tipo de vibraciones se presentan en el dominio de frecuencias como un gran número de armónicos y sub armónicos alrededor de la frecuencia de funcionamiento (habitualmente estos no son únicamente armónicos o sub armónicos enteros, sino que son del tipo 0,5X; 1,5X; 2,5X).

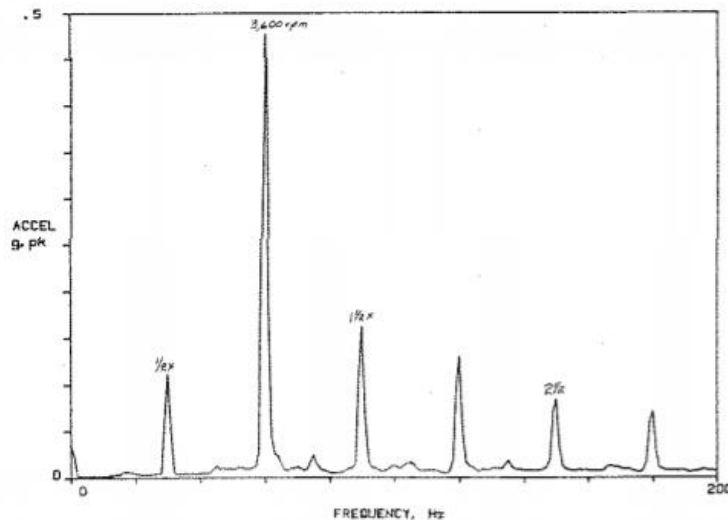


Figura 2.76-Espectro de frecuencias en un motor a un régimen de 3600rpm con piezas aflojadas. [2]

La aparición de este tipo de valores se debe al recorte o truncamiento producido en las ondas de vibración cuando las partes sueltas o aflojadas golpean con su límite de movimiento, por lo que en el dominio del tiempo se podría apreciar algo como lo siguiente:

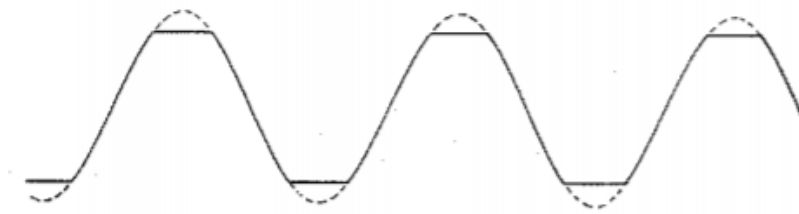


Figura 2.77-Truncamiento de la vibración, en el momento que las piezas sueltas golpean con su límite físico de movimiento[2]

2.5.1.13. ROZAMIENTO DEL ROTOR O PARTES GIRATORIAS

Un rozamiento de este tipo genera un espectro similar al de una pieza suelta o aflojada. Éstos pueden ser constantes durante todo el ciclo de giro o parciales, es decir, en momentos puntuales.

Éste tipo de rozamiento, genera vibraciones de tipo radial y al igual que en piezas sueltas o aflojadas, generará armónicos y sub armónicos enteros y no enteros de la frecuencia de giro.

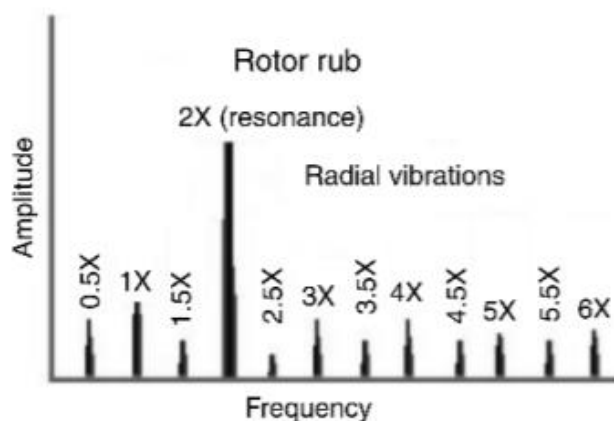


Figura 2.78-REspectro FFT de rozamiento del rotor^[4]

Al igual que en las piezas sueltas o aflojadas descritas en el apartado anterior, si se analiza la vibración en el dominio del tiempo, aparece una onda truncada:



Figura 2.79-Truncamiento de la vibración debida a rozamiento^[4]

Para determinar si hay un rozamiento de este tipo y conociendo la velocidad de giro del eje (N) y la velocidad crítica de giro del eje (N_c), se emplean las siguientes relaciones, para posteriormente analizar el espectro:

- Si $N < N_c$: se generan frecuencias a la velocidad de funcionamiento ($1 \cdot X$)
- Si $N > 2 \cdot N_c$: se generan frecuencias a $1 \cdot X$ o $\frac{1}{2} \cdot X$

- Si $N > 3 \cdot N_c$: se generan frecuencias a $1/3 \cdot X$; $1/2 \cdot X$ o $1 \cdot X$
- Si $N > 4 \cdot N_c$: se generan frecuencias a $1/4 \cdot X$; $1/3 \cdot X$; $1/2 \cdot X$ o $1 \cdot X$

2.5.2. FENÓMENOS DE FLUIDOS EN LA MAQUINARIA

2.5.2.1. FRECUENCIA DE PASO DE PALETA

Es un fenómeno que se produce en máquinas que impulsan fluido, tales como en bombas y ventiladores y consiste en una fluctuación de presión que se produce entre las paletas o aspas y el estator, lo que se traduce en una vibración a cierta frecuencia, la cual se determina siguiente modo:

$$f_p = n \cdot rps$$

En donde:

f_p : frecuencia de paso de paletas (Hz) o BPF (Blade Pass Frequency)

n : número de paletas

rps : velocidad de giro del ventilador o bomba en revoluciones por segundo.

Éste fenómeno se produce siempre en un equipo de este tipo, por lo que, analizando un espectro de frecuencias, siempre tendrá su contenido de BPF, y posiblemente armónicos.

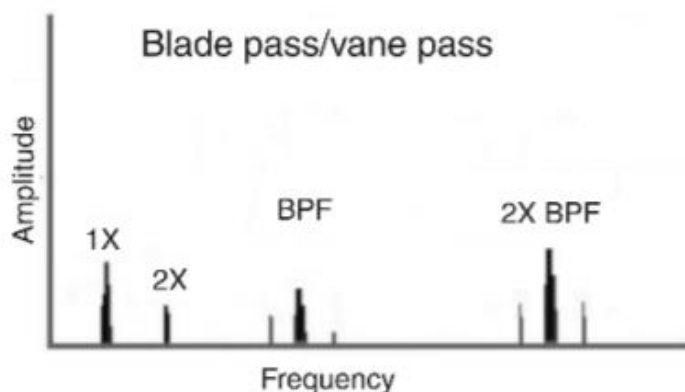


Figura 2.80-Espectro FFT donde se representa el frecuencia de paso de paleta y su armónico^[4]

No siendo un problema excepto que esta frecuencia coincida con la frecuencia de natural de la estructura, o de algún elemento, lo cual se traduciría resonancia con su consecuente ruido y vibraciones, las cuales si pueden ser origen de alguna avería en elementos adyacentes.

2.5.2.2. CAVITACIÓN

Este Fenómeno se produce cuando la presión de un fluido es menor que la presión de vapor a esa temperatura. Lo que implica la vaporización de ese fluido a temperatura ambiente.

En el ámbito de la maquinaria, esto sucede por ejemplo en las bombas. A la entrada de estas, al ser succionado el líquido, la presión disminuye, al producirse estas vaporizaciones, se crean burbujas de vapor, las cuales impactan en el rodete, colapsándose, y de forma prolongada, generarán daños destructivos en el mismo.

La cavitación se puede detectar en el espectro de vibración como unas vibraciones aleatorias en altas frecuencias (rango de kHz).

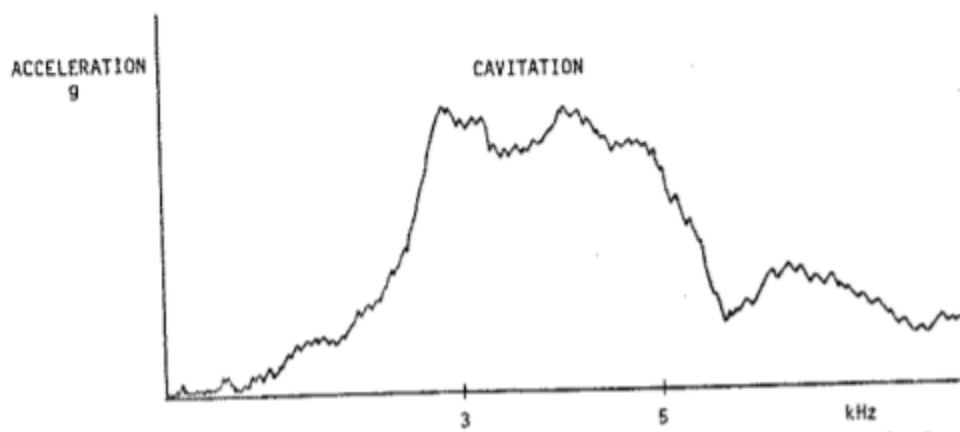


Figura 2.81-Espectro FFT de una bomba con cavitación^[2]

2.5.2.3. TURBULENCIAS

Cuando hay un fluido en movimiento en torno a un objeto, se generarán torbellinos o vórtices aguas abajo de este objeto. Con un incremento de la velocidad del flujo, estos se convierten en turbulencias.

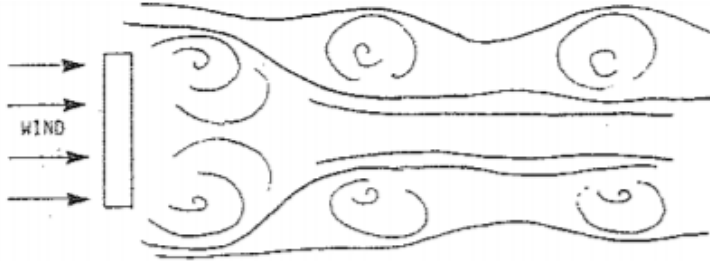


Figura 2.82-Generación de turbulencias^[2]

Las turbulencias consisten en unas vibraciones aleatorias, las cuales se pueden apreciar en el espectro del dominio de frecuencias como una banda ancha de ruido de vibración, por lo que, actuando en un amplio espectro de frecuencias, es fácil que genere resonancia con sus consiguientes problemas.

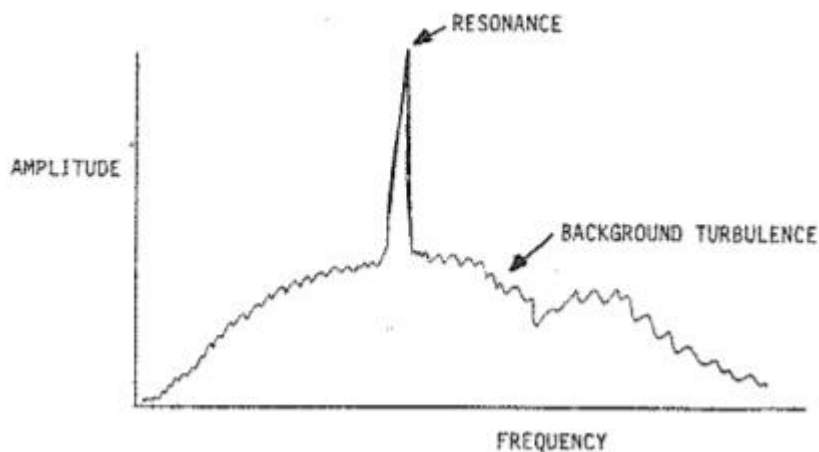


Figura 2.83-Resonancia producida por turbulencias^[2]

2.5.3. CARTA DE RATHBONE

Es la primera guía (históricamente) desarrollada para la determinación de la severidad de la vibración en máquinas y aceptada en el ámbito industrial, desarrollada en 1939 y mejorada con posterioridad. Aunque no es una norma fue de amplio uso, aunque ya está obsoleta.

Esta carta dispone de la escala de frecuencia (Hz), así como la amplitud del desplazamiento en su valor de pico, y ambas en escala logarítmica. A partir de la combinación de estos valores, se puede determinar la zona de vibración en la que se encuentra el equipo.

Se encuentra actualmente en desuso debido a las limitaciones que esta tiene, y se han visto mejoradas en las normas que se describen en el apartado 2.5.4.

Sus principales limitaciones son:

- No caracterizar la vibración en base al tipo de máquina y el tipo de soporte que la sustentan (rígido o flexible).
- Solo es aplicable a equipos rotativos y de baja velocidad de giro.

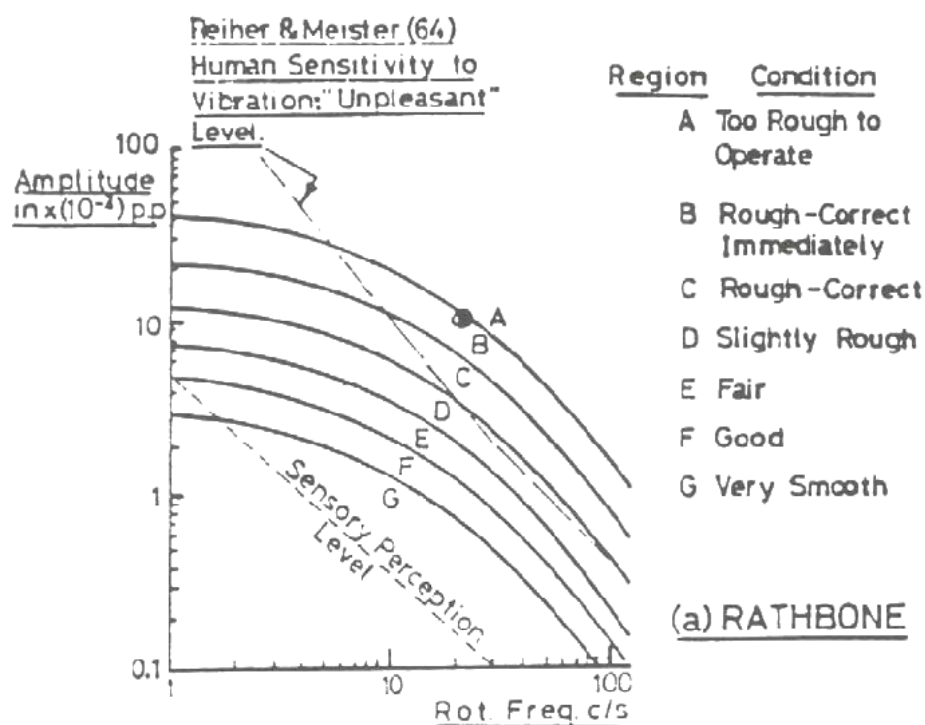


Figura 2.84-Carta de Rathbone^[10]

2.5.4. NORMATIVA

Dependiendo del tipo de máquina, de la parte característica a medir y del tipo de operación de la misma, se pueden tener unos valores representativos de la vibración bien en partes rotativas de la máquina, o en partes no rotativas de la máquina.

La vibración medida en partes rotativas viene caracterizada en la norma ISO 7919 y para su medición se emplean sensores de desplazamiento relativo sin contacto.

El objeto de este proyecto y el instrumento desarrollado en el mismo tiene como objeto la medición de vibraciones en partes no rotativas de máquinas, por lo que no se entrará en más detalle sobre la anterior norma.

La normativa aplicable para estas situaciones es la norma ISO 10816, la cual reemplaza a la norma ISO 2372:1974 y a la norma ISO 3945:1985.

Las normas anteriores a la ISO 10816 nos indican que el instrumento de medición debe ser capaz de medir en el rango de frecuencias de entre 10 Hz y 1000 Hz, sin embargo, la norma ISO 10816, nos indica que se pueden medir en otros rangos de frecuencia.

Asimismo, la norma ISO 2372 emplea criterio de amplitud la velocidad, mientras la norma ISO 10816 emplea tanto aceleración, como velocidad o desplazamiento.

Además, establecen los procedimientos, así como la ubicación de los sensores para la toma de datos.

Para la aplicación de estas normas, se mide el valor del nivel vibratorio RMS y no el pico a pico debido a que el segundo no nos va a dar un valor real de la vibración general, mientras el primero sí, como se aprecia en la Figura 2.85.

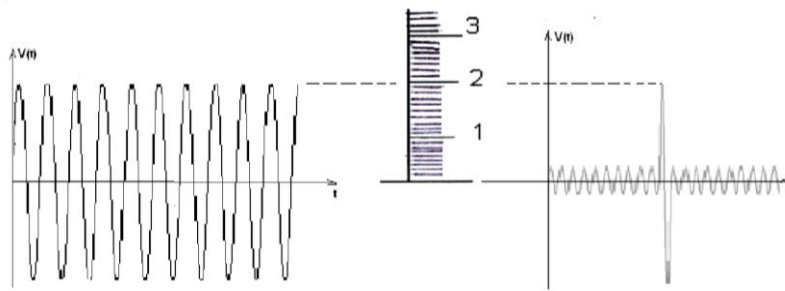


Figura 2.85-Vibraciones de igual amplitud pico y diferente valor RMS. Ambas tienen una amplitud pico de 2mm/s, mientras su velocidad RMS es de 1,4mm/s en la izquierda y de 0,3 en la derecha^[8]

2.5.4.1. NORMA ISO 10816

El título de esta norma es “Evaluación de la vibración en máquinas mediante la medida en partes no rotativas” y se divide en cinco partes:

- **ISO 10816-1:** Guías generales.
- **ISO 10816-2:** Grupos electrógenos-generadores turbinas de vapor terrestres sobre 50 MW.
- **ISO 10816-3:** Máquinas industriales de potencia nominal por encima de 15 kW y velocidades nominales de entre 120 revoluciones por minuto y 15.000 revoluciones por minuto medidos sobre el terreno.
- **ISO 10816-4:** Equipos de turbinas de gas, excluyendo aeronaves.
- **ISO 10816-5:** Equipos de máquinas hidráulicas de generación de potencia y plantas de bombeo de fluido.
- **ISO 10816-6:** Máquinas recíprocas de potencia nominal sobre 100 kW.
- **ISO 10816-7:** Bombas roto dinámicas de aplicación industrial.

En la norma **ISO 10816-1**, se indica que el instrumento de medición debe ser capaz de medir desplazamiento (en μm), velocidad (en mm/s) y aceleración

(en m/s^2), asimismo su montaje no debe interferir en las vibraciones, así como indica que es deseable que el equipo sea calibrable.

Se toman los valores de la vibración durante la operación del equipo y no se tiene en cuenta los valores durante la parada o el arranque.

Los puntos de medición deben ser tomados en cojinetes o rodamientos, en los soportes u otras partes estructurales que respondan significativamente a las fuerzas dinámicas que caracterizan la vibración general de la máquina. Siendo necesario la toma de medidas en cada uno de los puntos en los tres ejes ortogonales (X, Y, Z).

Si la vibración es excesiva, es recomendable tomar medidas de la vibración del medio producida externamente, por lo tanto, habría que tomar medidas con la máquina a medir apagada y realizar una comparativa de las mismas.

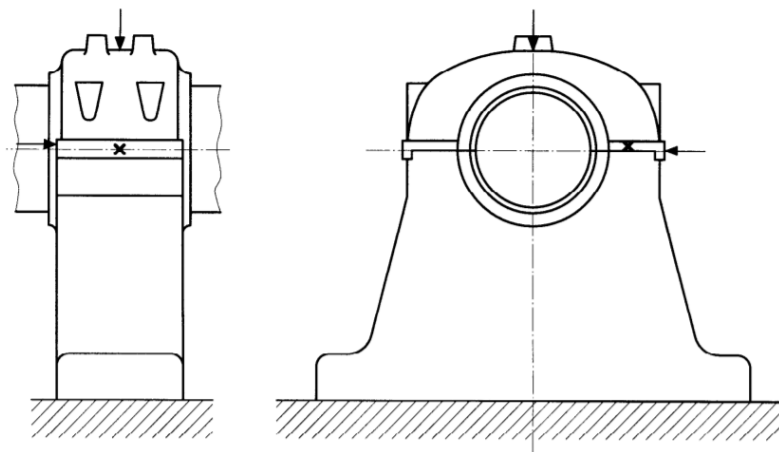


Figura 2.86-Puntos de medida en cojinetes/rodamientos de soporte-tipo Pillow block^[13]

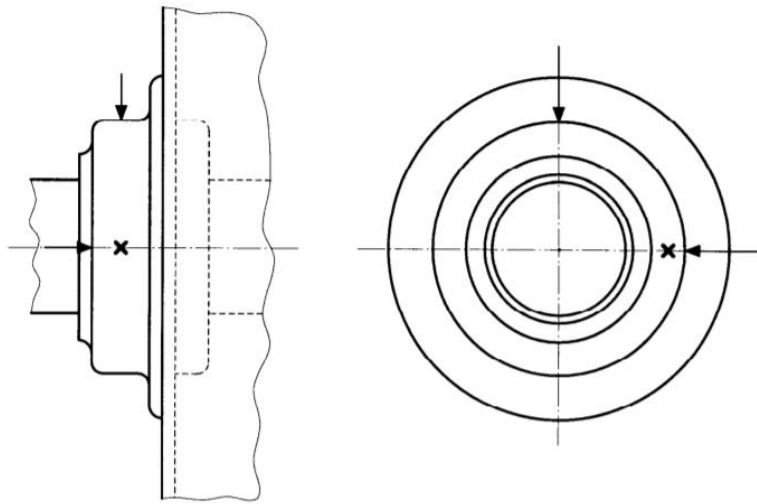


Figura 2.87-Puntos de medida en cojinetes/rodamientos de cajera^[13]

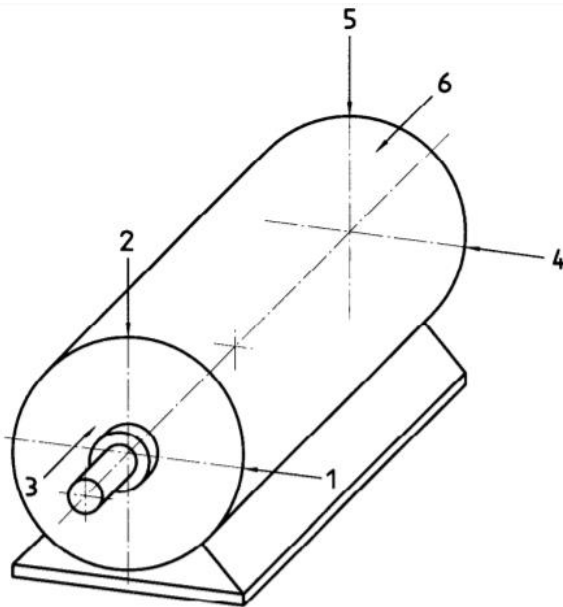


Figura 2.88-Puntos de medida en máquinas eléctricas pequeñas^[13]

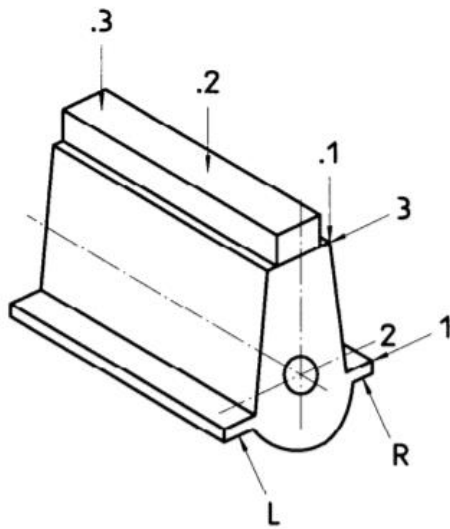


Figura 2.89-Puntos de medida para motores alternativos^[13]

En máquinas de montaje vertical o inclinadas, generalmente se emplea la dirección en la que mayor vibración se produce, habitualmente la dirección del eje elástico es una de las empleadas, así como la dirección perpendicular a este.

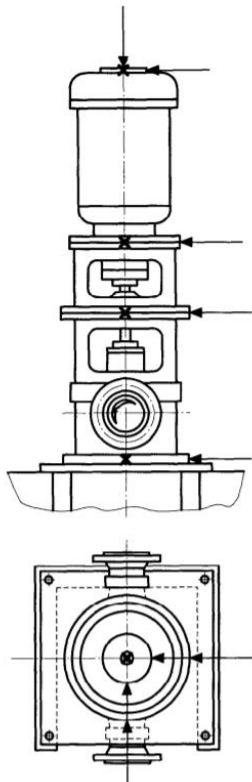


Figura 2.90-Puntos de medida en equipos de disposición vertical^[13]

En esta parte de la norma, se establecen los criterios diferentes de evaluación de la severidad de la vibración. El primero de ellos considera la magnitud de la vibración global, mientras el segundo de ellos considera las variaciones en la magnitud dependientemente de si este valor se incrementa o disminuye.

El criterio I se basa en la definición de los límites de la magnitud de la vibración consistentes con cargas dinámicas aceptables en los rodamientos y una transmisión aceptable de la vibración al soporte y cimiento de la máquina. La mayor magnitud de vibración entre todos los ejes ortogonales y en cada punto de medida se evaluará según cuatro zonas, y dependiendo en cual se encuentre, se determinarán las acciones indicadas:

- **Zona A:** Implica un nivel de vibración bueno, equivalente al de una máquina de reciente puesta en servicio.
- **Zona B:** Nivel de vibración satisfactorio, la máquina puede operar a largo plazo sin restricciones.
- **Zona C:** Nivel de vibraciones insatisfactorio, se considera que una máquina dentro de esta zona puede funcionar durante un periodo de tiempo limitado, hasta el momento apropiado para su reparación. Evitando asimismo un funcionamiento a largo plazo de la misma.
- **Zona D:** El nivel de vibraciones es inaceptable, lo que implica que una máquina vibraciones dentro de esta zona pueden causar daños a la máquina.

Puede haber excepciones en las que un equipo tiene límites más bajos o altos que los indicados en estas normas, los cuales serán detallados por el fabricante del equipo.

La clasificación de las máquinas según esta norma es la siguiente:

- **Clase I:** Partes de motores y máquinas integralmente conectados a otras máquinas. Máquinas de tamaño pequeño de hasta 15 kW de potencia.
- **Clase II:** Máquinas de tamaño medio de entre 15 kW y 300 kW de potencia, con cualquier tipo de soporte o cimiento.

- **Clase III:** Máquinas de tamaño grande (por encima de 300 kW de potencia), como motores principales grandes y otras máquinas de tamaño grande con masas giratorias y montadas en soportes rígidos y con rigidez en el sentido de la medición.
- **Clase IV:** Máquinas de tamaño grande (por encima de 300 kW de potencia), como motores principales grandes y otras máquinas de tamaño grande con masas giratorias montadas sobre soportes flexibles en el sentido de la medición.

Y en base a la clasificación anterior y al nivel de vibración, se determina la zona de vibración:

R.m.s. vibration velocity mm/s	Class I	Class II	Class III	Class IV
0,28	A	A	A	A
0,45				
0,71				
1,12	B	B	B	B
1,8				
2,8	C	C	C	C
4,5				
7,1	D	D	D	D
11,2				
18				
28				
45				

Figura 2.91-Zonas de vibración de acuerdo a la clase de máquina, y del nivel de vibración RMS medido de acuerdo a la norma ISO 10816-1^[13]

El criterio II proporciona criterios de evaluación mediante el cambio en la magnitud de la vibración a partir de un valor previamente medido y exactamente en el mismo sitio donde se toman las medidas de las vibraciones a comparar, en la misma orientación y con el equipo en las mismas condiciones de funcionamiento. Aunque un equipo aún no haya alcanzado la zona C del criterio I, puede haber una variación significativa, siendo necesario analizar el origen y realizar alguna acción.

En esta norma también se establecen los límites operacionales de la maquinaria, o lo que es lo mismo, una limitación para la vibración en

TRABAJO FIN DE GRADO
INGENIERÍA MARÍTIMA

operaciones a largo plazo de la máquina. Estos límites reciben el nombre de alarma y de parada.

Una **alarma** es una advertencia, que indica que cierto valor de vibración ha sido alcanzado o que ha sucedido un cambio significativo, por lo que puede ser necesario tomar medidas. Habitualmente el equipo puede seguir en operación mientras se efectúan las investigaciones para identificar el motivo de este cambio de vibración y realizar las reparaciones pertinentes.

Una **parada** especifica la magnitud de la vibración para la cual seguir operando puede causar daños en el equipo. Si este valor es sobrepasado se deben tomar acciones inminentemente para reducir el nivel de vibración o la máquina debe ser detenida.

En la norma **ISO 10816-3**, se evalúan las vibraciones en máquinas industriales como una potencia nominal por encima de 15 kW y velocidades de entre 120 revoluciones por minuto y 15.000 revoluciones por minuto. Esta norma es aplicable a los siguientes tipos de máquinas:

- Turbinas de vapor con una potencia de hasta 50 MW.
- Equipos de turbinas de vapor de una potencia mayor a 50 MW y velocidades por debajo de 1500 revoluciones por minuto o por encima de 3600 revoluciones por minuto y no en fluidas en la norma ISO 10816-2.
- Compresores rotativos.
- Turbinas de gas industriales con una potencia de hasta 3 MW.
- Bombas centrífugas, de flujo axial o mixto.
- Generadores excepto cuando son usados en plantas de generación hidráulica o plantas de bombeo.
- Motores eléctricos de cualquier tipo.
- Sopladores y ventiladores.

TRABAJO FIN DE GRADO
INGENIERÍA MARÍTIMA

Esta norma excluye a:

- Equipos generadores de turbina situados en tierra con una potencia superior a 50 MW y velocidades de 1500 revoluciones por minuto, 1800 revoluciones por minuto, 3000 revoluciones por minuto, o 3600 revoluciones por minuto (se incluyen en la norma ISO 10816-4).
- Turbinas de gas con una potencia superior a 3 MW.
- Máquinas hidráulicas para generación de energía y plantas de bombeo.
- Máquinas acopladas a maquinaria de movimiento alternativo (se incluyen en la norma ISO 10816-6).
- Compresores rotativos de desplazamiento positivo (por ejemplo, compresores de tornillo).
- Compresores de movimiento alternativo.
- Bombas de movimiento alternativo.
- Motobombas sumergibles.
- Turbinas de viento.

Según esta parte de la norma, se aplicable para medidas in situ tomadas en rodamientos, soportes de rodamientos o cojinetes o en las carcasas de las máquinas funcionando en condiciones de operación normales a la velocidad nominal y dentro del rango de operación, así como hayan alcanzado ya las temperaturas, presiones u otros parámetros óptimos de funcionamiento.

Los criterios son aplicables para la vibración producida por la máquina y no por la vibración que se transmite hacia la máquina desde otros orígenes.

El equipo de medición debe ser capaz de medir la vibración RMS con una respuesta plana y en un rango de frecuencias de entre 10 y 1000 Hz. Sin embargo, en máquinas velocidades próximas o por debajo de 600 revoluciones por minuto, este límite de inferior 10 Hz no debe ser superior a 2 Hz.

TRABAJO FIN DE GRADO
INGENIERÍA MARÍTIMA

Los puntos de medición según esta parte de la norma, serán en partes expuestas y accesibles y en los cuales hay que asegurar que la medida represente la vibración del cojinete y no incluyan tipo de resonancia o amplificación. Habitualmente se toman dos puntos ortogonales y radiales en cada soporte de rodamiento con las zonas descritas anteriormente. Las direcciones verticales y horizontales son preferidas para máquinas de montaje horizontal. Tomando como esquema general para los puntos de medida, el mismo que en la parte 1 de esta norma y representado por las figuras: Figura 2.86, Figura 2.87 y Figura 2.88. Quedando la Figura 2.89 excluida, dado que esta parte de la norma, no incluye equipos de funcionamiento alternativo.

Para la aplicación de esta parte de la norma (10816-3), la severidad de la vibración será cuantificada en una máquina teniendo en cuenta los siguientes parámetros:

- Tipo de máquina.
- Potencia nominal o altura del centro del eje la base.
- Flexibilidad de los soportes de la máquina.

De acuerdo con los dos primeros parámetros (tipo de máquina, potencia nominal o altura del eje la base), se establece la clasificación de las máquinas en cuatro grupos:

- **Grupo 1:** Máquinas de tamaño grande con potencia nominal por encima de 300 kW y máquinas eléctricas con una altura del eje mayor igual a 315 mm. Tienen un rango de operación de velocidades nominales amplio de entre 120 revoluciones por minuto de 15000 revoluciones por minuto.
- **Grupo 2:** Máquinas de tamaño medio con una potencia nominal por encima de 15 kW hasta 300 kW (incluidos) y máquinas eléctricas con una altura del eje de entre 160 mm y 315mm. Habitualmente estas

máquinas tienen una velocidad operación por encima de 600 revoluciones por minuto.

- **Grupo 3:** Bombas de rodete multi paleta movidas por un conductor separado a ellas (de flujo centrífugo, axial o mixto) y potencia nominal por encima de 15 kW.
- **Grupo 4:** Bombas de rodete multi paleta movidas por un conductor integrado en la misma (de flujo centrífugo, axial o mixto) y potencia nominal por encima de 15 kW.

De acuerdo con los soportes de la máquina y su flexibilidad, la norma ISO 10816-3, clasifica los soportes como soportes rígidos y soportes flexibles, y dependiendo de los mismos el nivel vibratorio de la máquina puede variar considerablemente.

Un soporte se considera **rígido** en una dirección si la menor de las frecuencias de la combinación máquina-soporte en la dirección de medida es mayor que su frecuencia principal de excitación (habitualmente la frecuencia de rotación) por al menos un 25%. En caso contrario el soporte será considerado **flexible**.

En algunos casos, un soporte puede ser rígido en un sentido de medida y flexible en otro.

Según el primer criterio de las vibraciones en el que se establecen unos límites y con cuatro zonas (según la severidad de la vibración-A, B, C y D), como se ha detallado anteriormente e indica las guías generales de esta norma (ISO 10816-1) y para la evaluación de la severidad de la vibración de acuerdo a la norma ISO 10816-3, se establece según el tipo de máquina y de soporte las siguientes clasificaciones:

Support class	Zone boundary	R.m.s. displacement μm	R.m.s. velocity mm/s
Rigid	A/B	29	2,3
	B/C	57	4,5
	C/D	90	7,1
Flexible	A/B	45	3,5
	B/C	90	7,1
	C/D	140	11,0

Figura 2.92-Clasificación de las zonas de vibración para las máquinas del Grupo 1^[13]

Support class	Zone boundary	R.m.s. displacement μm	R.m.s. velocity mm/s
Rigid	A/B	22	1,4
	B/C	45	2,8
	C/D	71	4,5
Flexible	A/B	37	2,3
	B/C	71	4,5
	C/D	113	7,1

Figura 2.93-Clasificación de las zonas de vibración para las máquinas del Grupo 2^[13]

Support class	Zone boundary	R.m.s. displacement μm	R.m.s. velocity mm/s
Rigid	A/B	18	2,3
	B/C	36	4,5
	C/D	56	7,1
Flexible	A/B	28	3,5
	B/C	56	7,1
	C/D	90	11,0

Figura 2.94-Clasificación de las zonas de vibración para las máquinas del Grupo 3^[13]

Support class	Zone boundary	R.m.s. displacement μm	R.m.s. velocity mm/s
Rigid	A/B	11	1,4
	B/C	22	2,8
	C/D	36	4,5
Flexible	A/B	18	2,3
	B/C	36	4,5
	C/D	56	7,1

Figura 2.95-Clasificación de las zonas de vibración para las máquinas del Grupo 4^[13]

Como se puede apreciar las tablas dan los valores tanto de velocidad y desplazamiento RMS, aunque con uno de ellos, preferiblemente la velocidad es posible caracterizar la vibración existente.

En la parte 6 de esta norma ISO (**ISO 10816-6**), se especifican las condiciones y formas de evaluar la severidad de la vibración tomando medidas en partes no rotativas ni recíprocas de las máquinas. Es aplicable

para las máquinas de movimiento recíproco pistones de potencia superior a 100 kW. Ejemplos típicos de aplicación de esta norma son, por ejemplo: motores principales buques, motores auxiliares marinos, motores diésel de generadores, bombas de movimiento recíproco o motores diésel de locomotoras.

Esta parte de la norma no es aplicable a máquinas instaladas en vehículos, ni tampoco en compresores de movimiento recíproco.

Los puntos de toma de medida, deben ser 3, dependiendo del tipo de máquina como los que se ilustran a continuación:

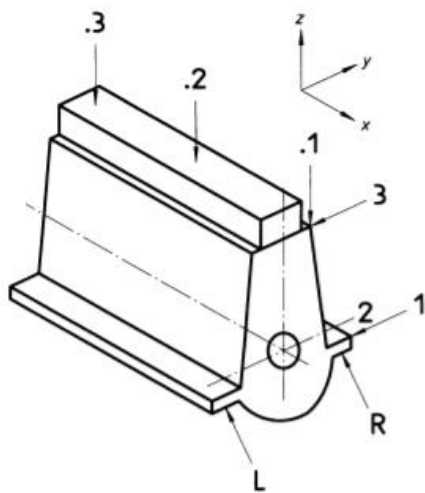


Figura 2.96-Disposición de los puntos y niveles de medida en un motor de cilindros en línea de disposición vertical. Ver leyenda en la Tabla 2.1^[13]

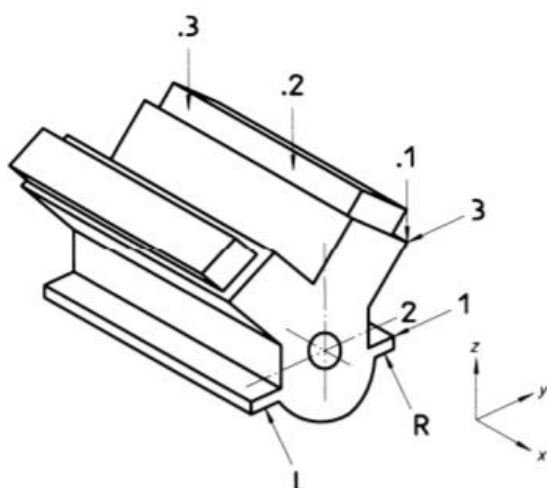


Figura 2.97--Disposición de los puntos y niveles de medida en un motor de cilindros dispuestos en V. Ver leyenda en la Tabla 2.1^[13]

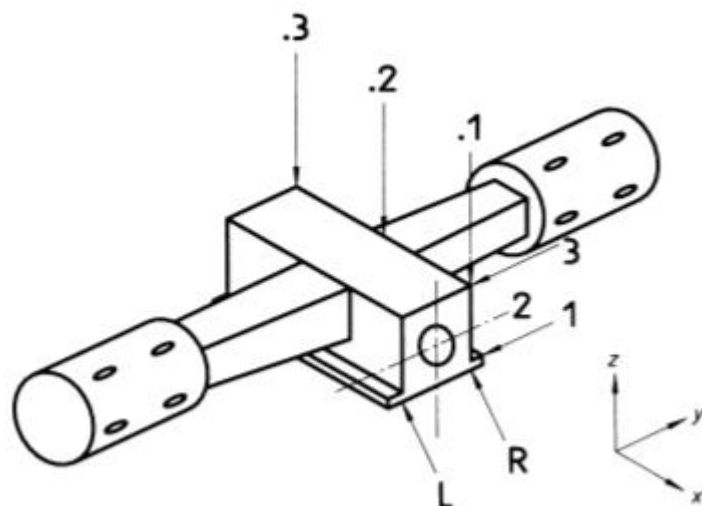


Figura 2.98--Disposición de los puntos y niveles de medida en un motor de cilindros opuestos de disposición horizontal. Ver leyenda en la Tabla 2.1^[13]

Lado de medida	L	Lado izquierdo mirando hacia el lado del acoplamiento
	R	Lado derecho mirando hacia el lado del acoplamiento
Niveles de medida (altura)	1	Extremo final del soporte
	2	Nivel del cigüeñal
	3	Parte superior
Punto de medida (longitudinal)	0.1	Extremo del acoplamiento
	0.2	Mitad de la máquina
	0.3	Extremo libre de la máquina

Tabla 2.1- Descripción de los puntos de medida^[13]

Los puntos de medida deben de ser accesibles, y asegurarse de que sensor quede bien fijado a la máquina. Si es posible, es importante tomar medidas en zonas próximas a apoyos del eje.

Para analizar la severidad de la vibración, se necesita tomar valores de entre 2 y 1000 Hz de desplazamiento, velocidad y aceleración RMS en la estructura principal de la máquina y de todos los valores obtenidos en los 3 puntos de medida, se tomará el más alto de ellos, y con ello y dependiendo de la amplitud de la vibración se la clasificará dentro de un grado de severidad de vibración u otro.

Dependiendo de la clase de máquina recíproca que sea, dependiendo de la aplicación, tamaño, configuración, tipo de soporte y velocidad de funcionamiento (se clasifican del número 1 al 7- habitualmente los motores diésel industriales y marinos se clasifican entre los números 5 y 7) y conociendo el grado de severidad de vibración explicado anteriormente, se podrá conocer la zona de evaluación en la que se encuentra el equipo.

Vibration severity grade	Maximum values of overall vibration measured on the machine structure			Machine vibration classification number						
	Displacement μm (r.m.s.)	Velocity mm/s (r.m.s.)	Acceleration m/s ² (r.m.s.)	1	2	3	4	5	6	7
				Evaluation zones						
1,1	17,8	1,12	1,76	A/B	A/B	A/B	A/B	A/B	A/B	A/B
1,8	28,3	1,78	2,79							
2,8	44,8	2,82	4,42							
4,5	71,0	4,46	7,01							
7,1	113	7,07	11,1	C	D	D	D	D	D	D
11	178	11,2	17,6							
18	283	17,8	27,9							
28	448	28,2	44,2							
45	710	44,6	70,1							
71	1125	70,7	111							
112	1784	112	176							
180										

Figura 2.99-Clasificación de las zonas de vibración para las máquinas de movimiento alternativo, de acuerdo a la norma ISO 10816-6^[13]

2.5.4.1. NORMA ISO 2372

La norma ISO 2372:1974 es la predecesora de la norma ISO 10816-1 y engloba las medidas de las vibraciones mecánicas en máquinas con velocidades de entre 600 y 12.000 revoluciones por minuto.

Aun siendo la predecesora de la norma 10816, se sigue empleando dado que permite evaluar máquinas que la norma actual no contempla, así como aún se fabrican máquinas que emplean criterios de esta norma.

Se toman los valores de la velocidad de la vibración RMS filtrados entre 10 y 1000 Hz.

La determinación de las zonas de nivel de vibración, así como la clasificación de las máquinas, vienen determinadas del mismo modo que en la norma ISO 10816-1, así como se emplea la tabla clasificatoria mostrada en la Figura 2.91 de la citada norma.

Asimismo, distingue además de las Clase I a IV, las clases V y VI, aunque simplemente las nombra, así como indica que no son analizables según los criterios expuestos en la norma.

2.6. VIBRACIONES EN BUQUES

Tal como se ha descrito en el apartado 2.5, las vibraciones influyen tanto intrínsecamente en el funcionamiento de los equipos y maquinas, como en las condiciones de confort del entorno, y en un caso como el de buques, influyen también en la habitabilidad del mismo.

En el caso de buques, hay una gran variedad de fuentes vibratorias, en su mayoría encontradas en la sala de máquinas (motor o motores principales, motores auxiliares, reductoras, hélices, así como gran variedad de diferentes equipos que se encuentran a bordo).

El Lloyd's, ha creado una guía en la que se describe el modo de analizar la vibración y el sonido a bordo de buques y en la cual, se describe la normativa a aplicar.

2.6.1. NORMATIVA

La normativa aplicable a bordo de buques incluye tanto a las normas descritas en el apartado anterior (norma ISO 10816 e ISO 2332, únicamente aplicables al estado de la maquinaria), así otras normas de especial aplicación en buques como es el caso de la norma ISO 6954 y la norma ISO 4867, descritas con mayor detalle a continuación, y las cuales están orientadas hacia las situaciones de habitabilidad del mismo o estado de vibración del buque en general.

2.6.1.1. NORMA ISO 6954

La norma ISO 6954 (vibraciones mecánicas-directrices para la medida, reporte y evaluación de las vibraciones de acuerdo a las condiciones de habitabilidad en buques de pasaje y mercantes).

Esta norma, indica las directrices a seguir para la medición de estas vibraciones tal como la situación de los transductores, condiciones de medida, procedimiento de medida, evaluación de los resultados, así como la forma de redactar el reporte. Todo ello, como el propio título de esta norma indica el referido a las condiciones de habitabilidad en buques de pasaje y mercantes.

Según esta norma, los transductores deben situarse en tantos lugares como sea necesario para caracterizar la vibración a bordo con respecto a la habitabilidad. Éstos transductores deben de estar orientados de modo que midan la vibración respecto a los tres ejes del buque: longitudinal, transversal y vertical con un mínimo de dos medidas en cada cubierta, siendo únicamente necesaria la medida en el eje vertical en otros puntos del buque.

Las condiciones de navegación para esta prueba describen que el buque debe estar navegando de modo lineal, con un funcionamiento del motor constante, con un estado del mar de fuerza Beaufort 3 o menos, con las hélices totalmente bajo el agua y con una profundidad no menor a cinco veces el calado del buque.

El rango de frecuencias evaluado entre 1 y 80 Hz.

La evaluación de la habitabilidad del buque se realiza con respecto a tres zonas diferenciadas del buque:

- **Área A:** Zonas de camarotes de pasaje.
- **Área B:** Zonas de camarotes de tripulación.
- **Área C:** Zonas de trabajo.

Con respecto a estas tres zonas diferentes del buque, esta norma indica los valores de aceleración y velocidad RMS para la aceptabilidad de las condiciones de habitabilidad o no respecto a esta norma, y medido entre 1 y 80Hz. En la tabla siguiente, se indican los valores a modo de guía que esta norma establece, siendo los valores que se encuentran entre el rango mayor y menor de cada área de clasificación, los valores habitualmente experimentados y aceptados, y por encima del límite superior, no se aceptarían:

	Area classification					
	A		B		C	
	mm/s ²	mm/s	mm/s ²	mm/s	mm/s ²	mm/s
Values above which adverse comments are probable	143	4	214	6	286	8
Values below which adverse comments are not probable	71,5	2	107	3	143	4
NOTE The zone between upper and lower values reflects the shipboard vibration environment commonly experienced and accepted.						

Figura 2.100-Valores de nivel de vibración RMS para aceptabilidad según las diferentes áreas del buque, de acuerdo a la norma ISO 6954^[14]

Los datos obtenidos mediante estas pruebas, deben ser reportados en un reporte que contenga al menos la siguiente información:

- Referencia a esta norma ISO 6954.
- Lugar y fecha de la prueba, así como identificación de las personas y organizaciones que realizan la prueba.
- Características principales de diseño del buque.
- Condiciones actuales del buque, y estado del medio durante la prueba.

TRABAJO FIN DE GRADO
INGENIERÍA MARÍTIMA

- Localización y orientación de los transductores.
- Equipo de medida y método de calibración.
- Resultado de la prueba.

2.6.1.2. NORMA ISO 4867

En la norma ISO 4867 (código para la medida y reporte de la vibración a bordo de buques), el término severidad de la vibración se emplea para describir las condiciones de vibración del buque, empleando la velocidad pico de la vibración como unidad de medida. También es aplicable a barcos que naveguen en aguas interiores, así como remolcadores.

Esta norma establece los procedimientos para la medida del reporte de las vibraciones en cascos de los buques mercantes de uno o más ejes propulsores y vibraciones del sistema del eje propulsor que afecte a la vibración del casco.

Éste estándar está relacionado con:

- Vibraciones del casco y superestructura excitadas por el sistema propulsor a la frecuencia de rotación del eje, a la velocidad de paso de la hélice y sus armónicos y a las frecuencias asociadas con los componentes de la maquinaria del buque.
- Excitación del eje propulsor y maquinaria principal.

Se deben de realizar las pruebas con unas condiciones concretas:

- Debe haber una profundidad de agua no menor a cinco veces el calado del buque.
- El mar debe estar con un estado Beaufort 3 o menos.
- El buque debe estar en condiciones de lastre, asegurando que la hélice esté totalmente hundida.
- El ángulo del timón estará restringido a un movimiento máximo de 2° a babor o estribor.

Las medidas deben de realizarse en los siguientes puntos:

- **Popa del buque:** se deben de tomar medidas longitudinales (proa-popa), transversales (de babor a estribor) y verticales, lo más próxima posible a la popa y a la línea de crujía.
- **Superestructura:** se deben de tomar medidas longitudinales, transversales y verticales en la zona de crujía del puente, en la zona crujía de la cubierta principal.
- **Maquinaria y carcassas de cojinetes de empuje:**
 - **Para equipos con reductora,** deben tomarse medidas verticales longitudinales y transversales en la parte superior de la carcasa del cojinete. Asimismo, pueden tomarse de modo opcional otras medidas longitudinales como se muestra en la siguiente imagen:

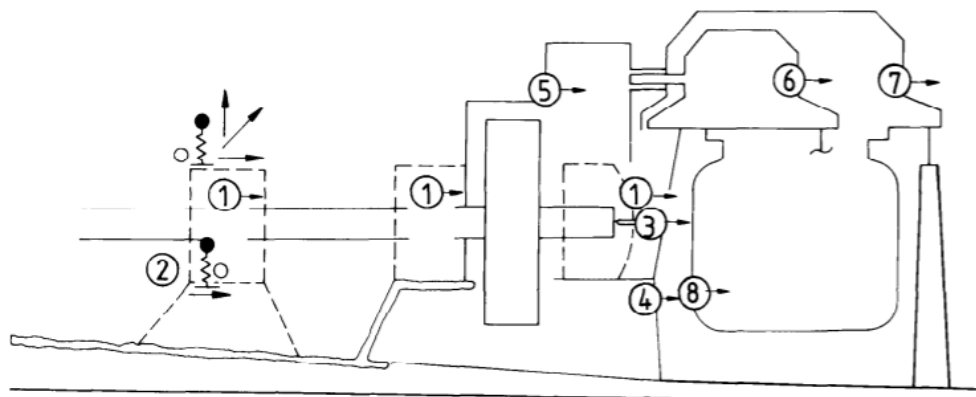


Figura 2.101-Localización de los puntos de medida para sistema propulsor a turbina^[12] En donde: 1-Carcasa del cojinete de empuje, 2-Soporte del cojinete de empuje, 3-Extremo final del eje de la reductora, 4-Soporte de la carcasa de la reductora, 5-Parte superior de la carcasa de la reductora. 6-Turbina de Alta presión. 7-Turbina de baja presión, 8-Condensador. Leyenda en la Figura 2.104

- **Para equipos sin reductora** (equipos diésel de acople directo), las medidas deben de efectuarse en la parte superior y en los soportes del cojinete de empuje, en el extremo superior delantero del motor principal, en la parte extrema delantera superior y extremos de popa del motor principal en dirección vertical y transversal (babor-estribor). Hay otras

medidas que se pueden realizar de modo opcional y se representa junto a las anteriores en la siguiente imagen:

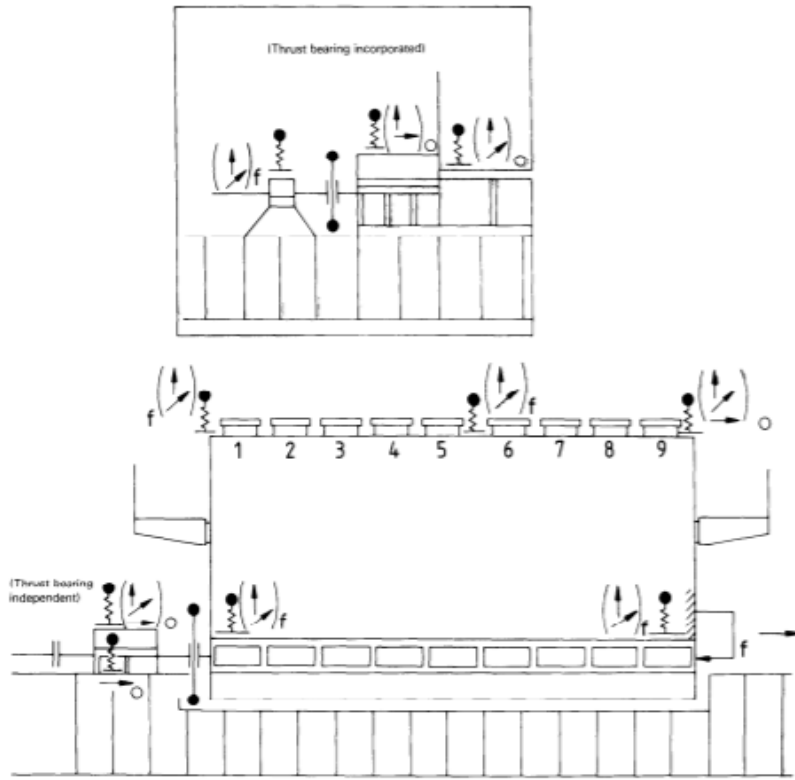


Figura 2.102--Localización de los puntos de medida para sistema propulsor de motor diésel^[12]
 Leyenda en la Figura 2.104

- **Vibraciones laterales del eje:** Es una medida opcional se toman los valores de vibración verticales y transversales a lo largo del eje.

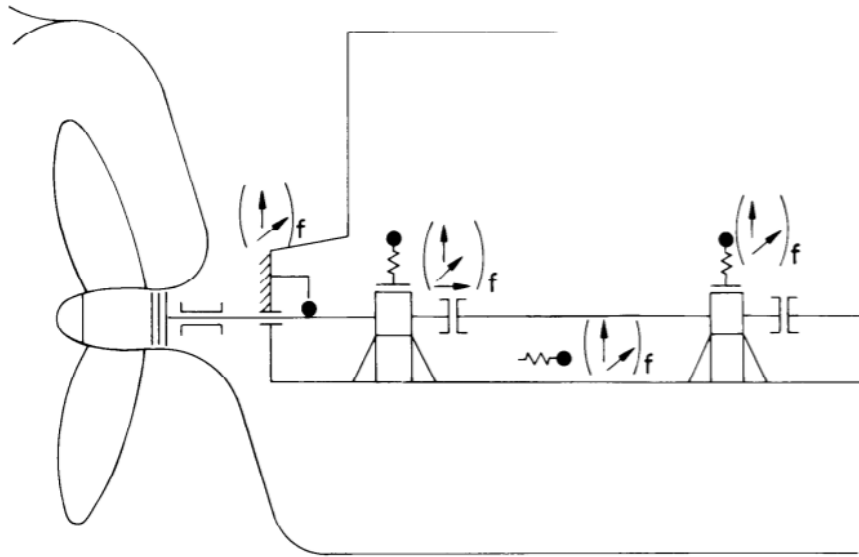


Figura 2.103-Localización de los transductores de vibración en la zona de popa del eje propulsor (opcional) ^[12]. Leyenda en la Figura 2.104

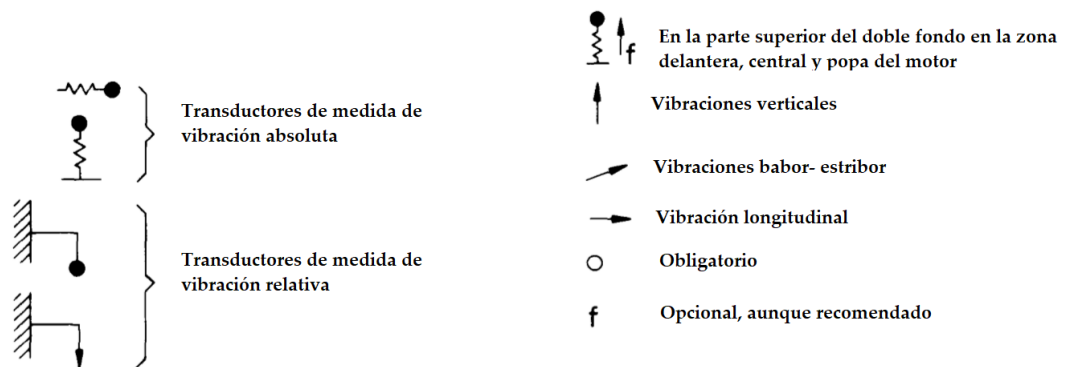


Figura 2.104-Leyenda de los puntos de medida^[12]

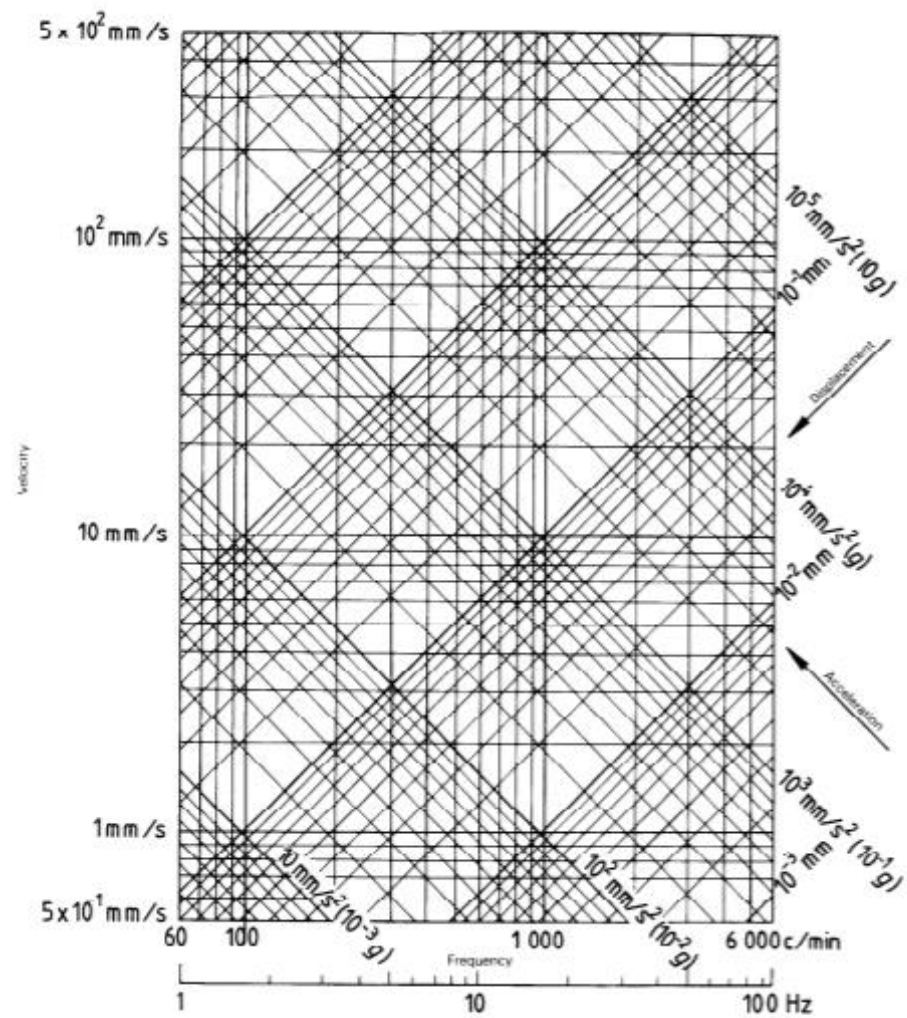
- **Vibración torsional del eje:** Se miden en el extremo libre de la maquinaria principal o bien en el eje con galgas extensiométricas.
- **Estructuras locales:** Es una medida opcional y se realiza sólo en caso de medidas de vibración en otros puntos excesivas.
- **Recorrido en toda la cubierta:** Es opcional consiste en la medición de cierto número de puntos en la cubierta a lo largo de los bordes de la misma y tomando medidas de babor a estribor y medidas verticales para determinar los modos de vibración del buque.
- **Medida de presión del casco:** Es una medida opcional que consiste en la medición de la presión del casco en su superficie debido a las

TRABAJO FIN DE GRADO
INGENIERÍA MARÍTIMA

fuerzas inducidas en la superficie del mismo producidas por el sistema propulsor.

El reporte de los datos debe incluir lo siguiente:

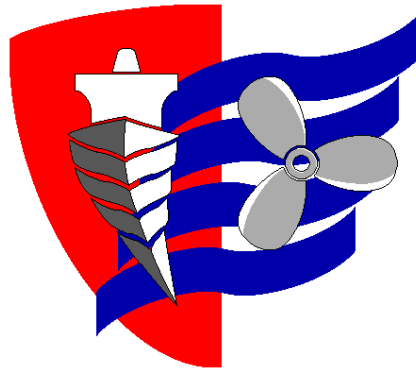
- Características principales del diseño del buque, incluyendo un croquis del perfil del casco, así como de la superestructura.
- Croquis que muestre las localizaciones de los transductores y sus direcciones de medida.
- Condiciones durante las pruebas.
- Resultados de medidas en áreas locales.
- Resultados de medidas en maniobra.
- Resultados en pruebas de caída y parada de ancla, incluyendo las frecuencias naturales del casco.
- Métodos de análisis de los resultados.
- Instrumento de medida usado.
- Debe anotarse cualquier vibración inusual detectada.
- Gráficas de amplitud de desplazamiento, velocidad o aceleración con respecto a la frecuencia rotacional del eje, de paso de pala de la hélice o cualquier frecuencia de excitación de la maquinaria, determinando el punto equivalente en la plantilla mostrada en la Figura 2.105



Details of data presented (see clause 6)

Figura 2.105-Gráfica de vibración en buques de acuerdo a ISO 4867^[12]

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



ELECCIÓN DE ELEMENTOS PARA EL
DESARROLLO

3. ELECCIÓN DE ELEMENTOS PARA EL DESARROLLO

En este apartado, se describen los elementos básicos que se han seleccionado para el desarrollo de este proyecto, tanto la parte electrónica, como el software de control para Windows, así como el encapsulado del equipo y otros componentes del equipo.

3.1. UNIDAD ELECTRÓNICA- HARDWARE

Para un mejor entendimiento del desarrollo de la unidad electrónica, se ha dividido en cinco apartados diferenciados entre sí:

- Sensor tipo acelerómetro
- Microcontrolador
- Conexión USB
- Regulación de tensión
- Conversión de niveles lógicos

En cada uno de estos apartados, se emplea uno o varios componentes electrónicos iguales principales, y los cuales son objeto en la descripción en los siguientes subapartados de este apartado.

Cada uno de estos componentes asimismo necesitan de componentes electrónicos activos o pasivos adicionales a los mismos para su correcto funcionamiento, tales como diodos, condensadores, resistencias, las cuales serán detalladas en el apartado 4.2.

El desarrollo de la PCB, así como los esquemas electrónicos están desarrollados con la herramienta EASYEDA.

Todas las hojas de datos de los componentes, se incluyen en el CD-ROM en la carpeta “Hojas de datos de componentes”, así como en el documento Excel del presupuesto adjunto, se dispone de enlaces a los mismos documentos.

3.1.1. SENSOR DE MEDIDA

Como sensor de medida, se emplea el acelerómetro ADXL345BCCZ.

Este sensor está fabricado en un encapsulado de tipo LGA de 14 pines

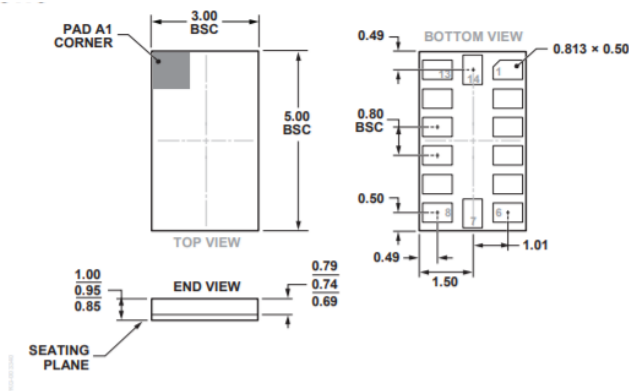


Figura 3.1-Dimensiones generales del ADXL345BCCZ: Vista superior a la izquierda, inferior a la derecha y lateral, en la parte inferior^[21]

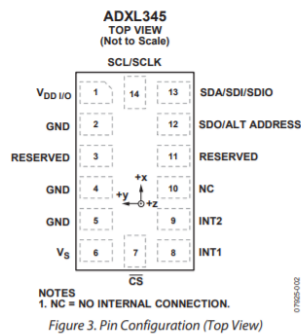


Table 5. Pin Function Descriptions

Pin No.	Mnemonic	Description
1	VDD I/O	Digital Interface Supply Voltage.
2	GND	This pin must be connected to ground.
3	RESERVED	Reserved. This pin must be connected to VS or left open.
4	GND	This pin must be connected to ground.
5	GND	This pin must be connected to ground.
6	VS	Supply Voltage.
7	CS	Chip Select.
8	INT1	Interrupt 1 Output.
9	INT2	Interrupt 2 Output.
10	NC	Not Internally Connected.
11	RESERVED	Reserved. This pin must be connected to ground or left open.
12	SDO/ALT ADDRESS	Serial Data Output (SPI 4-Wire)/Alternate I ² C Address Select (I ² C).
13	SDA/SDI/SDIO	Serial Data (I ² C)/Serial Data Input (SPI 4-Wire)/Serial Data Input and Output (SPI 3-Wire).
14	SCL/SCLK	Serial Communications Clock. SCL is the clock for I ² C, and SCLK is the clock for SPI.

Figura 3.2-Pinout del acelerómetro ADXL345BCCZ^[21]

Es de tipo MEMS y tiene las siguientes características internas:

- Consiste en una estructura formada por resortes micro mecanizados de polisilicio construido sobre una superficie de silicio.

- Éstos resortes suspendidos sobre la superficie de silicio someten a cierta fuerza a esta superficie creando en ella una deflexión y la cual es medida por condensadores diferenciales, los cuales están formados por una superficie fija y otra parte sujeta a la masa móvil. La variación de la capacidad de este condensador variable indicará una variación en la amplitud de la aceleración.
- Esta señal posteriormente será convertida a una señal digital mediante un conversor analógico-digital interno que dispone éste sensor, para ser filtrada mediante un filtro interno y, mediante su lógica digital interna, dará una señal de salida aplicando un FIFO de 32 niveles evitando con ello inexactitudes en la medida. A continuación, se muestra un diagrama de bloques de la funcionalidad de este sensor.

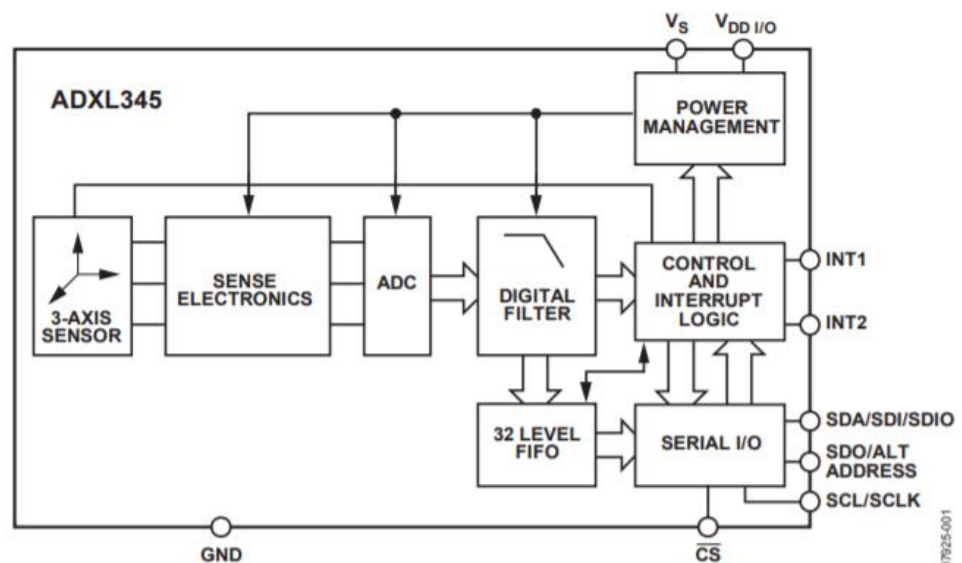


Figura 3.3-Diagrama de bloques funcional del ADXL345BCCZ^[21]

Se caracteriza principalmente por:

- Mide en los 3 ejes simultáneamente (X, Y, Z).
- Puede medir en diferentes rangos de aceleración, los cuales pueden ser seleccionados mediante programación ($\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$, $\pm 16g$).
- Posibilidad de conexión diferentes protocolos de comunicación: I2C y SPI.

- Bajo consumo de corriente: $23\mu\text{A}$ durante la medida y $0,1\mu\text{A}$ en modo stand by.
- Alta resolución en todos los ejes (teniendo un mínimo de 10 bits y hasta 13 bits de resolución a $\pm 16g$).
- Dispone de velocidades de muestreo configurables entre 0,10 y 3200 Hz.
- Tamaño pequeño (3 mm x 5 mm x 1 mm)
- Tensión de alimentación (VS) de entre 2V y 3,6V.
- Posibilidad de conexión mediante protocolo de comunicación I2C o SPI empleando una tensión mínima de alimentación de interfaz digital (VDDIO) de 1,7V y máxima la correspondiente a la de alimentación.

La disposición de los ejes de aceleración en el encapsulado, son como se describen en la Figura 3.4.

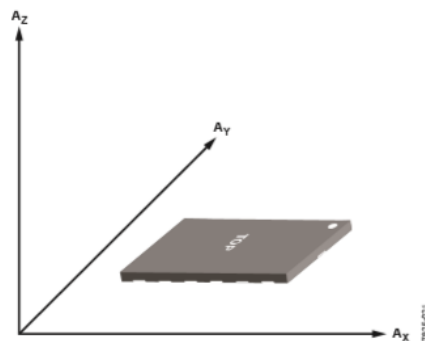


Figura 3.4-Ejes de aceleración del ADXL345BCCZ^[21]

Por lo que si se altera la posición del mismo, hay que tener en cuenta la variación de la salida que produce el acelerómetro, tal como se ilustra en la Figura 3.5.

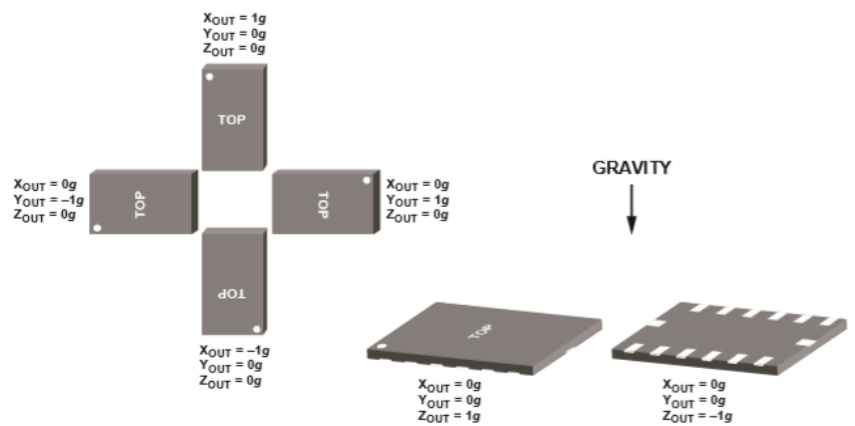


Figure 58. Output Response vs. Orientation to Gravity

Figura 3.5-Variación del valor de aceleración, según la disposición del ADXL345BCCZ^[21]

3.1.2. MICROCONTROLADOR/PROCESADOR

Para el control de la toma de datos a través del sensor, así como dar una salida de los mismos de un modo legible, se necesita un microcontrolador, asimismo con puertos de conexión I2C o SPI dados los requerimientos del sensor de medida, tal como se describe en el apartado 3.1.1, por lo que se ha escogido el empleo del microcontrolador ATMEGA 328P-AU del fabricante Microchip. Este componente viene en un encapsulado TQFP de 32 pines:

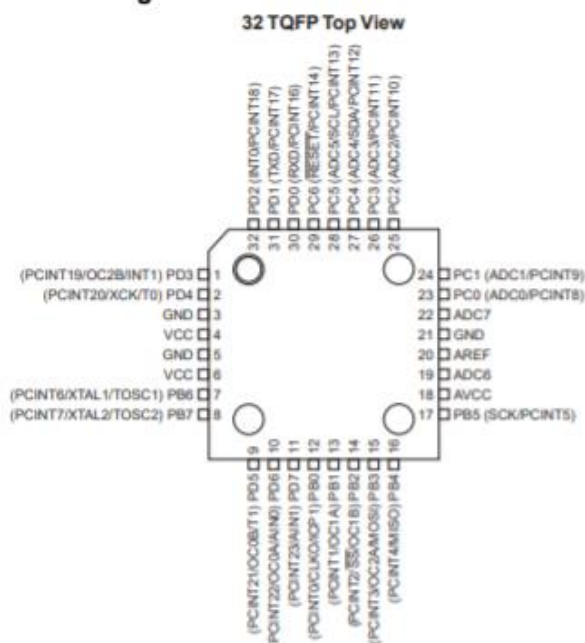


Figura 3.6-Pinout del ATMEGA 328P-AU^[21]

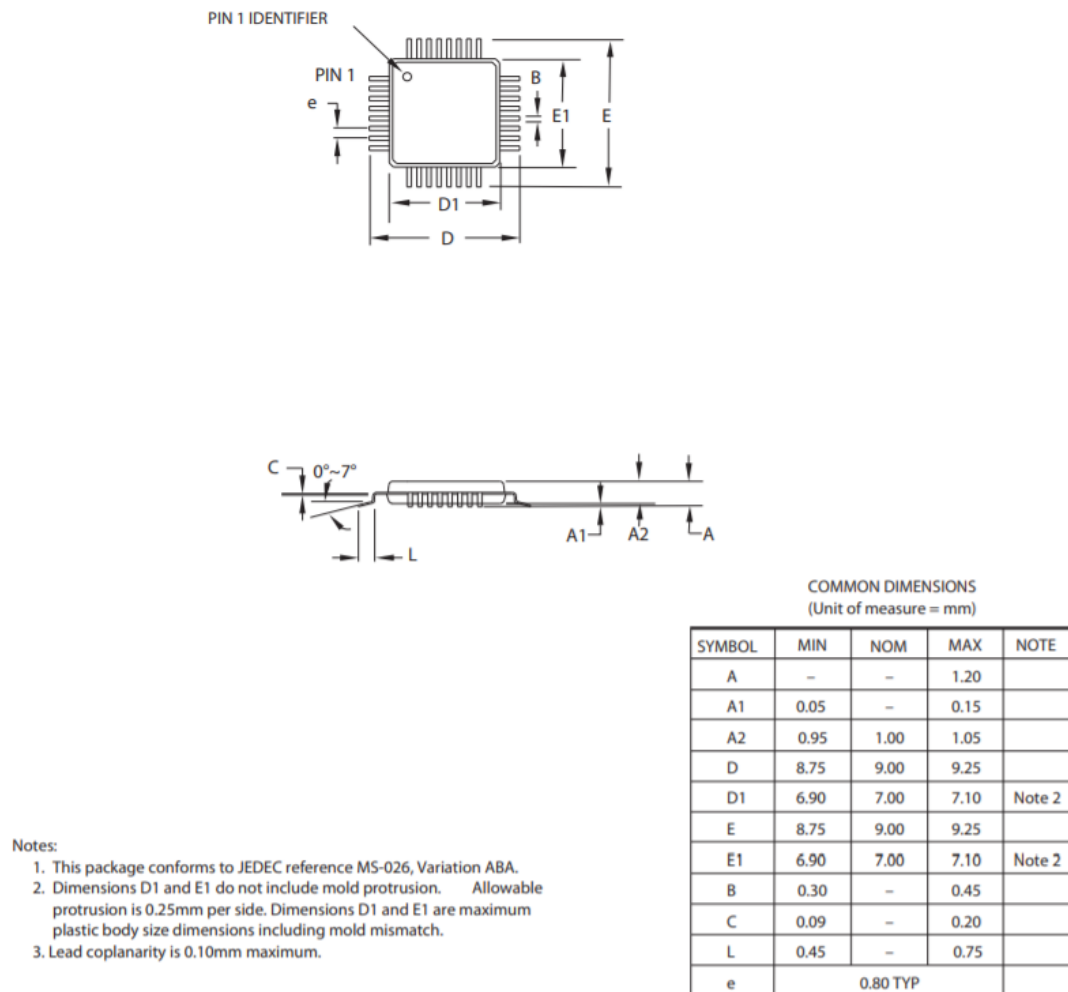


Figura 3.7- Dimensiones generales del ATMEGA 328P-AU^[21]

Es un microcontrolador de tipo CMOS de 8 bit basado en AVR con una arquitectura RISC mejorada. Ejecuta gran cantidad de instrucciones por ciclo de reloj, logrando unos rendimientos próximos a 1MIPS (Millones de instrucciones por segundo) por MHz.

Las principales características de este controlador son las siguientes:

- Alta velocidad de procesamiento de datos, pudiendo llegar hasta los 20MIPS a 20MHz.
- Memoria Flash de 32kBytes.
- Memoria EEPROM de 1kByte.

TRABAJO FIN DE GRADO
INGENIERÍA MARÍTIMA

- Dos temporizadores/contadores integrados de 8 bit con Prescaler separados.
- Un temporizador/controlador integrado de 16 bit con prescaler separado.
- Contador de tiempo con oscilador separado.
- 23 puertos de entrada-salida.
- 6 pines-puertos PWM.
- 8 pines con conversor analógico-digital de 10 bits.
- Conexión por puerto serie USART, SPI e I2C.
- Watch dog timer con oscilador separado interno.
- Comparador analógico.
- Oscilador interno.
- Tensión de funcionamiento: 1.8-5.5V. Según la frecuencia de funcionamiento del procesador, se requerirá una u otra tensión mínima de modo que:
 - 0-4MHz: 1,8-5,5V
 - 0-10Mhz: 2,7-5,5V
 - 0-20MHz: 4,5-5,5V

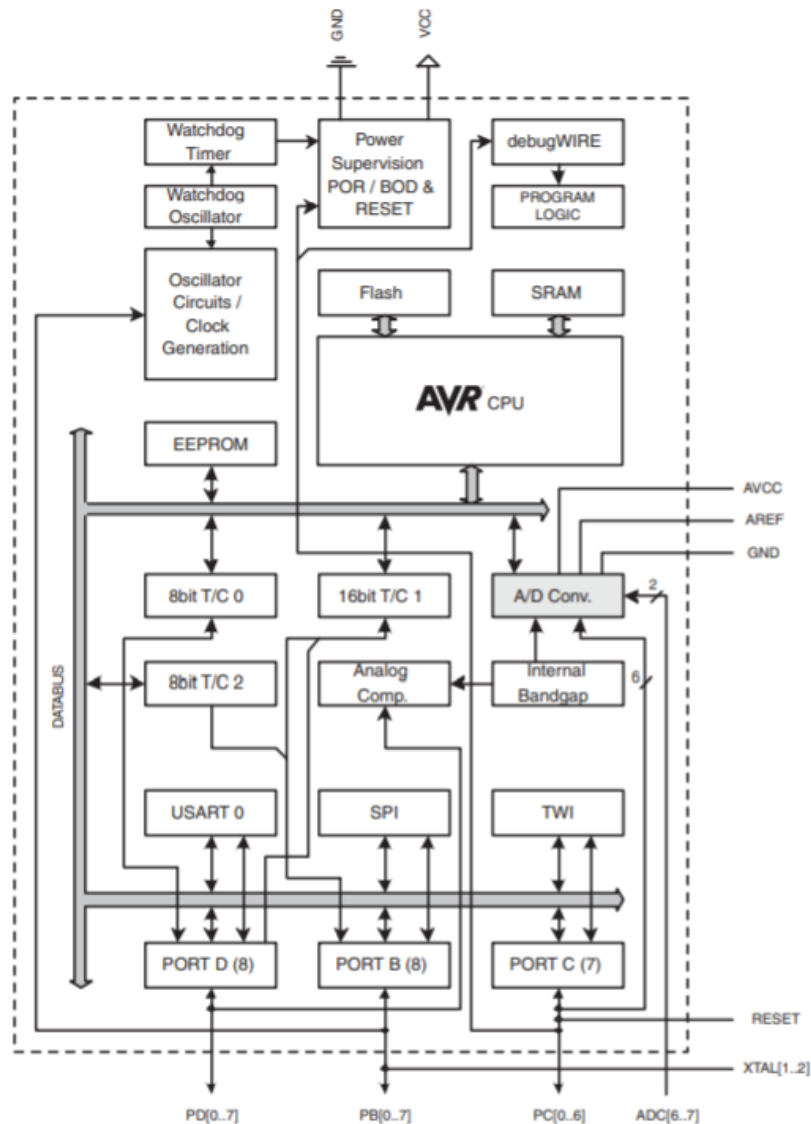
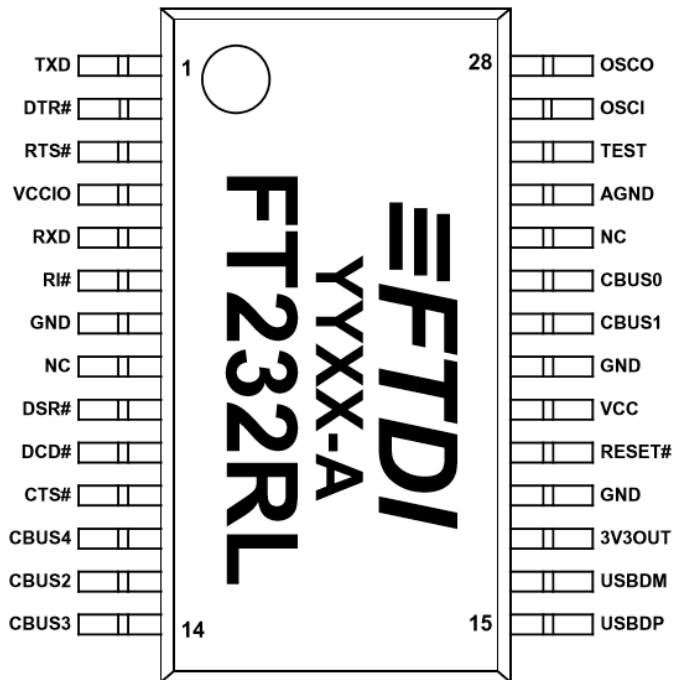


Figura 3.8-Diagrama de bloques funcional del ATMEGA 328P-AU^[21]

3.1.3. CONEXIÓN USB

Para la comunicación USB del instrumento y recibir los datos del microprocesador en el PC, se hace necesario el empleo de un circuito integrado que comunique el microcontrolador y la toma USB. El circuito elegido para este menester es el FT232RL. El cual transforma los datos de los puertos USART del microcontrolador a valores legibles por el USB.

Este circuito integrado está construido en un soporte/empaquetamiento SSOP de 28 pines, con el siguiente esquemático:

Figura 3.9-Pinout del FT-232RL^[21]

Las principales características de este circuito son:

- No necesita ningún cambio ni programación de firmware.
- Velocidad de transmisión de datos de entre 300 baudios y 3 Mega baudios
- Buffer de recepción FIFO de 256 bytes y de transmisión de 128 bytes.
- Señal de salida de reloj de 6, 12, 24 y 48MHz.
- No necesita conexión de oscilador, cristal o resonador.
- EEPROM interna de 1024 bits para guardado del número de serie o descripción del equipo, preprogramada con un número de identificación único.
- Conversor de nivel integrado de 3,3V
- Conversor de nivel lógico para comunicación UART 1,8V/2,8V/3,3V/5V.
- Tensión de operación de entre 3,3V y 5,25V.
- Compatible con USB 2.0 a velocidad máxima.

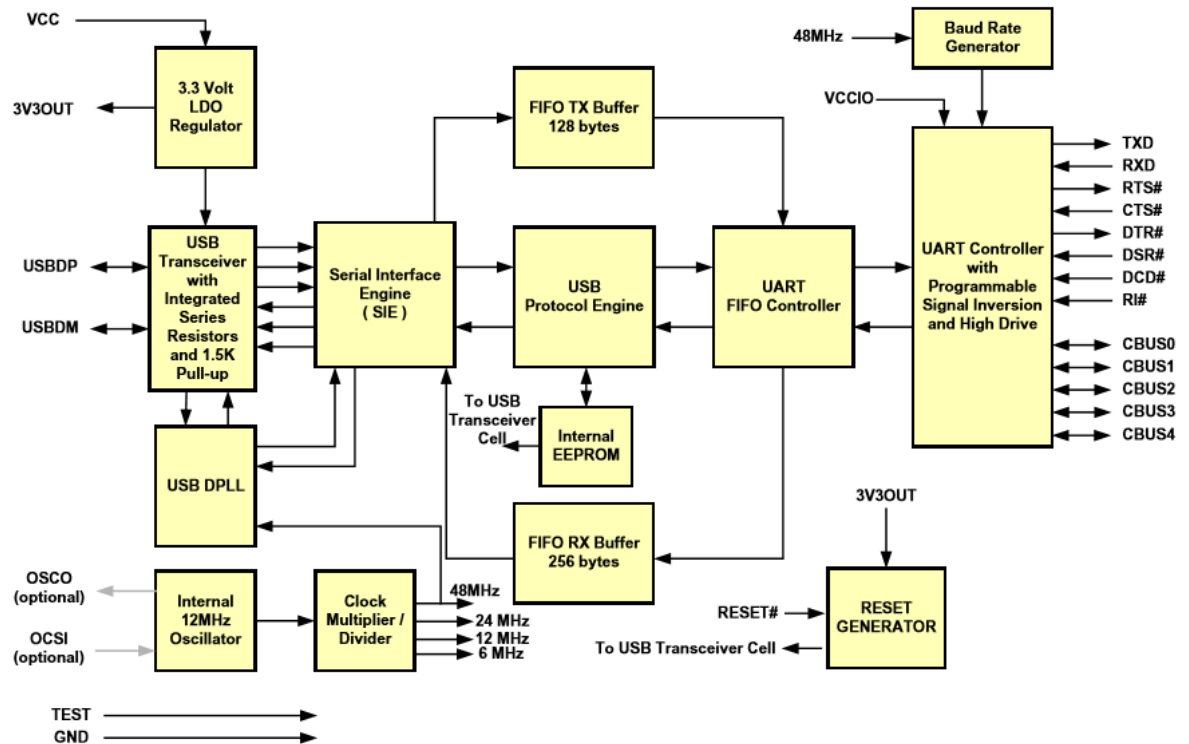


Figura 3.10-Diagrama de bloques funcional del FT-232RL^[21]

3.1.4. REGULACIÓN DE TENSIÓN

Para un funcionamiento en altas frecuencias del microcontrolador, tal como se describe en el apartado 3.1.2, la tensión de alimentación ha de ser de entre 4,5-5,5V (adquirible directamente del USB). Sin embargo, la tensión de alimentación del ADXL345 ha de ser de entre 2 y 3,6V, por lo que ésta ha de ser reducida a un nivel dentro de este rango. Se elige el empleo de 3,3V, dado que se encuentra en el rango y aunque el FT232RL explicado en el anterior apartado, dispone de una salida de 3,3V, se emplea para ello un regulador del tipo “de baja caída” o LDO. En concreto se elige el modelo LD1117S33TR en su encapsulado SOT-223.

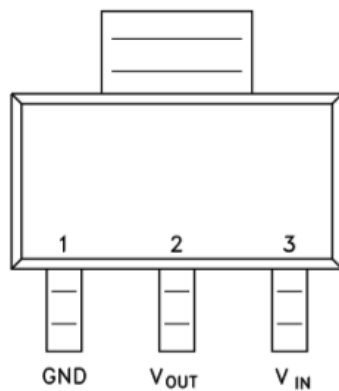
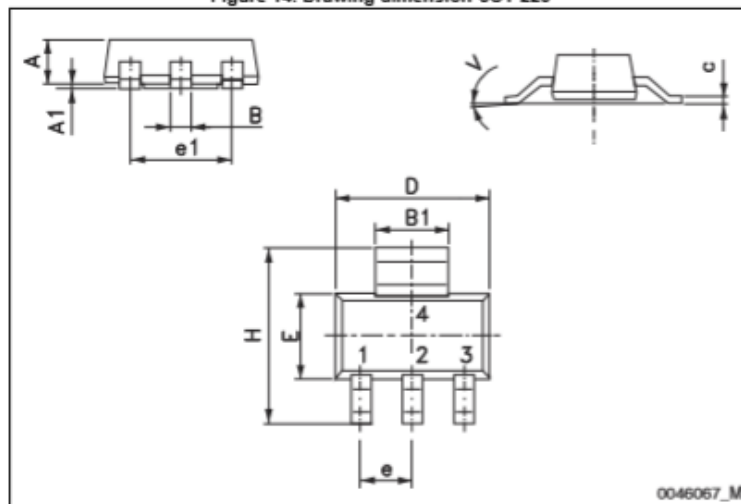
Figura 3.11-Pinout del LD1117S33TR en su encapsulado SOT-223^[21]

Table 17. SOT-223 mechanical data

Dim.	mm		
	Min.	Typ.	Max.
A			1.80
A1	0.02		0.1
B	0.60	0.70	0.85
B1	2.90	3.00	3.15
c	0.24	0.26	0.35
D	6.30	6.50	6.70
e		2.30	
e1		4.60	
E	3.30	3.50	3.70
H	6.70	7.00	7.30
V			10°

Figure 14. Drawing dimension SOT-223

Figura 3.12-Dimensiones generales del LD1117S33TR en su encapsulado SOT-223^[21]

Las principales características de este componente son las siguientes:

- Tensión de salida estable en 3,3V con un ruido de 100μV
- Corriente de salida máxima de 950mA.

- Protección de sobre corriente y sobre temperatura interna.

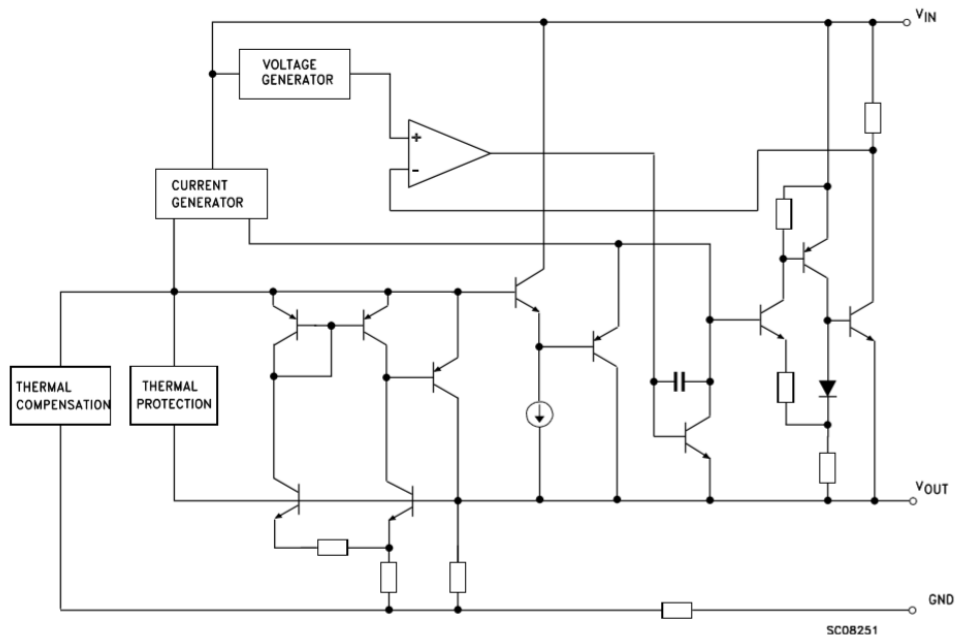


Figura 3.13-Diagrama de bloques funcional del LD1117S33TR ^[21]

3.1.5. CONVERSIÓN DE NIVELES LÓGICOS

Tal como se ha descrito en el apartado anterior, el sensor ADXL345 estará trabajando a una tensión de 3,3V, necesitando con ello unos niveles lógicos en la transmisión de datos SPI de 3,3V. Mientras tanto, el microcontrolador, trabaja con niveles lógicos de 5V. Por esta razón, se hace necesaria una conversión bidireccional de niveles lógicos entre estos dos niveles de tensión.

Se emplean para ello transistores de efecto de campo metal-óxido-semiconductor o transistor MOSFET. Escogiendo el modelo BSS138 en el encapsulado SOT23.

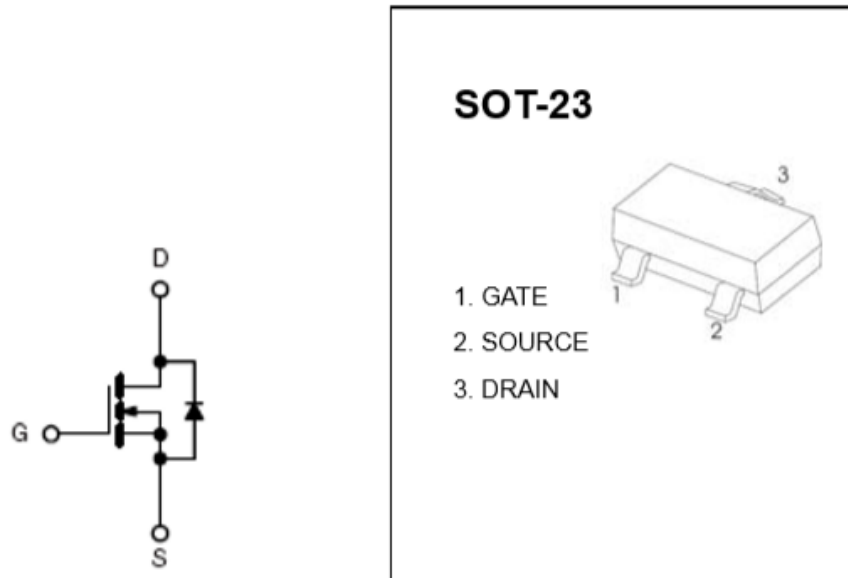


Figura 3.14-Pinout y esquema electrónico del BSS138 en el encapsulado SOT-23^[21]

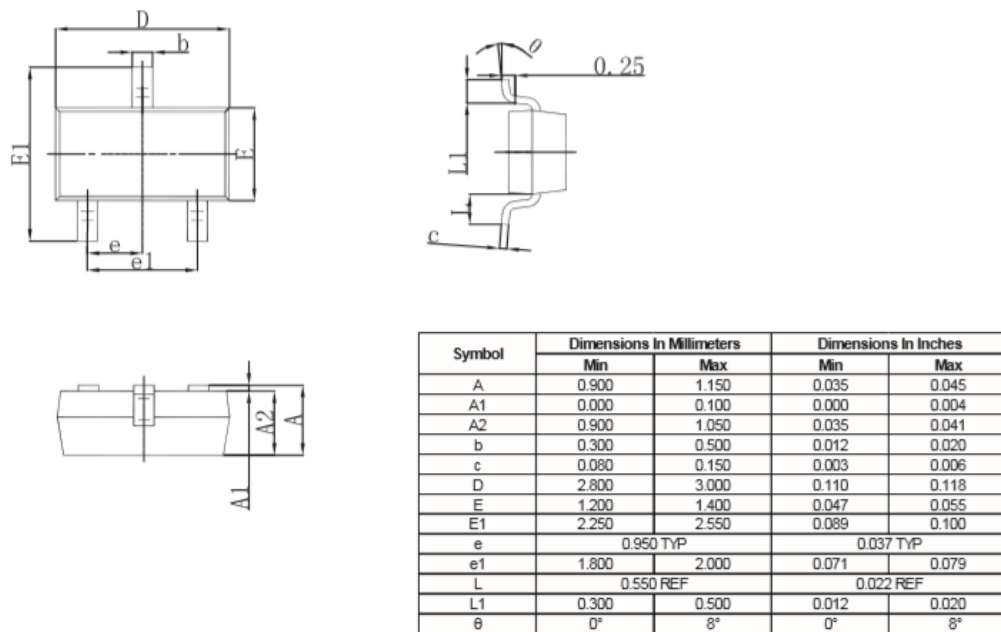


Figura 3.15--Dimensiones generales del BSS138 en el encapsulado SOT-23^[21]

Sus principales características son:

- Tensión máxima drenaje-fuente: 50V
- Tensión máxima compuerta-fuente: $\pm 20V$
- Corriente de drenaje máxima: 220mA(Continuada)/880mA(pulsante).

3.2. SOFTWARE

Para el desarrollo del software de control de la unidad electrónica, se ha empleado LabVIEW de National Instruments.

Éste es un software para programación y desarrollo de aplicaciones de adquisición de datos, procesamiento y depuración de señales, análisis de datos y presentación de resultados mediante un lenguaje de programación gráfico (con bloques o iconos que representan funciones). Y destinado a realizar aplicaciones con un destino industrial o científico.

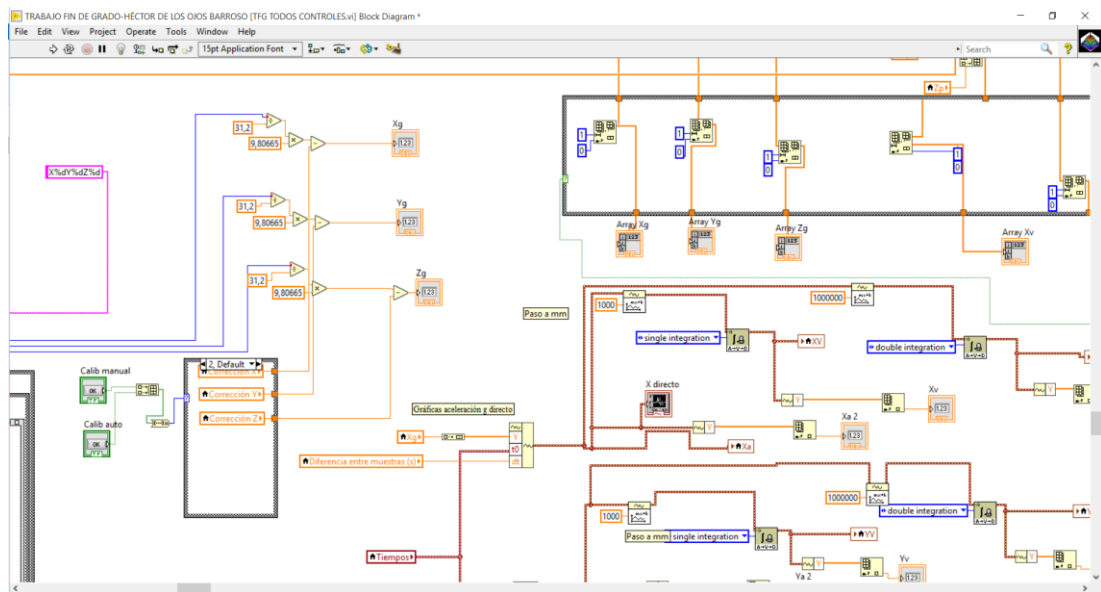


Figura 3.16-Interfaz de programación de LabVIEW - *Fuente propia*

LabVIEW también se caracteriza por incluir gran variedad de bibliotecas de control y análisis facilitando con esto el desarrollo de las aplicaciones. Asimismo, facilita la conexión a diferentes dispositivos y equipos, ya que soporta una amplia gama de protocolos de comunicación.

3.3. ENCAPSULADO

El equipo dispone de un encapsulado para proteger el circuito electrónico, facilitando asimismo una sujeción del sistema al equipo a analizar y será fabricado mediante impresión 3D usando filamento PC-ABS de Polymaker, debido a sus características mecánicas y resistencia a altas temperaturas. El diseño se ha realizado mediante SolidWorks y postprocesado con Slic3r.

3.4. OTROS

3.4.1. TORNILLERÍA DE SUJECIÓN PCB-CAJA

Se emplean 7 tornillos de sujeción NBK SNZS-M1.4-5 para la sujeción del circuito impreso al encapsulado.

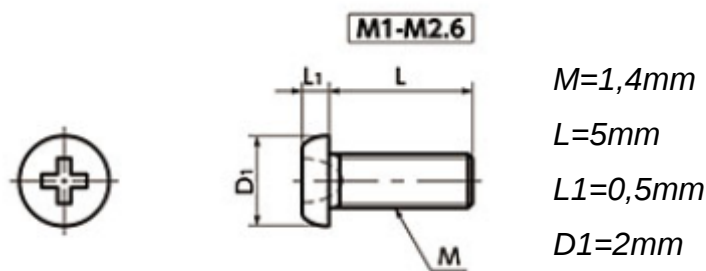


Figura 3.17-Dimensiones generales de los tornillos NBK SNZS-M1.4-5^[21]

3.4.2. CABLE MICRO-USB

Para la conexión del equipo, se emplea un cable conversor Micro-USB tipo B a USB tipo A, del fabricante RS PRO.

Este cable dispone de una longitud de 5 metros, conectores de níquel y un diámetro de 4mm. Así como dispone de apantallamiento para evitar posibles interferencias electromagnéticas.

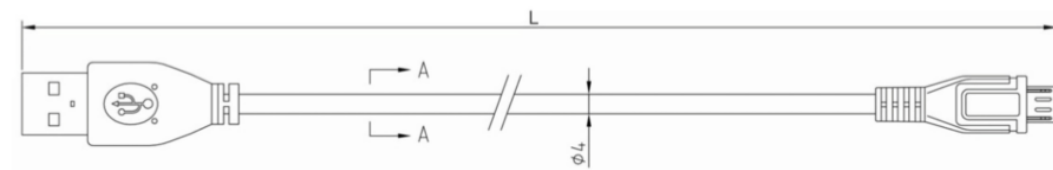


Figura 3.18-Cable Micro USB^[21]

3.4.3. NÚCLEOS DE FERRITA

Para optimizar la transmisión de datos, evitando posibles interferencias electromagnéticas, además del apantallamiento citado en el apartado 3.4.2, y dada la longitud del cable, se instala en cada uno de los extremos, a una distancia de 5 centímetros del conector correspondiente un núcleo de ferrita. Los núcleos escogidos para este propósito son los ZCAT1325-0530A de TDK.

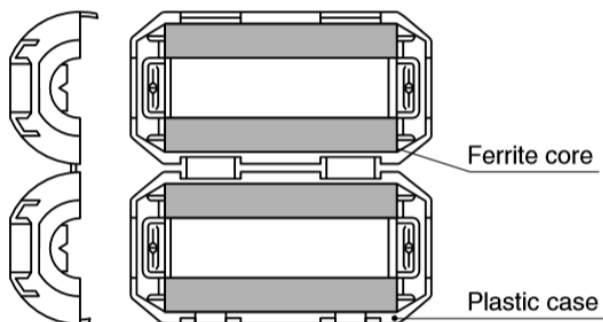


Figura 3.19-Configuración de los núcleos de ferrita ZCAT1325-0530A^[21]

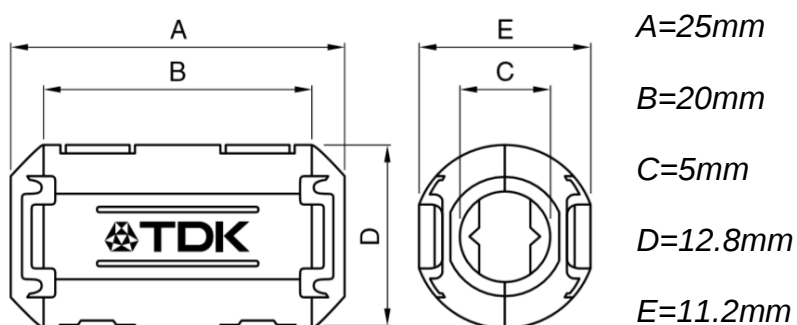


Figura 3.20-Dimensiones generales del núcleo de ferrita ZCAT1325-0530A^[21]

3.4.4. IMANES DE FIJACIÓN

En la parte inferior de la caja se dispone de 5 imanes de neodimio para la fijación del equipo sobre elementos ferromagnéticos. Para ello, se emplean imanes de disco del fabricante Supermagnete y modelo S-10-0.6-N. El cual tiene un diámetro de 10mm y una altura de 0,6mm. Éste tiene las siguientes características:

- Fabricación mediante sinterizado en NdFeB
- Sentido de magnetización axial
- Magnetización N35
- Fuerza de sujeción de 310 gramos
- Temperatura máxima de trabajo de 80°C

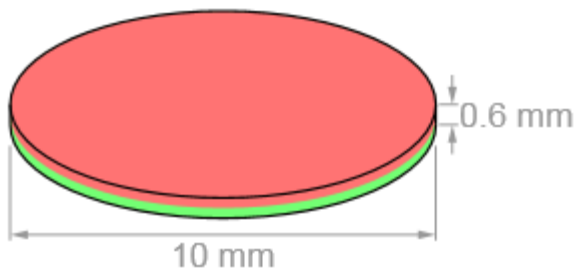
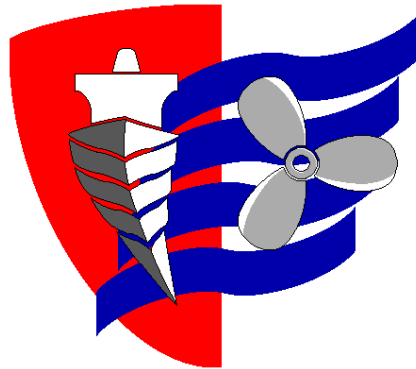


Figura 3.21-Dimensiones generales del imán S-10-0.6-N^[21]

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



DESARROLLO

4. DESARROLLO

4.1. INTRODUCCIÓN

En este apartado se describen las técnicas y métodos seguidos para el desarrollo de este proyecto.

4.2. HARDWARE

4.2.1. SENSOR DE MEDIDA

En la configuración del conexionado del sensor, cabe destacar ante todo la arquitectura de las dos tensiones de entrada de las que dispone el sensor:

- **VS:** Tensión de alimentación del sensor.
- **VDDIO:** Es la tensión de alimentación de la interfaz digital (nivel lógico de comunicación).

Tal como se ha descrito en el apartado 3.1.1 y 3.1.4, las tensión VS ha de tener un valor de entre 2V y 3,6V, mientras que VS ha de tener un valor de entre 1,7V y VS. Por lo que se decide trabajar asimismo en ambos pines con 3,3V.

La hoja de datos del fabricante asimismo recomienda el empleo de un núcleo de ferrita con una resistencia máxima de 100Ω en la alimentación del pin VS para el desacoplamiento de ambas alimentaciones (al emplear la misma fuente). Escogiendo en este caso un núcleo de ferrita con una resistencia de 5Ω (L1). Además se emplea un condensador de tantalio de $10\mu\text{F}$ (C6) en paralelo a otro de $0,1\mu\text{F}$ de tipo cerámico (C5) para la eliminación del ruido.

Asimismo se emplea un condensador cerámico de $1\mu\text{F}$ (C9) para la eliminación del ruido en la entrada VDDIO.

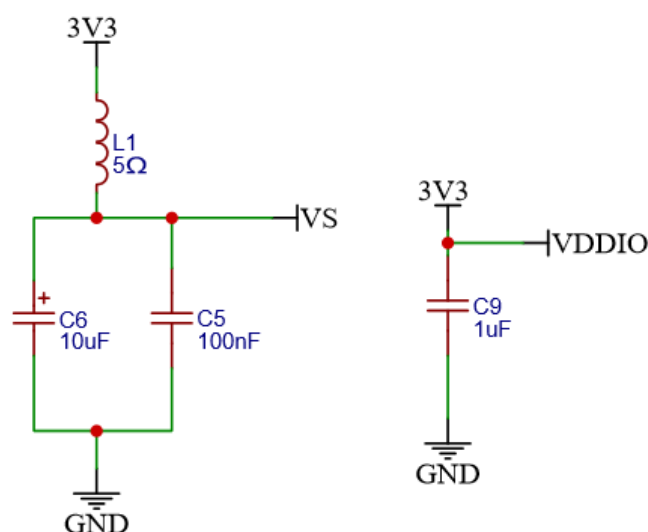


Figura 4.1-Disposición de alimentación y filtrado del acelerómetro ADXL345BCCZ - Fuente propia

El conexionado general del sensor será por lo tanto como se muestra en la siguiente imagen, y destacando en la misma que los niveles SPI son de 3,3V, por lo que los pines de comunicación 7, 12, 13 y 14 trabajarán a ese nivel lógico.

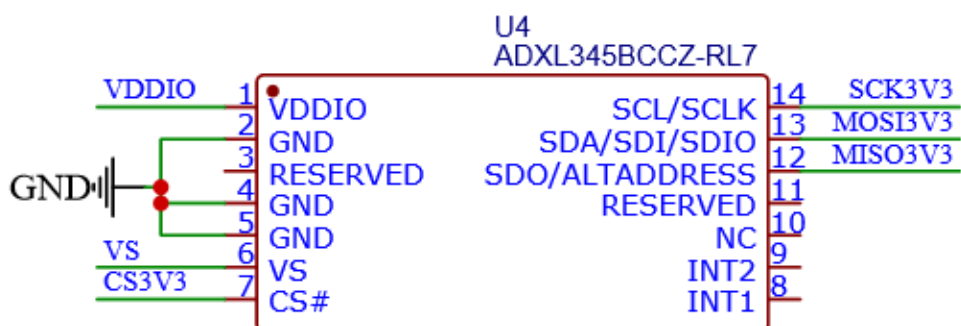


Figura 4.2-Conexionado del acelerómetro ADXL345BCCZ - Fuente propia

4.2.2. MICROCONTROLADOR

De la configuración del microcontrolador, cabe destacar el empleo de un resonador cerámico de 16MHz con un margen de error del 0,5% (Y1) como

oscilador en lugar de un cristal de cuarzo, debido a su estabilidad, resistencia y el poder prescindir de dos condensadores cerámicos, ahorrando con ello espacio.

Asimismo se emplean dos resistencias de $1k\Omega$ para la limitación de la corriente en el bus de datos serie (TX y RX, que serán conectados al controlador del bus serie), un switch para el reseteo del microcontrolador (Y que asimismo produce el reseteo del controlador USB-Ver apartado 4.2.3).

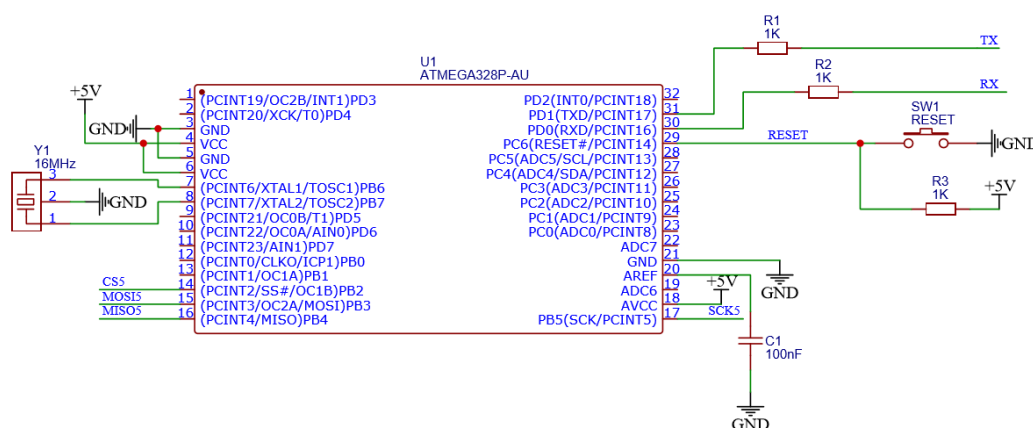


Figura 4.3-Disposición del conexionado del microcontrolador ATMEGA328P-AU - Fuente propia

4.2.2.1. CARGA DE BOOTLOADER

Para facilitar posibles actualizaciones de firmware en el dispositivo, antes de instalar el procesador en la PCB, se flashea el Bootloader de Arduino, lo que permite cargar el programa o futuras actualizaciones a través del USB del instrumento. Es por ello además por lo que el programa del microcontrolador descrito en el apartado 4.2.2.2, está realizado en el entorno de Arduino.

Hay gran cantidad de bootloaders disponibles de licencia de uso libre, en este caso, se emplea optiboot_atmega328.hex, incluido en el CD-ROM, en el directorio \Documentos de fabricación\Microcontrolador

Empleando para ello un programador AVR ISP, y siguiendo el esquema siguiente:

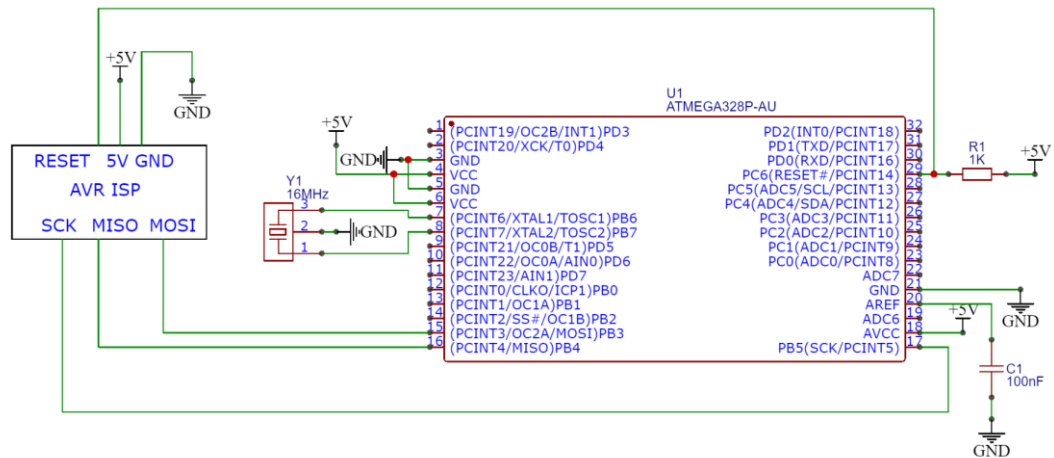


Figura 4.4-Conexión del AVR-ISP para la carga del Bootloader en el microcontrolador ATMEGA328P-AU - Fuente propia

Para la carga del bootloader, se emplea el software AVRDUDE, configurando el valor de los bits de FUSE del modo siguiente antes del flasheo del Bootloader:

- LOW Fuse=0xFF
- HIGH Fuse=0xDE
- Extended Fuses=0x05

4.2.2.2. PROGRAMACIÓN DEL MICROCONTROLADOR

Como se ha descrito con anterioridad, el microcontrolador es programado mediante Arduino, y el código será compilado y subido al microcontrolador una vez ensamblado en el circuito final, a través del puerto USB del que dispone el instrumento desde el mismo entorno de Arduino. El programa será subido una vez compilado empleando como valores de placa la Arduino Nano y procesador ATMEGA328P.

El programa completo sin compilar puede ser encontrado en el CD-ROM en el directorio \Documentos de fabricación\Microcontrolador\Programa, así como en el apartado 5.5.

A continuación, se detallan las diferentes partes del programa del microcontrolador:

Al comienzo del programa, **se detallan la única librería externa** que se emplea en el programa: La librería SPI, teniendo como objeto la comunicación en este protocolo entre el microcontrolador y el sensor de medida:

```
#include <SPI.h>
```

A continuación, se hace una **declaración de las variables globales** del programa, definiendo el pin CS para la activación del acelerómetro a través del protocolo SPI. Además, se crea un buffer en forma de array para el guardado de los datos de los registros correspondientes a la aceleración, y con un tamaño de seis elementos, así como las variables donde guardará los valores finales de aceleración de realizar las correspondientes operaciones.

```
//Configuración del PIN de selección (CS)
int CS = 10;

//Array-Buffer de guardado de cada registro de aceleración
byte coordenadas[6];

//Valores de aceleración en los tres ejes
int x, y, z;
```

El array anteriormente descrito, tiene una longitud de seis elementos debido a que los valores de aceleración de cada uno de los ejes vienen representados por la combinación de los valores de dos registros diferentes, como se detallará más adelante.

Posteriormente se realiza la **fase de configuración e inicialización**, dentro de la rutina setup(), en la cual en primer lugar, inicializa las comunicaciones SPI:

```
SPI.begin(); //Inicialización del SPI
```

A continuación y configura el modo de datos a emplear en la comunicación SPI, empleando para ello el modo 3 debido a las exigencias de este sensor, lo que significa que la fase del reloj se configura de forma que los datos se muestrean en el flanco ascendente del pulso del reloj y se desplazan en el flanco descendente del pulso del reloj, tal como indica la hoja de datos del sensor.

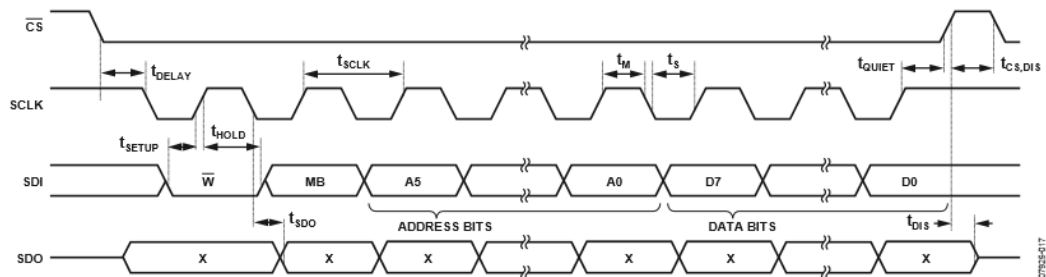


Figura 4.5-Disposición de las tramas de datos en una conexión SPI de 4 terminales, durante la escritura del acelerómetro ADXL345BCCZ^[21]

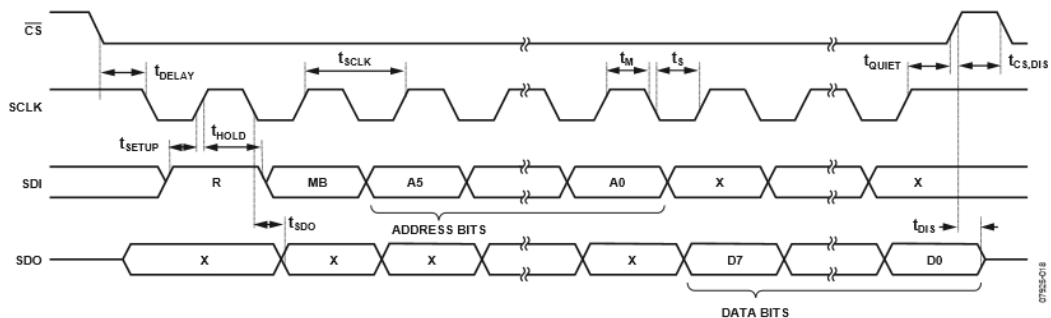


Figura 4.6-Disposición de las tramas de datos en una conexión SPI de 4 terminales, durante la lectura del acelerómetro ADXL345BCCZ^[21]

Por lo citado, el único modo de SPI válido para este sensor es el modo 3, el cual se configura del modo:

```
SPI.setDataMode(SPI_MODE3);
```

Seguidamente se inicializa y se abre el puerto serie a dos mega baudios:

```
Serial.begin(2000000);
```

A continuación, el pin CS, explicado en la declaración de variables, es definido como salida, para posteriormente establecer una salida de nivel alto en este pin.

```
pinMode(CS, OUTPUT);

digitalWrite(CS, HIGH);
```

Seguidamente el programa, calibra los posibles desfases en los distintos ejes, mediante la modificación del desfase en los registros correspondientes del acelerómetro, procedimiento explicado en mayor detalle en el apartado 4.5.

```
digitalWrite(CS, LOW);
SPI.transfer(0x1E); //Registro del ADXL345 de desfase en el eje X
SPI.transfer(0); //Desfase en eje X
digitalWrite(CS, HIGH);

digitalWrite(CS, LOW);
SPI.transfer(0x1F); //Registro del ADXL345 de desfase en el eje Y
SPI.transfer(0); //Desfase en eje Y
digitalWrite(CS, HIGH);

digitalWrite(CS, LOW);
SPI.transfer(0x20); //Registro del ADXL345 de desfase en el eje Z
SPI.transfer(0); //Desfase en eje Z
digitalWrite(CS, HIGH);
```

Finalmente, dentro de esta rutina de configuración, modifica los registros DATA_FORMAT, haciendo funcionar al acelerómetro en el rango de $\pm 16g$; el registro BW_RATE con el que proporciona la frecuencia de muestreo de 3200 Hz y finalmente el registro POWER_CTL, con el que se activa el modo de toma de datos.

```
//Configuración de ADXL345 en el rango de +/- 16G
digitalWrite(CS, LOW);
SPI.transfer(0x31); //Registro del ADXL345 para selección del
formato
SPI.transfer(0x03); // +/- 16G
digitalWrite(CS, HIGH);
```

```
//Configuración de ADXL345 a una frecuencia de muestreo de 3200Hz
digitalWrite(CS, LOW);
SPI.transfer(0x2c); //Registro del ADXL345 para selección de la
frecuencia de muestreo
SPI.transfer(0x0F); //3200Hz
digitalWrite(CS, HIGH);

//Activación del modo de lectura de datos
digitalWrite(CS, LOW);
SPI.transfer(0x2d); //Registro del ADXL345 para selección de ahorro
de consumo
SPI.transfer(0x08); //Toma de datos
digitalWrite(CS, HIGH);
```

Finalmente pasa a la **fase de medida**, que se encuentra dentro de un bucle loop(), en donde se leerán en primer lugar los 6 registros correspondientes a los tres ejes, dado que, el valor de aceleración de cada eje, está formado por la combinación de los datos de dos de estos registros mediante bitwise or, de forma que los valores de cada coordenada se calculan del modo:

$X = X0 \mid X1$

$Y = Y0 \mid Y1$

$Z = Z0 \mid Z1$

Address		Name	Type	Reset Value	Description
Hex	Dec				
0x32	50	DATA0	R	00000000	X-Axis Data 0
0x33	51	DATA1	R	00000000	X-Axis Data 1
0x34	52	DATA0	R	00000000	Y-Axis Data 0
0x35	53	DATA1	R	00000000	Y-Axis Data 1
0x36	54	DATA0	R	00000000	Z-Axis Data 0
0x37	55	DATA1	R	00000000	Z-Axis Data 1

Figura 4.7-Registros de memoria, donde se encuentran los valores de aceleración en los ejes X, Y y Z del acelerómetro ADXL345BCCZ^[21]

Se comienza en la dirección 0x32, pero al tratarse de una comunicación SPI de lectura, tal como indica el fabricante en la hoja de datos, el bit más significativo ha de ser 1. Asimismo, el segundo bit más significativo también, al tratarse de una lectura de múltiples bytes. Teniendo en cuenta que se trata de 8 bits en cada comunicación:

TRABAJO FIN DE GRADO
INGENIERÍA MARÍTIMA

Descripción	Hexadecimal	Binario
Dirección inicial	32	00110010
MSB	80	10000000
Segundo bit más significativo	40	01000000

Tabla 4.1-Descripción ilustrativa del cambio de base en las dirección de inicio de toma de datos, Bit más significativo y segundo bit mas significativo en una trama de 8 bits. - *Fuente propia*

Se obtiene el valor a enviar realizando el correspondiente bitwise or con estos valores, que será, por lo tanto:

00110010 | 10000000 | 01000000=11110010

O lo que es lo mismo, **F2 en hexadecimal en lugar de 32 (el cual sería válido únicamente en comunicación I2C)**, por lo tanto, se transfiere este valor y se queda a la espera de recepción de los 6 elementos que formarán los valores de los registros de las 3 coordenadas (X0, X1, Y0, Y1, Z0 y Z1).

```
digitalWrite(CS, LOW); //Comienzo de lectura
SPI.transfer(0xF2);
for (int i = 0; i < 6; i++) {
    coordenadas[i] = SPI.transfer(0x00);
}
digitalWrite(CS, HIGH); //Fin de lectura
```

Una vez recibidos estos valores, se procede a la obtención de los valores de aceleración (en LSB), mediante la combinación de los registros correspondientes mediante bitwise OR, tal como se ha descrito previamente.

```
//Creación de las coordenadas mediante bitwise OR a través de los
dos elementos correspondientes a cada eje
int x = ((int)coordenadas[1] << 8) | (int)coordenadas[0];
int y = ((int)coordenadas[3] << 8) | (int)coordenadas[2];
int z = ((int)coordenadas[5] << 8) | (int)coordenadas[4];
```

Finalmente, se crea un protocolo de transmisión de datos, descifrable por el software, de modo que evite desplazamientos y errores en la lectura por parte del software, por lo que se envía el resultado vía serie con un formato del modo XvalorxYvaloryZvalorz:

```
Serial.print("X");
Serial.print(x);
Serial.print("Y");
Serial.print(y);
Serial.print("Z");
Serial.println(z);
```

4.2.3. CONEXIÓN USB

El conexionado USB, se puede separar en dos partes claramente diferenciadas:

- Conexión física
- Procesador de datos USB-Controlador de BUS serie

La conexión física engloba al conector USB (USB1), así como el filtrado de la tensión de alimentación mediante dos condensadores conectados en paralelo: uno de tantalio de 4,7 μ F (C2) y otro cerámico de 100nF(C3), así como un diodo Schottky (D1) empleado a modo de protección de potencias inversas, dada su baja caída de tensión, obteniendo a partir de aquí los 5V.

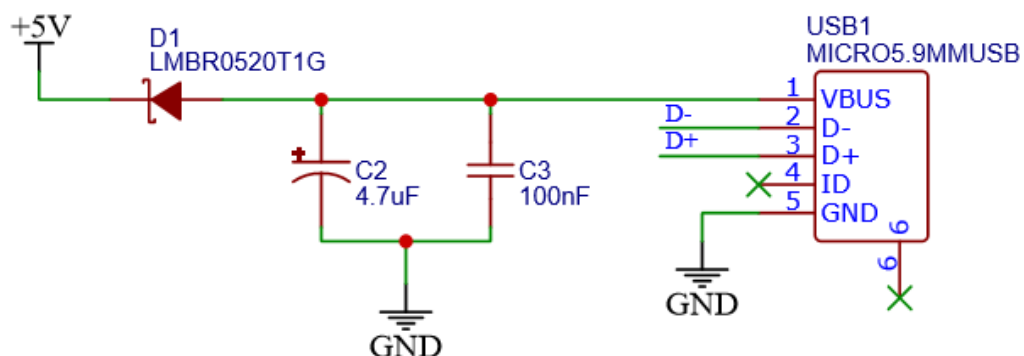
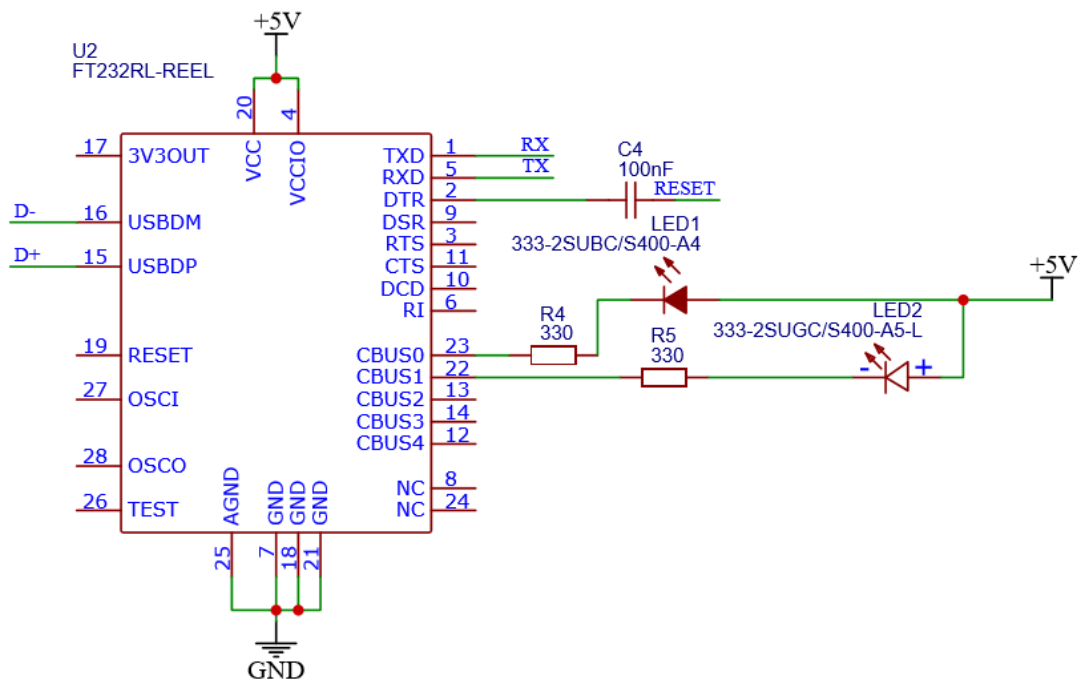


Figura 4.8-Conexionado USB y filtrado inicial de la señal de alimentación - Fuente propia

Asimismo, mientras se produce la recepción de datos en el terminal RXD anteriormente descrito, se encenderá un LED (LED1) de color verde, asimismo en caso de producirse transmisión a través del terminal TXD, se encenderá el LED2, de color azul. Ambos están limitados en corriente mediante una resistencia de 330Ω .



4.2.4. REGULACIÓN DE TENSIÓN

130

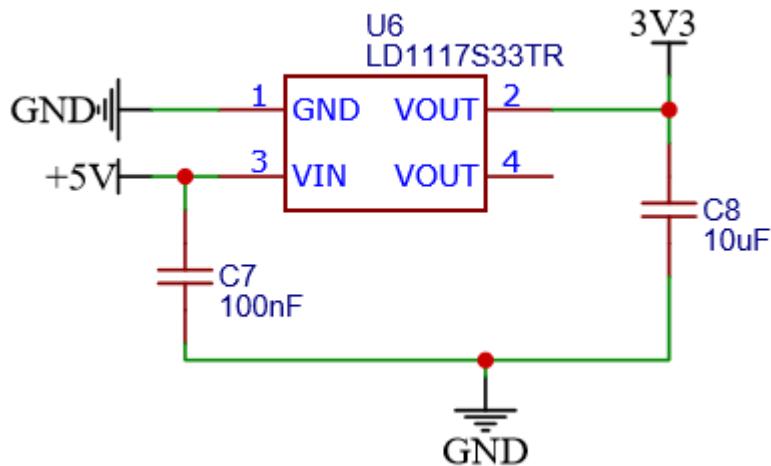


Figura 4.10-Disposición del regulador de tensión LD1117S33TR - Fuente propia

4.2.5. CONVERSIÓN DE NIVELES LÓGICOS

Tal como se ha descrito en el apartado 3.1.5, se emplean transistores de tipo MOSFET para la conversión de niveles lógicos en cada canal del SPI (CS, SCK, MISO y MOSI), con una arquitectura formada por un transistor BSS138, y dos resistencias de 10k Ω .

El funcionamiento se puede separar en dos etapas:

- Emisión de datos del ADXL345 al ATMEGA 328P-AU (3,3V $\rightarrow$ 5V):**
 Cuando cualquiera de los canales en el lado del ADXL345 (3,3V) transmite un 1 lógico, el pin de fuente (S) queda internamente conectado a la compuerta (G), por lo que el MOSFET quedará desactivado y en consecuencia, en el lado del Microcontrolador ATMEGA328P-AU llegarán 5V a través de la resistencia pull-UP (R10, R11, R12 o R13).
 Si se transmite un 0 lógico desde el ADXL345 al pin fuente, el MOSFET entra en conducción, llegando al drenaje (D) 0V y en consecuencia un 0 lógico al ATMEGA328P-AU.
- Emisión de datos del ATMEGA 328P-AU al ADXL345 (5V $\rightarrow$ 3,3V):**
 Cuando cualquiera de los canales en el lado del ATMEGA328P-AU (5V) transmite un 1 lógico a través del pin de drenaje (D), el MOSFET

no conduce, por lo que llegará un 1 lógico de 3,3V al ADXL345 a través de la resistencia de pull-up (R6, R7, R8 o R9).

Si se transmite un 0 lógico al pin de drenaje, el diodo damper interno del MOSFET entra en conducción, llegando aproximadamente al lado de la fuente 0,7V aproximadamente, lo que es suficiente para que el mosfet entre en modo conducción, bajando la tensión hasta los 0V, y obteniendo por ello finalmente un 0 lógico en el ADXL345.

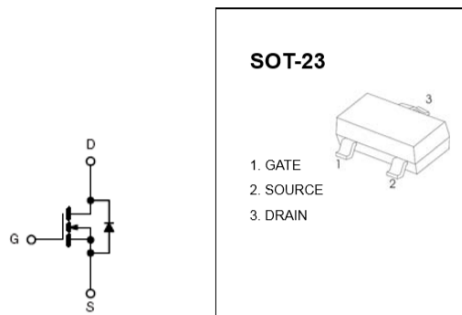


Figura 4.11- Pinout y esquema electrónico del BSS138 en el encapsulado SOT-23^[21]

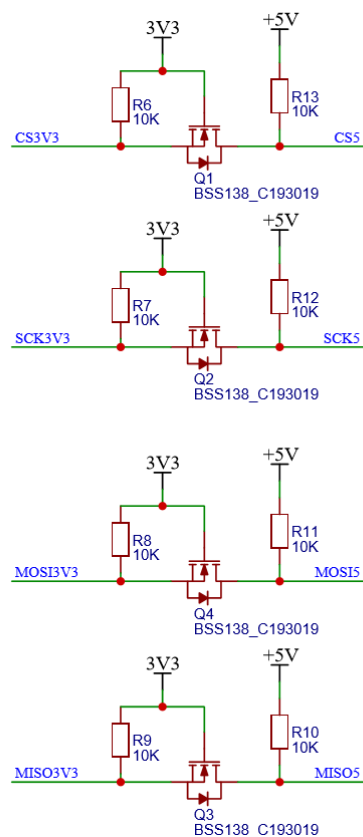


Figura 4.12- Disposición de los convertidores de nivel lógicos en el circuito - Fuente propia

4.2.6. DISEÑO DEL CIRCUITO IMPRESO

Para el diseño del circuito impreso, se realiza intentando optimizar y reducir el espacio al máximo, y atendiendo, de acuerdo al manual del sensor ADXL345, que éste quede sobre un punto de apoyo, para evitar errores en las medidas (ver Figura 4.13).

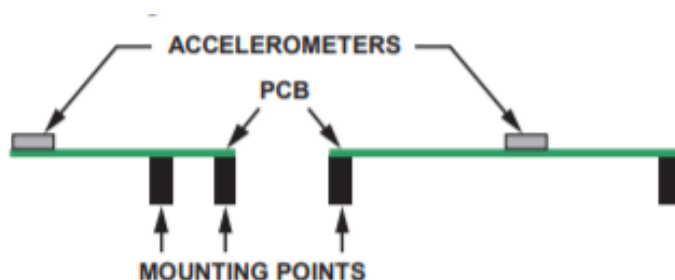


Figura 4.13-Disposiciones incorrectas del ADXL345BCCZ, según la hoja de datos del fabricante^[21]

Se efectúa el diseño en una placa PCB de doble cara, de 2mm de grosor y de acabado ENIG (Electroless Nickel with Immersion Gold coating). Las pistas de alimentación (5V y 3,3V), así como la de tierra tienen una anchura de 0,4mm, mientras que el resto, de 0,26mm y con un espaciado mínimo de 0,2mm. Asimismo las perforaciones para paso de pista entre las capas tienen un diámetro de 0,325mm, mientras que su vía de 0,65mm.

Se obtiene una PCB final de dimensiones: 38,61mm X 30,10mm.

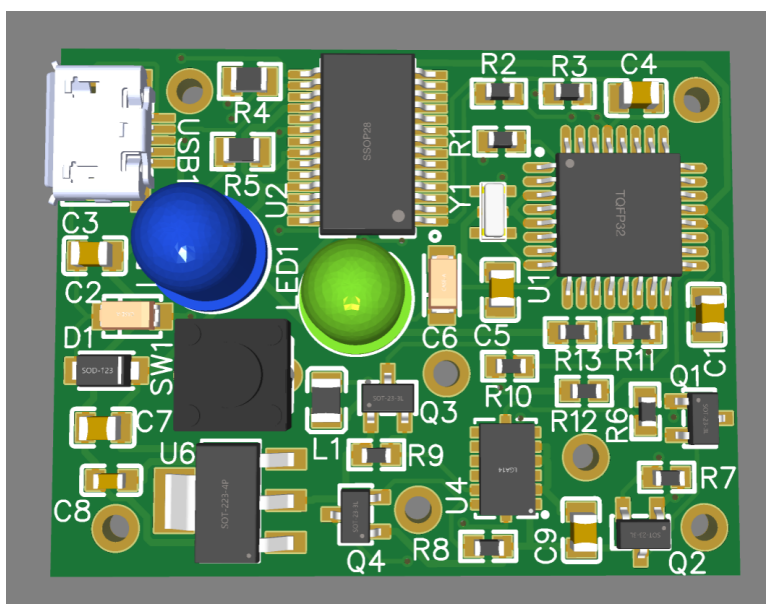


Figura 4.14-Vista superior del circuito ensamblado - Fuente propia

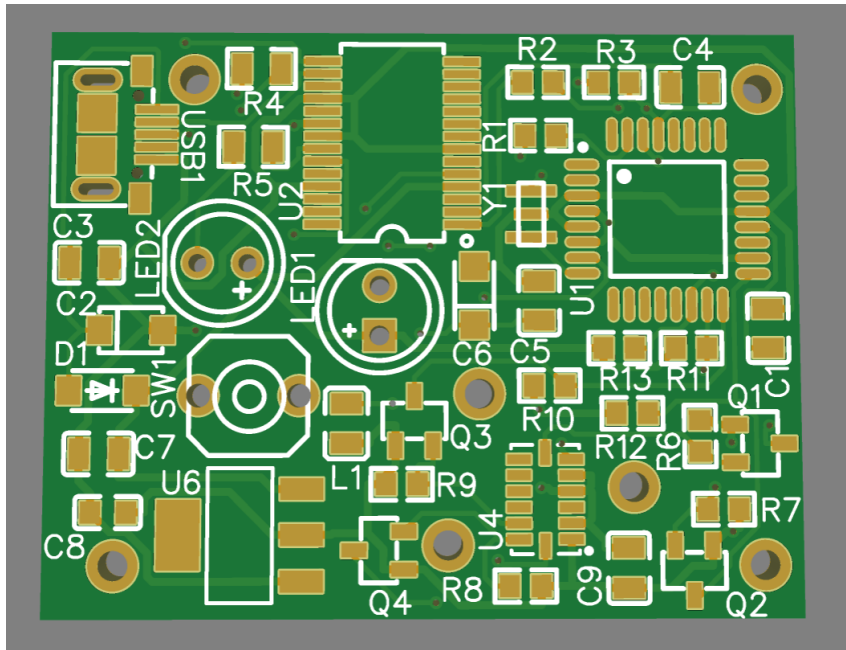


Figura 4.15-Vista superior de la PCB - *Fuente propia*

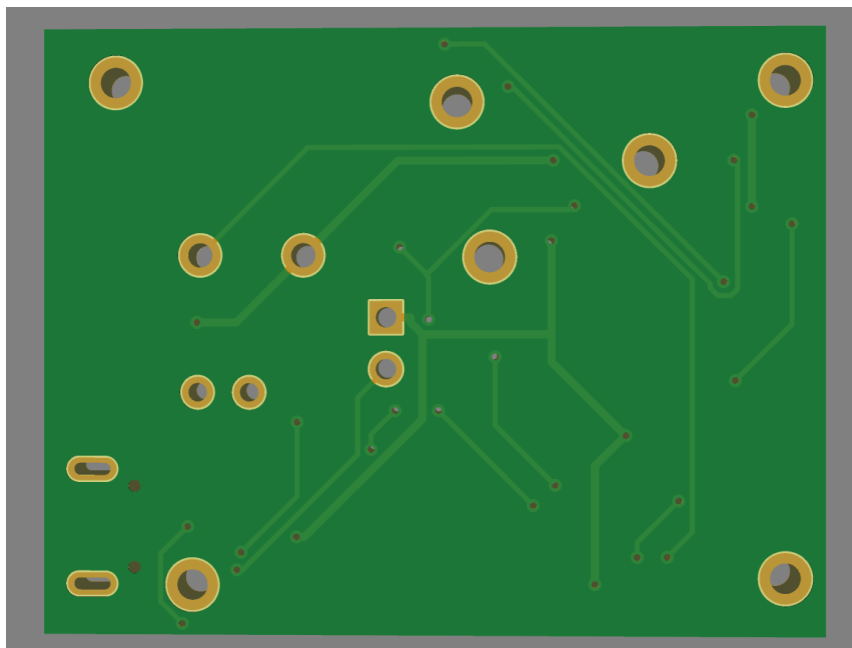


Figura 4.16-Vista inferior de la PCB sin componentes - *Fuente propia*

Como se puede apreciar, y según lo descrito, U4(Correspondiente al acelerómetro), está rodeado por 3 orificios, los cuales sirven de fijación para tornillos, quedando toda la superficie que hay entre los mismos por la parte

inferior sobre la estructura sólida de la parte inferior de la carcasa protectora (ver Figura 4.66).

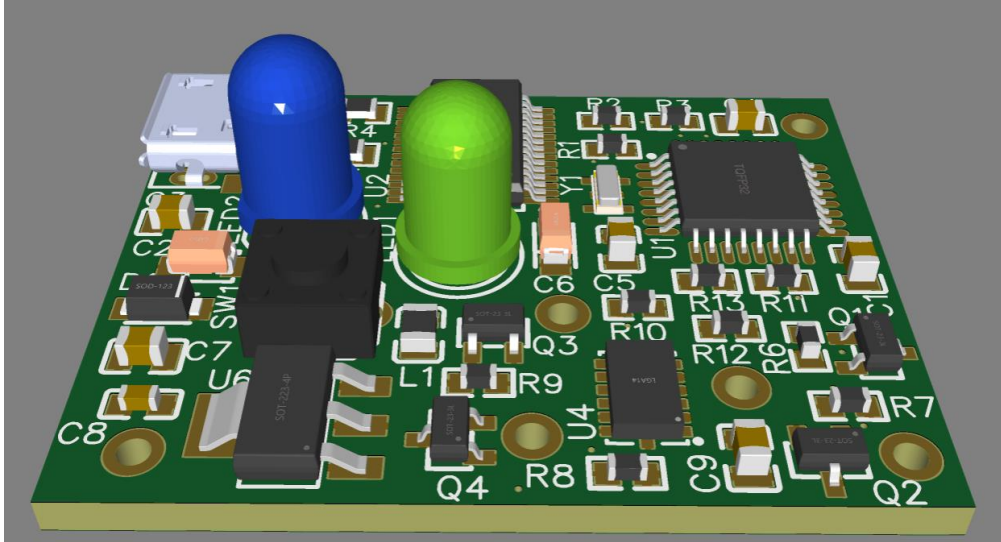


Figura 4.17-Vista en perspectiva de la PCB - *Fuente propia*

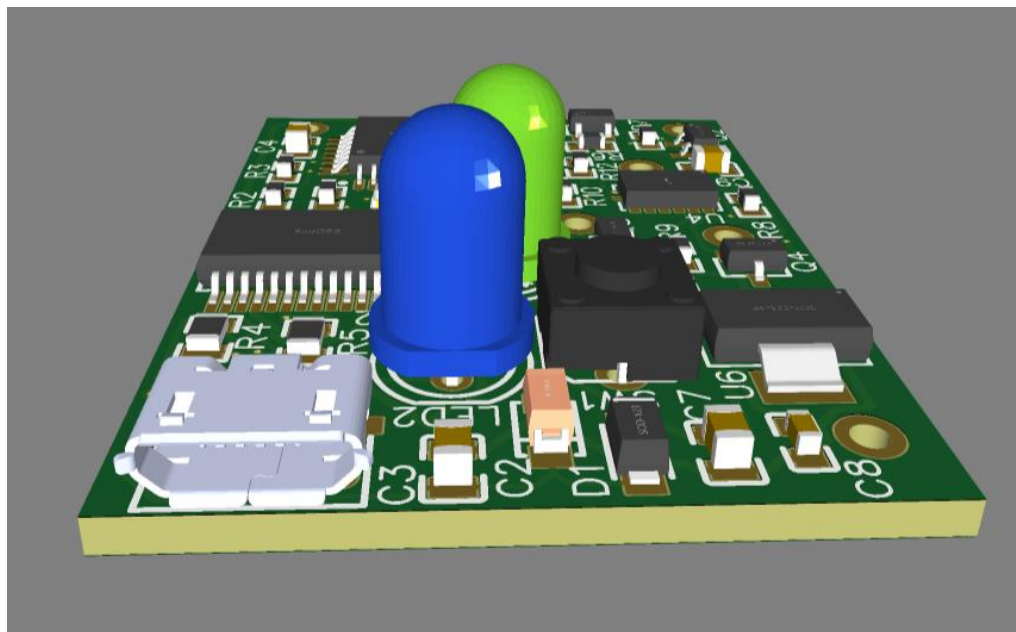


Figura 4.18-Vista en perspectiva de la PCB desde la zona de conexión - *Fuente propia*

4.3.4. PROCESAMIENTO DE SEÑAL

El procesamiento de la señal se realiza en el bucle consumidor, tras el desencolamiento:

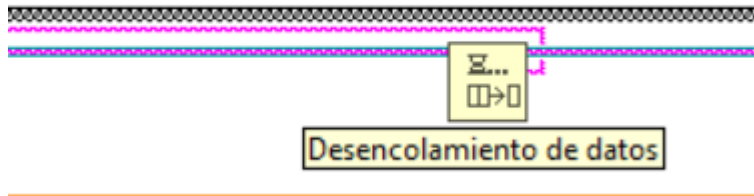


Figura 4.23-Desencolamiento de datos - Fuente propia

En este desencolamiento, los datos vuelven a tomar la forma de String con la arquitectura descrita anteriormente pasando al procesamiento de la señal.

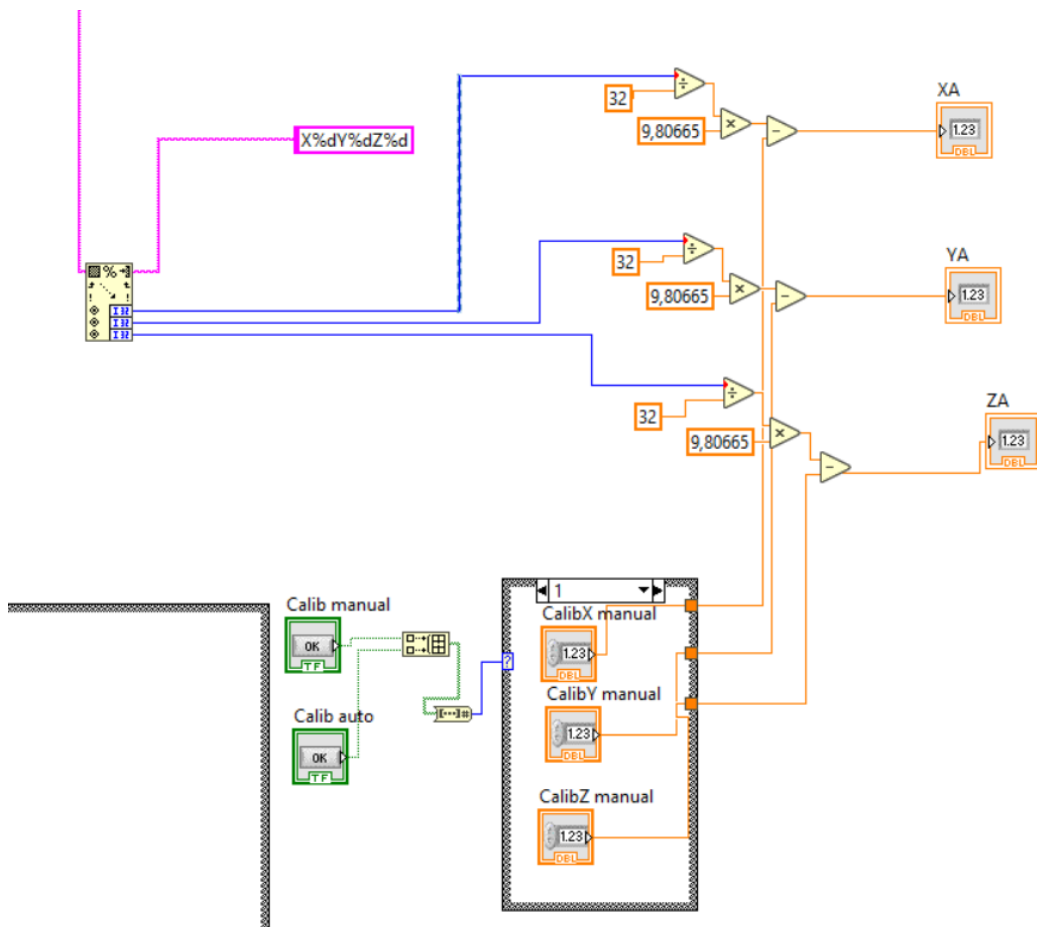


Figura 4.24-Procesamiento de datos recibidos - Fuente propia

El String ya descrito, en este paso se separa en los tres valores de aceleración de los tres ejes para posteriormente hacer el cambio de LSB a g, dividiendo el valor recibido entre 32, ya que, como indica la hoja de datos del sensor corresponde al valor típico establecido del mismo para 1g en el rango de aceleración de $\pm 16g$ y con una resolución de 10 bits: 32LSB/g.

Tras esto, este valor se convierte a unidades del sistema internacional (m/s^2), multiplicando el valor g por 9,80665.

Finalmente, este dato pasa por el filtro software de calibración (manual o automática-excepto que el usuario lo descarte), sumándole o deduciéndole la cantidad correspondiente a cada eje, para comenzar la medida con un valor de referencia de cero, a pesar de posibles desviaciones que tenga el equipo de medida respecto a los ejes cartesianos reales. Éstos datos procesados, se almacenan en las variables locales XA, YA y ZA.

Simultáneamente se van analizando los tiempos de recepción de cada bloque de datos, generando también el periodo y la frecuencia de muestreo:

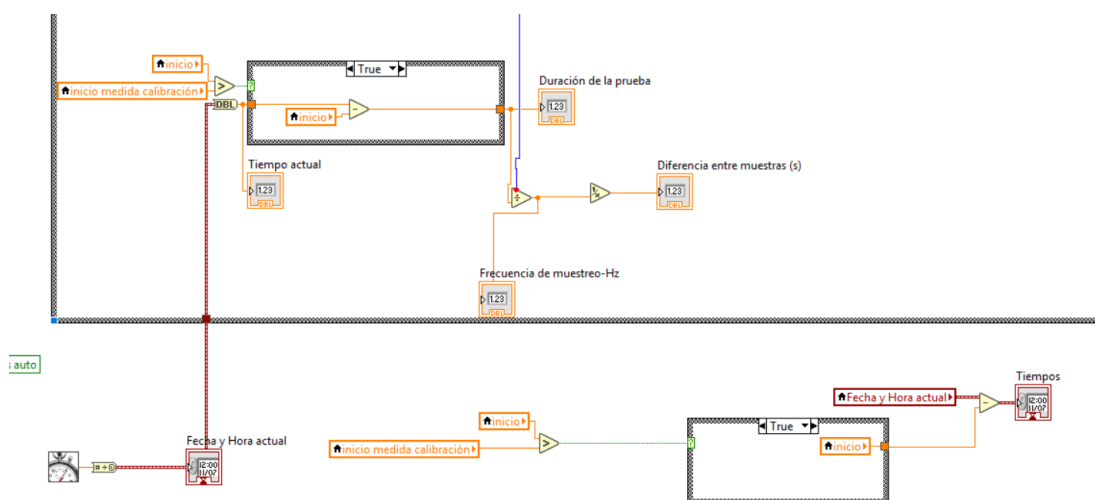


Figura 4.25-Cálculo de tiempos de recepción de datos - Fuente propia

Los valores de las variables locales XA, YA y ZA, correspondientes a las aceleraciones de los tres ejes medidos en unidades del sistema internacional, son computados con la frecuencia de muestreo, generando las tres ondas correspondientes de aceleraciones de sus respectivos ejes. Estas ondas serán integradas una vez para obtener las ondas de la velocidad

y dos veces para obtener las ondas del desplazamiento, así como efectuado un cambio de unidades, para obtener en términos de velocidad mm/s y en términos de desplazamiento micrómetros.

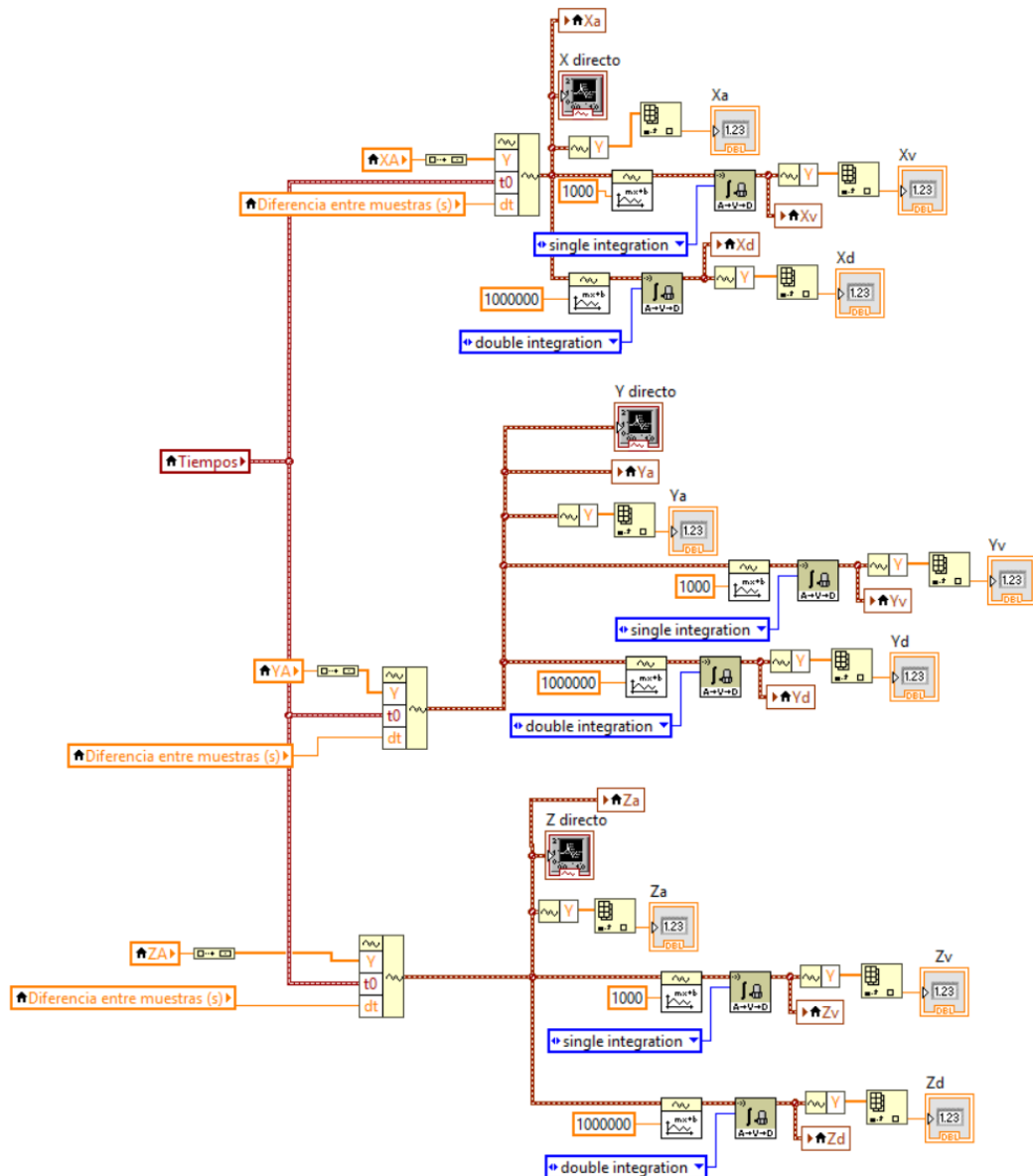


Figura 4.26-Determinación de los valores instantáneos de aceleración, velocidad y desplazamiento - Fuente propia

Asimismo, todos los valores obtenidos de aceleración (X_a , Y_a y Z_a), como de velocidad (X_v , Y_v y Z_v) o de desplazamiento (X_d , Y_d y Z_d), serán representados en forma de variables para pasar al almacenamiento provisional de los datos.

En este punto, además, se graficarán los datos en la gráfica que les corresponda.

4.3.5. CALIBRACIÓN

El programa dispone de la opción de calibrado manual o automático. De modo que se pueda añadir el desfase de aceleración deseado en cada eje, de forma que se pueda ajustar a cero independientemente de la posición del equipo. Hay que recordar que se trata de un sensor de tipo MEMS, por lo cual la gravedad surte efecto en el mismo, y ha de ser ajustado a cero necesariamente.

La calibración manual consiste en valores que son cambiados manualmente, y este valor de desfase es directamente aplicado en el procedimiento descrito en el apartado 4.3.4.

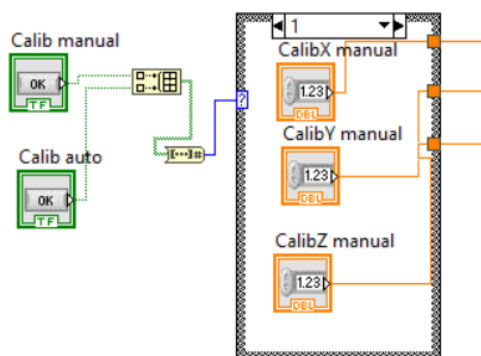


Figura 4.27-Calibración manual - Fuente propia

La calibración automática consiste en la toma de 3000 valores y de los cuales realiza el promedio en cada eje. Esta se realiza bien nada más se inicia la toma de datos de modo automático o bien una vez lo escoja el usuario en cualquier momento de la toma de datos. Viene definida la función:

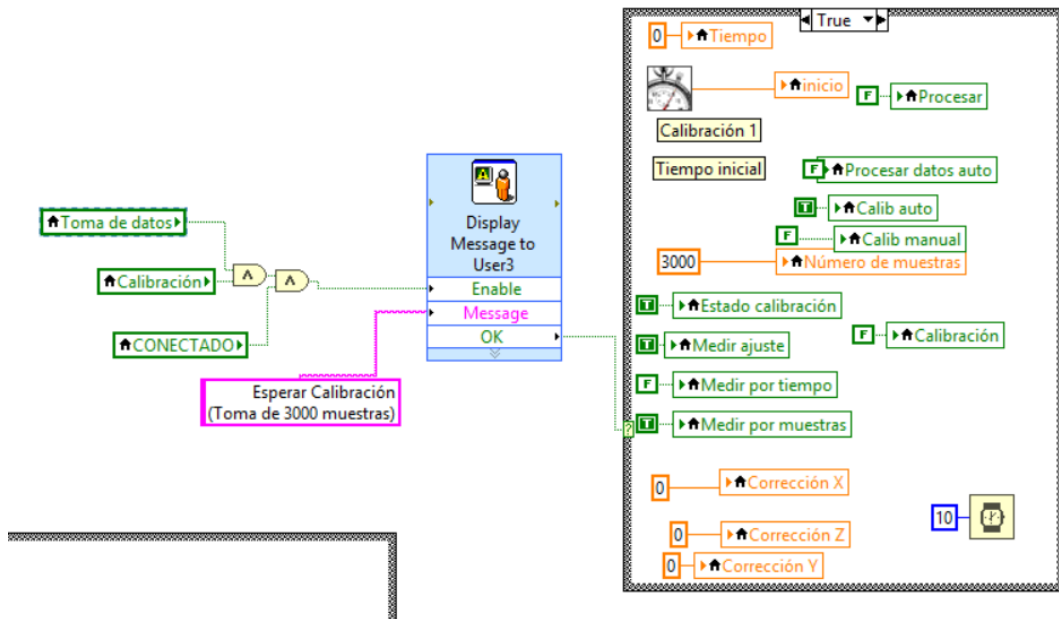


Figura 4.28-Calibración automática I - Fuente propia

Y el procesamiento de los valores de desfase a aplicar con respecto a los datos recibidos del sensor, se aplica con la rutina siguiente, obteniendo los valores promedio ($MEDIA X_a$, $MEDIA Y_a$ y $MEDIA Z_a$) mediante el procedimiento descrito en el apartado 4.3.9:

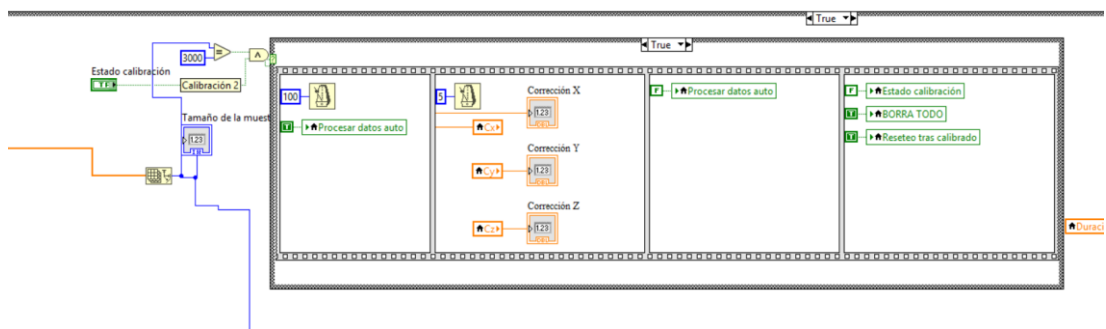


Figura 4.29-Calibración automática II - Fuente propia

El ajuste de la medida ya corregida, se aplicará automáticamente, con una estructura similar a la manual:

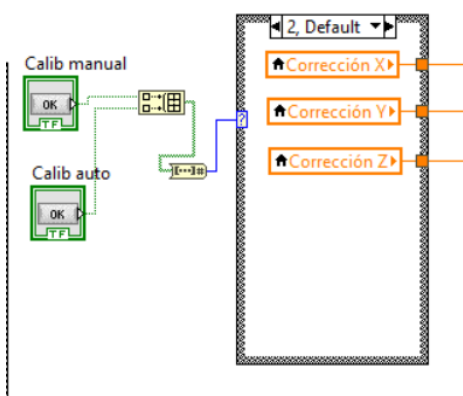


Figura 4.30- Corrección de valores mediante la calibración automática - Fuente propia

4.3.6. ALMACENAMIENTO PROVISIONAL DE DATOS

Estando en el modo de toma o recepción de datos, se puede pasar al modo de medida para almacenamiento de datos.

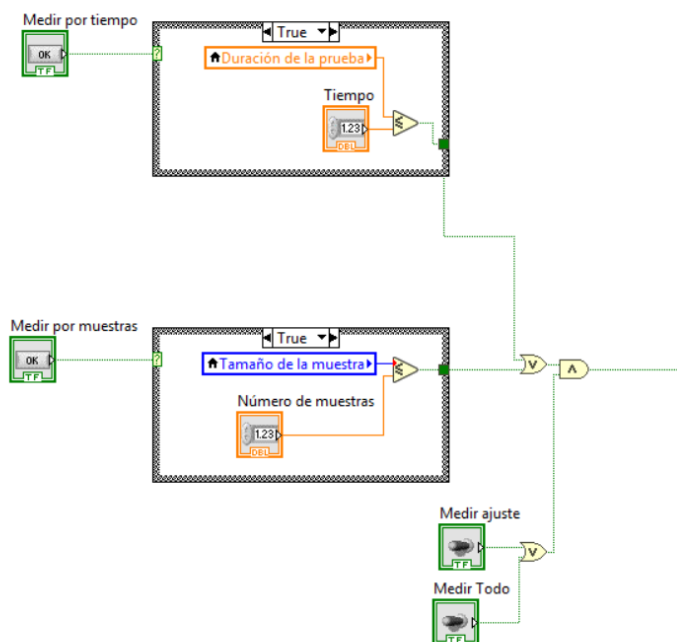


Figura 4.31-Bucle de activación de inicio de medida - Fuente propia

Para el almacenamiento provisional de los datos se crean 10 Arrays con registros de desplazamiento. Estos arrays almacenan los siguientes datos (desde la parte superior a la inferior):

- **Duración de la prueba:** Tiempo en el que se ha tomado el dato, obtenido simultáneamente a la frecuencia de muestreo, tal como se describe en el anterior apartado.
- **Xa:** Aceleración en el eje X
- **Ya:** Aceleración en el eje Y
- **Za:** Aceleración en el eje Z
- **Xv:** Velocidad en el eje X
- **Yv:** Velocidad en el eje Y
- **Zv:** Velocidad en el eje Z
- **Xd:** Desplazamiento en el eje X
- **Yd:** Desplazamiento en el eje Y
- **Zd:** Desplazamiento en el eje Z

Estos arrays son puestos a cero en el momento de comienzo de medida

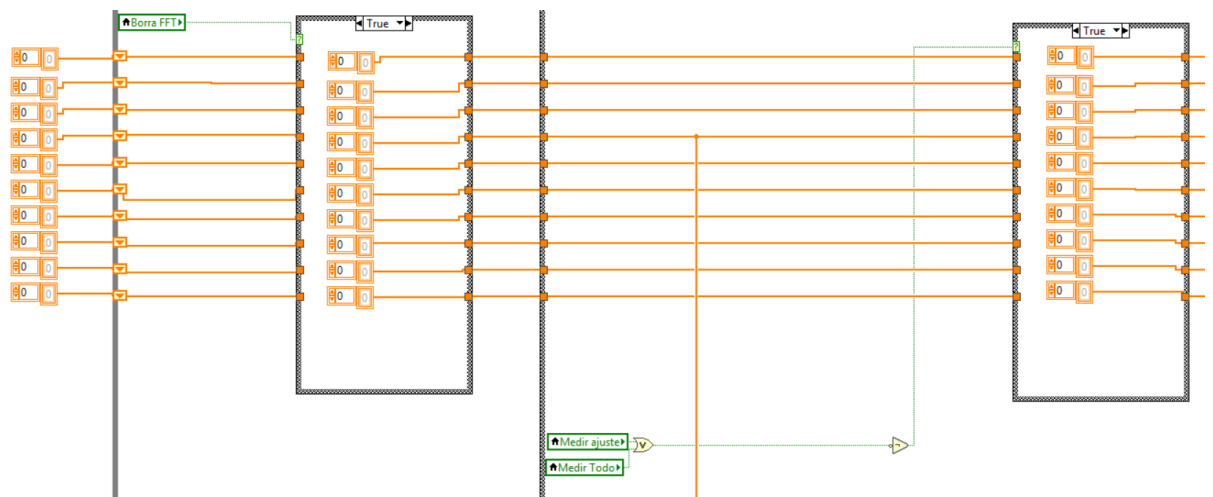


Figura 4.32-Arrays de almacenamiento datos con registro de desplazamiento-Zona de inicio y puesta a cero - Fuente propia

Asimismo, una vez vacíos, se procede al almacenamiento provisional de datos en estos arrays:

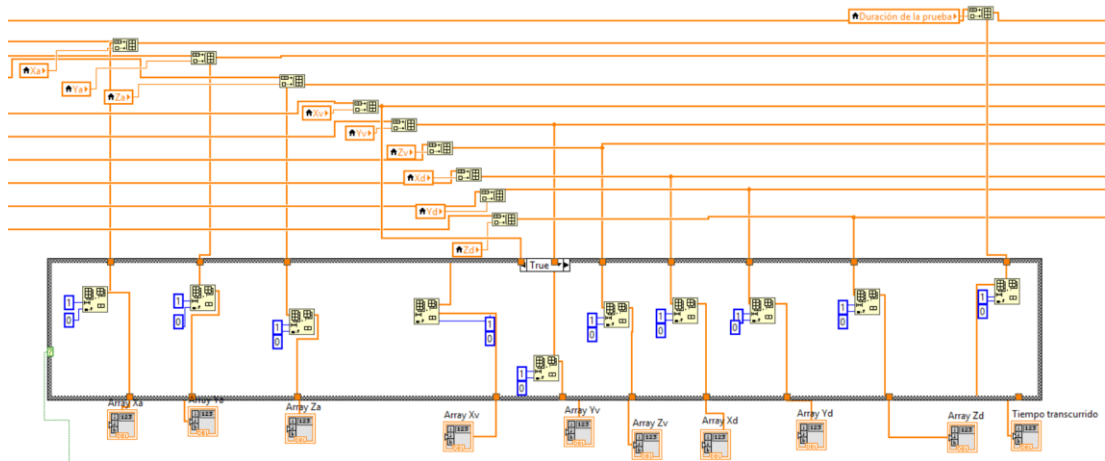


Figura 4.33-Almacenamiento de datos en los Arrays de la Figura 4.32 - Fuente propia

4.3.7. REPROCESAMIENTO DE DATOS Y FILTRADO DE SEÑAL

Los valores almacenados en los arrays son remuestreados a una frecuencia y rango de frecuencias constante, dado que, debido a la carga de trabajo y a las características del PC hospedador del software, podría haber pequeñas variaciones de frecuencia entre las muestras, encontrándose la tasa de recepción de datos en torno a 2325Hz en el PC en el que se ha desarrollado el software, y dado que por los requerimientos de las normas, se necesita analizar en un rango de hasta 1000Hz, se requiere una tasa de muestreo mínimo de 2000Hz.

Por lo que se designa una frecuencia de 2200Hz, aplicando un filtro FIR, y generando una señal interpolada sinusoidal y analizable hasta 1100Hz (Se ejemplifica en este documento solamente para los valores de aceleración del eje X, por lo que esta función estará repetida nueve veces):

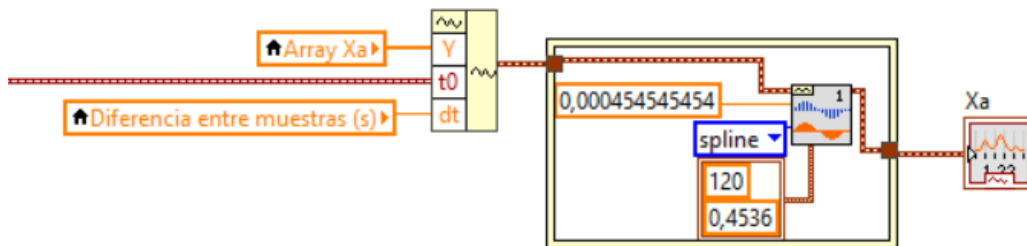


Figura 4.34-Reprocesamiento de señal y ajuste de frecuencia - Fuente propia

En caso de emplear un filtrado de frecuencias, el siguiente paso es la aplicación del mismo dentro de la banda generada mediante un filtro de banda de tipo IIR Butterworth y de orden 100.

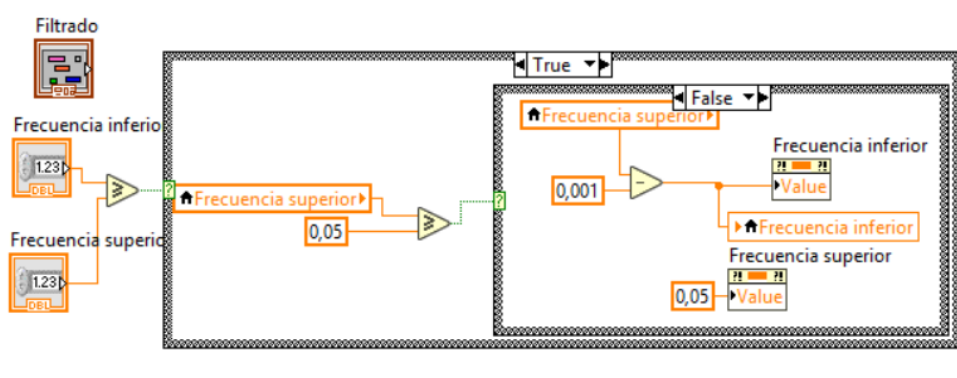


Figura 4.35-Elección de valores de filtro - Fuente propia

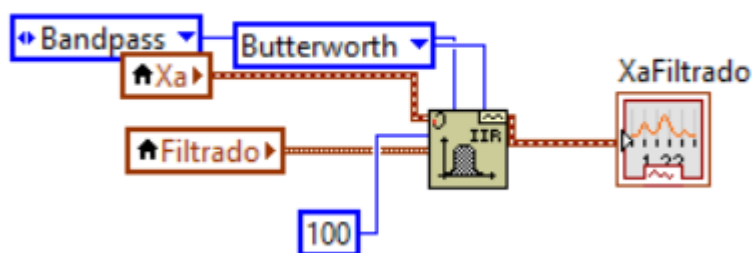


Figura 4.36-Aplicación de filtrado de señal, según el rango definido por el usuario, de acuerdo a la estructura descrita en la Figura 4.35 - Fuente propia

4.3.8. CREACIÓN DE ESPECTROS FFT Y ANÁLISIS DE PICOS

Al igual que en el apartado anterior se ejemplifica con los valores aceleración del eje X.

Tras reprocesamiento y filtrado de la señal, se genera el espectro de frecuencias con o sin filtrado, pudiendo escoger entre RMS o de valores pico, y aplicando en ambas una ventana de tipo Hanning, así como un promediado lineal del espectro.

Tal como se ha descrito en el apartado 4.3.7, al estar la señal promediada y ajustada a una frecuencia de 2200Hz, tras la aplicación de la transformada rápida de Fourier-FFT del modo descrito, se obtiene un espectro de frecuencias de la mitad de frecuencia de muestreo, es decir, de 0 a 1100Hz.

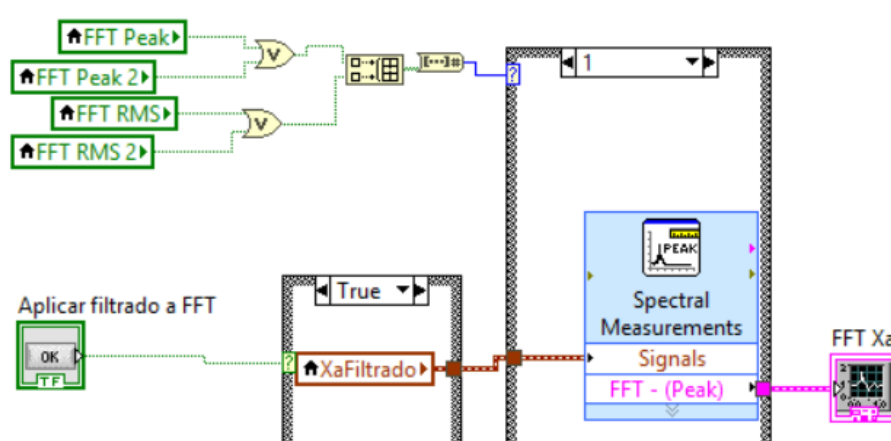


Figura 4.37-Generación de espectro FFT de valores pico - Fuente propia

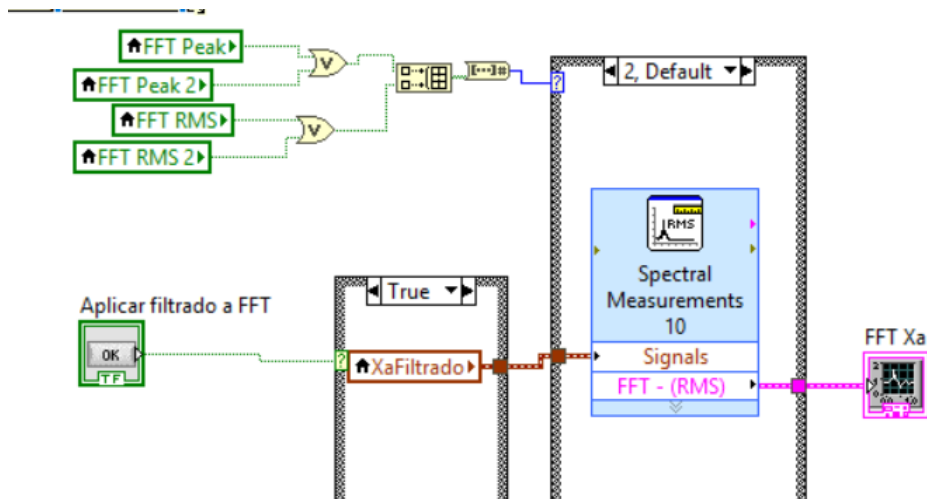


Figura 4.38-Generación de espectro FFT de valores RMS - Fuente propia

Los valores espectrales obtenidos son almacenados en un clúster para su posterior análisis de picos:

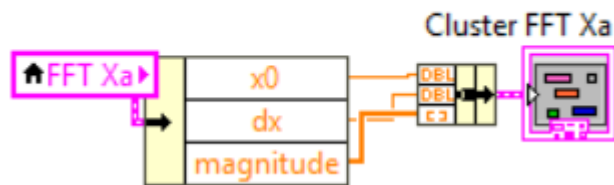


Figura 4.39-Paso de datos espectrales a clúster - Fuente propia

En el análisis de picos, se determina según la amplitud y la anchura de las bandas en qué lugares hay picos de amplitud, almacenando estos valores en arrays del tipo ARRAY FFT Xa.

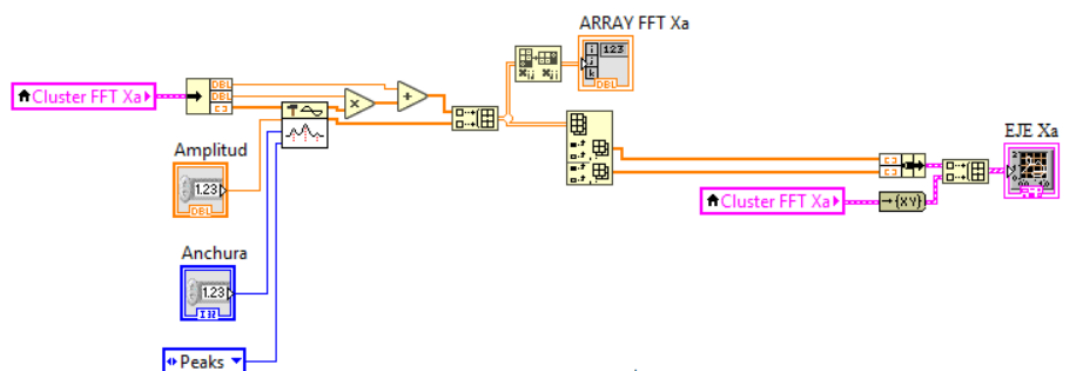


Figura 4.40-Localización de los picos de amplitud en el espectro FFT - Fuente propia

4.3.9. OBTENCIÓN DE OTROS RESULTADOS

Para la obtención de los valores medios, valores RMS, valores pico y valores pico-pico, se sigue la estructura siguiente para el caso de aceleraciones, velocidades y desplazamientos en cada uno de los ejes (por lo que esta función se repetirá nueve veces). Al igual que en el apartado anterior se ejemplifica con los valores aceleración del eje X.

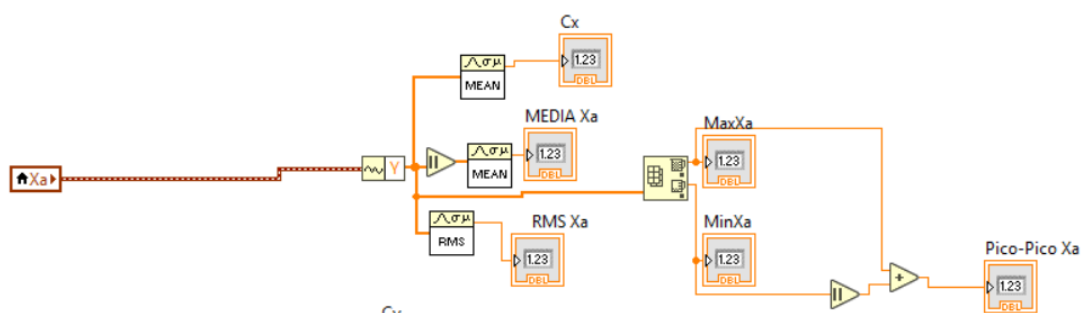


Figura 4.41-Función de cálculo de valores promedio, RMS, Pico y pico-pico - *Fuente propia*

Siendo las variables:

- **MEDIA X_a :** Valor medio de aceleración en el eje X.
- **RMS X_a :** Valor RMS de aceleración en el eje X.
- **Max X_a :** Valor pico positivo en la aceleración del eje X.
- **Min X_a :** Valor pico negativo en la aceleración del eje X.
- **Pico-Pico X_a :** Valor pico-pico de la aceleración del eje X.
- **C_x :** Es el valor que se toma para la calibración manual, solo se incluye esta variable en los tres ejes de velocidad, estando en el resto exentos de esta variable-Dado que se obtienen mediante la integración de este parámetro, como se describe en el apartado 4.3.4.

4.3.10. ANÁLISIS DE NORMAS

Para el análisis de vibración de acuerdo a la norma ISO 10816-1 y ISO 10816-3, la estructura de la programación de software tiene una arquitectura similar siendo del modo siguiente (ejemplificado por la norma ISO 10816-3).

En primer lugar discrimina entre el uso de valores filtrados o no filtrados en frecuencia según la elección del usuario, para posteriormente evaluar cuál de los ejes tiene una mayor velocidad RMS (ver Figura 4.42), mandando este dato así como el de tipo de máquina y la clase de soporte que la sustenta a una estructura de tipo “case”, en donde se evaluará la zona de vibración en la que se encuentra el equipo (ver Figura 4.43

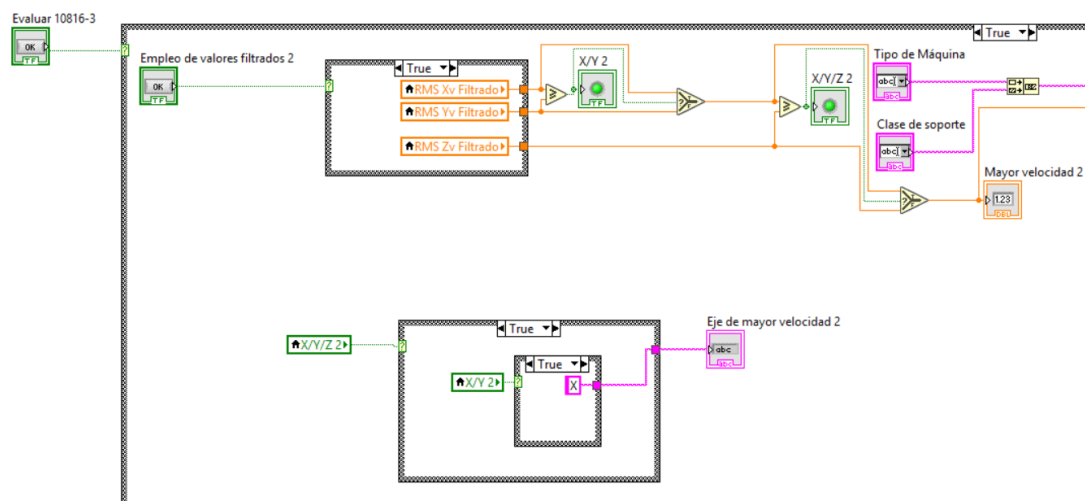


Figura 4.42-Discriminación de valores filtrados y cálculo de eje de mayor velocidad - *Fuente propia*

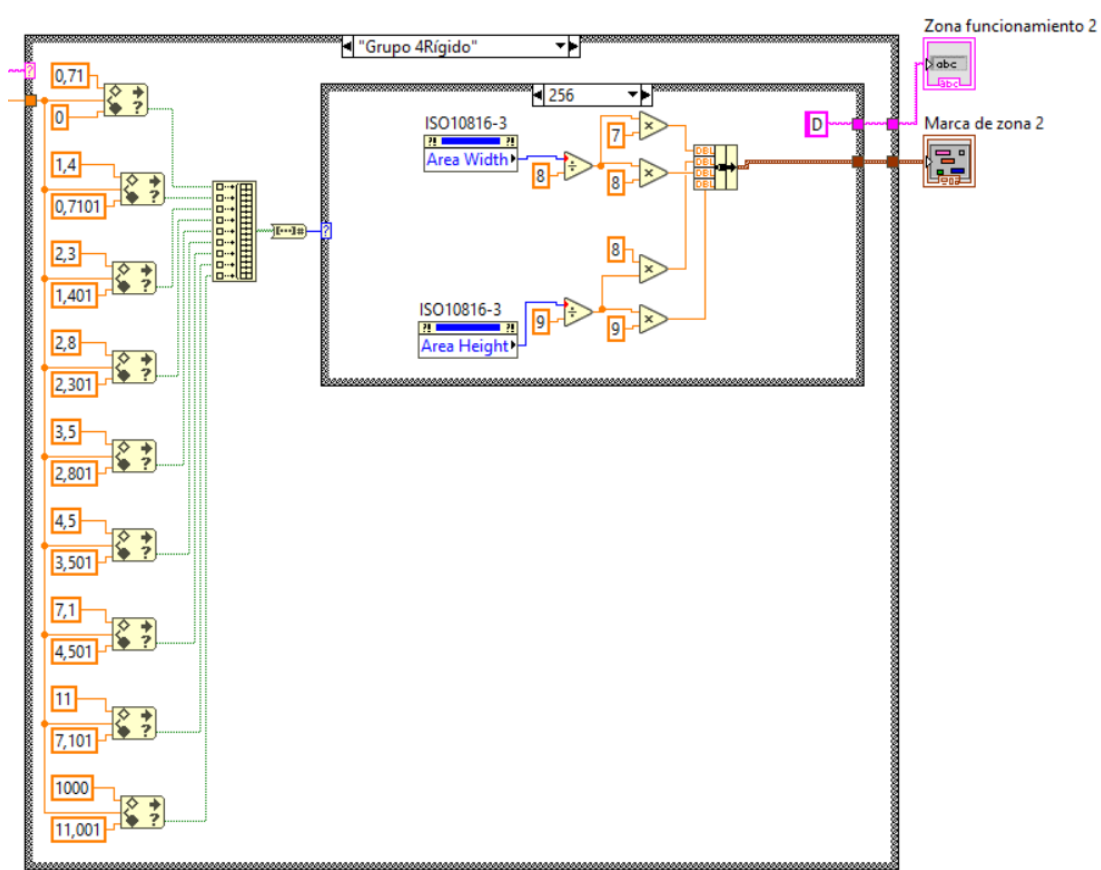


Figura 4.43-Evaluación de la zona de vibración, según la severidad de la misma, y acorde a la norma - Fuente propia

Esta zona de vibración, será a la vez representada de modo visual marcando una zona de vibración donde corresponda, a través de la siguiente función:

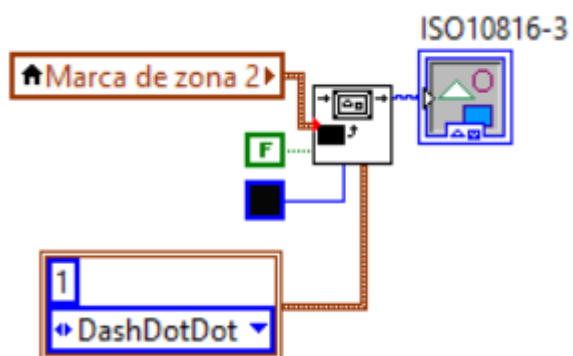


Figura 4.44-Representación gráfica de las zonas de vibración - Fuente propia

4.3.11. GUARDADO DE DATOS Y CREACIÓN DE REPORTE

El primer paso es la designación de las carpetas de guardado de datos, lo cual se efectúa con la rutina siguiente:

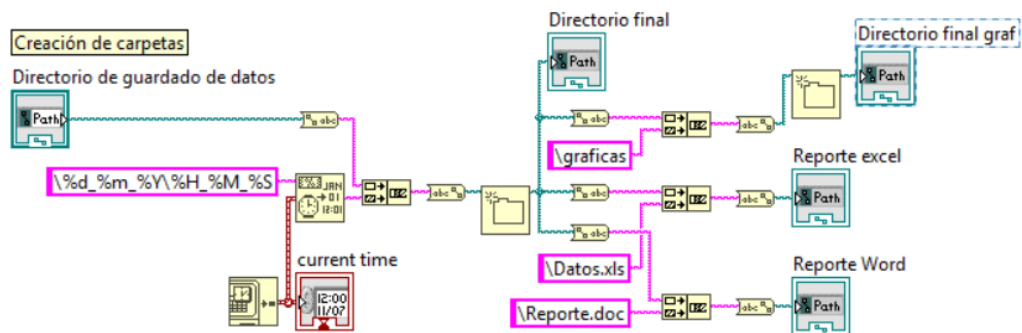


Figura 4.45-Creación de directorios y subdirectorios - Fuente propia

El guardado de los datos en bruto, se realiza en un documento Excel, el cual incluye dos pestañas:

- **Medidas:** Datos numéricos obtenidos en la toma de datos.
- **Datos adicionales:** Datos introducidos mediante el usuario a través de la interfaz del programa.

La parte de guardado de las medidas tiene una arquitectura del siguiente modo:

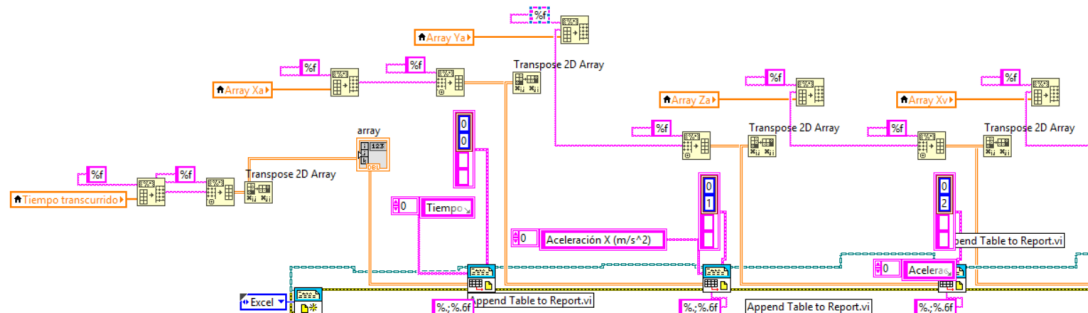


Figura 4.46-Guardado de medidas en el reporte Excel - Fuente propia

De forma que almacena los valores de los arrays de valores de aceleración, velocidad, y desplazamiento, así como el tiempo traspuestos en las diferentes columnas.

Mientras que la parte de guardado de datos adicionales (los cuales son introducidos de modo manual-Operador, equipo comentarios y número de serie), se realiza un chequeo de campos, y si estos contienen algo, lo almacenan en forma de string en donde corresponda:

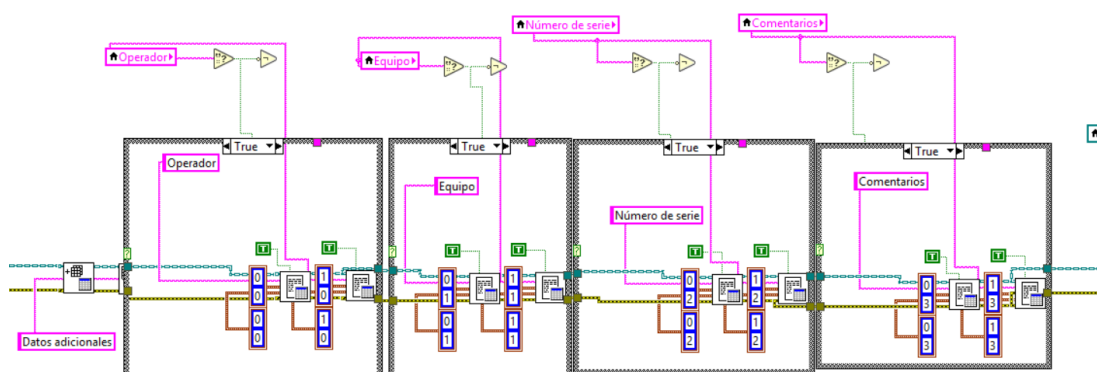


Figura 4.47-Guardado de datos adicionales en el reporte Excel - *Fuente propia*

Para el reporte de los **datos procesados**, se crea un reporte en Word. En primer lugar se establecen las características del documento (apaisado, márgenes y encabezado):

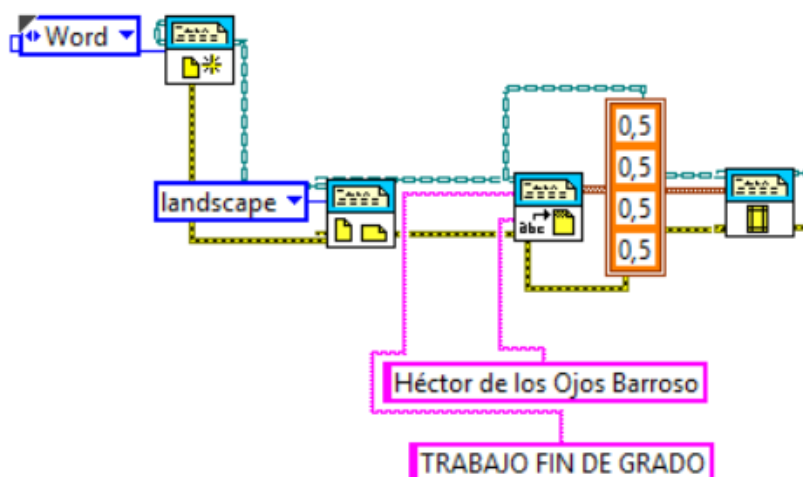


Figura 4.48-Creación de documento Word y configuración del formato - *Fuente propia*

Posteriormente, inserta en el documento la fecha y hora de la realización del reporte:

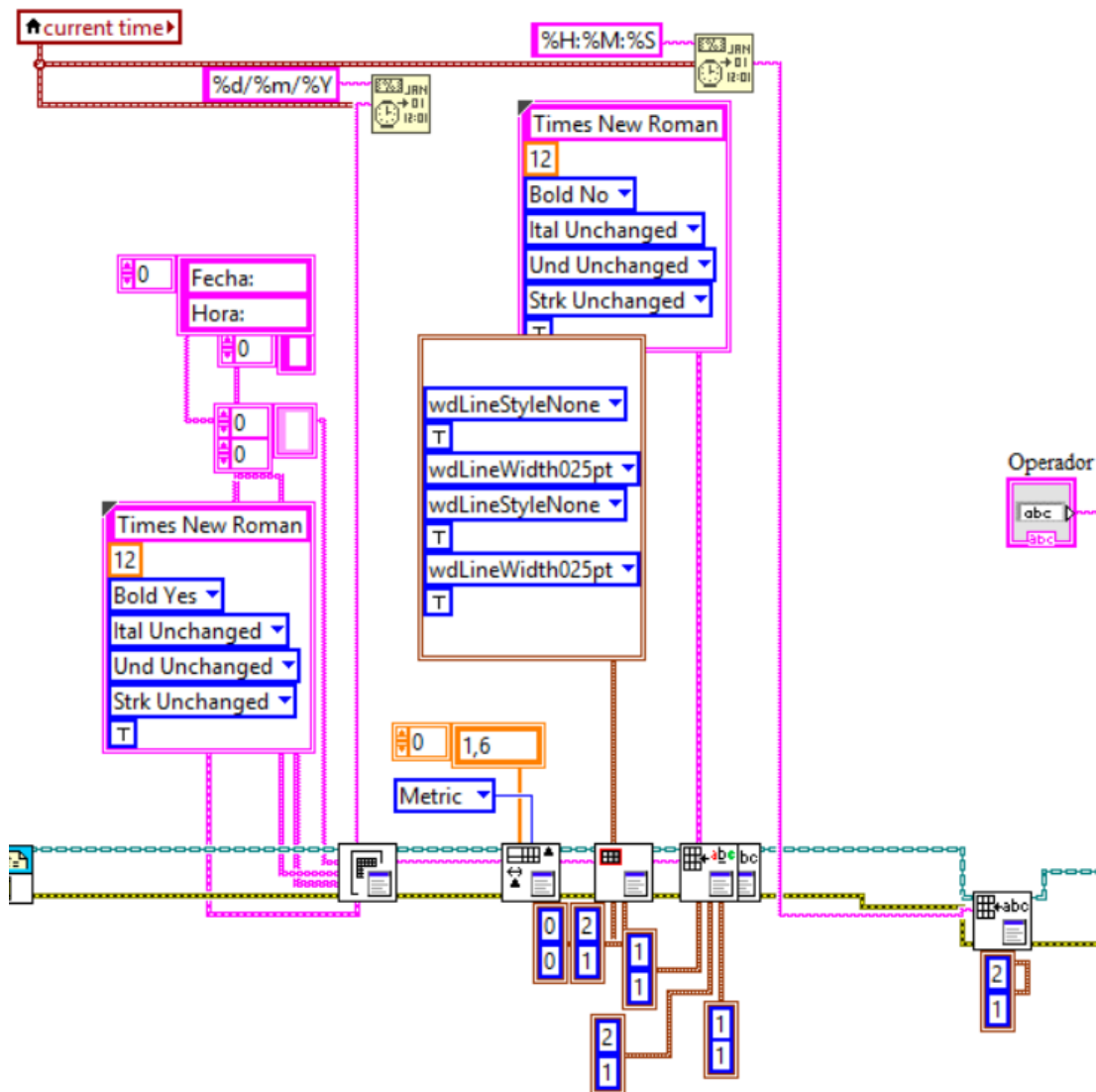


Figura 4.49- Inserción de fecha y hora - *Fuente propia*

Realiza un chequeo de los campos a rellenar manualmente, y en caso de que estén llenos, al igual de el caso del Excel, guardará este valor (el ejemplo mostrado es para la casilla del Operador que toma la medida, siguiendo el mismo procedimiento para la casilla de fabricante, número de serie o

comentarios).

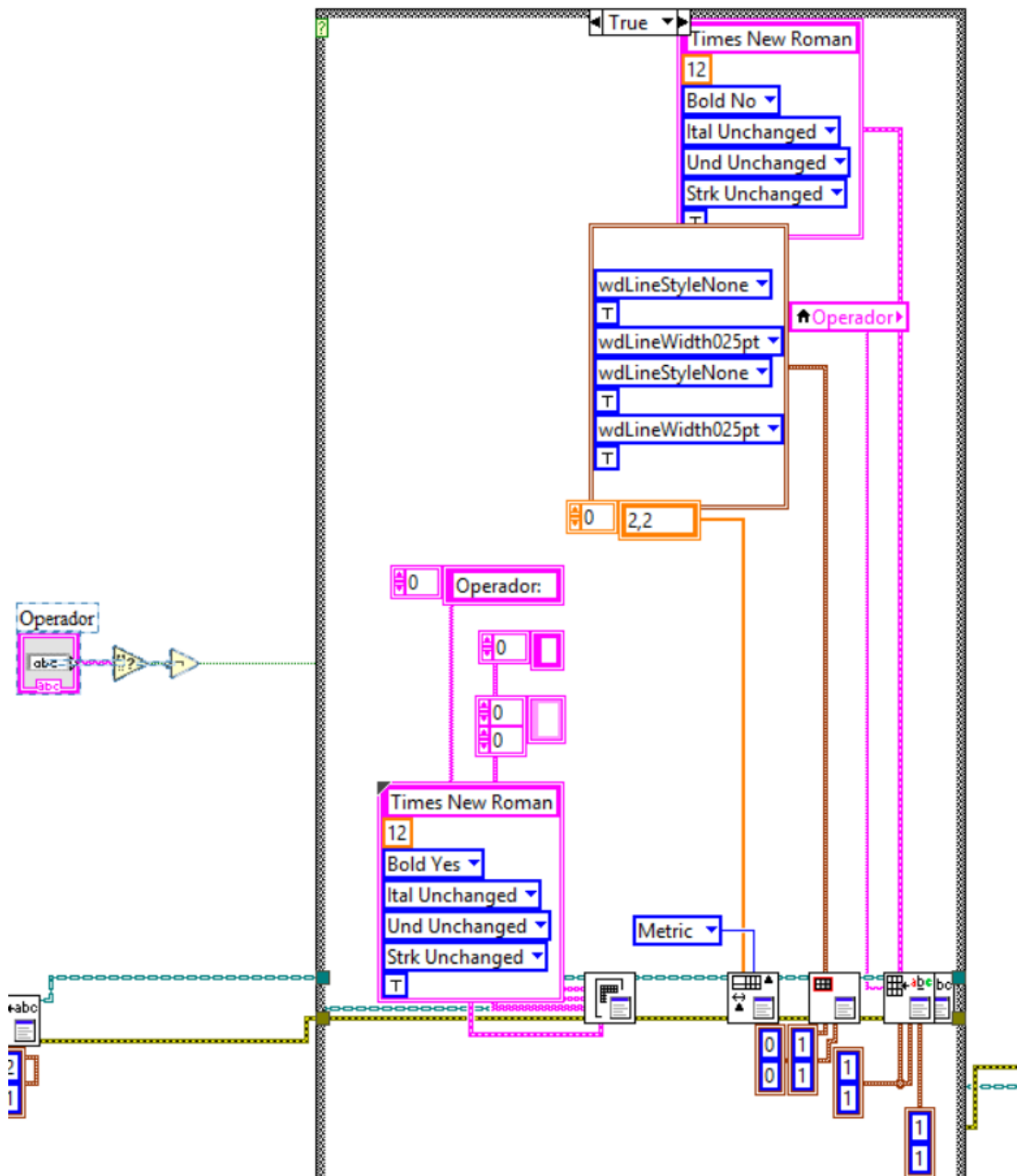


Figura 4.50- Inserción de datos introducidos manualmente - Fuente propia

Hace referencia al tipo de gráficas FFT va a mostrar el reporte, según como se realice el análisis (RMS o pico).

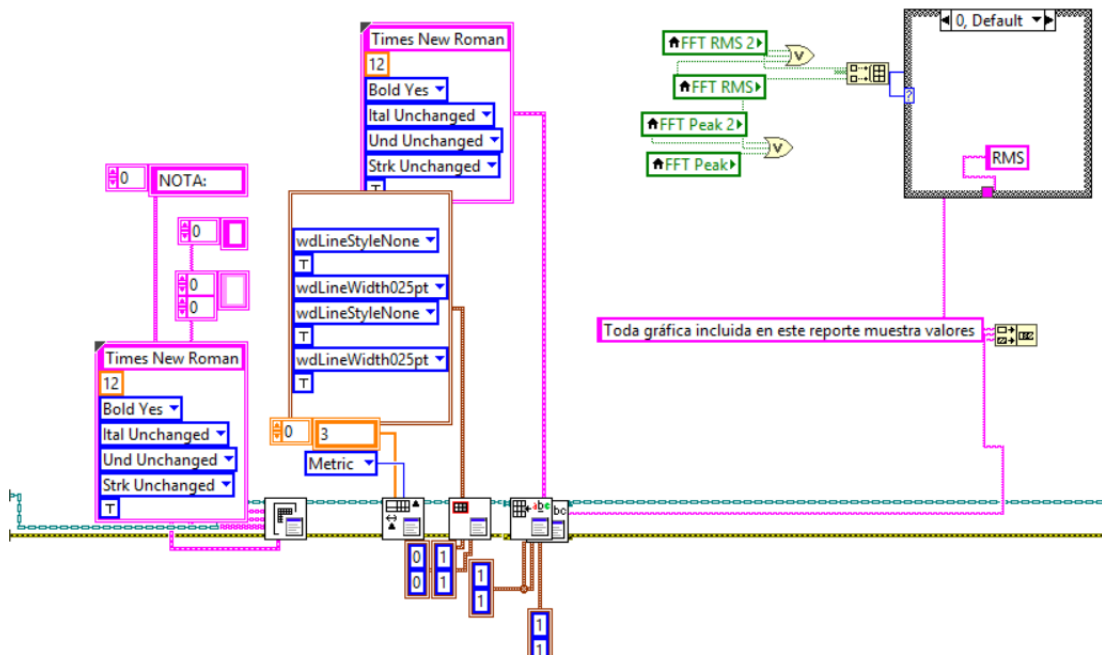


Figura 4.51-Inserción del aviso de tipo de gráficas en el reporte - *Fuente propia*

Posteriormente procede con el guardado de los datos obtenidos (datos promedio, RMS, pico y pico-pico). Esta imagen muestra la rutina en el caso de RMS:

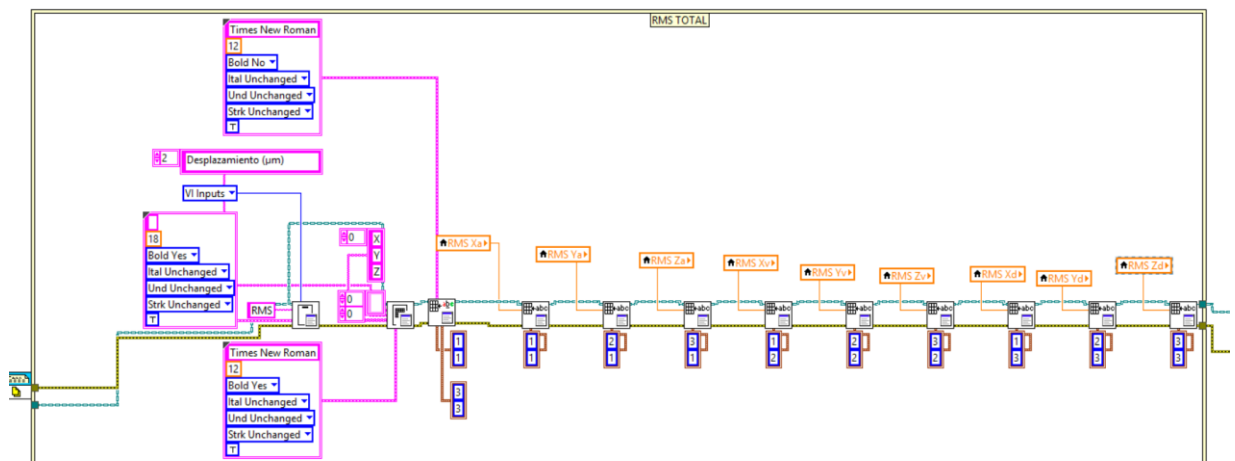


Figura 4.52-Guardado de datos sin filtrar - *Fuente propia*

En el caso de aplicación del filtro de frecuencias, comienza con la comprobación del mismo:

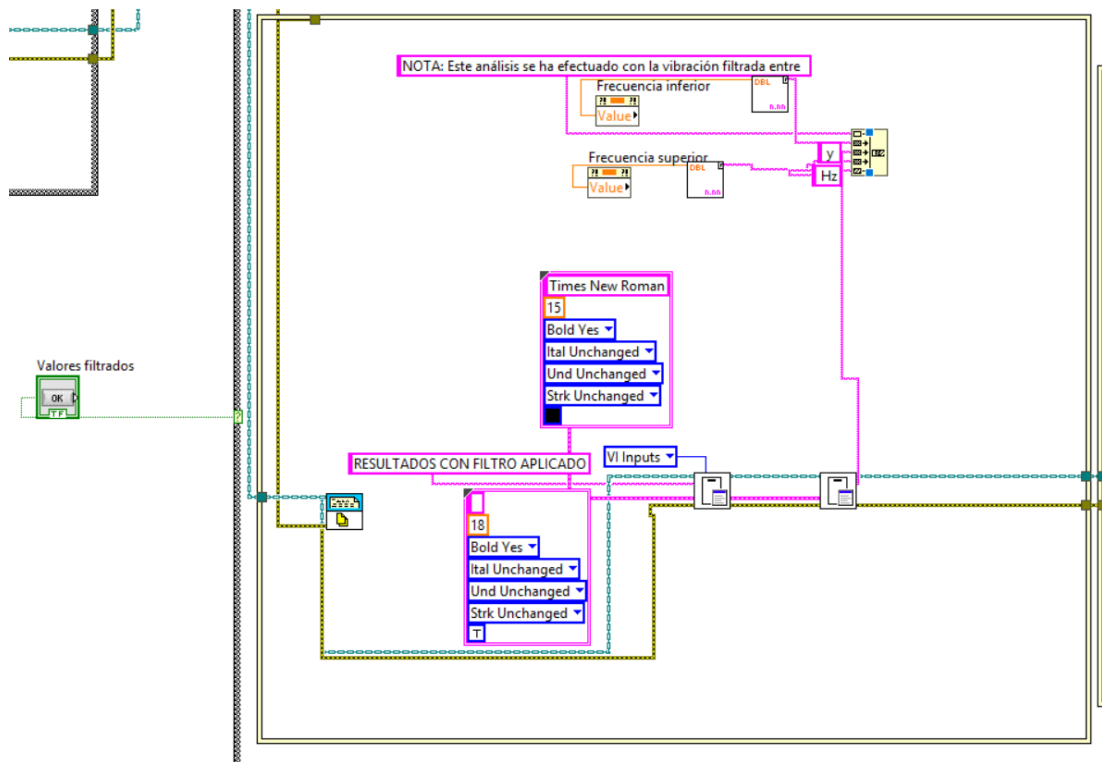


Figura 4.53-Guardado de datos filtrados - Fuente propia

Para proceder a almacenar los valores del mismo modo que sin él, tal como se describe en el anterior paso.

A continuación, presenta en forma de tablas los picos encontrados en el análisis, así como la gráfica espectral correspondiente.

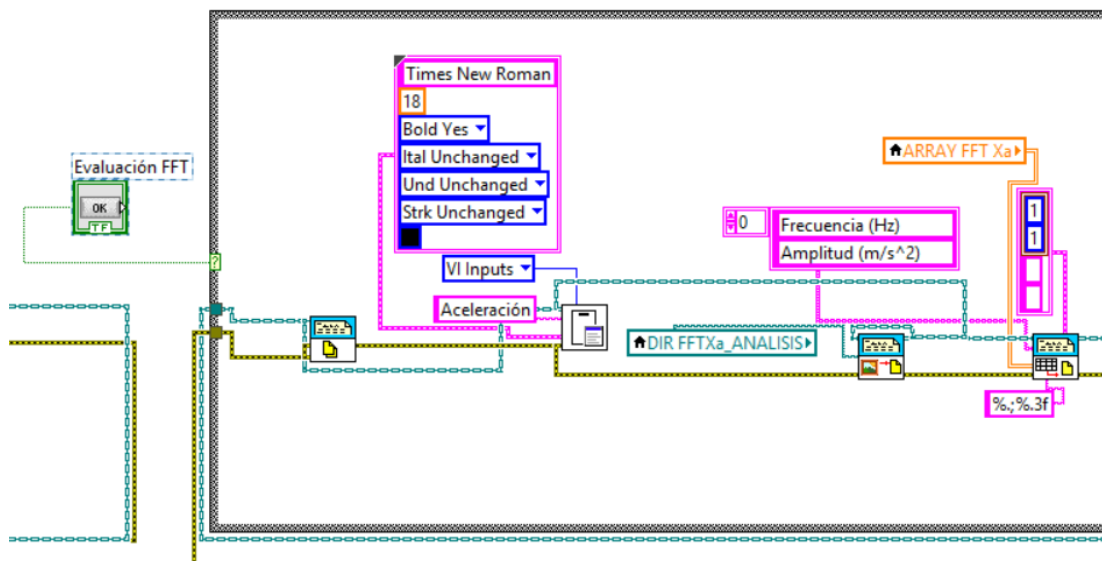


Figura 4.54-Insercción de gráficas FFT de análisis de picos y tablas de valores - Fuente propia

Seguidamente, procede con el análisis de las normas correspondientes (en ambas normas, el procedimiento es prácticamente igual). En primer lugar tiene una rutina de comprobación e inserción de valores de filtrado en el reporte:

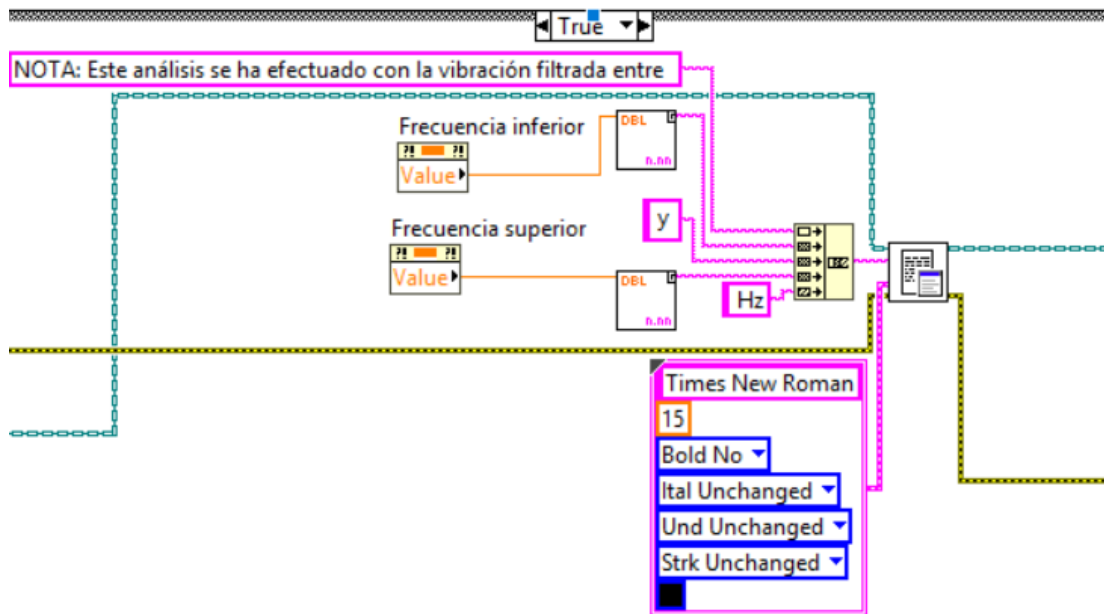


Figura 4.55-Rutina de comprobación de filtrado e introducción de valores del filtro - Fuente propia

Para terminar, indica la zona de vibración en la que se encuentra el equipo y el valor de la vibración, así como el eje en el que es predominante, y el estado del equipo, según concluye la norma específica.

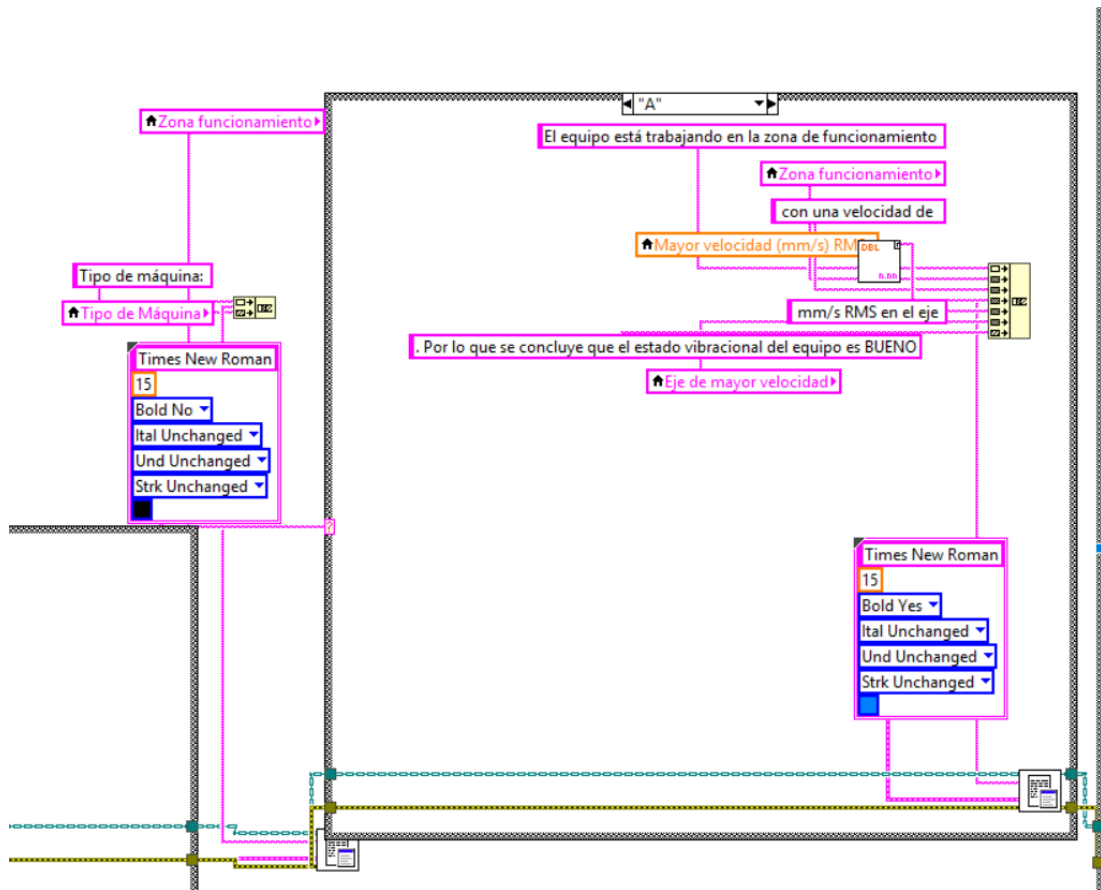


Figura 4.56-Insercción del reporte de la norma ISO - Fuente propia

Continúa con el guardado de las gráficas que escoja el usuario (bien de los datos en dominio de tiempo o del dominio de frecuencias, en cualquiera de los ejes y tanto de aceleración, desplazamiento o velocidad). En la imagen solamente la parte correspondiente a la aceleración en dominio del tiempo:

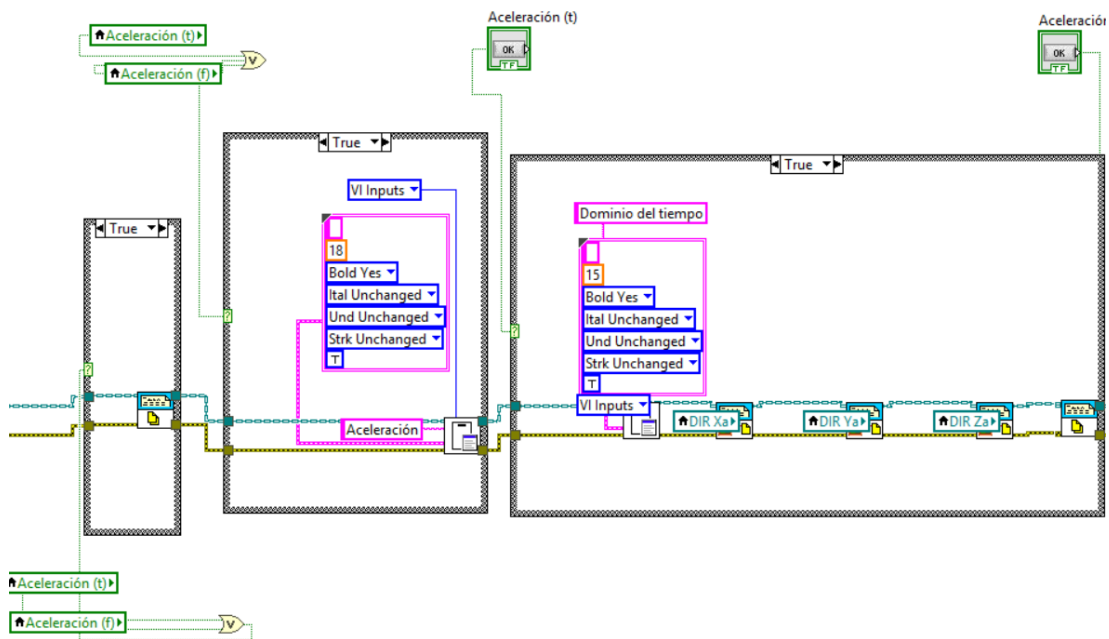


Figura 4.57-Guardado de gráficas en el reporte Word - *Fuente propia*

Adicionalmente, el programa da la posibilidad de un **guardado de todas las gráficas en la carpeta designada:**



Figura 4.58-Guardado de gráficas en su directorio - *Fuente propia*

4.3.12. APERTURA DE DOCUMENTOS

Para la apertura y análisis de los documentos de datos en bruto Excel, guardados con anterioridad, en primer lugar, se extraen los datos del documento Excel de la ubicación correspondiente:

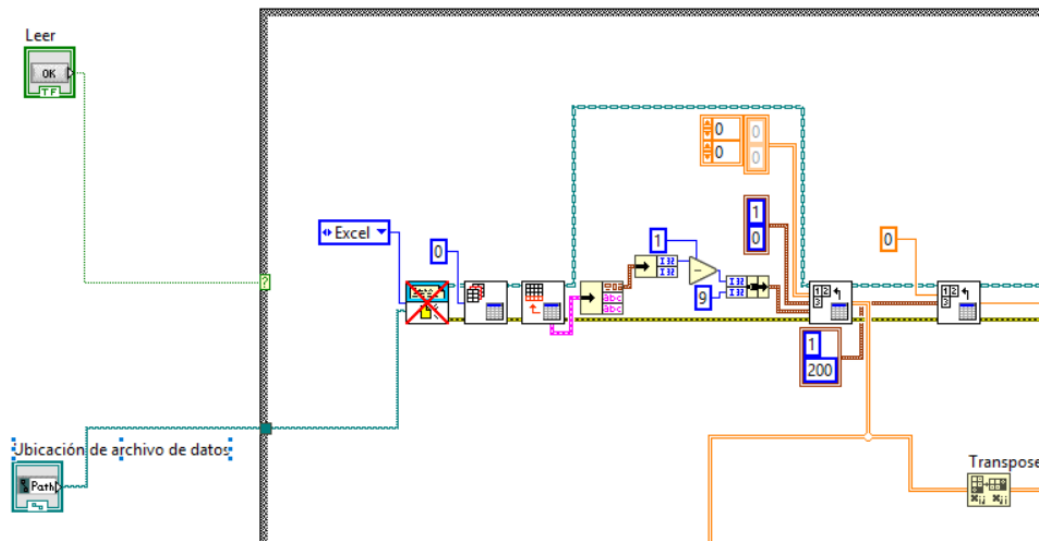


Figura 4.59-Apertura de documentos Excel de medidas - *Fuente propia*

La parte de datos introducida manualmente y que fue guardada, pasará a unos Strings:

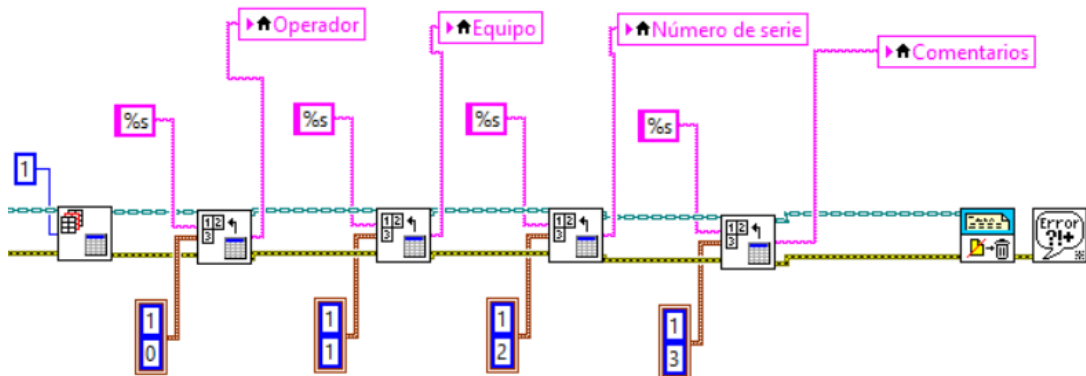


Figura 4.60-Paso de datos de introducción manual a strings - *Fuente propia*

Mientras que la parte de los datos de vibración, tanto de aceleración, velocidad y desplazamiento en todos los ejes, será extraída para generar a partir de ella sus ondas correspondientes en el dominio del tiempo para poder ser evaluada:

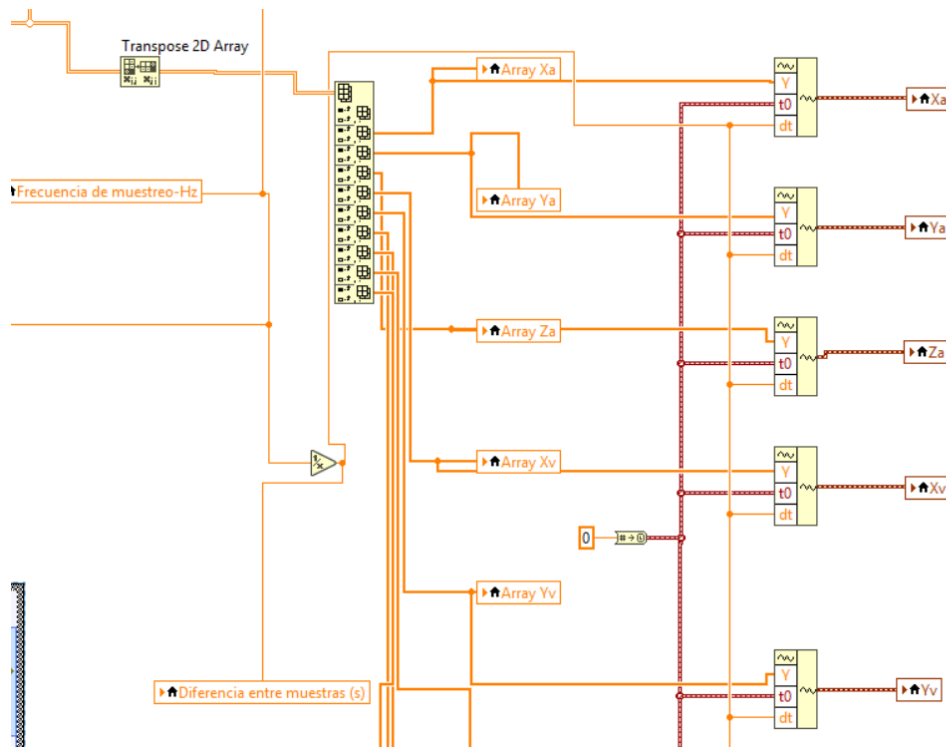


Figura 4.61-Interpretación de datos numéricos y creación de ondas en dominio del tiempo - *Fuente propia*

Así como hay una rutina que indica el momento en el que los datos se han leído y si fue de modo satisfactorio:

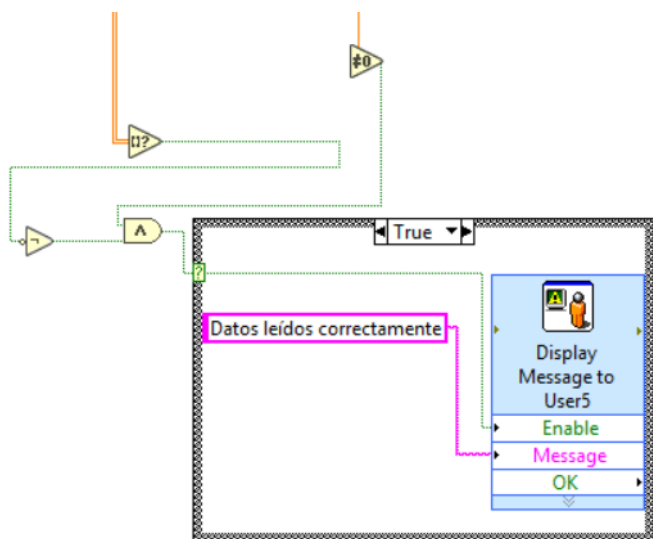


Figura 4.62-Verificación de lectura de datos del documento Excel - *Fuente propia*

4.4. ENCAPSULADO

4.4.1. INTRODUCCIÓN

El conjunto electrónico (incluido el sensor), viene presentado dentro de un encapsulado plástico, con imanes de fijación por su parte inferior. Disponiendo en uno de sus laterales un puerto de conexión micro-USB y dos diodos LED en su parte superior, los cuales indican una transmisión satisfactoria o no de los datos con el PC. En la parte superior de la carcasa dispone asimismo de las flechas indicativas de los ejes de movimiento, así como un orificio para resetear el instrumento de ser preciso.

El tamaño del equipo es de largo 42,61mm, ancho 34,10 mm y de altura 15mm ($\pm 0,5$ mm).

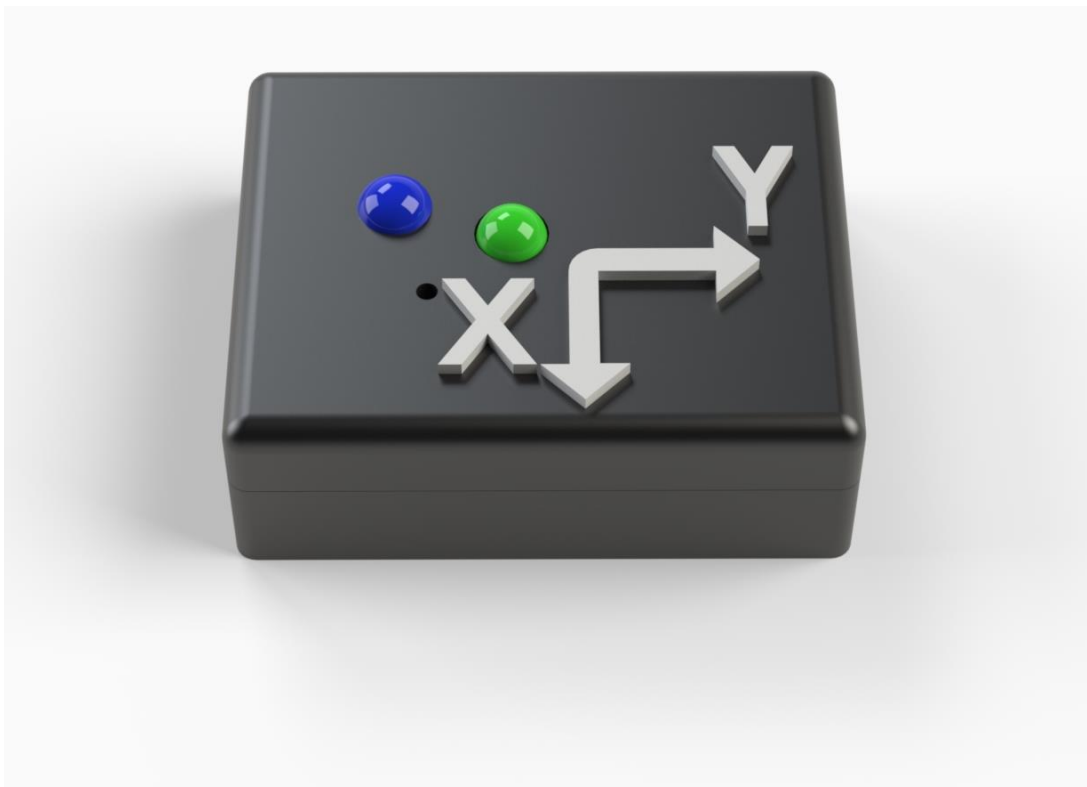


Figura 4.63-Vista exterior del equipo ensamblado - Fuente propia



Figura 4.64-Vista exterior del equipo ensamblado desde su zona de conexión - *Fuente propia*

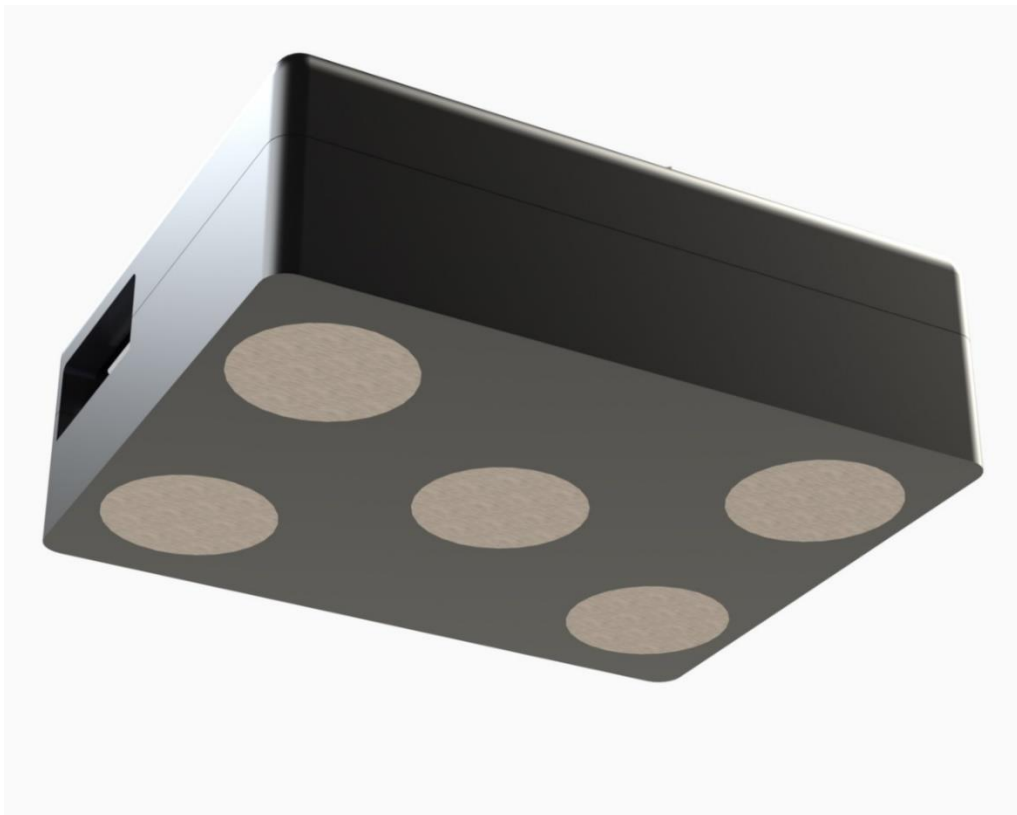


Figura 4.65-Vista inferior del equipo ensamblado - *Fuente propia*

4.4.2. DISEÑO

El diseño se ha realizado de acuerdo al tamaño obtenido en la PCB (38,61mm X 30,10mm), de modo que esta quede encajada en el interior del encapsulado.

Cabe destacar de la parte interior de la carcasa inferior del encapsulado se dispone de 7 orificios de 1,4mm de diámetro y 3mm de profundidad para la sujeción de la PCB mediante los tornillos de fijación descritos en el apartado 3.4.1, los cuales además estarán fijados con pegamento fijador de roscas. Asimismo, hay una amplia zona de soporte en la zona inferior del sensor ADXL345, tal como recomiendan las especificaciones técnicas del sensor (se describe en el apartado 4.2.6 y se ilustra en la Figura 4.13), estando la PCB adherida con epoxi en este punto para evitar interferencias.

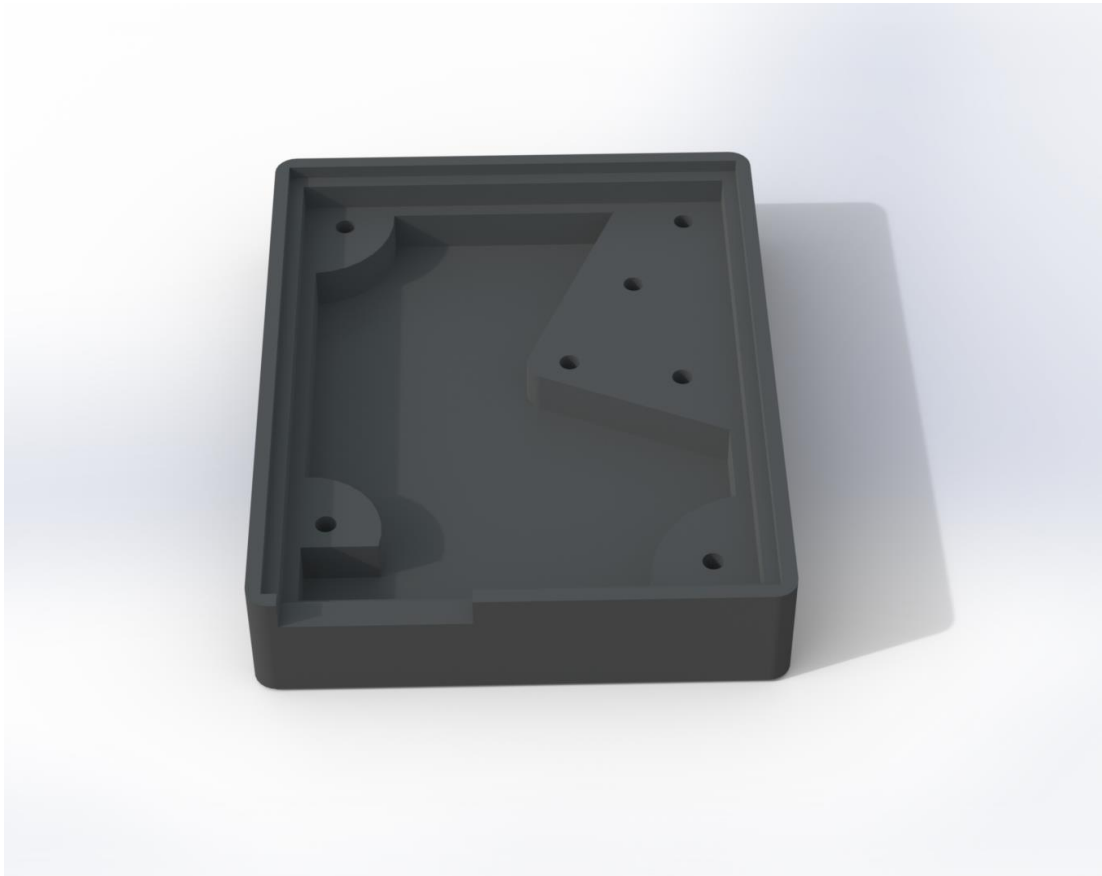


Figura 4.66-Parte inferior de la carcasa protectora - *Fuente propia*

La parte superior de la caja, al igual que la inferior, dispone de un ranurado para encajar ambas partes, las cuales serán adheridas mediante pegamiento tipo epoxi, para evitar posibles interferencias de vibración.

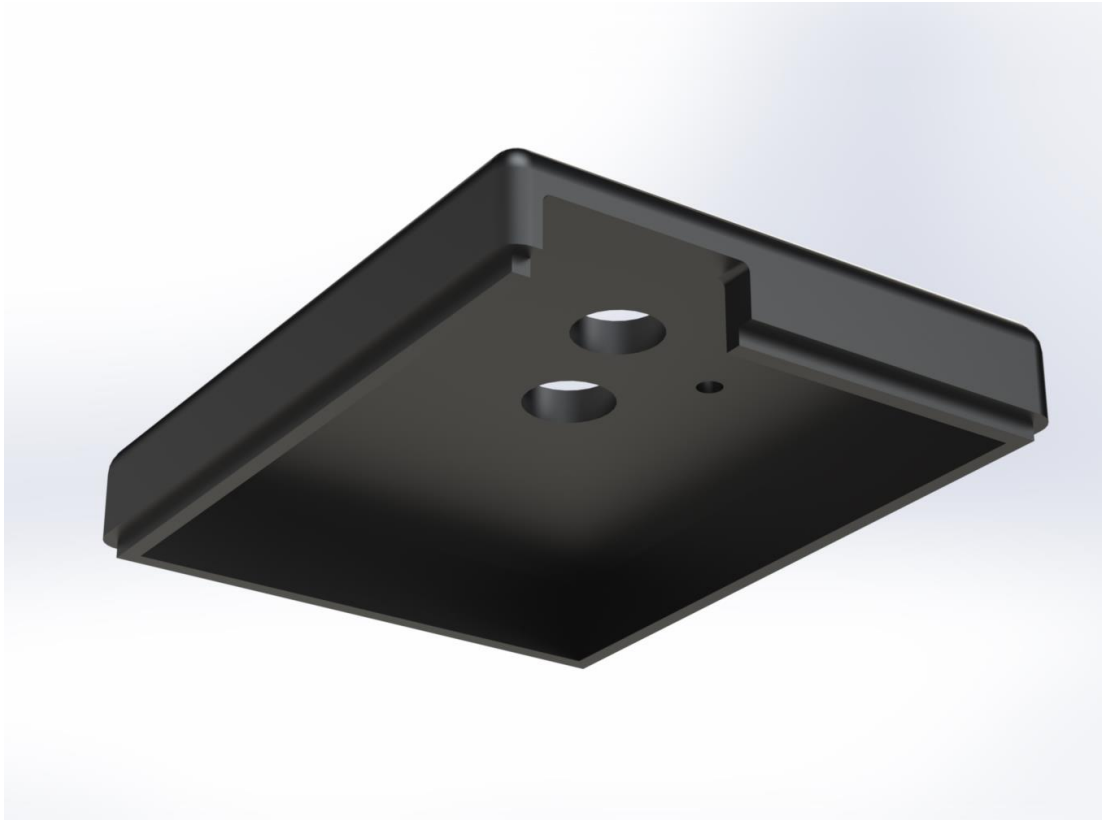


Figura 4.67-Parte superior de la carcasa protectora - *Fuente propia*

Estos diseños son adaptados para la impresión en 3D, del modo que se describe en el apartado 5.4.

Según especifica el fabricante del plástico, la densidad del mismo es de $1,1\text{g/cm}^3$, por lo que introduciendo este valor en los valores de propiedades de Solidworks, se obtienen los pesos de las diferentes partes:

Masa = 6.04 gramos

Volumen = 5492.05 milímetros cúbicos

Área de superficie = 5079.16 milímetros cuadrados

Figura 4.68-Propiedades de la carcasa inferior - *Fuente propia*

Masa = 4.39 gramos

Volumen = 3992.28 milímetros cúbicos

Área de superficie = 4714.93 milímetros cuadrados

Figura 4.69-Propiedades de la carcasa superior - *Fuente propia*

Teniendo por ello el conjunto de carcasas una masa total de 10,43 gramos.

4.5. CALIBRACIÓN ANTES DE PUESTA EN SERVICIO

Una vez instalada y fijada completamente la PCB en el encapsulado, se realiza un testeo sobre una **superficie 100% horizontal**, para corregir posibles pequeñas desviaciones del sensor (a la hora de la soldadura por ejemplo).

Este ajuste sería del modo siguiente:

En primer lugar, se toman 10 medidas, a través de cualquier monitor serie, conectando el instrumento al PC y con una velocidad de transmisión de 2 Megabaudios-En este caso, se ha tomado con RealTerm:

```
X-1Y-3Z30
X-1Y-3Z30
X-1Y-3Z30
X-1Y-3Z30
X0Y-3Z31
X-1Y-4Z31
X0Y-2Z31
X-1Y-4Z31
X-1Y-2Z31
X-1Y-3Z30
```

Figura 4.70-Trama de datos leídas por puerto serie sin calibración - Fuente propia

Realizando el promedio se obtiene:

X=-0.8

Y=-3

Z=30.5

Y, teniendo en cuenta que en el eje Z, el valor ha de ser de 1g, o lo que es lo mismo 32LSB, así como en el resto de ejes de 0, se calcula la diferencia al valor de referencia:

Offset X=0-(-0,8)=0,8

Offset Y=0-(-3)=3

Offset Z=32-30,5=1,5

El valor a introducir en los registros del offset ha de ser el doble del obtenido con los cálculos anteriores, redondeando al número entero más próximo.

De modo que:

$$\text{OFSX} = 0,8 \cdot 2 = 1,6 \approx 2$$

$$\text{OFSY} = 3 \cdot 2 = 6$$

$$\text{OFSZ} = 1,5 \cdot 2 = 3$$

Address		Name	Type	Reset Value	Description
Hex	Dec				
0x1E	30	OFSX	R/W	00000000	X-axis offset
0x1F	31	OFSY	R/W	00000000	Y-axis offset
0x20	32	OFSZ	R/W	00000000	Z-axis offset

Figura 4.71-Registros de memoria para offset de los ejes en el acelerómetro ADXL345BCCZ^[21]

Por lo que se resubiría todo el código del programa, a través del USB, modificando los registros OFSX, OFSY y OFSZ del acelerómetro:

```
digitalWrite(CS, LOW);
SPI.transfer(0x1E); //Registro del ADXL345 de desfase en el eje X
SPI.transfer(2); //Desfase en eje X
digitalWrite(CS, HIGH);

digitalWrite(CS, LOW);
SPI.transfer(0x1F); //Registro del ADXL345 de desfase en el eje Y
SPI.transfer(6); //Desfase en eje Y
digitalWrite(CS, HIGH);

digitalWrite(CS, LOW);
SPI.transfer(0x20); //Registro del ADXL345 de desfase en el eje Z
SPI.transfer(3); //Desfase en eje Z
digitalWrite(CS, HIGH);
```

Y obteniendo ahora una salida:

```
X0Y0Z32
X0Y-1Z31
X0Y0Z33
X0Y0Z32
X1Y0Z31
X0Y-1Z30
X0Y1Z33
X0Y0Z33
X1Y0Z32
X0Y0Z31
```

Figura 4.72-Trama de datos leídas por puerto serie sin calibración

TRABAJO FIN DE GRADO
INGENIERÍA MARÍTIMA

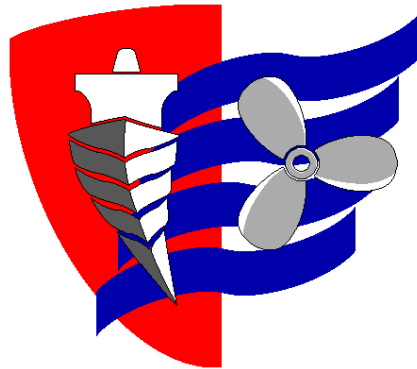
Claramente más cercana a los valores de referencia.

$$X=0,2\approx 0$$

$$Y=-0.1\approx 0$$

$$Z=31,8\approx 32$$

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



FABRICACIÓN

5. FABRICACIÓN

En este apartado, se encuentran tanto los planos del circuito impreso, así como de la caja protectora. Y el programa del microcontrolador. El programa de PC, puede encontrarse en el CD-ROM compilado en formato ejecutable en Windows (directorio \Software\COMPILADO), así como sin compilar, para ser abierto en LabVIEW (directorio \Software). No se encuentra en este documento completo, debido a que su tamaño y la cantidad de bucles, lo imposibilitan.

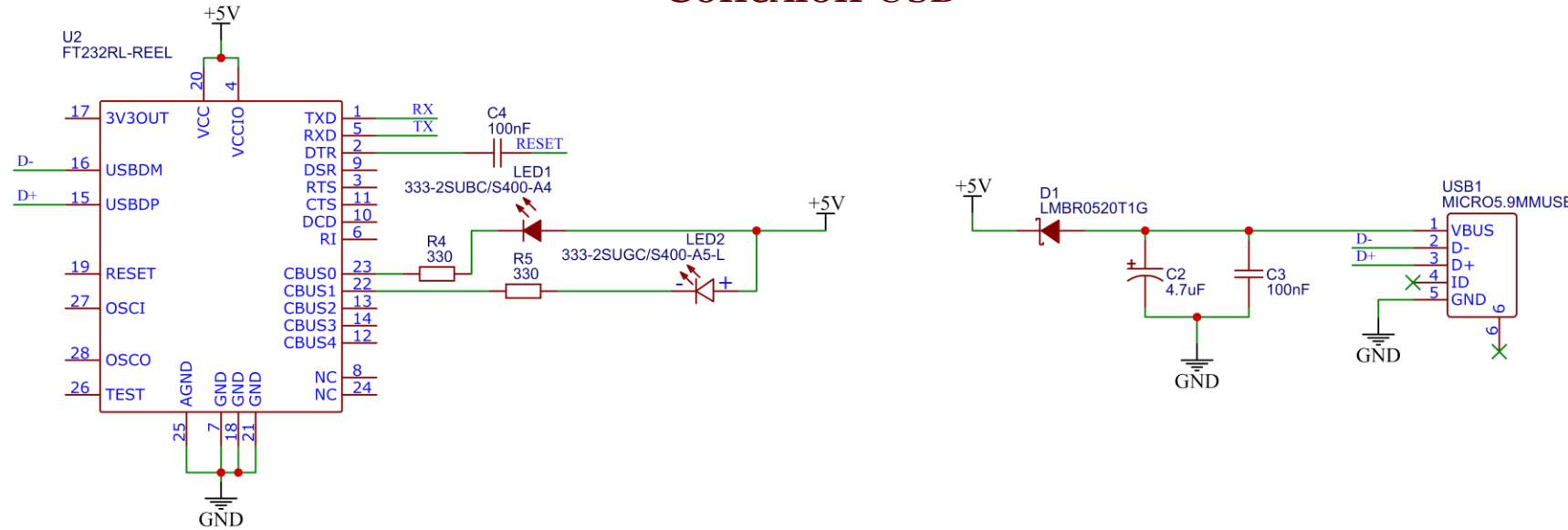
5.1. PLANOS

Los planos se dividen en los grupos siguientes:

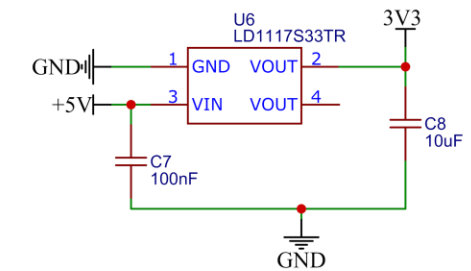
- Circuito:
 - **5.1-001**-Esquema general del circuito
 - **5.1-002**-Circuito impreso: Pistas de la cara superior
 - **5.1-003**-Circuito impreso: Pistas de la cara inferior
 - **5.1-004**-Circuito impreso: Agujeros
 - **5.1-005**-Circuito impreso: Serigrafía de la PCB en la cara superior
- Caja protectora:
 - **5.1-006**-Carcasa superior
 - **5.1-007**-Carcasa inferior
 - **5.1-008**-Ensamblaje

El listado completo de componentes se encuentra en el apartado 5.2.

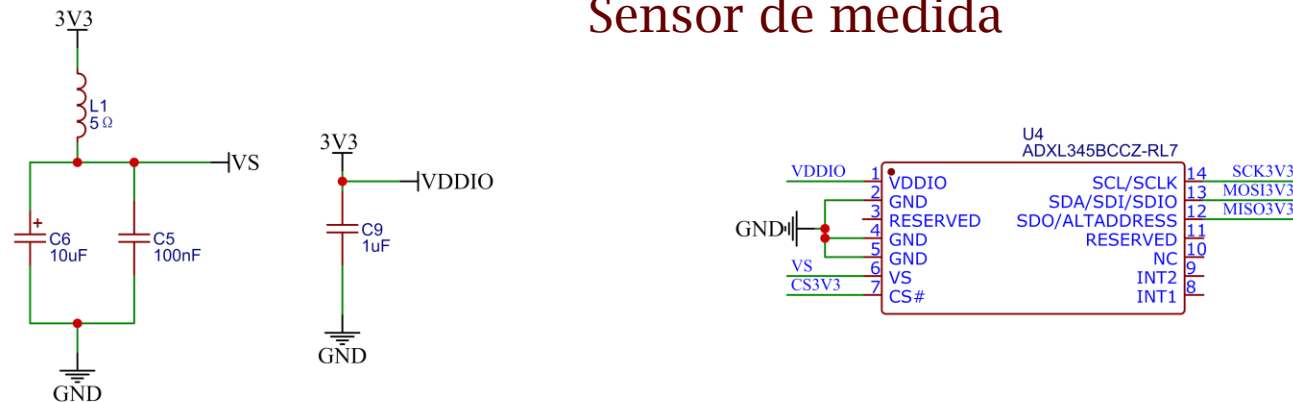
Conexión USB



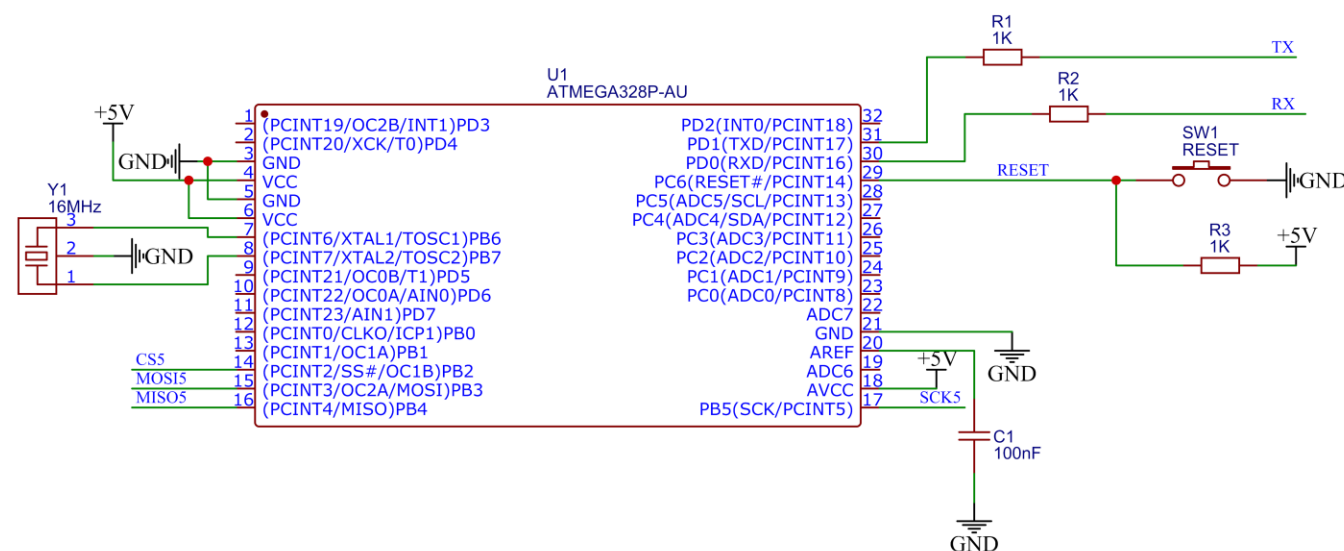
Regulación de tensión



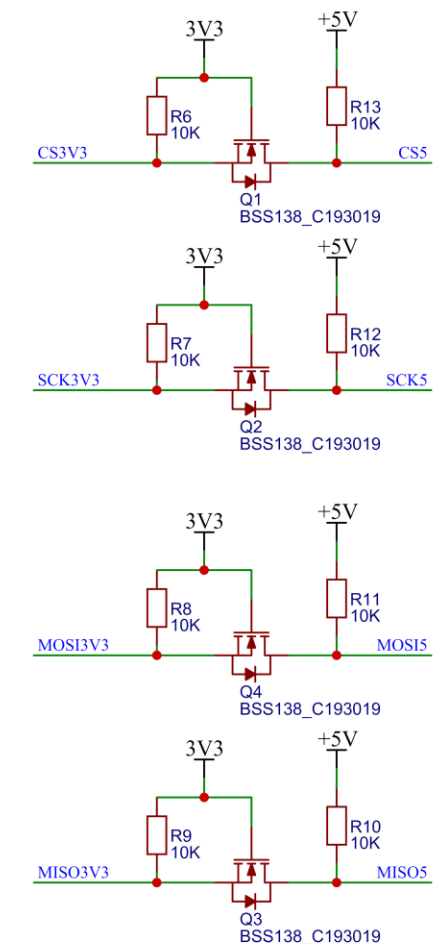
Sensor de medida



Microcontrolador



Conversión de niveles lógicos



DISEÑO Y DESARROLLO DE UN EQUIPO Y SOFTWARE PARA LA MEDIDA Y ANÁLISIS DE VIBRACIONES EN MÁQUINAS

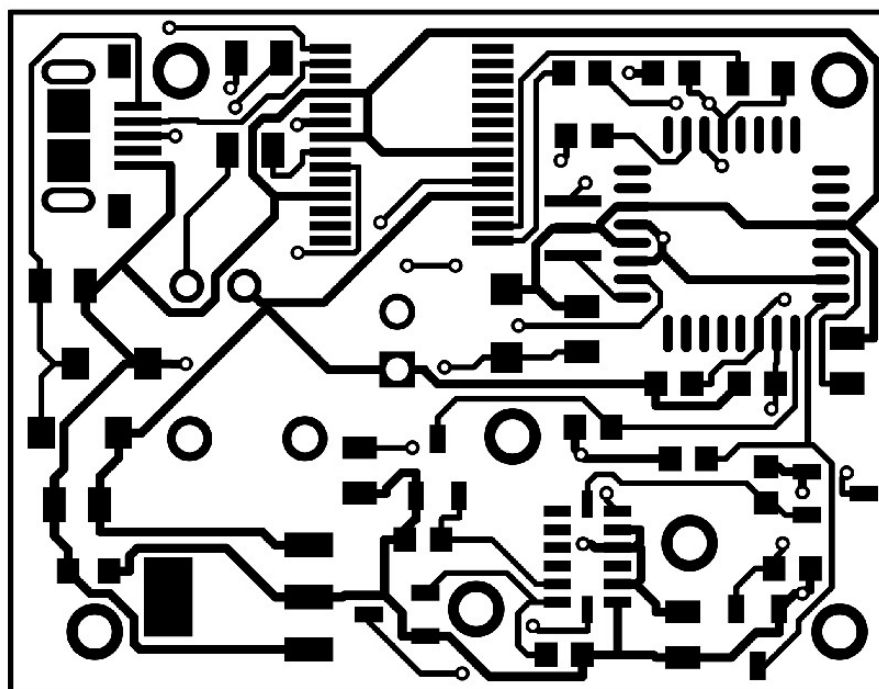
Descripción:
Circuito electrónico

AUTOR:
Héctor de los Ojos Barroso

Plano número:
5.1-001

Fecha:
1 de Abril de 2020

Escala:
--/--



**Escuela
Técnica
Superior
de Náutica**

DISEÑO Y DESARROLLO DE UN EQUIPO Y SOFTWARE PARA LA MEDIDA Y ANÁLISIS DE VIBRACIONES EN MÁQUINAS

Descripción:

Circuito Impreso-Cara superior

AUTOR:

Héctor de los Ojos Barroso

Plano número:

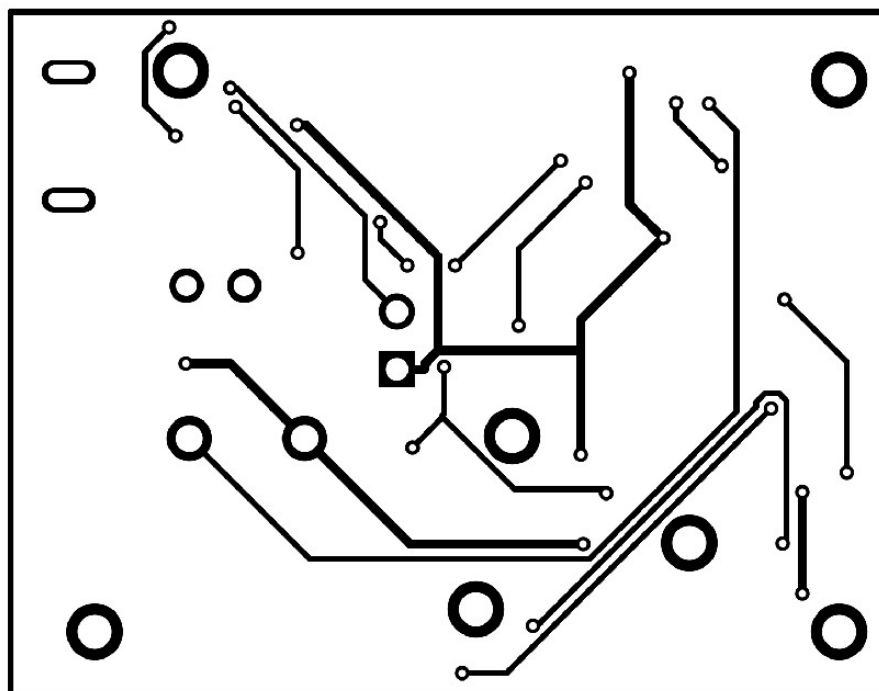
5.1-002

Fecha:

1 de Abril de 2020

Escala:

3:1



**Escuela
Técnica
Superior
de Náutica**

DISEÑO Y DESARROLLO DE UN EQUIPO Y SOFTWARE PARA LA MEDIDA Y ANÁLISIS DE VIBRACIONES EN MÁQUINAS

Descripción:

Circuito Impreso-Cara Inferior

AUTOR:

Héctor de los Ojos Barroso

Plano número:

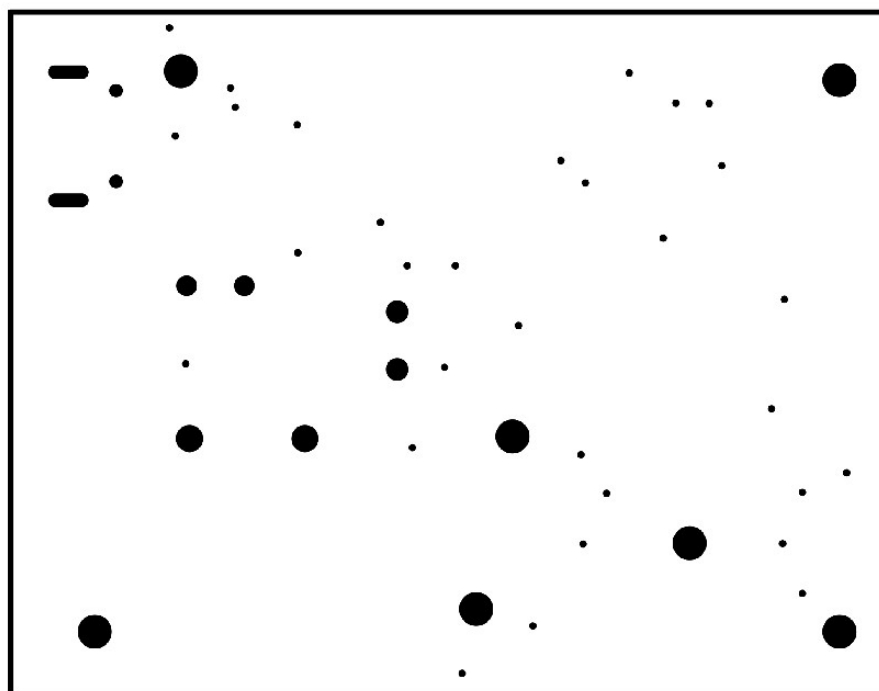
5.1-003

Fecha:

1 de Abril de 2020

Escala:

3:1



**Escuela
Técnica
Superior
de Náutica**

DISEÑO Y DESARROLLO DE UN EQUIPO Y SOFTWARE PARA LA MEDIDA Y ANÁLISIS DE VIBRACIONES EN MÁQUINAS

Descripción:

Circuito Impreso-Agujeros

AUTOR:

Héctor de los Ojos Barroso

Plano número:

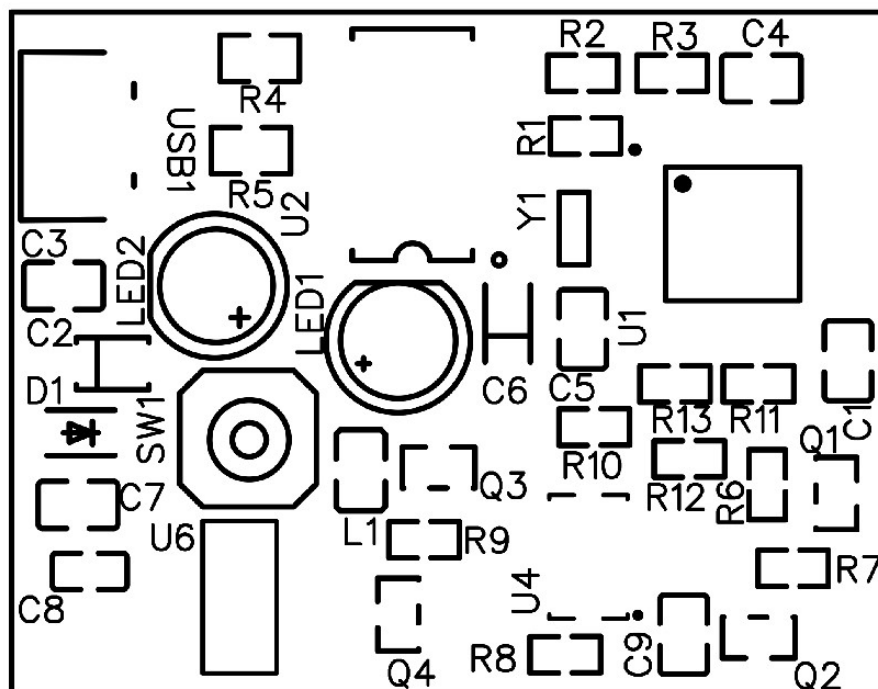
5.1-004

Fecha:

1 de Abril de 2020

Escala:

3:1



Escuela
Técnica
Superior
de Náutica

DISEÑO Y DESARROLLO DE UN EQUIPO Y SOFTWARE PARA LA MEDIDA Y ANÁLISIS DE VIBRACIONES EN MÁQUINAS

Descripción:

Circuito Impreso-Serigrafía PCB superior

AUTOR:

Héctor de los Ojos Barroso

Plano número:

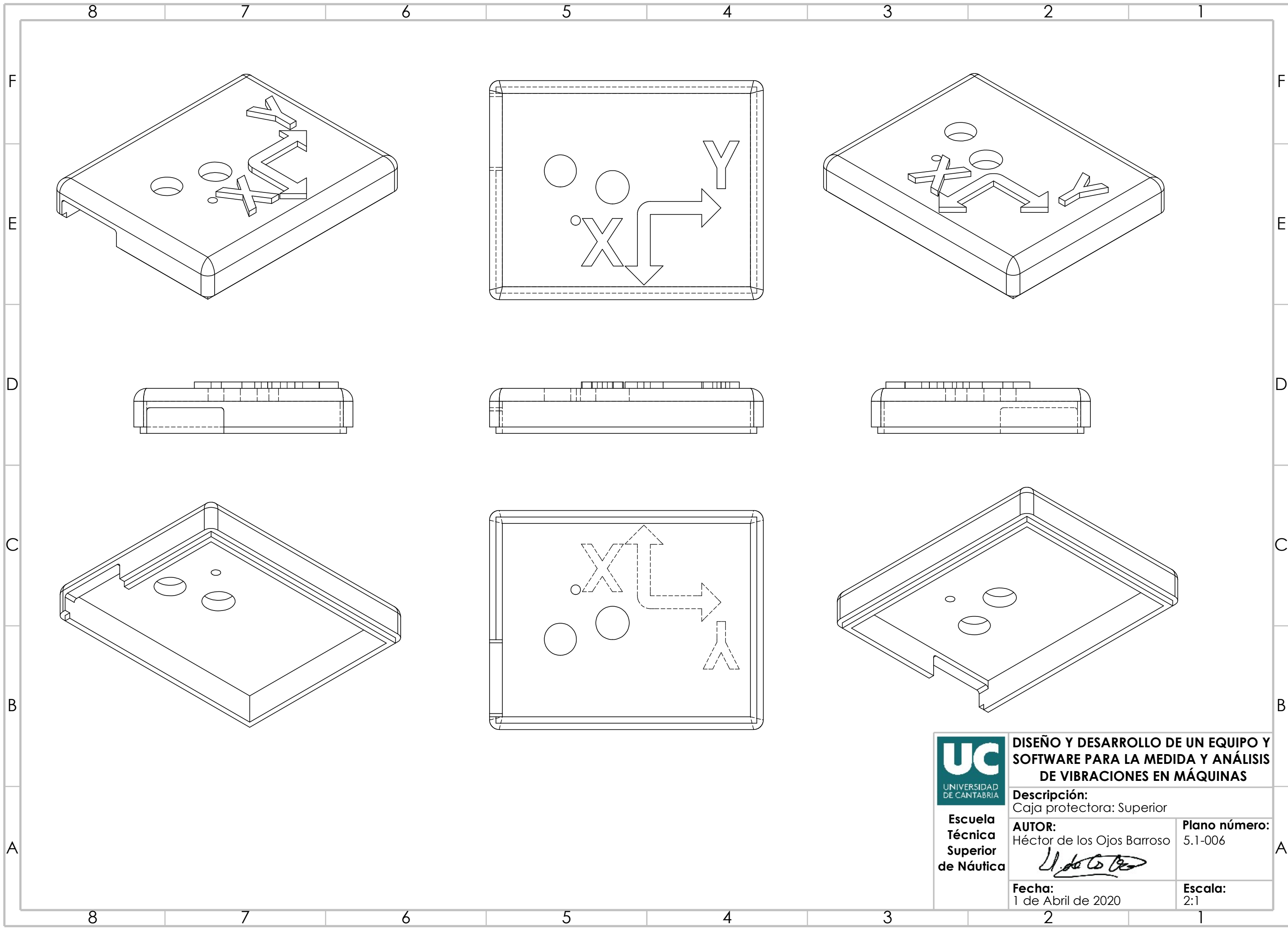
5.1-005

Fecha:

1 de Abril de 2020

Escala:

3:1



Escuela
Técnica
Superior
de Náutica

**DISEÑO Y DESARROLLO DE UN EQUIPO Y
SOFTWARE PARA LA MEDIDA Y ANÁLISIS
DE VIBRACIONES EN MÁQUINAS**

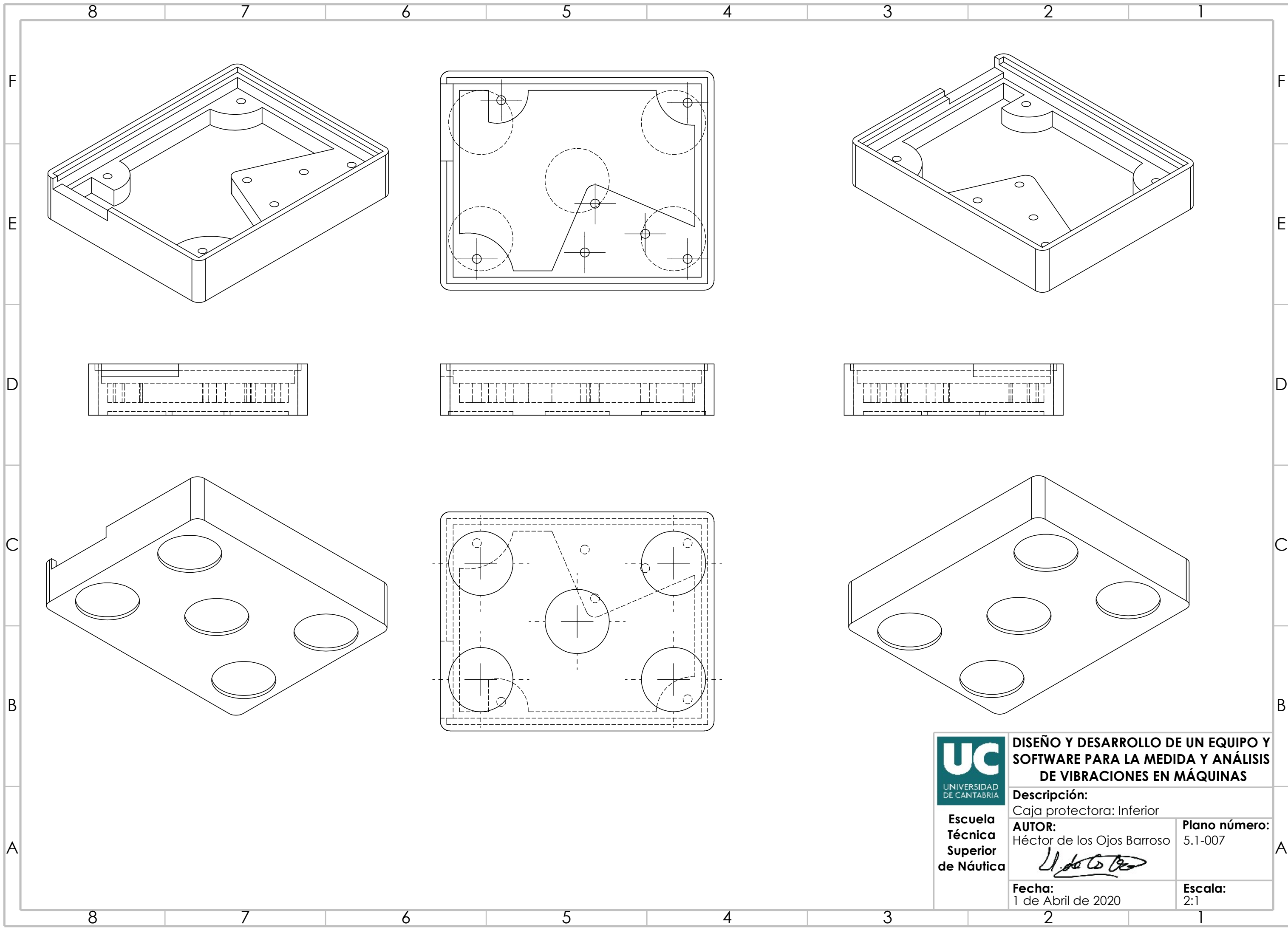
Descripción:
Caja protectora: Superior

AUTOR:
Héctor de los Ojos Barroso

Plano número:
5.1-006

Fecha:
1 de Abril de 2020

Escala:
2:1



Escuela
Técnica
Superior
de Náutica

**DISEÑO Y DESARROLLO DE UN EQUIPO Y
SOFTWARE PARA LA MEDIDA Y ANÁLISIS
DE VIBRACIONES EN MÁQUINAS**

Descripción:

Caja protectora: Inferior

AUTOR:

Héctor de los Ojos Barroso

Plano número:

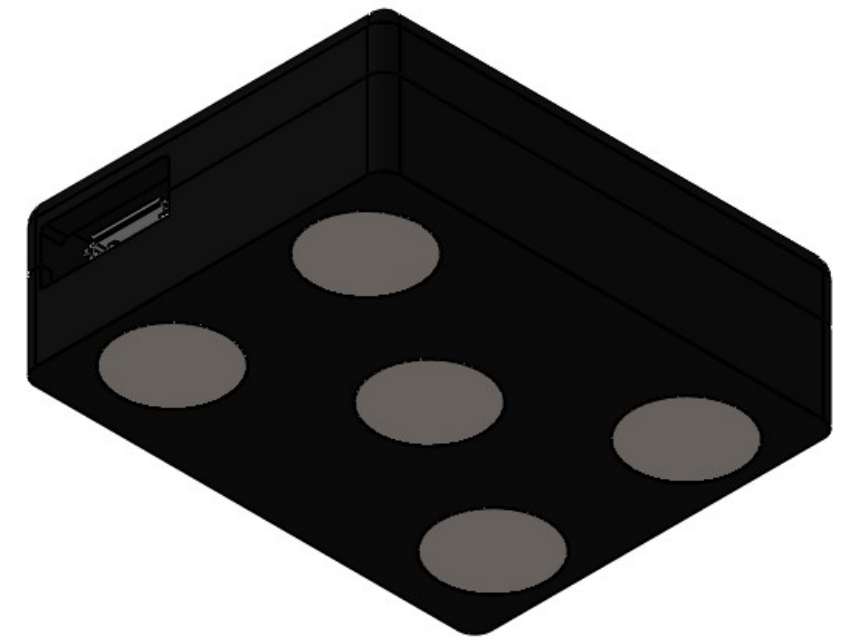
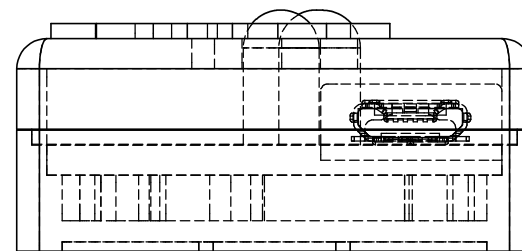
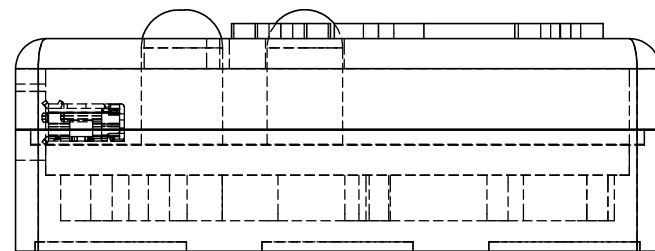
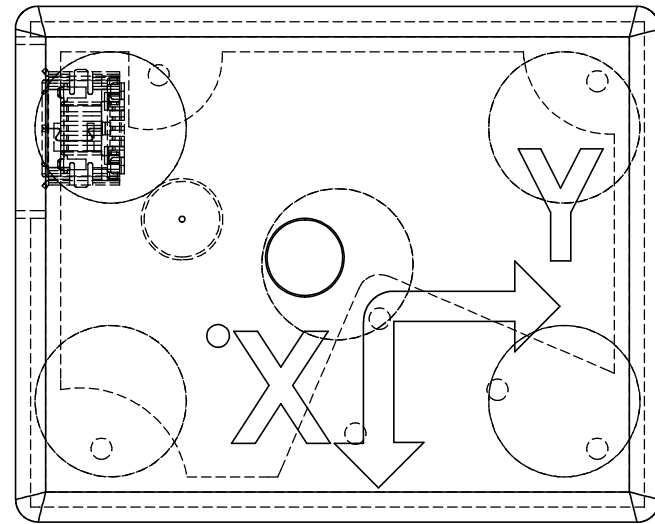
5.1-007

Fecha:

1 de Abril de 2020

Escala:

2:1



Escuela
Técnica
Superior
de Náutica

DISEÑO Y DESARROLLO DE UN EQUIPO Y SOFTWARE PARA LA MEDIDA Y ANÁLISIS DE VIBRACIONES EN MÁQUINAS

Descripción:
Caja protectora ensamblada

AUTOR:
Héctor de los Ojos Barroso

Plano número:
5.1-008

Fecha:
1 de Abril de 2020

Escala:
2:1

5.2. LISTA DE COMPONENTES ELECTRÓNICOS

Referencia	Elemento	Fabricante	Modelo
Y1	Resonador de 16MHz	muRata	CSTCE16M0V53-R0
U6	Regulador de tensión	STMicroelectronics	LD1117S33TR
USB1	Conector Micro-Usb Hembra	SHOU HAN	MICRO5.9mmusb
R3,R2,R1	Resistencia SMD de 1kΩ	ROHM Semicon	ESR03EZPJ102
D1	Diodo Schottky	LRC	LMBR0520T1G
C8	Condensador cerámico 10μF	Murata Electronics	GRM188B31A106ME69D
C7,C4,C5,C1,C3	Condensador cerámico 100nF	TORCH	CT41G-0805-2X1-50V-0.1uF-K(N)
SW1	Pulsador	PANASONIC	EVQ22705R
C6	Condensador de tantalio 10μF	AVX	TAJA106M016RNJ
L1	Nucleo deferrita de 5Ω	FH	CBM201209U050T
LED2	Diodo LED 5mm Verde	Everlight Elec	333-2SUGC/S400-A5-L
C9	Condensador cerámico 1μF	MuRata	GRM219R71E105KA88D
U4	Sensor acelerómetro	ADI	ADXL345BCCZ-RL7
LED1	Diodo LED 5mm Azul	Everlight Elec	333-2SUBC/S400-A4
C2	Condensador de tantalio SMD de 4,7μF	Shenzhen Zhenhua XinYun Elec	CA45A-A-16V-4.7uF-K
U2	Driver USB	FTDI	FT232RL-REEL
R4,R5	Resistencia SMD de 330Ω	UniOhm	TC0525D3300T5E
Q3,Q4,Q2,Q1	Transistor MOSFET	AnBon	BSS138
R11,R10,R9,R12,R13,R7,R6,R8	Resistencia SMD de 10kΩ	PANASONIC	ERJPA3F1002V
U1	Microcontrolador	MICROCHIP	ATMEGA328P-AU

Tabla 5.1 -Listado de componentes electrónicos - Fuente propia

5.3. ARCHIVOS DE FABRICACIÓN DE LA PCB

En el CD-ROM, se adjuntan los documentos necesarios para la fabricación de la PCB en formato gerber RS-274X. Este formato es el más extendido para la fabricación de PCB bajo pedido, los cuales incluyen las pistas de los circuitos, serigrafiado, agujeros y todo lo necesario para su producción. Los archivos que se pueden encontrar en el CD-ROM (directorio \Documentos de fabricación\Fabricación PCB) son los siguientes:

- **Agujeros no recubiertos.DRL:** Corresponden a las perforaciones de la placa, no recubiertas de conductor en la parte interna del agujero o NPTH.

TRABAJO FIN DE GRADO
INGENIERÍA MARÍTIMA

- **Agujeros recubiertos.DRL:** Corresponden a las perforaciones de la placa, recubiertas de conductor en la parte interna del agujero o PTH.
- **Capa Inferior.GBL;** Pistas en la cara inferior
- **Capa superior.GTL;** Pistas de la cara superior
- **Contorno.GKO:** Contorno de la PCB
- **Máscara de soldadura inferior.GBS:** Zonas de la capa inferior que contienen la máscara de soldadura.
- **Máscara de soldadura superior.GTS:** Zonas de la capa superior que contienen la máscara de soldadura.
- **Pasta de soldar en capa superior.GTP:** Zonas de la capa superior que contienen la pasta de soldar.
- **Revestimiento superior.GTO:** Serografiado-Revestimiento superior

5.4. FABRICACIÓN DE LAS CARCASAS PROTECTORAS

A partir de los diseños de las cajas, se ejecuta el postprocesado de los archivos para la impresión en impresora 3D (Prusa i3-La cual se dispone) y con un extrusor de 0,25mm y empleando un filamento de 1,75mm, y mediante Slic3r.

Para ello, se crea un postprocesado en la carcasa inferior usando un solo extrusor (para plástico PC-ABS de color negro), y en la superior con dos extrusores (Empleando plástico PC-ABS de colores negro-para el cuerpo de la carcasa- y blanco para las letras y designación de ejes). Las piezas tienen un infill del 100% para garantizar su durabilidad.

Se adjuntan asimismo los archivos del postprocesado en formato. gcode para la fabricación de estos elementos:

- **Inferior.gcode**
- **Superior.gcode**

La apariencia del postprocesado, se muestra a continuación, así como el tiempo demorado para la impresión, y el material empleado en cada una de las partes.

Destacar, asimismo, que el extrusor empleado para el color negro es el número 1 (representado en azul en las imágenes del postprocesado, para mejor visualización), mientras el extrusor empleado para el ABS blanco es el número 2.

Se emplea un skirt a 6mm del elemento para asegurar la limpieza del extrusor. Asimismo, dispone de soportes internos en forma de panal de abeja y con un infill de un 30%, en donde es necesario disponerlos.

Respecto a la carcasa inferior:

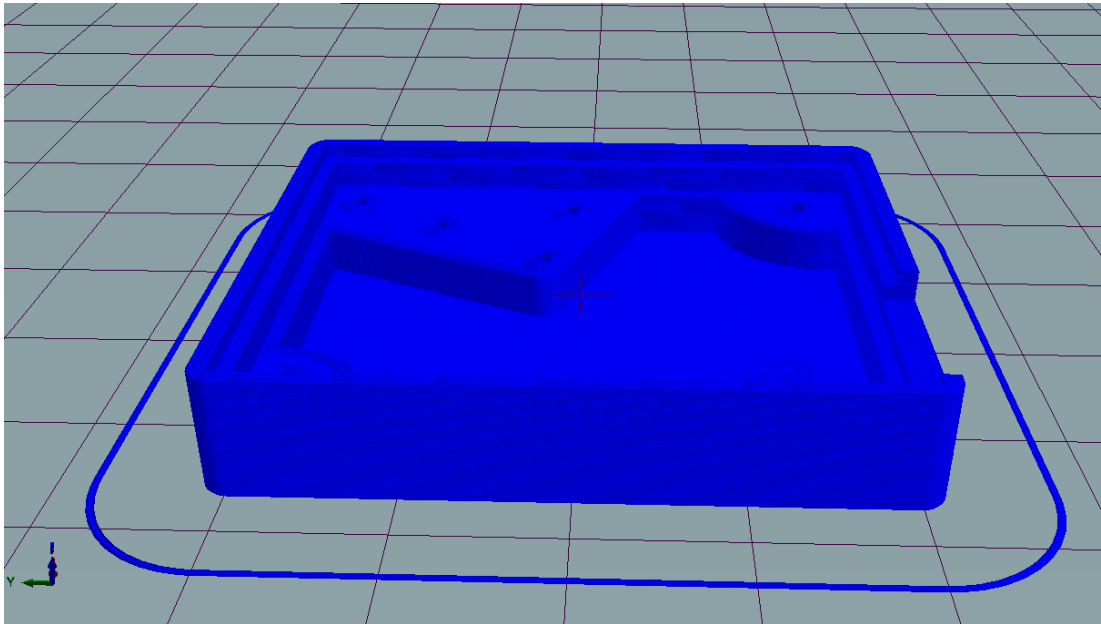


Figura 5.1-Vista previa de la impresión-carcasa inferior - Fuente propia

Tiempo Estimado Impresión:	1h:3m:6s
Número de Capas:	53
Total de Líneas:	51192
Filamento Necesario:	2377 mm
Extrusor 1	2377 mm
Extrusor 2	0 mm

Figura 5.2-Estadísticas de la impresión- Carcasa inferior - Fuente propia

La carcasa superior:

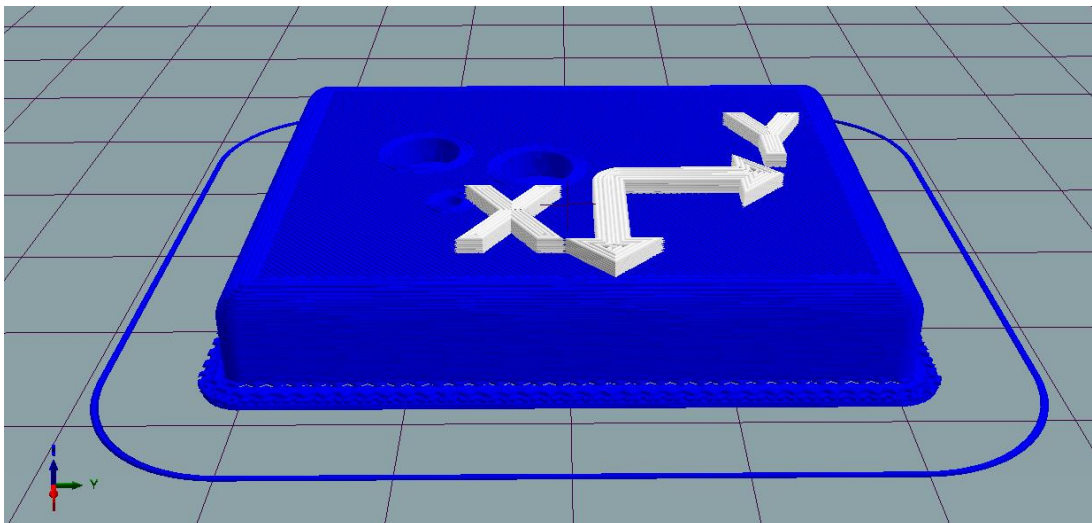


Figura 5.3-Vista previa de la impresión-carcasa superior - *Fuente propia*

Tiempo Estimado Impresión:	50m:4s
Número de Capas:	65
Total de Lineas:	33225
Filamento Necesario:	1913 mm
Extrusor 1	1875 mm
Extrusor 2	38 mm

Figura 5.4-Estadísticas de la impresión- Carcasa superior - *Fuente propia*

Asimismo, debido al material empleado (PC-ABS), se realiza un recocido de las piezas en horno a 90°C durante una hora tras la impresión para mejorar la resistencia de la pieza y aliviar posibles estreses residuales en la misma, tal como recomienda el fabricante en su hoja de datos.

Con estos datos, junto con los descritos en el apartado 4.4.2 (Figura 4.68 y Figura 4.69), se puede determinar, a cantidad de remanente residual de material debido a los soportes creados durante la fabricación, como se ha citado con anterioridad de un infill del 30%. Por lo que, si consideramos la densidad anteriormente citada de este material de 1,1g/cm³, se puede determinar las propiedades de masa del filamento por unidad de longitud, considerando las propiedades:

Propiedades PC-ABS		
<i>Densidad PC-ABS</i>	<i>Volumen por metro</i>	<i>Masa por metro</i>
1,1 g/cm ³	2,4041 cm ³ /m	2,6445 g/m

Tabla 5.2-Cálculo de las propiedades del filamento - *Fuente propia*

TRABAJO FIN DE GRADO
INGENIERÍA MARÍTIMA

Se calcula el material empleado:

	Material			
	<i>PC-ABS 1,75mm Negro</i>		<i>PC-ABS 1,75mm Blanco</i>	
	<i>Longitud</i>	<i>Masa</i>	<i>Longitud</i>	<i>Masa</i>
<i>Carcasa inferior</i>	2,377 m	6,286 g		
<i>Carcasa superior</i>	1,875 m	4,958 g	0,038 m	0,1005 g
TOTAL	4,252 m	11,244 g	0,038 m	0,1005 g

Tabla 5.3.Material empleado - *Fuente propia*

Y, con ello, también se puede calcular el desperdicio del mismo.

	Desperdicio de soportes		
	<i>Masa</i>	<i>Masa fabricada</i>	<i>Masa desperdicio</i>
<i>Carcasa inferior</i>	6,04 g	6,286 g	0,246 g
<i>Carcasa superior</i>	4,39 g	5,059 g	0,669 g
	TOTAL		0,915 g

Tabla 5.4-Desperdicio generado - *Fuente propia*

Se concluye, por lo tanto, un remanente de material de **0,915g**.


```

////////////////////////////////////
/
//Ajuste de desfases en los diferentes ejes
digitalWrite(CS, LOW);
SPI.transfer(0x1E); //Registro del ADXL345 de desfase en el eje X
SPI.transfer(0); //Desfase en eje X
digitalWrite(CS, HIGH);

digitalWrite(CS, LOW);
SPI.transfer(0x1F); //Registro del ADXL345 de desfase en el eje Y
SPI.transfer(0); //Desfase en eje Y
digitalWrite(CS, HIGH);

digitalWrite(CS, LOW);
SPI.transfer(0x20); //Registro del ADXL345 de desfase en el eje Z
SPI.transfer(0); //Desfase en eje Z
digitalWrite(CS, HIGH);
////////////////////////////////////
/

//Configuración de ADXL345 en el rango de +/- 16G
digitalWrite(CS, LOW);
SPI.transfer(0x31); //Registro del ADXL345 para selección del
formato
SPI.transfer(0x03); // +/- 16G
digitalWrite(CS, HIGH);

//Configuración de ADXL345 a una frecuencia de muestreo de 3200Hz
digitalWrite(CS, LOW);
SPI.transfer(0x2c); //Registro del ADXL345 para selección de la
frecuencia de muestreo
SPI.transfer(0x0F); //3200Hz
digitalWrite(CS, HIGH);

//Activación del modo de lectura de datos
digitalWrite(CS, LOW);
SPI.transfer(0x2d); //Registro del ADXL345 para selección de ahorro
de consumo
SPI.transfer(0x08); //Toma de datos
digitalWrite(CS, HIGH);

}

void loop() {

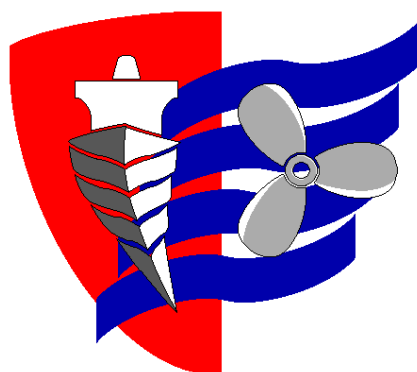
    digitalWrite(CS, LOW); //Comienzo de lectura
    SPI.transfer(0xF2);
    for (int i = 0; i < 6; i++) {
        coordenadas[i] = SPI.transfer(0x00);
    }
    digitalWrite(CS, HIGH); //Fin de lectura

```

```
//Creación de las coordenadas mediante bitwise OR a través de los
dos elementos correspondientes a cada eje
int x = ((int)coordenadas[1] << 8) | (int)coordenadas[0];
int y = ((int)coordenadas[3] << 8) | (int)coordenadas[2];
int z = ((int)coordenadas[5] << 8) | (int)coordenadas[4];

Serial.print("X");
Serial.print(x);
Serial.print("Y");
Serial.print(y);
Serial.print("Z");
Serial.println(z);
}
```

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



PRESUPUESTO

6. PRESUPUESTO

NOTA IMPORTANTE: Se puede encontrar el siguiente presupuesto más completo en el CD-ROM. Este dispone de enlaces directos a las tiendas de donde se han obtenido los precios, así como las hojas de características de todos los componentes.

6.1. PRESUPUESTO DESGLOSADO EN PARTIDAS

En este apartado se efectúa un desglose del presupuesto en:

- Componentes electrónicos
- Fabricación del circuito impreso
- Fabricación de las cajas protectoras
- Diseño y desarrollo del instrumento
- Soldadura, ensamblado de componentes y montaje
- Otros componentes

TRABAJO FIN DE GRADO
INGENIERÍA MARÍTIMA

6.1.1. COMPONENTES ELECTRÓNICOS

Elemento	Fabricante	Modelo	Unidades	Precio unitario	Precio total
Resonador de 16MHz	muRata	CSTCE16M0V53-R0	1	0,2283 €	0,2283 €
Regulador de tensión	STMicroelectronics	LD1117S33TR	1	0,1567 €	0,1567 €
Conector Micro-Usb Hembra	SHOU HAN	MICRO5.9mmusb	1	0,0226 €	0,0226 €
Resistencia SMD de 1kΩ	ROHM Semicon	ESR03EZPJ102	3	0,0134 €	0,0402 €
Diodo Schottky	LRC	LMBR0520T1G	1	0,0273 €	0,0273 €
Condensador cerámico 10μF	Murata Electronics	GRM188B31A106ME69D	1	0,0261 €	0,0261 €
Condensador cerámico 100nF	TORCH	CT41G-0805-2X1-50V-0.1uF-K(N)	5	0,0134 €	0,0671 €
Pulsador	PANASONIC	EVQ22705R	1	0,0811 €	0,0811 €
Condensador de tantalio 10μF	AVX	TAJA106M016RNJ	1	0,0788 €	0,0788 €
Nucleo deferrita de 5Ω	FH	CBM201209U050T	1	0,0086 €	0,0086 €
Diodo LED 5mm Verde	Everlight Elec	333-2SUGC/S400-A5-L	1	0,0688 €	0,0688 €
Condensador cerámico 1μF	MuRata	GRM219R71E105KA88D	1	0,0948 €	0,0948 €
Sensor acelerómetro	ADI	ADXL345BCCZ-RL7	1	1,5361 €	1,5361 €
Diodo LED 5mm Azul	Everlight Elec	333-2SUBC/S400-A4	1	0,0720 €	0,0720 €
Condensador de tantalio SMD de 4,7μF	Shenzhen Zhenhua XinYun Elec	CA45A-A-16V-4.7uF-K	1	0,0870 €	0,0870 €
Driver USB	FTDI	FT232RL-REEL	1	3,9910 €	3,9910 €
Resistencia SMD de 330Ω	UniOhm	TC0525D3300T5E	2	0,0209 €	0,0417 €
Transistor MOSFET	AnBon	BSS138	4	0,0158 €	0,0630 €
Resistencia SMD de 10kΩ	PANASONIC	ERJPA3F1002V	8	0,1503 €	1,2020 €
Microcontrolador	MICROCHIP	ATMEGA328P-AU	1	2,1218 €	2,1218 €
				TOTAL	10,02 €

Tabla 6.1-Coste derivado de los componentes electrónicos - Fuente propia

TRABAJO FIN DE GRADO
INGENIERÍA MARÍTIMA

6.1.2. OTROS COMPONENTES

Elemento	Fabricante	Modelo	Unidades	Precio unitario	Precio total
Tornillos de fijación	NBK	SNZS-M1.4-5	7	0,171 €	1,1998 €
Cable conector	RS PRO	RS PRO 5 mtr USB 2.0 A M - Micro B 5 Pin Cable - Black	1	7,680 €	7,6800 €
Núcleo de ferrita	TDK	ZCAT1325-0530A	2	1,290 €	2,5800 €
Imanes	Supermagnete	S-10-0.6-N	5	0,024 €	0,1200 €
				TOTAL	11,58 €

Tabla 6.2-Coste derivado de otros componentes - Fuente propia

6.1.3. FABRICACIÓN DEL CIRCUITO IMPRESO

Este presupuesto incluye la fabricación de las 75 placas PCB, dado que el menor pedido en cualquier fabricante es de 5 y resultan en función de las dimensiones del diseño relacionados con las dimensiones de la placa virgen. Por lo que el número óptimo de pedido es de 75 unidades en este caso.

En este distribuidor (jlcpcb), la fabricación de 5 placas tiene un precio de 48.70\$, lo cual es mayor que el de 75 (30,90\$) (ver Anexo I-Presupuestos de fabricación de PCB).

Por lo tanto, se le repercute al cliente la fabricación de todas las PCB:

Cambio €/ \$ a 3 de Abril de 2020	0,92 €/ \$
Coste de 75 placas PCB (\$)	\$ 30,90
Coste de 75 placas PCB (€)	28,43 €

Tabla 6.3-Coste de fabricación de las PCB - Fuente propia

6.1.4. FABRICACIÓN DE LAS CAJAS PROTECTORAS

Tal, como se describe en el apartado 5.4, los tiempos de fabricación de las carcasas protectoras es de 1h 3 minutos y 6 segundos en su parte inferior y de 50 minutos y 4 segundos para la superior. Asimismo, se tiene en cuenta un tiempo de calentamiento y preparación de 10 minutos, por lo que se deduce un coste en esta operación de:

Tiempo de fabricación	
Caja Inferior	1:03:06
Caja superior	0:50:04
Calentamiento y preparación	0:10:00
Tiempo máquina TOTAL	2:03:10
Coste hora máquina	15 €/h
Coste máquina fabricación	30,8 €

Tabla 6.4-Coste máquina de fabricación de las cajas protectoras - *Fuente propia*

Asimismo, el material empleado en cada una de las carcasas es:

Masa materia prima empleada	
Carcasa inferior	6,286 g
Carcasa superior	5,059 g
TOTAL	11,345 g

Tabla 6.5-Material empleado para fabricación - *Fuente propia*

Y teniendo en cuenta un coste de 17,96€/kg de este material, se obtiene el siguiente coste:

Coste	
Carcasa inferior	0,11 €
Carcasa superior	0,09 €
TOTAL	0,20 €

Tabla 6.6-Coste material de fabricación - *Fuente propia*

Asimismo, el recocido requiere de 1h en horno a 100°C de las piezas:

Recocido	
Tiempo	1 h
Coste máquina	5 €/h
Coste total	5,00 €

Tabla 6.7-Coste de proceso de recocido - *Fuente propia*

TRABAJO FIN DE GRADO
INGENIERÍA MARÍTIMA

Por lo que se deduce un coste total de la fabricación del encapsulado de:

Coste total de producción	
Manufactura en impresora	30,8 €
Coste material	0,20 €
Recocido	5,00 €
TOTAL	36 €

Tabla 6.8-Balance total del coste de producción de las carcasas protectoras - *Fuente propia*

6.1.5. DISEÑO Y DESARROLLO DEL INSTRUMENTO

En este apartado se detalla el número de horas invertidas y coste generado en el desarrollo del equipo y el software.

El coste por hora de trabajo es de 40€/h.

Horas de diseño	
Análisis del problema(s)	5 h
Elección de elementos	8 h
Desarrollo de hardware	12 h
Programación del microcontrolador	15 h
Creación del software	115 h
Diseño de cajas y postprocesado	8 h
Total Horas de diseño	163 h
Coste hora	40 €/h
Coste diseño TOTAL	6.520 €

Tabla 6.9-Costes derivados del diseño y desarrollo - *Fuente propia*

6.1.6. SOLDADURA, ENSAMBLADO DE COMPONENTES Y MONTAJE

En este apartado, se detalla el número de horas invertidas y coste generado por el montaje de componentes y soldadura de los mismos, el ensamblado y fijación del circuito a la caja, además del montaje de la misma. Asimismo incluye los costes de calibración inicial y prueba del equipo.

TRABAJO FIN DE GRADO
INGENIERÍA MARÍTIMA

Horas de montaje	
Soldadura y montaje de componentes electrónicos	1,5 h
Montaje de circuito, ensamblado de la caja y cable	0,5 h
Calibración y prueba	1 h
Total Horas de montaje	3 h
Coste hora	20 €/h
Coste montaje TOTAL	60 €

Tabla 6.10-Costes derivados del montaje - Fuente propia

6.2. BALANCE FINAL DEL PRESUPUESTO

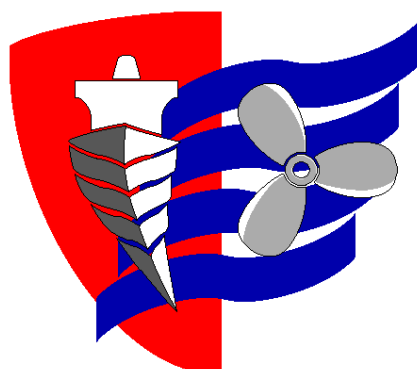
Secciones a presupuestar	Importe
Componentes Electrónicos	10,02 €
Otros componentes	11,58 €
Fabricación de PCB	28,43 €
Fabricación de cajas protectoras	36 €
Diseño	6.520,00 €
Montaje	60,00 €
Presupuesto de Ejecución del material	6.666,02 €

Secciones a presupuestar	Importe
IVA (21% PEM)	1.399,86 €
Presupuesto General para conocimiento del cliente	8.065,88 €

Tabla 6.11-Balance final del presupuesto - Fuente propia

Asciende el Presupuesto General para conocimiento del Cliente a Ocho mil sesenta y cinco euros con ochenta y ocho céntimos de euro.

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



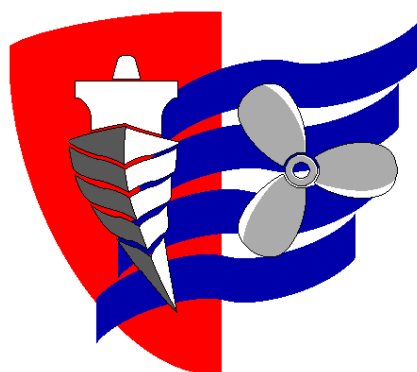
PLIEGO DE CONDICIONES

7. PLIEGO DE CONDICIONES

Al tratarse de un proyecto propio en el que se desarrolla un equipo de instrumentación, análisis y guardado de datos, el pliego de condiciones irá dirigido hacia el posible cliente que desee adquirir esta herramienta. De este modo, los términos de contrato para comprar la herramienta serían los siguientes:

- El autor del proyecto como ingeniero y proyectista de la herramienta se compromete a que funciona correctamente y dentro de sus especificaciones y en caso de lo contrario se corregirían los defectos sin costes añadidos.
- El conjunto de herramientas se vende en un kit compuesto de un sensor con un microcontrolador incorporado y conexión USB, y su correspondiente cable, así como el software (funcional únicamente con el Sistema operativo Windows- 7 en Adelante)
- El cliente se compromete a emplear adecuadamente el instrumento, y en caso de rotura o desajuste por una mala manipulación o uso, el autor del proyecto no se hace cargo de los posibles daños causados en el instrumento.
- El instrumento queda abierto a posibles actualizaciones del software, cuyo coste no será superior al 10% del precio neto del kit anteriormente descrito.
- El autor del proyecto se compromete a contestar vía email o telefónica y de modo gratuito, las dudas que surjan al cliente durante 90 días hábiles después de haber adquirido la herramienta.
- La herramienta tiene un periodo de garantía de 2 años.
- En caso de que el cliente demande una segunda unidad y consecuentes, éstas tendrán un precio de 500€.

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



MANUAL

8. MANUAL

8.1. PRIMEROS PASOS

El primer paso antes de abrir el software ni conectar el equipo únicamente por primera vez, es la instalación de los drivers FTDI para el reconocimiento del FT-232RL y una satisfactoria comunicación con el equipo. Estos drivers se encuentran en el CD-ROM, en el directorio \Complementos y drivers\Drivers, y se instalan mediante un instalador de modo automático.

Una vez instalados los drivers, el equipo podrá ser conectado al PC, siendo reconocido de modo automático por éste.

Asimismo es necesaria la instalación del Runtime de Labview para el correcto funcionamiento del programa, previa apertura del mismo, y el cual se encuentra en el CD-ROM en el directorio \Complementos y drivers\LV Runtime.

8.2. INICIALIZACIÓN DEL PROGRAMA

El programa se encuentra compilado en formato .EXE en el CD-ROM, en el directorio \Software\COMPILADO, con el nombre “Analizador de vibraciones”.



Figura 8.1-Icono del programa compilado - Fuente propia

8.3. DESCRIPCIÓN DE PANTALLAS DEL PROGRAMA

El programa en su inicialización, se abre en pantalla completa, dispone en su parte superior de 8 pestañas con diferentes opciones dentro de las mismas y que se describen en los siguientes subapartados.

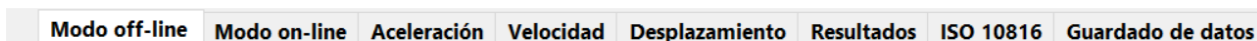


Figura 8.2-Pestañas superiores de selección de apartados de programa

Asimismo, en la parte derecha de estas, dispone de un indicador, el cual indica si el equipo está conectado o desconectado.



Figura 8.3-Indicador de conexión y desconexión - Fuente propia

Y en el extremo derecho superior, se encuentran los tres elementos fundamentales de operación con las ventanas de Windows:

	Minimizar ventana a la barra de tareas
	Reduce la ventana al tamaño mínimo para su correcto funcionamiento y visualización
	Cerrar programa

Tabla 8.1-Elementos de operación de ventana de Windows en este programa - Fuente propia

8.3.1. MODO OFFLINE

Esta primera pestaña se dedica para la carga de archivos de datos de análisis, previos. Se describe en profundidad en el apartado 8.11.



Figura 8.4-Pantalla del modo offline - Fuente propia

8.3.2. MODO ONLINE

Es la pantalla de control para la conexión al dispositivo de medición.

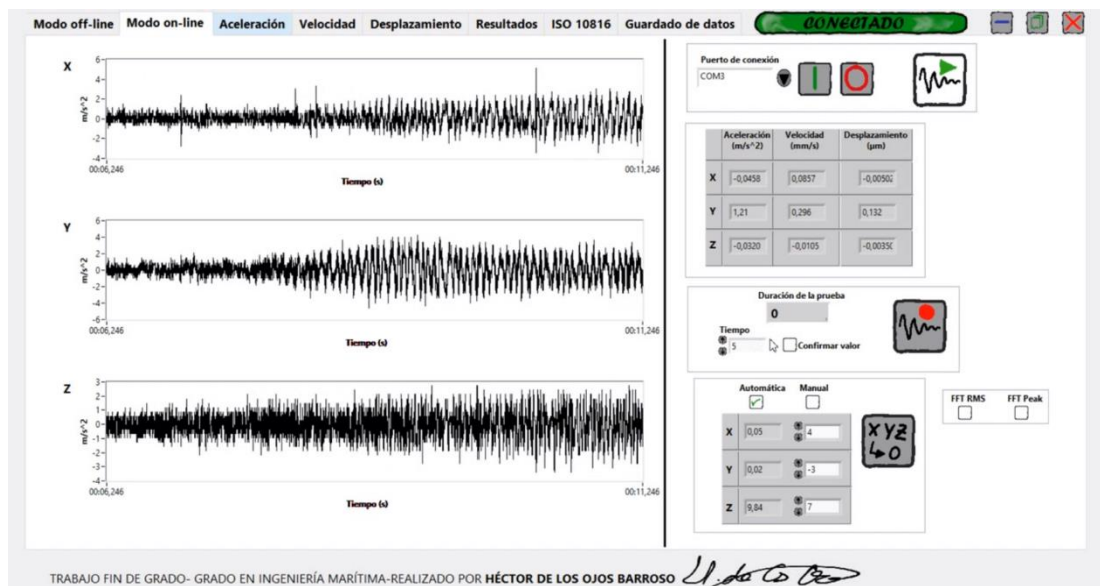


Figura 8.5-Pantalla del modo online - Fuente propia

8.3.3. ACELERACIÓN, VELOCIDAD Y DESPLAZAMIENTO

Estas pantallas tienen la misma configuración. Se muestran las gráficas correspondientes a cada una de las variables correspondientes (Aceleración, velocidad y desplazamiento). En ellas hay tres subpantallas o subapartados:

- **Histórico:** Datos obtenidos sin procesar- m/s^2 VS tiempo (aceleración), mm/s VS tiempo (velocidad), μm VS tiempo (desplazamiento)

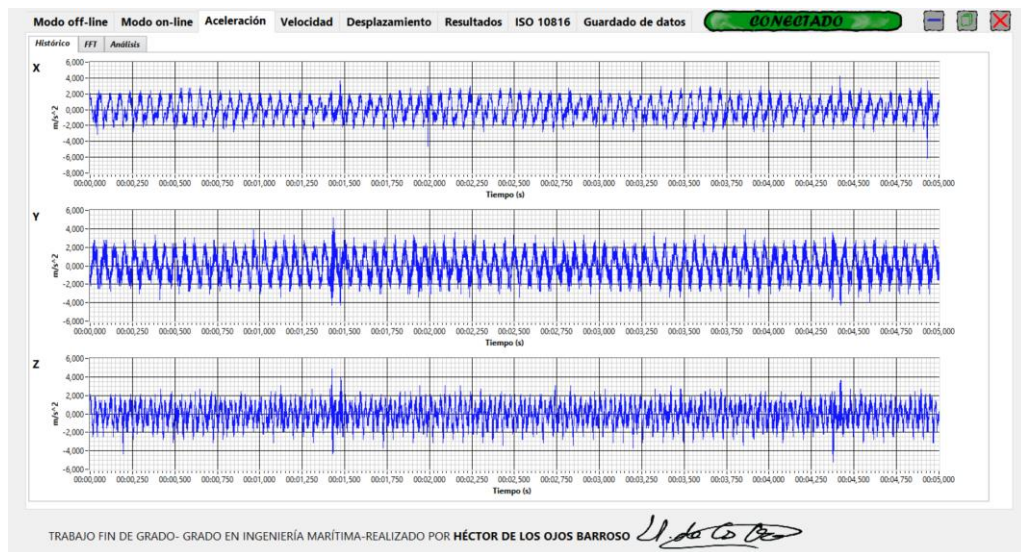


Figura 8.6-Subapartado Histórico - Fuente propia

- **FFT:** Muestra el espectro FFT de los datos correspondientes del histórico correspondiente en el dominio de frecuencias.

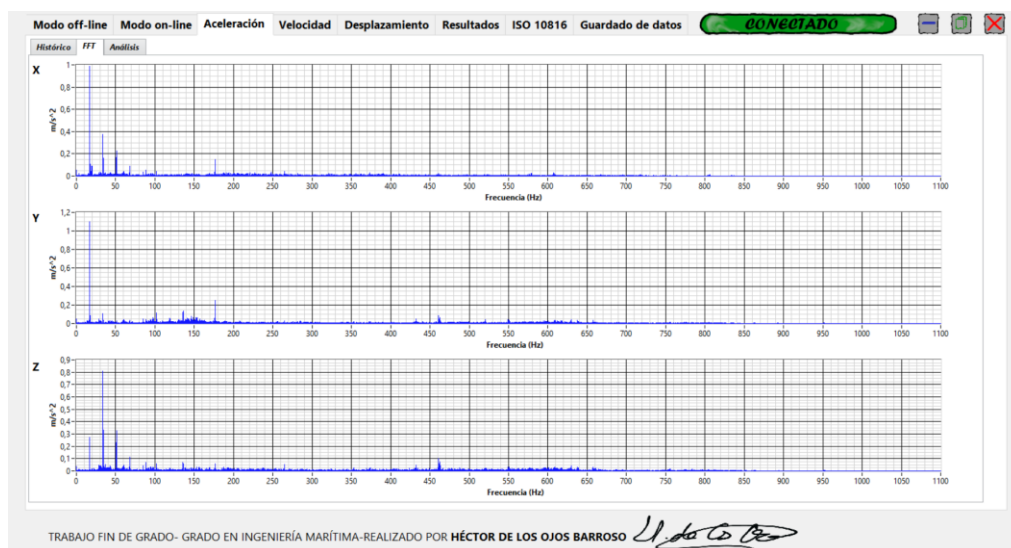


Figura 8.7-Subapartado FFT - Fuente propia

- **Análisis:** Gráficos y procedimientos de análisis de picos del espectro FFT.

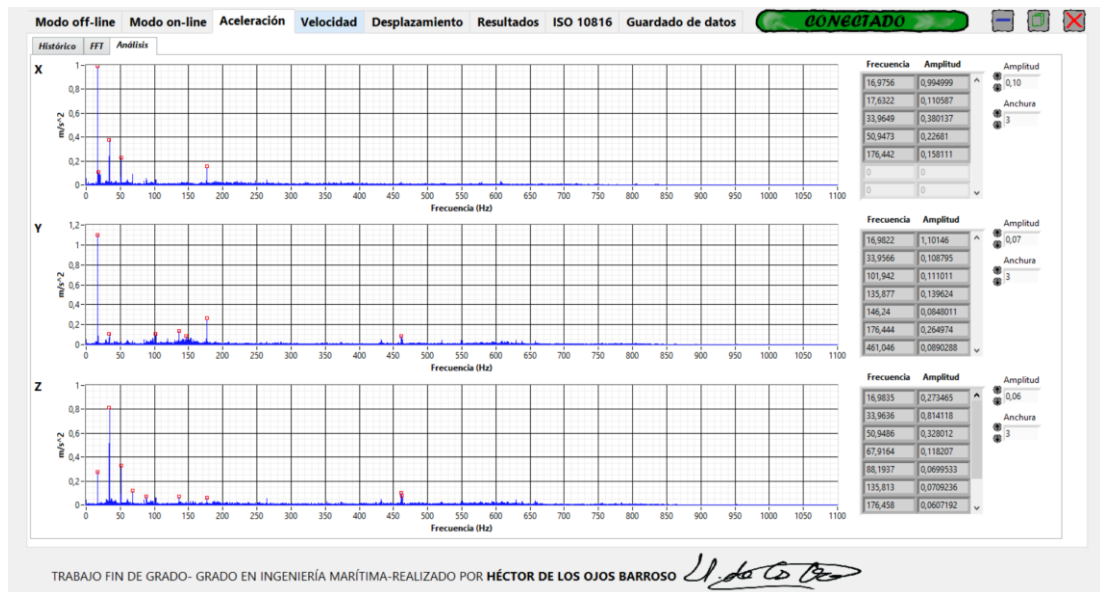


Figura 8.8-Subapartado de Análisis de picos - Fuente propia

8.3.4. RESULTADOS

Resultados obtenidos en el análisis. Se describe el procedimiento en el apartado 8.8.

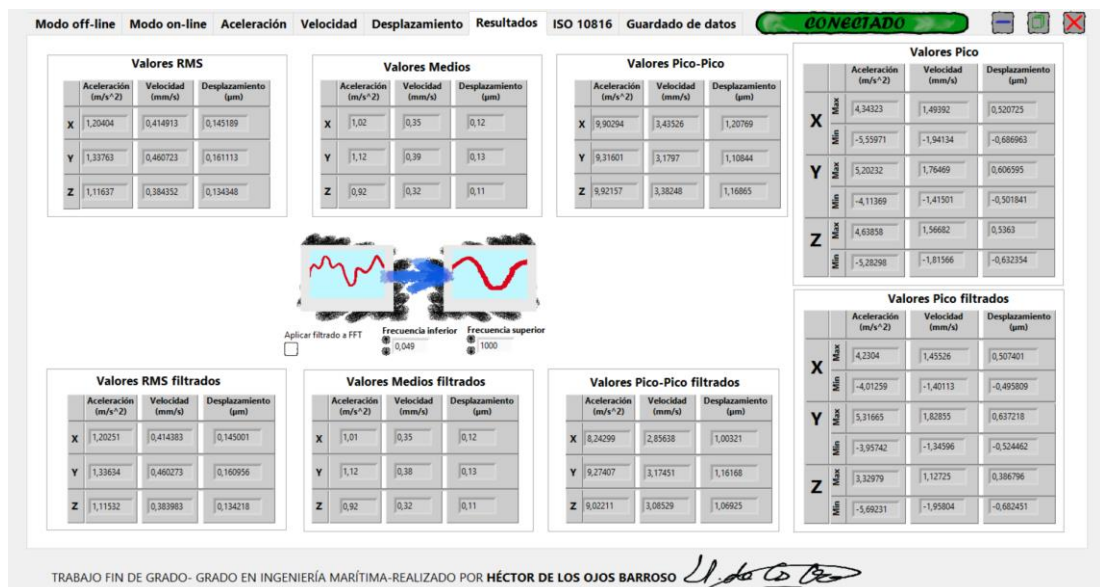


Figura 8.9-Pantalla de resultados - Fuente propia

8.3.5. ISO 10816

Pantalla de análisis de las normas ISO 10816 más significativas, lo cual se efectúa en las dos subpestañas que esta incluye: 10816-1 y 10816-3. Descrietas en profundidad en el apartado 8.9.

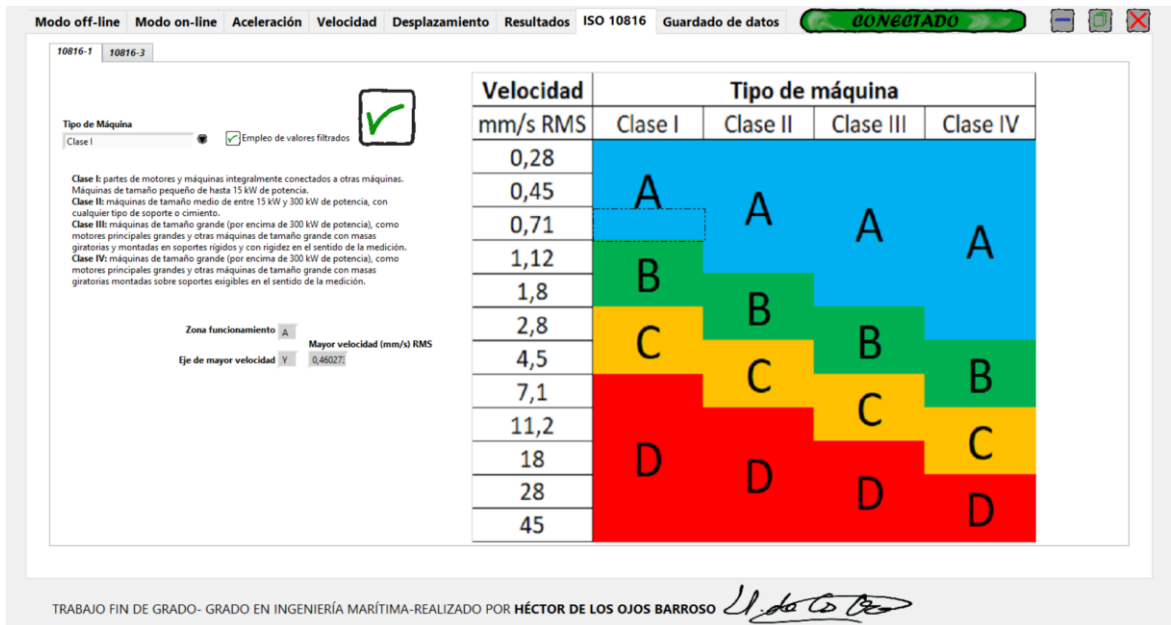


Figura 8.10-Subpantalla de la norma ISO 10816-1 - Fuente propia

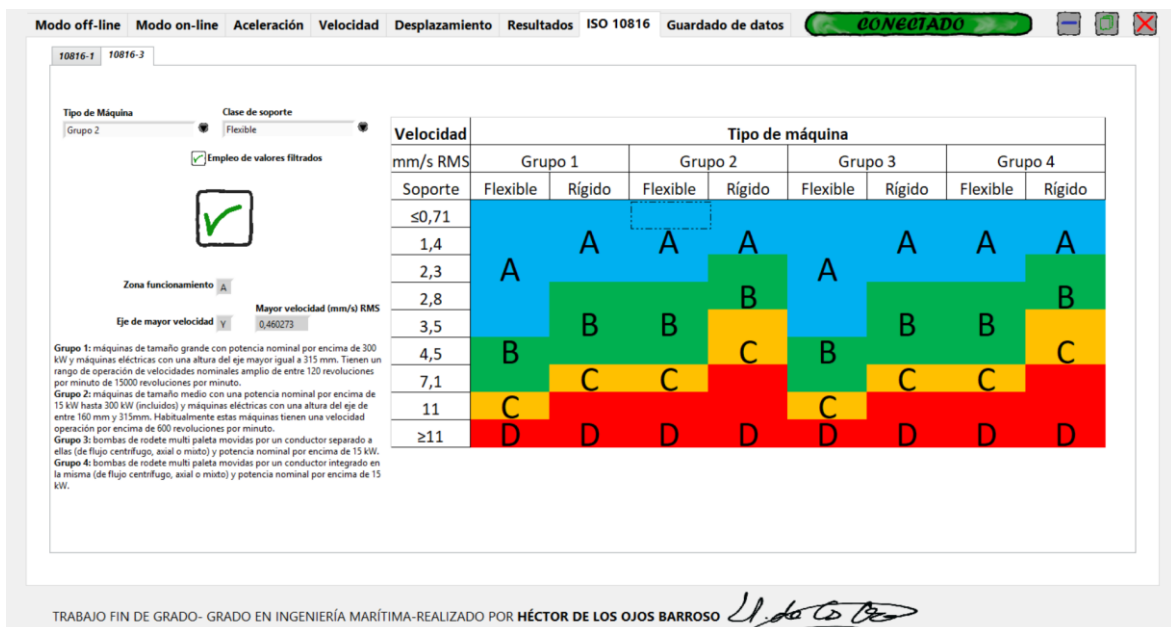


Figura 8.11-Subpantalla de la norma ISO 10816-3 - Fuente propia

8.3.6. GUARDADO DE DATOS

Pantalla de guardado de datos tras el análisis. Se describe el funcionamiento en el apartado 8.10.

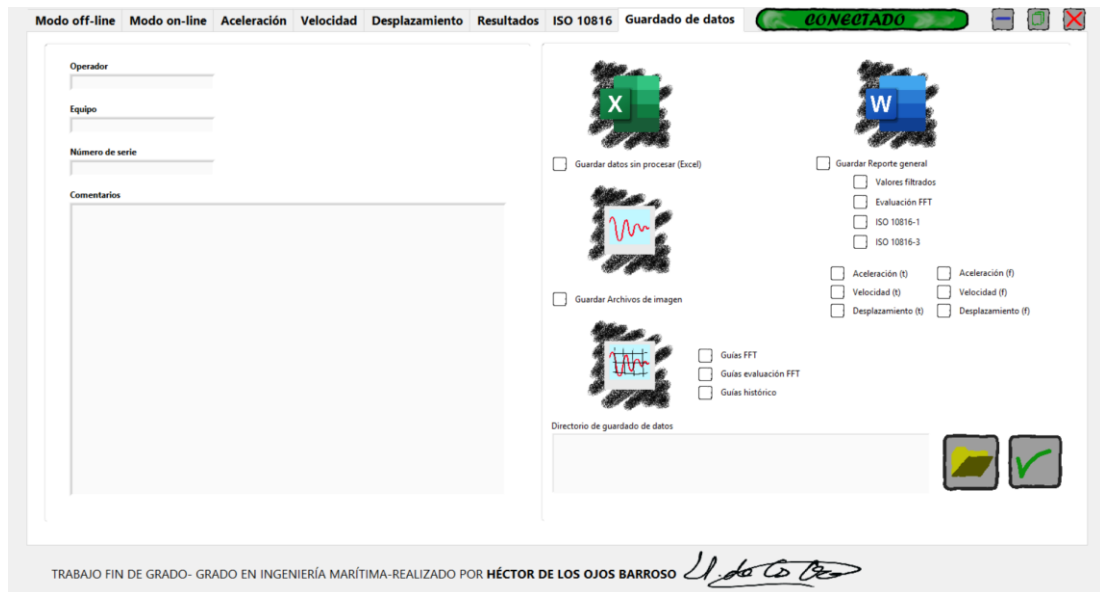


Figura 8.12-Pantalla de guardado de datos - Fuente propia

8.4. CONEXIÓN AL DISPOSITIVO Y DESCONEXIÓN

Para la conexión al dispositivo, en primer lugar hay que entrar a la pantalla “Modo Online”-ver 8.3.2.

En la zona izquierda, en la parte superior, se encuentra la zona de conexión:



Figura 8.13-Conexionado al dispositivo - Fuente propia

En donde se escoge el Puerto de conexión USB al cual está el dispositivo conectado del menú desplegable. Una vez elegido el puerto, hay que hacer un click sobre el botón de conectar (Figura 8.14).

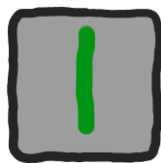


Figura 8.14-Botón de conexión - *Fuente propia*

Si todo es correcto, el dispositivo quedará conectado al equipo, lo cual es indicado mediante el indicador de conexión en color verde descrito en el apartado 8.3.

Para la desconexión del equipo al PC, hay que hacer click sobre el botón de desconectar (Figura 8.15).

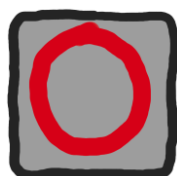


Figura 8.15-Botón de desconexión - *Fuente propia*

8.5. LECTURA DE DATOS Y CALIBRACIÓN

Una vez conectado y sincronizado el dispositivo al software, se procede a leer los datos de éste, haciendo click sobre el botón de lectura de datos:

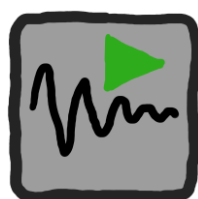


Figura 8.16-Botón de lectura de datos - *Fuente propia*

En este momento, el programa empieza a mostrar datos en pantalla, además que solicita una calibración de los sensores para corregir posibles desviaciones (ver Figura 8.17-Ventana emergente de aviso de calibración), y para corregir la aceleración de la gravedad sobre el eje Z, poniendo los valores de X, Y y Z a cero.

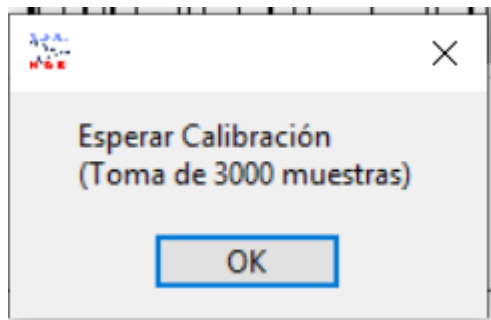


Figura 8.17-Ventana emergente de aviso de calibración - *Fuente propia*

Asimismo, si se selecciona la casilla de manual en la calibración y se varían los datos en las casillas de sus ejes correspondientes, se puede efectuar una calibración manual del mismo.

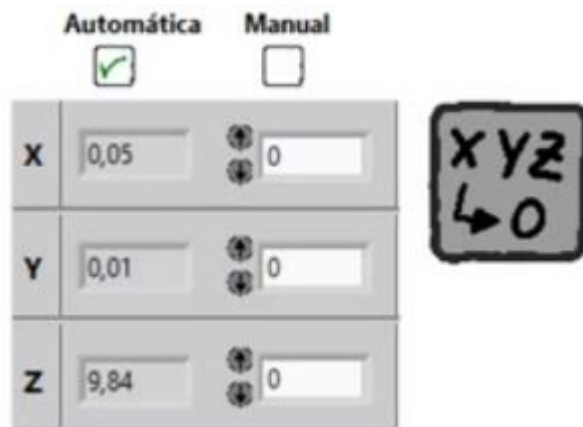


Figura 8.18-Selector de calibración manual o automática - *Fuente propia*

Si se desea recalibrar el software por cualquier motivo de modo automático, se puede hacer en cualquier momento, haciendo click sobre el botón:

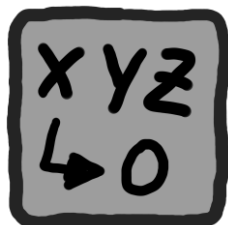


Figura 8.19-Botón de calibración automática - *Fuente propia*

8.6. TOMA DE DATOS

Una vez emplazado el sensor en la posición de medida y calibrado, se puede proceder a la toma de datos. Esto se realiza en la pantalla de modo Online, en la zona mostrada en la Figura 8.20.

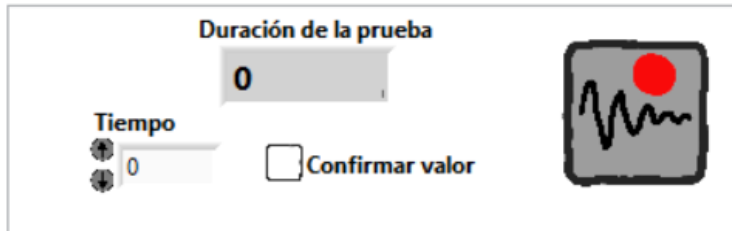


Figura 8.20-Toma de datos - Fuente propia

En primer lugar, hay que introducir el tiempo deseado de medida (entre 0 y 15 segundos), posteriormente se confirma el valor en la casilla contextual y se hace click sobre el botón de medida:

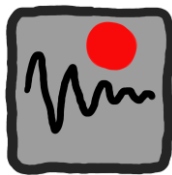


Figura 8.21-Botón de medida - Fuente propia

Entonces el contador “Duración de la prueba” cuenta hasta el valor asignado, guardando los datos, mientras grafica estos en la pantalla.

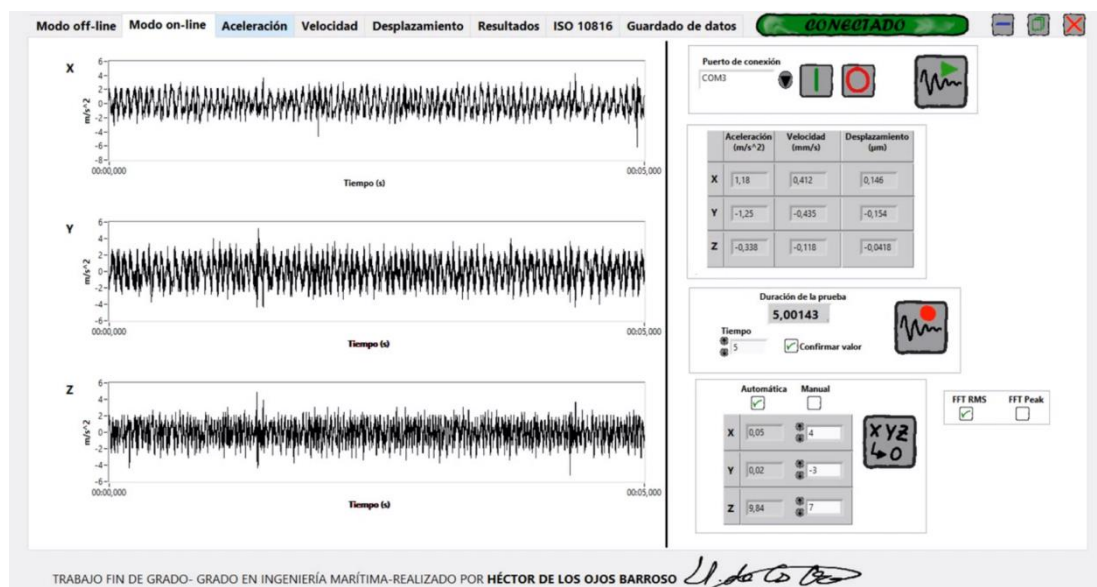


Figura 8.22-Pantalla online tras la toma de datos - Fuente propia

8.7. ANÁLISIS ESPECTRAL

Una vez ha finalizado la toma de datos, automáticamente estos datos son procesados, generando espectros de frecuencias entre 0 y 1100 Hz. Estos espectros representan tanto la aceleración, como la velocidad y el desplazamiento en los tres ejes ortogonales X, Y y Z. En las tres magnitudes físicas, estos espectros se representan en dos pantallas como se describe en el apartado 8.3.3: La pantalla FFT, en donde se puede ver el espectro y la pantalla análisis, en la cual se pueden analizar los picos del mismo.

Asimismo, estos datos en el dominio de frecuencias pueden ser representados mediante los valores RMS o valores pico, seleccionando en la casilla el valor deseado, y pudiendo modificarlo en cualquier momento en la sección mostrada en la Figura 8.23.

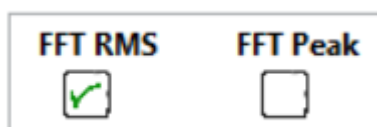


Figura 8.23-Selector de tipo de FFT a mostrar - Fuente propia

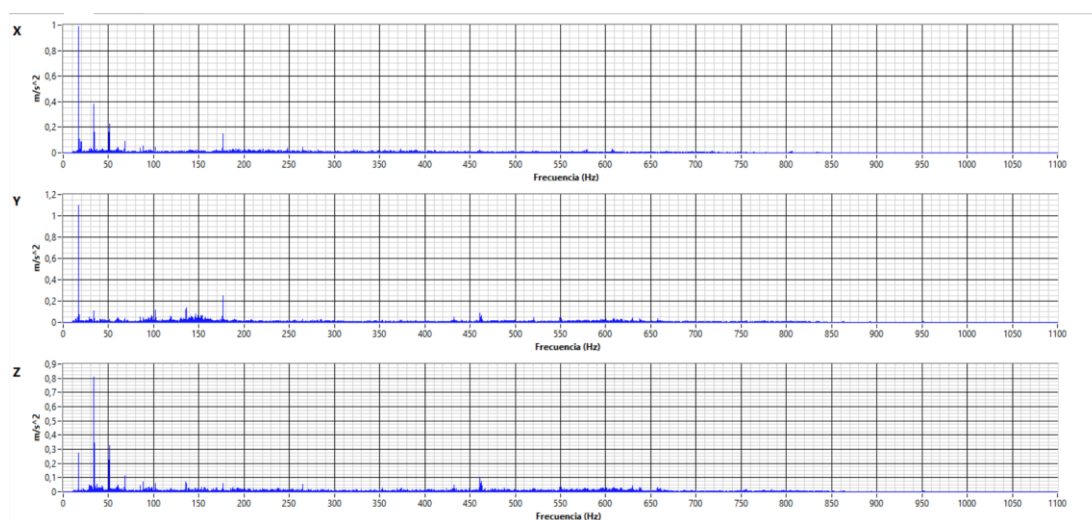


Figura 8.24-Pantalla de espectro FFT - Fuente propia

Para el análisis espectral, en las pestañas de análisis, mediante la variación de los parámetros de Amplitud y Anchura de las bandas de frecuencia, se

puede apreciar visualmente la detección de picos, y mediante un ajuste manual de estos parámetros, se pueden determinar los picos que se requiera conocer su amplitud y frecuencia.

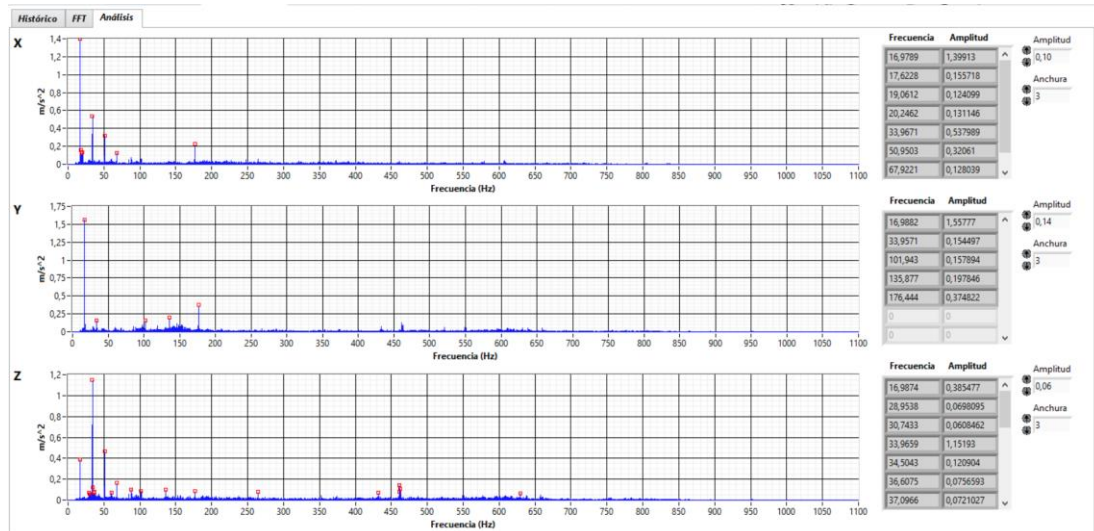


Figura 8.25-Análisis de picos espectrales - Fuente propia

8.8. EVALUACIÓN DE RESULTADOS

En la pantalla resultados, descrita en el apartado 8.3.4, se puede visualizar los valores obtenidos en la medida tanto en las magnitudes de aceleración, como de velocidad y de desplazamiento en cada uno de los tres ejes ortogonales para cada uno de los siguientes resultados. En la parte superior de esta pantalla, se encuentran las variables:

- **Valores RMS Generales:** Son los valores RMS obtenidos durante la medición de datos de las ondas de vibración (sin filtrar).
- **Valores Medios:** Corresponden a los valores medios de la onda de vibración sin filtrar.
- **Valores pico-pico:** Es la medida pico-pico de la onda de vibración sin filtrar.
- **Valores pico:** Cada una de las tres magnitudes en todos los ejes ortogonales viene dividida en dos filas: Max (el pico máximo producido sobre cero-punto de calibración) y Min (el pico máximo

producido bajo el cero), cuya suma de valores absolutos formarán el valor anterior (pico-pico).



Figura 8.26-Resultados sin filtrar - Fuente propia

Asimismo, en la zona central, se puede encontrar una zona para el ajuste del filtro de frecuencias:

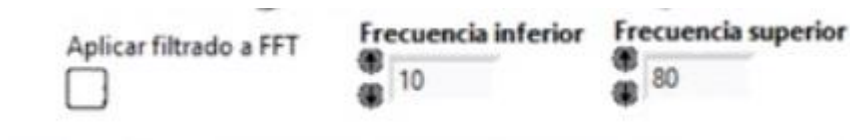


Figura 8.27-Filtro de frecuencias - Fuente propia

Este filtro puede ser aplicado a los resultados a medida que se varían los valores “Frecuencia inferior” y “Frecuencia superior”, siendo reflejados en la parte inferior los valores homólogos a los descritos previamente (RMS, Medios, Pico-Pico y Pico), con este filtro aplicado.



Figura 8.28-Resultados filtrados en frecuencia - Fuente propia

Asimismo, si la casilla “Aplicar filtrado a FFT” es marcada, este filtro se verá reflejado en el espectro, omitiendo los valores que estén fuera del rango definido:

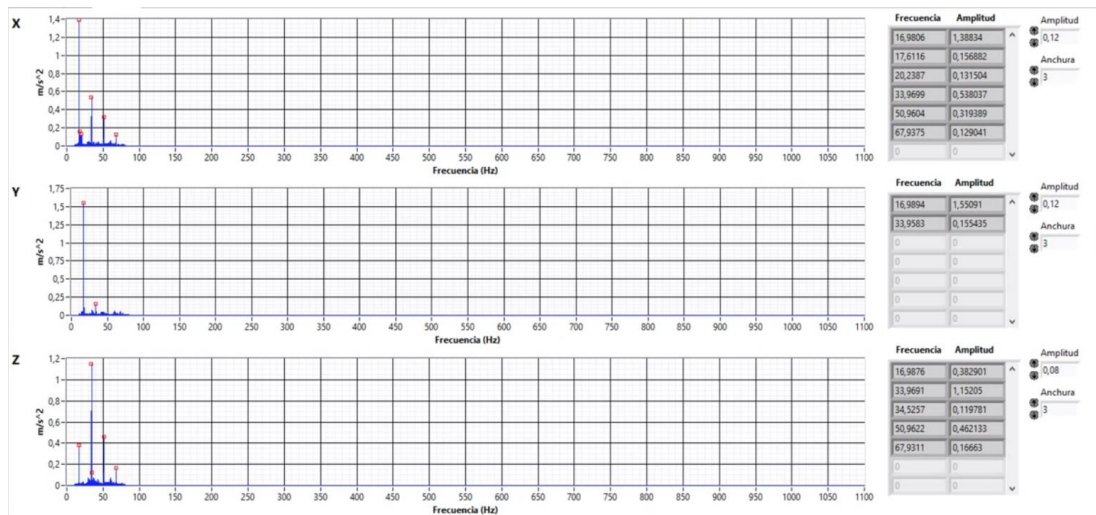


Figura 8.29-Acotación del espectro en frecuencia - Fuente propia

8.9. EVALUACIÓN EN NORMAS ISO

Tal como se describe en el apartado 8.3.5, en la pestaña ISO 10816, se puede efectuar un análisis del estado de vibración de la máquina de acuerdo a la norma. Ésta incluye la norma 10816-1 y 10816-3 en sus pestañas correspondientes.

Para ello, en ambas normas, el procedimiento es similar:

Tras haber efectuado la toma de datos durante el periodo seleccionado, y aplicado los filtros correspondientes en las frecuencias que dicta la norma, en la pestaña de la norma ISO hay que seleccionar el tipo de máquina (norma ISO 10816-1) o el tipo de máquina y clase de soporte en el caso de la norma ISO 10816-3. Asimismo, hay que indicar al software el empleo de valores filtrados en la frecuencia anteriormente descrita, en caso contrario, tomará el valor correspondiente en el rango de 0 a 1100Hz:



Figura 8.30-Selector de máquina para la aplicación de la norma ISO 10816-1 - Fuente propia

Tipo de Máquina

▼
Grupo 3

Clase de soporte

▼
Flexible

☒ **Empleo de valores filtrados**

Figura 8.31-Selector de máquina y tipo de soporte para la aplicación de la norma ISO 10816-3 - *Fuente propia*

A continuación, se procede a la aplicación de estos valores para proceder al análisis de estas normas, mediante el botón de confirmación:



Figura 8.32-Botón de confirmación para la aplicación de las normas - *Fuente propia*

Tras ello, el programa muestra de modo visual en que zona de vibración se encuentra el equipo en el diagrama, mediante un cuadrado de líneas discontinuas (ver Figura 8.33).

Velocidad mm/s RMS	Tipo de máquina			
	Clase I	Clase II	Clase III	Clase IV
0,28	A	A	A	A
0,45				
0,71	B	A	A	A
1,12				
1,8	C	B	B	B
2,8				
4,5	D	C	C	C
7,1				
11,2	D	D	D	D
18				
28	D	D	D	D
45				

Figura 8.33-Representación gráfica en el cuadro evaluativo de la norma - *Fuente propia*

TRABAJO FIN DE GRADO
INGENIERÍA MARÍTIMA

Así como indicará esto mismo en forma escrita, indicando tanto la zona de funcionamiento, como el eje en el que se ha producido la mayor velocidad, así como el valor de la misma.

Zona funcionamiento A
Eje de mayor velocidad Y **Mayor velocidad (mm/s) RMS** 0,46027:

Figura 8.34-Indicador de resultados tras la aplicación de la norma - *Fuente propia*

En caso de duda del Tipo de máquina que corresponde la máquina a analizar, estas pantallas, disponen de una pequeña guía-ayuda para identificarlo.

8.10. GUARDADO DE DATOS

El guardado de datos dispone de un formulario rellenable (opcionalmente), en donde se puede escribir el operador que ha tomado los datos, el equipo en donde se ha tomado la medida, número de serie del mismo y una zona para comentarios o anotaciones.

Operador	
Equipo	
Número de serie	
Comentarios	

Figura 8.35-Formulario de datos rellenable - *Fuente propia*

Dispone de tres posibilidades de guardado:

- **Guardado de datos sin procesar:** seleccionando esta casilla, se guardan las medidas tomadas, así como los datos del formulario anteriormente descrito, en un documento de Excel, con el nombre Datos.xls. Este archivo se guarda para realizar un posterior procesado o análisis de los datos, ya que, sin él, tras cerrar el programa, no se puede recuperar la medida tomada.

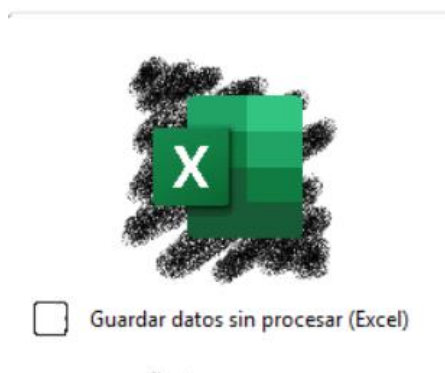


Figura 8.36-Selector de guardado de datos sin procesar - Fuente propia

- **Guardar archivos de imagen:** Mediante la selección de esta casilla, se guardarán todas las gráficas del reporte, en una carpeta llamada "graficas". Asimismo, si se seleccionan las casillas de guías, se guardarán las imágenes con las guías en los ejes X e Y. Puede realizarse tanto en modo online-tras la toma de medidas, o en modo offline.



Figura 8.37-Guardado de imágenes - Fuente propia

- **Guardar reporte general:** Mediante la selección de cualquiera de las casillas que engloba este grupo, se guardará un reporte en formato Word 97-2003, con el nombre “Reporte.doc”. Éste reporte siempre incluye los resultados de la medida: RMS, medios, pico y pico-pico, así como la opción que se seleccione en estas casillas. Puede realizarse tanto en modo online-tras la toma de medidas, o en modo offline.

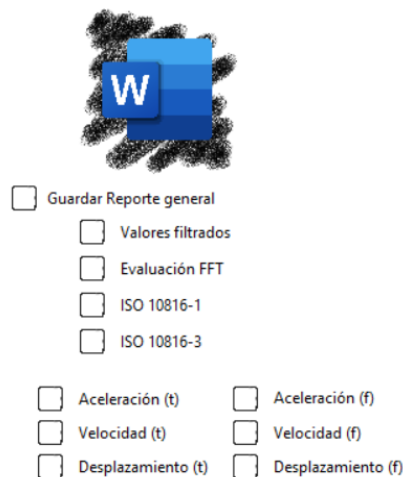


Figura 8.38-Guardado de reporte en Word - *Fuente propia*

Una vez seleccionado y rellenado todo apropiadamente, se procede a seleccionar el directorio de guardado de datos:

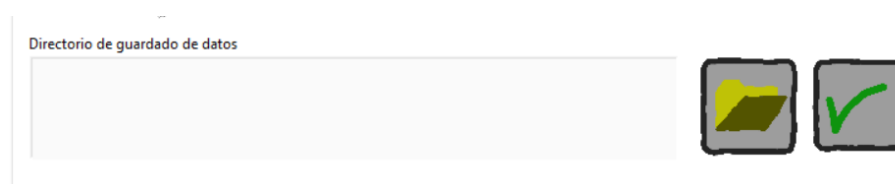


Figura 8.39-Selector del directorio de guardado - *Fuente propia*

Haciendo click sobre la carpeta, se abre una ventana, en donde hay que escoger el directorio, pulsando sobre “Esta carpeta”:

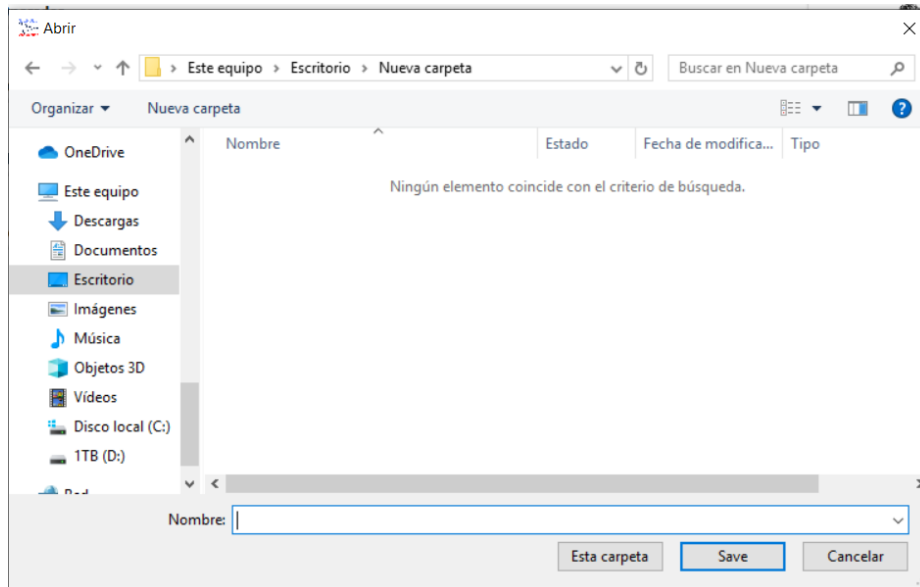


Figura 8.40-Ventana emergente de selección de la carpeta - *Fuente propia*

Apareciendo entonces la carpeta seleccionada:

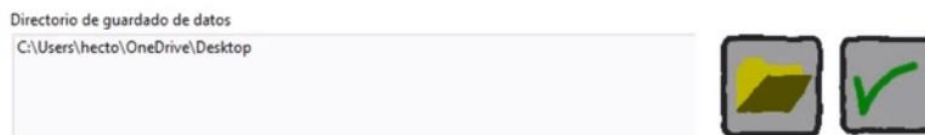


Figura 8.41-Selector del directorio de guardado cumplimentado correctamente - *Fuente propia*

Y finalmente se confirma la selección haciendo click sobre el botón de confirmación.



Figura 8.42-Botón de confirmación - *Fuente propia*

Entonces el programa, comienza a guardar los documentos seleccionados, en el directorio seleccionado, en una carpeta con el nombre de la fecha de la toma de medidas “Día_Mes_Año”, con una subcarpeta con la hora de la muestra “Hora_Minuto_Segundo”. De modo que si se toman sucesivas muestras en un día estas queden agrupadas en una misma carpeta de modo automático.

Esta carpeta asimismo, como se ha descrito incluye dos archivos (Datos.xls y Reporte.doc), así como la carpeta “graficas” también descrita.

8.11. APERTURA DE DATOS PARA REPROCESADO

Disponiendo del archivo Datos.xls, descrito en el apartado 8.10, se puede realizar un análisis de los datos, sin necesidad de tener el sensor conectado al PC. Para esto, en primer lugar, accediendo a la pestaña “Modo offline” (ver Figura 8.43), hay que hacer click sobre el icono de la carpeta (1), se abrirá una nueva ventana que en donde hay que seleccionar el archivo Datos.xls, y posteriormente hacer click sobre el botón de confirmación (2).

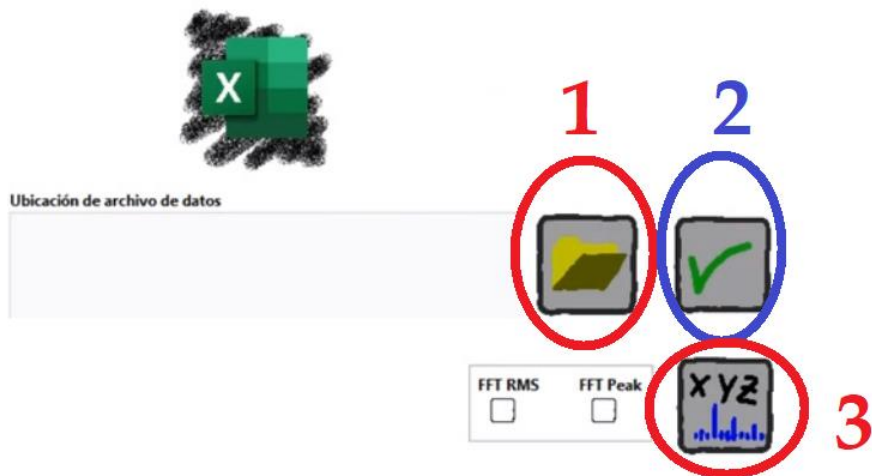


Figura 8.43-Pantalla para guardado de datos - Fuente propia

Tras esto, el programa leerá estos datos, y si lo hizo de forma satisfactoria, se abre una ventana indicándolo (ver Figura 8.44).

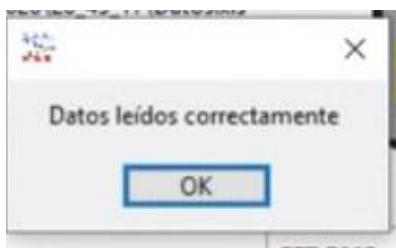


Figura 8.44-Ventana emergente de confirmación de datos leídos - Fuente propia

En este momento habrán cargado todos los datos que hay en este documento, pero para poder ver los espectros de frecuencias, hay que seleccionar que tipo de niveles de amplitud quieren visualizarse en el espectro, mediante la selección de las casillas “FFT RMS” o “FFT Peak”, para ver los niveles RMS o pico respectivamente. Finalmente, se hace click sobre el botón de generar

TRABAJO FIN DE GRADO
INGENIERÍA MARÍTIMA

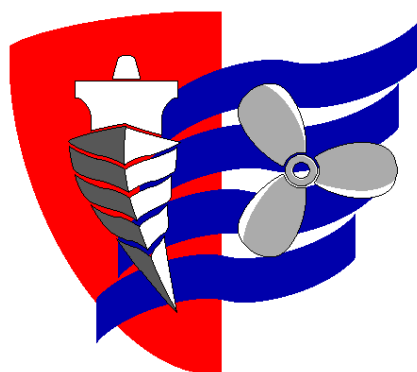
espectro (3) (Figura 8.43) y los espectros estarán ya disponibles también para su análisis.

8.12. REQUISITOS MÍNIMOS DEL PC

Los requisitos mínimos del PC para el uso de este software son los siguientes:

- **LabVIEW 2019 Runtime o superior** instalado. Se incluye en el CD-ROM, en \Software\LV Runtime
- **Sistema Operativo:** Windows 7, Windows 8, Windows 10 de 64 bit.
- **Procesador:** AMD Ryzen 7 3800X, Intel Core i7-8750H o equivalente
- **Memoria RAM:** 16 Gb
- **Gráficos:** NVIDIA GTX 560Ti
- **DirectX:** Versión 9.0
- **Almacenamiento:** 30Mb de memoria libre disponible.

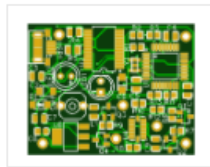
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



ANEXOS

9. ANEXOS

9.1. ANEXO I-PRESUPUESTOS DE FABRICACIÓN DE PCB



Gerber Viewer

PCB prototype:Y2-2549780A

\$48.70

Gerber file - 5dd7a74f31e849e6be76b0853be68ac
a_1585887166000_Y2

Build Time: 3 days

PCB Qty:5

Layers:2

Dimension:39mm*30mm

PCB Thickness:2

Impedance:no

PCB Color:Green

Surface Finish:ENIG-RoHS

Copper Weight:1 oz

Gold Fingers:No

Material Details:FR4-Standard Tg 130-140C

Panel By JLCPCB: No

Weight:20g

Flying Probe Test:Fully Test

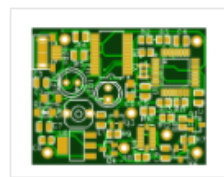
Castellated Holes:no

Remove Order Number:No

4-Wire Kelvin Test:No

Paper between PCBs:No

Figura 9.1-Presupuesto para la fabricación de 5 PCB en jlcpcb^[20]



Gerber Viewer

Small-batch PCB:P2-2549780A

\$30.90

Gerber file - 5dd7a74f31e849e6be76b0853be68ac

a_1585886541000_P2

Build Time: 5-6 days

PCB Qty:75

Layers:2

Dimension:39mm*30mm

PCB Thickness:2

Impedance:no

PCB Color:Green

Surface Finish:ENIG-RoHS

Copper Weight:1 oz

Gold Fingers:No

Material Details:FR4-Standard Tg 130-140C

Panel By JLCPCB: No

Weight:350g

Flying Probe Test:Random Test

Castellated Holes:no

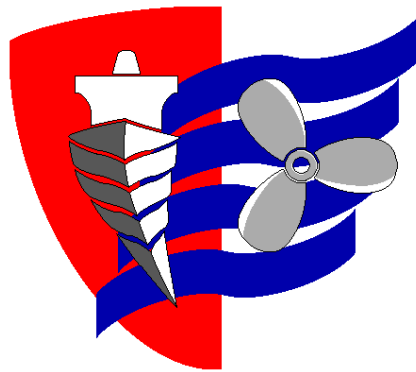
Remove Order Number:No

4-Wire Kelvin Test:No

Paper between PCBs:No

Figura 9.2--Presupuesto para la fabricación de 75 PCB en jlcpcb^[20]

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



BIBLIOGRAFÍA

10. BIBLIOGRAFÍA

10.1. LIBROS, SEMINARIOS Y DOCUMENTOS

[1]Singiresu S. Rao, University of Miami (2012)-“VIBRACIONES MECÁNICAS”. Pearson Education, Inc.

[2]Victor Wowk (1991)-“Machinery Vibration-Measurement and Analysis”- McGraw-Hill, Inc.

[3]Glen White (1990)- Introducción al Análisis de Vibraciones- Azima DLI

[4]Paresh Girdhar, Scheffer C.(2004)-Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance- Elsevier

[5]Zakriya Mohammed, Ibrahim (Abe) M. Elfadel, Mahmoud Rasras (2018)- “Monolithic Multi Degree of Freedom (MDoF) Capacitive MEMS Accelerometers”-MDPI

[6]Brüel & Kjær (1998)-Vibration measurement and analysis

[7]L Schiltz, Richard (1990)-“Forcing Frequency Identification of Rolling Element Bearings”

[8]Dr. Pedro Nelson Saavedra - Departamento de ingeniería mecánica- universidad de Concepción –“Tutorial severidad vibratoria. Parte I”

[9]Universidad Pública de Navarra – Departamento de Ingeniería mecánica, energética y de materiales. Curso de Doctorado “Introducción al fenómeno de las vibraciones mecánicas”

[10]Anders Nöremark-Energiforsk Vibrations in nuclear application (2018)-“ISO standards for Machine vibrationand balancing-Focus on large turbines and generators”.

10.2. NORMATIVA Y SOCIEDADES DE CLASIFICACIÓN

[11]International Standard Organization (1974) - Norma ISO 2372: "Mechanical vibration of machines with operating speeds from 10 to 200 rev/s -- Basis for specifying evaluation standards"

TRABAJO FIN DE GRADO
INGENIERÍA MARÍTIMA

[12]International Standard Organization (1984) - Norma ISO 4867: "Code for the measurement and reporting of shipboard Vibration data"

[13]International Standard Organization (1998) - Norma ISO 10816: "Mechanical vibration — Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts".

[14]International Standard Organization (2000) - Norma ISO 6954: "Mechanical vibration — guidelines for the measurement, reporting and evaluation of vibration with regard to habitability on passenger and merchant ships"

[15]Lloyd's Register (2016)-"Ship vibration and noise-Guidance notes. Rev. 2.1"

10.3. PÁGINAS WEB

[16]Conversor MOSFET bidireccional de niveles de 3.3V a 5V

URL: <http://www.hobbytronics.co.uk/mosfet-voltage-level-converter>

Accedido durante Octubre de 2019

[17]Página web oficial de National Instruments: Sección de Soporte y la Comunidad

URL: www.ni.com

Accedido entre Octubre de 2019 y Marzo de 2020

[18] Correas de transmisión dentadas

URL: <http://frs-cnc.com>

Accedido durante Febrero de 2020

[19] El sismógrafo de Zhang Heng

URL: <https://confuciomag.com/zhang-heng-sismografo>

Accedido durante Febrero de 2020

TRABAJO FIN DE GRADO
INGENIERÍA MARÍTIMA

^[20]JLCPCB: Fabricante de PCB, presupuestado del modelo diseñado

URL: <https://jlcpcb.com>

Accedido durante Marzo de 2020

10.4. HOJAS DE CARACTERÍSTICAS DE COMPONENTES EMPLEADOS

Para no reiterar todas las hojas de datos de todos los componentes empleados en este apartado, descritos en el apartado 3.1 (Elección de elementos), así como los elementos adicionales a éstos y enumerados en la lista de materiales (apartado 5.2), todas las referencias bibliográficas referidas a cualquiera de estos componentes, vendrá referenciada como ^[21]

Nota: Todas las hojas de características de los componentes, se incluyen en el CD-ROM, en el directorio \Hojas de datos de componentes

10.5. OTROS

^[22]Apuntes de clase de la asignatura “Vibraciones” de la Licenciatura en Máquinas Navales- Universidad de Cantabria.

Aviso responsabilidad UC

Este documento es el resultado del Trabajo Fin de Grado de un alumno, siendo su autor responsable de su contenido.

Se trata por tanto de un trabajo académico que puede contener errores detectados por el tribunal y que pueden no haber sido corregidos por el autor en la presente edición.

Debido a dicha orientación académica no debe hacerse un uso profesional de su contenido.

Este tipo de trabajos, junto con su defensa, pueden haber obtenido una nota que oscila entre 5 y 10 puntos, por lo que la calidad y el número de errores que puedan contener difieren en gran medida entre unos trabajos y otros,

La Universidad de Cantabria, la Escuela Técnica Superior de Náutica, los miembros del Tribunal de Trabajos Fin de Grado así como el profesor tutor/director no son responsables del contenido último de este Trabajo.”