

E.T.S. de Ingeniería Industrial,
Informática y de Telecomunicación

PROCEDIMIENTO DE MEDIDA Y CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DE TRENES DE POTENCIA EN TURBINAS EÓLICAS



Grado en Ingeniería
en Tecnologías Industriales

Trabajo Fin de Grado

Adrián Hernández Basterra

Gorka Gainza Gonzalez

Pamplona, fecha de defensa

Resumen

Las turbinas eólicas requieren, con el objeto de completar su diseño y validación, el desarrollo de ensayos sobre maquinas prototipo. Entre toda la batería de pruebas realizadas, el presente proyecto profundizará en aquellas encaminadas a la caracterización del tren de potencia en condiciones de operación. Se pretende describir y documentar un procedimiento genérico válido para las diferentes maquinas y los diferentes alcances de la normativa vigente. Para ello, se estudiarán:

- Las diferentes configuraciones del tren de potencia existentes en el mercado
- Las normas IEC, VDI y aquellas propias de las entidades certificadoras del sector eólico
- Los métodos de monitorización y adquisición de datos
- Los métodos de análisis para caracterización dinámica de componentes mecánicos.

El procedimiento desarrollado se aplicará a una maqueta que incluya componentes semejantes a los que componen el tren de potencia de máquinas eólicas

Abstract

Wind turbines need development of tests on prototype machines in order to complete its design and validation. Among the entire battery of tests, this project will deepen into those aimed at the characterization of the power train under operating conditions. It is intended to describe , document, and research a generic procedure valid for different machines and different scope of current regulations. To this end, it shown:

- .- Different configurations of the train's power in the market
- .- The IEC, VDI standards and those of the certification authorities of the wind energy sector
- .- The methods of monitoring and data acquisition
- .- The methods of analysis for dynamic characterization of mechanical components.

The developed procedure is applied to a model that includes similar components that make up the power train of wind machines.

Índice

Resumen	3
1. Introducción.....	1
2. Tipos de trenes de potencia	3
Tipo I: High speed modular drivetrain: Rotor + Eje Lento + Multiplicadora + Generador.....	4
Tipo II: Medium Speed Drivetrain: Rotor + Multiplicadora + Generador.....	6
Tipo III: Direct drive drivetrain: Rotor + Eje Lento + Generador Multipolo.....	8
3. Multiplicadora	9
4. Clasificación de aerogeneradores en el mercado según el tren de potencia	11
5. Análisis de señales	13
5. 1. Transforma de Fourier	14
5.2. Dominio temporal.....	14
5.2.1. Resolución	16
5.2.2. Frecuencia de muestreo.....	16
5.3. Dominio frecuencial.....	20
5.4. Filtros de señal.....	23
5.5. Ventanas	28
5.6. Análisis de Órdenes	34
5.7. Aplicación a una maqueta	39
6. VDI 3834	47
7. Resultados.	53
7.1. Acelerómetros	53
7.2. Medición	54
7.3. Análisis temporal según VDI 3834	56
7.4. Análisis Campbell	62
8. Conclusiones.....	68
Bibliografía.....	71

1. Introducción

En el diseño de aerogeneradores intervienen multitud de ensayos con el fin de completar y validar su diseño. Gracias a todos estos ensayos, se verifica que la máquina eólica funcione correctamente dando los niveles de potencia eléctrica que determina el fabricante y garantizando su vida útil. Al realizar dichas pruebas se crea la confianza en inversores, compañías de seguros, operadores... de que el aerogenerador que las ha pasado tiene un buen funcionamiento dando los beneficios que se espera de ella sin problemas permitiéndoles invertir en dicha máquina.

Uno de los ámbitos en los que se realizan estos ensayos es en el de las vibraciones. Es muy importante caracterizar dinámicamente todo el aerogenerador. Hay que comprobar que no se produzcan vibraciones indeseadas, durante su funcionamiento, que resulten perjudiciales dañando el aerogenerador o sus componentes y acortando su vida útil. Hay que comprobar las frecuencias naturales del mismo para evitar excitar dichas frecuencias produciendo la resonancia y posibles daños, es decir, si se observa una frecuencia natural que puede ser excitada por el viento o por otra acción previsible habrá que actuar para cambiarla o para que sus efectos no sean dañinos.

El presente proyecto se centra en la caracterización dinámica de los trenes de potencia de los aerogeneradores exclusivamente. Se trata de determinar el procedimiento que se sigue para la medición de las señales vibratorias y el procesamiento de dichas señales para comprobar si tienen un valor adecuado o por el contrario pueden causar un problema en la máquina, se realizará siguiendo la norma VDI 3834. Además se determinará el procedimiento para determinar su comportamiento dinámico en función de la velocidad de giro del generador, se realizará con ayuda de un gráfico Campbell.

Para ello, se establece una primera parte en la que se describen los diferentes tipos de trenes de potencia ya que dependiendo de ellos y sus componentes se colocarán unos sensores de vibración u otros y en una determinada posición para la correcta captación de la señal.

Después se establecen los principios del análisis y adquisición de señales y los parámetros a tener en cuenta. Además se explica el análisis frecuencial y todo ello se aplica a una maqueta que se asemeja a una máquina eólica.

Por último, se toman señales reales de un aerogenerador y con el programa Famos se realiza un análisis de esas señales en el dominio temporal y en el dominio frecuencial.

El alcance de este proyecto no incluye determinar las diferentes causas que provocan la vibración, ni posibles soluciones o análisis posteriores. Únicamente se trata de ver

cómo realizar una correcta adquisición de las señales vibratorias y, una vez que se tiene realiza la medición, cómo procesar esa información para realizar un análisis correcto. En dicho análisis se trata de determinar si un valor de vibración es excesivo y por lo tanto puede resultar perjudicial para la máquina y su funcionamiento y determinar las frecuencias naturales del aerogenerador y su comportamiento dinámico.

Por último, la normativa que existe sobre análisis de vibraciones no se puede aplicar fielmente a los aerogeneradores debido a su diseño y complejidad de componentes, además de las condiciones de trabajo más severas al trabajar bajo velocidades y cargas variables, aunque si que podría servir como guía. Existen diversos documentos como el VDI 3834 en los que se citan procedimientos para su desarrollo pero aun así es un campo bastante laxo y queda bajo el criterio del analista.

2. Tipos de trenes de potencia

Cualquier máquina o mecanismo vibrará de forma diferente en función de los elementos por los que esté formado, en un aerogenerador ocurrirá lo mismo. Existen muchos aerogeneradores, en concreto muchos trenes de potencia, que varían en función de su diseño y sus componentes, así, se puede tener un aerogenerador con muchos rodamientos y otros con menos, un aerogenerador con caja multiplicadora y otros sin ella, etc. En función de estos elementos aparecerán unas vibraciones u otras y el tener el conocimiento de todos ellos y de su disposición en el aerogenerador permitirá una mejor adquisición de las señales de vibración (saber cuántos y dónde colocar sensores) y un mejor análisis de la misma. En resumen, el procedimiento, para analizar vibraciones y resonancia que se dan en el eje de potencia de los aerogeneradores, variará en función del tipo de tren de potencia del aerogenerador, es decir, en función de los elementos que posee y sus apoyos. Para ello en este apartado se establecen los tres principales tipos de trenes de potencia que existen actualmente en el mercado.

Dependiendo de los elementos y su disposición se colocan unos sensores u otros. Para determinar que componentes producen una determinada frecuencia de vibración se emplean acelerómetros, si se desea conocer el efecto a fatiga que provoca una determinada vibración se colocan velocímetros y si se quiere conocer la magnitud en desplazamiento de un elemento se colocan sensores de posición, esta cuestión se detalla más a fondo en el apartado en el que se describe la norma VDI 3834. Sin embargo es posible, y lo que se hace habitualmente, colocar únicamente un tipo, suelen ser acelerómetros ya que son los más extendidos en el ámbito de las vibraciones, y pasar entre aceleración, vibración y desplazamientos mediante integración y derivación.

El número de sensores a colocar dependerá de los elementos que posea la máquina y de las direcciones en las que se mida la vibración. Por norma general se suele colocar un sensor (o tres para medir en las tres direcciones) cerca de cada elemento móvil, es decir, en elementos donde se dan mayores probabilidades de vibración como engranajes (caja multiplicadora), rodamientos, ejes, acoplamientos... En la mayoría de estos elementos las vibraciones se producen por imperfecciones como desequilibrios o daños.

Tipo I: High speed modular drivetrain: Rotor + Eje Lento + Multiplicadora + Generador

Este tipo de tren de potencia está formado por un eje lento sustentado por rodamientos que va desde el rotor hasta la caja multiplicadora, de ella sale el eje rápido que va hasta el generador eléctrico a través de un acoplamiento flexible. El rotor está formado por el buje, las palas y el sistema de pitch y, en esta disposición, el eje lento es el encargado de transmitir el giro del rotor a la multiplicadora. La carga axial y momentos flectores originados en el rotor y transmitidos por eje lento son absorbidos por los rodamientos con el fin de que a la multiplicadora solo le llegue el par y no le afecten esas fuerzas a los engranajes de la misma las cuales podrían dañar y acortar la vida útil de los mismos. Lo más habitual es que el eje lento tenga como apoyo dos rodamientos o un rodamiento:

- **Eje lento con dos rodamientos:** El eje lento descansa sobre dos rodamientos que, normalmente, suelen ser dos rodamientos esféricos. Con ellos, a la multiplicadora se transmite únicamente el par torsor y el resto de esfuerzos son transmitidos por los rodamientos a sus soportes, a la góndola y a la torre. Esto permite que los apoyos de la multiplicadora sean solo brazos de reacción para el par, se podría decir que la multiplicadora se cuelga del eje.

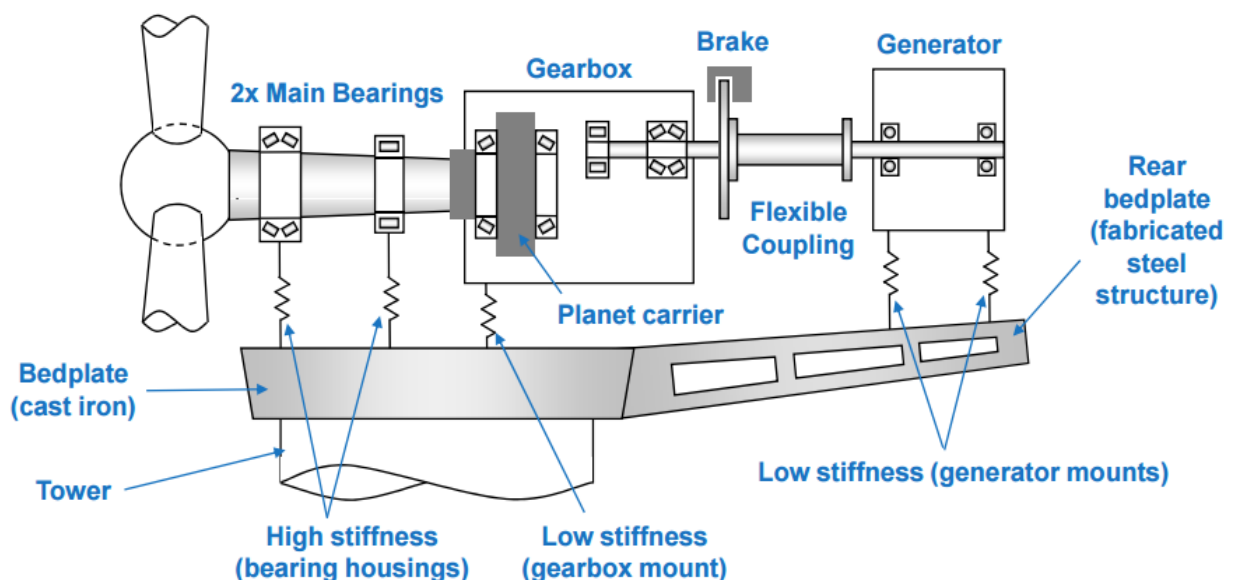


Figura 1. Esquema tren de potencia Tipo I con 2 rodamientos [1]

- **Eje lento con un rodamiento:** Esta configuración, el eje lento posee tres apoyos. El primer apoyo será un único rodamiento colocado cercano al buje y los otros dos serán rodamientos o apoyos de la propia multiplicadora. Por ello, la multiplicadora deberá soportar y transmitir a la estructura mediante sus apoyos los flectores y fuerzas que le llegan, que en la otra configuración no lo hacía, por lo que en este caso debe ser más robusta. Es decir, los rodamientos internos de la multiplicadora transmiten las fuerzas axiales y momentos flectores a la carcasa, por eso, la carcasa debe ser más robusta; e igual que en el caso anterior a los engranajes de la multiplicadora solo les llega el par con el fin de no dañarlos (la carcasa debe estar desacoplada de los engranajes para que únicamente les llegue par y no otras fuerzas que puedan dañarlos).

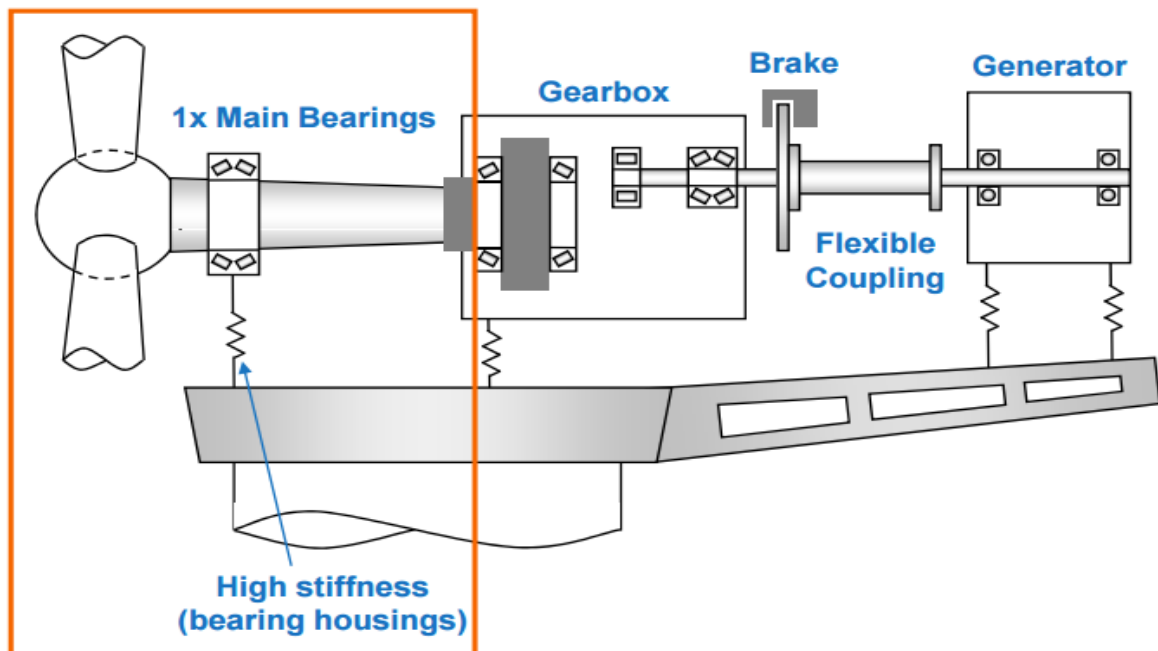


Figura 2. Esquema tren de potencia Tipo I con 1 rodamiento [1]

El eje lento llega a la multiplicadora, la cual se encarga de acelerar la velocidad de giro para poder emplear generadores eléctricos estándar de pocos polos, los cuales necesitan elevadas velocidades para generar energía eléctrica. Transforma la velocidad de giro del eje lento, que será la misma que la del rotor, a unas 1000-1500 rpm ya que es la velocidad óptima para los generadores con número bajo de polos.

A continuación de la multiplicadora se encuentra el acoplamiento flexible de eje rápido que la une al generador. Este eje rápido se encuentra girando entre 1000 y 1500 rpm, la velocidad de salida de la multiplicadora. Una de las principales funciones del acoplamiento es la de absorber las posibles desalineaciones entre los ejes de la

multiplicadora y el generador de tal forma que no se produzcan tensiones ni funcionamientos indeseables de los ejes de ambos elementos, por ello, se suelen emplear juntas del tipo Cardan (acoplamiento que permite unir dos ejes no colineales). Para proteger el acoplamiento y todo el sistema ante picos de par, que pueden afectar de manera nociva al rotor y demás componentes, por cortocircuito se suele colocar un disco de freno y un limitador de par, los cuales están tarados con el fin de evitar que se excedan un determinado par. Estos sistemas también evitan que pase mucho par del rotor al generador para que no lo dañe (frenan el funcionamiento del aerogenerador con velocidades muy elevadas del viento que provocan mucho par) y también sirven por si se para o estropea el generador no afecte de manera negativa al resto de maquinaria.

Tipo II: Medium Speed Drivetrain: Rotor + Multiplicadora + Generador

En esta configuración la multiplicadora se une directamente al buje, por lo que debe ser esta la que debe soportar todas las cargas provenientes del rotor al no existir rodamientos entre rotor y multiplicadora que lo hagan. Dichas cargas son absorbidas por la carcasa de forma que no afecten en ningún momento a los engranajes, los cuales solo pueden recibir el par del rotor. Por ello, la multiplicadora debe ser muy robusta y es más costosa ya que es necesario realizarle un diseño específico para esta aplicación (mayores cargas en ella). Además, este diseño puede ocasionar problemas si se necesita una reparación de la multiplicadora ya que al estar unida al rotor, para bajarla de la góndola, hay que desmontar todo el rotor para poder separar la multiplicadora. La ventaja es que se va a tener una máquina mucho más ligera al eliminar todo el conjunto de elementos del eje lento.

Normalmente la relación de transformación de esta multiplicadora es menor que en las configuraciones anteriores por lo que se dispondrá de un generador con velocidad de giro menor, es decir, con más número de polos.

La unión de la multiplicadora al generador se puede realizar de dos formas:

- Con un acoplamiento: El eje de salida de la multiplicadora se une al eje de entrada del generador mediante un acoplamiento flexible de la misma forma que ocurría en los “Tipo I”. Lo comentado en ese apartado es aplicable a este.

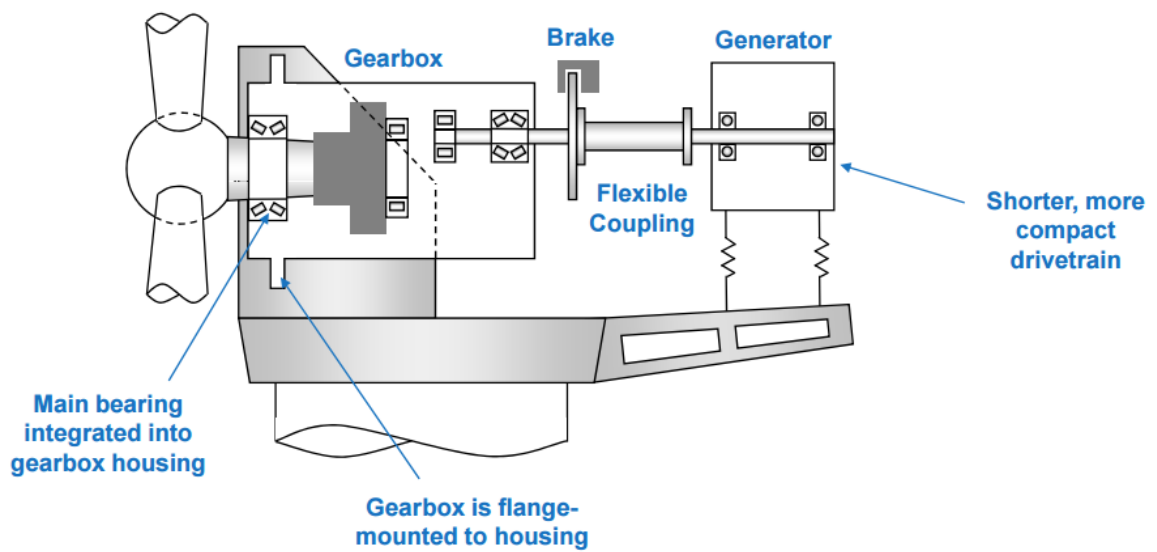


Figura 3. Esquema tren de potencia Tipo II con acoplamiento flexible [1]

- Directamente: No hay nada entre la multiplicadora y el generador, ambas máquinas están unidas. El eje de salida de la multiplicadora es el de entrada del generador. Necesita una alta precisión e interacción entre la multiplicadora y el generador. Apenas se usa por la dificultad de obtener dicha precisión y a que desequilibrios posteriores pueden causar graves problemas.

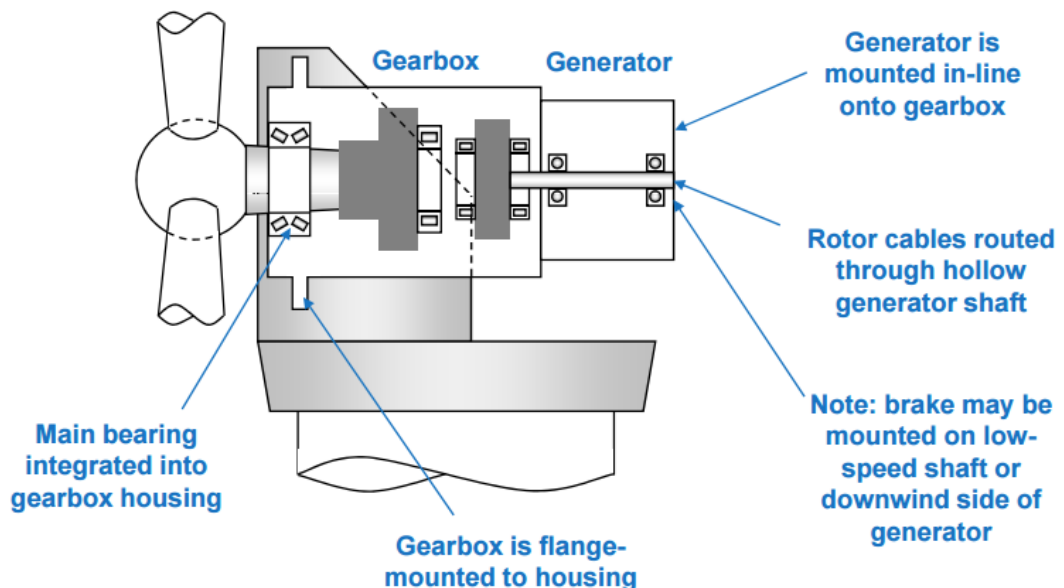


Figura 4. Esquema tren de potencia Tipo II sin acoplamiento [1]

Tipo III: Direct drive drivetrain: Rotor + Eje Lento + Generador Multipolo

En esta configuración lo más característico es que no hay máquina multiplicadora. De esta forma el rotor se une directamente al generador a través de un eje lento. El estator del generador es fijo en la carcasa del aerogenerador y el rotor del generador se apoya sobre un eje unido al rotor del aerogenerador de dos posibles maneras:

- Eje en voladizo fijo al bastidor, sobre el que se monta un eje hueco apoyado en los extremos, y unidos a este están el buje y el rotor del generador.
- Rotor del generador unido a un eje biapoyado en el bastidor y al que va unido el buje.

Al no haber multiplicadora el generador gira a baja velocidad, la misma que el rotor, entre 7 y 30 rpm, para poder generar electricidad se necesita un elevado número de polos. Es un generador síncrono de imanes permanentes que genera energía eléctrica en corriente alterna a frecuencia variable, por lo que no se puede introducir directamente a la red, así que toda la energía se rectifica y después se ondula de nuevo a la frecuencia de red.

Las ventajas de no tener máquina multiplicadora son que tienen menos partes que pueden fallar al haber menos mecanismos y se tiene un menor uso de lubricantes y mantenimiento.

3. Multiplicadora

En este apartado se realiza un inciso sobre la multiplicadora ya que es un elemento clave en el campo de las vibraciones al tener un elevado número de engranajes.

El rotor de un aerogenerador suele girar entre 15 rpm y 20 rpm en función del viento y del aerogenerador, pero el generador eléctrico de pocos polos (el más utilizado) necesita una velocidad muchísimo mayor (de unas 1500 rpm) para generar electricidad eléctrica y verterla a la red a 50 Hz. La multiplicadora es el elemento mecánico que se encarga de transformar la velocidad del eje del rotor a una velocidad mucho mayor, la óptima para el generador eléctrico.

Para realizar esta función, la multiplicadora consta de una serie de engranajes dispuestos en varias etapas, normalmente en los aerogeneradores se emplean 3 etapas. En este tipo de multiplicadoras se suele emplear etapas epicicloidales y etapas paralelas.

- Las etapas planetarias o epicicloidales están formadas por un engranaje solar alrededor del cual giran varios planetarios y portaplanetarios y por último una corona exterior. Debido a esta disposición distribuyen los esfuerzos entre los diferentes engranajes planetarios de la etapa, reduciendo la carga a transmitir por cada engranaje. De esta forma se consigue tener engranajes más pequeños que en una etapa paralela con los mismos esfuerzos aunque el diseño es más complejo y el coste mayor. Por ello se colocan en la entrada de la multiplicadora (en la 1ª o 2ª etapa) porque es en esta zona donde llega mucho par (grandes esfuerzos) con poca velocidad. Tienen mejor eficiencia que una etapa paralela.

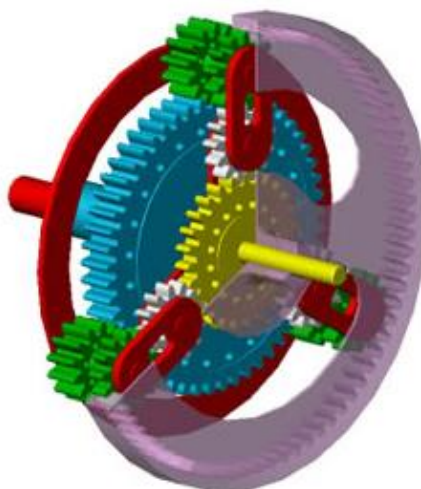


Figura 5. Etapa epicicloidal de una multiplicadora [1]

- Las etapas paralelas están formadas por dos ejes paralelos con engranajes. Son las ideales para transmitir poco esfuerzo y grandes velocidades, por ello se colocan hacia la salida de la multiplicadora (3º etapa y también en la 2ª dependiendo de la potencia a transmitir) donde ya se tiene y se quiere conseguir mucha velocidad y se ha reducido el par.

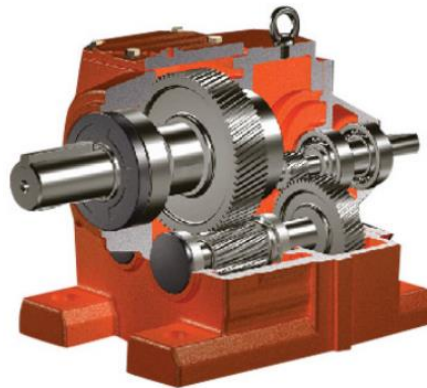


Figura 6. Etapa paralela de engranajes [1]

En la multiplicadora es donde se sitúan las mayores pérdidas de rendimiento del aerogenerador. Para minimizarlas en lo máximo posible los engranajes suelen ir sumergidos en aceite lubricante y este mismo aceite se hace circular por un circuito que lo filtra, lo enfría y lo reparte por todos los elementos móviles.

Las ventajas del uso de una caja multiplicadora en un aerogenerador son que es una tecnología estándar ya que es la que más se usa y está más desarrollada. Además el utilizar la multiplicadora permite colocar un generador más pequeño y menos pesado por lo que todo el sistema será más liviano. Se consigue una gran eficiencia en operación nominal.

Normalmente, las multiplicadoras de los aerogeneradores tienen una relación de transmisión entre 1:30 y 1:90 y suelen estar formadas por tres etapas de engranajes que suelen ser o bien dos etapas planetarias y una paralela o una etapa planetaria y dos etapas paralelas.

4. Clasificación de aerogeneradores en el mercado según el tren de potencia

Una vez vistos los tres tipos de trenes de potencia con los que puede estar diseñado un aerogenerador, se va a realizar una clasificación atendiendo a esos tres tipos de trenes de potencia de diferentes aerogeneradores que existen en el mercado.

- La empresa *GOLDWIND* diseña todos sus aerogeneradores con una configuración “Direct Drive”, es decir, tipo III.
- La empresa *ENERCON* diseña todos sus aerogeneradores con una configuración “Direct Drive”, es decir, tipo III.
- Los aerogeneradores de *SIEMENS* son los siguientes:
 - ✓ Familia SWT-2.3: Tipo I con 1 rodamiento.
 - ✓ Familia SWT-3.0: Direct Drive
 - ✓ Familia SWT-3.2: Direct Drive
 - ✓ Familia SWT-3.3: Direct Drive
 - ✓ Familia SWT-3.4: Direct Drive
 - ✓ Familia SWT-3.6: Tipo II con 2 rodamientos
 - ✓ Familia SWT-4.0: Tipo II con 2 rodamientos
 - ✓ Familia SWT-6.0: Direct Drive
- Los aerogeneradores de *VESTAS* son los siguientes:
 - ✓ Los de 2.0 MW: Tipo I con 1 rodamiento
 - ✓ Los de 3.0 MW: Tipo II
 - ✓ Los de 3.45 MW: Tipo II
- Los aerogeneradores de *GAMESA* son los siguientes:
 - ✓ Los de 2.0 MW: Tipo I con 2 rodamientos
 - ✓ Los de 2.5 MW: Tipo I con 2 rodamientos
 - ✓ Los de 3.3 MW: Tipo I con 2 rodamientos
 - ✓ Los de 5.0 MW: Tipo I con 1 rodamiento
- Los aerogeneradores de *ACCIONA* son los siguientes:
 - ✓ AW3000: Tipo I con 2 rodamientos
 - ✓ AW1500: Tipo I con 2 rodamientos

- Los aerogeneradores de *NORDEX* son los siguientes:
 - ✓ Generation Delta: Tipo I con 1 rodamiento
 - ✓ Generation Gamma: Tipo II

- Los aerogeneradores de *MINGYANG* son los siguientes:
 - ✓ Los de 1.5 MW: Tipo I con 2 rodamientos
 - ✓ Los de 2.0 MW: Tipo I con 2 rodamientos
 - ✓ Los de 2.5 MW: Tipo II
 - ✓ Los de 2.75 MW: Tipo II
 - ✓ Los de 3.0 MW: Tipo II

5. Análisis de señales

Para medir las vibraciones de cualquier máquina lo primero que se necesita es realizar una captación de las mismas, para ello se procede a colocar sensores o acelerómetros que captan, en cada instante, el desplazamiento del punto de la máquina (en el caso de los acelerómetros lo que se capta es la aceleración del punto, pero es fácil pasar entre desplazamiento, velocidad y aceleración mediante integración y derivación con fórmulas de cinemática) sobre el que se coloca el sensor. De esta forma, estos acelerómetros captan la señal de la vibración en el dominio del tiempo y la convierten en una señal eléctrica (normalmente se transforma en una señal análoga en voltaje) que se puede procesar y almacenar. Así se posee una onda, normalmente muy compleja, que va variando en el tiempo y que indica como son las vibraciones que está sufriendo el punto de la máquina sobre el que se mide.

En esta onda se puede observar toda la información acerca del comportamiento vibratorio de cada elemento de la máquina, pero se encuentran todas las vibraciones superpuestas por lo que no es fácil identificarlas y ver lo que ocurre en cada elemento. Es decir, no es de gran ayuda a la hora de realizar un análisis del comportamiento de cada elemento de la máquina y ver si algo falla o no, debido a la complejidad y enorme cantidad de información que esta onda tiene al componerse de muchas señales de todos los elementos de la máquina, por lo cual resulta prácticamente imposible distinguir a simple vista sus comportamientos característicos.

Una forma más sencilla de realizar este estudio de vibraciones es analizarlas en el dominio de la frecuencia, ya que, conociendo los elementos que componen ese aerogenerador y como es el comportamiento de cada uno, se puede asociar cada vibración a una frecuencia determinada al elemento que la provoca. Esto supone transformar la señal en el dominio del tiempo a una gráfica en la que se representa la amplitud de esa señal en función de cada frecuencia. A esta gráfica se le denomina espectro (es simplemente otra forma de representación de la misma señal) y es la herramienta más utilizada hoy en día y con la que se va a trabajar en el presente proyecto. El espectro nos permite separar las diferentes señales que hay superpuestas en la onda en el dominio del tiempo (esta superposición es la que hace muy complicado realizar un análisis en el dominio del tiempo al pasar desapercibidas muchas señales) y ordenarlas en función de su frecuencia. Cada señal de cada frecuencia se podrá asociar a un elemento o aun comportamiento de la máquina, como se verá más adelante, y ver si la amplitud de esa vibración en esa frecuencia es perjudicial o no.

5. 1. Transforma de Fourier

Para realizar esa transformación matemática del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia se emplea la “Transformada de Fourier”. La transformada de Fourier Continua – TDF – es una herramienta matemática que permite descomponer y expresar una onda cualquiera, por muy compleja que sea, siempre que sea periódica, en suma de funciones senoidales cada una con su amplitud, frecuencia y fase propia. Estas funciones senoidales son las que se representan en el espectro y dan toda la información de la onda medida en el tiempo. Las técnicas de análisis de señal que se han ido desarrollando, y que se detallará su procedimiento más adelante, permiten extender el concepto de la TDF a señales reales, las cuales se pueden considerar periódicas de período infinito, y que son discretizadas y truncadas para su tratamiento digital y almacenamiento. La herramienta con la que se comenzó a trabajar para este fin fue la Transformada de Fourier Discreta – TDFD – pero a día de hoy la herramienta universal para el análisis frecuencial es la Transformada Rápida de Fourier – FFT – la cual respecto a la TDFD reduce el tiempo de cálculo computacional pero tiene la limitación de que el número de muestras o mediciones de la señal debe ser igual a una potencia de dos.

5.2. Dominio temporal

Los sensores empleados son en su mayoría de naturaleza analógica (miden una señal continua en el tiempo) generando señales analógicas que han de ser tratadas para almacenarse digitalmente. La digitalización consiste en ir midiendo el valor de esa señal analógica cada incremento de tiempo – Δt – establecido, guardando el valor medido en función del tiempo. Solo se poseerán esos datos de la señal cada Δt , lo que ocurra en la señal entre dos medidas se perderá. Así se tendrá una gran cantidad de puntos que uniéndolos correctamente se tendrá la función analógica que se guarda y a la que se podrá aplicar la FFT.

Un ejemplo se observa en la figura 7, cada Δt pone un punto en la señal analógica que se está midiendo. Estos puntos con su valor y su instante de tiempo es la única información que se guarda, que se digitaliza. Toda lo que le ocurra a la señal entre puntos no se guardará y se perderá esa información ya que la señal se recompondrá uniendo los puntos guardados.

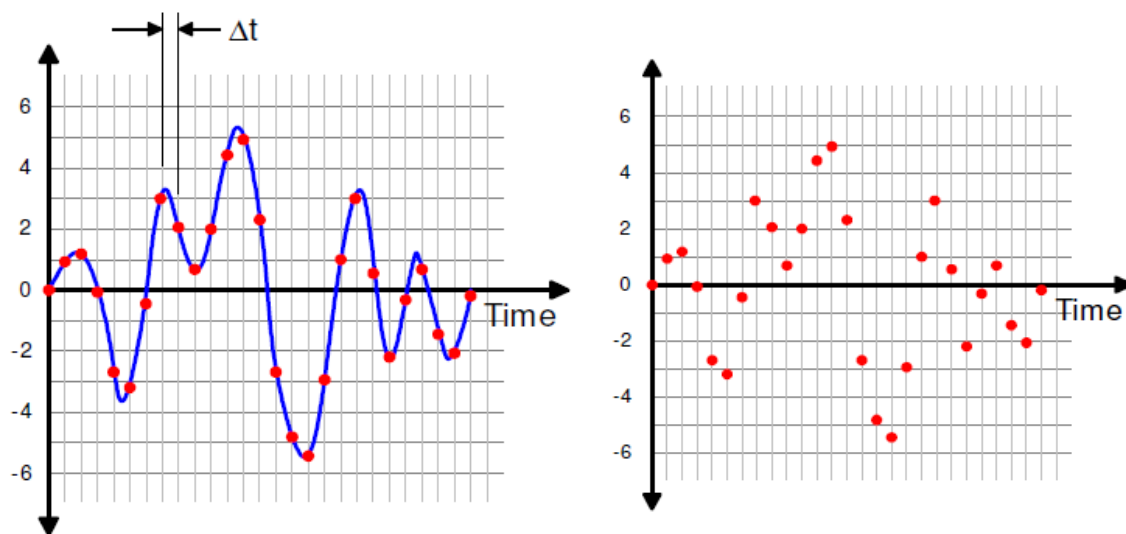


Figura 7. Digitalización de una señal [4]

Esta adquisición de datos depende de dos parámetros básicos que en función de su correcta elección determinará si con los datos tomados se puede reconstruir la señal real fielmente (o cercana, cometiendo poco error) o por el contrario se cometerán errores en la medición perdiendo información y obteniendo otra señal diferente (debido a que la información perdida en el Δt era muy relevante). Por ello habrá que tener especial cuidado en los siguientes dos parámetros que permiten la adquisición de información en el dominio temporal:

- **Frecuencia de muestreo:** Número de muestras o puntos sobre la señal analógica que se realizan por segundo para así tener la señal digitalizada. El inverso de la frecuencia de muestreo es equivalente al tiempo transcurrido entre dos muestras sucesivas (Δt).
- **Resolución:** Mínimo incremento posible en el eje de amplitud para que no tome diferentes valores como uno mismo. Es decir, todos los valores que estén en este intervalo (incremento) no los diferenciará y los tomará como uno solo. Como se observa en la figura 8 los puntos rojos serán desplazados según la flecha hasta la línea discontinua más próxima al estar dentro de uno de esos intervalos, por lo que no se tendrá el valor exacto. Esta resolución será función del rango de medida a cubrir y del número de intervalos en los que se puede medir este rango que será una característica de la capacidad de convertidor del sistema de adquisición.

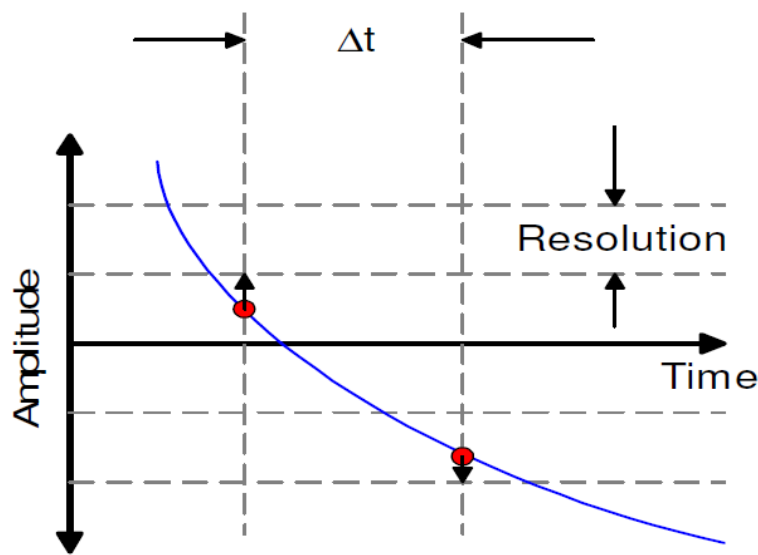


Figura 8. Efecto de la resolución en el dominio temporal [4]

5.2.1. Resolución

Para mejorar la resolución en amplitud lo que hay que conseguir es tener el mínimo incremento posible ya que así se tendrán más valores posibles que puede tomar la señal y los puntos serán más próximos a su valor real (se habrán desplazado menos al tener menor recorrido el intervalo). Para ello hay que fijar muy bien el rango de medida a cubrir aproximándolo lo más posible a los valores de la señal siempre que toda la señal entre en ese rango, así se tendrá un rango menor con el mismo número de divisiones por lo que cada división será más pequeña que era lo perseguido. El número de divisiones o intervalos que se pueden realizar es función del sistema de adquisición; así, por ejemplo para un sistema de 8 bits podrá hacer $2^8=256$ intervalos y uno de 16 bits podrá realizar $2^{16}=65536$ intervalos. Cuanto mayor sea el número de bits del sistema de adquisición mejor será la resolución en amplitud ya que dividirá el mismo rango en mayor número de intervalos consiguiendo que la amplitud de cada intervalo sea menor.

5.2.2. Frecuencia de muestreo

Saber fijar la frecuencia de muestreo también es una cuestión fundamental para una buena adquisición de la señal. Cuanto mayor es la frecuencia de muestreo más datos por segundo se toman por lo que la cantidad de información a procesar es mucho mayor con el consiguiente aumento del tiempo de cálculo computacional. Si se disminuye la frecuencia de muestreo se tomarán menos puntos por lo que el cálculo computacional será mucho menor, por lo que interesará tener frecuencias de muestreo bajas en este aspecto. Pero si se muestrea a una frecuencia muy baja se puede cometer un gran error y tener otra señal completamente distinta a la real.

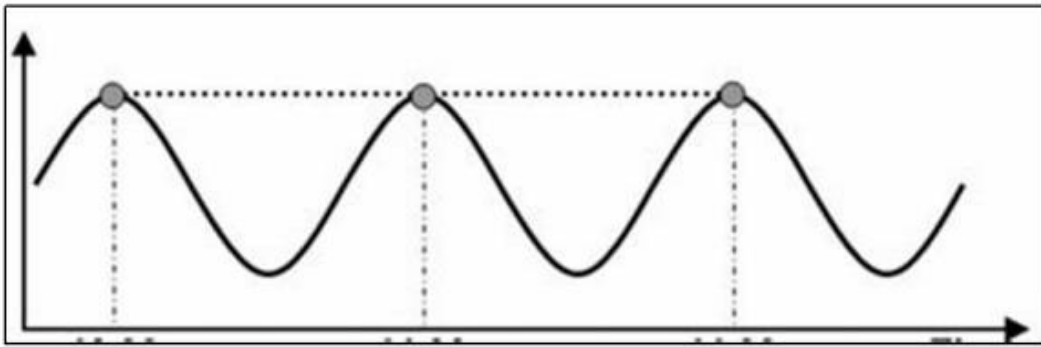


Figura 9. Señal de 50Hz muestreada a 50Hz. Uniendo los puntos da una línea recta [16]

La figura 9 muestra una señal de 50Hz y se muestrea a una frecuencia, también, de 50Hz. Conectando los puntos muestreados se obtiene una línea recta, con lo que la señal medida no será la real. No es una frecuencia válida de muestreo porque no hay suficientes puntos para reconstruir la señal, habrá que aumentar la frecuencia de muestreo.

En la siguiente figura se observa la misma señal muestreada al doble de frecuencia (100Hz)

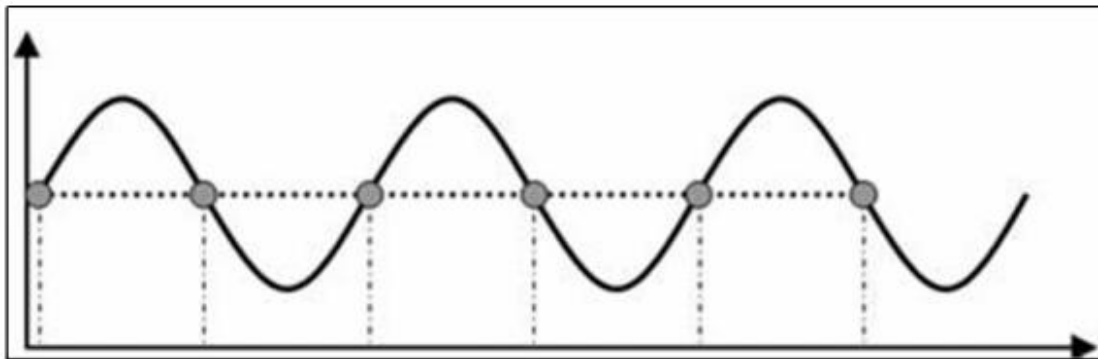


Figura 10. Señal de 50Hz muestreada a 100Hz. Uniendo los puntos da una línea recta [16]

Se vuelve a obtener lo mismo, una línea recta en la señal medida. Por lo que, de momento, la señal demuestro debe ser mayor que el doble de la frecuencia de la señal porque se ha comprobado que con frecuencias menores no muestra correctamente la señal.

Para seguir ilustrando este fenómeno, la figura 11 muestra una señal muestreada a una frecuencia menor del doble de su frecuencia y, como se observa, en la reconstrucción aparece una señal a otra frecuencia diferente por lo que no será una

señal válida al no ser como la real. No siempre dará una línea recta sino que puede resultar otra señal completamente distinta, dependerá de la frecuencia de muestreo empleada.

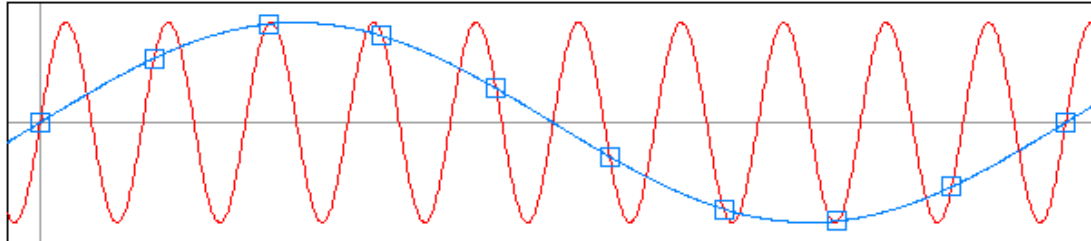


Figura 11. Señal muestreada a una frecuencia menor del doble de su frecuencia [4]

Este efecto por el que no se reconstruye correctamente la señal se le denomina efecto Aliasing y para que no ocurra, la frecuencia de muestreo debe ser siempre superior a la frecuencia de Nyquist. Esta frecuencia de Nyquist es el doble de la frecuencia de la señal y se comprobó que con que la frecuencia de muestreo sea mayor que la de Nyquist se consigue que la señal obtenida tenga la misma frecuencia que la real. Por ejemplo, para que en el espectro aparezca una señal a la frecuencia de 200 Hz y se corresponda con la señal real debe realizar el muestreo a una frecuencia mayor de 400 Hz.

Por lo tanto se muestreará a una frecuencia superior al doble de la máxima frecuencia de interés de la señal a medir, pero la máquina podrá tener otras frecuencias superiores y estas aparecerán en el espectro pero que no serán reales al no estar muestreadas al doble de su frecuencia obteniendo así un espectro de la vibración erróneo (estas frecuencias superiores a la de la mitad de la de muestreo aparecerán reflejadas como si tuvieran una baja frecuencia). Para que esto no suceda lo que se realiza es intentar eliminar todas esas señales que están a una frecuencia por encima de la máxima de interés que se desea medir para que no modifique el espectro. Con este fin se coloca un filtro paso bajo con frecuencia de corte igual a la máxima de interés, de esta forma deja pasar todas las señales de interés y serán muestreadas correctamente y las señales que no iban a ser muestreadas correctamente las elimina el filtro paso bajo antes de ser muestreada la señal. El filtro paso bajo no elimina justo en la frecuencia de corte todas las señales con frecuencias superiores si no que lo hace siguiendo la ganancia que se observa en la figura 12.

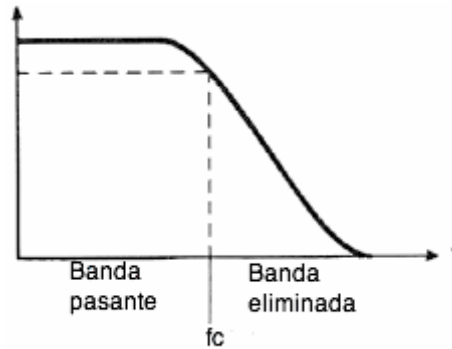


Figura 12. Esquema de ganancia de un filtro paso bajo

Se observa como seguirán existiendo señales por encima de la frecuencia de corte que no se eliminan sino que estas simplemente se atenúan y por lo tanto no estarán muestreadas al doble de su frecuencia por lo que no se representarán correctamente en el espectro. Para corregir este efecto de la ganancia del filtro paso bajo se establece que la frecuencia de muestreo debe ser mayor a 2.57 veces la frecuencia máxima de interés, así, aparecerán señales a frecuencias superiores pero atenuadas con la ventaja de que no interferirán en las frecuencias de interés del espectro.

En definitiva se debe muestrear a una frecuencia superior a 2.57 veces la frecuencia máxima de interés para conseguir una señal real o se podrán tener en cuenta las señales que aparezcan a una frecuencia menor que la frecuencia de muestreo entre 2.57.

Con lo descrito hasta ahora anterior se consiguen que las señales se reconstruyan con su frecuencia real pero tendrán errores en su amplitud ya que al no realizar suficientes puntos de muestreo va a perder información, como se ve en la figura 13.

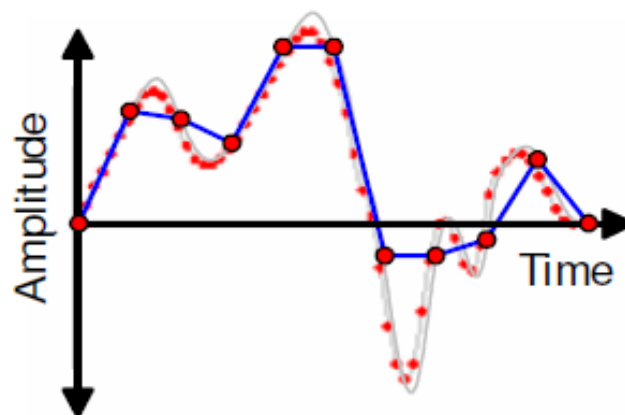


Figura 13. Ejemplo de pérdida de información debido a una frecuencia de muestreo baja [4]

Se ha estudiado y determinado que el error en amplitud cometido se establece con la siguiente relación, dando el resultado en porcentaje:

$$Peak Error = \left[1 - \cos \left(\frac{\pi f_{max}}{R} \right) \right] * 100$$

Siendo:

f_{max} = La frecuencia sobre la que se está calculando el error
R = frecuencia de muestreo

Así, por ejemplo, para una frecuencia de muestreo 3 veces mayor que una determinada frecuencia, se tendrá un error de pico del 50% y para una frecuencia de muestreo 12 veces superior se tendrá un error de amplitud del 3,4%. De esta forma cuando se ha calculado un espectro de una señal, las señales con frecuencias más bajas tendrán un error mucho menor que las de frecuencias altas ya que la frecuencia de muestreo respecto a ella es mucho mayor.

En resumen, si únicamente se desea conocer los valores de las frecuencias de las señales o de las vibraciones basta con realizar el muestreo a una frecuencia mayor de 2,57 veces la mayor frecuencia de interés. Si además interesa conocer el valor real de amplitud de esa señal la frecuencia de muestreo deberá ser mucho mayor con el fin de tener errores pequeños. Se establece que una buena frecuencia de muestreo es 10 veces la mayor frecuencia de interés del espectro, haciendo un balance entre error y tiempo de computación.

5.3. Dominio frecuencial

Una vez adquirida la señal y digitalizada se le realiza una FFT, que como se ha comentado es más útil para su análisis. Al realizar la transformada de Fourier a la señal en el dominio del tiempo, no se obtiene una función continua en frecuencia si no que es discreta; solo se tendrá información a determinadas frecuencias. Si se grafica la amplitud de la señal en función de la frecuencia (esta relación entre amplitud y frecuencia la determina la FFT) se obtiene lo que se llama un espectro. Entonces el espectro no será una gráfica continua sino que será discreta.

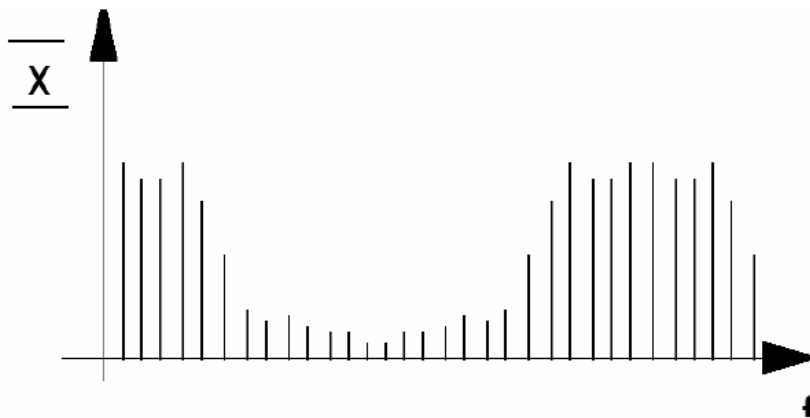


Figura 14. Esquema de un espectro discreto [4]

Las frecuencias en las que se determinará la amplitud son determinadas en función de dos parámetros:

- **Resolución en frecuencia (Δf):** Intervalo incremental en el eje de frecuencia. Como se acaba de comentar únicamente se tendrán valores en el espectro a determinadas frecuencias y cada frecuencia que aparezca en el espectro está separada de la siguiente frecuencia un intervalo fijo para todo el espectro. Es decir, la resolución en frecuencia es la mínima distancia entre frecuencias para que sean diferenciables. Todas las señales con frecuencias dentro de un mismo intervalo aparecerán promediadas como una sola señal.

Si por ejemplo la resolución en frecuencia es de 3 Hz y en la onda real se tienen señales a 6 Hz y 8 Hz y según la resolución de frecuencia aparece en el espectro la señal a 7 Hz y no a 6 ni 8 Hz significa que todas las señales que tenga la onda real en el intervalo de 5,5 Hz a 8,5 Hz aparecerán promediadas en un solo pico a la frecuencia de 7 Hz, por lo que como se tenía señales a 6 Hz y 8 Hz en el espectro solo se observa un pico a una frecuencia de 7 Hz en lugar de un pico a una frecuencia de 6 Hz y otro pico a una frecuencia de 8 Hz teniendo un resultado erróneo y perdiendo información. Mejorar la resolución en frecuencia (Δf) significa reducir ese intervalo entre frecuencias y se puede estimar que el Δf es el inverso del tiempo que abarcan los puntos utilizados en el cálculo de transformada de Fourier, $\Delta f=1/T$, con todo ello se puede mejorar la resolución en frecuencia aumentando el tiempo de muestreo de la vibración, con lo que conllevará tener más puntos muestreados. Puede ocurrir que la vibración a medir no dure el tiempo T necesario para medir puntos y obtener una Δf concreta, con lo que habrá que realizar un balance que se explica un poco más adelante.

- **Rango de frecuencia:** Intervalo de frecuencia que aparecerá en el espectro. Como ya se ha comentado, la frecuencia máxima que aparecerá o el límite superior del rango de análisis será la frecuencia de Nyquist ya que no se pueden identificar señales que no sean muestreadas al doble de su frecuencia y por ello se coloca un filtro paso bajo que elimina las frecuencias superiores. El límite inferior del rango de frecuencia o la frecuencia más baja de la que se tendrá información será igual a la resolución en frecuencia.

El dominio frecuencial está relacionado con el dominio temporal según la siguiente relación:

$$N \times \Delta f \times \Delta t = 1$$

Donde:

N: Número de muestras utilizadas para el cálculo de la transformada de Fourier, que será potencia de dos en el caso de la FFT y que estará relacionado con el tiempo T que se utiliza para la medición (a mayor T, con una misma frecuencia de muestreo, mayor número de puntos muestreados).

Δf : Resolución en el dominio frecuencial. Como se ha comentado $\Delta f = 1/T$

Δt : Resolución en el dominio temporal

A primera vista cuanto mayor resolución tanto en el dominio frecuencial como en el temporal (que los intervalos Δf y Δt sean muy pequeños) sería mejor ya que se perderá menos información y será más precisa. Pero según la relación citada, $\Delta f = 1/T$, para mejorar la resolución en frecuencia hay que estar muestreando la señal un mayor tiempo, lo que puede ocasionar problemas ya que puede que la vibración a medir no dure tanto como el tiempo necesario para conseguir una resolución en frecuencia determinada y se estará midiendo tiempos en los que no hay vibración repercutiendo en una FFT de la vibración errónea. Además se conseguiría a costa de tener un elevado número de muestras (N muy alto) que deberán ser guardadas, transferidas, graficadas y usadas en cálculos como la transformada de Fourier que provocará un coste computacional muy elevado y muchas veces inasumible. Por todo ello, habrá que realizar un balance entre la resolución en frecuencia y la resolución temporal de tal forma que no se tenga un elevado número de puntos pero que tampoco se cometan muchos errores.

5.4. Filtros de señal

Las señales medidas son señales analógicas que tienen mucha información sobre diferentes frecuencias. Muchas de esta información esta enmascarada por la cantidad de señales que se captan y muchas se introducen por error de los aparatos de medida. Para centrarse en frecuencias determinadas o en rangos de frecuencia de interés de forma que otras señales no enmascaren estos datos se utilizan filtros, los cuales su función es eliminar señales de determinadas frecuencias escogiendo bien sus características. Por ejemplo si solo se quiere ver la señal producida por un eje, esta suele ser a bajas frecuencias comparada con otros elementos, por lo que se establece un filtro que elimine las señales de alta frecuencia y así se pueden configurar los parámetros característicos de resolución temporal, frecuencial... óptimos para esta señal.

Los parámetros de los filtros son los siguientes:

Frecuencia de corte: Punto en frecuencia a partir del cual la atenuación del filtro actúa de manera significativa

Orden del filtro: Asociado a la precisión del filtrado, así conforme se aumenta el orden la atenuación se hace más brusca en el dominio frecuencial y por lo tanto menor la transición en frecuencia.

En los filtros se pueden producir rizados en las zonas de atenuación o en la ganancia unitaria, esto quiere decir, que la ganancia no es constante en esas zonas y va variando un poco y también se producen desfases debido a la multiplicación de la fase de la señal por la fase de la función de transferencia del filtro, a este desfase se le denomina retraso.

Los filtros se pueden clasificar en función del contenido frecuencial que atenúan:

- **Paso bajo:** Atenúan el efecto de frecuencias por encima del valor de corte. Son utilizados para eliminar el ruido, suavizar señales y evitar aliasing como ya se ha comentado en apartados anteriores.

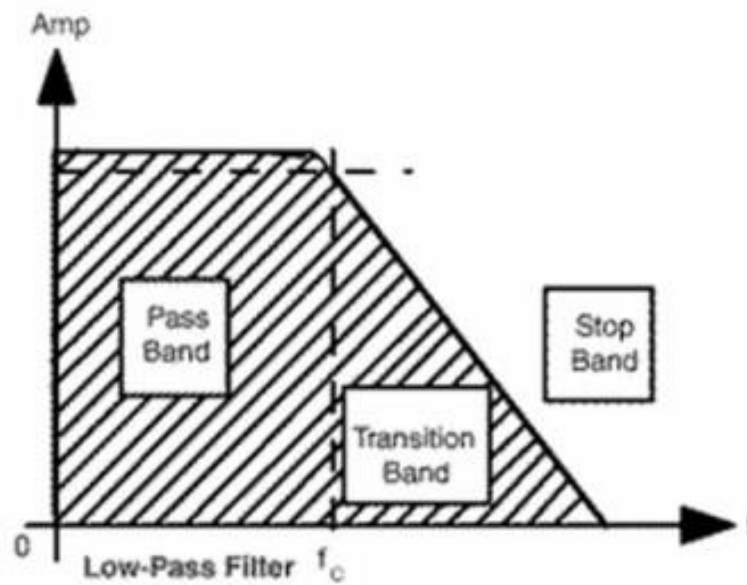


Figura 15. Esquema ganancia filtro paso bajo [16]

- **Paso alto:** Atenúan el efecto de frecuencias por debajo del valor de corte. Utilizados para eliminar offset, drifts o como parte del proceso de acondicionamiento de señal.

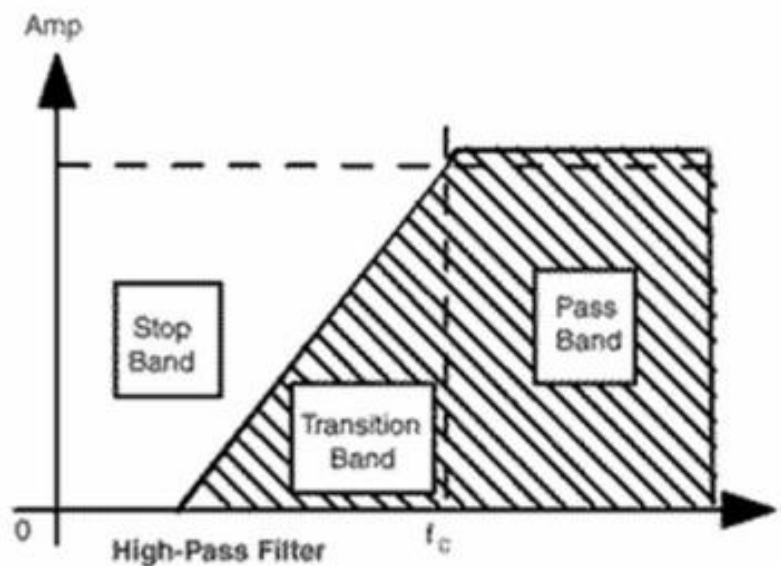


Figura 16. Esquema ganancia filtro paso alto [16]

- **Paso banda:** Atenúan el efecto de frecuencias comprendidas fuera de la banda establecida por dos frecuencias de corte.

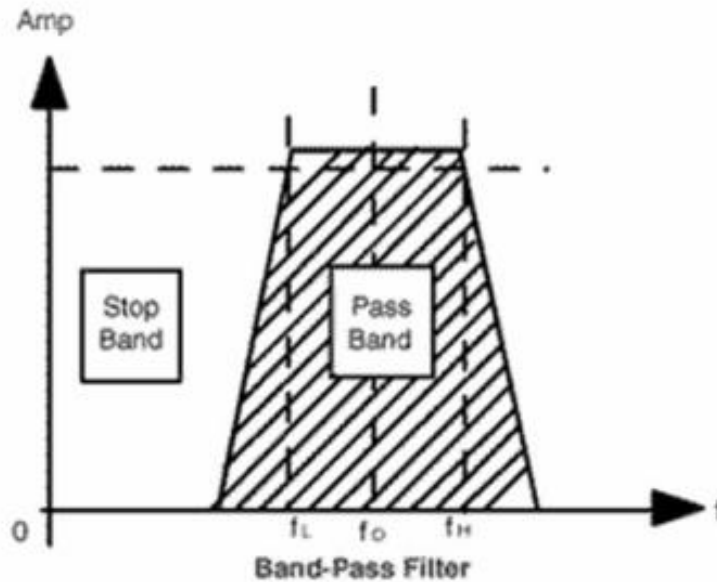


Figura 17. Esquema de la ganancia de un filtro paso banda [16]

- **Paso stop:** Atenúan el efecto de frecuencias comprendidas dentro de la banda establecida por dos frecuencias de corte.

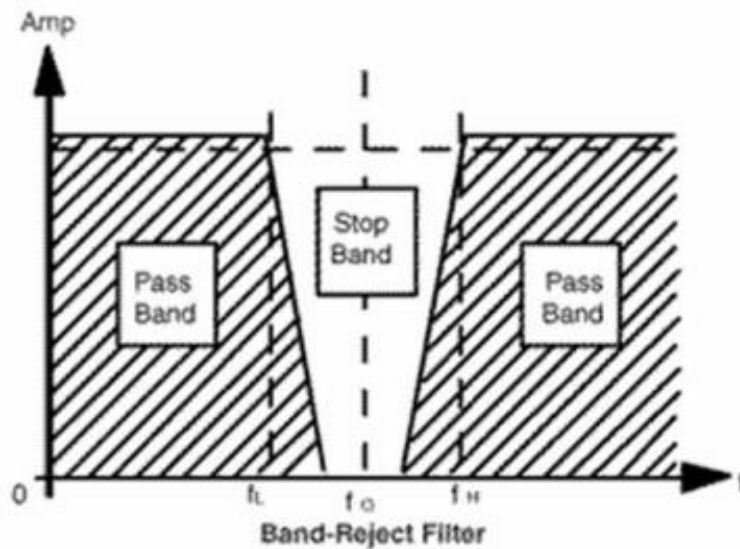


Figura 18. Esquema de la ganancia de un filtro paso stop [16]

Además, existen diferentes tipos de filtros en función de su formulación y construcción obteniendo diferentes ganancias y retrasos:

- **Bessel:** Su característica principal es que no distorsionan la fase respecto a la señal original pero presentan una banda de transición más amplia con una frecuencia de corte poco definida. Se utiliza cuando interesa la fase de la señal.

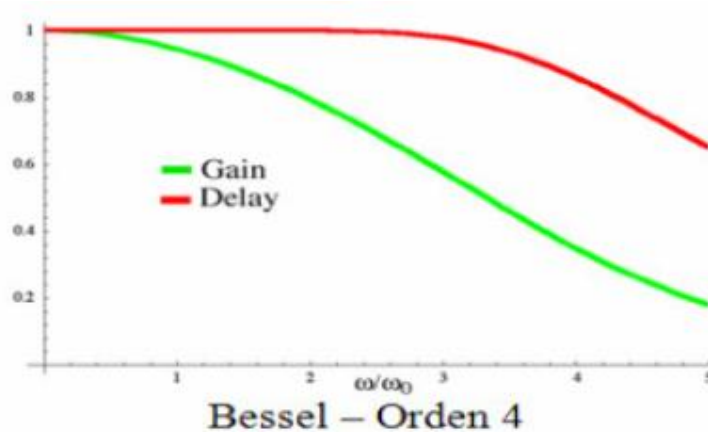


Figura 19. Ganancia y retraso de un filtro Bessel de orden 4 [4]

- **Butterworth:** Tienen una ganancia constante en la zona de paso y retrasos monotónicos en zonas de paso y cancelación. Se utiliza cuando se desea conocer la magnitud de la señal.

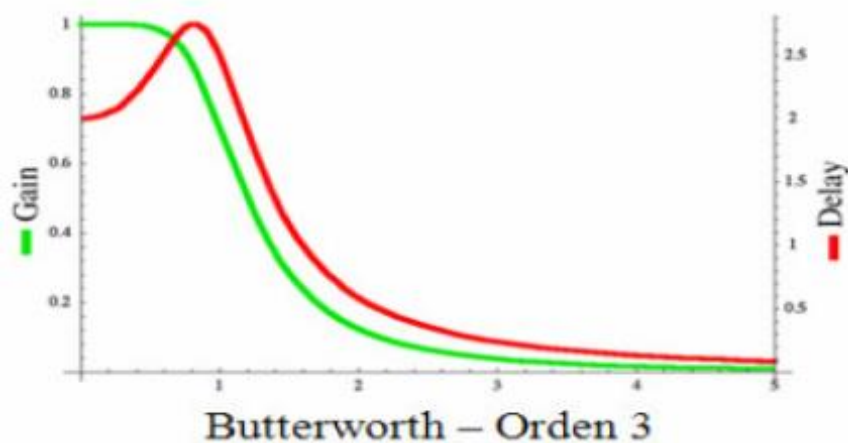


Figura 20. Ganancia y retraso de un filtro Butterworth de orden 3 [4]

- **Chebyshev:** Presenta un rizado uniforme en la zona de paso y ganancia constante en frecuencias atenuadas. Normalmente para la misma aproximación requieren un orden menor respecto al filtro Butterworth.

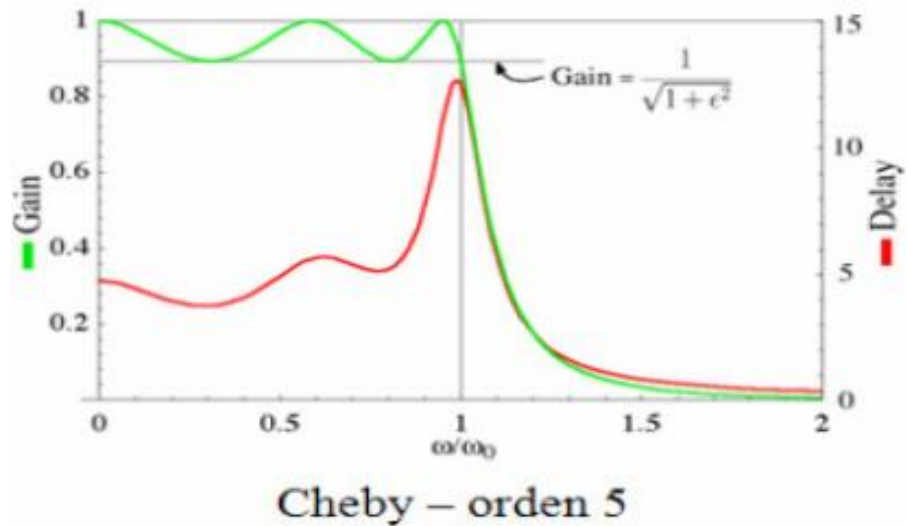


Figura 21. Ganancia y retraso de un filtro Chebyshev de orden 5 [4]

- **Chebyshev invertido:** Presenta un rizado uniforme en la zona de atenuación, ganancia constante en banda de paso y presenta un retraso sustancialmente no lineal.

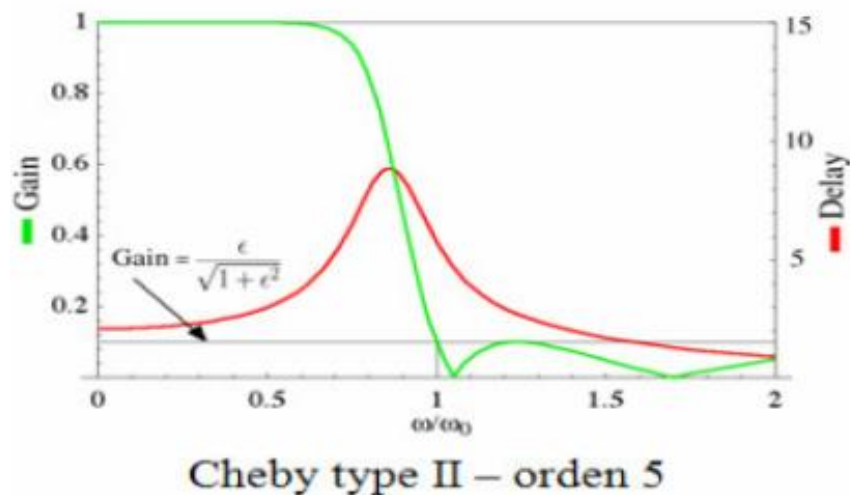


Figura 22. Ganancia y retraso de un filtro Chebyshev invertido de orden 5

5.5. Ventanas

La FFT necesita tener un número de puntos que sean potencia de 2 para su realización y como se ha dicho cuanto menor sean estos puntos mejor ya que así se disminuirá el tiempo computacional. Es difícil conseguir que con la frecuencia de muestreo que se tenga coincidan los 2^n puntos con toda la señal. Por ejemplo, para la siguiente señal:

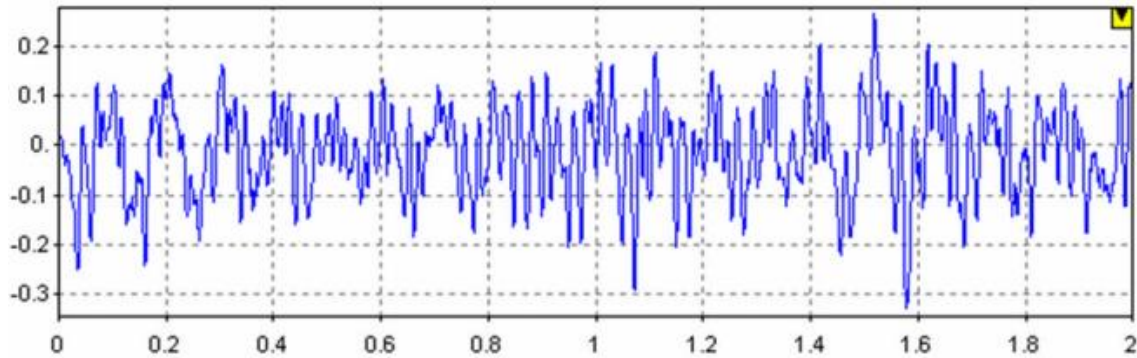


Figura 23. Ejemplo de una señal en el dominio del tiempo [16]

Si para dicha señal selecciono la potencia de dos que hace que todos los puntos entren en la señal sin que se salgan, será, por ejemplo, la zona entre corchetes de la figura 24 y como se observa queda aún mucha señal sin muestrear con la consiguiente pérdida de información.

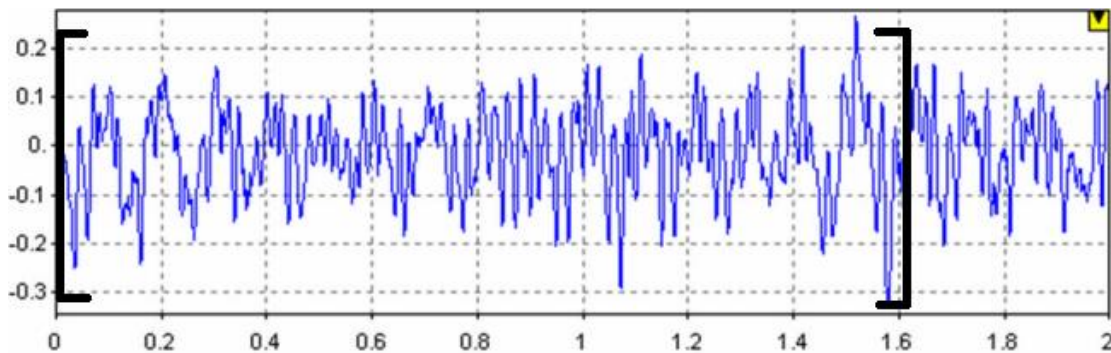


Figura 24. Señal con un intervalo un número de muestras 2^n

Si decido elegir la siguiente potencia de dos, habrá puntos muestreados que estén fuera de la señal, como se pone de manifiesto en la figura 25, y se rellenen todo esos puntos de ceros con lo que variará el espectro de la señal al introducir información no real.

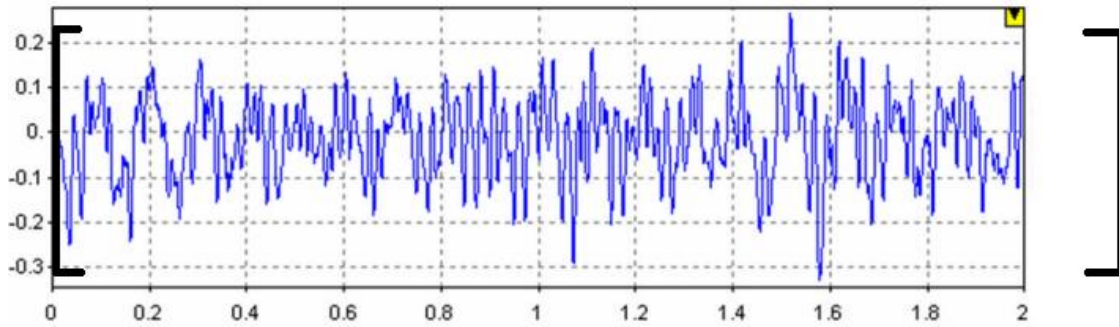


Figura 25. Señal con un intervalo un número de muestras 2^{n+1}

Cuanto mayor sean los puntos que se desean muestrear o cuanto más tiempo haya de señal, más se acentuarán estos problemas debido a que cada vez hay más salto de números de una potencia de dos a la siguiente.

Para solucionarlo lo que se realiza es cortar la señal en trozos de forma que coincidan los 2^n puntos en todo ese trozo con señal real de la vibración o perdiendo muy poca información. En definitiva se va a cortar la señal en trozos y se operará con cada trozo por separado. Al tomar trozos más pequeños el orden de la potencia de dos es más pequeño y se ajusta mejor al haber menos número de puntos de una potencia a la siguiente.

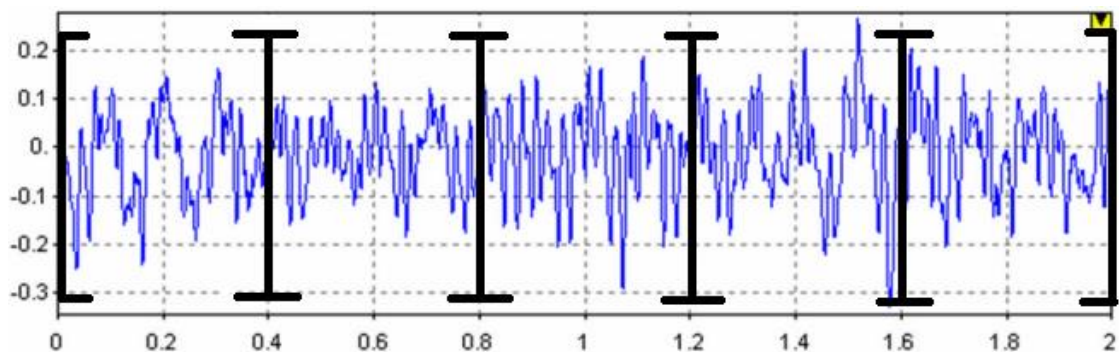


Figura 26. Señal troceada

Con la señal troceada se realiza el espectro de cada trozo por separado, se tendrán tantos espectros como divisiones se hayan realizado. Cada trozo tendrá un tiempo T , por lo tanto, cada espectro tendrá una resolución en frecuencia $\Delta f=1/T$. Con todos los espectros calculados se puede trabajar de la forma que se considere adecuada; se puede sumarlos y dividirlos entre el número de espectros para así tener uno promedio, se puede hacer la superposición de espectros dejando la mayor amplitud que se dé a cada frecuencia, se puede elegir solo uno como el más representativo...

Pero hay inconvenientes a la hora de realizar la FFT de los trozos. Una condición para poder emplear la FFT es que la señal debe ser periódica para poder obtener el espectro, lo que se realiza es repetir el trozo una y otra. De esta forma se cumple la condición de periodicidad pero otra condición que hay que cumplir es la de continuidad y esta repetición del trozo en la mayoría de casos no es continua. Se muestra la no continuidad en la figura 27, se ha elegido un trozo y se ha repetido, se observa como hay discontinuidades debido a la repetición.

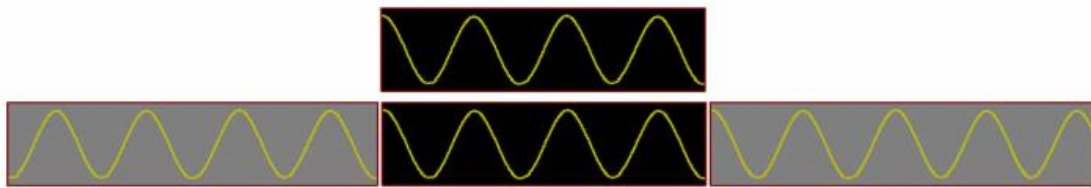


Figura 27. Ejemplo de no continuidad de un trozo de señal [16]

En la figura 27 se observa cómo se ha cogido un trozo de señal y si se repite queda una función discontinua con lo que no se puede realizar su FFT.

Otras veces la repetición de esos trozos de señal puede dar lugar a un espectro equivocado.

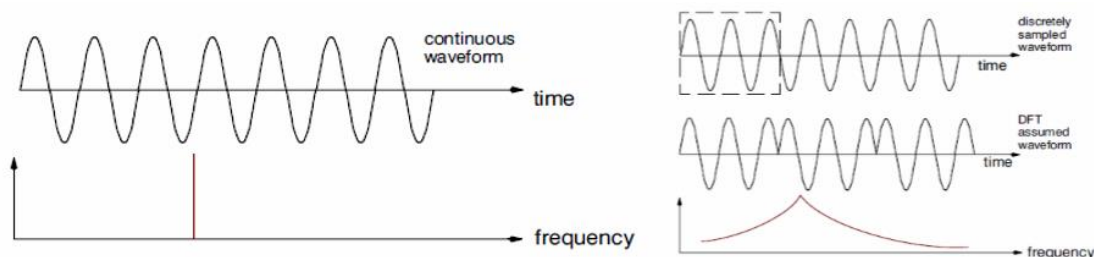


Figura 28. Variación de la señal por repetición de un trozo de señal [4]

En la figura 28 se observa a la derecha una señal con su espectro, y a la izquierda si se coge un trozo de esa señal y se repite en el tiempo, se observa cómo cambia la señal y el espectro.

Para solucionar estos problemas, denominados efecto "Leakage", se aplica a la señal una función denominada ventana. Esta aplicación de una ventana sobre una señal es equivalente a una convolución, es decir transforma a la señal inicial en otra señal siguiendo la tendencia de la ventana de forma que cumpla con los requerimientos de periodicidad. En definitiva es como multiplicar dos señales. Se busca que la ventana

transforme a la señal de tal manera que comience y termine en magnitud cero, así a la hora de unir cumplirá con la continuidad. La ventana tiene un efecto mínimo sobre el contenido en frecuencia (no va a mover la señal a otras frecuencias, los picos van a seguir en las mismas frecuencias) aunque sí que afecta a las formas de los picos y la amplitud del espectro.

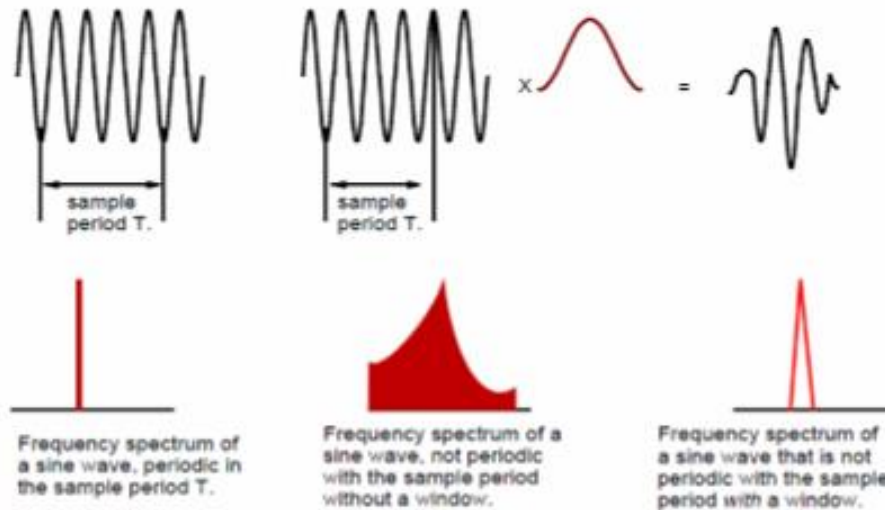


Figura 29. Efecto de una ventana en el espectro [4]

En la figura 29 se observa lo que le ocurre a la señal al aplicarla la ventana, la modula. También se refleja cómo afecta al espectro según lo comentado, el pico de frecuencia sigue estando a la misma frecuencia pero varía la forma del mismo.

El espectro de una ventana tiene la forma que se muestra en la figura 20. Existen diversos tipos de ventanas que según las características que se detallan más adelante y que servirán para tomar la decisión de la ventana a utilizar.

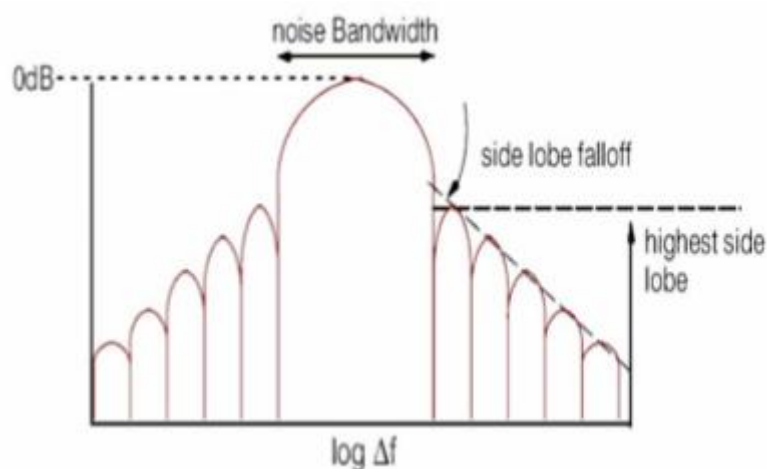


Figura 30. Esquema del espectro de una ventana [4]

El “ancho del lóbulo principal” (noise Bandwidth) es una característica relevante de la ventana ya que juega un papel importante en la resolución en frecuencia. De este modo, conforme más ancho es el “ancho del lóbulo principal”, menor será la resolución en frecuencia, lo que significa que es más difícil separar dos componentes de frecuencias cercanas y, por el contrario, si el “ancho del lóbulo principal” se estrecha, será posible diferenciar dos componentes de frecuencia cercanas. Otro parámetro es la “selectividad” o capacidad para separar componentes secundarios respecto a los dominantes y será mayor cuanto mayor sea el “side lobe fallout” (lóbulo lateral), es decir, la capacidad de eliminar componentes de frecuencia que no son las de interés. Estos parámetros estarán relacionados, cuando el lóbulo principal se estrecha (se incrementa la resolución en frecuencia) el “side lobe fallout” se incrementa.

Normalmente, la selección del tipo de ventana es una solución de compromiso entre ambos parámetros aunque cada ventana posee unas características que la hacen más o menos apropiadas según la aplicación. Para realizar correctamente su elección, es de gran ayuda conocer o tener una idea aproximada de cómo es el contenido espectral de la señal a analizar. De esta forma, si hay fuertes interferencias lejos de la frecuencia de interés, se escoge una ventana con alta tasa de disminución de lóbulo lateral. En caso de que la interferencia esté cercana a la frecuencia de interés, se escoge una ventana con bajo nivel máximo del lóbulo lateral. Si a la frecuencia de interés hay componentes muy cercanas, entonces se escogerá una ventana con un estrecho ancho del lóbulo principal, así tendrá una elevada resolución en frecuencia y separará correctamente todas estas componentes. Otra característica del ancho del lóbulo principal es que cuanto mayor sea la amplitud será más precisa a la de la señal real, así si lo que interesa es la medida en amplitud más que su ubicación en el espectro se elige un gran ancho del lóbulo principal.

Los diferentes tipos de ventanas más utilizadas son:

- **Uniforme:** Se utiliza cuando la señal comienza y acaba en cero y es la que tiene el lóbulo central más estrecho pero como contrapartida los lóbulos laterales son los de mayor amplitud. También se le denomina “rectangular”

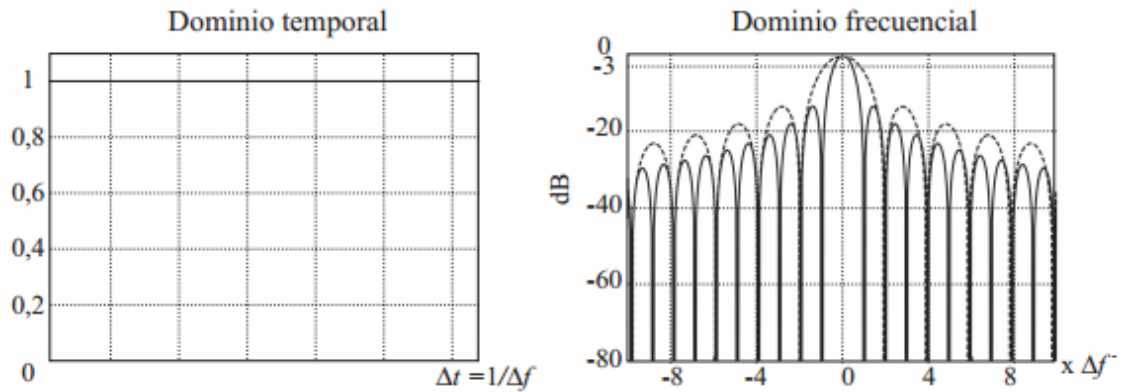


Figura 31. Ventana uniforme

- **Hanning:** Es la más utilizada para el análisis de señales aleatorias con componentes discretos en frecuencia

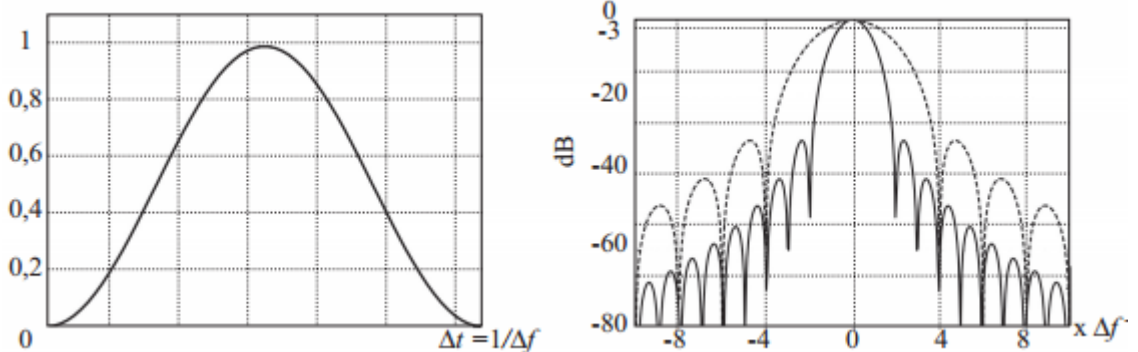


Figura 32. Ventana Hanning

- **Hamming:** Respecto a la Hanning tiene mayores lóbulos laterales.
- **Blakman:** Útil para detectar componentes débiles en presencia frecuencias dominantes
- **Kaiser-Bessel:** Apropiaada para utilizarse sobre señales multitonales con niveles diferentes, pero puede causar más leakage en señales aleatorias
- **Flattop:** Se utiliza cuando se requiere precisión en señales tonales simples. Apropiaada para calibraciones.

Con todo lo comentado, para evitar el Leakage y ajustar la toma de datos a potencia de 2 se efectúa la división de la señal en trozos y se le aplica a cada uno la ventana. Este método puede provocar la pérdida de información en las zonas en las que las ventanas atenúan la señal, con lo que para solucionar este problema se realiza un solapamiento u overlapping, de forma que no afecte la atenuación y no se pierda información.

Consiste en dividir la señal de forma que cada trozo contenga un porcentaje del final de la señal del trozo anterior, es decir, un trozo no comienza cuando termina otro sino antes de que este termine. Se ilustra en la siguiente imagen en la que se muestra como una señal troceada y tratada con una ventana Hanning provoca que el 20% de la serie temporal original sea ignorado, efecto que se corrige con un solapamiento del 30%.

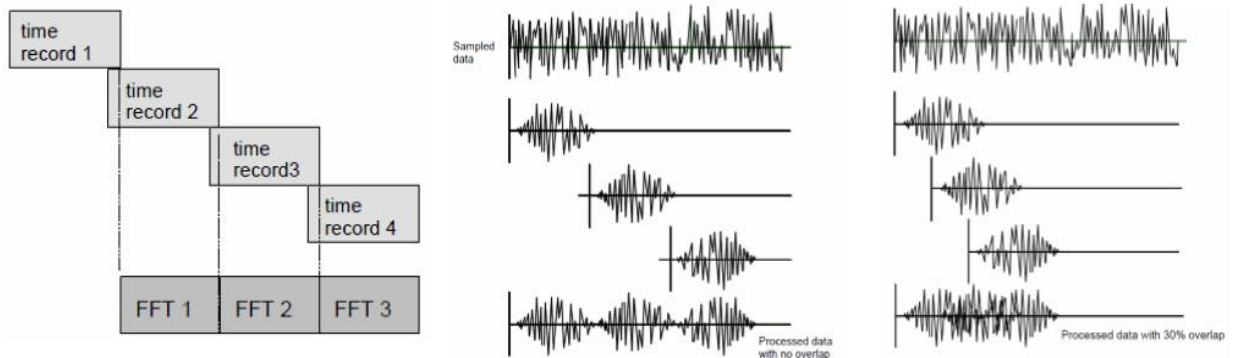


Figura 33. Efecto del solapamiento [4]

5.6. Análisis de Órdenes

En todas las máquinas, muchas de las frecuencias de vibración están relacionadas con la frecuencia o la velocidad de rotación de los ejes que intervienen en la máquina. Si se tiene un elemento en el que se produce un impacto o una vibración en un punto o en un contacto determinado, este punto se repetirá en función de la velocidad de giro dando lugar a una vibración con una frecuencia que es un múltiplo de la frecuencia de giro del eje. Estas frecuencias asociadas al giro se determinan frecuencias forzadas, a continuación se establecen algunas de las más importantes:

- Una de las frecuencias que siempre aparece es la frecuencia del propio giro del eje. Esta frecuencia en hercios será el número de revoluciones por minuto entre sesenta.
- Otras frecuencias forzadas que aparecen son debidas a los rodamientos. Estas se deben al giro y contacto de los elementos rodantes y las pistas que serán función de la velocidad del eje. Las más importantes se darán por imperfecciones o fallos en los diferentes elementos, así, por ejemplo, si se tiene una picadura en una pista cada vez que entre en contacto un elemento rodante con ella se producirá un impacto que se va repitiendo en función del número de elementos rodantes y de la velocidad de giro dando lugar a una vibración con una determinada frecuencia. En función de estas frecuencias se puede determinar diferentes fallos en los mimos. El desgaste de cada uno los

elementos del rodamiento generará una o varias frecuencias características en los espectros de frecuencia que permitirá una rápida y fácil identificación. Las cuatro posibles frecuencias de deterioro de un rodamiento son:

- ✓ **BPFO** o frecuencia de deterioro de la pista exterior. Físicamente es el número de bolas o rodillos que pasan por un punto de la pista exterior cada vez que el eje realiza un giro completo.
- ✓ **BPFI** o frecuencia de deterioro de la pista interior. Físicamente es el número de bolas o rodillos que pasan por un punto de la pista interior cada vez que el eje realiza un giro completo.
- ✓ **BSF** o frecuencia de deterioro de los elementos rodantes. Físicamente es el número de giros que realiza una bola del rodamiento cada vez que el eje realiza un giro completo.
- ✓ **FTF** o frecuencia fundamental de tren o de deterioro de la jaula. Físicamente es el número de giros que realiza la jaula del rodamiento cada vez que el eje realiza un giro completo.

Todas estas fórmulas se muestran en la figura 34.

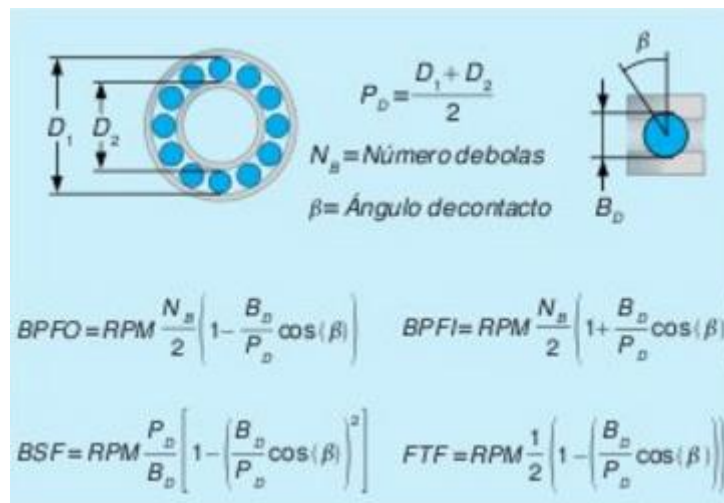


Figura 34. Frecuencias forzadas producidas por rodamientos [5]

- Los engranajes y cajas de engranajes tienen unas frecuencias forzadas propias que analizándolas permiten identificar si están funcionando correctamente o si hay algún fallo. Midiendo estas vibraciones se pueden identificar problemas tales como, una inapropiada relación entre el número de dientes, excentricidad, montaje en árboles deformados, holguras, desalineación, sobrecarga y la fractura o deterioro de los dientes.

- ✓ Frecuencia de engrane (GMF): son propias de cada engranaje y aparecen en el espectro de frecuencia independientemente del estado del engranaje y es igual al producto del número de dientes por la velocidad del eje. Esta señal será de baja amplitud y tendrá unas bandas laterales que son señales equidistantes a la frecuencia de engrane y se corresponden con la frecuencia de giro del piñón y de la corona dando información de si la corona o el piñón se encuentran en mal estado. Al haber muchos engranajes aparecen muchas frecuencias de engrane y puede resultar complicada su identificación.

$$GMF = Z * RPM$$

Z= Número de dientes

RPM= Velocidad de giro en radianes por segundo

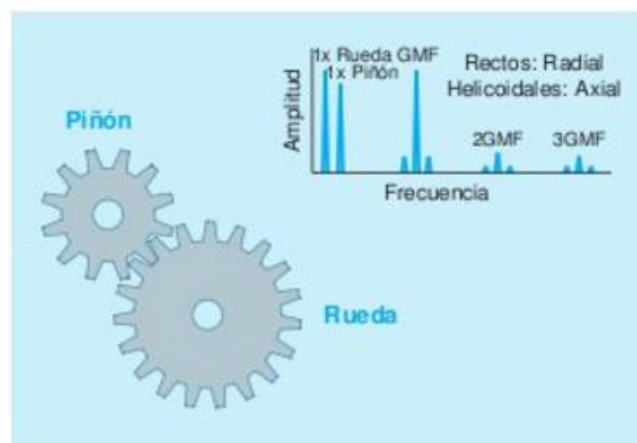


Figura 35. Frecuencias forzadas producidas en engranajes [5]

- ✓ Frecuencia de excitación: Los engranajes pueden ser fabricados con tan alto grado de precisión que pequeñas imperfecciones pueden generar componentes de vibración anormales. La medición de errores revela esquemas complejos de defectos geométricos que dan por resultado frecuencias de vibración anormales. Para el análisis de funcionamiento de cajas de engranaje, son de gran interés los armónicos de baja frecuencia, ya que estos componentes excitan las frecuencias normales de funcionamiento más destructivas. Los armónicos altos, tales como los errores diente a diente y las fluctuaciones de desplazamiento del eje debido a la flexibilidad de los dientes, generan ruidos, más que vibraciones en las cajas de engranajes.

- Los motores eléctricos generan multitud de frecuencias de vibración que son inherentes a su diseño y aplicación.
 - ✓ Si hay un desequilibrio del eje aparecerá una vibración que tendrá una frecuencia igual al número de revoluciones por minuto
 - ✓ Si hay una desalineación aparecerá una vibración que tendrá una frecuencia igual al doble de revoluciones por minuto
 - ✓ Si hay un problema eléctrico aparecerán señales a 50Hz, 100Hz, 150Hz, es decir, a múltiplos de la frecuencia de red eléctrica
 - ✓ También se producirán vibraciones debido al paso de polos que tendrán una frecuencia igual al número de polos por el número de revoluciones por minuto.
 - ✓ Aparecerán vibraciones debido a sus rodamientos, a roces mecánicos...

Como se producen las vibraciones en función de la velocidad de giro del eje, una manera más visual de ver el espectro es graficarlo en función de órdenes en lugar de frecuencia. Un orden es un múltiplo de la frecuencia de giro del eje así que en definitiva se sigue graficando en función de la frecuencia. Por ejemplo el orden 2X representa que esa señal tiene una frecuencia que es el doble a la de giro del eje, 8X representa una frecuencia igual a ocho veces la de giro del eje. Así, viendo el factor por el que multiplica a la frecuencia de giro del eje se puede determinar más fácilmente si corresponde a alguno elemento o frecuencia forzada conocida (como serían las citadas anteriormente).

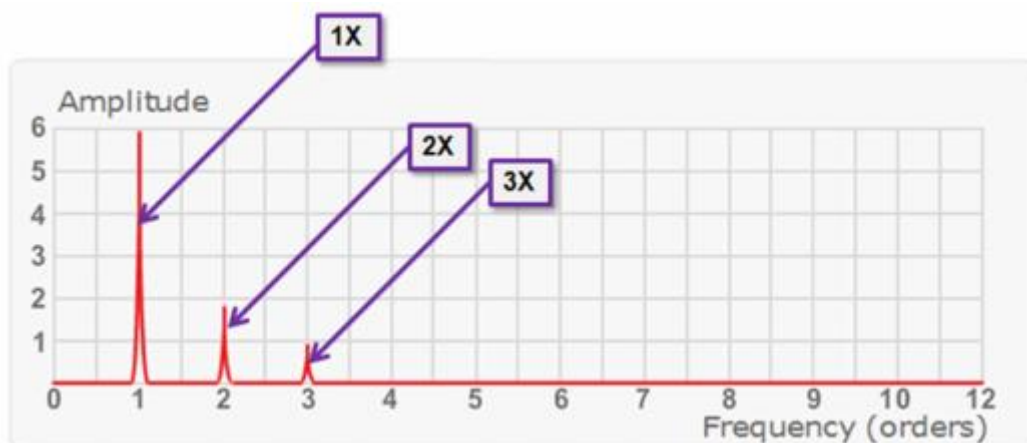


Figura 36. Ordenes [16]

Como se ha podido comprobar todos estos elementos producen vibraciones en función de la velocidad de giro del eje, pero muchas máquinas, como es el caso de un aerogenerador, giran a velocidades que varían continuamente debido a la variación en

la velocidad del viento con lo que resulta complicado determinar estas señales durante el funcionamiento normal de la máquina y asociarlas a su elemento al estar cambiando constantemente de frecuencia.

Para solucionarlo y determinar las frecuencias de la máquina, se realiza un “gráfico Campbell”. Para ello se hace que la máquina trabaje a todas las velocidades de interés y se realiza la FFT de cada velocidad. En una gráfica Campbell se plasma en dos dimensiones, una representación de tres. Por ejemplo, en el eje X se representa las frecuencias medidas en Hz, en el eje Y las revoluciones por minuto y con una escala de colores se representa la amplitud de esa señal a esa frecuencia y esa velocidad.

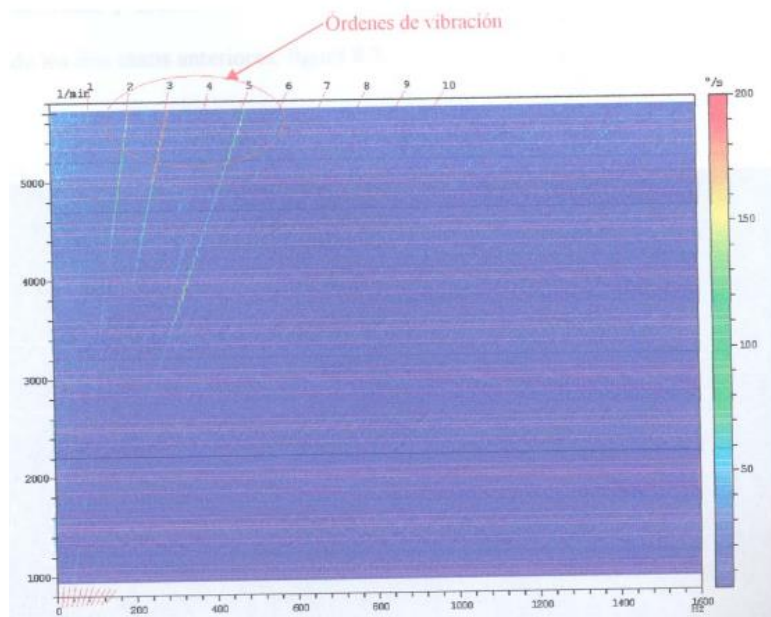


Figura 37. Ejemplo de un gráfico Campbell [6]

Es un método muy gráfico ya que líneas inclinadas informarán de que esa señal es debida a una vibración que depende de la velocidad de giro del rotor ya que al aumentar la velocidad de giro aumenta la frecuencia constantemente, es decir, será un orden. Si lo que aparece es una línea horizontal significará que es un modo propio de vibración o una vibración natural del sistema ya que se produce a la misma frecuencia independientemente de la velocidad de rotación, también puede ser debido a una componente eléctrica (si aparece a 50Hz probablemente sea la señal de la corriente eléctrica de la red). Resulta un elemento muy gráfico para determinar qué puntos de operación se deben evitar, estos serán en los que se crucen líneas inclinadas con horizontales ya que significará que en ese punto se producirá una resonancia, es decir, se estará excitando un modo propio de vibración que puede dar lugar a vibraciones elevadas produciendo fallos de la máquina y se soluciona tan fácilmente como pasando muy rápidamente por esa velocidad o cambiando la velocidad de giro para que trabaje en otro punto y no se dé la resonancia.

5.7. Aplicación a una maqueta

Con el objetivo de tener una visión más experimental se realiza un análisis de órdenes en una maqueta que incluye componentes semejantes a los que componen el tren de potencia de máquinas eólicas. Se trata de una maqueta del departamento de ingeniería mecánica, energética y de materiales de la Universidad Pública de Navarra y desarrollada por la empresa "Aresse Engineering".



Figura 38. Maqueta empleada

Se asemeja a un tren de potencia de un aerogenerador porque, en lugar de tener un generador que produce electricidad por el movimiento de un eje, se tiene un motor que consume electricidad y produce el giro de un eje, pero a efectos de funcionamiento y vibraciones es semejante. Además posee el eje rápido que es el que sale del motor que va a unos engranajes, que hacen la función de multiplicadora del aerogenerador, y de ellos sale un eje lento. Todo esto estará soportado por una serie de rodamientos al igual que en una máquina eólica. Aunque el funcionamiento es el contrario, aquí se le da electricidad al motor y con un control se le marca a las revoluciones que debe girar para al final tener un giro de un eje lento, los elementos y su funcionamiento es muy similar al de un aerogenerador.

El motor puede estar girando desde 0 hasta 150 revoluciones por minuto y la multiplicadora tiene una relación de 10, es decir, si el motor está girando a 150 rpm el eje lento lo estará haciendo a 15 rpm.

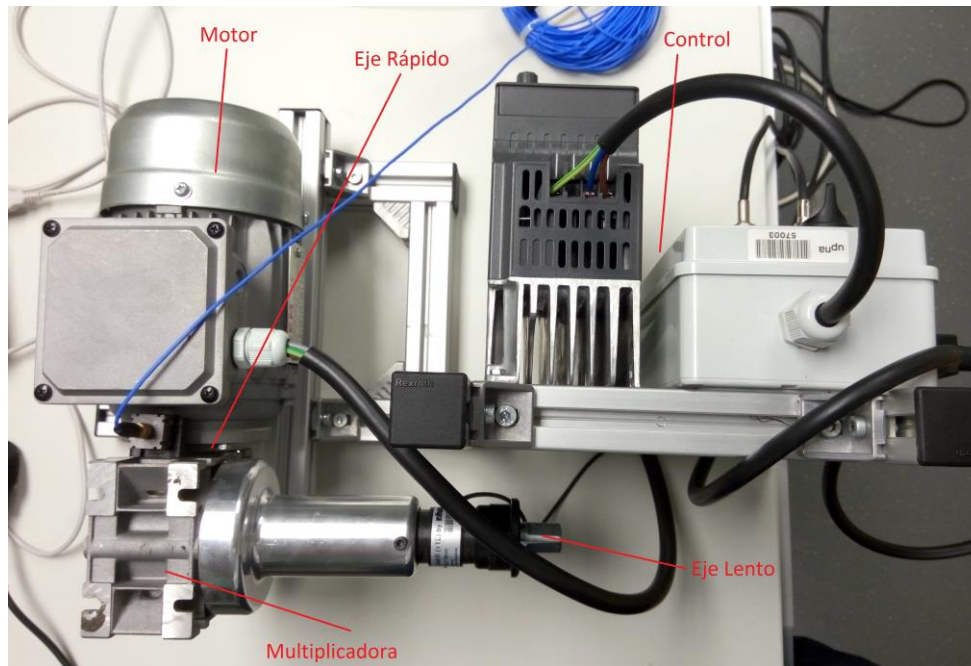


Figura 39. Elementos de la maqueta

Se maneja la maqueta desde el ordenador con un software de la propia “Aresse Engineering”, para ello se conecta una tarjeta de control con cinco canales al ordenador. Desde el canal output se conecta al control de la maqueta y será desde este canal (AO 0) por donde la tarjeta enviará a las revoluciones a las que debe girar marcadas desde el ordenador. La maqueta ya va provista de un tacómetro en el eje lento que mide las revoluciones por minuto del mismo, así que desde el canal input 3 (AI 3) de la tarjeta se conecta a la clavija del control que llega la señal del tacómetro. Este tacómetro mide pulsos, cuanto más rápido gire el eje más pulsos medirá por tiempo y en función de estos pulsos medidos por tiempo obtiene la velocidad de giro, pero el tacómetro lo único que mide son pulsos y se los manda a la tarjeta y es esta la convierte estos giros en revoluciones por minuto. De esta forma se tiene un canal por el que se le manda la velocidad de giro y otro canal por el que se mide la velocidad real de giro (puede que no esté girando exactamente a la velocidad marcada y por eso es necesario medir la velocidad real que es con la que se realizarán los cálculos y análisis).

Además se coloca en la maqueta un acelerómetro que nos permita medir las vibraciones que está experimentando. Los acelerómetros se colocan en puntos de interés para las vibraciones, donde se den valores importantes, estos puntos serán cerca de rodamientos, cerca de engranajes y en puntos de apoyo rígidos. Se decide colocar el acelerómetro con el que medir las vibraciones de la maqueta en el motor hacia la salida porque es ahí donde se encuentra uno de los rodamientos. Se trata de un acelerómetro triaxial, mide aceleraciones en los tres ejes, por lo que posee tres cables que cada uno se conecta a una de las entradas de la tarjeta (AI 0, AI1, AI2) y se corresponderán cada uno con las aceleraciones en esos tres ejes.

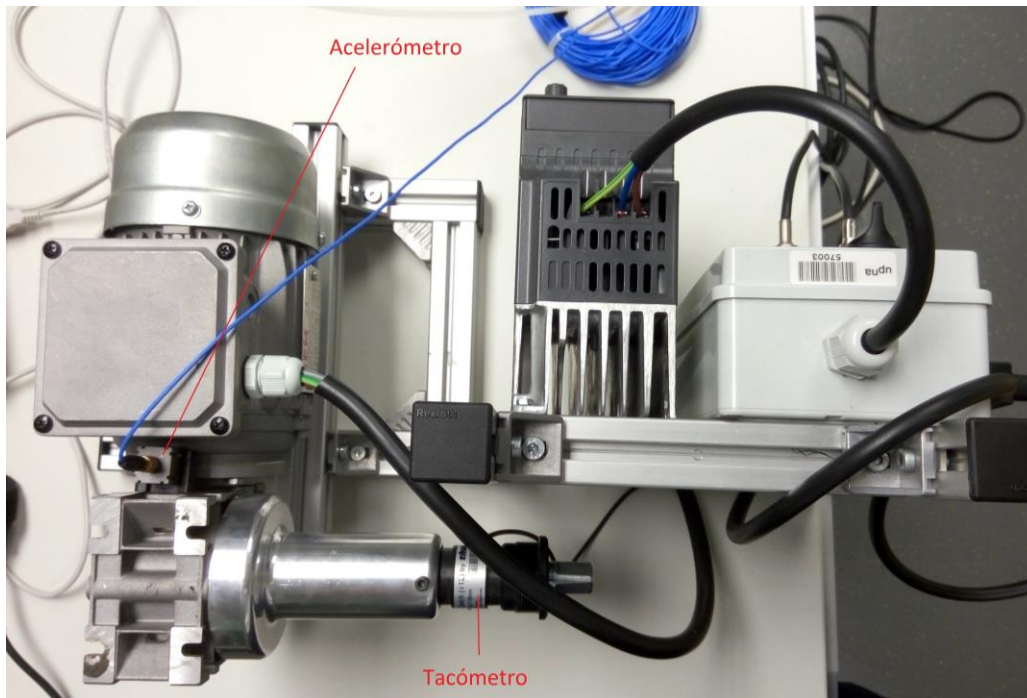


Figura 40. Sensores de la maqueta



Figura 41. Tarjeta de adquisición

Con el software se controla velocidad de giro del motor y se hace que funcione de tal forma que tenga un arranque suave, después se le lleva al máximo de velocidad (150 rpm) y se hacer la parada.

La variación de velocidad desde 0 hasta 150 rpm no puede ser muy rápida ya que entonces no el espectro no será representativo. Como ya se ha explicado, la resolución en frecuencia es inversa al tiempo de análisis. Cuando se trabaja con transformadas rápidas de fourier a una determinada frecuencia de muestreo, se necesita un número de muestras de potencia de 2 y medir estas muestras requerirá un tiempo concreto y por lo tanto una resolución frecuencial. Si en ese tiempo la velocidad de giro ha cambiado lo suficiente para que la frecuencia forzada de interés cambie más que la propia resolución en frecuencia el espectro no será representativo. Es decir, necesita que la velocidad de giro y por consiguiente la frecuencia de giro este dentro de la resolución en frecuencia durante el tiempo que tarda en muestrear los puntos para una determinada frecuencia de giro, sino, si mientras está muestreando para una frecuencia de giro está crece tan rápido que cambia al siguiente valor de frecuencia diferenciable (asociada a la resolución en frecuencia) no podrá calcular el espectro para el Campbell porque no le habrá dado tiempo a calcular el espectro para la primera frecuencia.

Por ello se hace que la velocidad cambie de tal forma que de los 0 a los 5 primeros segundo arranque hasta 5 rpm, que de 5 a los 65 segundos llegue hasta 150 rpm y que pare en 2 segundos. Esta variación de velocidad que se quiere que lleve el motor se observa en la siguiente imagen.



Figura 42. Rampa de velocidad del ensayo en la maqueta

Se lanza el software introduciendo ese perfil de velocidad y el motor comienza a girar según esas velocidades. El propio software (con la ayuda de la tarjeta de adquisición) va adquiriendo y almacenando las mediciones del tacómetro (puedo ver la velocidad de giro real) y del acelerómetro (vibraciones en los tres ejes).

A continuación se muestra la señal medida por el sensor en las tres direcciones junto con la velocidad de giro del motor.

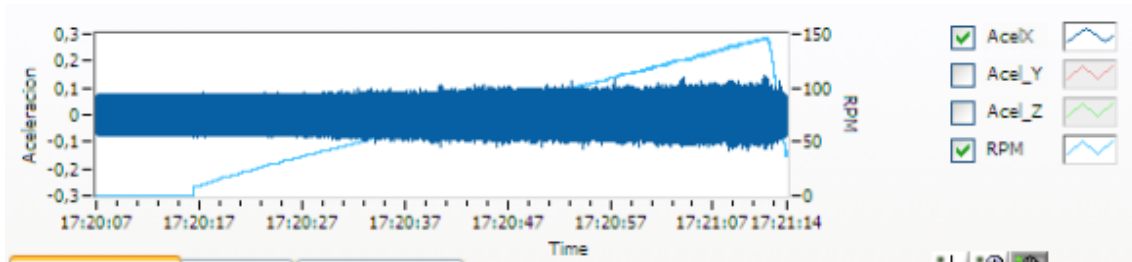


Figura 43. Velocidad del eje rápido y aceleración en el eje X

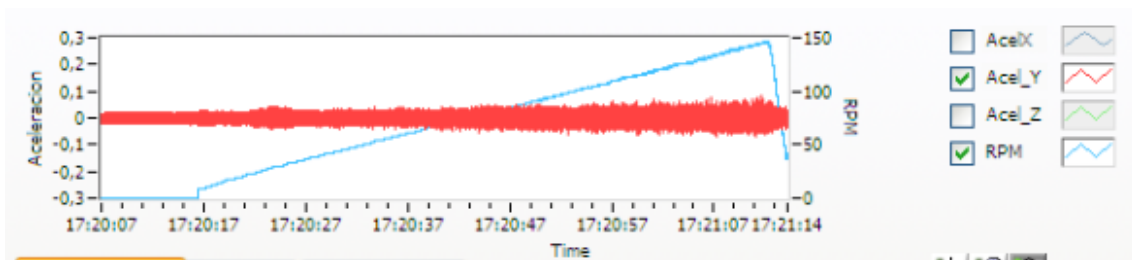


Figura 44. Figura 43. Velocidad del eje rápido y aceleración en el eje Y

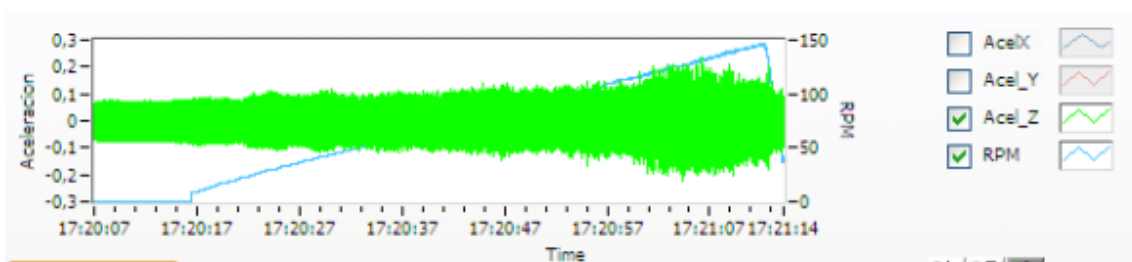


Figura 45. Figura 43. Velocidad del eje rápido y aceleración en el eje Z

Según esta colocado el acelerómetro en el motor la dirección X se corresponde con la dirección radial en vertical del eje, la dirección Y con la dirección axial del eje y la dirección Z con la dirección radial en horizontal del eje. Se observa como las vibraciones son mayores conforme la velocidad aumenta, esto es debido a que las

vibraciones forzadas son cada vez mayores y se observa que la máxima vibración se da en la dirección Z.

El programa recoge estos datos y realiza el espectrograma (que es una gráfica tridimensional que representa la amplitud del contenido frecuencial de la señal según va variando ésta a lo largo del tiempo, es decir, los espectros que se dan en cada instante de tiempo en el que se ha estado midiendo las vibraciones se unen en una gráfica tridimensional) y también realiza el Campbell.

El espectrograma que se mide y se calcula de la maqueta es el siguiente.

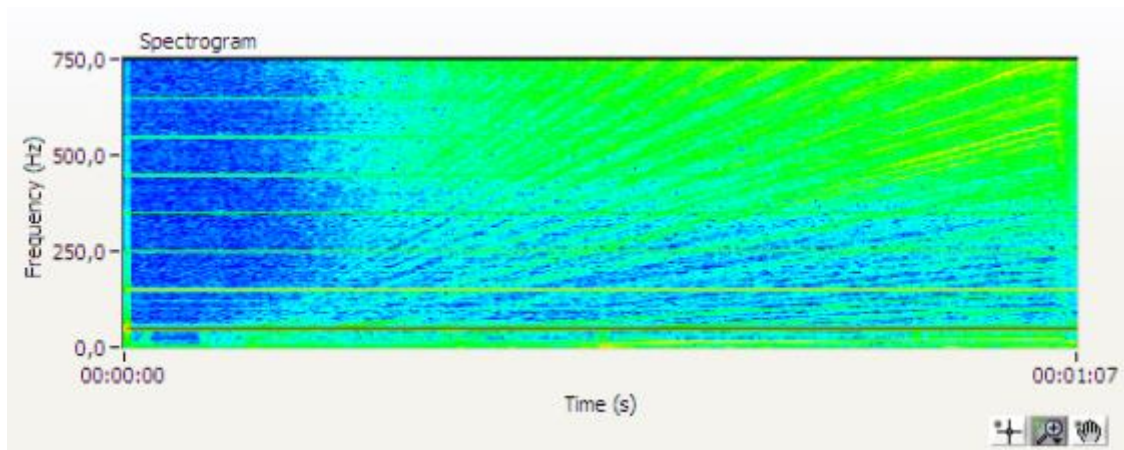


Figura 46. Espectrograma realizado de la maqueta

En él se observan la magnitud de las señales medidas en el tiempo para cada frecuencia pero no es de gran utilidad ya que la velocidad del rotor no ha sido constante sino que ha ido variando a lo largo del tiempo. Para solucionar esto y poder realizar mejor un análisis se pasa de la señal medida en el tiempo a una gráfica en función de la velocidad de giro del rotor, es decir, un Campbell.

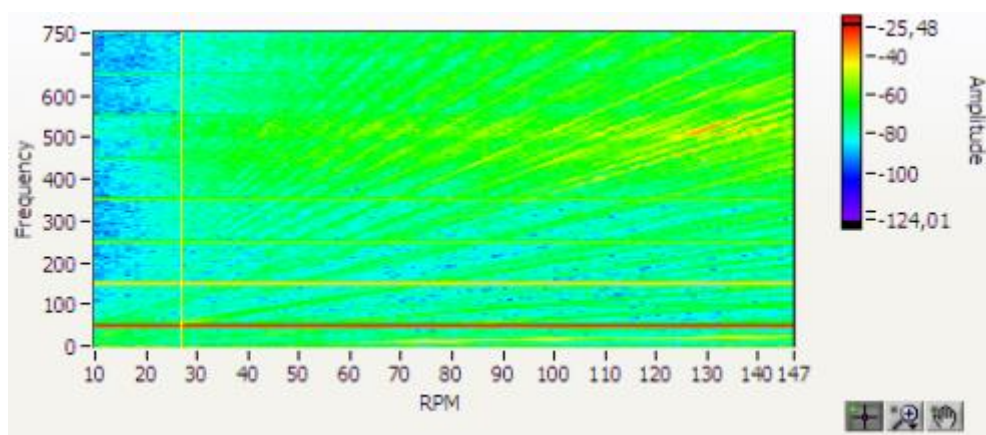


Figura 47. Campbell de la maqueta

Se observa como aparecen líneas horizontales, estas se deberán a frecuencias naturales de la máquina ya que se dan a una misma frecuencia que solo dependen de la distribución de masas y rigideces (parámetros constantes) y son independientes de la velocidad de giro del rotor o sino pueden ser debido a fenómenos eléctricos como por ejemplo la línea horizontal en rojo que aparece a unos 50 Hz. La corriente eléctrica es una onda sinusoidal de 50 Hz constante en el tiempo independiente de la velocidad de giro y el sensor la detecta y por eso sale en el Campbell; otras líneas horizontales cuya frecuencia es múltiplo de la de frecuencia de red pueden ser debido a esta corriente eléctrica en diversos componentes eléctricos.

Cuando un elemento está girando, como no son perfectos, producen fuerzas que se repetirán dependiendo de las veces que ocurra por vuelta y serán fuerzas armónicas debido a este giro. Estas señales armónicas son las que se conocen como forzadas y las frecuencias a las que se dan como frecuencias forzadas. Al depender se la velocidad a la que gire el rotor, en el Campbell al ir variando la velocidad, las frecuencias de estas señales van variando también y quedan en el Campbell como una línea diagonal. Cada línea diagonal se podrá identificar con un orden, es decir, con cuantas veces más rápido se da esa frecuencia con respecto a la de giro del rotor. Así el orden uno será la señal que tiene en todo momento la misma frecuencia que el rotor, el orden dos tiene una frecuencia el doble que la del rotor.

Lo que habrá que analizar y evitar será los puntos en los que se cruza una línea horizontal con una diagonal ya que significará que la frecuencia forzada será la misma que la natural y se dará una resonancia, es decir, una amplificación muy elevada de la vibración.

Con el programa se puede calcular la gráfica de los órdenes por separado. De esta forma, el orden diez, que será la frecuencia del eje del generador por lo tanto será como vibra dicho eje es el siguiente:

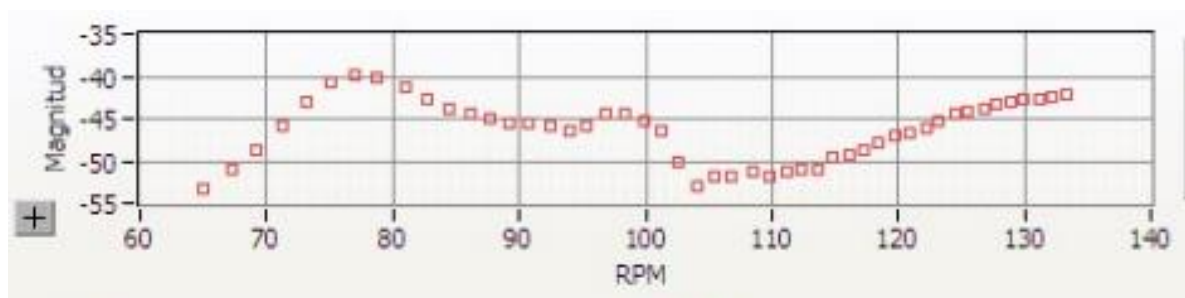


Figura 48. Orden 10 de la maqueta

El orden diez se corresponde al eje rápido porque la medición de revoluciones por minuto se realiza desde el eje lento y como la relación entre los dos ejes es de diez, el eje del generador tiene una frecuencia 10 veces mayor, es decir, orden 10.

Los engranes y componentes que hay en la caja multiplicadora son siempre puntos de problemas vibratorios debido al desgaste que sufren por el continuo contacto. Por ello siempre es de interés comprobar la vibración de los mismos, estos elementos girarán a una velocidad proporcional al eje rápido produciendo una frecuencia forzada. Así que los órdenes que habrá que prestar una mayor atención serán los órdenes que son múltiplos del orden del eje rápido. A modo de ejemplo de posibles órdenes a los que se producen estas vibraciones se adjunta la señal de la vibración del orden 20 y 30.



Figura 49. Orden 20 de la maqueta

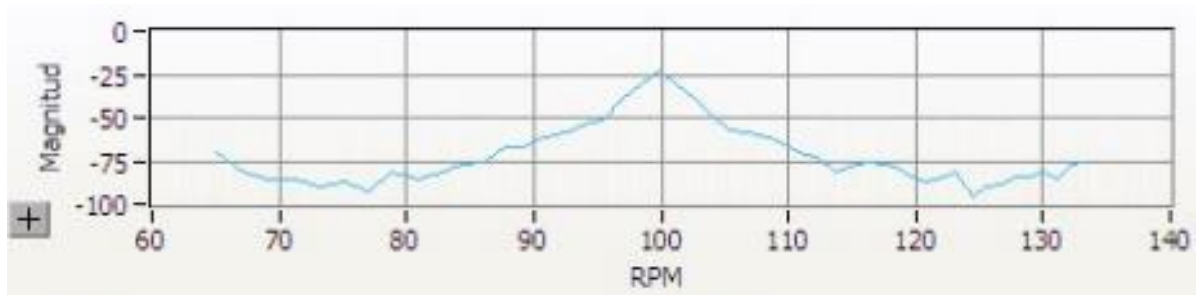


Figura 50. Orden 30 de la maqueta

6. VDI 3834

Las normas establecidas para medir y evaluar vibraciones en estructuras y máquinas no pueden aplicarse a los aerogeneradores debido a la naturaleza de su construcción y funcionamiento, es decir, no existe una normativa vigente que se deba seguir a la hora de evaluar vibraciones en las máquinas eólicas. Las normas actuales sobre el procedimiento y valoración de vibraciones se explican en la norma DIN 4150-3 y en la norma ISO 4866, que como se acaba de comentar no se puede usar para un aerogenerador, sí que pueden servir como guía y sí que se puede aplicar para evaluar componentes específicos de la máquina eólica como a los rodamientos, generador...

El procedimiento para análisis de las vibraciones es muy importante para comprobar cómo estas afectan a todos los componentes y por tanto a su vida útil y esto es lo que realiza el documento VDI 3834, con el fin de ofrecer a los fabricantes, operadores, inversores, compañías de seguros, etc un procedimiento fiable y reconocido. Además trata de estandarizar las mediciones para ayudar en su análisis y para hacer posible una comparativa. En este apartado se describirá este procedimiento.

En este documento se realiza un análisis en el dominio del tiempo de la severidad de la vibración, es decir, no tiene en cuenta espectros.

Si los valores de vibraciones que se miden son superiores a los valores guía que se establecen en el documento VDI 3834 será una indicación de posibles amenazas o mal funcionamiento de los correspondientes componentes o de toda la instalación, aunque no se identifican las causas. Si los valores de vibración no superan los valores guía entonces se puede suponer un funcionamiento correcto y normal de la máquina eólica pero no se deben descartar pequeños casos individuales de daño.

Debido a los continuos cambios de las condiciones de fuerza y dirección del viento se producen constantemente cambios en las vibraciones de tal modo que en muy poco tiempo pueden producirse grandes cambios en la amplitud de la vibración. Por ello hay que realizar promedios de las mediciones en periodos de tiempo específicos antes de compararlos con los valores guía. El método elegido para realizar estos promedios es el de energía equivalente, también llamado RMS, y establece un parámetro de aceleración denotado como a_{w0} . El valor RMS es el valor de una señal rigurosamente constante que produce la misma energía que la señal medida. Para calcularlos se suman los valores que va tomando la señal en el dominio del tiempo, es decir, se integra y se divide entre el tiempo que se ha calculado; además va elevado al cuadrado y se realiza su raíz cuadrada para eliminar los términos negativos que darían un resultado erróneo. Este término a_{w0} es calculado para un periodo T_0 :

$$a_{rms\ w0} = \sqrt{\frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} a_w^2(t) dt}$$

La función $a_w(t)$ es la señal de la aceleración medida a lo largo del tiempo en el periodo T_0 . Para medir las vibraciones de la góndola, torre y componentes con frecuencias entre 0,1 Hz y 10 Hz y con aceleraciones y vibraciones relativamente altas, este periodo T_0 debe fijarse en 10 min. De esta manera, incluso aquellos componentes de vibración con frecuencias alrededor o por debajo de 1 Hz (se encuentra la frecuencia de rotación del rotor) se puede medir de forma fiable.

En el caso de diferentes condiciones de operación, puede ser necesario dividir el período de medición total de 10 minutos en varias secciones. Entonces, el valor total de la vibración se calcula como sigue:

$$a_{rms\ w} = \sqrt{\frac{1}{T_0} \sum_{e=1}^n a_{rms\ e}^2 \cdot T_e}$$

Si se desea medir la frecuencia en las cajas de engranajes y generadores, normalmente elementos con vibraciones entre 10 Hz y más de 1000 Hz, bastará con periodos T_0 más pequeños, como por ejemplo de 1 minuto. T_0 nunca deberá ser menor a 1 minuto.

Se podría operar de la misma forma solo que en lugar de utilizar aceleración se podría realizar con velocidad.

A continuación se establecen las magnitudes de las vibraciones de los diferentes elementos del aerogenerador y dónde realizar las mediciones (dónde colocar los acelerómetros):

Góndola y Torre

Las vibraciones estarán en el rango de 0,1 Hz a 10 Hz de frecuencia siempre que el límite inferior sea menor de la frecuencia de velocidad del rotor.

Para la góndola hay que colocar los acelerómetros en ambos lados del rodamiento principal y en la parte posterior junto al generador y para la torre se colocarán por debajo de la corona de orientación.

Rodamientos del eje principal

Las vibraciones estarán en el rango de 0,1 Hz a 10 Hz de frecuencia siempre que el límite inferior sea menor de la frecuencia de velocidad del rotor.

Para los ejes con dos rodamientos, se deberán colocar acelerómetros en ambos rodamientos y en el caso de un rodamiento se colocarán en este.

Multiplicadora

Las vibraciones estarán en el rango de 0,1 Hz a 10 Hz y de 10Hz a 2000Hz de frecuencia siempre que el límite inferior sea menor de la frecuencia de velocidad del rotor.

Se colocarán acelerómetros en la carcasa de la multiplicadora cerca de los rodamientos de la misma.

Generador

Las vibraciones estarán en el rango de 10 Hz a 5000 Hz de frecuencia. Si el generador tiene rodamientos estos estarán entre 0,1 Hz y 10 Hz.

Se colocarán acelerómetros en la carcasa de los rodamientos de entrada y salida del generador.

Se resume en la siguiente tabla.

Component	Characteristics	Measuring period	Measuring location	Direction
Nacelle and Tower	Acceleration ≤ 0.1 to 10 Hz Velocity ≤ 0.1 bis 10 Hz	10 minutes	<ul style="list-style-type: none"> In the nacelle on both sides of the rotor bearing base and on both sides of the main frame near the generator At the tower below the azimuth bearing 	Axial, horizontal und vertical direction of rotor shaft
Rotor bearing with rolling elements ¹	Acceleration ≤ 0.1 to 10 Hz Velocity 10 to 1000 Hz	10 minutes 1 minute	<ul style="list-style-type: none"> In designs with two separate rotor bearings on both bearing cases In three-point bearing designs at the case of the front bearing 	Axial, horizontal und vertical direction of rotor shaft
Gearbox	Acceleration ≤ 0.1 to 10 Hz Acceleration 10 to 2000 Hz Velocity 10 to 1000 Hz	10 minutes 1 minute 1 minute	<ul style="list-style-type: none"> In designs with separately mounted gearbox and gearboxes with integral rotor bearing at the gearbox case near the rotor or main bearing 	Axial, horizontal und vertical direction of rotor shaft
Generator	Acceleration 10 to 5000 Hz Velocity 10 to 1000 Hz	1 Minute 1 Minute	<ul style="list-style-type: none"> In designs with integrated gearbox and generator at the case near the input and outer bearings In designs with flexibly coupled generators at the case of both bearings 	Axial, horizontal und vertical direction of rotor shaft

Tabla 1. Características de medición según componentes [17]

Todos los criterios de evaluación seguidos en esta guía son para mediciones en condiciones normales del aerogenerador, esto es en modo de producción estable y con una potencia producida de no menos del 20% de la potencia nominal de la máquina.

Los valores de vibración en aceleración o velocidad se van a poder clasificar en tres bandas para determinar una evaluación cualitativa de los mismos y dar información sobre posibles daños y riesgos. Estas tres bandas son las siguientes:

- Banda I: Los valores que entren en esta banda se consideran adecuados para el funcionamiento continuo de la máquina con esos niveles de vibración.
- Banda II: Los valores que entren en esta banda no se consideran que sean adecuados para un funcionamiento continuo de la máquina. Se recomienda una investigación del elemento que provoca la vibración para determinar si es posible un funcionamiento continuo ilimitado de la maquina teniendo en cuenta el diseño y las condiciones de operación de la máquina en cuestión o no.
- Banda III: Los valores que entren en esta banda se consideran peligrosas ya que podría ocurrir el daño de la máquina eólica o sus componentes.

El valor más perjudicial es el que se tiene en cuenta y para clasificarlo en una de esas tres bandas se sigue según la siguiente tabla.

Guide values for onshore wind turbines with nominal outputs ≤ 3 MW

Component	Evaluation acceleration in m/s^2 rms		Evaluation velocity in mm/s rms	
Nacelle and tower	Frequency range $\leq 0,1$ to 10 Hz		Frequency range $\leq 0,1$ to 10 Hz	
	Band limit I/II	Band limit II/III	Band limit I/II	Band limit II/III
	0,3	0,5	60	100
Rotor with roller bearing	Frequency range $\leq 0,1$ to 10 Hz		Frequency range 10 Hz to 1000 Hz	
	Band limit I/II	Band limit II/III	Band limit I/II	Band limit II/III
	0,3	0,5	2,0	3,2
Gearbox	Frequency range $\leq 0,1$ to 10 Hz		Frequency range 10 Hz to 1000 Hz	
	Band limit I/II	Band limit II/III	Band limit I/II	Band limit II/III
	0,3	0,5	3,5	5,6
	Frequency range 10 Hz to 2000 Hz			
	7,5	12,0		
Generator with roller bearing	Frequency range 10 Hz to 5000 Hz		Frequency range 10 Hz to 1000 Hz	
	Band limit I/II	Band limit II/III	Band limit I/II	Band limit II/III
	10	16	6,0	10

With shafts on plain bearings

Component	Vibration amplitude a_{pp} in μm within the $\leq 0,1$ Hz to 100 Hz frequency range	
	Band limit I/II	Band limit II/III
Rotor bearing	$0,5 \times \text{bearing play}$	$0,75 \times \text{bearing play}$
Generator $n = \text{nominal speed}$ in rpm	$9000 / \sqrt{n}$	$13200 / \sqrt{n}$

Tabla 2. Valores límite de las bandas [17]

Las vibraciones se pueden medir según su desplazamiento, velocidad y aceleración y se pueden pasar de una de ellas a las otras por medio de integración y derivación.

El desplazamiento es la distancia del objeto a su posición de equilibrio y por tanto estará asociado con deformaciones y por lo tanto con tensiones. Cuando se mide el desplazamiento de un punto, el espectro muestra como las mayores amplitudes se dan en baja frecuencia.

La velocidad es una unidad muy utilizada, también, en vibraciones. Técnicamente es el la tasa de cambio del desplazamiento, como de rápido varía el desplazamiento. Cuando se mide la velocidad de un punto, el espectro muestra como las mayores amplitudes se dan en media frecuencia. La velocidad determina lo rápido que el desplazamiento consigue alcanzar sus picos, es decir, influirá en el número de ciclos que realiza el punto a una determina frecuencia. A mayor velocidad realizará más ciclos y el número de ciclos estará relacionado con fatiga. Para entender este concepto, imagina un alambre. Si lo doblas despacio hacia adelante y atrás (baja velocidad) no se romperá, pero si lo doblas rápido muchas veces (alta velocidad) el

alambre se romperá debido a la fatiga. Como se muestra en la siguiente figura, a frecuencias intermedias es donde se da la mayor amplitud en velocidad y, además, tal y como se observa, se considera que esta amplitud es igual para todo ese rango de frecuencias, es decir, que la severidad de la fatiga es la misma.

La aceleración es la tasa o proporción de cambio de la velocidad, cuanto de rápido está cambiando la velocidad. Cuando se mide la aceleración de un punto, el espectro muestra como las mayores amplitudes se dan en alta frecuencia. La aceleración está asociada con las fuerzas a una determinada frecuencia. La frecuencia se puede asociar a un componente en concreto de la máquina y, en el espectro, se observa su amplitud. Si la amplitud es alta significará que hay una fuerza elevada, por ejemplo un desequilibrio, que está produciendo la vibración.

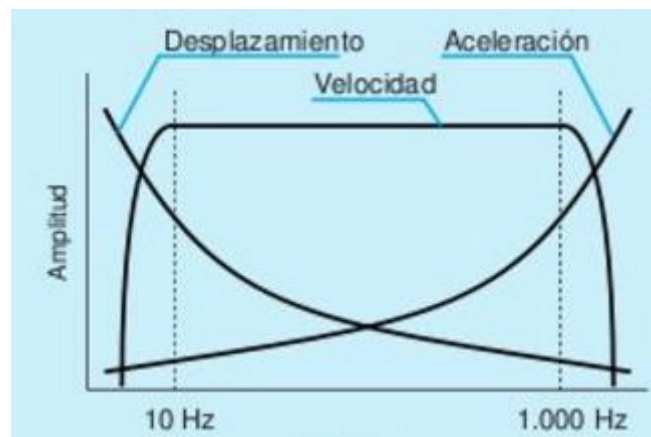


Figura 51. Relación de aceleración, velocidad y desplazamientos en función de la frecuencia

De esta forma, a bajas frecuencias se tendrán altos desplazamientos que provocarán tensiones importantes pero no afectarán en gran medida a fatiga. En frecuencias medias se tendrán bajos desplazamientos, que no afectarán mucho en tensiones, pero se repetirán en gran medida debido a su velocidad y por tanto se podrán tener problemas a fatiga. A altas frecuencias se tendrán desplazamientos y velocidad bajos pero aceleración alta lo que significará que hay algún problema que produce una fuerza.

Por todo ello, en función de lo que se desee comprobar se utilizará una magnitud u otra y por ello en la VDI 3834 aparecen valores de clasificación y análisis para las tres magnitudes.

7. Resultados.

En este apartado se realiza un análisis de las vibraciones sobre una multiplicadora de un aerogenerador Gamesa GBT 2.5MW colocado en Alaiz, Navarra. Las mediciones de las señales en el tiempo fueron realizadas por la empresa Aresse Engineering.

Se va a realizar un análisis en el dominio del tiempo siguiendo la norma VDI 3834 y otro análisis en el dominio espectral en el que no hay ninguna norma que diga cómo realizarlo. Lo más importante de este apartado es el método que se propone para el procesado de las señales, el cual se va a realizar con el programa Imc Famos.

7.1. Acelerómetros

Lo primero que hay que realizar es la medición de las vibraciones para ello se colocan los siguientes acelerómetros.

Nombre	Posición	Dirección
MEM_5	Gear box	X
MEM_6	Gear box	Y
MEM_7	Gear box	Z
Aceleration_5	Planet carrier 1 rotor side	Radial (45º)
Aceleration_6	Planet carrier 1 rotor side	Axial
Aceleration_7	Planet carrier 2 rotor side	Radial (45º)
Aceleration_8	Planet carrier 2 rotor side	Axial
Aceleration_9	High speed intermediate shaft generator side	Radial (45º)
Aceleration_10	High speed intermediate shaft generator side	Axial
Aceleration_11	Mechanical pump	Axial
Aceleration_12	High speed shaft generator side	Radial
Aceleration_13	High speed shaft generator side	Axial
Aceleration_14	High speed shaft generator side	Horizontal

Tabla 3. Lista de acelerómetros

Se tendrá una señal de la vibración en el tiempo por cada acelerómetro colocado.

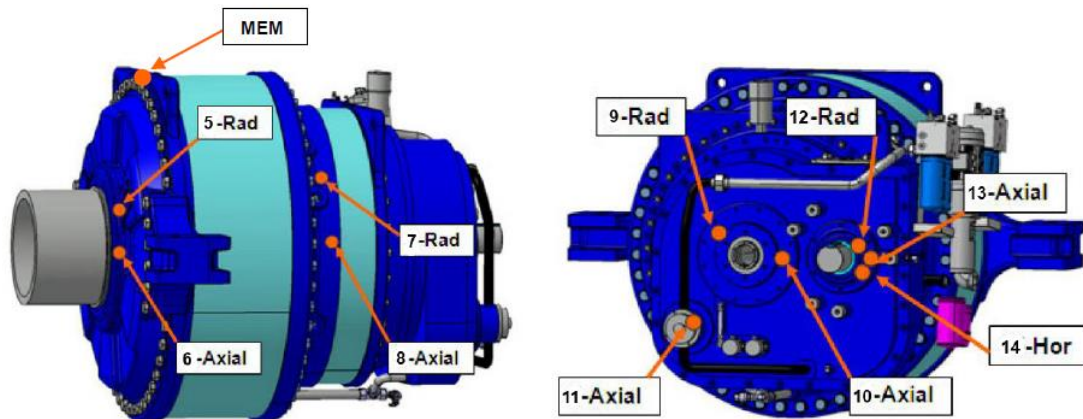


Figura 52. Esquema de la colocación de los acelerómetros en la multiplicadora

7.2. Medición

El software utilizado para la medición de las vibraciones es VidDAS, desarrollado por Aresse. La frecuencia de muestreo que se utilizó fue de 10240 Hz que dividiendo entre 2.57 indica que va a muestrear correctamente hasta señales de 3984Hz. Mirando las frecuencias utilizadas para el análisis de la multiplicadora en la VDI es un valor correcto.

VidDAS está configurado de tal forma que crea un archivo “data” con los datos medidos en 10 segundos para alta frecuencia de adquisición. Se tendrá un archivo cada 10 segundos en el que aparecerá la señal de vibración captada por cada acelerómetro en esos 10 segundos, además crea un archivo con el valor medio de la vibración, la desviación, el valor máximo y mínimo de esos diez segundos. Cada uno de estos archivos tendrá una señal por acelerómetro colocado.

Además se va realizando la medición de la velocidad del viento y se le asocia a cada data su valor de velocidad de viento.

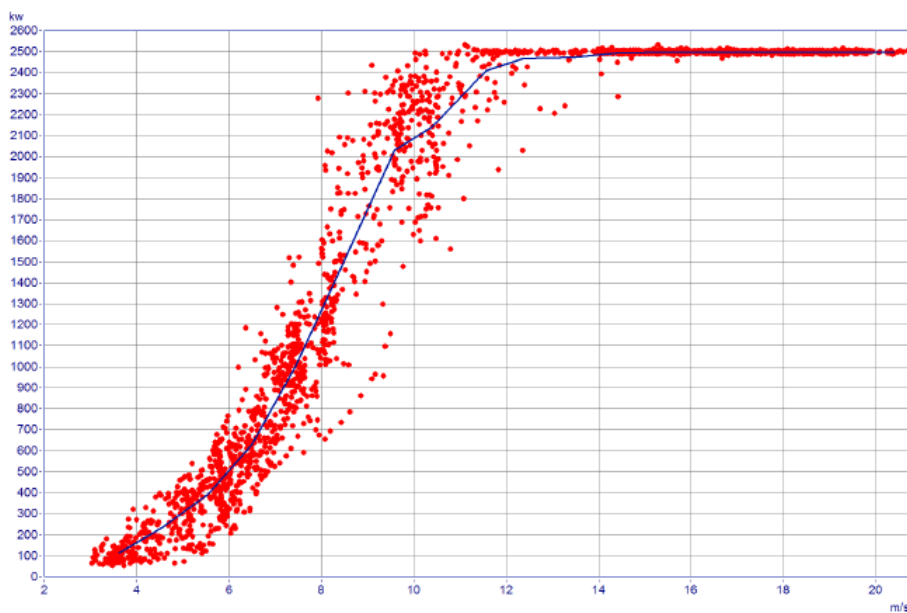
Los archivos “data” medidos se organizan en grupos denominados Bin según la velocidad del viento. Si la velocidad del viento está entre 3 y 4 m/s el archivo data se introduce en el Bin 4, si la velocidad del viento está entre 4 y 5 m/s el archivo se introduce en el Bin 5... Cada Bin tendrá tendrás los archivos “data” en los que la velocidad media del viento es la correspondiente a ese Bin.

Por ejemplo, tras la medición en el citado aerogenerador, se poseen los siguientes archivos de señal de las vibraciones.

Bin	Intervalo velocidad viento (m/s)	Numero de archivos de 10 segundos	Minutos de cada Bin
4	3-4	119	16
5	4-5	96	13
6	5-6	201	27
7	6-7	201	27
8	7-8	201	27
9	8-9	145	19
10	9-10	129	17
11	10-11	106	14
12	11-12	68	9
13	12-13	42	6
14	13-14	25	3
15	14-15	192	26
16	15-16	201	27
17	16-17	201	27
18	17-18	201	27
19	18-19	201	27
20	19-20	136	18
21	20-21	15	2

Tabla 4. Lista de archivos generados

Para analizar las vibraciones correctamente, es de gran ayuda, dar más información del funcionamiento del aerogenerador para ver si es muy elevado o no el valor de la vibración según el punto de operación de la máquina. Se puede comparar, por ejemplo con las revoluciones por minuto del aerogenerador (esto se realiza en el Campbell) o, como se observa en la siguiente gráfica, con la potencia del aerogenerador.



Gráfica 1. Relación de la velocidad del viento y la potencia generada por el aerogenerador

En la gráfica anterior cada punto es la información de uno de esos archivos de 10 segundos y la línea azul es la media que va tomando en cada Bin, por eso es una línea poligonal y no una curva.

7.3. Análisis temporal según VDI 3834

El procedimiento es el siguiente, se calcula el valor RMS de la aceleración o la velocidad según la fórmula descrita en la VDI 3834 de cada acelerómetro dentro de cada archivo de 10 segundos medidos. Se grafican en función de la velocidad del viento.

A continuación se cogen todos estos puntos que caen dentro de un determinado Bin y se calcula su valor medio y su desviación típica. Se coloca este valor medio en la gráfica en el punto medio del intervalo de velocidad del viento del Bin y se colocan los puntos de más menos el doble de la desviación típica para así tener un 95% de probabilidades de que todos los valores estén entre esos dos.

Esto se realiza para todos los Bins, para ver cómo va ir la tendencia de las vibraciones con la velocidad del viento y se compara que no supere el valor límite expuesto en la VDI 3834.

En la programación de Famos se tendrá que tener primero un bucle que recorra los diferentes Bin, dentro de este otro bucle para que recorra los diferentes archivos “data” y un bucle final para que recorra los acelerómetros. Dentro de este bucle estarán los diferentes comandos para realizar el procesado de las señales. Todos los comandos que hay para realizar los bucles, definir variables, ir leyendo las diferentes carpetas y cargando los archivos no se expone en el presente trabajo, ya que no es de interés según los contenidos del mismo. Se va a establecer los comandos para el procesado de la señal para ir viendo la elección de los parámetros explicados anteriormente para el tratamiento de señales.

Por lo tanto nos encontramos dentro del último bucle con la señal de 10 segundos de un acelerómetro en concreto seleccionada, se denota con la variable “nombre_ace1”.

Como se ha comentado en el apartado de la VDI 3834, se calcula el valor RMS de la señal en un rango específico de frecuencias seleccionadas por la norma por ser donde se puede encontrar las mayores vibraciones. Como lo que más nos interesa es medir lo que ocurre con la caja de cambios y acudiendo a norma VDI 3834, los valores RMS en aceleración se calculan entre 10Hz y 2000Hz y en velocidad entre 10 Hz y 1000 Hz. Por ello se definen las siguientes variables para luego introducir en los comandos esas frecuencias

```
_filtro_inf2=10;  
_filtro_sup2=2000;  
_filtro_inf3=10;  
_filtro_sup3=1000;
```

A continuación se filtran las señales según esas frecuencias por lo tanto es necesario el empleo de un filtro paso banda. Para ello se emplean la siguiente funcione disponible en Famos:

Filtro paso banda: **FiltBP**(Data, Characteristic, Parameter, Order, CutFreqLower, CutFreqUpper)

- Data: Señal a filtrar. En este caso habrá que poner “nombre_ acel”
- Characteristic: Tipo de filtro a aplicar. Se selecciona colocando en número del tipo de filtro que se quiere. En este caso se desea un filtro Butterworth.
 - 0: Butterworth
 - 1: Bessel
 - 2: Chebychev
 - 3: Critical damping
- Parameter: Es un parámetro en caso de usar un filtro Chebychev. Como no se usa se coloca un 0
- Order: Orden del filtro.
- CutFreqLower: frecuencia baja de corte
- CutFreqUpper: frecuencia alta de corte

Con este comando se realiza el siguiente filtrado de las señales de los acelerómetros

```
; ACELERACION  
acel_int_2=FiltBP(<nombre_ acel>,0,0,2,_filtro_inf2,_filtr  
o_sup2)  
setunit(acel_int_2,"m/s2",1)  
  
; VELOCIDAD  
acel_int_3=1000*int(FiltBP(<nombre_ acel>,0,0,2,_filtro_in  
f3,_filtro_sup3))  
setunit(acel_int_3,"mm/s",1)
```

Como se observa se utiliza tanto en aceleración como en velocidad el filtro paso banda descrito. Se indica que se realice sobre la señal con la variable “nombre_ acel” y se selecciona un filtro tipo Butterworth ya que, este, proporciona una ganancia constante de 1 (lo que no altera los valores) en la zona de paso y retrasos de la fase pero la fase no nos interesa para este análisis de vibraciones. El orden del filtro se

establece en cero y se colocan las variables que indican las frecuencias de corte de cada caso.

En la fórmula de velocidad el filtro está dentro de la función “int”, esto lo que hace es integrar la señal para pasarla de aceleración a velocidad. Además está multiplicada por 1000 para pasar de metros, que estaba la aceleración, a milímetros para la velocidad.

Otra función empleada que hay en el código de arriba y que sirve para establecer las unidades de la señal es:

SetUnit(XXWaveform, TxUnit, SvCode)

- XXWaveform: Nombre de la variable a la que colocar las unidades.
- TxUnit: Unidades que colocar. En aceleración impondremos m/s^2 y en velocidad mm/s
- SvCode: A qué eje de coordenadas se le asigna.
 - 0: Eje X
 - 1: Eje Y
 - 2: Eje Z

Ya se tienen las señales en el tiempo filtradas según la norma, entonces ya se calcula el valor RMS, así como los valores máximos y mínimos que alcanzan y que servirán para realizar las gráficas y su análisis:

```
; ACELERACION
rms_2=RMS(accel_int_2)
min_2=MIN(accel_int_2)
max_2= MAX(accel_int_2)

; VELOCIDAD
rms_3=RMS(accel_int_3)
min_3= MIN(accel_int_3)
max_3= MAX(accel_int_3)
```

Funciones empleadas para realizar esas operaciones:

- RMS(señal): Calcula el valor RMS de la señal
- MIN(señal): Calcula el valor máximo que toma la señal
- MAX(señal): Calcula el valor mínimo que toma la señal



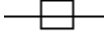

En este se punto se tiene el valor RMS de los archivos y su desviación, así que se grafica y se compara con los valores límites de la VDI3834 en los filtros realizados.











Evaluation in ACCELERATION (m/s ²)				Evaluation in VELOCITY (mm/s)	
0.1-10 Hz		10-2000 Hz		10-1000Hz	
Band Limit I/II	Band Limit II/III	Band Limit I/II	Band Limit II/III	Band Limit I/II	Band Limit II/III
0.3	0.5	7.5	12	3.5	5.6

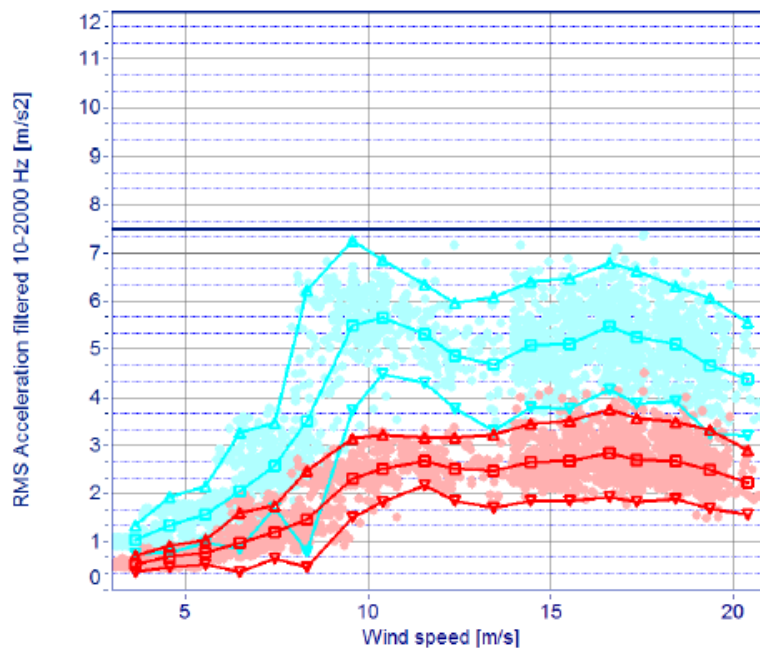
Tabla 5. Valores para el análisis de la VDI 3834 [17]

Se representa el valor RMS de cada 10 segundos de medida. También se representa la media de los valores RMS de todos los archivos de 10 segundos que entran en un mismo BIN. A esa media se le coloca también el doble de su desviación típica para observar en la gráfica el rango en el que se encontraría el valor de RMS con una probabilidad del 95%.

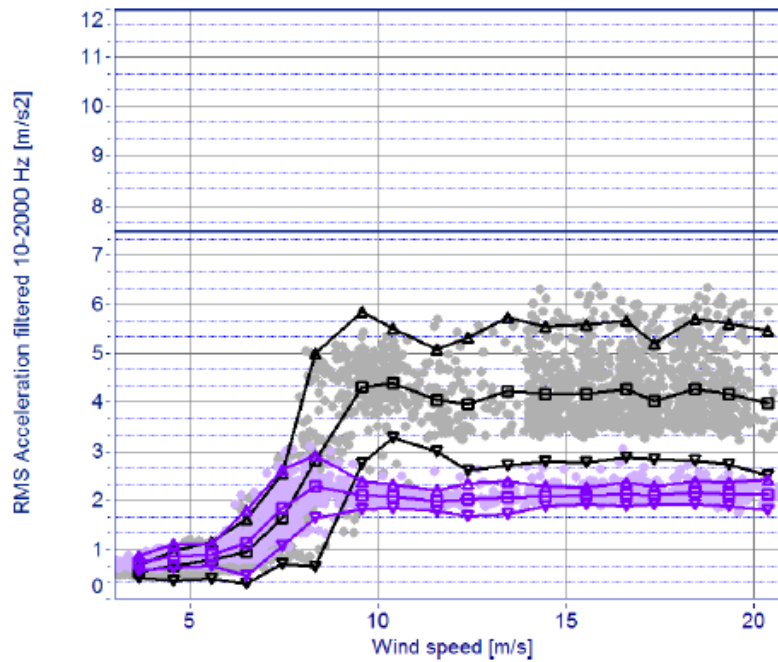
Algunas gráficas de los acelerómetros son las siguientes.

-  valor RMS de cada intervalo de 10 segundos
-  Media + 2xDesviación de todos los valores de un BIN
-  Media de todos los valores de un BIN
-  Media - 2xDesviación de todos los valores de un BIN

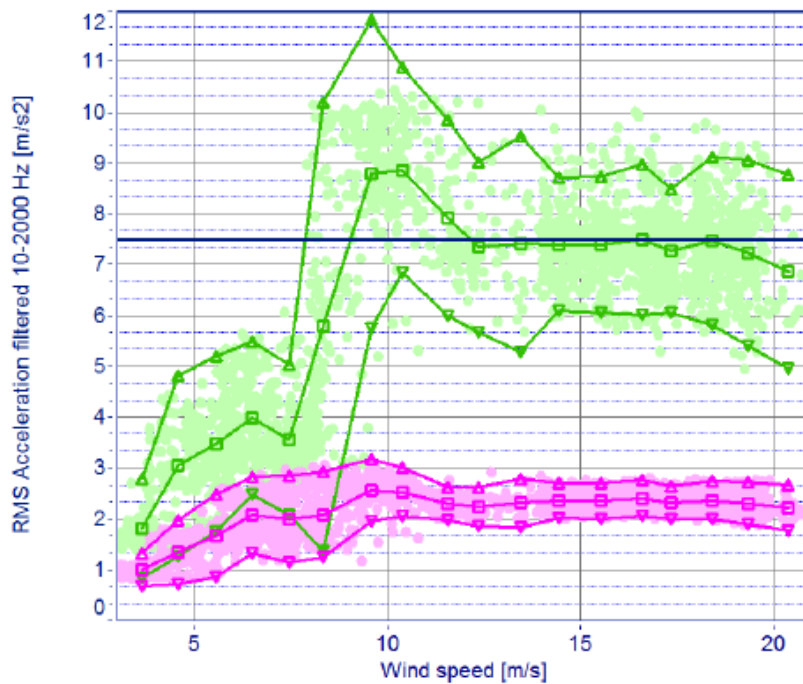
-  Accel#5 PC1 radial
-  Accel#6 PC1 axial
-  Accel#7 PC2 radial
-  Accel#8 PC2 axial
-  Accel#9 IS radial
-  Accel#10 IS axial
-  Accel#11 MP axial
-  Accel#12 HSS radial
-  Accel#13 HSS axial
-  Accel#14 HSS horizontal



Gráfica 2. Valores RMS en aceleración de los acelerómetros 5 y 6



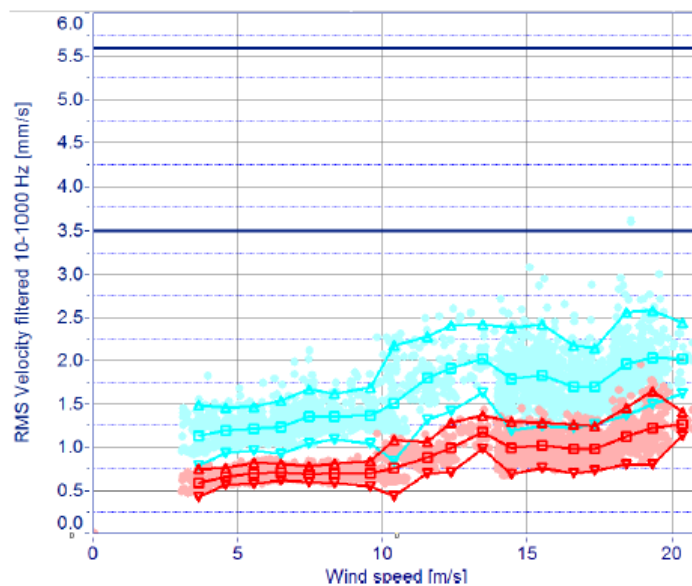
Gráfica 3. Valores RMS en aceleración de los acelerómetros 7 y 8



Gráfica 4. Valores RMS en aceleración de los acelerómetros 9 y 10

En cada grafica hay una línea en los $7,5 \text{ m/s}^2$ que es el límite de la banda uno y otra en 12 m/s^2 que es límite de la banda dos establecidos por la VDI 3834. Se observa como el acelerómetro 10 entra en la banda II, por lo que se considera que los valores no son adecuados. Este acelerómetro mide el eje rápido en dirección axial, así que habrá que realizar un análisis para ver si es posible que el aerogenerador continúe funcionando.

Un ejemplo de una gráfica en velocidad:



Gráfica 5. Valor RMS en velocidad de los acelerómetros 5 y 6

Se analiza de la misma forma que en aceleración. Ha variado las unidades del valor RMS que ahora son mm/s y también han cambiado los límites de las bandas según lo establecido en la VDI 3834.

7.4. Análisis Campbell

En este apartado se realiza un análisis de las vibraciones en el dominio de la frecuencia. Se realizan espectros para determinar que componentes están afectados por la vibración y se determinan las frecuencias forzadas y las frecuencias naturales mediante la representación de un gráfico Campbell. Este análisis no está descrito en ninguna norma, por lo que es un análisis propio.

El procedimiento es parecido al anterior. Se calcula el espectro de la vibración en aceleración de cada acelerómetro dentro de cada archivo de 10 segundos medidos. Se clasifican estos espectros en función de la velocidad de giro del generador, para ello se divide todo el rango de velocidades del generador en intervalos iguales de revoluciones por minuto. Se realiza la velocidad media de giro de cada archivo de 10 segundos y se clasifica en esos intervalos. Se tendrán diferentes espectros en cada intervalo, con ellos se hace la media y se realiza el Campbell. A continuación se ve este proceso más detalladamente, igual que antes nos encontramos en el punto que ya se ha realizado el bucle de los Bin, el de los archivos y estamos con la señal de un acelerómetro.

Comenzamos definiendo algunos parámetros del análisis en Famos. Este análisis se realiza para una velocidad del generador comprendido entre 1020 rpm y 1700 rpm por ser las velocidades normales de funcionamiento, es decir, el Campbell se realizará para este intervalo.

```
;Rango de velocidades del generador  
vgen_min=1020  
vgen_max=1700
```

Las frecuencia de muestreo que se ha utilizado es de 10240 Hz y para determinar el tiempo entre dos muestras consecutivas, como ya se ha explicado en apartados anteriores, hay que realizar su inversa, $\Delta t=1/10240$. Este tiempo servirá para calcular el número de puntos que se utilizan para el cálculo de la FFT. Para ello se define una variable con dicho valor:

```
_f_muestreo=1/10240
```

Los gráficos Campbell se clasifican en función de la velocidad de giro, se necesitará tener la máquina girando a una velocidad constante un determinado tiempo para que calcule la FFT de la señal a esa velocidad y habrá que ir recorriendo todas las velocidades para completar el gráfico. Lo que ocurre es que la velocidad del generador va ir variando continuamente y no se puede hacer que vaya constante y pasando por todas las velocidades. Debido a esta variación se establece un intervalo de rpm en el que se introducirán todos los espectros de las señales

en las que la velocidad del generador no salga de ese intervalo. Este intervalo se establece que tenga una amplitud de 20 rpm, por lo que el primer intervalo será de 1020 rpm a 1040 rpm y en él se agruparán todos los espectros de los archivos de 10 segundos en los que la velocidad del generador no sobrepase las 1040 rpm y no sea menor de 1020 rpm. El siguiente intervalo será de 1040 a 1060 rpm, el siguiente de 1060 a 1080 rpm... A cada intervalo le corresponderá un número de espectros que luego se sumaran y se dividirán para tener una media que se asocie con dicho intervalo de velocidades.

```
genspd_ratio=20 ; diferencia de velocidad del generador para los  
espectros
```

Lo primero que realizamos es el filtrado de la señal captada por el acelerómetro, para ello utilizamos un filtro paso banda, se realiza con la función descrita en el apartado anterior

```
pre_int=FiltBP(<nombre_ acel>,0,0,2,0.5,2500)
```

La señal del acelerador está guardada en la variable “nombre_ acel” y esta señal filtrada se guarda en la variable pre_int. Se selecciona un filtro tipo Butterworth ya que, este, proporciona una ganancia constante de 1 (lo que no altera los valores) en la zona de paso y retrasos de la fase pero la fase no nos interesa para este análisis de vibraciones. El orden del filtro se establece en cero y las frecuencias de corte son de 0.5Hz y 2500Hz ya que son las frecuencias entre las que se va a graficar el Campbell ya que cubren las frecuencias de interés.

La FFT se calcula para una longitud de señal de 4 segundos para conseguir una resolución en frecuencia de 0.25 Hz en el espectro, la señal que se acaba de filtrar tiene 10 segundos de duración por lo que hay que crear un bucle que vaya cortando la señal en trozos de 4 segundos y vaya calculando sus FFTs. Definimos las variables que van a ayudar a realizar estos trozos

```
corte_inicial=0  
corte_final=tiempo+corte_inicial  
corte_max=_longitud_señal
```

siendo y estableciéndolo antes que las variables anteriores:

```
tiempo=4 ; segundos  
_longitud_señal=10 ; segundos
```

El bucle que se realiza es el siguiente:

```
while corte_final<=corte_max  
  
    aux_acel=cut(pre_int,corte_inicial,corte_final)  
    aux_rpm=cut(rpm,corte_inicial,corte_final)  
    mean_rpm=mean(aux_rpm)  
    posicion=1+floor((mean_rpm-vgen_min)/genspd_ratio)  
    ind_rpm=(posicion-1)*genspd_ratio+vgen_min
```

```
        dif_rpm=max(aux_rpm)-min(aux_rpm)

    if dif_rpm<genspd_ratio
        variable_1=AmpSpectrumRMS_1(aux_ace1,tiempo/_f_muestreo,
            2,0,1)
    end

    corte_incial=tiempo+corte_inicial
    corte_final=tiempo+corte_final
end
```

Se comienza el bucle con un “while” que establece que mientras el corte inferior en segundos sea más pequeño que la longitud máxima de la señal entonces se hace el bucle.

Se crea la variable “aux_ace1” que guarda el trozo que se corta de 4 segundos de la señal. El corte se realiza con la función “cut” indicándole que debe realizarlo sobre “pre_int” (la señal filtrada) y los cortes en segundos. En la variable “aux_rpm” se coge el trozo de señal de las revoluciones que lleva el aerogenerador en los 4 segundos de señal seleccionada; se realiza también con la función “cut” aplicándose a la variable “rpm” y estableciéndose los mismos cortes.

Con la función “mean” se calcula la media de revoluciones por minuto de ese trozo de señal y se guarda en la variable “mean_rpm”. Esta media sirve para clasificar el trozo de señal de 4 segundos en los intervalos 20 rpm de amplitud que se han comentado anteriormente para la realización del Campbell. Esta clasificación se realiza en la siguiente línea del código y el intervalo al que corresponderá será la variable “posicion”. Recordando esa línea:

```
posicion=1+floor((mean_rpm-vgen_min)/genspd_ratio)
```

La función floor lo que hace es coger el primer número entero del número sobre el que se aplica.

Las rpm a las que se colocará el espectro de dicha señal en el Campbell será:

```
ind_rpm=(posicion-1)*genspd_ratio+vgen_min
```

En la siguiente línea del código lo que se realiza es definir la variable “dif_rpm” como la mayor diferencia de velocidad en rpm que toma el trozo de señal de 4 segundos.

A continuación se establece la siguiente condición:

```
if dif_rpm<genspd_ratio
    variable_1=AmpSpectrumRMS_1(aux_ace1,tiempo/_f_muestreo,
        2,0,1)
end
```

Compara la diferencia de velocidades de la señal de cuatro segundos con la amplitud de los intervalos de división de las rpm para la realización del Campbell. Si esta diferencia es menor que ese intervalo, entonces calcula la FFT de dicho trozo de señal porque se considera que se puede asociar a ese intervalo de rpms. Si la diferencia es mayor entonces no realiza nada y se desecha ese trozo de señal por considerarse una variación muy grande de rpms para su clasificación en un espectro. La FFT de las señales validas se realiza con la función "AmpSpectrumRMS_1" que calcula el valor de la media del espectro en valor RMS. Dicha función se define de la siguiente forma:

AmpSpectrumRMS_1(InputData, WindowWidth, WindowType, Overlapping, AveragingType):
Calcula el valor de la media del espectro en valor RMS.

- InputData: Señal sobre la que calcular
- WindowWidth: Número de puntos sobre los que colocar la ventana
- Windowtype: Colocar un número en función del tipo de ventana. En este caso se elige una ventana Hanning.
 - 0: Rectangle
 - 1: Hamming
 - 2: Hanning
 - 3: Blackman
 - 4: Blackman / Harris
 - 5: Flat Top
- Overlapping: Porcentaje de overlapping que se desea. No se coloca overlapping por eso se coloca un cero.
- AveragingType: método para el cálculo de la media de toda la FFT. Se elige entre:
 - 1: Media aritmética de toda la señal
 - 2: Máximo valor del espectro
 - 4: Mínimo valor del espectro

El número de puntos sobre el que realizar la FFT es el tiempo de la señal, es decir 4 segundos, entre el tiempo entre dos muestras consecutivas, es decir 1/10240 Hz establecido en la variable "_f_muestreo". Realizando esta operación da un resultado de 40960 puntos. Este número de puntos no es una potencia de dos y, como se ha comentado, la FFT necesita un número de puntos potencia de dos, entonces lo que hace Famos para realizar la operación es rellenar con puntos de valor cero hasta completar una potencia de dos.

La ventana utilizada es una Hanning por ser la más apropiada para señales aleatorias con componentes discretos en frecuencia. No se considera solapamiento. Se selecciona la media aritmética como resultado de dicha señal.

Y por último se termina el bucle modificando las variables de corte para que al volver al empezar el bucle tome los 4 segundos siguientes de señal.

Una vez que se ha concluido el bucle, otro bucle anterior recorrería los siguientes archivos de 10 segundos, de tal forma que al final se hayan recorrido todas las señales. Se tendrán los espectros de todas las señales calculadas y clasificados en los intervalos en los que se ha dividido el eje de revoluciones. El valor final que se dará a cada intervalo será la suma de todos los espectros que entran en dicho intervalo dividido entre ese número de espectros para así calcular su media.

A continuación, en el código vendría una secuencia para crear matrices y rellenarlas con estos valores y así crear el gráfico Campbell. Algunos resultados:

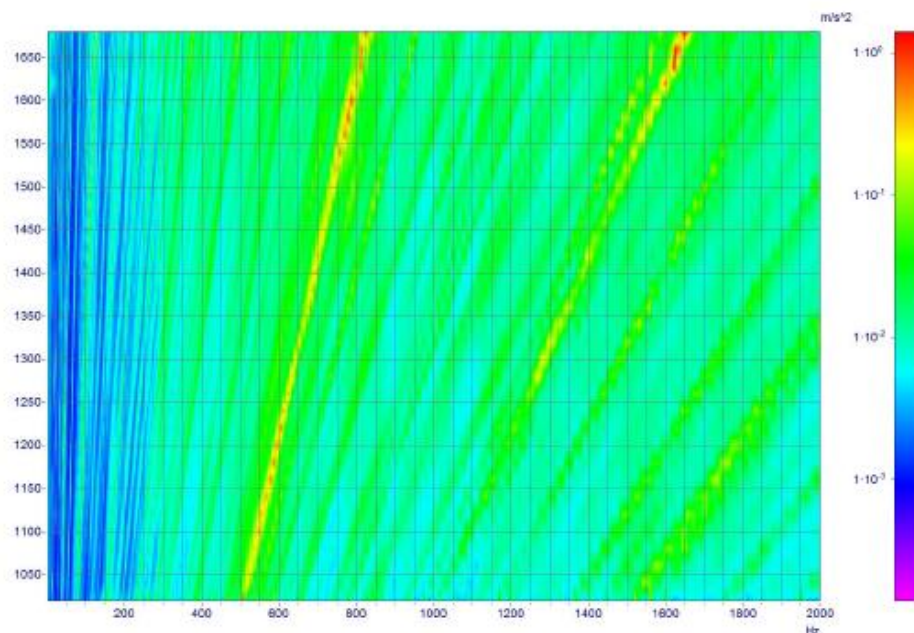


Figura 53. Diagrama Campbell del acelerómetro 10

Estos Campbell se han graficado de forma contraria a como se ha explicado anteriormente. En ellos la frecuencia está en el eje horizontal y las revoluciones por minuto en el eje vertical por lo que, aquí, las frecuencias forzadas son líneas verticales.

Con estos Campbell se consigue identificar las frecuencias forzadas (líneas inclinadas) y las frecuencias naturales (líneas verticales) con el fin de caracterizar dinámicamente a la multiplicadora sobre la que se ha realizado las mediciones.

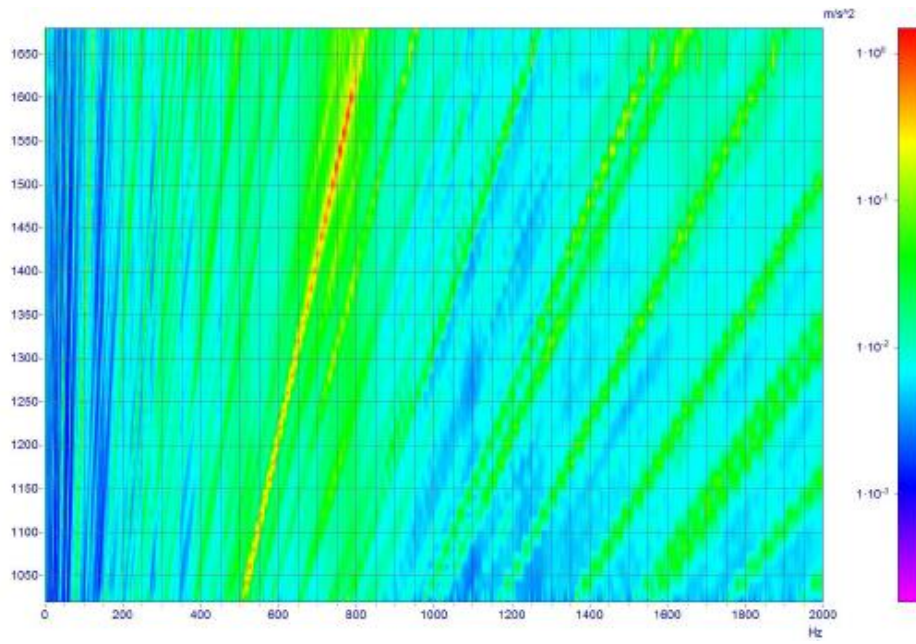


Figura 54. Diagrama Campbell del acelerómetro 11

8. Conclusiones

En el presente proyecto se ha realizado un procedimiento para analizar la severidad de las vibraciones en el momento de funcionamiento de un generador y para caracterizar dinámicamente (frecuencias forzadas, frecuencias naturales...) al mismo.

Se ha comenzado con la clasificación en tres principales tipos de trenes e potencia con el fin de conocer su diseño para conocer sus componentes y poder deducir donde colocar los sensores de medición.

A continuación se ha descrito el proceso de adquisición y procesamiento de señales definiendo todos los parámetros que intervienen en él. Es importante conocer todos los parámetros y sus relaciones para hacer un buen balance en su selección que permita obtener unos resultados fiables.

Una vez tratada correctamente la señal se ha descrito la norma VDI 3834 que permite valorar el efecto de una vibración que se ha medido en un aerogenerador en funcionamiento.

Estos procesos y análisis se han aplicado a las señales de vibración de una multiplicadora de un aerogenerador real. Con las mediciones sobre el aerogenerador se ha realizado un procedimiento siguiendo lo expuesto en la norma VDI 3834 el cual permite determinar si dichas vibraciones son aceptables para el buen comportamiento de toda la máquina o por el contrario puede ser dañinas.

Con esas mismas señales vibratorias que se han medido en un funcionamiento normal del aerogenerador, mediante otro procedimiento descrito, se ha realizado una gráfica Campbell que permite obtener las frecuencias forzadas de la multiplicadora y las frecuencias naturales, es decir, se ha conseguido obtener sus propiedades de vibración naturales, su comportamiento dinámico.

Con estos diagramas también es posible obtener como son los componentes del aerogenerador. Por ejemplo con uno de los diagramas Campbell que se ha mostrado anteriormente y que se vuelve a poner a continuación se puede obtener el número de dientes de los engranajes.

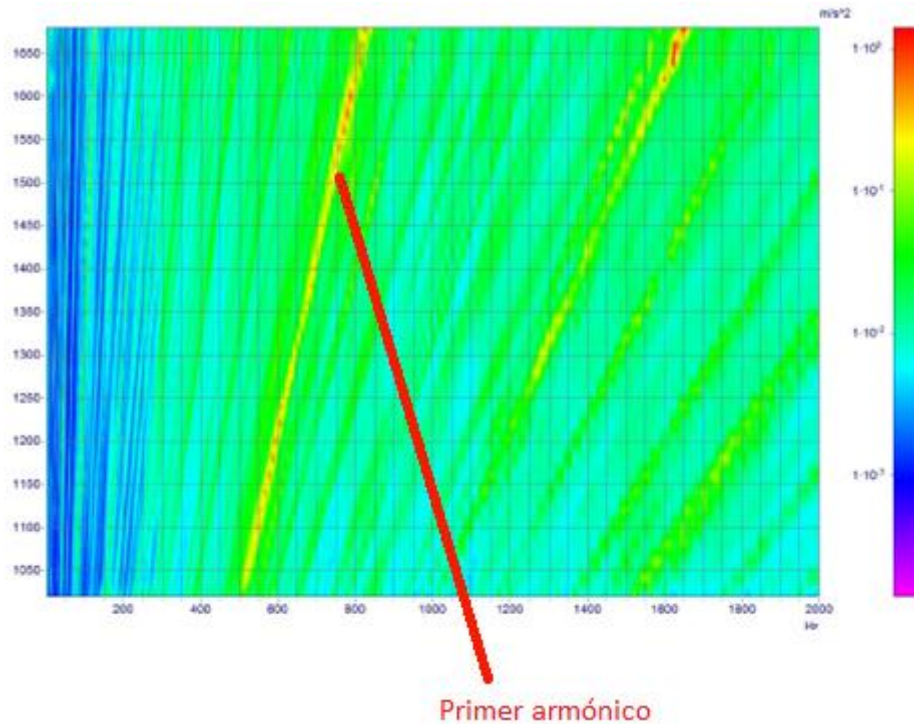


Figura 55. Diagrama Campbell del acelerómetro 10

Es orden que se muestra en la figura 55 se sabe que es el primer armónico de la frecuencia de engrane de uno de los engranajes de la multiplicadora. La fórmula para determinar esta frecuencia de engrane es:

$$GMF = Z * RPM$$

Z= Número de dientes

RPM= Velocidad de giro en radianes por segundo

GMF= Frecuencia de engrane

Observando el Campbell, en ese armónico a una velocidad de 1600 rpm, que serán 80/3 Hz, se da a una frecuencia de 800 Hz. Introduciendo los datos en la formula se obtiene redondeando que el engranaje tiene que tener 30 dientes.

Así se podría operar con todos los componentes si se tienen identificados en el Campbell y se conoce la expresión que rige dicha frecuencia.

De este Campbell también se puede realizar un análisis de órdenes, obteniendo la señal de cada una de las frecuencias forzadas u órdenes que aparecen en él. A modo de ejemplo se va a realizar para el armónico anterior.

En Famos, después del proceso descrito sobre cómo realizar el Campbell, se tiene en una variable una matriz con todos los valores de rpm, frecuencia y valor RMS para realizarlo. En concreto, para el Campbell sobre el acelerador número 10 se tiene guardado en la variable “CAMPBELL_matrix_ acel_10”. Con la función “MatrixCut” lo que realiza Famos es como si cortara en la gráfica Campbell de un punto de ella a otra mostrando como va variando la amplitud en función de la frecuencia. En realidad lo que hace es coger de la matriz los valores entre los dos puntos.

Para analizar ese orden del Campbell del acelerador 10 se elige que realice el corte desde el punto de 500 Hz y 1000 rpm hasta el punto 780 Hz y 1600 rpm. Se asigna dicho corte a la variable “Orden_primer_armónico”, de esta forma:

```
Orden_primer_armonico=MatrixCut(CAMPBELL_matrix_ acel_10,      500,  
1000, 780, 1600,  0, 1, 0)
```

Se obtiene la siguiente señal de dicha frecuencia forzada:

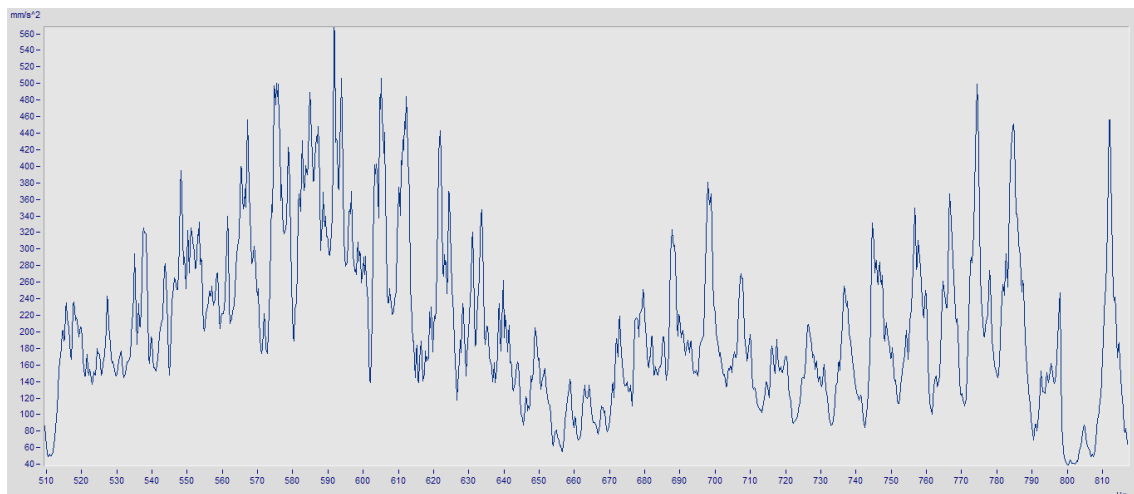


Figura 56. Análisis de orden, primer armónico del acelerador 10

En definitiva, una vez realizado el Campbell se puede proceder a realizar un análisis de los órdenes que interesen.

Bibliografía

- [1] Romax Technology. Wind Turbine Drivetrain Technology and Cost Drivers. Dr John Coultate
- [2] http://www.imac.unavarra.es/dinaero/Enneko/Dinamica_de_Aerogeneradores_Parte_1.pdf
- [3] Kisoft. Wind turbine gearbox
- [4] Guiones programa SPG_Vibroacoustics. Aresse Engineering
- [5] www.sinais.es
- [6] http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/cleto_o_ja/capitulo7.pdf
- [7] <http://www.gamesacorp.com/es/productos-servicios/aerogeneradores/>
- [8] <http://www.thewindpower.net/>
- [9] <http://www.suzlon.com/>
- [10] <http://www.goldwindglobal.com/web/solutions.do?action=technology>
- [11] <http://www.enercon.de/en/products/>
- [12] http://w5.siemens.com/spain/web/es/energia-sostenible/wind-power/Energia_Eolica_Terrestre/Pages/Energia-Eolica-Terrestre.aspx
- [13] <https://www.vestas.com/en/products/turbines#!>
- [14] <http://www.nordex-online.com/en/products-services/wind-turbines.html>
- [15] <http://www.mywind.com.cn/English/program/products.aspx?MenuID=05030301&ID=29>
- [16] Curso de Vibraciones Mobius Institute
- [17] VDI 3834 Part 1. Marzo 2009