



ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE GIJÓN

GRADO EN INGENIERÍA INFORMÁTICA EN TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN

**ÁREA DE
ARQUITECTURA Y TECNOLOGÍA DE COMPUTADORES**

DETECCIÓN DE ANOMALÍAS DE FUNCIONAMIENTO EN MOTORES ELÉCTRICOS

D. Serrano Prieto, Juan

TUTOR: D. Francisco José Suárez Alonso

D. Luis Magadán Cobo

Fecha: Julio 2024

Índice de contenidos

Índice de contenidos	2
Índice de figuras	5
Índice de tablas.....	7
1. Introducción	8
2. Objetivos y Alcance	10
3. Estado del arte	11
3.1 Tipos de mantenimiento en la industria	11
3.2 Machine learning	13
3.2.1 Aprendizaje supervisado	14
3.2.2 Aprendizaje no supervisado	15
3.2.3 Aprendizaje por refuerzo	15
3.3 Técnicas para obtener modelos	16
3.3.1 Regresión	16
3.3.2 K-nearest Neighbors (KNN)	19
3.3.3 Máquina de vector soporte	20
3.3.4 Árboles de decisión	21
3.3.5 Redes neuronales	22
3.3.6 Métodos de regularización	23
3.4 Análisis de fallos en motores eléctricos.....	26
3.4.1 Fallos en rodamientos.....	26
3.4.2 Fallos de balanceo.....	33
3.4.3 Fallos de alineamiento	36

3.5 Transformada rápida de Fourier.....	39
 3.5.1 Vibraciones y la transformada rápida de Fourier.....	40
4. Recursos empleados.....	43
 4.1 Elementos de trabajo.....	43
 4.2 Sistema de Monitorización.....	48
 4.2.1 Arquitectura.....	48
 4.2.2 Sensores (Edge)	49
 4.2.3 Gateway (Fog)	50
 4.2.4 Software	51
5. Desarrollo del trabajo	53
 5.1 Captura y organización de los datos de vibraciones	53
 5.2 Determinación de las frecuencias características de fallo.....	54
 5.4 Ajuste de las gráficas de resultados	64
6. Evaluación de resultados	69
 6.1 Resultados en bruto y normalizados	69
 6.2 Resultados relativos a la velocidad de giro nominal.....	73
 6.3 Resultados relativos a rodamientos	78
 6.3.1 BPFI	79
 6.3.2 BPFO	81
 6.3.3 BSF y FTF	84
 6.4 Resultados relativos a la frecuencia de giro de las aspas del ventilador	
85	
7. Planificación	90
8. Conclusiones.....	92
Referencias.....	93
Anexo.....	97

Gráficas	97
Código.....	97
Datos de los motores.....	101

Índice de figuras

Ilustración 1: regresión lineal vs polinómica	18
Ilustración 2: Hiperplanos SVM	20
Ilustración 3: Árbol de decisión	21
Ilustración 4: Red neuronal	23
Ilustración 5: Ajuste lineal, bajo ajuste y sobreajuste [9]	24
Ilustración 6: Rodamientos en motor eléctrico [38].....	27
Ilustración 7: Rodamiento de bolas.....	27
Ilustración 8: espectro BPFO	29
Ilustración 9: espectro BPFI.....	30
Ilustración 10: espectro BSF	31
Ilustración 11: espectro FTF	32
Ilustración 12:Desbalanceo estático [19]	35
Ilustración 13: Fallo alineamiento [14].....	37
Ilustración 14: Desalineamiento paralela [30]	38
Ilustración 15: Desalineamiento angular [30].....	38
Ilustración 16: Señales con FFT [16]	40
Ilustración 17: Motor 1 cementera Aboño	44
Ilustración 18: Motor 2 cementera Aboño	45
Ilustración 19: Vista frontal rodamiento [36]	47
Ilustración 20: Arquitectura sistema monitorización [37]	49
Ilustración 21: Placa de sensor (izquierda) y de gateway (derecha) [37]	51
Ilustración 22: Arquitectura sistema monitorización [37]	52
Ilustración 23: Extracto de la matriz para dos muestras	57
Ilustración 24: Motor 1, eje Z, 1X	59
Ilustración 25: Motor 1, eje Z, 1X	60
Ilustración 26: Diagrama dispersión eje Z	65
Ilustración 27: Gráfica sin ajustar datos motor 1, eje X.....	67

Ilustración 28: Gráfica normalizada motor 1, eje X.....	68
Ilustración 29: Gráfica sin normalizar 1X eje Y	70
Ilustración 30: Gráfica normalizada 1X ejeY	71
Ilustración 31: Gráfica sin normalizar 1X eje Y	72
Ilustración 32: Gráfica normalizada 1X eje Y	73
Ilustración 33: Gráfica normalizada 1X ejeZ.....	74
Ilustración 34: Gráfica normalizada 1X eje X	75
Ilustración 35: Gráfica normalizada 1X eje Y	76
Ilustración 36: Gráfica normalizada 1X eje Z.....	76
Ilustración 37: Gráfica normalizada 2X eje Y	77
Ilustración 38: Gráfica normalizada 3X eje Z.....	78
Ilustración 39: Gráfica normalizada 1X eje X	79
Ilustración 40: Gráfica normalizada 1X eje Y	80
Ilustración 41: Gráfica normalizada 2X eje Y	81
Ilustración 42: Gráfica normalizada 1X eje Y	82
Ilustración 43: Gráfica normalizada 2X eje Y	83
Ilustración 44: Gráfica normalizada 1X eje Y	84
Ilustración 45: Gráfica normalizada 1X eje Y	85
Ilustración 46: Gráfica normalizada 1X eje Z.....	86
Ilustración 47: Grafica normalizada 2X eje Z.....	87
Ilustración 48: Gráfica normalizada 3X eje Z.....	88
Ilustración 49: Gráfica normalizada 1X eje X	89
Ilustración 50: Diagrama Gantt planificación	91

Índice de tablas

Tabla 1: Desgaste de los rodamientos	18
Tabla 2: Grado de balanceo según ISO	36
Tabla 3: Mejora de FFT respecto a DFT [6]	41
Tabla 4: Posicion frecuencias características de fallo motor 1	56

1. Introducción

Los motores eléctricos desempeñan un papel fundamental en la industria actual, siendo elementos clave en diversos sectores y procesos productivos. Su funcionamiento eficiente y continuado es vital para asegurar la continuidad de las operaciones y maximizar la productividad en diferentes entornos industriales.

Los motores eléctricos ofrecen varias ventajas significativas respecto a otros tipos de motores tradicionales en la industria. Algunas de estas ventajas son la alta eficiencia energética, lo que significa que convierten la mayor parte de la energía eléctrica en energía mecánica útil. Según la “Agencia Internacional de Energía”, los motores eléctricos alcanzan eficiencias superiores al 90% en muchas aplicaciones. Una ventaja más evidente es el menor impacto ambiental que tienen respecto a otras alternativas. Los motores eléctricos no emiten gases contaminantes ni generan residuos nocivos durante su operación, lo que contribuye a la reducción de la huella de carbono y al cumplimiento de regulaciones ambientales más estrictas [1].

Sin embargo, a pesar de su importancia, los motores eléctricos aún presentan desafíos en términos de fiabilidad y durabilidad. Es por esto por lo que las empresas tratan de mejorar la fiabilidad y durabilidad de los motores eléctricos. Estos dispositivos pueden experimentar fallos y anomalías de funcionamiento que pueden resultar en interrupciones costosas y pérdidas significativas de producción con graves costes. Por tanto, es crucial abordar estos problemas y desarrollar soluciones efectivas que garanticen un funcionamiento óptimo de los motores.

La mejora en la fiabilidad y durabilidad de los motores eléctricos tiene un impacto significativo en la productividad para las empresas. Al lograr motores más fiables, se reducen

las interrupciones y los tiempos de inactividad no planificados, lo que conduce a una mayor eficiencia y una producción más consistente. Además, una mayor durabilidad de los motores reduce los costes de mantenimiento y reemplazo, mejorando la rentabilidad a largo plazo.

La implementación de estas mejoras se lleva a cabo en un entorno industrial dinámico y diverso. Los motores eléctricos se utilizan en una amplia gama de aplicaciones, desde maquinaria pesada en la industria de fabricación hasta sistemas de bombeo en el sector agrícola. Por tanto, cualquier solución diseñada para mejorar la fiabilidad de estos motores debe ser adaptable a diferentes condiciones de trabajo y requisitos específicos de cada sector.

El principal objetivo de este proyecto es garantizar la fiabilidad de los motores eléctricos a través de la detección de anomalías de funcionamiento. Mediante el desarrollo e implementación de técnicas y sistemas de monitorización avanzados se busca identificar y prevenir posibles fallos en los motores antes de que ocurran. Esto permitirá a la empresa interesada anticiparse a problemas potenciales, tomar las medidas correctivas oportunas y asegurar la continuidad de sus procesos productivos.

En resumen, la mejora en la fiabilidad y durabilidad de los motores eléctricos es esencial para la industria actual. Este proyecto aborda la importancia de estos motores en la industria, el desafío en cuanto a mantenimiento que enfrentan y cómo su mejora se traduce en una mayor productividad. Además, se enfoca en el entorno en el que se implementarán las soluciones propuestas y establece el objetivo principal de garantizar la fiabilidad de los motores eléctricos mediante la detección de anomalías de funcionamiento.

2. Objetivos y Alcance

Hoy en día la industria tiene como uno de los grandes problemas el mantenimiento de sus herramientas de trabajo. Las pérdidas tanto económicas como de tiempo que se producen cuando ocurren fallos en las máquinas es un gran problema que se puede evitar, o al menos mitigar realizando un mantenimiento correcto de las mismas [2]. Siendo importante adelantarse a estos fallos, se plantean los siguientes objetivos en este proyecto:

- Estudio del estado del arte sobre análisis, detección y diagnóstico de fallos en motores.
- Desarrollo de una metodología de trabajo para el análisis de vibraciones.
- Desarrollo de un sistema de detección temprana de anomalías de funcionamiento en motores eléctricos.
- Desarrollo de un sistema de diagnóstico de anomalías detectadas en motores eléctricos.

En cuanto al alcance, para abordar el segundo objetivo se trabajará con los datos de vibración de dos motores eléctricos proporcionados por un prototipo de sistema de monitorización desplegado en una planta industrial cementera. Los motores impulsan ventiladores de rechazo encargados de retornar a los molinos aquellos trozos de material que superan un tamaño mínimo y los sensores de vibración están montados encima del rodamiento delantero de cada motor.

3. Estado del arte

Los motores eléctricos con los que se trabaja en este proyecto serán analizados con distintas herramientas para conseguir un funcionamiento correcto. En los siguientes puntos se presentan los diferentes enfoques y herramientas que se conocen para lograr esto.

3.1 Tipos de mantenimiento en la industria

El mantenimiento industrial en los procesos industriales es el conjunto de actividades encaminadas a garantizar el correcto funcionamiento de las máquinas e instalaciones que conforman un proceso de producción permitiendo que éste alcance su máximo rendimiento.

Es indispensable para las empresas con el fin de adaptarse a los estándares de calidad internacional y de ser competitivas tanto a este nivel como al nacional o regional. Las empresas se han de adaptar a la Norma ISO 9001 [3], y para ello necesitan un plan de mantenimiento apropiado con el fin de conservar sus equipos, herramientas e instalaciones de trabajo [4]. Tradicionalmente han existido distintos enfoques en el mantenimiento, como puede ser el mantenimiento correctivo, preventivo, según condición o predictivo. A continuación, se detallan estos tipos de mantenimiento:

- Mantenimiento reactivo: el mantenimiento reactivo o correctivo es el más común, se aplica cuando ocurre un daño o avería en el equipo que se está monitorizando. Este es un modelo bastante ineficiente ya que siempre va un paso por detrás del problema ocurrido, lo cual es un riesgo en cuanto a tiempo o incluso posible solución del fallo.

- Mantenimiento preventivo: en este tipo de mantenimiento el objetivo es llegar por delante al momento en el cual se puede producir el fallo. La meta es garantizar que la disponibilidad del sistema esté lo más próxima al 100% del tiempo total de uso. Para esto se puede realizar este mantenimiento de manera programada, buscando una oportunidad (parada obligada del sistema) o condicionalmente, siguiendo algún parámetro predeterminado.
- Mantenimiento según condición: este mantenimiento es una variación del mantenimiento preventivo en el cual se monitorizan las variables más significativas de un sistema, creando alertas precisas determinadas [5]. Estas alertas servirán para planificar una parada de forma que se pueda comprobar que todo está correctamente.
- Mantenimiento predictivo: este tipo de mantenimiento busca ir un paso más allá y utilizar a partir de diferentes variables de entrada, técnicas para poder adelantarse a estos problemas de manera más precisa, creando un pronóstico a partir de un análisis de la situación. Esto es lo que lo diferencia del diagnóstico preventivo y lo mejora respecto al de condición [5, 6].

En el mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM), ocurre que hay distintas opiniones sobre las sutiles diferencias entre el mantenimiento preventivo y el predictivo. Si se sigue la directriz europea sobre terminología de mantenimiento, según la norma EN-13306:2003 [7], el mantenimiento se divide en correctivo y preventivo. Este último a su vez se divide en dos ramas, de las cuales la rama de mantenimiento basado en condición es la definida como predictiva.

Cabe señalar que según otras normas como la AFNOR NFX 60-010 [7], sacan al mantenimiento predictivo de la rama del preventivo y se coloca como un tipo de mantenimiento distinto, o incluso en otras como la norma SAE JA 1011 [5] se consideran directamente como sinónimos.

El mantenimiento predictivo de los motores eléctricos está ligado desde hace unos años al uso de técnicas de análisis de vibraciones, termografía, ultrasonidos o medición del nivel de lubricación como herramientas para el estudio de este.

El análisis de vibraciones es el cual determina el funcionamiento de una maquina rotativa en base al comportamiento de sus vibraciones. En las maquinas se producen niveles de vibración controlados, que cuando se presenta algún fallo o desajuste se ven alterados, señalando un posible problema y necesidad de mantenimiento del aparato. Este análisis solo se puede realizar si se conoce información del equipo como su velocidad de giro, el tipo de cojinetes, rodamientos y aspas que usa y un punto adecuado para realizar las mediciones. Gracias a esta técnica se pueden detectar problemas como el desalineamiento, desbalance o el daño en rodamientos [8].

En cuanto a la termografía, esta técnica estudia como varía la temperatura en las máquinas utilizando esta información para evaluar si la máquina funciona correctamente. La energía que una maquina emite es directamente proporcional a su temperatura. Con una cámara termográfica se puede capturar la temperatura de una máquina para analizar las variaciones de la temperatura. Si se detecta que la temperatura sube, generalmente indica un problema a nivel eléctrico o mecánico en el aparato [8].

El análisis de ultrasonidos se basa en el análisis de las ondas de sonido de alta frecuencia que producen los aparatos. Con un medidor ultrasónico se pueden tanto escuchar las señales emitidas como transformarlas a una pantalla y así poder detectar distintos problemas en una máquina, como sería el caso de la fricción en máquinas rotativas o fallos y fugas en válvulas [8].

También se puede determinar el estado de funcionamiento de una maquina a través del estudio de las propiedades de su aceite lubricante. Este lubricante es muy importante ya que sirve para proteger el desgaste del aparato, controlando también la temperatura y limando impurezas. Si el lubricante presenta un nivel insuficiente o se encuentra contaminado, dejará de cumplir estas funciones y la maquina podrá fallar [8].

3.2 Machine learning

El campo del Aprendizaje Automático, una subdisciplina de la Inteligencia Artificial (IA), permite a las computadoras procesar grandes volúmenes de datos, entrenarse con ellos

y utilizar algoritmos que les permiten predecir o solucionar problemas. Este proceso les permite adaptarse a la incorporación constante de nuevos datos, mejorando continuamente sus resultados [9].

Un ejemplo simplificado de como una máquina trabaja en un aprendizaje cuando recibe datos de entrenamiento puede ser el siguiente. La máquina recibe estos datos, y usando un algoritmo ya instalado en la misma, le aplica el modelo elegido previamente y de esta manera entrena el modelo. Cuando llegue un caso nuevo, si ha sido previamente entrenada, podrá dar una respuesta de manera automática. Cabe resaltar que esta es una explicación muy simplificada del proceso que más adelante en el documento se detallará con más precisión [10].

En definitiva, esta técnica dota a los computadores de la capacidad de realizar tareas de forma autónoma, observando datos, construyendo un modelo basado en estos y utilizándolo para resolver problemas. Además, si se le añaden más datos posteriormente, será capaz de adaptarse y mejorar los resultados.

Estos algoritmos son clasificados de muchas maneras, respecto a su técnica, respecto al tipo de modelo... pero la taxonomía principal es respecto a los datos que procesan, dividiendo el aprendizaje en aprendizaje supervisado, no supervisado o por refuerzo [9,10].

3.2.1 Aprendizaje supervisado

Los algoritmos supervisados son los que en los datos previos o conjunto de entrenamiento que utiliza este algoritmo, viene dada la información tanto de la entrada al sistema como de la salida o resultados deseados. Es decir, en estos algoritmos se parte de un conocimiento previo acerca de cómo han de ser los resultados esperados del mismo, siendo esta la diferencia con el aprendizaje no supervisado que se explicará más adelante.

Este tipo de aprendizaje es realmente útil en investigación biológica o biología computacional, siendo los más utilizados las regresiones, las redes neuronales o las máquinas de soporte vectorial (SVM). Este tipo de algoritmos comúnmente se enfrentan a dos tipos de problemas tras ser entrenados con datos, sobreajuste y correlación.

En el primer caso, el sobreajuste ocurre cuando los datos han sido demasiado entrenados, lo cual puede causar una reacción negativa en el rendimiento del modelo, afectando también a los nuevos datos de entrada.

Respecto a la correlación, surge cuando aparecen variables que están relacionadas entre sí por valor o medición, por ejemplo, kilómetros con metros, causando de esta manera problemas en la obtención de resultados ya que están altamente correlacionadas [11, 12, 13, 14].

3.2.2 Aprendizaje no supervisado

En este caso, en los datos obtenidos para entrenar el algoritmo, no se posee el par entrada/salida, si no que solo se conoce la entrada, con lo cual no hay información previa de cómo debe ser la salida o resultado esperado, siendo esta la diferencia con el aprendizaje supervisado.

En este caso, al no tener conocimiento previo, estos algoritmos suelen tratar de agrupar los datos dentro del caos de estos, tratando de encontrar algún patrón o modelo para organizarlos de alguna manera. Esta agrupación o “clustering” suele ser la forma más típica de aprendizaje no supervisado, pero también se encuentra la inferencia bayesiana para producir probabilidades condicionales (aprendizaje supervisado) o es utilizado para comprender datos de una entrada [11, 13, 14, 15].

3.2.3 Aprendizaje por refuerzo

Para este último caso, el algoritmo aprende a partir de su propia experiencia. Este modelo es ampliamente distinto a los dos anteriores, ya que no se presenta ningún conjunto de entrenamiento con datos de entrada o salida sobre el que trabajar, es un algoritmo totalmente autónomo.

Este algoritmo funciona a partir del tradicional prueba y error, de esta manera obtiene experiencia acerca de estados, acciones y recompensas mientras al mismo tiempo se evalúa de forma concurrente para determinar cuándo obtiene recompensas por realizar la acción que da el máximo beneficio.

Un ejemplo de un algoritmo basado en este tipo de aprendizaje puede ser su uso en el reconocimiento facial o para hacer diagnósticos médicos [14, 16].

3.3 Técnicas para obtener modelos

Una vez conocidos los tipos de algoritmos, estos a su vez se pueden clasificar según la técnica que se utilice para obtener el modelo. En el caso del aprendizaje supervisado hay técnicas como la regresión o clasificación, mientras que por ejemplo el modelo más usado en aprendizaje no supervisado son los basados en la agrupación.

Algunos de los que van a ser analizados más a fondo para conseguir establecer un modelo que ayude a realizar el mantenimiento predictivo son la regresión tanto lineal, polinómica como logística, los árboles de decisión o clasificación y el agrupamiento mediante multiclasificación y redes neuronales. También son de especial interés las SVM.

Aunque estos son varios ejemplos de técnicas que se utilizan para obtener modelos, los más usados en la actualidad para el análisis de frecuencias son los árboles de decisión, el análisis discriminante, Naïve Bayes, SVM o K-neighbors más cercanos.

Con el fin de ser más precisos para calcular hipotéticamente que algoritmos pueden ser mejores para obtener los resultados óptimos, se procede a explicar a continuación alguno de los algoritmos previamente mencionados [11, 17, 18].

3.3.1 Regresión

Esta técnica englobada dentro del aprendizaje supervisado se puede presentar de tres formas distintas, dos métodos para predecir valores continuos con distinto grado y uno para predecir probabilidades de resultados categóricos:

Regresión lineal

Es la técnica más sencilla para predecir el valor de variables en el tiempo. En este estudio más adelante se trabajará con frecuencias con lo cual, aunque no sea de las técnicas más influyentes en análisis de frecuencias, es interesante investigar sobre ellas.

Esta “simple” técnica estadística que pronostica un posible valor conociendo su entrada con un valor específico. Para realizar esta predicción, se utiliza el método de los mínimos cuadrados, que aproxima una recta hacia los puntos que estaban anteriormente recogidos, entrenando de esta manera el modelo.

Una vez realizado esto y obtenido el modelo, se pueden pronosticar valores de salida dependiendo del punto de entrada que se evalúe. Este algoritmo está directamente relacionado con el objetivo de este trabajo, ya que es muy útil para comparar valores que pueden surgir en un motor eléctrico, como por ejemplo predecir la velocidad de giro de los rodamientos a partir de distintos valores de potencia. De una forma muy sencilla, se puede crear una tabla de valores que calcule esto y sirva para realizar un mantenimiento predictivo de este campo.

En los algoritmos de regresión muchas veces ocurre el problema de sobreajuste comentado previamente, que se soluciona usando Regularización, término sobre el cual se ahondará más adelante.

Regresión polinómica

El objetivo de esta técnica es igual que el de la anterior, sin embargo, la mejora sustancialmente ya que el grado de las hipótesis que se generan ya no es lineal, sino que es siempre mayor, proporcionando de esta manera mejores resultados.

Para verlo más claro, en la Ilustración 1 se observa una comparación del uso de ambas regresiones entrenadas con el mismo conjunto de datos, donde se analizan el desgaste en milímetros de un rodamiento en un motor eléctrico según los días consecutivos de uso. Los datos del conjunto de entrenamiento son los presentados en la Tabla 1.

días usado consecutivamente	desgaste (mm)
0	6
1	9,7
2	10,1
3	14
4	15
5	17
6	16,5
7	15

Tabla 1: Desgaste de los rodamientos

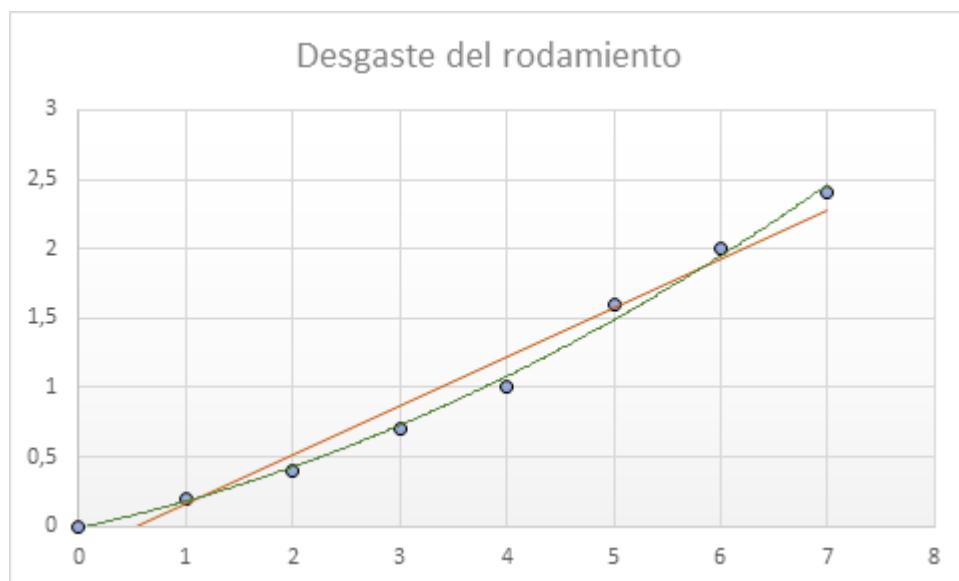


Ilustración 1: regresión lineal vs polinómica

Se puede apreciar como la regresión polinómica (línea verde) se ajusta mucho más a los datos dados que la lineal, pintada de color naranja. En este ejemplo, se está utilizando una regresión polinómica de grado 2, pero si este grado aumentara, cada vez se adaptaría más a los datos, obteniendo de esta manera cada vez resultados más fiables ya que el error se reduciría entre la aproximación de la hipótesis y los resultados reales. Sin embargo, al aumentar este grado también puede ocurrir un caso de sobreajuste tal y como se comentaba previamente.

Regresión logística

En el último capítulo de las regresiones se encuentra la logística, en la cual, a diferencia de las anteriores, sus salidas solo pueden tomar valores concretos. Por este motivo este algoritmo de clasificación es muy usado en el ámbito sanitario, ya que es capaz de predecir enfermedades concretas que puede padecer un paciente.

Con lo cual lo que indica esta herramienta es la probabilidad de pertenecer a cualquiera de las clases de clasificación que se obtengan. En este caso, la función hipótesis se sitúa en el intervalo [0-1], donde si es 0 es que no hay probabilidad de pertenecer a esa clase y 1 es el 100% de las probabilidades de pertenecer a una clase.

Utilizando la función sigmoidea que describe la evolución temporal de un proceso y el modelo de regresión lineal previamente explicado, esta función en la regresión logística es crucial para transformar la salida del modelo en probabilidades y así realizar la clasificación en problemas de predicción categórica.

Con lo cual, se pueden obtener predicciones categóricas de mantenimiento sobre la vida útil de un rodamiento en un motor en un periodo de tiempo concreto, obteniendo una probabilidad que indica el grado de éxito del mantenimiento del rodamiento en ese tiempo [13, 17, 18].

3.3.2 K-nearest Neighbors (KNN)

Se trata de uno de los algoritmos más simples y eficientes que está directamente relacionado con la regresión y clasificación de datos. En muchas ocasiones, al trabajar con sensores puede ocurrir que el conjunto de datos recibidos no sea completo, le falten datos intercalados o información importante. Este algoritmo puede tratar con esto clasificando los datos en función de la clase a la que pertenezcan otros que son similares, es decir, a sus vecinos.

Este algoritmo es muy utilizado en el reconocimiento de patrones o también para reconocer datos o conjuntos de datos extraños o intrusos, más conocido como *outlier*, pero sobre todo se usa para predecir en detección de fallos, que es lo que interesa realmente en este proyecto.

En definitiva, además de poder clasificar los datos de una manera ordenada, la potencia de este algoritmo radica en poder calcular un valor puntual basándose en valores próximos al mismo, que a su vez son basados en otras variables respectivamente, pudiendo crear así una sucesión de valores calculados de manera predictiva relacionados entre ellos [11, 17].

3.3.3 Máquina de vector soporte

Esta técnica de clasificación, más conocida como SVM, realiza una ordenación sobre vectores, buscando la “frontera” que mejor separa las clases que se estén clasificando.

A estas separaciones se les llama hiperplanos, siendo el objetivo conseguir que este “plano” separe los datos lo mejor posible, buscando diferenciar claramente las clases.

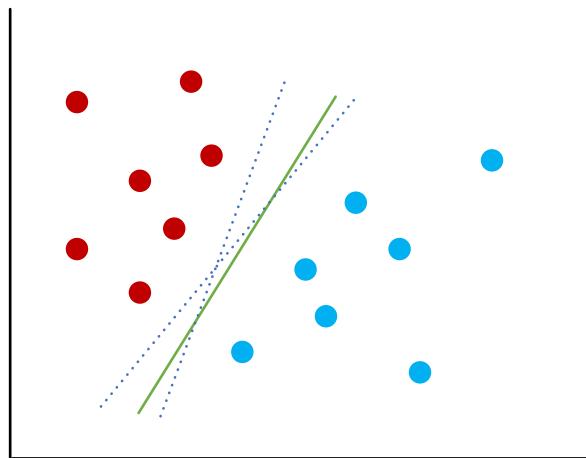


Ilustración 2: Hiperplanos SVM

Como se puede observar en la ilustración 2, la frontera o hiperplano es la línea verde y la que aparece dibujada de manera continua es la que separa ambas clases de los conjuntos de datos de entrada en el punto de máximo margen entre las dos.

De esta manera, utilizando este algoritmo se reduce bastante el tiempo de análisis, ya que cada vez que entre un conjunto de datos se aplicara a las muestras esta división. Esto reduce el costo computacional en gran medida, consiguiendo reducir el tiempo de entrenamiento de regresión y como se explicará más adelante, en las redes neuronales [13, 17].

3.3.4 Árboles de decisión

Un tipo de técnica que permite hacer tareas tanto de regresión como de clasificación, capaz de emitir varias salidas simultáneamente. Esta técnica es mejor que otras de clasificación, ya que visualmente el modelo resultante es mucho más intuitivo que otros creados por otros algoritmos de clasificación.

Su funcionamiento es de la siguiente manera: a partir del conjunto de datos de entrada, prepara una salida (o multi salida) siguiendo unas condiciones y tomando decisiones desde el nodo raíz o principal hasta el nodo o nodos terminales (nodos hoja), tal y como se puede ver en la ilustración 3.

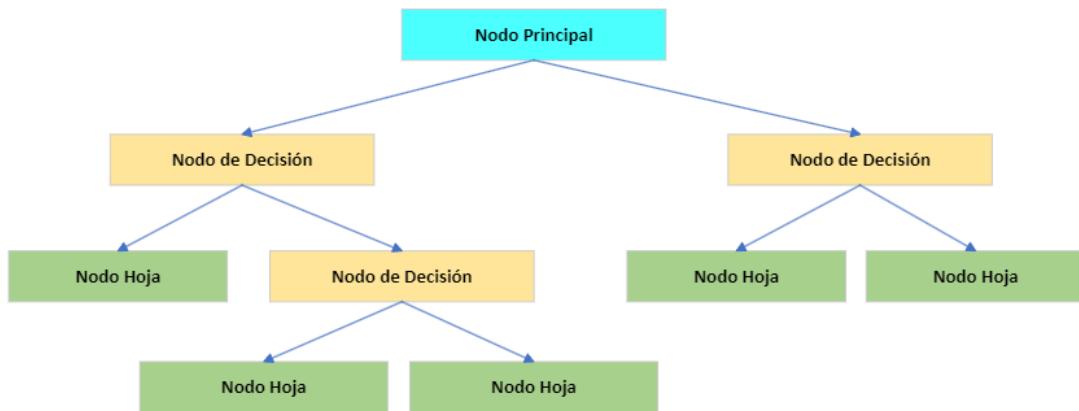


Ilustración 3: Árbol de decisión

Esto permite que la decisión y condiciones puedan ir cambiando en cada nodo o dependiendo del camino que se tome, dependiendo del entrenamiento del algoritmo. Con lo cual, se tiene un algoritmo muy versátil, que además presenta más puntos fuertes como que su tasa de éxito no depende del tamaño de datos, ya que cada proceso se va realizando por los diferentes caminos o ramas por separado. De esta manera, no se usa mucho espacio en memoria durante su ejecución.

En cuanto a los inconvenientes de este, como muchos algoritmos de aprendizaje supervisado puede presentar sobreajuste, que puede solucionarse regularizando, aunque en este caso tiene soluciones particulares. Cuando un árbol presenta demasiadas “ramas” y se

hace muy difícil su comprensión, se tienen que podar las ramas que nos impiden ver con claridad el modelo que se está generando. Esto se puede controlar de manera previa, con la preposta, evitando crear más ramas cuando se llega a cierta condición. A posteriori, postpoda, se pueden “cortar” las ramas que, tras previo análisis, se vea que mejoran el resultado de clasificación reduciendo el error.

Como último detalle en relación con algunos de los algoritmos similares, esta técnica destaca positivamente ante las maquinas vectoriales de soporte o a las redes neuronales siendo más fáciles de escalar ante conjuntos de entrenamiento grandes o manejar valores extraños o inconexos de variables [11, 17].

3.3.5 Redes neuronales

Una de las herramientas más usadas hoy en día son las redes neuronales. Aunque se pueden considerar dentro del Deep Learning, pueden funcionar como una herramienta de clasificación dentro del Machine Learning y sus extensas aplicaciones hacen que sean una de las herramientas más usadas en la actualidad.

Esta técnica simplemente intenta reproducir lo que ocurre en un cerebro humano a la hora de aprender. Obviamente con bastantes diferencias a la de un cerebro humano, una red neuronal funciona comenzando por una capa de entrada donde se introduce el conjunto de datos que trabajará.

Tal y como se muestra en la ilustración 5, desde la capa de entrada se parte de distintos puntos, ya que cada uno tiene sus características particulares. La primera fila (el primer círculo) de cada capa es la llamada “unidad de oscilación”, que es una neurona que siempre devuelve 1, fijando un punto de partida de cada capa para tener de referencia si hay algún error durante el proceso.

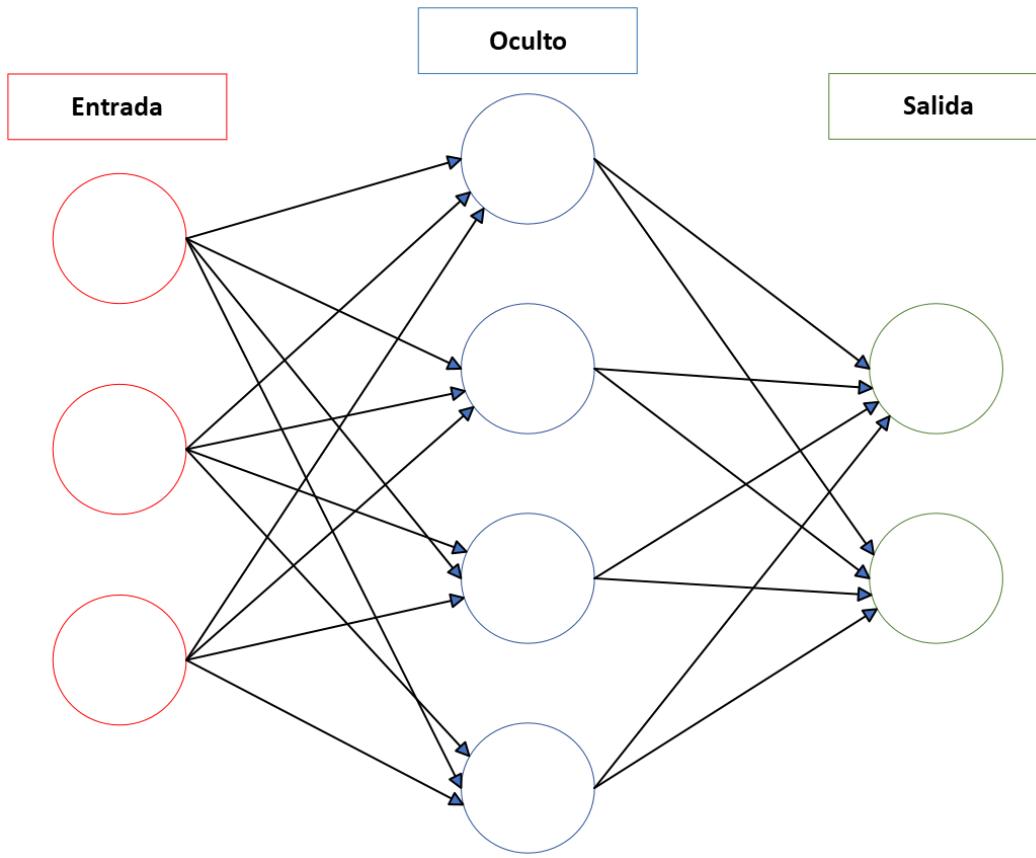


Ilustración 4: Red neuronal

Inmediatamente después se encuentran las “capas ocultas”, que son donde se procesa la información y se genera el modelo de clasificación. Finalmente, en la capa de salida se representan estos niveles de clasificación, que puede ser multiclase o binaria dependiendo de si se presentan varios o sólo dos niveles respectivamente.

La relación entre las neuronas de distintas capas es que cada neurona transmite información a todas las neuronas de su capa posterior. Este método es muy abstracto y modelable, pero su estructura siempre presenta el estilo explicado previamente, siendo esto uno de los puntos más fuertes de esta técnica [13, 19].

3.3.6 Métodos de regularización

Tras ver las técnicas o algoritmos más usados, se han presentado distintos problemas que surgen de manera muy común al utilizar todas estas técnicas. Sobreajuste o correlación son algunos de los más importantes, y aunque como se pudo ver ciertas técnicas tienen

métodos particulares para solucionarlos, existen ciertos métodos comunes de regularización que tratan de evitar estos fallos.

En los métodos de aprendizaje supervisados vistos es muy típico que aparezca el sobreajuste, del cual se habla ligeramente en la ilustración 2, donde se presentan dos ajustes, lineal y de grado 2. Como se comenta, si se aumentara más el grado el resultado sería mejor, pero, podría terminar cayéndose en un sobreajuste.

Con el fin de verlo visualmente mejor, en la ilustración 6 se presenta un modelo de regresión de grado 6 (línea verde), que como se ve, se adapta bien a los datos de entrenamiento, sin embargo, esto presenta un problema: al adaptarse tan bien a estos datos, este modelo no se adaptara nada bien a los datos nuevos, ya que está demasiado ajustado a los que ya se tienen. Es por esto por lo que se debe regularizar para que el modelo sea más versátil.

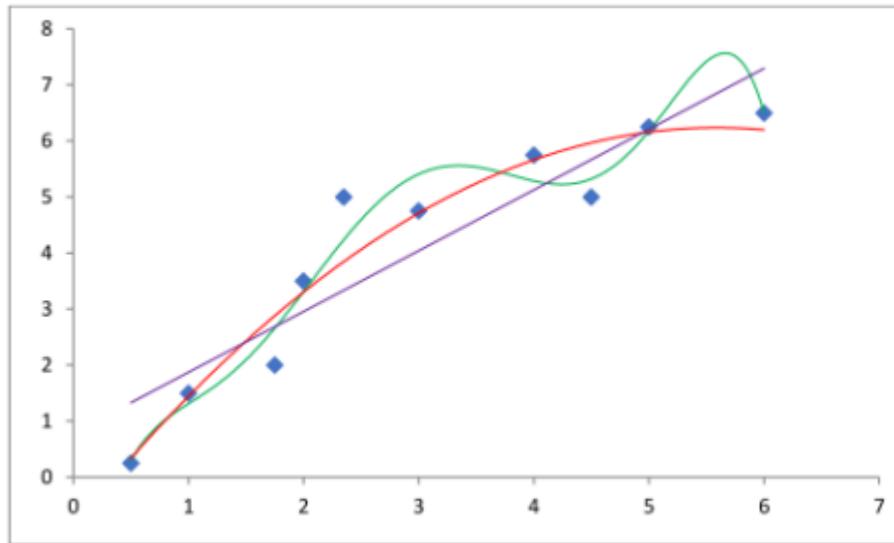


Ilustración 5: Ajuste lineal, bajo ajuste y sobreajuste [9]

Para ello, existen distintos métodos que son los siguientes y están relacionados entre ellos: Regularización Ridge, Lasso y Net [13, 17].

Regularización Ridge: este tipo de regularización es el original en el cual se basan el resto, fue originalmente creado por Hoerl y Kennard, que buscaban evitar el problema de

colinealidad que surge al usar mínimos cuadrados en un modelo lineal. Este método es muy parecido al de mínimos cuadrados, con la diferencia de que se utiliza una cantidad distinta a la hora de estimar coeficientes. A través de una serie de complejas ecuaciones se trata de minimizar el error de predicción esperado. Sin embargo, este método tiene un problema, no consigue seleccionar ciertas variables, si no que tras su aplicación todas las variables siguen estando en el modelo.

Esto causa que si en un estudio como el de un motor eléctrico, en el que se pueden encontrar muchas variables, sea un problema ya que no hace una selección de las más relevantes si no que las mantiene todas [20].

Regularización Lasso: como medida para evitar este problema, se creó esta nueva regularización. Con el fin de estabilizar predicciones y mediciones, seleccionando variables en una regresión lineal, se propuso esta técnica, que se diferencia de la anterior en que a partir de cierto punto se producen estimaciones nulas para algunos coeficientes y no nulas para otros, seleccionando de esta forma variables.

De esta manera, además de reducir las variaciones de la estimación/es, puede crear modelos gracias a la reducción de los coeficientes a cero.

En definitiva, Lasso produce modelos más sencillos y fáciles de interpretar que Ridge, aunque este método primario es mejor cuando existen muchos factores predictivos, con coeficientes del mismo tamaño [19].

Elastic Net: “red elástica”, por último y más reciente, surge este método de regularización, el cual utilizando las ventajas que ya existían en Lasso, mejora otros parámetros que tenía como puntos débiles la técnica anterior, como la poca estabilidad. El funcionamiento práctico no es más que la conjunción de las dos técnicas anteriores de forma combinada. Este método tiene su fortaleza en situaciones en las cuales se tienen más parámetros de predicción que datos de entrenamiento u observación. Sigue utilizando un método de métodos cuadrados mejorado, al estilo de las dos primeras regularizaciones [17, 20].

3.4 Análisis de fallos en motores eléctricos

En este trabajo se utilizan las vibraciones para analizar los fallos en un motor eléctrico, más concretamente analizando el dominio de la frecuencia, y de esta manera obtener los datos para poder realizar un mantenimiento del motor. Sabiendo esto, se podrán buscar los errores analizando la vibración que ocurra en el mismo, ya que estos fallos se muestran en vibraciones que usando la transformada rápida de Fourier (FFT) podrán ser analizadas.

3.4.1 Fallos en rodamientos

Todas las maquinas que necesitan movilidad disponen de estas piezas para trabajar con las cargas que generan. Utilizando bolas o rodillos, encasillados en anillos que permiten su giro, este elemento es usado generalmente en cualquier componente mecánico del campo de automoción, industria o navegación.

Un rodamiento es un tipo de cojinete que se encuentra en una máquina entre las piezas y el eje que está conectado a ellas. Su función principal es la de minimizar la fricción entre ellas. El rodamiento está formado por dos cilindros concéntricos, separados por una corona de rodillos o bolas que giran libremente [21]. Los rodamientos se utilizan para facilitar el movimiento de las piezas que giran sobre un eje, como las ruedas, los engranajes o los ventiladores. Los rodamientos también permiten soportar cargas radiales y axiales, es decir, las que actúan perpendicular y paralelamente al eje [21, 22].

En los motores eléctricos con los que se trabaja en este documento se encuentran dos rodamientos instalados, uno en la parte delantera y otro en la trasera de este, con el fin de lograr los siguientes objetivos: apoyar y colocar el rotor (la parte giratoria del motor), transferir las cargas desde el eje al bastidor del motor, minimizar la fricción entre eje y piezas que están conectadas a él permitiendo así operaciones en distintas velocidades según se necesite. En definitiva, el objetivo de los rodamientos es permitir un giro lo más suave y estable posible del eje del motor. En la ilustración 22 se puede observar la distribución de estos elementos en un motor eléctrico [23, 24].

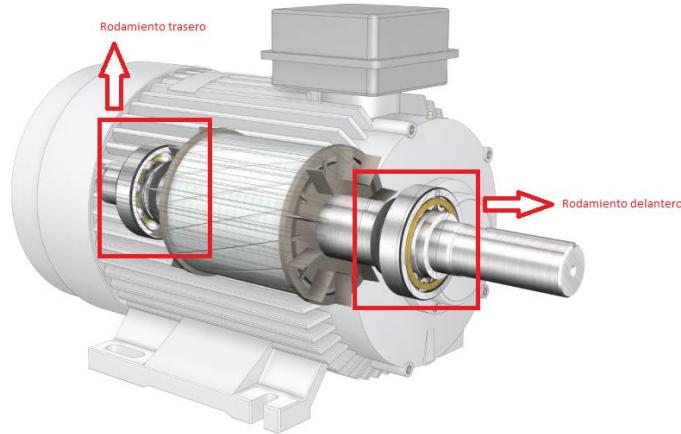


Ilustración 6: Rodamientos en motor eléctrico [38]

Los rodamientos de estos motores son rodamientos de bolas, que consisten en un componente mecánico utilizado para reducir la fricción y permitir un movimiento suave entre dos partes que se desplazan una sobre la otra. El rodamiento es una estructura de anillos concéntricos con una serie de bolas en su interior, que actúan como elementos rodantes entre los anillos interior y exterior.

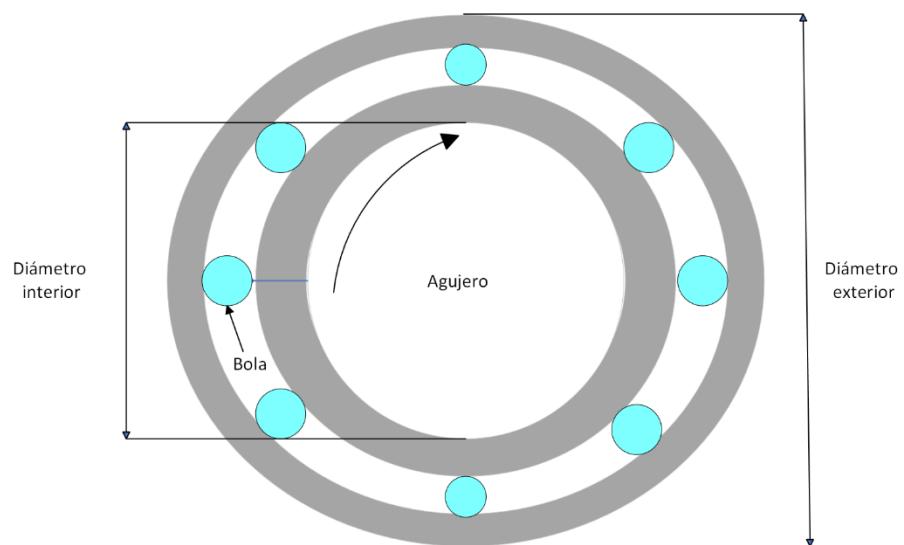


Ilustración 7: Rodamiento de bolas

Como se puede ver en la ilustración 7, los elementos más importantes de este tipo de rodamientos son el número de bolas que tiene, el tamaño de estas y el diámetro de tanto la pista exterior como la interior. Con estos datos es con los que se realizan los cálculos para determinar los tipos de fallos que pueden presentar estos elementos del motor, siendo esenciales para el análisis de estos.

En un elemento tan complejo como este, hay muchos tipos distintos de problemas que pueden ocurrir, que se manifiestan de distintas formas y en distintos lugares del rodamiento o rodaje, cada uno con un valor de componente frecuencial distinto.

Estos problemas y fallos pueden ser causados por una combinación de factores, como un mantenimiento inadecuado, condiciones de trabajo adversas, selección incorrecta de rodamientos o falta de lubricación adecuada.

Los rodamientos poseen varios componentes diferenciados entre sí, los cuales producen una frecuencia característica en el espectro obtenido, ayudando a llevar a cabo una detección intuitiva de un deterioro [25]. Estas frecuencias son las siguientes:

- **Ball Pass Frequency of the Outer race (BPFO):** será la frecuencia base a analizar que representa un defecto en la pista exterior, siendo de forma física la frecuencia por la que pasan los elementos rodantes (bolas o rodillos) por la pista exterior del rodaje.

Teóricamente es calculada de la siguiente manera:

$$BPFO = rpm * \frac{Nb}{2} * \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cos \beta \right)$$

Donde N_b es el número de bolas del rodamiento, P_d es la suma del diámetro exterior y el interior del rodamiento dividido entre 2 y B_d es el diámetro de las bolas.

Una vez conocida esta frecuencia fundamental correspondiente a los defectos en la pista exterior, tal y como se ve en la ilustración 7, esto se ve representado en los armónicos múltiples de esta frecuencia, disminuyendo en amplitud progresivamente hasta generalmente 8 o 10 armónicos representados.

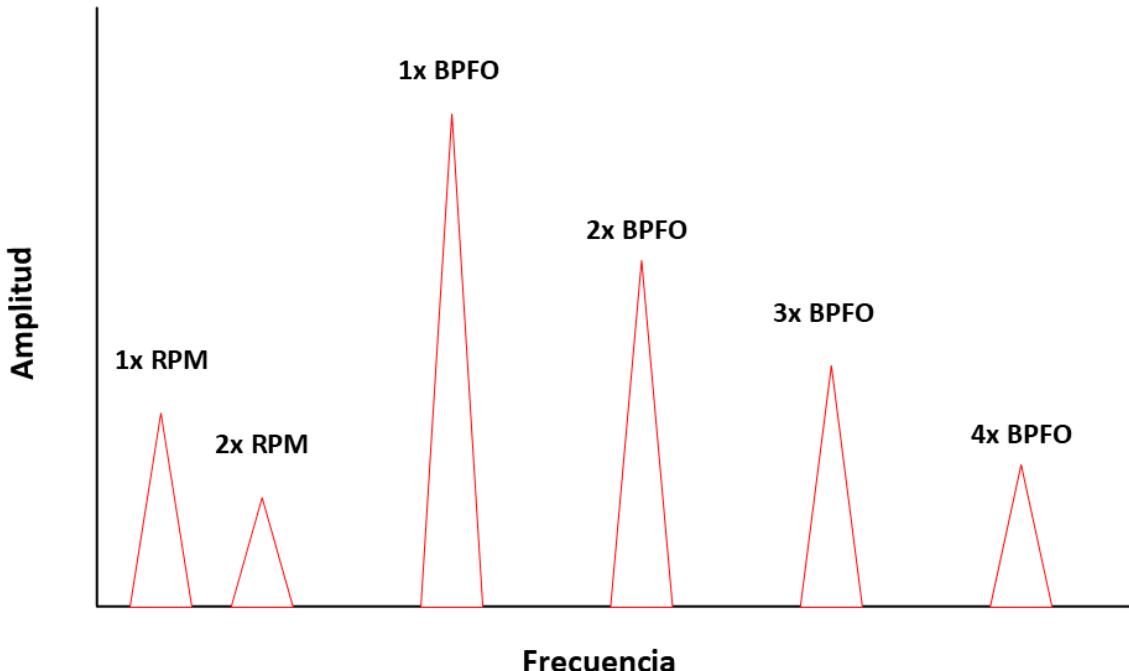


Ilustración 8: espectro BPFO

Por otro lado, como también se puede ver en la ilustración 8, la diferencia de amplitud con los armónicos que son múltiplos de la frecuencia de giro (RPM) es más que reseñable.

- **Ball Pass Frequency of the Inner race (BPFI):** será la frecuencia que representa un defecto en la pista interior, siendo de forma física la frecuencia por la que pasan los elementos rodantes (bolas o rodillos) por la pista interior del rodaje.

En este caso, la representación teórica de esta frecuencia se calcula de la siguiente manera:

$$BPFI = rpm * \frac{Nb}{2} * \left(1 + \frac{B_d}{P_d} \cos \beta \right)$$

En este caso también obtendremos entre 8 y 10 picos de armónicos de esta frecuencia de deterioro, pero en este caso vendrán acompañados por bandas laterales múltiplos de la frecuencia de giro, a 1x RPM.

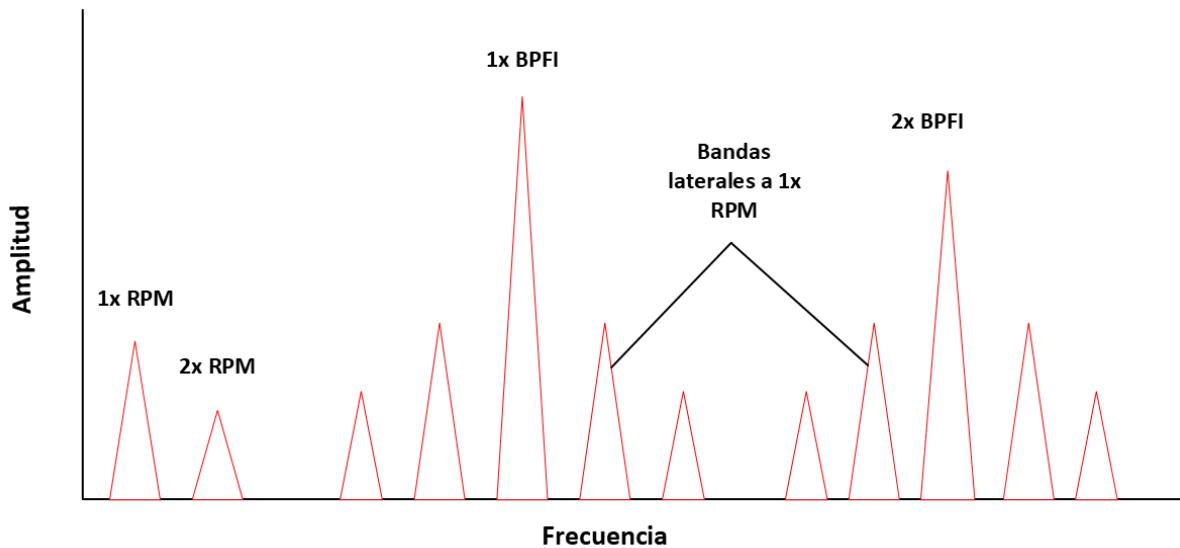


Ilustración 9: espectro BPFI

- **Ball Spin Frequency (BSF):** estos elementos rodantes pueden tener defectos en sí mismos, con lo cual esta será su frecuencia de deterioro, siendo el número de giros que realiza un elemento rodante sobre si misma cada vez que el eje realiza uno completo.

Teóricamente, la representación frecuencial de este tipo de deterioros vendrá calculada de la siguiente manera:

$$BSF = rpm * \frac{P_d}{B_d} * \left(1 - \left(\frac{B_d}{P_d} \cos(\beta) \right)^2 \right)$$

En el caso de defectos en los elementos rodantes, generalmente el primer armónico de esta frecuencia indica cuantas bolas tienen un defecto, y aparecen también acompañados de bandas laterales (ilustración 10), ya que este tipo de defectos suele ir acompañado siempre de defectos de pista, como en la ilustración 9.

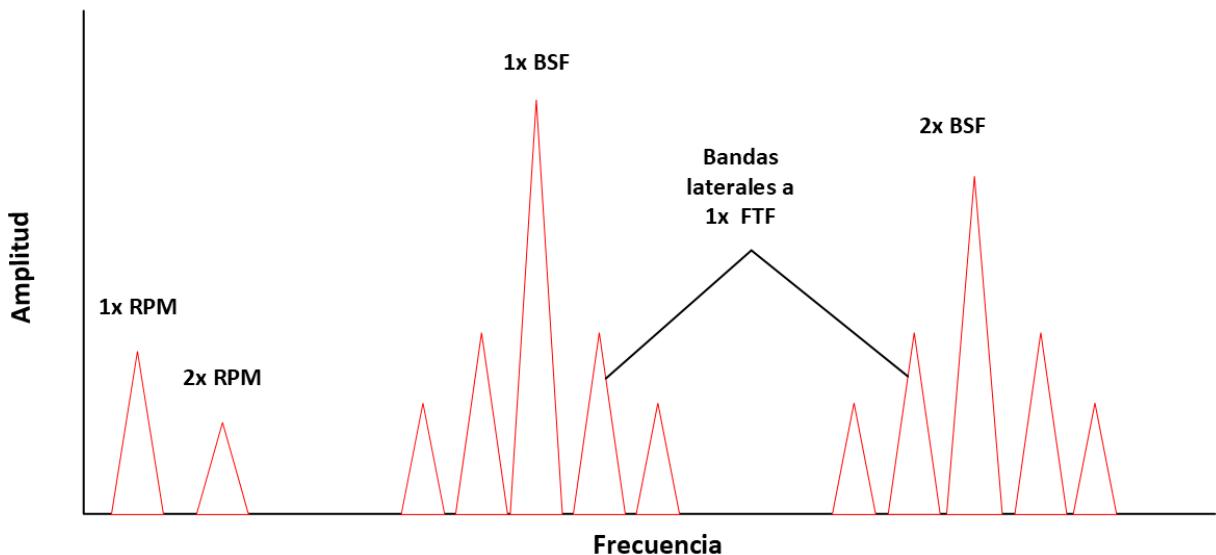


Ilustración 10: espectro BSF

- **Fundamental Train Frequency (FTF):** será la frecuencia con la cual rota la jaula que contiene los rodillos o bolas, siendo de forma física las veces que esto ocurre mientras el eje del rodamiento realiza un giro completo. Esta representa un daño en este elemento que contiene los elementos rodantes.

Para calcular teóricamente esta frecuencia se utiliza la siguiente formula:

$$FTF = rpm * \frac{1}{2} * \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cos \beta \right)$$

Normalmente los defectos en la jaula también van asociados a los defectos en las pistas interiores o exteriores, esta frecuencia modula a estas frecuencias (BTFO, BTFS) generando sumas o diferencias de frecuencias, como se puede ver en la ilustración 11.

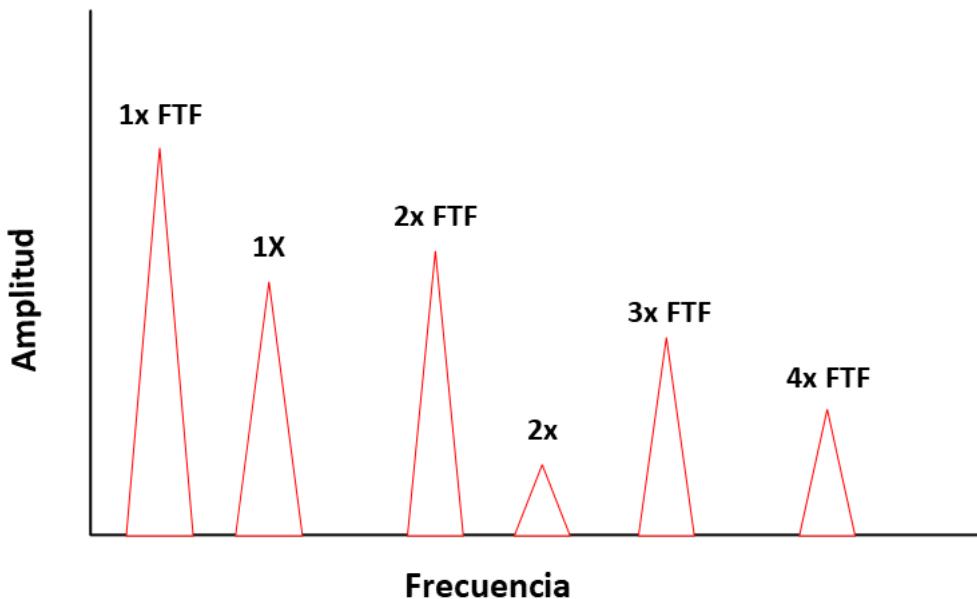


Ilustración 11: espectro FTF

Cabe resaltar que desde la ilustración 8 a la 11 lo que se representa es el deterioro de un rodamiento en lo que sería la fase en la cual aparecen estas frecuencias características de los fallos y sus armónicos. Es decir, en un estado de deterioro avanzado, pero sin llegar a tener una rotura total, en la cual el ruido provocaría un espectro en el que desaparecen estos indicadores [25, 26].

Los rodamientos se colocan siempre entre dos piezas con el fin de disminuir en la medida de lo posible la fricción entre ellas utilizando estos elementos rodantes, teniendo como objetivo funcionar como eje de rotación para que ambas piezas puedan moverse coordinadamente.

Su localización y el trabajo que realizan, hacen que sea una de las piezas la que sufra más deterioros y fallos debido a las fuerzas y cargas que se aplican sobre ella, debido a que absorben gran cantidad de vibraciones que se producen en la maquina con el fin de que no afecten a las partes fijas del motor. Es por esto por lo que se convierte en una pieza de análisis prioritario, siendo fundamental monitorizar la fatiga del material, ya que es el componente más previsible de fallo en el motor.

Una de las causas más típicas de fallos es la lubricación escasa o al revés, excesiva. La lubricación en estas piezas que se encuentran en constante movimiento es uno de los puntos

claves de la vida útil de las mismas, ya que una mala gestión de esta provoca fallos desde marcas o araños en las pistas internas y externas del rodamiento hasta provocar una rotura parcial o total de la pieza si este desgaste es continuo. Una buena medida de prevención ante estos casos es observar y comparar la vida útil de la pieza respecto al del lubricante, con el fin de controlar y evitar estos fallos.

Otros tipos de fallos que se pueden encontrar son los relacionados con el diseño de este. Cuando esto es así se pueden producir holguras imprevistas las cuales generaran más vibraciones de las previstas generando así fallo en el material, desde pequeñas marcas o fisuras hasta posible rotura de los discos. Por último, una carga excesiva en los rodamientos puede provocar también que aparezcan grietas debido al aumento inesperado de vibraciones y terminar con una rotura del rodamiento.

3.4.2 Fallos de balanceo

El desbalanceo en un rotor se produce cuando la masa de este está distribuida de forma asimétrica respecto al eje de rotación. Los fallos de este tipo son muy comunes y repetitivos en este tipo de motores. Estos desbalances se pueden presentar como en rodamientos, por un diseño impreciso en puntos clave como el eje de rotación, por tolerancias en la fabricación que ocasionen una pérdida de simetría o concentricidad, o por el uso de materiales que no son homogéneos, los cuales su densidad no es uniforme en su volumen.

De igual forma la corrosión y desgaste de vida útil es también un motivo de desbalanceo, la aglomeración de polvo en las ventilaciones, erosión o corrosión de estos, peso no distribuido de forma balanceada o deformaciones en el eje o rotor son casos típicos. Según la norma ISO 1940/1 y 1940/2 [9], que establece el desbalance permisible en estos rotores rígidos dependiendo de la relación entre el eje principal de movimiento y el de rotación, se puede clasificar hasta cuatro tipos de desbalanceo:

- **Desbalanceo estático:** cuando existe una desviación del centro de masa desde el eje de rotación, pero el eje de inercia y el de rotación siguen alineados [27].

- **Desbalanceo del par de fuerzas:** cuando el eje principal de inercia está desviado respecto al eje de rotación, pero el centro de masa no se desvía del de rotación. Por

par de fuerzas se entiende dos fuerzas iguales que se sitúan en los extremos del rotor y que están desfasadas. Así, este rotor está balanceado estáticamente pero no dinámicamente, ya que al girar el par de fuerzas desbalanceará el mismo [27].

- **Desbalanceo cuasi-estático:** se produce cuando el eje principal de inercia intercepta al de rotación en un punto distinto al centro de masas. En este caso el eje principal de movimiento y el de rotación coinciden en el mismo plano, pero existe desviación entre el centro de masas y el eje principal de inercia [27].
- **Desbalanceo dinámico:** es el más generalizado en motores como el que se utiliza, que se presenta cuando el eje principal de inercia no intercepta con el eje de rotación. Aparecen dos desviaciones entre centro de masas y eje principal, sin coincidir esta vez en un mismo plano axial [27].

Todos estos fallos pueden ser analizados con el estudio de las vibraciones, transformándolas previamente usando FFT para analizar las frecuencias características que nos denotan los fallos que pueden estar ocurriendo. Estas frecuencias características y lo que explican se detallan a continuación:

Generalmente en un desbalanceo estático o en un plano como el comentado previamente, el espectro presentará una amplitud fuera de lo normal en el pico de primer orden, pero sin incidencia en el resto de los picos. Un motor que se presente desbalanceado estáticamente será el que en el pico de primer orden aumente con la velocidad del eje de rotación, presentando una vibración dominante con una frecuencia igual a 1x RPM del rotor [27].

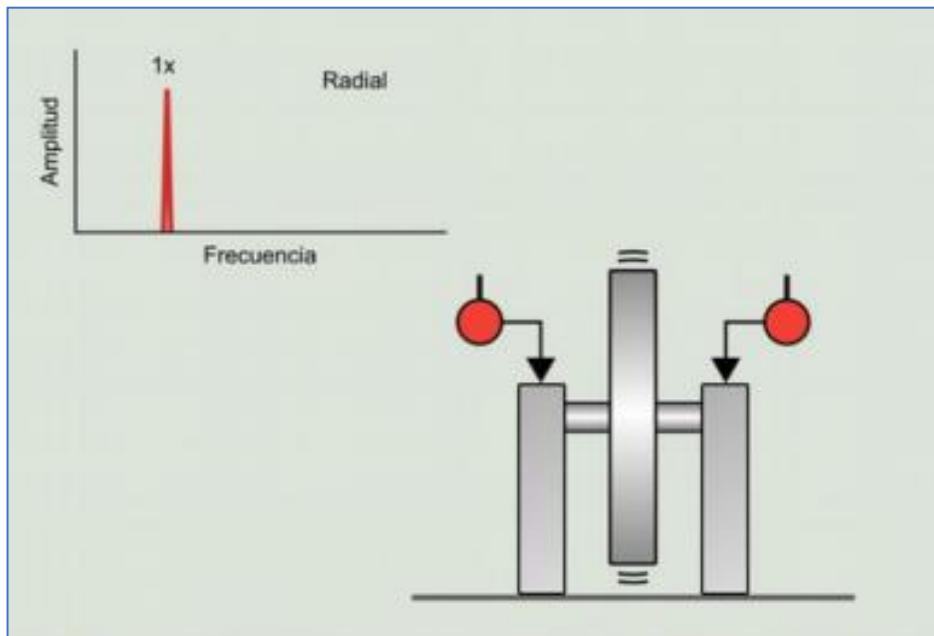


Ilustración 12: Desbalanceo estático [19]

Siguiendo la norma ISO 1940/1 [28] que se explica en la tabla 2, representando, para una relación de balanceo dada, los motores, piezas u otros elementos que deben cumplir esta relación según la norma ISO que así lo determina con esta tabla.

Se observa que para las piezas más pequeñas el grado de balanceo es acorde a esto, mientras que para los rotores o grandes motores se permite mayor desplazamiento. De esta manera se puede determinar cuál es el grado de calidad de balanceo permisible para controlar este tipo de fallos.

Para hacer esta clasificación se considera la severidad del balanceo (relación de balanceo) como la velocidad de vibración, expresada en milímetros por segundo (mm/s), que se calcula como la multiplicación del desplazamiento (mm) por la frecuencia (Hz). Según este valor, se le asocia un grado de calidad correspondiente tal y como se puede apreciar en la tabla [27].

Grado de calidad en el balanceo según el rotor o motor rígido		
Grado de calidad	Relación de balanceo (mm/s)	Tipos de rotores
G 0.4	0.4	Husillos, discos u otros elementos rectificadores de posición. Giroscopios.
G 1.0	1	Armaduras eléctricas. Grabadoras y fonógrafos
G 2.5	2.5	Turbinas. Rotores en general. Turbo compresores. Bombas de turbina.
G 6.3	6.3	Piezas o maquinas de plantas de procesos. Piezas relacionadas con aviación. Impulsores de bombas. Piezas y máquinas en general.
G 16	16	Ejes de transmisión. Partes de maquinaria agrícola y de trituración. Componentes individuales de motores de gasolina o diésel.
G 40	40	Ruedas de coche, llantas, ejes de transmisión. Cigüeñales de motores grandes como automóviles o locomotoras.

Tabla 2: Grado de balanceo según ISO

En cuanto al desbalanceo entre dos planos explicado previamente, su análisis frecuencial es el mismo, presentando un pico de primer orden, con un espectro como el de la ilustración 12. Si se produce un desbalance estático y uno del par de fuerzas ocurre el llamado desbalance dinámico, que en este caso a partir de la norma ISO 1940/2 se puede observar el balanceo correcto del motor [28].

3.4.3 Fallos de alineamiento

Los fallos de alineamiento junto a los desbalances son defectos muy usuales en los rotores del tipo que se analizará y ambos presentan características muy similares en el espectro de frecuencia de vibración. Es importante diferenciarlos ya que si el problema es de desbalanceo y lo que se corrige es el alineamiento del motor la mejora es despreciable.

Este tipo de defectos aparecen cuando el eje principal del rotor eléctrico no está alineado con el de la máquina acoplada, tal y como se puede observar en la ilustración 13. De igual manera a nivel de piezas del motor, pueden ocurrir desalineaciones entre rodamientos y otras piezas del sistema.

Esta desalineación, que puede ser vertical u horizontal, también denominada paralela o angular respectivamente (ilustración 14 y 15) provoca entre otros, que ocurran fallos entre rodamientos y otros acoplamientos, se rompan los ejes, el consumo de energía se vea muy incrementado o se produzcan fugas de aceite o lubricantes [29].

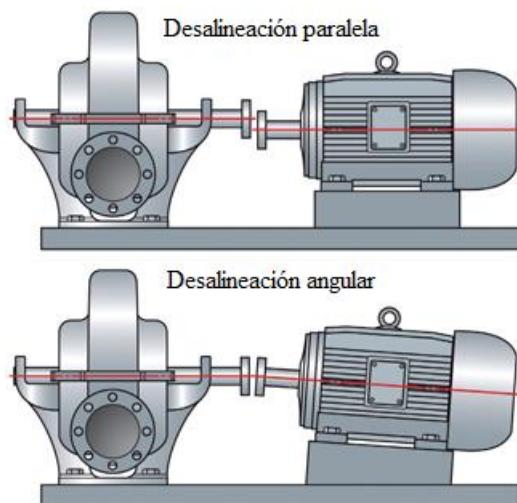


Ilustración 13: Fallo alineamiento [14]

Pasando al análisis espectral de frecuencia, en este caso se puede apreciar el fallo resaltado en el segundo armónico, el cual aparece siendo superior al primero (1X). Sin embargo, tal y como se explicaba previamente, este defecto también puede aparecer resaltado en el primer armónico, por eso en este caso es conveniente ser más precisos en el análisis para evitar confusiones entre defectos en desbalanceo o desalineamiento, ya que el espectro que presentan en muchos casos tiene características muy similares.

Analizando pues en más detalle, en la desalineación paralela o vertical, el segundo armónico será predominante sobre 1X, tal y como se puede ver en la ilustración 14, pero su altura respecto al primero depende del acoplamiento que se use. En el caso de que el daño sea más grave, aparecerán picos en armónicos superiores como 4X o 8X. En este caso

interpretando este espectro nos puede conducir a un error, y para no confundir desalineamiento con desbalanceo y por ello se realiza el siguiente análisis de diferenciación.

Viendo la amplitud de $2X$, si es inferior al 30% del pico de primer orden, nos encontraremos con un problema de desbalanceo, mientras que, si no es así, puede ser un caso de desalineamiento, dependiendo de este porcentaje su gravedad (de menor porcentaje a mayor). Es por esto por lo que para diferenciar estos defectos se requiere generalmente de un análisis más exhaustivo.

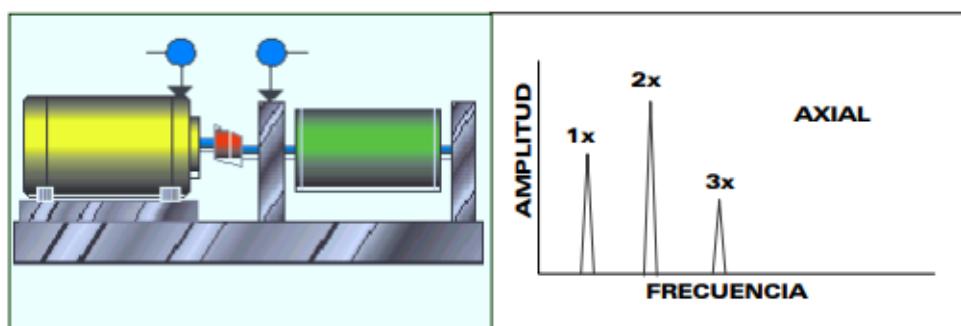


Ilustración 14: Desalineamiento paralelo [30]

Por otro lado, en un problema de alineamiento angular u horizontal, presenta $1X$ y $2X$ siendo las más comunes, aunque también aparece el tercer armónico, como se puede observar en la ilustración 15. Todos estos síntomas presentan problemas en el acople, presentando un espectro realmente parecido al problema anterior.

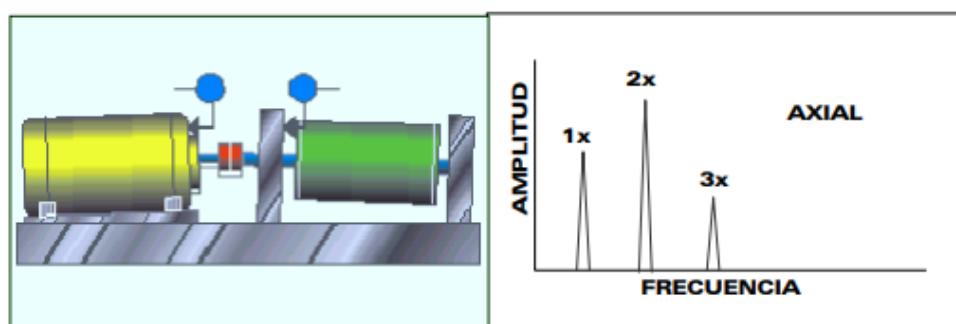


Ilustración 15: Desalineamiento angular [30]

Como se puede observar en las ilustraciones 14 y 15, diferenciar estos problemas de alineación es realmente complicado ya que lo que los hace distintos son los pequeños detalles que se han de estudiar con gran atención [29, 30].

3.5 Transformada rápida de Fourier

Dentro de un motor eléctrico se pueden realizar análisis de este basado en distintas variables que ayudan a encontrar fallos en el motor.

Puesto que el análisis se realizará sobre un espectro de frecuencia que dejen las vibraciones del motor, variables como la velocidad, la aceleración o amplitud de estas vibraciones y sobre todo la frecuencia de estas vibraciones, ya que utilizando la Transformada Rápida de Fourier se estudiara el motor sobre un dominio de esta, serán las variables claves sobre el análisis del motor.

No se pueden descartar tampoco variables como temperatura, ultrasonidos o incluso el uso de lubricante en el motor, ya que la aparición de temperaturas exageradamente altas, lubricante escaso en ciertas piezas como los rodamientos u otros ejemplos, provocarán la aparición de distintos defectos o fallos que se explicarán detalladamente más adelante en el documento.

Según se dictamina en la norma ISO-13373 en su versión de 2002, que habla sobre el monitoreo y condicionamiento en el diagnóstico de máquinas a través de las vibraciones, y que se utilizará en distintas ocasiones (todas las normas ISO relacionadas con esto), se deberán de recopilar en estos motores cada vez que se trabaje con vibraciones, que las condiciones como la velocidad, carga o temperatura deberán de acompañar siempre al análisis de este factor.

La velocidad del eje, carga de la máquina que alimenta el motor y otros parámetros pueden afectar en gran medida, y para poder monitorear las vibraciones es importante conocer estos detalles del motor de forma actualizada, ya que influirán directamente en los distintos escenarios que se plantearán en los análisis.

3.5.1 Vibraciones y la transformada rápida de Fourier

El análisis que se quiere realizar será sobre la amplitud de las frecuencias que se reciben en hertzios. Dependiendo de lo que se esté analizando en un momento preciso, la amplitud se expresará en aceleración (g, mg, m/s², mm/s²) o en velocidad (m/s, mm/s).

Para trabajar con los datos obtenidos por el sensor, es preciso filtrar esta información previamente para poder revisar con el mayor grado de precisión esto. Como se puede ver en la ilustración 20, los sensores que se utilizan captan un espectro de onda, que a lo largo de un tiempo nos da la información sobre la variable que se esté analizando, pero esto tiene un inconveniente. Estos datos generalmente vienen contaminados por el ruido, y como el objetivo no deja de ser realizar un análisis de esto, es preciso utilizar algún instrumento que facilite el estudio de los resultados. Se opta pues a cambiar al dominio de la frecuencia, en el cual se clarifican más las señales recibidas como se puede ver en la ilustración 16 y prepara un espectro del que se pueden concluir resultados de forma más limpia.

Para esta conversión de la señal en el dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, se utilizará como herramienta la Transformada Rápida de Fourier (FFT) gracias a la cual podremos detectar los fallos de manera más sencilla debido a su propiedad de descomposición de las señales de la siguiente manera:

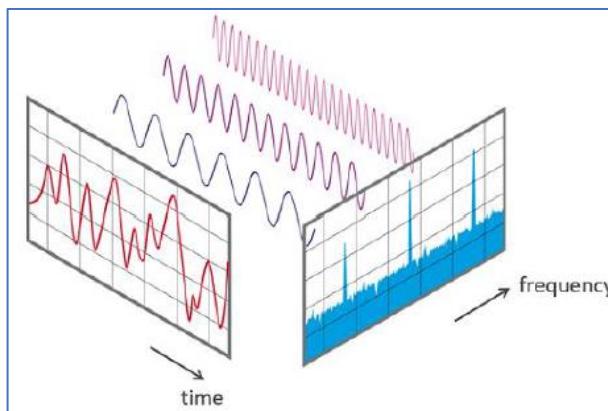


Ilustración 16: Señales con FFT [16]

Como se puede observar en la ilustración 16 tras capturar un conjunto de vibraciones durante un periodo de tiempo, la señal obtenida es compleja de analizar pues contiene múltiples componentes frecuenciales. De cara a facilitar su análisis, se utiliza la FFT, que convierte una señal de vibraciones en el dominio del tiempo en una señal de vibraciones en

el dominio de la frecuencia, es decir, descompone una señal en el dominio del tiempo en sus diferentes componentes frecuenciales. Alguna de las variaciones que puede sufrir una componente frecuencial determinada puede significar un fallo en el funcionamiento del motor.

La FFT parte de la base de la Transformada de Fourier Discreta (DFT) pero con la cualidad de que, utilizando distintas propiedades de este algoritmo original, se eliminan cálculos repetitivos que realiza la DFT, mejorando el rendimiento de este en cuanto al tiempo que tarda en realizar los mismos cálculos (de varios minutos a segundos), reduciendo el orden de la función original de $O(n^2)$ a $O(n \log 2n)$.

Para el caso de un motor eléctrico, el cual presentara muchas señales superpuestas, es de gran ayuda utilizar la versión del algoritmo rápido, ya que reduce el número de operaciones de manera exponencial, tal y como se muestra en la tabla 3, en la que n es el número de operaciones que se quiere realizar.

n	Nº de operaciones con DFT $O(n^2)$	Nº de operaciones con FFT $O(n \log 2n)$	Factor de Mejora
4	8	4	2,0
8	64	12	5,3
16	256	32	8
32	1024	80	12,8
64	4096	192	21,3
128	16384	448	36,6
256	65536	1024	64,0
512	262144	2304	113,8
1024	1048576	5120	204,8
2^{30}	2^{60}	30×2^{30}	35791394,1

Tabla 3: Mejora de FFT respecto a DFT [6]

Suponiendo que cada operación tiene una duración de 1ns, en el caso de los cálculos usando DFT con n = 2^{30} el tiempo que se tardaría en obtener los resultados sería de 13.343 días. Esto es evidente que es inasumible, y es por eso por lo que viendo el factor de mejora que aporta usar FFT, (más de 35 millones de veces mejor) reduce el tiempo de cálculo total a solo 32 segundos, con lo cual se usará esta herramienta para filtrar y obtener resultados del motor eléctrico [31].

En definitiva, gracias a este algoritmo se podrá capturar y analizar las distintas señales que vienen dadas de una manera más simplificada (en una sola gráfica de frecuencias) la cual queda preparada para realizar un análisis de los errores de manera sencilla.

Con lo cual, y en cuanto a su uso práctico en este trabajo, empleando la FFT se podrá analizar que en las gráficas de la FFTs correspondientes aparezcan armónicos de alta y baja frecuencia (en los extremos del gráfico), ocurran vibraciones particulares en ciertas frecuencias que destaque por su amplitud, o aumente de manera sobresaliente las vibraciones generales obtenidas, pudiendo significar esto la aparición o existencia de ciertos problemas o fallos que se analizarán en el siguiente apartado [31, 32].

4. Recursos empleados

Para realizar un estudio de estas características es fundamental conocer cuáles serán las herramientas más eficientes para el desarrollo de este. En este apartado se detallarán tanto los elementos con los que se trabaja, como las herramientas prácticas con las que se extraen los datos de estos componentes, así como los recursos software que se utilizan para el análisis de la información recogida.

4.1 Elementos de trabajo

El proyecto se realiza en colaboración con la planta cementera de Tudela-Veguín situada en la localidad asturiana de Aboño, dentro de la cual se ubican los dos motores eléctricos bajo análisis.

Motores

Los motores son de marca WEG y modelo W22 IE2 e IE3 respectivamente. Su función es impulsar ventiladores de rechazo encargados de retornar a los molinos aquellos trozos de material que superan un tamaño mínimo.

A continuación, se procede a explicar más detalladamente las especificaciones de cada cual, si bien se pueden ver todos los datos en el punto 9.3 Anexo III, en el cual se encuentran las hojas de especificaciones oficiales del fabricante.

- **Motor 1:** WEG 160M-02 W22 Baja Tensión. Motor de inducción trifásico, con niveles bajos de ruido y vibración y un mantenimiento sencillo. En este caso el nivel de eficiencia es IE2, siendo la garantía de eficiencia más baja teóricamente, aspecto que se evaluará durante el proyecto. Los datos de interés son que la potencia es de 15 kW, la frecuencia 50Hz y la tensión nominal 400/690 V.



Ilustración 17: Motor 1 cementera Aboño

- **Motor 2:** WEG 180M-02 W22 Baja Tensión. Motor de inducción trifásico, con niveles bajos de ruido y vibración y un mantenimiento sencillo. Como características específicas y que interesan en el proyecto están que la potencia del motor es de 22 kW, su frecuencia 50Hz y la tensión nominal 400/690 V. Cumple con el estándar de eficiencia IE3 conforme IEC 60034-30-1. Los cojinetes o rodamientos que luego se evaluarán con más detalle tienen mayor vida útil en este motor. Este motor es más grande que el anterior, pesando casi 60 kilogramos más.



Ilustración 18: Motor 2 cementera Aboño

En cuanto a la información de mantenimiento por parte de la empresa, la cual es de vital importancia para el proyecto, se comunica lo siguiente:

“El motor nº1 (22kw) lleva montado desde 7-7-2017 y tiene rodamientos 6309C3 y 6209ZC3. El motor nº2 (15kw) lleva montado desde 3-7-2020 y tiene rodamientos 6311C3 y 6211ZC3.

Los motores salvo avería se suelen cambiar por encima de las 40.000 horas (~6 años)

Si en un principio si alcanzan las 40.000 horas (si no hay avería previa), se manda el motor a revisión general y cambio de rodamientos y se suele montar el mismo.

Cuando tenemos un problema suele ser por vibración y fallo de rodamiento (la estructura es un poco endeble para el moto-ventilador instalado sobre todo el más potente),

solemos tener bastantes problemas en dicho accionamiento y no suele alcanzar las 40.000 horas.”

Rodamientos

Mención aparte merecen los rodamientos de estos motores, los cuales tienen características específicas interesantes que se estudiarán teóricamente y analizarán en la práctica dada la importancia de los mismos en el funcionamiento del motor.

En el punto 3.2.1 del estado del arte de este documento se han presentado como son los rodamientos de los motores eléctricos y los posibles problemas que pueden ocurrir en los rodamientos y los tipos de fallos que presentan. El desgaste, fatiga por contacto rodante, corrosión, erosión eléctrica, deformación plástica y agrietamiento o fractura de estos (según norma ISO 15243), hacen que sea preciso analizar estos elementos de manera separada a los fallos de una maquina en conjunto [33].

A continuación, se presentarán los rodamientos presentes en cada motor. Antes cabe mencionar que los rodamientos utilizados tienen la designación ZZ y C3, siglas que indican lo siguiente:

- **ZZ** indica que el rodamiento tiene una placa de protección tanto en el anillo exterior como en el interior, formando una obturación sin contacto. Las placas de protección son chapas metálicas que se colocan en uno o ambos lados del rodamiento para impedir el ingreso de contaminantes sólidos dentro del rodamiento. Las placas de protección son no rozantes, por lo que no generan fricción ni desgaste. Son particularmente adecuadas para altas temperaturas gracias a su material y su diseño.
- **C3** indica la claridad que existe entre un acero y la jaula del rodamiento, es decir, el espacio libre entre los elementos rodantes y las pistas. El número 3 significa que esta claridad está a 3 milésimas el balín de acero de la jaula. Una mayor claridad interna permite que los rodamientos soporten cargas radiales y axiales más altas, y también

puede ayudar a prevenirla deformación por calor en condiciones de funcionamiento a altas temperaturas. Estos rodamientos funcionan especialmente bien cuando soportan cargas elevadas, donde existen ajustes con presión entre los anillos del rodamiento o cuando hay una diferencia elevada de temperatura entre el anillo interior y exterior [33, 34, 35].

En la ilustración 19 se muestran los datos más significativos de los rodamientos, que serán los que se utilizarán para analizar los fallos del mismo.

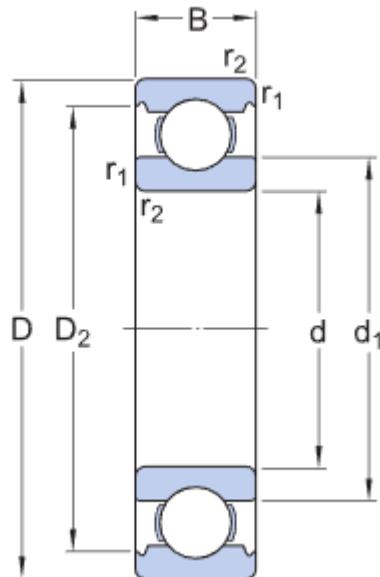


Ilustración 19: Vista frontal rodamiento [36]

En esta vista frontal del anillo del rodamiento en corte axial se puede ver como no sólo es el diámetro interior o exterior del propio rodamiento lo que interesa, sino también la distancia d_1 y D_2 , que corresponde con la distancia entre el reborde de ambos aro interior y exterior. Estas distancias interesan, ya que muchos de los fallos que se analizan se producen por el rozamiento entre los elementos rodantes y estas pistas, aunque también se tendrán en cuenta d (diámetro interior) y D (diámetro exterior) para defectos exteriores.

En el motor 1 se utilizan los rodamientos 6309-ZZ-C3 y 6209-ZZ-C3 con las siguientes características:

- **Rodamiento 6309-ZZ-C3:** 8 bolas, d1: 62,18 mm; D2: 86,7 mm; d: 45 mm; D: 100 mm.
- **Rodamiento 6209-ZZ-C3:** 8 bolas, d1: 51,5 mm; D2: 78,5 mm; d: 45 mm; D: 85 mm.

En el motor 2 se utilizan los rodamientos 6311-ZZ-C3 y 6211-ZZ-C3 con las siguientes características:

- **Rodamiento 6311-ZZ-C3:** 8 bolas, d1: 75,34 mm; D2: 103,7 mm; d: 55mm; D: 120 mm.
- **Rodamiento 6211-ZZ-C3:** 8 bolas, d1: 69,06 mm; D2: 89,4 mm; d: 55 mm; D: 100 mm.

4.2 Sistema de Monitorización

Una vez conocidas las máquinas sobre las que se trabaja, así como sus componentes específicos que se estudiaran específicamente, es momento de presentar como se extraerán los datos de estos motores, para los cual se ha desplegado un sistema de monitorización. Por un lado, para captar las vibraciones se utilizará un sensor por cada motor, recogiendo las vibraciones de los rodamientos. Estos sensores transmiten los datos obtenidos a una Raspberry cercana a través de Bluetooth Low Energy. Las Raspberrys a su vez se comunican entre sí y con el exterior a través de red Wifi.

4.2.1 Arquitectura

Tal y como se puede ver en la ilustración 20, la arquitectura del sistema de monitorización está compuesta por tres capas en las cuales la información puede ser procesada. La primera capa es la capa de borde (Edge), la cual está compuesta por todos los sensores. La segunda capa es la capa Fog, que contiene los Gateway o pasarelas. La última

capa es la nube (Cloud), donde todos los datos relevantes son almacenados, visualizados y analizados.

Todas las capas tienen capacidad de cómputo. En la capa Edge, el filtrado, la agregación y la transformación de datos son llevados a cabo directamente por los sensores. La capa Fog permite a los Gateways recopilar datos de múltiples sensores utilizando tecnologías de comunicación inalámbrica tales como Bluetooth Low Energy (BLE) y continuar procesándolos. Tanto la capa Edge como la capa Fog ayudan a distribuir el procesamiento de información entre los sensores y la nube, mejorando la latencia y reduciendo la cantidad de datos a transferir a la nube.

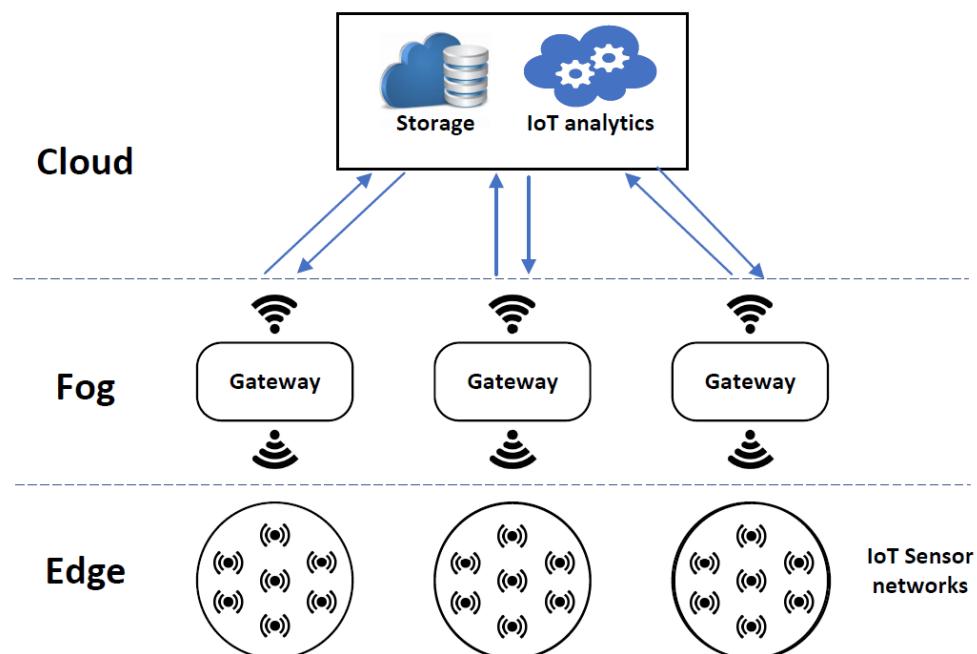


Ilustración 20: Arquitectura sistema monitorización [37]

4.2.2 Sensores (Edge)

En la primera capa del sistema de monitorización (Edge), compuesta por los sensores que recogen los datos, se encuentra un sensor en cada motor que se describe a continuación.

El módulo multisensor de bajo coste empleado es el SensorTile.box de ST Microelectronics (ver ilustración 21), que cuenta con un procesador ARM Cortex-M4 con DSP y FPU, 2MiB de memoria flash programable y ocho sensores integrados, incluyendo sensores de movimiento y humedad. LM6DSOX es el sensor de movimiento. Tiene un acelerómetro, un magnetómetro y un giroscopio que capturan datos a una frecuencia de muestreo de hasta 5 kHz. El sensor de humedad es el HTS221, que mide la humedad relativa y la temperatura del entorno. El módulo admite comunicación inalámbrica con el protocolo BLE. La naturaleza inalámbrica del módulo permite una implantación muy rápida y económica en el entorno industrial. Gracias a ello se puede comunicar con el elemento de la siguiente capa que se explica a continuación.

4.2.3 Gateway (Fog)

El Gateway utilizado en la capa Fog es la computadora de placa única de bajo coste Raspberry Pi 4 mostrada en la ilustración 21. Cuenta con 4 GiB de RAM, dos puertos micro-HDMI, dos puertos USB 2.0, dos puertos USB 3.0, así como un puerto CSI y un puerto DSI para conectar una cámara y una pantalla táctil. La interfaz Ethernet admite velocidades de datos de hasta 1Gbps. También incluye interfaces WiFi, Bluetooth 5.0 y BLE. Incorpora una CPU Broadcom BCM2711 (4C Cortex-A72 ARM v8 64-bit SoC @1.5 GHz) con GPU integrada.

Gracias precisamente a la interfaz Bluetooth 5.0 que presenta puede recibir los datos obtenidos por el sensor y a su vez utilizando la conectividad a internet, conectarse con la siguiente capa para enviar los datos a la nube. Es por esto que se le llama *Gateway*, ya que funciona como un punto de parada para los datos en su camino hacia la última capa de la arquitectura, la nube.

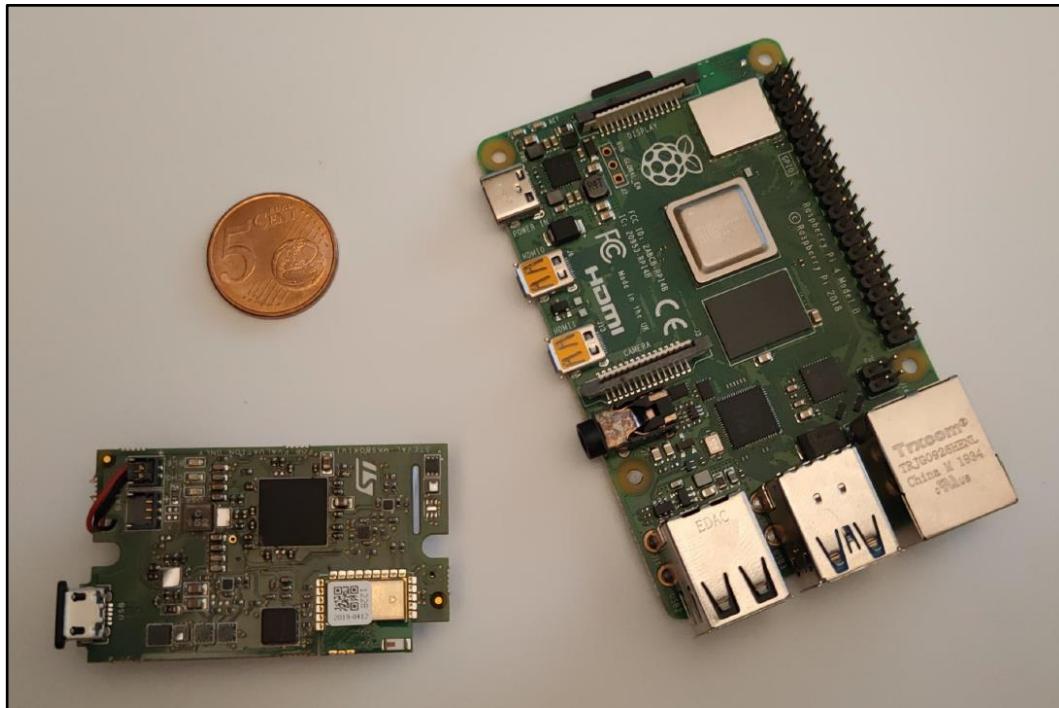


Ilustración 21: Placa de sensor (izquierda) y de gateway (derecha) [37]

4.2.4 Software

En el plano software de los componentes del sistema de monitorización, para la recogida de datos del multisensor, en este proyecto enfocado hacia las vibraciones, se utilizará el acelerómetro que incorpora. En este caso un firmware personalizado permite que se muestre la vibración a 5 kHz en un rango de 8G. Este se comunica a través del protocolo BLE con el *Gateway*, que está a una distancia máxima de 10 metros del sensor.

Una vez los datos de aceleración están en el *Gateway* estos se filtran e integran para obtener la velocidad y ser transformados al dominio de la frecuencia. Para esto se utiliza la Transformada Rápida de Fourier (FFT) como fue explicado en el estado del arte. Cada procesamiento de la FFT utiliza un vector de 65.536 muestras, equivalente a 13 segundos de operación del motor, incluyendo suficientes revoluciones del motor para cubrir todo su comportamiento dinámico al tiempo que se obtiene una buena precisión (número de *bins*) en el espectro de frecuencia.

Para que todo esto funcione, desde el montaje teórico visto en la ilustración 21 como el que se lleva a cabo en la práctica que se puede ver en la ilustración 22, se han de colocar los módulos multisensor (1 por motor) encima de los rodamientos delanteros de los motores, que se comunican inalámbricamente con las correspondientes puertas de enlace que están a menos de 10 metros. Estos Gateway se comunican entre si vía WiFi y solo uno de ellos se comunica con la nube a través del protocolo MQTT.

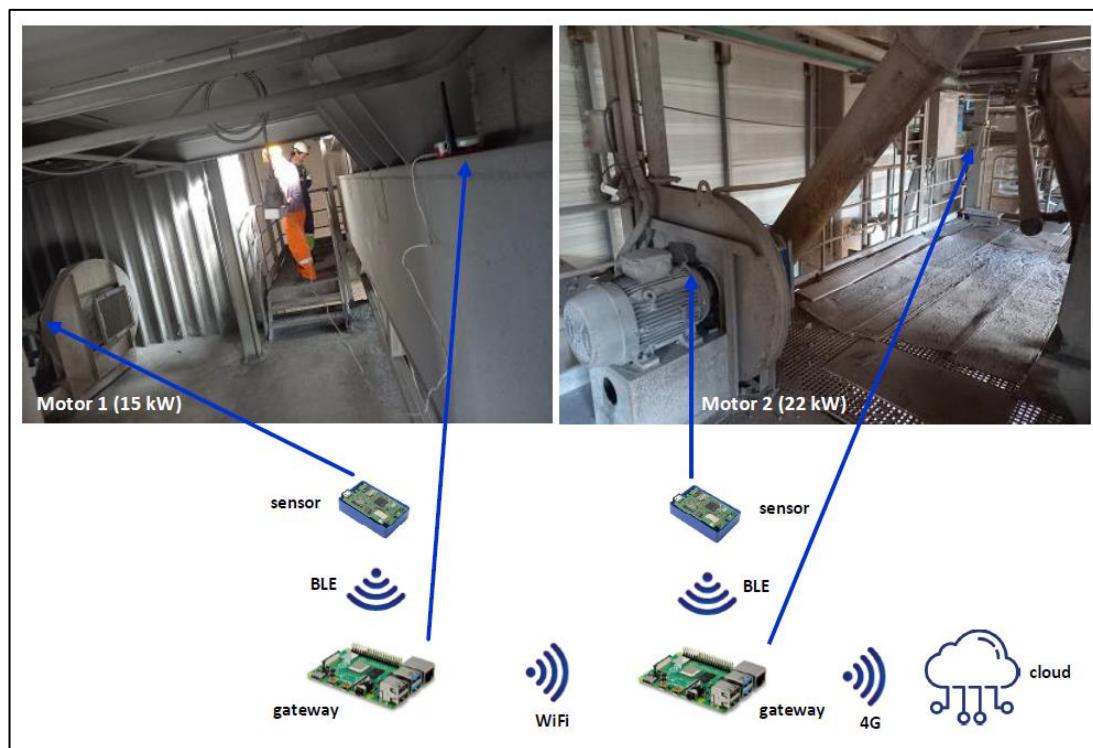


Ilustración 22: Arquitectura sistema monitorización [37]

5. Desarrollo del trabajo

Con el fin de conseguir los resultados que permitan cumplir los objetivos planteados, el proyecto se ha desarrollado en varias fases con el fin de ir cumpliendo uno a uno los objetivos planteados. A continuación, se describe en detalle cada una de esas fases.

5.1 Captura y organización de los datos de vibraciones

En este apartado se profundiza sobre el sistema de monitorización explicado en el subapartado 4.3 y se detalla cómo se obtienen los datos de vibraciones, así como se organizan estos una vez han sido capturados, con el fin de favorecer el tratamiento futuro de los datos.

En cuanto a la obtención directa de las vibraciones en los motores, estas se recogen en el acelerómetro que incorporan los sensores utilizados. En concreto, se capturan 32768 muestras a 5kHz, repitiéndose este proceso cada 8 minutos.

Esta captura será enviada a la siguiente capa del sistema, el Gateway correspondiente, que es donde se procesa y almacena temporalmente. Este proceso de almacenamiento automático en orden cronológico de las capturas de vibraciones está ya realizado en desarrollos previos a este proyecto, así como el envío a la nube de esta información.

Ya que el sensor trabaja sobre los ejes X, Y, Z, se obtienen por cada motor tres señales de vibración correspondientes a cada eje. Es decir, cada 8 minutos en cada motor se genera una captura de 32.768 muestras por eje. Se genera así un fichero csv por cada eje, 3 en total, cada uno almacenado automáticamente en su carpeta.

Cada fichero contiene un total de 32.768 muestras. Este número no es arbitrario; en secciones posteriores se explica la razón detrás de esta cantidad de muestras por captura. Cada captura representa una serie de 32.768 medidas de aceleración tomadas de manera continua a lo largo del tiempo. A una frecuencia de muestreo de 5 kHz, estas muestras corresponden aproximadamente a 6,55 segundos de datos. La amplitud de onda registrada

en estas muestras se transformará al dominio de la frecuencia, como se detalla en el estado del arte.

En cuanto al trabajo con estos datos, se opta por descargar estas carpetas de capturas de vibraciones a un equipo más potente en cuanto a capacidad de computación de cálculo. Esto es por varios motivos, pero el principal es que como se puede ver en la ilustración 28, el sistema funciona de manera automática recolectando datos siempre que el motor está en funcionamiento desde el día 28 de junio de 2022. Es por esto por lo que el número de archivos en estas carpetas supera los cientos de miles de capturas realizadas y hay ciertos cálculos que se realizan sobre el total de estos, o incluso mezclando archivos de distintos ejes en un mismo motor. Aunque las puertas de enlace disponen de cierta capacidad de cómputo para analizar estas muestras según se van capturando, esto no es lo que se pretende en este proyecto. La idea es analizar todo el histórico de muestras y esto queda fuera del alcance de cómputo de estas puertas de enlace.

Una vez en la capa de red del sistema de monitorización, se procede a acceder a los datos locales de los Gateway, descargando los datos a otro sistema con más capacidad de cómputo y trabajando desde ahí. Sin embargo, el sistema de monitorización está desarrollado para en vez de descargar los datos a nivel local, desde la capa de red subirlos a un repositorio *online* y trabajar desde la nube. Esto solucionaría la problemática de, en cuanto se tengan muchas capturas, comprometer el espacio de almacenamiento del sistema local en el cual se trabaja con ellas.

5.2 Determinación de las frecuencias características de fallo

Como se explica en puntos anteriores del estado del arte, el análisis de los datos obtenidos se hace a partir de un estudio teórico previo realizado sobre el tipo de fallos en motores eléctricos.

Aunque los datos que se obtienen del sensor están basados en el dominio del tiempo, como se detalla en profundidad en el punto 6.3, el objetivo 1 es transformar estos datos al

dominio de la frecuencia y una vez ahí, basándose en los cálculos teóricos previos, establecer las frecuencias características y comenzar el estudio. Este punto tratará sobre esto.

Por otro lado, para el objetivo 2 se buscan estos picos de frecuencia característicos que coinciden con el estudio teórico de la detección de fallos (punto 3.4, caso de rodamientos) para así analizar los fallos de cada motor.

Para comenzar se aplica la transformada rápida de Fourier para convertir la señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia.

Una vez realizado esto, según el teorema de Nyquist solo se puede reconstruir la señal hasta $\left(\frac{F_s}{2}\right)$, con lo cual solo se utilizarán las frecuencias comprendidas entre 0 y $\left(\frac{F_s}{2}\right)$.

Sabiendo que el total de muestras del fichero csv es N y que F_s es 5000Hz se puede calcular el paso entre frecuencias utilizando la siguiente ecuación:

$$Fft_freq = \left(\frac{F_s}{2}\right) / \left(\frac{N}{2}\right)$$

En este caso,

$$Fft_freq = \left(\frac{5000}{2}\right) / \left(\frac{32768}{2}\right)$$

El resultado de esta ecuación es 0,1525 Hz, y una vez que se tiene este dato ya se puede encontrar en qué posición se encuentra cada armónico de la siguiente manera:

$$Pos = Freq_{armonico} / 0,1525$$

Una vez conocido esto, se elabora una tabla con las especificaciones de cada motor y su relación con los fallos teóricos en rodamientos que queremos calcular. En estas tablas se calculan las posiciones donde a priori se encontrarán los picos de frecuencia que se corresponden con los fallos del motor.

Para el motor 1, se tiene la tabla 4:

Motor 1: Gateway		2960 rpm motor			
Rodamiento	Dim int (mm)	Dim ext (mm)	Dim bola (mm)	Nbolas	Pd
6309C3	62,18	86,7	25	8	74,44
6209ZC3		78,5	19	8	65
	BPFO	BPFI	BSF	FTF	VPF
6309C3	131,06072	263,6059466	65,16339001	16,38259001	394,666667
6209ZC3	139,6512821	255,0153846	74,86814443	17,45641026	394,666667

Tabla 4: Posicion frecuencias características de fallo motor 1

La primera fila de la tabla corresponde a las medidas técnicas de los rodamientos, siendo las unidades milímetros, “Dim int” se corresponde con el diámetro interior d1, el diámetro interior del rodamiento junto al reborde interior de la pista se puede ver claramente en la figura 23 correspondiente al apartado “Rodamientos” en el punto 4.1. “Dim ext” sería el diámetro exterior D2, correspondiente a la distancia que abarca hasta el exterior de la bola con el interior de la pista exterior del rodamiento. “Diambola” es el diámetro de la bola de cada rodamiento, “Nbolas” el número de bolas correspondiente y “Pd” es la suma del diámetro exterior y el interior anteriores del rodamiento dividido entre 2.

Por otra parte, en la fila inferior de la tabla se encuentran las posiciones en las que teóricamente se deben encontrar los picos de frecuencia del primer armónico de los fallos correspondientes, calculadas a través de las fórmulas que se exponen en el punto 3.4 del presente documento.

Como modo de ejemplo, se presenta como se calcula la posición de 1X del fallo BPFO para los dos rodamientos del motor 1:

El motor 1 tiene una velocidad de giro nominal que asciende a 2960 rpm, lo que se traduce en una frecuencia de 49,33 Hertzios. Con lo cual el cálculo para buscar la posición donde se encuentra el máximo del primer armónico en la matriz es el siguiente:

$$Pos = 49,33/0,1525 = 328,89.$$

Para determinar la posición exacta en la cual buscar la amplitud, se toma únicamente la parte entera, desechando el decimal, aunque está por encima de 0'5, en este caso la posición sería la 328.

Una vez se conoce este dato, se ejecutan dos métodos distintos para realizar los cálculos.

Por un lado, se toma esta posición como exacta y se realizan los cálculos utilizando directamente las posiciones que aparecen en las tablas de rodamientos. Este método, siendo bastante directo, no es el más efectivo. Para empezar, la posición no es un número exacto, con lo cual ahí ya se está cometiendo un error, ocasionando así que estas posiciones puedan variar de una muestra a otra; con lo cual se trabaja en un segundo método.

En estudios anteriores se comprueba que la frecuencia teórica del pico de 1X nunca coincide con la que se encuentra en la práctica, variando en +1,5Hz arriba o debajo de 49,33. Mismamente, en la posición 326 el valor es mayor que en 329, tan solo -0,3Hz, lo que denota que quizás la amplitud se puede encontrar analizando esta posición y no en la teóricamente calculada.

324	1.908776...	1.540973...
325	2.060139...	3.024173...
326	3.260712...	4.330045...
327	1.088618...	2.126665...
328	0.457295...	0.390604...
329	0.334315...	1.161317...
330	0.684835...	1.905661...
331	0.787101...	1.501057...
332	0.773859...	1.055245...
333	0.361390...	0.527753...
334	1.671108...	0.925997...

Ilustración 23: Extracto de la matriz para dos muestras

Como se puede ver en la ilustración 23, los valores en la posición 326 son mayores que los que se encuentran en la fila teórica.

Con lo cual, partir de la posición calculada teóricamente, se traza un margen de hasta 1,5 Hz por encima y por debajo para buscar el máximo valor en este espacio. Cada vez que se analice una muestra, se obtendrá la posición más alta en este rango, buscando así evitar perder máximos de amplitud que están algo desplazados y que yendo al dato directo de posición se pierden.

5.3 Tratamiento de los datos

Tal y como se describe en el apartado anterior, ya se define como se va a trabajar con los datos para determinar la frecuencia característica de fallo. Sin embargo, más adelante en el estudio se realizan una serie de modificaciones en el tratamiento de datos que se comentan a continuación.

Basándose en los primeros resultados en cuanto a la obtención de graficas se refiere, se plantean dos métodos para la búsqueda de las frecuencias características de fallo.

Por un lado, el método relatado en el apartado 5.2. Determinada teóricamente la posición en la cual se ubica el fallo, se busca con un margen de 1,5 Hz positiva y negativamente el valor máximo y la media de resultados para cada frecuencia característica por muestra.

Por otro lado, tras la observación de primeros resultados, se puede determinar cómo en cuanto se pasa a obtener los valores máximos en el rango $+0,9$ Hz, se produce un cambio significativo en las amplitudes, aumentando el valor enormemente, con lo cual se puede suponer que estamos cerca del máximo real en este rango de muestras algo alejado del valor teórico. Esto es algo que ocurre recurrentemente en el cálculo de todas las frecuencias de fallo, variando el rango de Hertzios ligeramente.

Como muestra, un ejemplo de la diferencia entre una gráfica obtenida basándose en el punto teórica de fallo, ilustración 24, en comparación con otra que mide los mismos valores en el mismo eje y periodo de tiempo, pero obteniendo valores hasta $\pm 0,9$ Hz desde la posición teórica, ver ilustración 25.

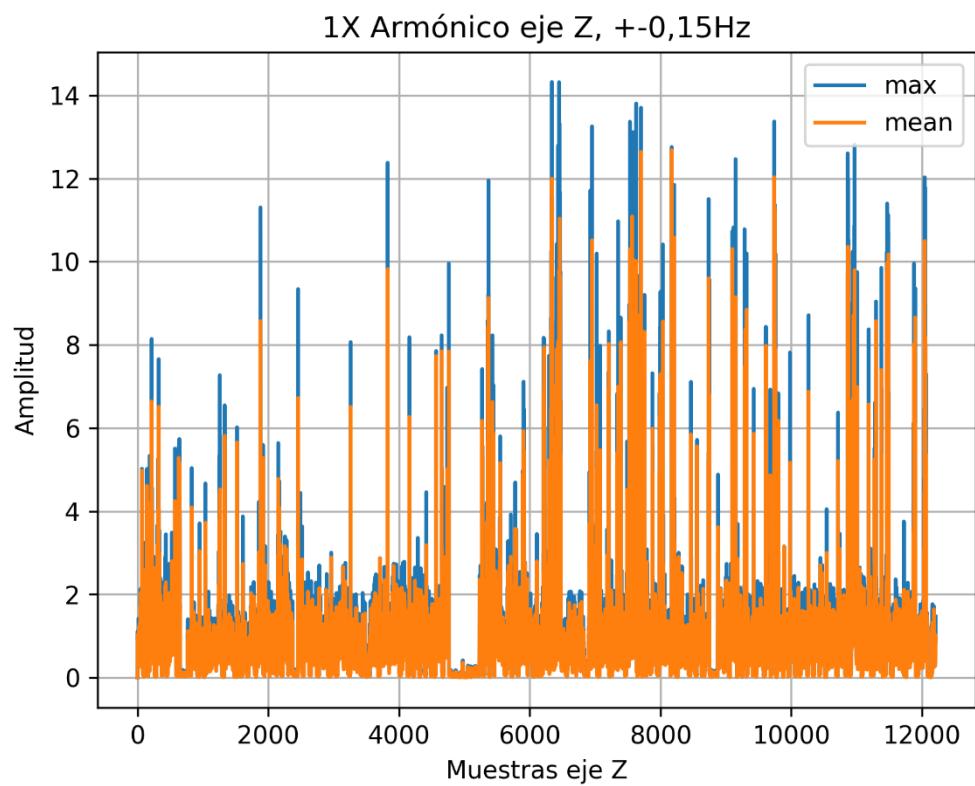


Ilustración 24: Motor 1, eje Z, 1X

Con desviación de 0,15Hz, se obtienen valores muy irregulares y además con una amplitud muy distinta a la que aparece en la ilustración 25 que aparece a continuación.

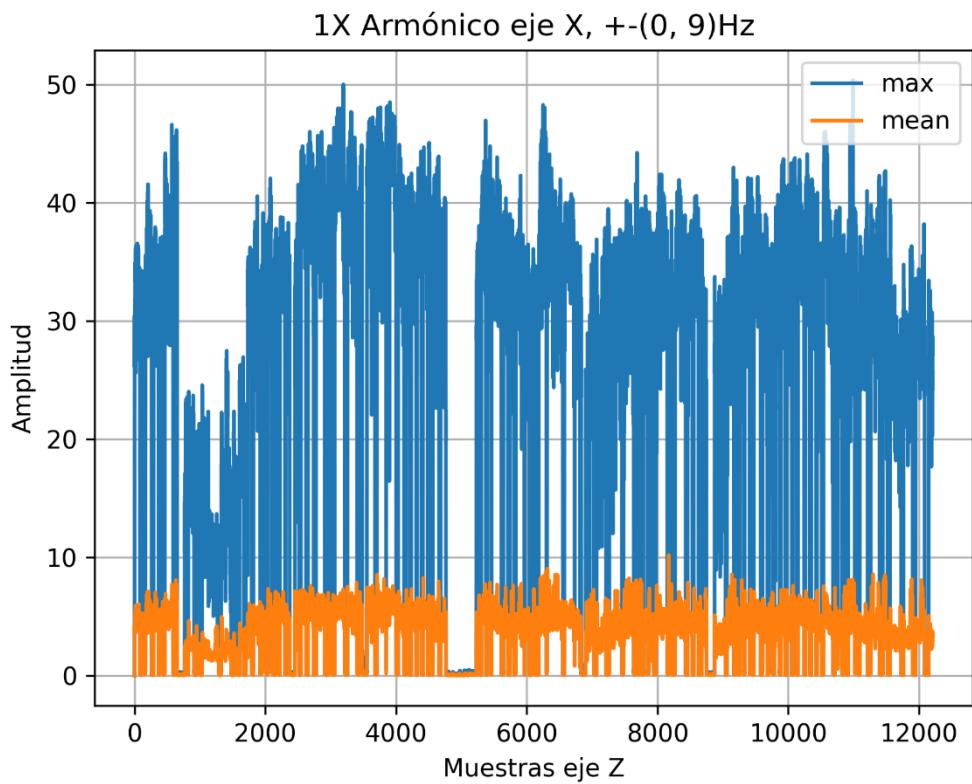


Ilustración 25: Motor 1, eje Z, 1X

Sin entrar más en detalle ya que se presentan y analizan en el apartado 6 de resultados, estas graficas sirven para ver como el valor máximo de amplitud dista mucho del obtenido con un margen tan pequeño sobre el punto teórico de fallo. Además, la homogenización de los datos obtenidos es evidente en la observación directa y como se verá en el punto 5.3, cuando se ajustan los datos se obtienen resultados más claros.

Por todo esto es por lo que se opta por un segundo camino para determinar las frecuencias características de fallo y analizar los resultados. En esta segunda opción se plantea el cambio del punto inicial en las estimaciones del máximo teórico al práctico. Es decir, primero se calcula el punto máximo de la frecuencia característica de fallo en la muestra correspondiente y a partir de ahí se abre el rango de búsqueda de máximos y media.

De esta manera se pretende acercarse ya desde el comienzo del rango a los valores más altos de amplitud y no perder tanto tiempo buscándolos. Para obtener este punto inicial se parte del punto teórico de fallo y en el mismo rango de 1,5 Hz se busca la posición.

A partir de este lugar, se abre un rango de 1,5 Hz de nuevo para buscar los valores que más se ajusten al resultado buscado. Se considera en un momento dado la posibilidad de aumentar este rango, pero tras realizarlo se desecha la opción ya que los resultados no mejoran y aparecen más irregularidades tanto en el cálculo del máximo como la media.

Basándose entonces en el punto 5.2 para la determinación de la frecuencia, así como en las estimaciones comentadas a continuación, se pasa a explicar el diferente código que se realiza utilizando el lenguaje de programación Python y sus bibliotecas para realizar estos cálculos.

Hay dos enfoques en el código: el primero es el realizado al principio, el cual es algo distinto a lo comentado con anterioridad, pero es simple de explicar: La idea inicial fue calcular la FFT de cada muestra en cada eje de los motores recogiendo muestras durante 3 meses.

Todas estas muestras se analizan y se convierten a FFT, mostrándose en una sola gráfica con el fin de visualizar puntos con amplitudes muy altas respecto a la media y poder estudiar si estos coinciden con algún punto de frecuencia característica de fallo teórico.

El código que se presenta en el Anexo de código se centra en realizar un análisis de frecuencia de archivos CSV que contienen datos relacionados con un motor. El objetivo es realizar una transformada rápida de Fourier (FFT) a los datos para visualizar su contenido en el dominio de la frecuencia, tal y como se define en apartados anteriores.

Para ello, se comienza por importar las bibliotecas necesarias:

- “**pandas**” para manipulación de datos en formato de marco de datos.
- “**glob**” para buscar archivos en el sistema de archivos.
- “**numpy**” para operaciones numéricas.
- “**matplotlib.pyplot**” para la creación de gráficos.
- “**scipy.fft**” para realizar la FFT.

Posteriormente se definen las variables que se utilizan para hacer los cálculos relacionados con la transformada rápida de Fourier, como la frecuencia de muestreo (`F`), y el número de muestras (`N`). También se necesita almacenar el tamaño de cada archivo CSV (`SIZE`), el paso de tiempo (`timestep`), y una ventana de Hamming (`window`).

Estos cálculos se realizan tras haber almacenado las muestras en un equipo local, previamente descargadas del *Gateway*. Es por esto que el directorio que contiene los archivos CSV que se analizarán contiene una ruta local.

Se utiliza la biblioteca “**glob**” para obtener una lista de todos los archivos que coinciden con el patrón proporcionado.

Se definen las frecuencias de la FFT utilizando “**fftfreq**” de “**scipy.fft**” y posteriormente se itera sobre cada archivo en la lista, de modo que para cada muestra se hace lo siguiente:

- Se lee el archivo CSV con `pd.read_csv`.
- Se verifica si el tamaño de los datos en el archivo coincide con `SIZE` .
- Si el tamaño es correcto, se concatenan los datos y realiza la FFT aplicando una ventana de Hanning.
- Se almacenan los resultados normalizados en “file_list”.

Como se desea ver los resultados de manera gráfica, se generan los resultados utilizando “**matplotlib**” de la siguiente manera:

- Se itera sobre la lista de resultados y se realiza un gráfico para cada conjunto de datos FFT. Estos se superpondrán en una sola gráfica que recoge las muestras de más de dos meses de estudio.
- Se definen los límites del eje X e Y, etiquetas de ejes y un título para el gráfico.

En resumen, el código carga datos de archivos CSV, realiza la FFT para cada conjunto de datos y luego visualiza las amplitudes de las frecuencias en un rango específico para cada archivo en forma de gráficos. Este primer código es en definitiva el cálculo de la FFT para cada muestra recogida durante dos meses y se puede realizar para cada eje de los motores.

Esto da una aproximación para ver ciertos puntos de interés en la frecuencia con amplitudes que destaque sobre la media y poder estudiar esos puntos, comparándose con los teóricos de fallo y viendo si presentan un comportamiento que se pueda analizar posteriormente.

Una vez obtenido esto, se busca optimizar los resultados realizando lo definido en el punto 5.1: Obtiene el valor de una posición (o su rango) para posteriormente compararlo con la amplitud de esa misma posición o rango del resto de muestras recogidas durante un periodo de tiempo.

Esto se representa de forma gráfica y así se puede analizar una sola frecuencia característica de fallo (BPFO, BPFI,...) a lo largo del tiempo, lo cual resulta mucho más interesante que lo realizado anteriormente ya que con esto se puede ver la evolución de la amplitud en estas posiciones de interés y comprobar así si se está produciendo un desgaste en el motor.

La diferencia con el código anterior es que, en este, tras haber realizado la transformación de la muestra a FFT, se establecen el punto significativo que se busca. Por ejemplo, si se trata de buscar frecuencias características de fallo en un rodamiento relacionadas con BPFI, la posición en el motor 1 será 1678. Esta posición viene de, como se explica anteriormente, el cálculo de la frecuencia característica de fallo para el rodamiento del motor 1. En el apartado 3.4, en su subapartado de BPFI se puede consultar.

De cualquier manera, también se calculan las frecuencias de fallo características en rodamientos con un método alternativo y aunque menos preciso, que ayuda a tener más información sobre estos fallos. En el caso de BPFI se puede multiplicar el número de bolas del rodamiento por la frecuencia de giro y por 0,6 para obtener un valor aproximado de la posición de fallo teórica.

Es por esto por lo que se hace el cálculo de esta posición para los dos rodamientos de cada motor, también esta estimación teórica explicada en el párrafo anterior y finalmente el valor escogido es la media de estos tres valores estimados para cada fallo. Se hace la media entre el cálculo para cada uno de los rodamientos del motor junto al obtenido con el cálculo de la estimación teórica. Así se pretende cercar el rango de búsqueda lo máximo posible para determinar la amplitud del fallo de manera más precisa.

A este número se le aplica un diferencial de búsqueda que varía según el rango que se quiera (hasta 1,5Hz máximo tal y como se había comentado). Aquí hay dos posibilidades. O bien se parte de esta posición teórica para realizar la búsqueda en un rango de 1,5 Hz o bien

previamente se buscan los valores máximos en este rango y luego de obtenerlos, se parte de este nuevo valor para realizar el cálculo en un nuevo rango de búsqueda, tal y como se explica al comienzo de este apartado.

Finalmente se recorre la muestra extrayendo solo estos valores que corresponden con este rango que se busca.

Se calcula el máximo y la media de este rango y se representa en la gráfica. Este proceso se repite para todas las muestras que se deseen, que en el caso de prueba que se ve en el apartado 6 son un conjunto de muestras de más de 3 meses de duración.

En resumen, este código realiza un análisis de frecuencia mediante la FFT de archivos CSV que contienen datos de un motor. Luego, identifica y visualiza los picos significativos en la frecuencia, específicamente relacionados con la frecuencia que se quiera buscar, por ejemplo, el pico 1X BPFI en el eje X del motor.

El código está preparado para que tan solo cambiando el input de entrada que corresponde a la posición que se quiere evaluar y el rango de búsqueda ya se pueda obtener la gráfica deseada.

5.4 Ajuste de las gráficas de resultados

La observación de los resultados en las gráficas que se generan es la clave para sacar conclusiones en este proyecto. Los resultados de estos cálculos son los que marcan si un fallo está aumentando y así poder utilizar mantenimiento predictivo.

La mayoría de las gráficas que se obtiene son de resultados para miles de muestras en un tiempo determinado. Lo que ocurre es que las muestras se toman durante las 24 horas del día los siete días de la semana, por lo que los motores sufren paradas por diversos motivos y esto hace que se tomen muestras en momentos cercanos a parada o rearriante, en los cuales se obtienen resultados con amplitud próxima a 0.

Al ver esto en las gráficas de manera recurrente se decide ajustar estos resultados para poder ver claramente la tendencia en las gráficas. Por otro lado, también se quiere eliminar los valores atípicos que aparecen en ciertas gráficas y que no aportan información de valor.

Con este fin, se realiza un estudio en todos los ejes de cada motor para la búsqueda de valores atípicos y poder así eliminarlos posteriormente.

Una de las técnicas que se realizan es obtener un diagrama de dispersión sobre los datos de máximo y media en los ejes (ver ilustración 32 para eje Z) obtenidos durante el estudio de los picos de fallos característicos.

En concreto, en la ilustración 26 se muestran los valores del cálculo de la frecuencia característica de fallo del eje Z en el primer armónico de giro nominal.

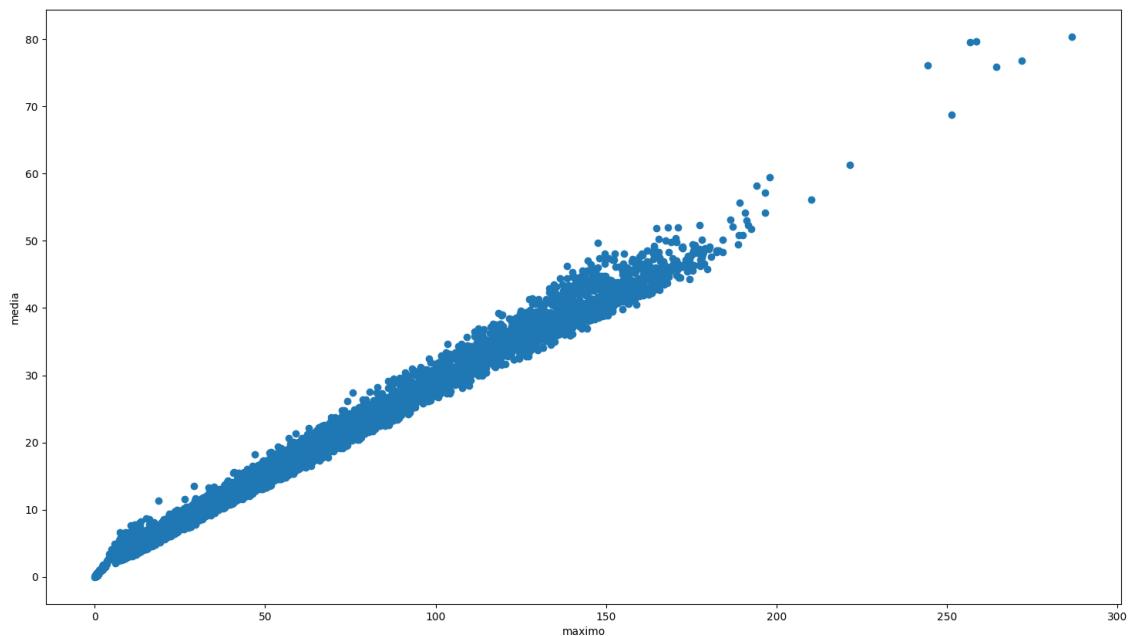


Ilustración 26: Diagrama dispersión eje Z

Como se puede observar, existe una gran concentración en los puntos obtenidos desde el valor 5 hasta algo menos de 200, y a partir de ahí ya aparecen en menor medida las muestras con valores de mucha mayor amplitud.

Viendo esto es por lo cual se determina eliminar los valores más cercanos a cero (hasta antes de que comiencen a agruparse de manera más precisa) y los valores que sobresalen por encima del valor de 200.

El primer enfoque que se realiza para esto es eliminar los valores de amplitud inmediatamente contiguos que superen el valor de la anterior amplitud en más del doble de su valor, intentando así eliminar los picos de valor desmedido. Finalmente, esto no se hará así por el problema que ocurre con este método.

El problema está en que como se analizan muestras contiguas, ya que cuando aparece un valor de la amplitud que se sale de los valores típicos no es solo una muestra, sino que son varias las que progresivamente aumentan de valor y esto en muchos casos resulta en que no se elimina dicho pico ya que el aumento es progresivo. Es decir, si se intenta eliminar valores atípicos que salen “por encima” utilizando la técnica comentada en el párrafo anterior no funciona en muchos casos ya que el aumento de una muestra a la siguiente no es tan exponencial.

Al ver esto, se cambia el parámetro de comparación a un porcentaje de solo un 50 % mayor, lo que resultó en que algunas gráficas como las del motor 2 no se pueden ajustar ya que hay cambios menores que estos que ocurren en las paradas y entonces ya no sirve para eliminar estos picos.

Con lo cual, la opción que se toma al final es eliminar los valores atípicos de 0 o cercanos a 0, ya que cuando el motor vuelve a arrancar tras tiempo parado muestra valores de amplitud muy bajos que también salen del rango de valores buscados. Dependiendo de cada eje y cada error el umbral escogido es distinto, pero nunca es superior a 5 puntos de amplitud. Por debajo de este valor se puede desechar el resultado.

Esto se hace desde código, mientras que para eliminar los valores que salen del rango por valores muy altos lo que se hace es eliminarlos también pero posteriormente a la realización del cálculo, a la hora de mostrarlos en la gráfica. Una vez obtenida una primera gráfica en un eje se eliminan los picos máximos que superan el valor del 100% de la media de los picos obtenidos de la secuencia de máximos. De esta manera, aunque se calculen no aparecen en el resultado representado y se eliminan estos valores atípicos.

Como ejemplo, y aunque se detallará posteriormente en el apartado de resultados, la diferencia entre una gráfica sin normalizar y otra normalizada es la siguiente, siendo la ilustración 27 sin hacerlo y la 28 normalizada.

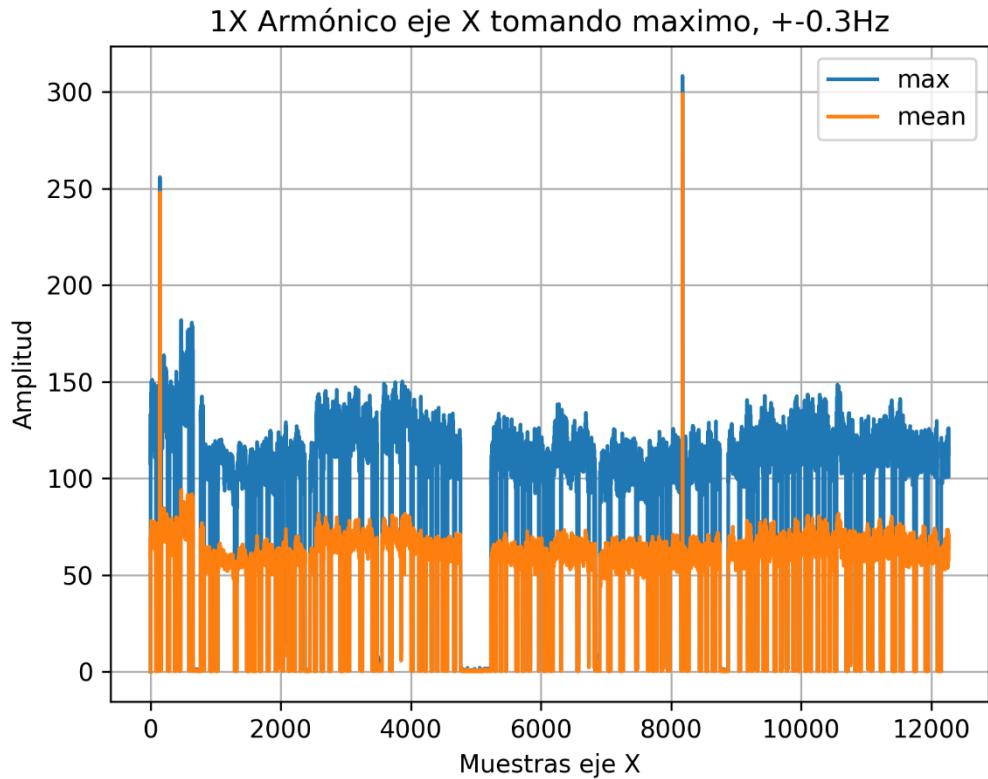


Ilustración 27: Gráfica sin ajustar datos motor 1, eje X

En la siguiente grafica se muestra el mismo eje X y con el mismo gráfico de búsqueda pero esta vez normalizando los datos obtenidos:

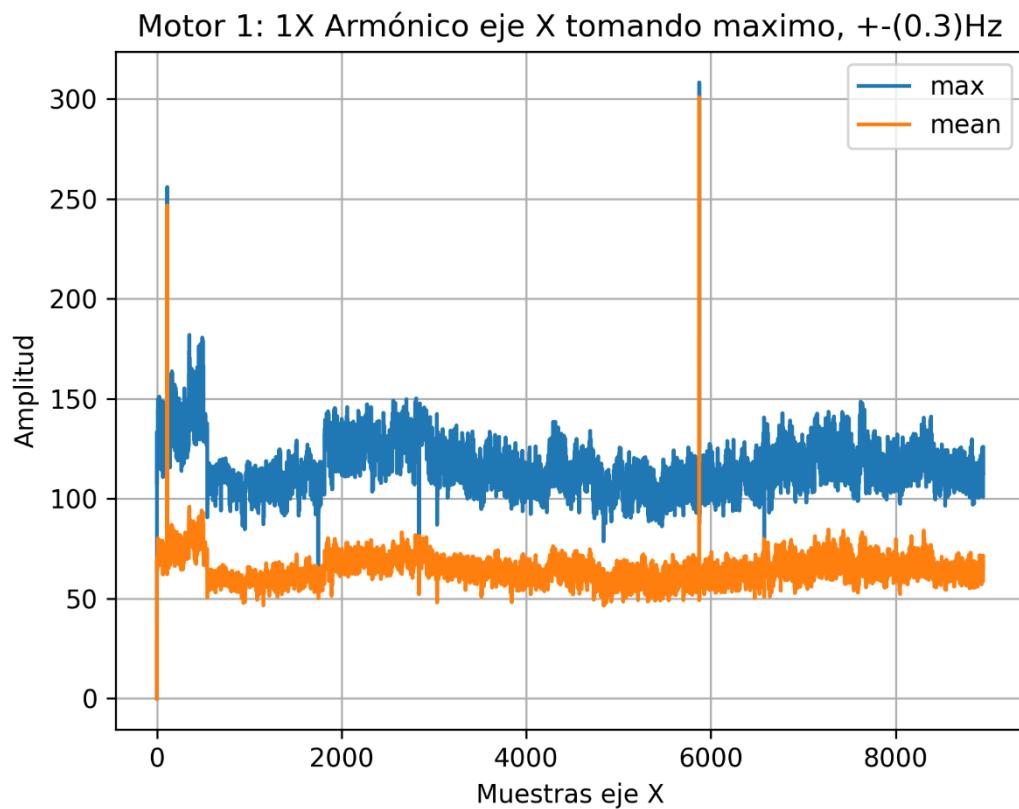


Ilustración 28: Gráfica normalizada motor 1, eje X

Como se puede observar, la diferencia de claridad en los resultados es evidente y se eliminan casi un 25% de las muestras tomadas (pasando de más de 12000 a algo menos de 9000 muestras) que tienen valores fuera del umbral seleccionado.

A pesar de todo, siguen apareciendo valores máximos atípicos que no se ajustan por lo explicado anteriormente.

Aunque se eliminan todos los picos que superan el doble del valor de la media de valores de la secuencia de máximos, aparecen dos picos que suben prácticamente hasta este umbral debido a que las muestras son muy contiguas entre sí y forman esta gráfica.

Esto se profundiza más en próximos apartados, en concreto en el apartado 6.3.

6. Evaluación de resultados

En este apartado se detallan los resultados obtenidos tras la evaluación de las muestras obtenidas. Se divide en resultados de los datos en bruto y los pasados por una normalización. Además, se presentan divididos entre el análisis hecho sobre el giro nominal y sus armónicos, así como los obtenidos sobre los rodamientos.

Además de presentar los resultados gráficos también se analiza su evolución temporal con el fin de buscar evidencias de relaciones entre los esperados teóricamente y los obtenidos.

Aunque se han hecho gráficas para todos los ejes analizando todos los posibles fallos calculados teóricamente, estas se encuentran en el anexo correspondiente y en este apartado de resultados solo se presentan las que se consideran que aportan información de más valor para el estudio.

6.1 Resultados en bruto y normalizados

En este punto se analiza la diferencia entre los resultados en bruto y normalizados en los distintos motores y ejes, ampliando lo comentado en el punto 5.4.

La ilustración 29, corresponde a la amplitud en la frecuencia de giro nominal del motor 1 en todas las muestras durante 3 meses.

La amplitud se ha calculado realizando la búsqueda de un valor máximo en un rango de la frecuencia de giro nominal teórica, tal y como se detalla en el punto 5.3 del documento.

A esto se le añade un rango mayor para abarcar un espectro de amplitudes donde sea seguro obtener el valor más ajustado al punto de amplitud máxima para cada punto en cada

muestra, usando tanto la búsqueda de la amplitud máxima como la media en este espectro para poder comparar dos métodos distintos.

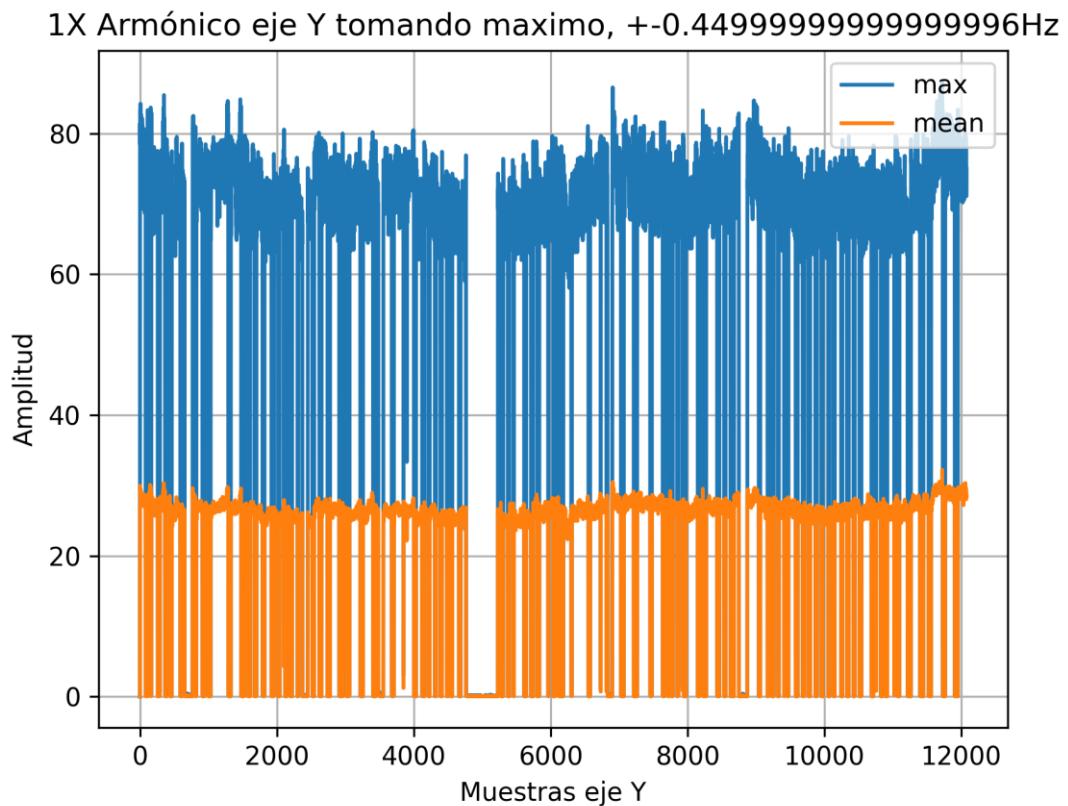


Ilustración 29: Gráfica sin normalizar IX eje Y

Como se puede observar, el resultado en bruto no es nada claro ni siquiera a simple vista. Lo que sí se puede observar es todos los momentos en los cuales el motor está detenido. Tras el arranque del motor, las muestras recogen amplitudes mientras comienza su funcionamiento, recogiendo muestras cercanas a 0 ya que el motor tarda un tiempo en arrancar a funcionar, registrando vibraciones de baja amplitud hasta que comienza su funcionamiento normal. Estas muestras no son representativas de su funcionamiento y se deben eliminar.

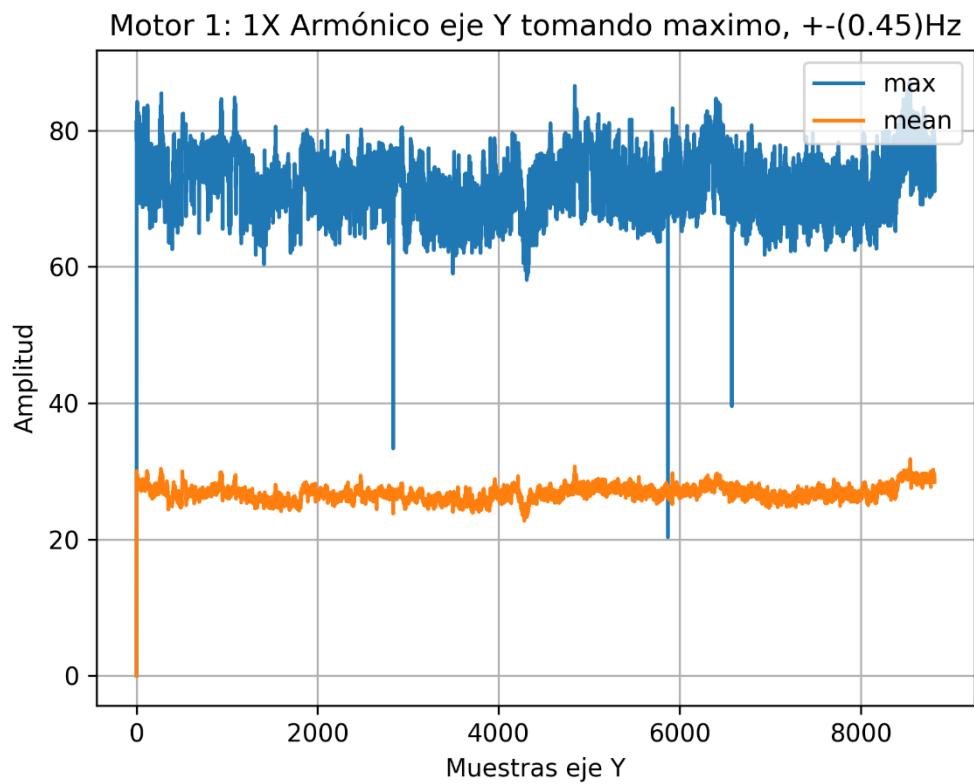


Ilustración 30: Gráfica normalizada 1X ejeY

Como se puede observar en la ilustración 30, correspondiente a los resultados normalizados, tras eliminar valores atípicos (punto 5.4), aprecia una homogeneidad en los datos obtenidos.

Las muestras de la parada temporal del motor en Agosto (el margen de muestras analizadas es de 3 meses) desaparecen, así como todas las que tienen una amplitud de 0 o cercana a 0, que son las obtenidas tras el arranque.

Se consigue así una visión mucho más clara de los datos que se analizan, y este tipo de graficas normalizadas serán las que aparezcan en los apartados 6.2 y 6.3 para presentar los resultados.

En cuanto al motor 2, se presentan dos ejemplos más de gráficas sin normalizar y tras su normalización en el eje Y.

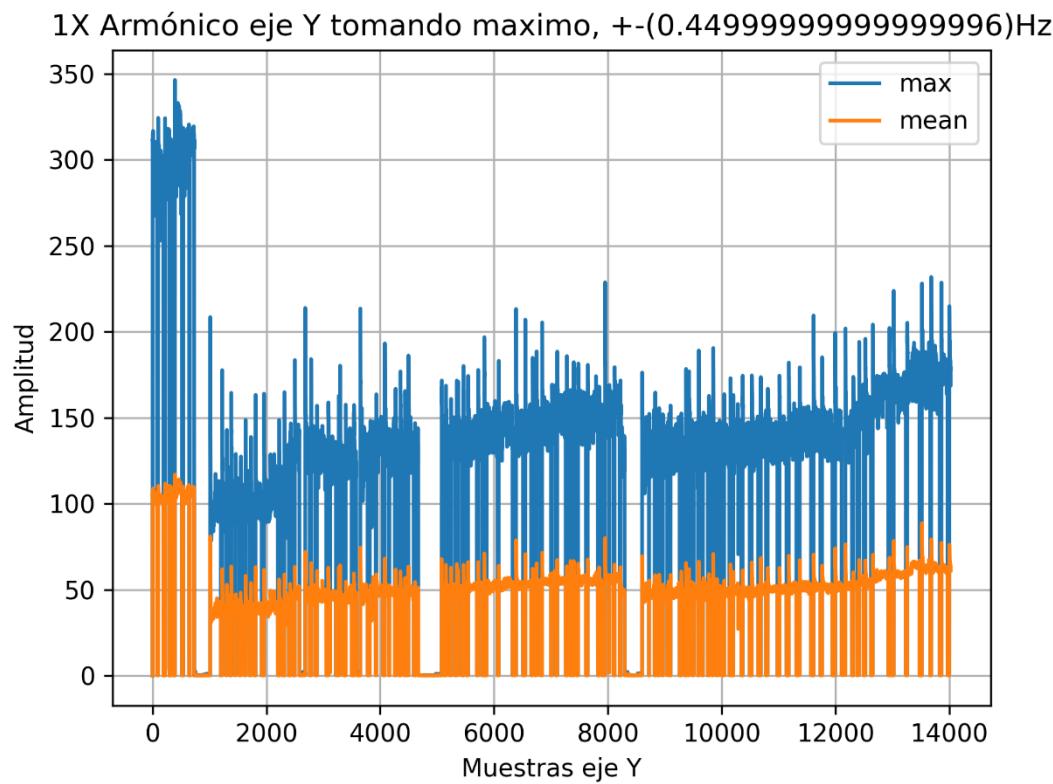


Ilustración 31: Gráfica sin normalizar 1X eje Y

En la ilustración 31 se puede observar como en las muestras anteriores a una parada prolongada en el tiempo del motor se obtienen amplitudes de casi el doble del valor de las obtenidas posteriormente.

Esto se comenta más a fondo en el punto 6.2, aunque ya se puede ver como obteniendo la gráfica normalizada, correspondiente a la ilustración 32, se observa mejor que este eje sí que presenta una amplitud creciente, lo cual puede ser de interés para el análisis del mismo.

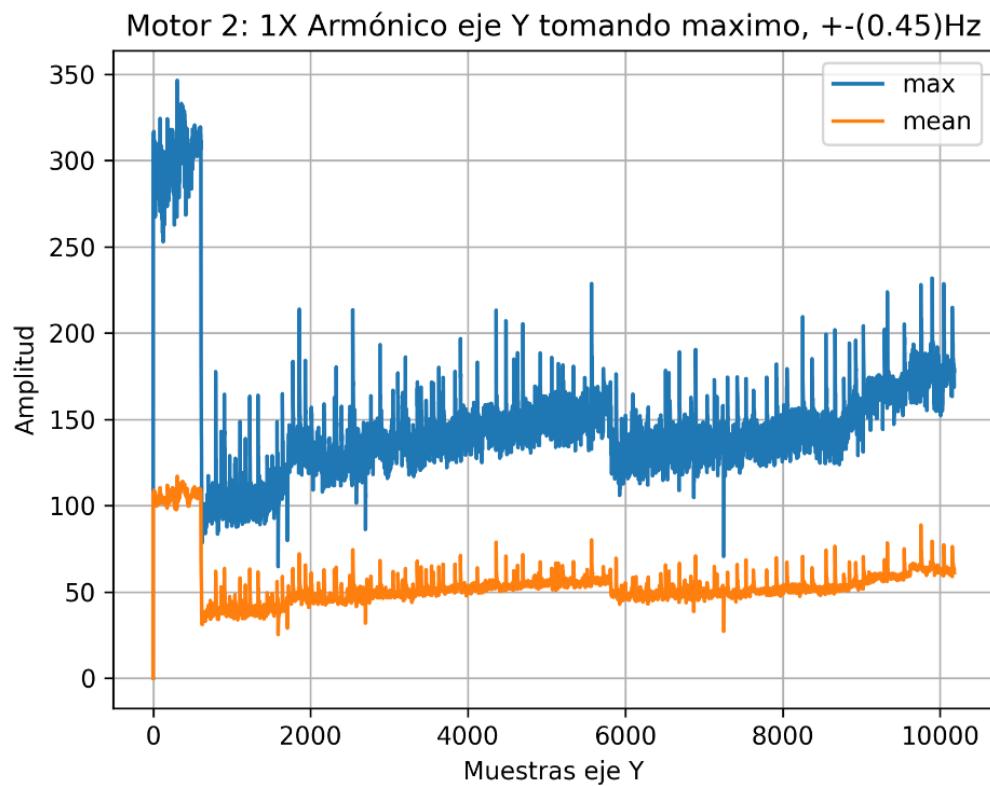


Ilustración 32: Gráfica normalizada 1X eje Y

6.2 Resultados relativos a la velocidad de giro nominal

Una vez obtenido el valor máximo en un rango para cada muestra en el umbral seleccionado ya se puede investigar los posibles fallos relativos al giro nominal.

En el siguiente ejemplo se muestran los resultados normalizados relativos a la velocidad de giro nominal del motor 2 en su eje Z.

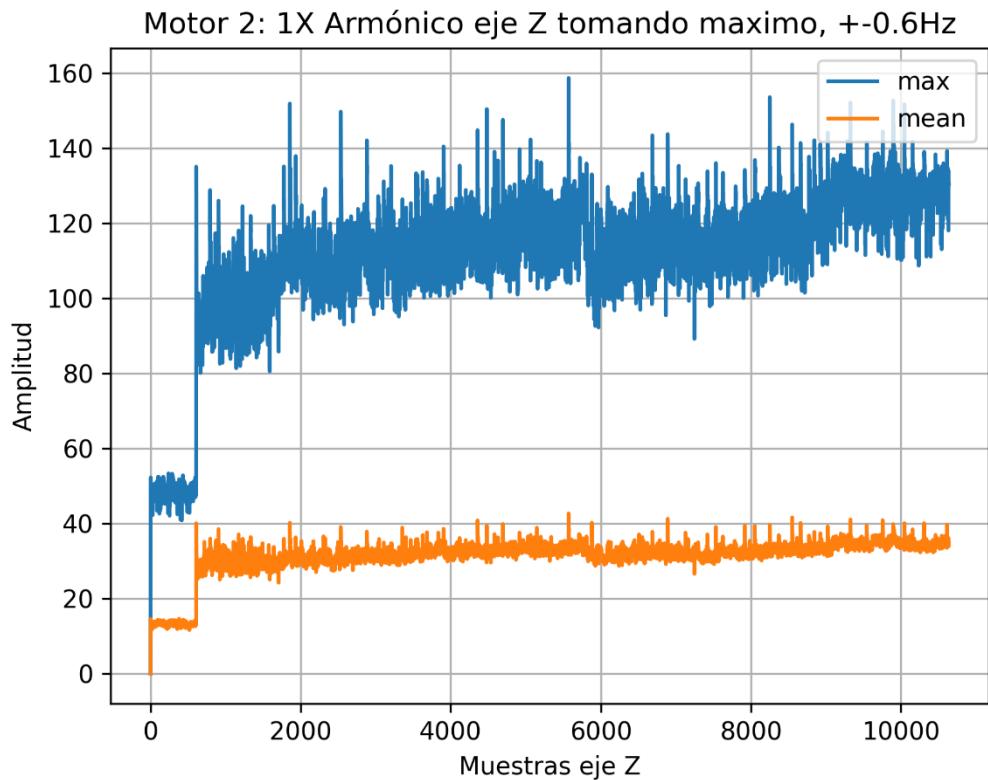


Ilustración 33: Gráfica normalizada 1X ejeZ

Viendo la ilustración 33 se puede observar cómo tras la primera parada los resultados aumentan a prácticamente el doble en el caso de la media y casi al triple si se evalúan los máximos. A partir de ahí los resultados siguen una distribución mucho más estable que poco tiene que ver con las primeras muestras.

Yendo al análisis particular de este eje, se puede observar cómo aumenta ligeramente la amplitud en este eje con el paso del tiempo, y cómo tras la parada del mes de agosto (poco antes de la muestra 6000) vuelve a bajar un poco, pero continua de manera ascendente a partir de ese momento.

Se plantea la hipótesis de que el salto en el valor de las amplitudes sea debido a que el sensor se gira en un momento dado y esto hace que los ejes cambien su posición, con lo cual se muestran las tres graficas de los tres ejes tomadas en el mismo rango de búsqueda para ver si esto coincide.

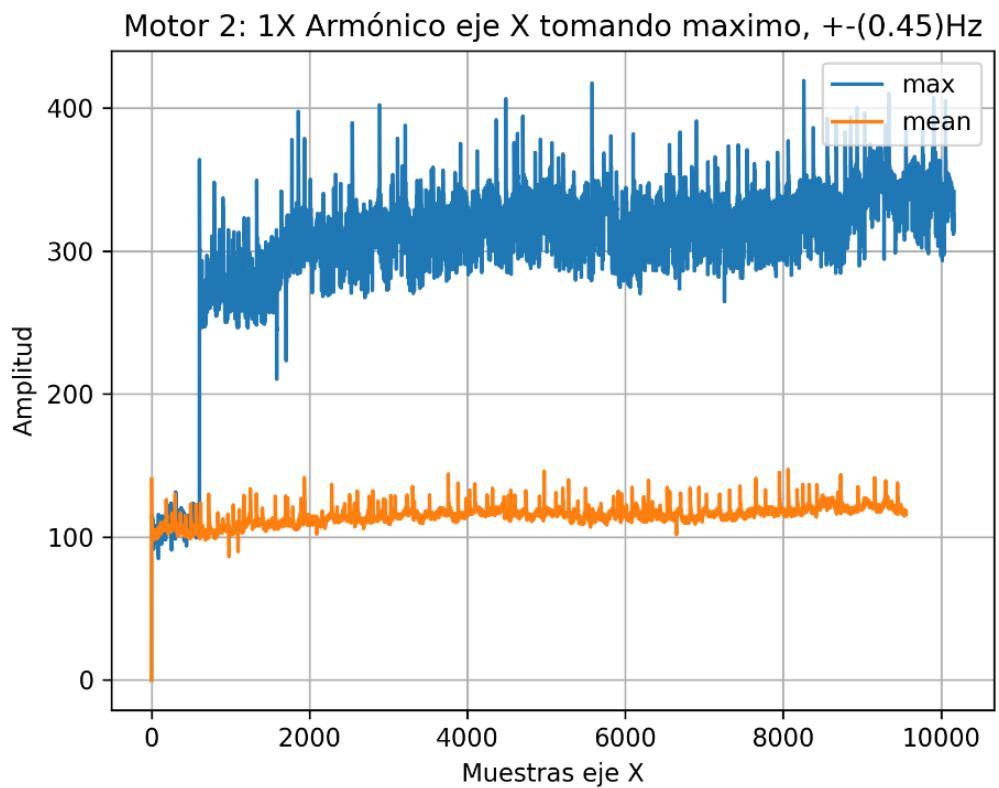


Ilustración 34: Gráfica normalizada 1X eje X

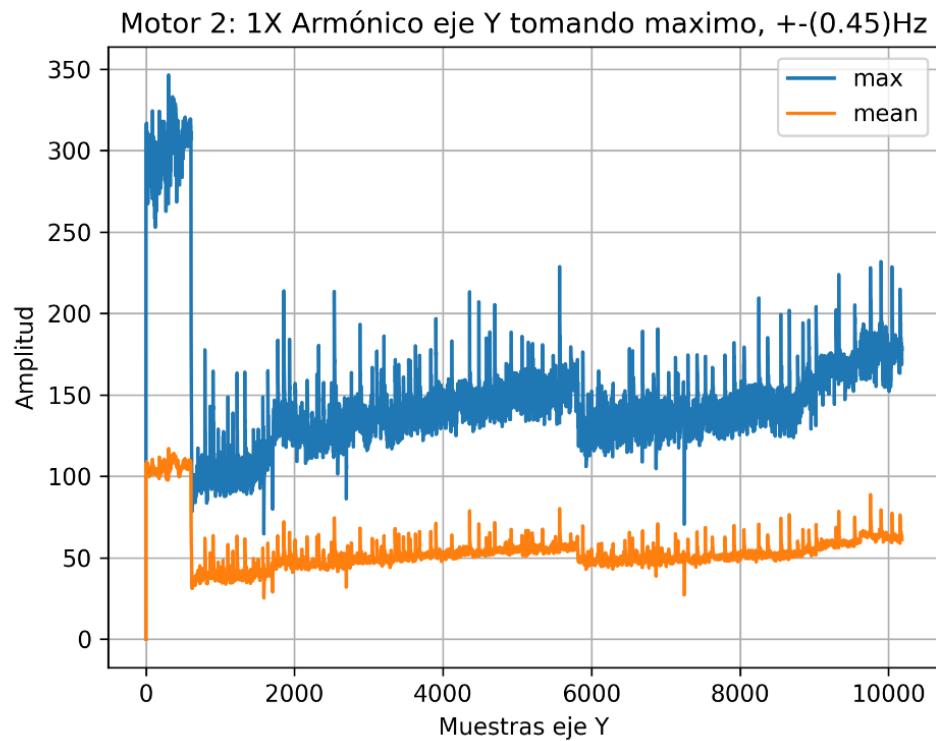


Ilustración 35: Gráfica normalizada 1X eje Y

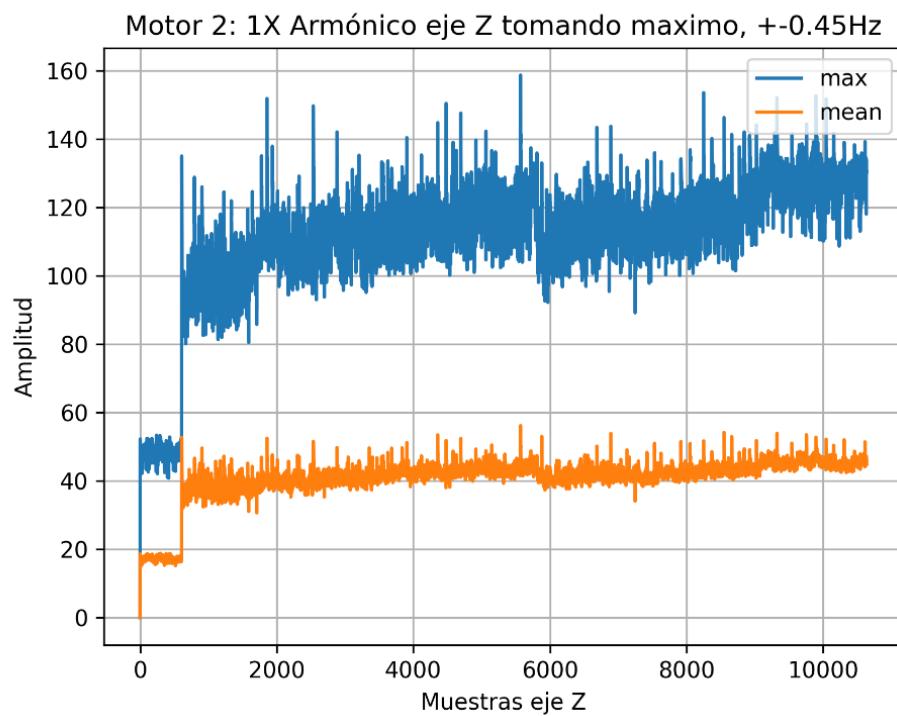


Ilustración 36: Gráfica normalizada 1X eje Z

La gráfica más interesante es la correspondiente a la ilustración 35, en la que se ve que el eje Y tanto después de la primera parada como tras la parada que se produce en Agosto, la amplitud aumenta progresivamente en valor, lo cual puede hacer pensar que esté produciéndose un desgaste y debido a esto aumente el valor.

Para analizar si este aumento de la amplitud es significativo y se puede estar ante un caso de desgaste en el motor en este eje se analizan los armónicos 2X y 3X de la frecuencia de giro nominal.

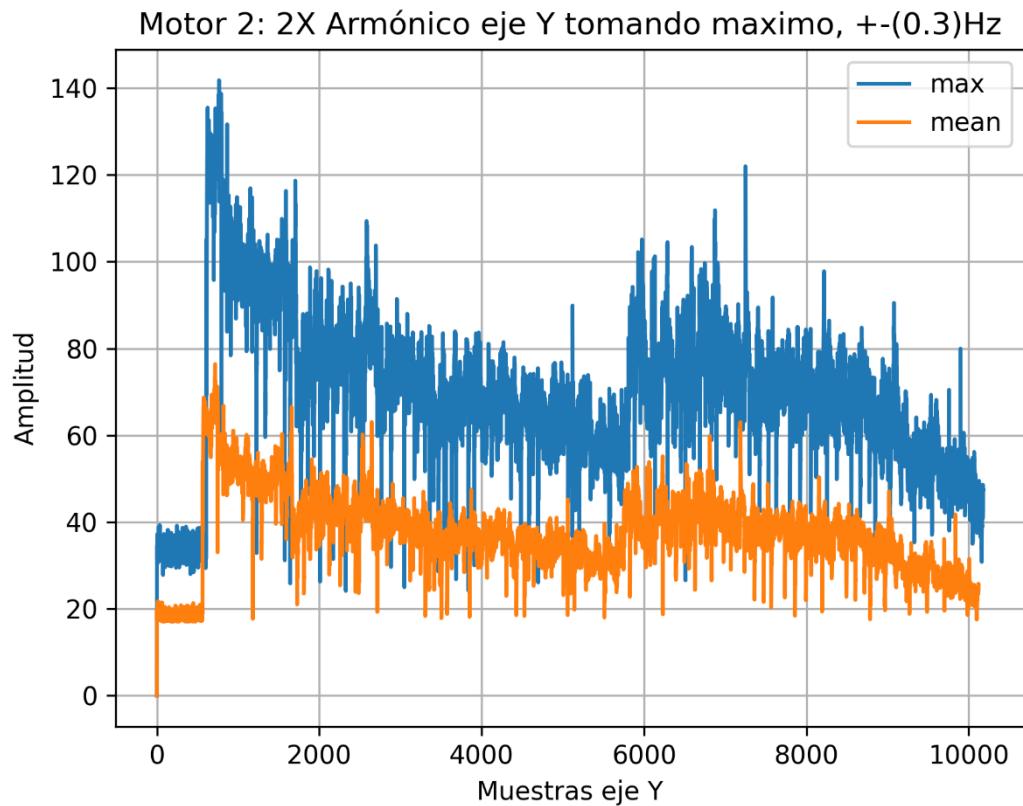


Ilustración 37: Gráfica normalizada 2X eje Y

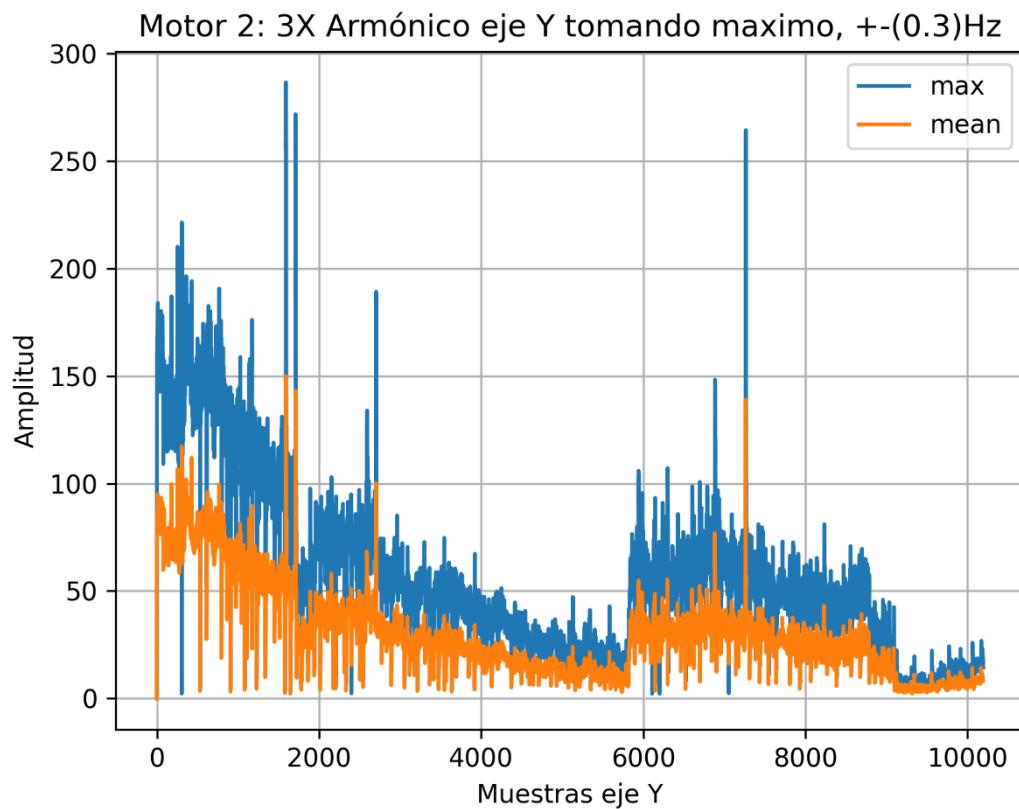


Ilustración 38: Gráfica normalizada 3X eje Z

Como se puede ver en estas ilustraciones 37 y 38, aunque si se ve que hay una variación en la amplitud de los puntos que corresponde a las paradas del motor, el efecto es justo al contrario que en el armónico 1X, la amplitud baja a medida que pasa el tiempo.

Esto puede deberse a la presencia de ruido en la toma de las muestras, que influye mucho en la toma de estos resultados en todos los ejes y motores.

6.3 Resultados relativos a rodamientos

En este apartado se analizarán las gráficas obtenidas sobre el cálculo teórico de los distintos rodamientos en los dos motores. No se presentarán todas las gráficas obtenidas ya que muchas se descartan debido a que no aportan información relevante, y se ha optado por

dejar sólo las que presentan amplitudes de relevancia junto a alguna para detallar porque son despreciables.

6.3.1 BPFI

En este caso se empezará por el motor 1, los fallos de pista interna, denominados BPFI. En este caso en el motor 1 normalizando los resultados en el eje X tan solo se obtienen 2000 muestras con una amplitud que apenas llega a la decena en cuanto a valor. Como se puede ver en la ilustración 39, una nueva muestra de que tan solo aparece ruido y realmente estos resultados son despreciables. Los valores máximos eran tan poco representativos que ni siquiera aparecen.

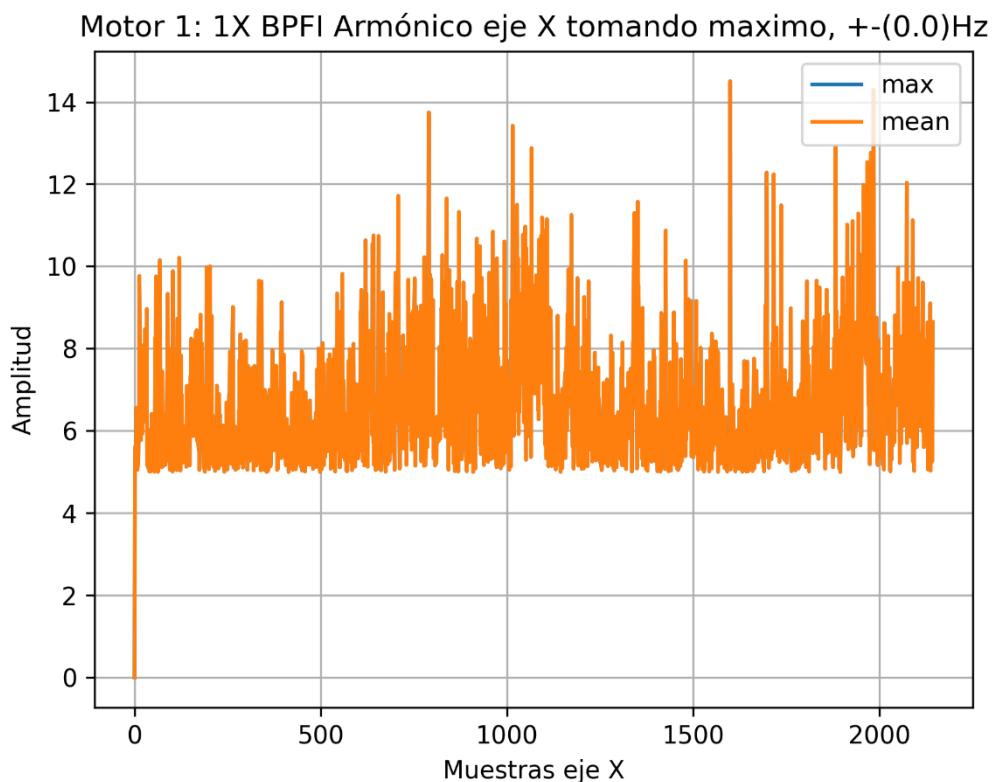


Ilustración 39: Gráfica normalizada IX eje X

Visto este resultado se procede a realizar este mismo calculo, pero en el motor 2, buscando resultados más relevantes.

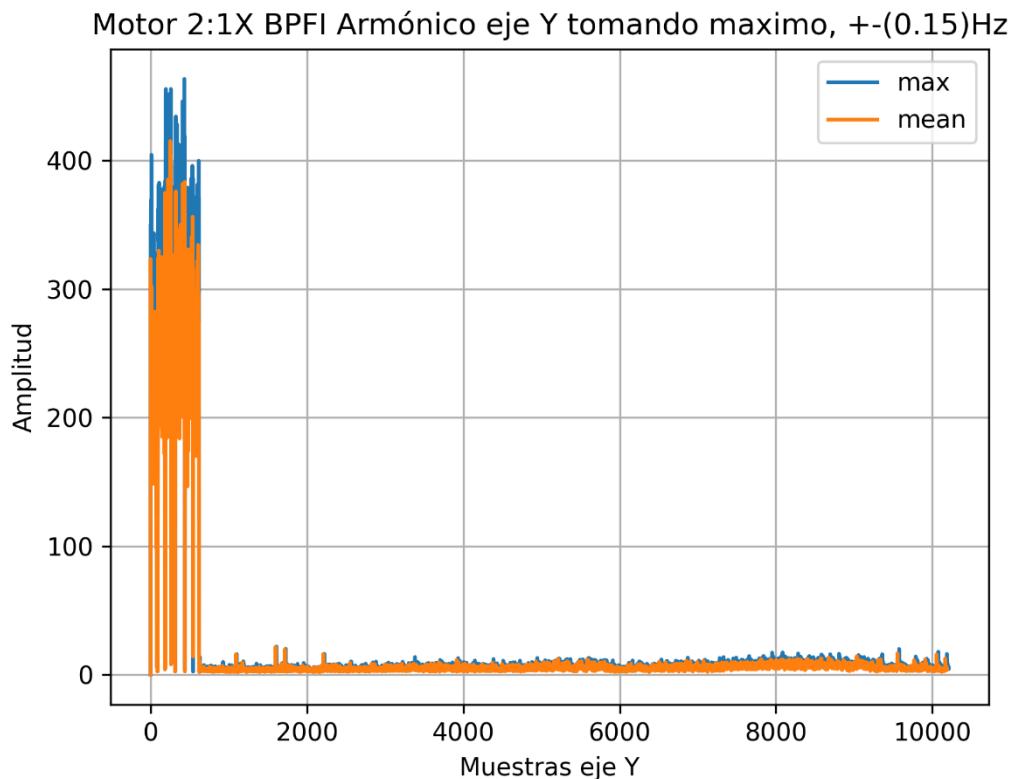


Ilustración 40: Gráfica normalizada 1X eje Y

Tal y como se puede ver en la ilustración 40, parece que antes de la primera parada en el tiempo se presentaban amplitudes de un valor muy alto, desapareciendo casi totalmente a partir de ese momento. Quizá puede ser una señal de que este rodamiento se encontrara desgastado y se produjera un mantenimiento reforzando o cambiando la pieza. En cuanto al eje Z la gráfica es casi idéntica, mientras que para el eje X los valores son mucho más pequeños.

Se calcula para el segundo armónico la gráfica, pero ésta como se puede ver en la ilustración 41 ya no sigue este mismo patrón, así como tampoco ocurre en el eje Z.

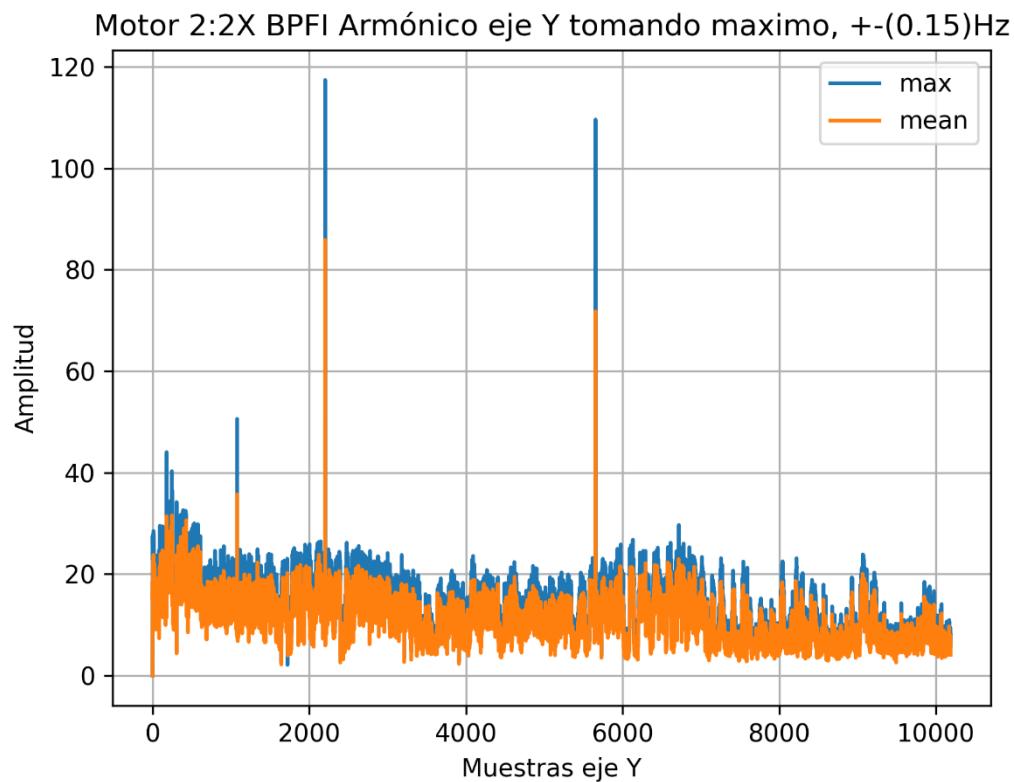


Ilustración 41: Gráfica normalizada 2X eje Y

6.3.2 BPFO

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para el fallo en la pista externa del rodamiento.

En el motor 2, se encuentran las siguientes gráficas, 42 para el primer armónico y 43 correspondiente con el segundo.

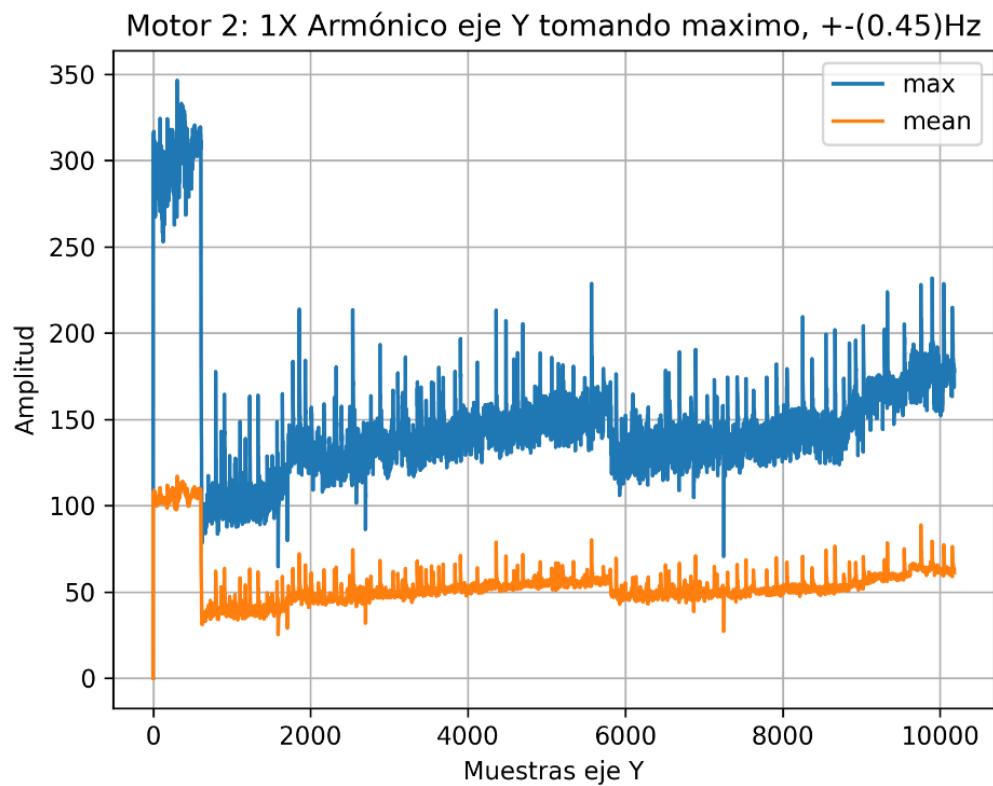


Ilustración 42: Gráfica normalizada 1X eje Y

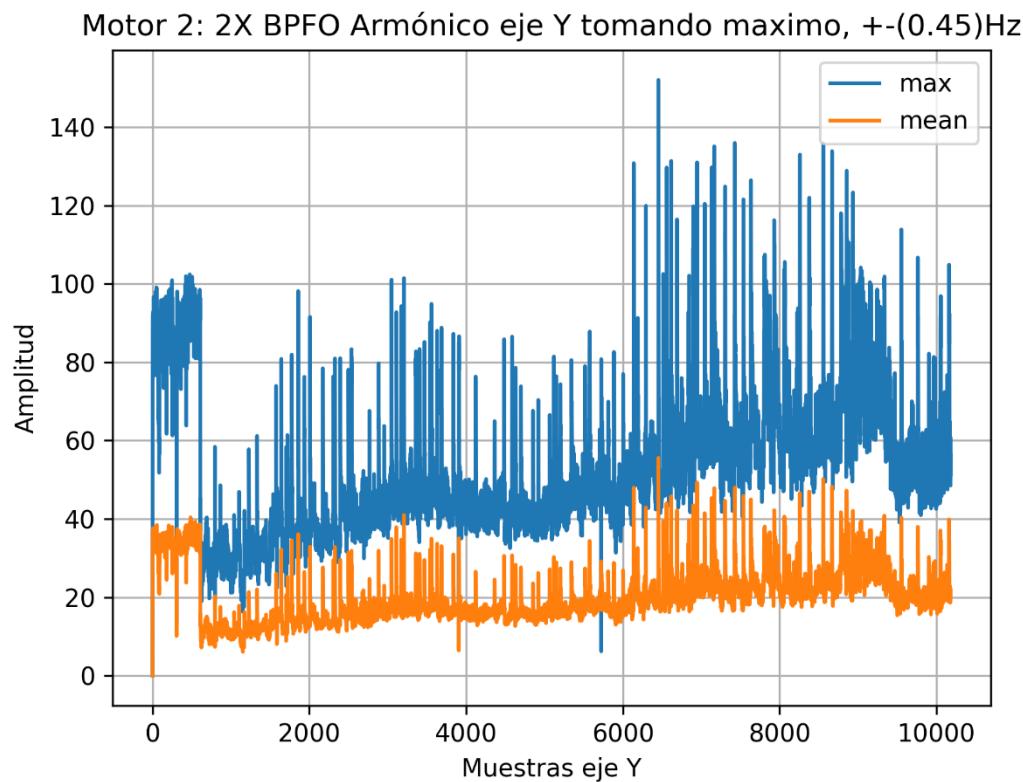


Ilustración 43: Gráfica normalizada 2X eje Y

Este es uno de los resultados más significativos obtenidos. En ambos armónicos, ilustraciones 42 y 43, se ve como después de la primera parada de motores (alrededor de la muestra 500) el valor de su amplitud baja, quizás muestra de que se puede haber realizado un mantenimiento en el motor.

Posteriormente, se puede ver claramente como esta amplitud aumenta progresivamente con el paso del tiempo, indicando que el desgaste del rodamiento está haciendo mella en la pieza.

Para el resto de los ejes en este motor no se obtienen resultados relevantes.

6.3.3 BSF y FTF

Se agrupan estos dos fallos en rodamientos debido a que los resultados que se han obtenido no han sido nada concluyentes y no se puede obtener información relevante de ellos.

Con el fin de representar esto se muestran dos ilustraciones, 44 y 45, en las cuales se puede observar cómo los valores de las amplitudes en las muestras obtenidas son muy cercanos a 0, lo cual indica que tan solo es ruido lo captado en estas frecuencias.

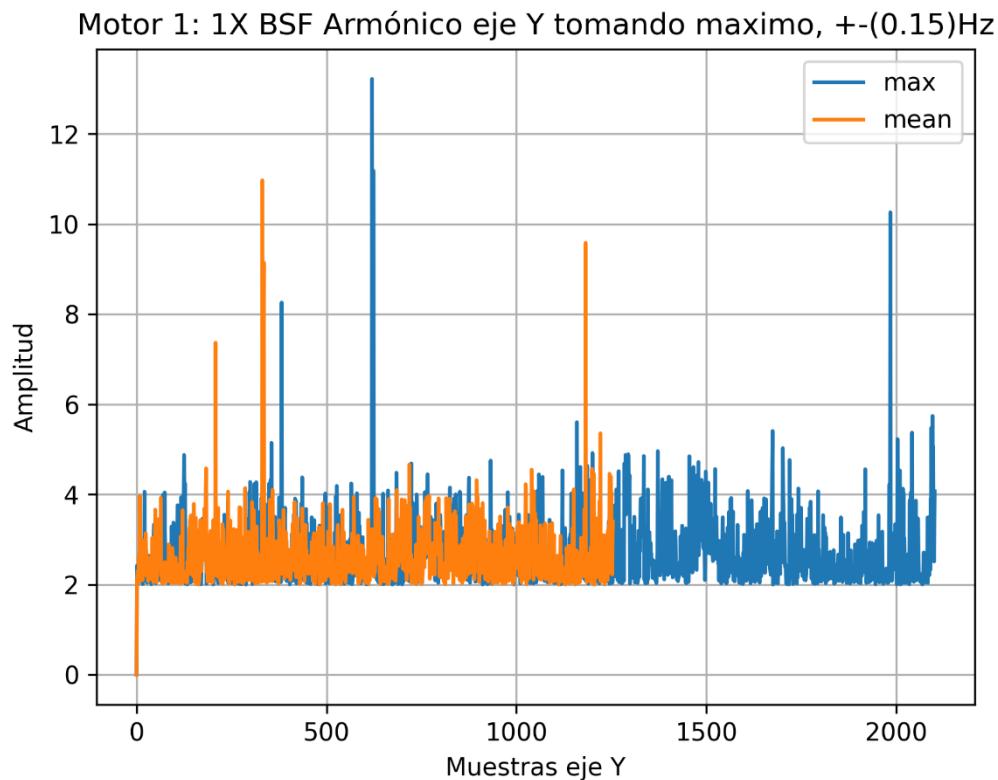


Ilustración 44: Gráfica normalizada 1X eje Y

Como se puede apreciar, tras normalizar resultados, en la ilustración 44 tan solo aparecen apenas 2000 muestras y con amplitud de valor correspondiente a ruido. De hecho a partir de algo más de la muestra 1000, las amplitudes de la línea correspondiente al cálculo de la media desaparecen debajo del mínimo de 2 y dejan de aparecer en la gráfica.

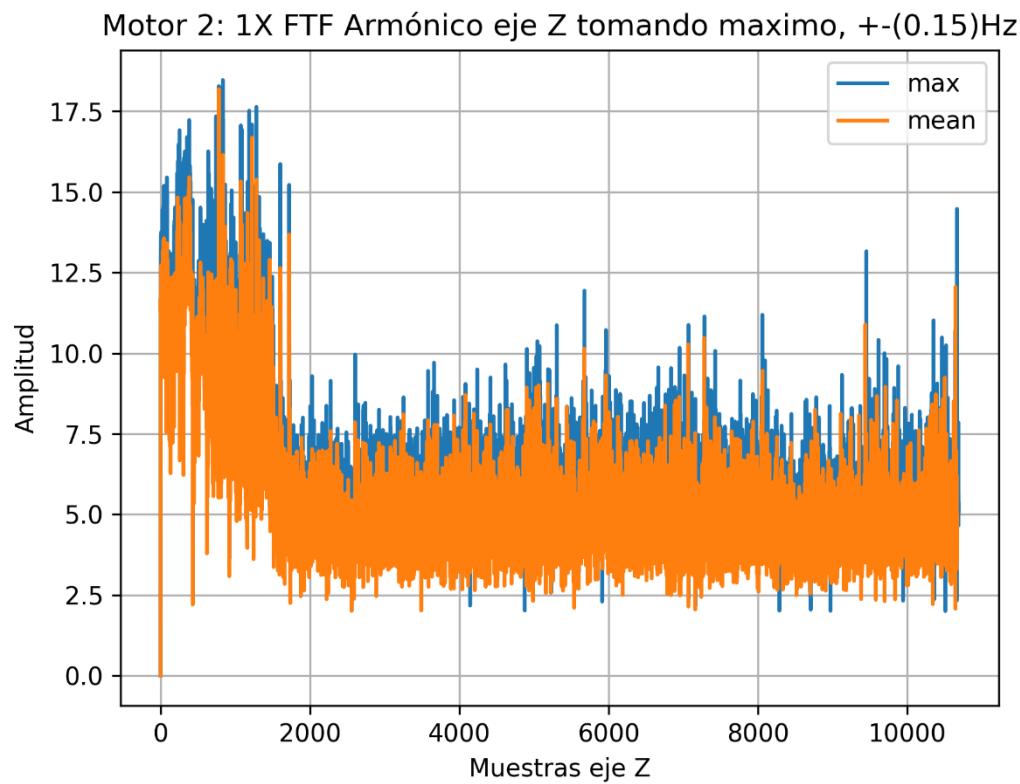


Ilustración 45: Gráfica normalizada 1X eje Y

En la ilustración 45 se observa cómo antes de la primera parada del motor se manejan valores de una amplitud superior que posteriormente no aparecen, lo cual hace indicar junto al resto de medidas anteriores que es posible que se realizara un mantenimiento del motor en ese momento.

6.4 Resultados relativos a la frecuencia de giro de las aspas del ventilador

Las aspas del ventilador de los motores analizados están acoplados a ventiladores que se encargan de mover materiales.

Como en ambos motores el número de aspas es el mismo, ocho, el cálculo teórico del punto donde se puede encontrar el error es sencillo, hallándose multiplicando la velocidad de giro nominal del motor por el número de aspas del ventilador.

En el eje Z del motor 2 se obtienen los siguientes resultados (ilustraciones 46, 47 y 48):

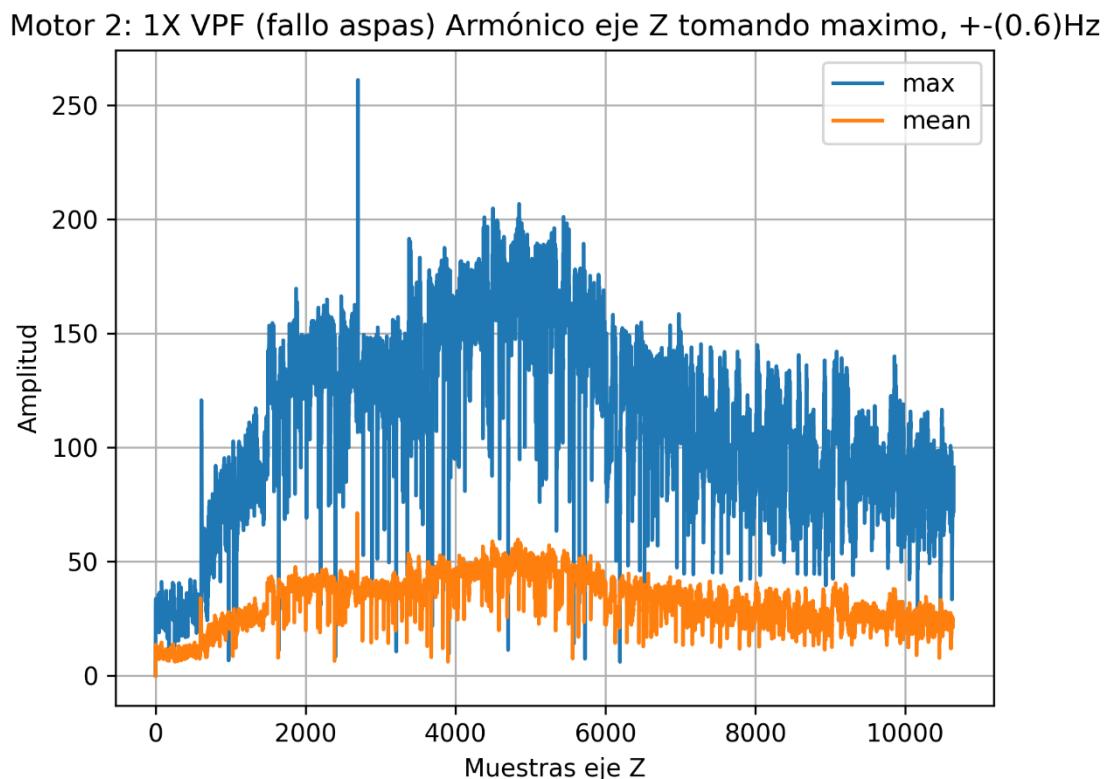


Ilustración 46: Gráfica normalizada 1X eje Z

Motor 2: 2X VPF (fallo aspas) Armónico eje Z tomado maximo, +-(0.6)Hz

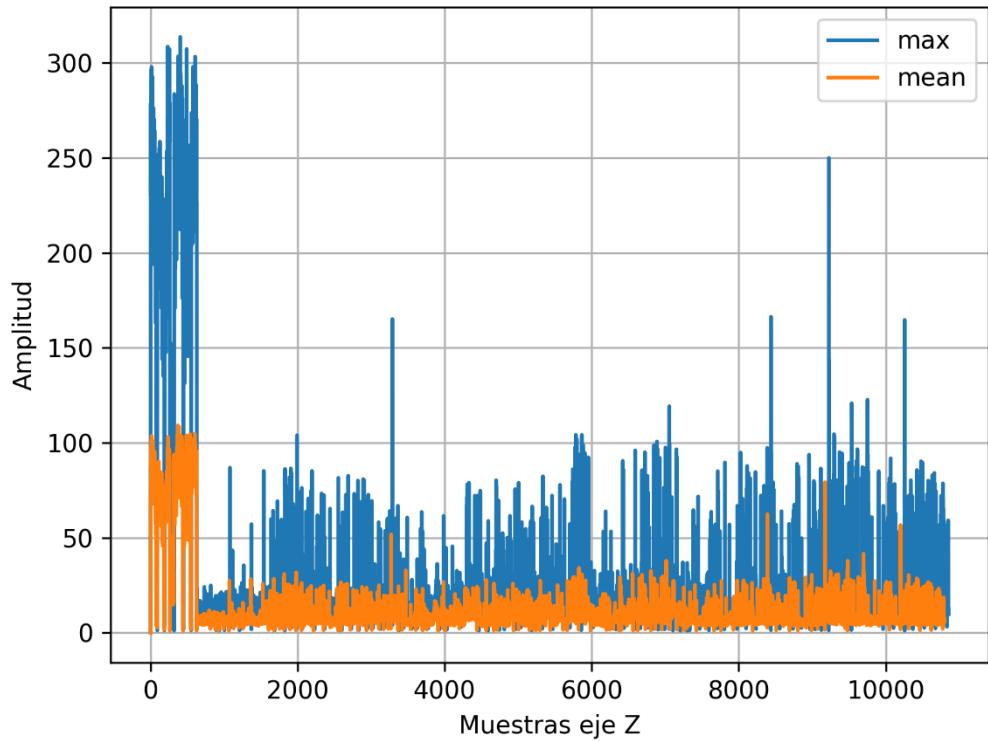


Ilustración 47: Grafica normalizada 2X eje Z

Motor 2: 3X VPF (fallo aspas) Armónico eje Z tomando maximo, +- (0.45)Hz

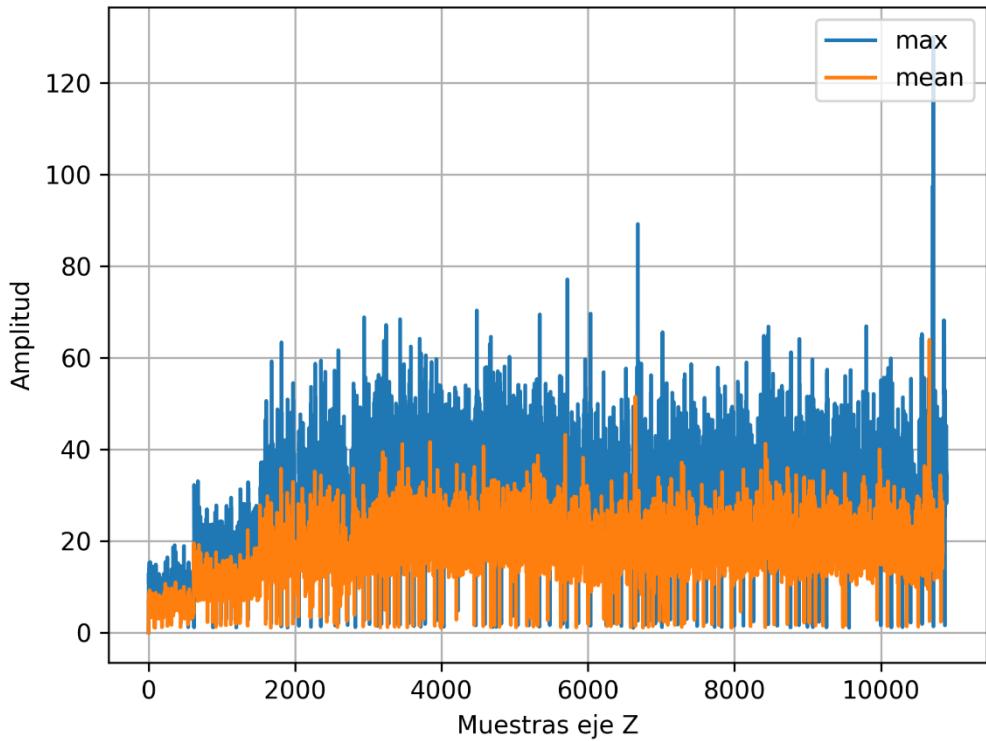


Ilustración 48: Gráfica normalizada 3X eje Z

En el primer armónico se puede ver como aumenta para finalmente bajar en el tiempo de nuevo, con amplitudes importantes. En el 2X ocurre lo mismo que en el eje Z de este mismo motor, las muestras antes de la parada son de gran amplitud y luego pasa a ser ruido.

Y por último en el tercer armónico su pico tiene una amplitud que aumenta lentamente hasta mantenerse estable en el tiempo.

Por otro lado, en el motor 1 aparecen en los tres ejes en su armónico 1X valores de amplitud muy elevados aunque no aumentan con el paso del tiempo. Los valores de los armónicos 2X, 3X, no coinciden con grandes amplitudes.

Aunque se mantienen estables con valores altos tal y como se puede ver en la ilustración 49, no se puede confirmar que existe un desgaste en estas aspas ya que no aumenta en el tiempo.

Motor 1: 1X VPF (fallo aspas) Armónico eje X tomando maximo, +- (0.45)Hz

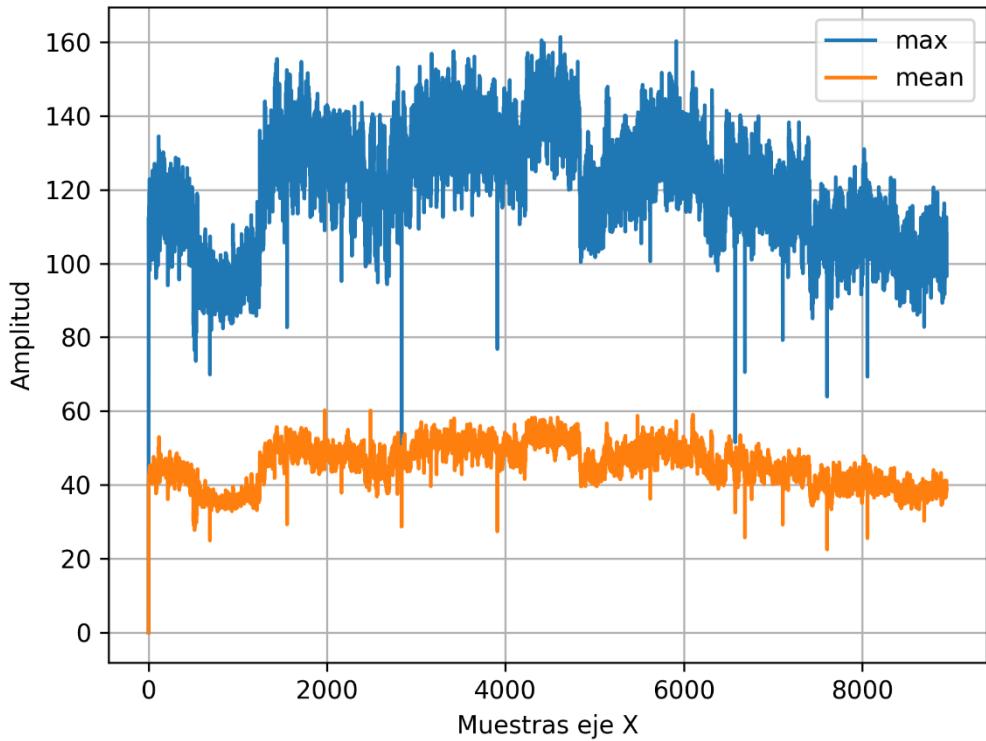


Ilustración 49: Gráfica normalizada 1X eje X

7. Planificación

El desarrollo de gran parte del proyecto se planificó sobre 6 meses que corresponden al periodo de ejecución de la beca realizada en el IUTA (Instituto Universitario de Tecnología Industrial de Asturias) en el proyecto “*Detección y diagnosis en tiempo real de anomalías de funcionamiento de motores eléctricos en la industria del cemento mediante tecnologías IoT*” durante el cual se trabajó entre los meses de Julio y Diciembre de 2022, con una dedicación diaria de cinco horas de lunes a viernes.

Además de este periodo, también se trabajó durante otro mes más en periodos intermitentes con el fin de ajustar y añadir la documentación necesaria para la realización de este documento.

- Estudio y definición de objetivos: Durante las primeras 2 semanas se investiga sobre el tema escogido y se hace una previsión del alcance de los objetivos planteados.
- Investigación teórica del proyecto: De la semana 2 a la 8 se procede al estudio y documentación de “papers” con el fin de elaborar el estado del arte del proyecto.
- Establecimiento de entorno de trabajo: Entre la semana 8 y 10 se establece el entorno de trabajo desde la instalación desde cero hasta la incorporación a la arquitectura del sistema de monitorización del proyecto.
- Desarrollo inicial y pruebas preliminares: De la semana 10 a la 13 se inicia la codificación de los primeros acercamientos utilizando herramientas como Excel y MATLAB. Se crean y prueban métodos estudiados en el estado del arte.
- Desarrollo de código y generación de resultados: Entre la semana 13 y 20 ocurre el grueso del proyecto, momento en el cual utilizando Python se aplican las técnicas definidas en el estado del arte para crear un código el cual ayuda a

obtener los resultados del proyecto. Durante toda esta fase y la siguiente además de código se documenta semana a semana los avances y modificaciones realizadas. Esto se puede consultar en el repositorio que se encuentra en el anexo.

- Ajuste de resultados: Aproximadamente de la semana 20 a 25 se ajustan los resultados obtenidos a partir de la normalización del código utilizado.
- Documentación del proyecto: Desde la primera semana hasta la entrega, semana 31, se crea añade y modifica la documentación existente con el fin de crear este documento y entregar el trabajo realizado. En las últimas semanas se ajustan los objetivos y alcance respecto a los cambios que han surgido durante la realización del proyecto.

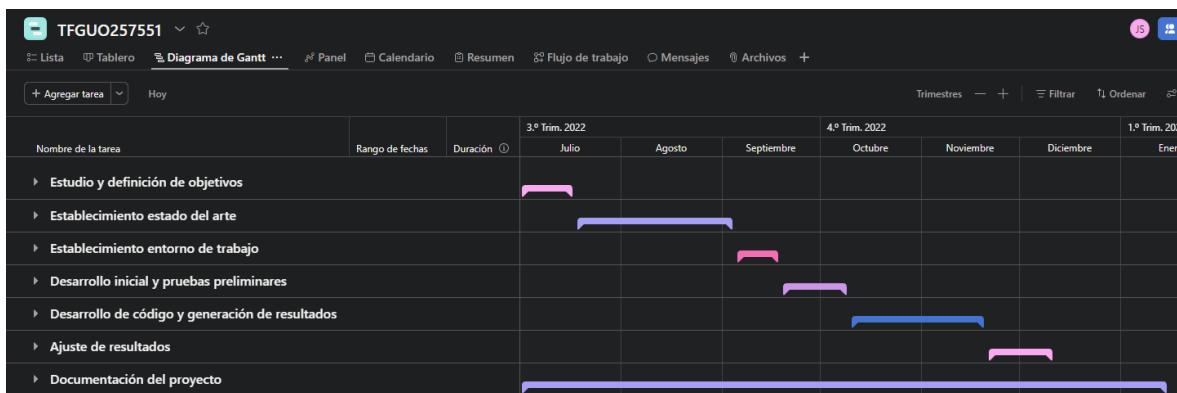


Ilustración 50: Diagrama Gantt planificación

El diagrama responde a los tiempos de manera precisa salvo en el apartado de documentación cual fue realizado en parte durante todo el periodo del 3er trimestre de 2022 pero también se continuó trabajando más adelante durante los dos años siguientes. Para su mejor visualización se añadió así. Se puede consultar en el repositorio que se adjunta en el anexo.

En definitiva, la dedicación total del proyecto en horas ha sido aproximadamente de 480 horas, unos 6 meses durante 20 horas a la semana.

8. Conclusiones

Tras la revisión de los resultados y los objetivos iniciales marcados en el proyecto, se concluye que tanto el objetivo correspondiente al estudio del estado del arte sobre análisis, detección y diagnóstico de fallos en motores, como el relativo al desarrollo de una metodología de trabajo para el análisis de vibraciones, se han cumplido al completo.

Sin embargo, en cuanto a los dos siguientes objetivos, el desarrollo de un sistema de detección temprana de anomalías de funcionamiento en motores eléctricos y el diagnóstico de anomalías detectadas en motores eléctricos, se puede decir que se han cumplido solo de forma parcial.

Aunque es cierto que los resultados obtenidos sirven para realizar un diagnóstico de anomalías detectadas en motores eléctricos como con los que se estudiaron y su detección temprana, el sistema no se ha desarrollado, pero se ha desarrollado una metodología de análisis a seguir que se puede implementar para conseguir estos objetivos.

El desarrollo de este proyecto sobre un modelo de datos real ha hecho que los resultados no hayan sido los esperados en la mayor parte de los casos. No se han detectado anomalías evidentes en los motores, rodamientos o aspas, debido a factores externos, estando estos motores sometidos a un mantenimiento que hace que estas anomalías no se lleguen a evidenciar.

En lo personal, trabajar con un caso real de detección de anomalías, realizando un estudio teórico del diagnóstico de anomalías en estos motores y sus herramientas a través del estudio de la frecuencia de ondas me ha dado la oportunidad de aprender sobre este campo que no se estudia durante el grado.

He observado que este trabajo puede ser una buena base para desarrollar un sistema que, con esta metodología de detección de anomalías, desarrollada, pueda aplicarse en un caso real de uso como este.

Referencias

- [1] Nadel, S., Elliott, R. N., Shepard, M., Greenberg, S., Katz, G., & de Almeida, A. (2000). Energy-efficient motor systems: A handbook on technology, programs, and policy opportunities.
- [2] Olarte, W., Botero, M., & Cañón, B. (2010). Técnicas de mantenimiento predictivo utilizadas en la industria. *Scientia et technica*, 2(45), 223-226.
- [3] Norma ISO 9001 <https://www.mct.es/documents/74411/81413/ISO-9001.pdf/8b5859cd-3b5d-49d9-996d-69cc4b9f6abb> Última vez visitado: Junio 2023
- [4] Olarte, W., Botero, M., & Cañón, B. (2010). Importancia del mantenimiento industrial dentro de los procesos de producción. *Scientia et technica*, 16(44), 354-356.
- [5] Sexto, L. F. (2008). La evaluación de tareas en un proceso de mantenimiento centrado en la confiabilidad.
- [6] García Pérez, J. A. (2019). [Análisis multisectorial de la viabilidad e impacto de las nuevas tecnologías en el mantenimiento.](#)
- [7] Fernández, F. J. G. (2005). *Teoría y práctica del mantenimiento industrial avanzado*. FC editorial.
- [8] Olarte, W., Botero, M., & Cañón, B. (2010). Técnicas de mantenimiento predictivo utilizadas en la industria. *Scientia et technica*, 2(45), 223-226.
- [9] Russell and Norvig (2021). *Artificial Intelligence: A Modern Approach*
- [10] De Debora.riu - Trabajo propio, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=17614297>

[11] Ortiz Pérez, Á. (2021). *Diseño de algoritmos de diagnóstico de fallos en rodamientos basados en métodos de machine learning aplicados al análisis de vibraciones* (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València).

[12] https://es.wikipedia.org/wiki/Aprendizaje_supervisado Última vez visitado: agosto de 2022

[13] Pozo Gallego, C. D. (2016). Aplicación de técnicas de Machine Learning con regularización al diagnóstico de fallos en motores de inducción.

[14] <https://www.iberdrola.com/innovacion/machine-learning-aprendizaje-automatico> Última vez visitado: agosto de 2022

[15] https://es.wikipedia.org/wiki/Aprendizaje_no_supervisado Última vez visitado: agosto de 2022

[16] Morales, E., & González, J. (2012). Aprendizaje por Refuerzo. *Presentacion En Linea en: https://ccc. inaoep. mx/~ emorales/Cursos/Aprendizaje2/Acetatos/refuerzo. pdf.*

[17] Contreras Alvarez, J. L. (2020). Diseño de un modelo para mantenimiento predictivo en motores de inducción utilizando técnicas de la Industria 4.0.

[18] Albornoz Cabello, G. A. (2021). Aplicación del aprendizaje automático supervisado en el mantenimiento predictivo de los motores eléctricos de inducción en las empresas mineras del Perú.

[19] De Los Ríos Tomalá, G. A. (2019). Mantenimiento predictivo para la supervisión de motores eléctricos aplicando técnicas de inteligencia artificial.

[20] Carrasco Carrasco, M. (2016). Técnicas de regularización en regresión: implementación y aplicaciones.

[21] [Rodamiento - Wikipedia, la enciclopedia libre](#) Última vez visitado: Junio 2023

[22] [▷ ¿Qué es un rodamiento y para qué sirve? \[Ejemplos\]](#) (sadittransmisiones.com) Última vez visitado: Julio 2023

[23] Grupo SKF (2016). Rodamientos y sellos en motores eléctricos y generadores.

[24] [Tipos y Características de Cojinetes de los Motores Eléctricos \(vhindustrial.com\)](#) Última vez visitado: Julio 2023

[25] <https://power-mi.com/es/content/defectos-típicos-en-rodamientos-y-su-identificación-espectral> Visitado por última vez: Julio 2022

[27] Serruto Contreras, N. G. (2020). Implementación de metodología para el diagnóstico de fallas mediante el análisis vibracional en motores eléctricos en la empresa AEI SRL.

[28] Standard, I. S. O. (1998). Mechanical Vibration-Balance Quality Requirements of Rigid Rotors. Part I: Determination of Permissible Residual Unbalance.,

[29] Mendoza Franco, G. A. (2019). Estudio y diagnóstico del estado de operación de motores eléctricos mediante análisis de vibraciones. Propuesta de guía de mantenimiento.

[30] Lagla Taipe, B. R., & Lanche Pineda, P. A. (2016). Desarrollo de estánderes de tolerancia de desalineamiento y su consumo energético de motores eléctricos en el laboratorio de análisis vibracional de la Escuela de Ingeniería de Mantenimiento (Bachelor's thesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo).

[31] Schmidt, A. L. (2013). Fft: Transformada rápida de fourier. Estudiante de Ingenieria en Sistemas de Computación. Universidad Nacional de Sur. Bahia Blanca, Argentina. Marzo 2013.

[32] De la Fraga, L. (2001). La transformada discreta de Fourier y la transformada rápida de Fourier.

[33] [Cómo comprender la norma ISO 15243 | Evolution \(skf.com\)](#) Última vez visitado: Junio 2023

[34] [Que significa zz en un rodamiento \(ejemplos.net\)](#) Última vez visitado: Junio 2023

[35] [Sistema de designación | SKF | SKF](#) Última vez visitado: Junio 2023

[36] [6309 - Rodamientos rígidos de bolas | SKF](#) Última vez visitado: Junio 2023

- [37] Magadán, L., Suárez, F. J., Granda, J. C., & García, D. F. (2023). Low-cost industrial IoT system for wireless monitoring of electric motors condition. *Mobile Networks and Applications*, 28(1), 97-106.

Anexo

En este apartado se proporciona toda la información utilizada durante el proyecto para tratar de cumplir los objetivos y obtener resultados.

Gráficas

A través del siguiente enlace se accede al repositorio en GitHub donde consultar todas las gráficas normalizadas generadas durante el transcurso del proyecto, de las cuales parte se han mostrado como resultados:

- [Repository gráficas](#)

Dentro de la carpeta *results* se proporcionan todas las gráficas normalizadas generadas en el transcurso del proyecto, así como un documento en el que aparecen clasificadas.

Código

A continuación, se muestra el código que se ha desarrollado para obtener los resultados normalizados, así como una breve explicación del mismo.

```
# Importación de las librerías necesarias
import pandas as pd
import scipy
import glob as glob
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.fft import fft, fftfreq

# Variables necesarias para la FFT
F = 5000 # Frecuencia de muestreo
N = 32768 # Número de muestras
SIZE = 32767 # Tamaño esperado de los archivos CSV
timestep = 1/F # Intervalo de tiempo entre muestras
window = np.hanning(N-1) # Ventana de Hann para suavizar los datos

# Directorio de los archivos CSV
all_files =
glob.glob("C:/Users/xuans/OneDrive/Escritorio/CEMENTERA/ficheros_motores/Motor_1/Motor1_AxeX_full/AxeX/16*.csv")

# Lista para almacenar los resultados de la FFT de cada archivo
```

```

file_list = []

# Frecuencia de la FFT
fft_freq = fftfreq(N, d=timestep)
fft_freq = fft_freq[0:int(N/2)] # Se toma solo la mitad del espectro,
ya que es simétrico

# Procesamiento de cada archivo CSV
for f in all_files:
    # Leer el archivo CSV correspondiente
    data = pd.read_csv(f)
    if data.size == SIZE:
        # Convertir los datos en un arreglo numpy y aplicar la ventana
        de Hann
        data = np.concatenate(data.values.tolist(), axis=0)
        fft_res = fft(data * window) # Calcular la FFT
        fft_res = np.abs(fft_res[0:int(N/2)]) / N**2 # Normalizar y tomar
        la mitad del espectro
        file_list.append(fft_res) # Añadir el resultado a la lista
    else:
        exit("Tamaño de archivos incorrecto") # Salir si el tamaño del
        archivo no es el esperado

file_list = np.array(file_list) # Convertir la lista en un arreglo
numpy

# Parámetros para la detección de picos
x = 952 # Frecuencia teórica del primer armónico de BPFO (aprox. 135
Hz)
y = 60 # Rango diferencial para la búsqueda
z = 1 # Diferencial de búsqueda
z2 = round(0.15 * z, 2) # Ajuste del diferencial de búsqueda

# Listas para almacenar los máximos y las medias
maximum = [0]
means = [0]

# Búsqueda de picos en los resultados de la FFT
for elem in file_list:
    max_value = np.argmax(elem[x-y:x+y]) # Encontrar el índice del
    máximo valor en el rango
    max_value = (x - y) + max_value # Ajustar el índice al rango
    original
    ma = np.max(elem[max_value-z:max_value+z]) # Calcular el máximo en
    el rango ajustado
    me = np.mean(elem[max_value-z:max_value+z]) # Calcular la media en
    el rango ajustado
    if (ma > 2.0): # Filtrar valores menores que 2.0
        maximum.append(ma)
    if (me > 2.0):
        means.append(me)

# Gráfica de los resultados
plt.plot(maximum, label="max")
plt.plot(means, label="mean")
plt.title("Motor 1: 1X BPFO Armónico eje X tomando maximo, +-(" +
str(z2) + ") Hz")

```

```
plt.xlabel("Muestras eje X")
plt.ylabel("Amplitud")
plt.grid(True)
plt.legend(loc="upper right")
save_results_to =
'C:/Users/xuans/OneDrive/Escritorio/CEMENTERA/armonicos_especiales/Moto
r_1/BPFO/AxeX/'
plt.savefig(save_results_to + 'BPFO_max_axeX_desviacion_1X(' + str(z2)
+ ') Hz.png', dpi=300)
```

Se adjunta el código (un único fichero) correspondiente a la toma [de frecuencia teórica del primer armónico de BPFO](#), pero este dato, “x” es el único que junto a “y” cambian dependiendo de la gráfica que se quiera obtener. Esto y la obtención del directorio local donde se encuentran almacenadas las muestras son los únicos valores que cambian en la toma de resultados de los distintos errores.

Como explicación del código se puede comenzar con que, para su uso lo primero que se necesitan son las siguientes librerías: para el procesamiento de datos (pandas, numpy), para la realización de la FFT (scipy.fft), para la manipulación de archivos (glob) y para la visualización (matplotlib.pyplot).

Las variables correspondientes para el cálculo de la FFT son “F”, Frecuencia de muestreo, “N” número de muestras, “SIZE” tamaño esperado de los archivos CSV, “timestep” que es el intervalo de tiempo entre muestras y “window” que es la Ventana de Hann que suaviza los datos antes de aplicar la FFT.

Con glob se obtienen los archivos guardados en la maquina local. En la variable “fft_freq” se almacena la mitad del espectro obtenido en el cálculo ya que es simétrico y finalmente para cada archivo CSV se concatenan sus datos en un vector, se le aplica la Ventana de Hann y se añade su resultado a la variable “file_list”.

En el caso que se adjunta, para la detección de picos se busca el valor máximo y la media en el rango especificado alrededor de la frecuencia teórica de interés (135 Hz) y para normalizar los resultados se filtran los valores menores que 2.0 y se almacenan los resultados.

Finalmente, se grafica la amplitud máxima y la media de los resultados de la FFT y se guarda la gráfica en un archivo PNG.

Además, en el mismo repositorio compartido que se menciona en el punto anterior se proporciona el código utilizado para generar las gráficas a partir de las muestras obtenidas.

- [Repositorio código](#)

A través del enlace se puede acceder al repositorio donde, además del código que se ha utilizado para generar los resultados presentados aquí (carpeta *src*), se proporciona el código desarrollado en herramientas como MatLab o Excel para generar resultados que finalmente fueron descartados (carpeta *opt*).

Por otro lado, también se pueden consultar en un documento PDF todas las gráficas generadas durante el desarrollo del proyecto (carpeta *docs*), tal y como se comentó en el punto 9.1, y que no procede añadir a este documento.

Por último, en la carpeta *docs* también se puede consultar la memoria del proyecto del IUTA (Instituto Universitario de Tecnología Industrial de Asturias) en cuyo contexto se ha desarrollado este TFG, la presentación realizada sobre los resultados del proyecto y el justificante de la ponencia realizada.

Datos de los motores

HOJA DE DATOS		WEG			
Motor Trifásico de Inducción - Rotor de Jaula					
Cliente :					
Línea del producto : W22 IE3 Trifásico			Código del producto : 12881896		
Carcasa : 180M Potencia : 22 kW (30 HP) Polos : 2 Frecuencia : 50 Hz Tensión nominal : 400/690 V Corriente nominal : 39.8/23.1 A Corriente de arranque : 330/192 A I _p /I _n : 8.3 Corriente en vacío : 15.0/8.70 A Rotación nominal : 2960 rpm Resbalamiento : 1.33 % Torque nominal : 7.24 kgfm Torque de arranque : 320 % Torque máximo : 320 % Clase de aislamiento : F Factor de servicio : 1.00 Momento de inercia (J) : 0.0968 kgm ² Categoría : N			Tiempo de rotor bloqueado : 16s (frio) 9s (caliente) Elevación de temperatura : 80 K Régimen de servicio : S1 Temperatura ambiente : -20°C hasta +40°C Altitud : 1000 m Grado de protección : IP55 Método de refrigeración : IC411 - TEFC Forma constructiva : B35T Sentido de giro ^a : Ambos Nivel de ruido ^a : 67.0 dB(A) Método de Arranque : Partida directa Masa aproximada ^b : 191 kg		
Potencia 25% 50% 75% 100%			Fuerzas en la fundación		
Rendimiento (%) 0.000 92.0 92.7 92.7			Tracción máxima : 223 kgf Compresión máxima : 414 kgf		
Cos φ 0.00 0.69 0.80 0.86					
Pérdidas en puntos de funcionamiento estándar (velocidad; par), en porcentaje de la potencia nominal					
P1 (0,0;1,0)	P2 (0,5;1,0)	P3 (0,25;1,0)	P4 (0,0;0,5)		
7.6	6.3	5.7	3.7		
P5 (0,5;0,5)	P6 (0,5;0,25)	P7 (0,25;0,25)			
Delantero : 6311 ZZ C3 Trasero : 6211 ZZ C3 Tipo de cojinete : VRing Sello : VRing Intervalo de lubricación : - Cantidad de lubricante : - Tipo de lubricante : Mobil Polyrex EM					
Notas					
Esta revisión reemplaza y cancela la anterior, la cual deberá ser eliminada. (1) Mirando la punta delantera del eje del motor. (2) Medido a 1m y con tolerancia de +3dB(A). (3) Masa aproximada sujetos a cambios después del proceso de fabricación. (4) Al 100% de la carga completa.					
Los valores indicados son valores promedio con base en ensayos y para alimentación en red senoidal, sujetos a las tolerancias de la norma IEC 60034-1.					
Rev.	Resumen de los cambios		Ejecutado	Verificado	Fecha
Ejecutor					
Verificador					
Fecha	09/06/2023		Página	Revisión	
			1 / 2		

Propiedad de WEG S/A. Prohibida la reproducción sin permiso.
Sujeto a cambios sin previo aviso

HOJA DE DATOS		weg				
Motor Trifásico de Inducción - Rotor de Jaula						
Cliente :						
Línea del producto	: W22 IE2 Trifásico	Código del producto :	13220060			
		Catalog # :	E01536EP3Y180MF3-W22			
Carcasa	: 160M	Tiempo de rotor bloqueado	: 14s (frio) 8s (caliente)			
Potencia	: 15 kW (20 HP)	Elevación de temperatura	: 80 K			
Polos	: 2	Régimen de servicio	: S1			
Frecuencia	: 50 Hz	Temperatura ambiente	: -20°C hasta +40°C			
Tensión nominal	: 400/690 V	Altitud	: 1000 m			
Corriente nominal	: 27.6/16.0 A	Grado de protección	: IP55			
Corriente de arranque	: 204/118 A	Método de refrigeración	: IC411 - TEFC			
I _{p1n}	: 7.4	Forma constructiva	: B3T			
Corriente en vacío	: 9.30/5.39 A	Sentido de giro*	: Ambos			
Rotación nominal	: 2945 rpm	Nivel de ruido ²	: 67.0 dB(A)			
Resbalamiento	: 1.83 %	Método de Arranque	: Partida directa			
Torque nominal	: 4.96 kgfm	Masa aproximada ³	: 136 kg			
Torque de arranque	: 260 %					
Torque máximo	: 310 %					
Clase de aislamiento	: F					
Factor de servicio	: 1.00					
Momento de inercia (J)	: 0.0517 kgm ²					
Categoría	: N					
Potencia	25%	50%	75% 100%			
Rendimiento (%)	90.8	91.0	91.3			
Cos φ	0.47	0.71	0.81 0.86			
Fuerzas en la fundación						
Tracción máxima	: 171 kgf					
Compresión máxima	: 307 kgf					
Pérdidas en puntos de funcionamiento estándar (velocidad; par), en porcentaje de la potencia nominal						
P1 (0,9;1,0)	P2 (0,5;1,0)	P3 (0,25;1,0)	P4 (0,9;0,5)	P5 (0,5;0,5)	P6 (0,5;0,25)	P7 (0,25;0,25)
9.5	8.5	7.6	4.2	2.9	1.7	1.2
Delantero Trasero						
Tipo de cojinete	: 6309 ZZ C3	6209 ZZ C3				
Sello	: VRing	VRing				
Intervalo de lubricación	: -	-				
Cantidad de lubricante	: -	-				
Tipo de lubricante	: Mobil Polyrex EM					
Notas						
Esta revisión reemplaza y cancela la anterior, la cual deberá ser eliminada. (1) Mirando la punta delantera del eje del motor. (2) Medido a 1m y con tolerancia de +3dB(A). (3) Masa aproximada sujetos a cambios después del proceso de fabricación. (4) Al 100% de la carga completa.						
Rev.	Resumen de los cambios		Ejecutado	Verificado	Fecha	
Ejecutor					Página	
Verificador					Revisión	
Fecha	09/06/2023		1 / 2			

Propiedad de WEG S/A. Prohibida la reproducción sin permiso.
Sujeto a cambios sin previo aviso