

Universidad de Huelva

Departamento de Ingeniería Minera, Mecánica y
Energética



Analysis and discrimination through neuronal and PSD approximations of the vibrational monitoring of an impulsion system

Memoria para optar al grado de doctor
presentada por:

Javier Castilla Gutiérrez

Fecha de lectura: 4 de marzo de 2021

Bajo la dirección de los doctores:

Juan Carlos Fortes Garrido

José Miguel Dávila Martín

Huelva, 2021



Universidad de Huelva

**Programa Oficial de Doctorado:
CIENCIA Y TECNOLOGIA INDUSTRIAL Y AMBIENTAL**



ANALYSIS AND DISCRIMINATION THROUGH NEURONAL AND PSD APPROXIMATIONS OF THE VIBRATIONAL MONITORING OF AN IMPULSION SYSTEM

Memoria para optar al grado de Doctor, presentada por:

Javier Castilla Gutiérrez

Bajo la dirección de los Doctores:

Juan Carlos Fortes Garrido

José Miguel Dávila Martín

Noviembre - 2020

Agradecimientos:

Esta tesis es resultado del esfuerzo, la constancia, la entrega y la paciencia.

Estos nunca se hubieran alineados sin el apoyo de mi mujer, que mantuvo la constancia y paciencia de aguantar cada día, semana, mes y año que duró todo.

Mis padres, por el esfuerzo que tuvieron para darme una educación y mostrarme que el único camino para conseguir las cosas era la entrega sin descanso.

Y por último mi hermano, que siempre ha estado conmigo en lo bueno y lo malo.

Como dijo Walter Bonatti “el tiempo hace justicia y siempre premia la lógica”

Y no puedo dejar de agradecer a mis directores de tesis, que han sido ejemplo y modelo a seguir y en especial al que ya se ha convertido en amigo, Juan Carlos Fortes.

ÍNDICE:

	Pag.
ABSTRACT	1
RESUMEN	3
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	7
CAPÍTULO II: PROBLEMÁTICA Y OBJETIVOS	13
2.1. Problemática de las metodologías predictivas	13
2.2. Objetivos	20
2.2.1. Objetivo general	20
2.2.2. Objetivos específicos	22
2.2.3. Aportaciones científicas de esta tesis	24
CAPÍTULO III: ESTADO DEL ARTE	27
3.1. Análisis vibracional	27
3.2. Análisis neuronal	34
CAPITULO IV: MATERIALES Y MÉTODOS	49
4.1. Área de estudio	49
4.2. Equipo estudiado	49
4.3. Elementos de sujeción	51
4.4. Adquisición, procesamiento y análisis de datos	53
4.4.1. Análisis de vibración	53
4.4.2. Análisis neuronal	67
CAPITULO V: RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LA APROXIMACIÓN POR LEVENBERG-MARQUART	71
5.1. Análisis con todas las variables	71
5.1.1. Análisis con todas las variables de todos los años	72
5.1.2. Análisis de todas las variables de años pares	74
5.1.3. Análisis de todas las variables de años impares	77
5.1.4. Resultado del análisis de todas las variables	80
5.2. Análisis sin la frecuencia característica del equipo	81
5.2.1. Análisis sin SPEED de todos los años	81
5.2.2. Análisis sin SPEED de años pares	83
5.2.3. Análisis sin SPEED de años impares	86
5.2.4. Resultado del análisis sin la frecuencia característica del equipo	88
5.3. Análisis según posiciones con todas las variables	89
5.3.1. Posición 3 axial	90
5.3.2. Posición 3 horizontal	90
5.3.3. Posición 3 vertical	91
5.3.4. Posición 4 axial	92

5.3.5. Posición 4 horizontal	93
5.3.6. Posición 4 vertical	94
5.3.7. Resultado del estudio	94
5.4. Análisis según posiciones sin SPEED	97
5.4.1. Posición 3 axial	97
5.4.2. Posición 3 horizontal	98
5.4.3. Posición 3 vertical	99
5.4.4. Posición 4 axial	100
5.4.5. Posición 4 horizontal	100
5.4.6. Posición 4 vertical	101
5.4.7. Resultado del estudio	102
5.5. Conclusiones del Capítulo V	106
5.5.1. Caracterización por RNA para la determinación de la posición y eje más sensible	106
5.5.2. Caracterización por RNA para la determinación de la variable de mayor peso	108
CAPITULO VI: RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LA APROXIMACIÓN POR DENSIDAD DE POTENCIA	111
6.1. Estudio comparativo de espectros	111
6.1.1. Estudio posición 3	111
6.1.2. Estudio posición 4	113
6.1.3. Resultado del estudio	115
6.2. Estudio comparativo de Amplitud Máxima en RMS	115
6.2.1. Posición 3	115
6.2.2. Posición 4	117
6.2.3. Estudio comparativo y resultados	118
6.3. Estudio de frecuencias	120
6.3.1. Estudio de frecuencia SPEED	120
6.3.2. Estudio de frecuencia de Álabes	125
6.3.3. Comparativa entre SPEED y Álabes	130
6.4. Análisis del rodamiento FAGNU322	131
6.4.1. Análisis de la frecuencia FTF	131
6.4.2. Análisis de la frecuencia BSF	134
6.4.3. Análisis de la frecuencia BPOR	137
6.4.4. Análisis de la frecuencia BPIR	140
6.4.5. Análisis de la frecuencia 2BSF	143
6.4.6. Resultado del análisis de las frecuencias características	146
6.4.7. Análisis de FTF con SPEED y Álabes	148
6.5. Análisis del rodamiento SKFNU322	149
6.5.1. Análisis de la frecuencia FTF	149
6.5.2. Análisis de la frecuencia BSF	152

6.5.3. Análisis de la frecuencia BPOR	155
6.5.4. Análisis de la frecuencia BPIR	158
6.5.5. Análisis de la frecuencia 2BSF	161
6.5.6. Resultado del análisis de las frecuencias características	164
6.5.7. Análisis de FTF con SPEED y Álabes	165
6.6. Análisis del rodamiento SKF6322	166
6.6.1. Análisis de la frecuencia FTF	166
6.6.2. Análisis de la frecuencia BSF	170
6.6.3. Análisis de la frecuencia BPOR	173
6.6.4. Análisis de la frecuencia BPIR	176
6.6.5. Análisis de la frecuencia 2BSF	179
6.6.6. Resultado del análisis de las frecuencias características	182
6.6.7. Análisis de FTF con SPEED y Álabes	183
6.7. Análisis por RMS de la frecuencia más determinante de cada rodamiento	184
6.8. Conclusiones del Capítulo VI	186
6.8.1. Conclusiones del análisis del rodamiento FAGNU322	186
6.8.2. Conclusiones del análisis del rodamiento SKFNU322	188
6.8.3. Conclusiones del análisis del rodamiento SKF6322	190
CAPITULO VII: CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN	193
7.1. Conclusiones	194
7.2. Líneas futuras de investigación	196
REFERENCIAS	199
ABREVIATURAS	219
PUBLICACIONES	221
ANEXO GRÁFICAS OBTENIDAS CON EMONITOR	
ANEXO MUESTREO OBTENIDO POR PROCESAMIENTO DE IMAGEN	
ANEXO ERRORES ESTADÍSTICOS RNA	

ABSTRACT

One of the main industrial problems in general are facing is the prediction of errors or failures of the most sensitive or critical assets of their equipment.

For this reason, techniques based on predictive maintenance are emerging, searching for the early detection of possible cracks, imperfections or defects that are likely to cause an accident or the partial or complete shutdown of a plant.

This not only increases safety, but also improves the industry's profitability. Bearings are one of the most important mechanical elements in industrial production equipment and systems.

This study characterizes the 15-year operating scheme of a set of bearings in a real mechanical system (a blower) by means of spectral analysis of the vibrations generated.

We obtained the values over the years of every characteristic frequency of the bearings and the equipment itself in two sampling positions and in their typical axes.

For data collection and we have followed the ISO 10816 standards, thus using the values of speed in RMS (mm/s), aiming to reduce the masking of these signals that occurs depending on whether they are high or low frequencies.

The study will respond to one of the most important requirements found in the predictive and preventive control of industrial sites. The problem of the predictive systems of maintenance of equipment with bearings lies in the number of monitoring and analysis points that generate a high cost in time and human resources.

The result will be to determine which of all the study frequencies is the most significant and in which position and measurement axis has the biggest impact. To do this, we will analyse the rotation frequency of the blowing machine, the resulting frequency of all the frequencies, the frequency of the impulsion blades and finally the frequency of the bearing.

With Artificial Neural Networks (ANNs) models, we estimated the most significant bearings, measurement points and variables in the changes of the maximum amplitude of the frequency spectra, a parameter that determines the feasibility and safety of the equipment.

A sensitivity analysis concludes that the most significant frequency has been the one generated by rotation of the machine itself, followed by the second harmonics of the bearing ball frequencies and the frequency generated by the blades of the equipment.

The study also shows that vertical position 4 is the most critical one, followed by axial

position 4 caused by the action of the blades, and the bearing most important is the SKF6322 one.

RESUMEN

Uno de los principales problemas a los que se enfrentan las industrias en general, es la predicción del error o la falla de los activos más sensibles o críticos de sus equipos. Es por ello, que surgen técnicas basadas en el mantenimiento predictivo, en busca de la detección precoz de las posibles grietas, imperfecciones o defectos que son susceptibles de provocar un accidente o la parada de parte de una planta o su totalidad.

El objetivo principal es adelantarse en el tiempo a la rotura, para mejorar la planificación y la programación de operaciones de mantenimiento y control. La metodología actual sigue los principios de monitoreo continuo en cada punto y eje de control analizando los valores de amplitud máxima facilitados por los sistemas de análisis de monitorización como son el Emonitor.

La propuesta de esta tesis es validar las nuevas técnicas no paramétricas de las redes neuronales, pero validando éstas en condiciones reales de trabajo con un equipo del mayor grado y peligrosidad que marca la norma ISO10816, un equipo del grupo 1 con 500 kW de potencia.

El muestreo no se realiza en laboratorios controlados, de este modo las aproximaciones estocásticas validarán el método en las condiciones reales donde las variables se ven afectadas por las fluctuaciones generadas por el propio funcionamiento y fallos derivados en los controles de mantenimiento correctivo.

El estudio no solo aborda la validación del método sino que amplía el análisis abarcando qué elemento constituyente de cada rodamiento es el más sensible, dato no facilitado por el software de control, si no el punto y eje donde su incidencia es mayor. Todo esto validado por métodos diferenciados como son aproximaciones estocásticas y por análisis de densidad potencia.

Otra novedad que aporta el método es el volumen de la muestra y la tipología del equipo, que permite la predicción con el total de la muestra y con la mitad del muestreo, que hace de esta metodología un procedimiento válido para la predicción del fallo en condiciones reales y con muestras de menor envergadura.

Esto no sólo permite aumentar la seguridad, sino también permite una mejora de la rentabilidad. No hay que olvidar el elevadísimo coste que implica un paro por mantenimiento correctivo y las implicaciones en los distintos equipos, provocando en ocasiones su propia inutilización.

El rodamiento es precisamente uno de los elementos más importantes dentro de los equipos y sistemas de producción. Es por ello por lo que su análisis y monitorizado de vibraciones, son dos de las herramientas más comunes para predecir problemas en los distintos procesos industriales.

Este estudio aborda las distintas situaciones sufridas por un conjunto de rodamientos de un sistema mecánico a lo largo de 15 años, en condiciones reales de funcionamiento, analizando para ello su mapa espectral en busca de las variables de mayor peso y, por tanto, de mayor influencia en la vida útil del conjunto.

No sólo se dará respuesta a los elementos más influyentes, sino que se intentará determinar en qué puntos de medida se acentúan sus perturbaciones, con el propósito de disminuir puntos de muestreo sin perder fiabilidad.

Para ello, se obtienen los valores de cada una de las frecuencias características de los rodamientos y del propio equipo a lo largo de los años, tanto en las dos posiciones de muestreo como en sus ejes característicos, este procesamiento se realiza mediante el método de análisis de imágenes con la intención de procesarlos a través de una red neuronal.

Para la obtención de datos se han seguido las especificaciones de la ISO 10816, en términos de RMS, con la intención de evitar el enmascaramiento de las señales, además de ser una norma de reconocido prestigio a nivel internacional.

La primera parte de la investigación fue el análisis de la amplitud máxima mostrada por el equipo de medida en los dos ejes y posiciones (horizontal, vertical y axial).

En la segunda fase se obtuvo el valor de densidad de potencia de cada una de las frecuencias características de los rodamientos, la de giro del equipo y la de los álabes.

La tercera fase fue el análisis, a través de una red neuronal, para determinar qué variable tiene más peso. Para ello, se analizaron todos los valores en cada uno de los años y se compararon con el procesamiento de años pares y años impares.

También se procesaron los datos siguiendo el mismo patrón, pero eliminando la variable de más peso, obtenida con el primer procesamiento por red neuronal, con ello se validan los resultados.

La cuarta fase del estudio fue el análisis espectral arrojado durante todo el periodo de toma de datos, en busca de los valores energéticos de cada frecuencia de cada rodamiento, y así determinar la variable más expuesta y sensible al funcionamiento del equipo.

En una quinta fase se estudiaron determinaron las frecuencias más importantes, la posición y el eje acción en valores de RMS. Estos resultados se contrastaron con los obtenidos

por el análisis neuronal.

El estudio responde así a uno de los requerimientos más importantes de los mantenimientos predictivos en los procesos industriales, que buscan reducir los tiempos de parada productiva, además de los costes humanos y materiales.

El estudio determinó que los valores de amplitud máxima más importantes se dan en la posición 4, y es el eje vertical el más sensible a las acciones mecánicas del equipo, tanto para los estudios por RNA's (Redes Neuronales Artificiales), como por valor de RMS (Root Mean Square).

Según las variables, se puede decir que la frecuencia de giro del equipo, SPEED, es la más determinante en todos los estudios.

También se encuentra unanimidad en el análisis de la frecuencia de los álabes, determinando que la posición más importante es la 3 en el eje axial, siendo la variable que genera más empuje en el eje axial, esto es debido a la acción de empuje que generan los álabes y el fluido sobre el propio eje.

Sobre los rodamientos existe linealidad entre ambos estudios, dando como rodamiento más determinante el SKF6322.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

Uno de los principales problemas a los que se enfrentan las industrias en general y sistemas de producción, ya sean petroquímicas, minería pesada, etc., es mantener la estabilidad en sus sistemas.

El mantenimiento y la confiabilidad son una herramienta fundamental para los complejos de producción industrial y las empresas en general, ya que representan una ventaja competitiva. Esto se debe a que ayuda a reducir los costes de tiempo, material y, sobre todo, pérdidas de producción. Por lo tanto, existe una gran demanda para mejorar los protocolos de mantenimiento preventivo y especialmente predictivo [1], en términos de equipos industriales y entre ellos el elemento más sensible, que son los rodamientos.

Por ello, se busca a través del mantenimiento predictivo (como pueden ser los análisis de vibración por medio de los espectros de frecuencia), anticiparse a la falla catastrófica de sus equipos, provocada principalmente por los sistemas de sujeción de los ejes, los rodamientos [2]. Estos fallos provocan el corte temporal de las líneas productivas.

En un mundo cada vez más globalizado, los costes y la reducción de estos es una ventaja estratégica y competitiva. Es por ello, por lo que surge la demanda en el sector industrial, de procesos automatizados e informáticos que permitan el control de los sistemas y la reducción de recursos humanos. De este modo, nacen las técnicas de mantenimiento preventivo y, sobre todo, predictivo, dejando atrás cada vez más las acciones correctivas que generan mayores costes en tiempo, recursos, material y pérdidas en producción.

Las actividades predictivas son procesos cada vez más extendidos dentro de los sectores industriales, debido sin duda a su efectividad en la reducción de costes y aumento de la seguridad.

Se puede decir que las ventajas principales son dos:

- La primera viene provocada por un cambio de mentalidad en la dirección de las empresas y la implantación de protocolos de actuación en busca de la eficiencia, reduciendo los tiempos no productivos.
- La segunda viene por el impacto provocado por los efectos de las acciones correctivas, que siempre afectan a mayor número de elementos. Las consecuencias de este tipo de paradas están provocadas principalmente por la rotura de algún elemento, aumentando el número de recursos y la paralización de los sistemas durante más tiempo, generando, en definitiva, mayores pérdidas

económicas y, por consiguiente, una reducción en la rentabilidad [3].

Teniendo en consideración la problemática anteriormente descrita, que encuentran las instalaciones industriales, y que afectan al buen desarrollo productivo y económico de las mismas, esta tesis ha planteado los siguientes objetivos.

El primer objetivo ha sido la búsqueda de nuevas técnicas de análisis y monitorización de equipos sometidos a efectos vibracionales, principalmente los que disponen de elementos con movimientos rotativos o alternativos.

Para la obtención de este objetivo principal, que consiste en la búsqueda de una nueva metodología de monitorización predictiva, se ha llevado a cabo el análisis y estudio de dos líneas de trabajo diferentes. Este primer objetivo ha requerido el desarrollo de objetivos secundarios o específicos, como son un análisis en términos de densidad espectral de cada elemento constituyente del sistema de soporte de los ejes transmisores de los ejes transmisores de la potencia mecánica y el análisis de estos mediante métodos estocásticos.

El análisis de cada densidad de potencia espectral, en términos de RMS (mm/s), no se relaciona con la defectología. Esta parte de la ciencia ha conseguido a día de hoy cotas de conocimiento muy altas, pero sigue pendiente la correlación y el cálculo porcentual de los pesos energéticos generados por los elementos rotativos generadores de los impulsos vibracionales, interrelacionado estos con los valores máximos acumulados y los distintos puntos de monitorización y control.

Además del análisis de densidad de potencia, que requiere muestreo de años, es necesaria una herramienta válida para el uso real industrial. Para ello, se aproximarán los estudios de densidad de potencia con los obtenidos por aproximaciones estocásticas, como son las redes neuronales artificiales.

El problema de las RNA's se encuentra en la necesidad de disponer de grandes muestras de control que validen los resultados. En esta tesis se ha demostrado que ambos métodos de análisis, con grandes y pequeñas muestras, aportan linealidad en todas las aproximaciones.

Para la consecución de los objetivos generales y específicos, que se han expuesto en el punto anterior, se ha dividido la memoria de la tesis en siete capítulos, los cuales se resumen a continuación:

En el capítulo II, titulado "Problemática y objetivos", aborda, en primera instancia, la problemática de las metodologías predictivas, donde se muestran las enormes dificultades que tienen las industrias y los departamentos de control predictivo para una monitorización satisfactoria. Esto es debido al tener que controlar un gran número de puntos de control,

sumado a una elevada periodicidad, con muestreos casi diarios, con el fin de predecir el fallo total del equipo.

Debido a lo expuesto anteriormente, se plantean las hipótesis de partida del estudio, como son los análisis realizados en la actualidad en equipos de pequeñas y grandes dimensiones para la determinación de los fallos de los rodamientos. La mayoría de los análisis se realizan en condiciones de estudio muy controladas.

Esta tesis da un giro en la metodología actual del mantenimiento predictivo, abordando un análisis de densidad de potencia de cada uno de los elementos interrelacionándolos entre sí, con los valores que marca la norma de aplicación, ISO 10816, como variable de referencia (amplitud máxima) y los puntos de control. Todo ello se realiza mediante dos procedimientos diferentes, energías espectrales acumuladas y el análisis por RNA.

En el capítulo III, se analiza el “Estado del arte” de las dos líneas fundamentales de estudio, como son el campo del mantenimiento predictivo, la metodología de la vibración desde su marco histórico hasta el usado en el campo de los análisis de defectos en rodamientos, y, por último, las tecnologías y ventajas que ha ido aportando al mundo de la ciencia y la investigación industrial el procesamiento de algoritmos matemáticos derivados de los CNN (Computacional Neuronal Network) y la inteligencia artificial, evolucionados a sistemas de redes neuronales artificiales, como el algoritmo Levenberg-Marquardt, usado en esta investigación.

Hay muchos métodos de entrenamiento. En este trabajo, se propone utilizar una variación del algoritmo de retro propagación, conocido como el algoritmo de Levenberg-Marquardt, que se trata de un algoritmo de optimización no lineal de segundo orden, con una velocidad de convergencia muy rápida.

El capítulo IV, titulado “Adquisición, procesamiento y análisis de datos”, describe el equipo en estudio, que se trata de una soplante, con una envergadura de álabes, superior a los 3 metros de diámetro. Este equipo es el encargado de suministrar aire a un horno flash de fundición de cobre. Éste es impulsado por un motor de 500 KW, haciendo de este equipo, dentro de la norma de aplicación, el de mayor categoría por su peligrosidad y dificultad de monitorización.

El sistema de transmisión mecánica se realiza mediante un eje soportado por tres rodamientos de más de 300 mm., de diámetro.

Este capítulo aborda y explica cómo se obtuvieron los datos de campo y la metodología usada, acorde a las directrices internacionales de toma de datos, las cuales fueron realizadas

por personal acreditado. Tras esta primera fase, se ha desglosado la energía de frecuencia resultante, por la de cada uno de los componentes de los tres rodamientos en estudio y las vibraciones generadas por el propio equipo.

La adquisición y análisis de datos tiene dos partes bien diferenciadas: la de aproximación energética vibracional y la del análisis estocástico.

El capítulo V aborda el “Análisis, resultados y discusión de la metodología por Levenberg-Marquardt”, realizando un estudio exhaustivo de los valores procesados, que alcanzan un total de 66.312 datos.

En este punto se comparan las distintas aproximaciones con toda la muestra, la aproximación con años pares e impares, y estas mismas con la variable de mayor peso porcentual energético, en relación a la amplitud máxima y sin esta. Todo con el fin de validar la viabilidad de la metodología usada.

El capítulo VI titulado “Resultados y discusión de la aproximación por densidad de potencia”, analiza, estudia y compara la metodología de análisis por densidad de potencia en los 15 años de muestreo. Como en el análisis por Levenberg-Marquardt se busca el peso de cada variable comparándolas entre sí, con la amplitud máxima y en relación a los puntos de medida y control de muestreo predictivo.

En este análisis se aproxima también el peso porcentual entre las variables de cada rodamiento, entre sí y en correlación a los puntos de medida del equipo de estudio.

En capítulo VII, se exponen las conclusiones de esta tesis doctoral. Para ello, se aborda el resultado de cada método de análisis y cada rodamiento por separado, generando posteriormente las conclusiones finales de todo el estudio relacionándolas entre sí y entre otras investigaciones.

Como punto final, se exponen las líneas futuras que se derivan de esta tesis, como son el análisis de la comparativa en otros equipos de las mismas características, con sistemas de trabajo con régimen variables, y aproximarlos con otros CNN (Computacional Neuronal Network), como son las regulaciones bayesianas.

Finalmente, se enumeran las referencias biográficas utilizadas durante la elaboración de esta tesis doctoral.

Se ha considerado importante incluir en esta memoria un glosario de las abreviaturas más destacadas, así como las publicaciones científicas que ha generado esta tesis doctoral.

A la información anteriormente mencionada, se le adjuntan tres anexos:

- Anexo Gráficas, obtenidas con Emonitor, donde se pueden ver las imágenes que fueron procesadas para la obtención de los datos de estudio. Estas imágenes se obtuvieron de manera manual por el doctorando mediante el Software anteriormente mencionado.
- Anexo Muestreo, obtenido por procesamiento de imagen. En este anexo se pueden ver los datos obtenidos de cada variable de estudio.
- Anexo Errores estadísticos RNA, en este anexo se muestran los cálculos estadísticos de cada una de las aproximaciones estocásticas.

CAPÍTULO II: PROBLEMÁTICA Y OBJETIVOS

2.1. Problemática de las metodologías predictivas

Una de las principales causas de paro o fallo en sistemas productivos, viene provocada por los elementos rotativos y entre ellos los rodamientos. Casi el 40% de los paros están generados por estos [4,5], de ahí la importancia de incorporar sistemas de control y monitorización para predecir su vida útil y evaluar su estado.

Las metodologías actuales siguen los criterios establecidos, a nivel internacional, de la norma ISO 10816, que monitorea los equipos mediante el concepto de densidad de potencia espectral máximo, generado en cada uno de los puntos de control. Este procedimiento tiene el problema de la cantidad de muestras y la periodicidad de las mismas que hacen inviable un correcto mantenimiento predictivo por volumen de personal y material técnico necesarios.

En los últimos años se ha producido un aumento significativo en los avances y en los tratamientos de datos por los sistemas informáticos, que han conseguido un aumento en la calidad de las señales, su procesamiento y posterior evaluación, facilitando el trabajo y mejorando los resultados [6]. Pero no se ha avanzado en la determinación, cuantificación y sensibilidad, de los puntos de muestreo, ni del efecto energético vibracional que genera cada parte móvil del sistema a estos y entre sí que permitirían, por un lado reducir los puntos de control y por otro ver los elementos más perjudiciales para el correcto funcionamiento del equipo.

El procedimiento convencional de diagnóstico de defectos o fallas y el análisis de rodamientos se realiza mediante señales de vibración, que tienen una implicación fundamental en este tipo de mantenimiento. La información proporcionada por las vibraciones en el dominio de la frecuencia da las claves para determinar las posibles condiciones erráticas en los elementos giratorios [7].

La rotura de un rodamiento viene provocada por un conjunto de variables, hecho por el cual, su predicción resulta tan compleja y costosa. Las líneas de investigación más importantes son el comportamiento de los rodamientos, su fricción, las tensiones internas y cómo afecta la fricción de sus propios componentes y la disipación de energía a través de la aspereza de los componentes [8, 9].

Los estudios realizados incluyen la generación de nuevos diseños con aplicación de gas para reducir los efectos tangenciales de las fuerzas centrífugas para equipos rotativos. Es importante tener en cuenta que la mayoría de las pruebas se han llevado a cabo en el laboratorio

sin poder estudiar la evolución a lo largo de los años en condiciones reales de funcionamiento y con equipos con potencias de trabajo menores a 500 kW y con muestras que no alcanzan los 15 años usados en este estudio [10,11].

A diferencia de otros estudios, esta tesis aborda el análisis en términos de densidad de potencia espectral, de tres rodamientos y sus elementos constituyentes, en condiciones reales de funcionamiento continuo y la cuantificación de los efectos energéticos vibracionales de todos los componentes estructurales susceptibles de efecto vibracional, relacionándolos con el elemento de control predictivo de uso internacional, según aplicación de la ISO 10816, como es la amplitud máxima.

La relación de estas variables con los puntos de monitorización y control y su afección energética es una nueva metodología aplicada en este estudio, con el fin de mejorar los protocolos de mantenimiento y aumentar de este modo el rendimiento en el control predictivo industrial.

Este tipo de tecnología requiere un coste importante en la implantación, en el número de recursos humanos, materiales y en la especialización de los técnicos. Definir qué variable es la causante o futura causante del problema requiere mucha formación y experiencia. Esto se debe a que existen muchos elementos que afectan al comportamiento de los rodamientos, como son las operaciones de lubricación [12], la actuación de cargas dinámicas excesivas o externas, fatiga del material [13], fallos de diseño, contaminación, defectos en la manipulación, transporte, etc.

El monitoreo continuo de los equipos es la única alternativa actual para evitar y predecir el fallo de los rodamientos [14,15]. Es por ello, por lo que las grandes compañías aplican los sistemas de gestión de mantenimiento predictivo para tal fin. El principal propósito es determinar las condiciones de funcionamiento y evitar las paradas no programadas y planificar acciones no correctivas, minimizando los impactos y tiempos muertos.

El procedimiento convencional de diagnóstico y análisis de fallos en cojinetes o rodamientos, se lleva a cabo a través de las señales de vibración, que tienen una implicación fundamental en este tipo de mantenimientos.

La información aportada por las vibraciones en el dominio de la frecuencia da las claves para determinar posibles condiciones erráticas en los elementos rotativos [16]. Las más significativas que se encuentran en los sistemas rotativos son el desbalanceo, el desalineamiento, excentricidad, ejes doblados, cavitación en turbo máquinas y fallas en rodamientos [17].

Para llevar a cabo una buena evaluación es necesario cuantificar y cualificar las variables dependientes e independientes de cada elemento rotativo vibracional de los equipos, que afectan al rango máximo de trabajo o amplitud máxima, representado por el valor global y el espectral de la onda. Con tal fin, se usan alarmas de funcionamiento que tienen que ser estudiadas independientemente.

Para la determinación de los rangos máximos o críticos, tal y como define la norma ISO 10816, se ha generado una linealidad dentro del marco internacional a través de normas y estándares de calidad, como son:

- Normas internacionales (ISO – International Standards Organization) ISO 13381-1, se considera el referente principal, dentro de las transacciones internacionales, siendo en la práctica el primer punto de partida para valorar la severidad los equipos [18].
- ISO 2954 Vibración mecánica en maquinaria rotativa alternativa – Requerimientos para los instrumentos de medida de la severidad de vibración.
- Según el equipo a evaluar, existen normas específicas como es la ISO 10816.3 para la evaluación de máquinas de más de 15 kW y con velocidades entre 120 a 15000 rpm.
- Normas Europeas (UNE) como son la UNE 21 32 875 sobre las características de los transductores electromecánicos, y clase de captadores de vibraciones y elementos sensibles de captadores y la UNE 95-010-86, sobre terminología de vibración y choques.
- Directivas Europeas 89/392/CEE y 91/368/CEE.
- También existen normas de orden nacional, como son la UNE 20-180-86 sobre vibraciones mecánicas de determinadas máquinas con ejes superiores a 56 mm², basada en la ISO 2372. Otra norma para tener en consideración es la de verificación de los valores de emisión según la UNE-EN 12096.

La regulación de este tipo de actuaciones, por parte de entidades de reconocido prestigio y organismos oficiales, ha conseguido un cambio sustancial para la mejora y avance de estos estudios (provocado sin duda por la ambigüedad existente), haciendo que la comparativa sea más veraz y eficiente.

El principal objetivo, de la monitorización y control de la vibración, es determinar una de las cuatro etapas de rotura, definidas en la norma, en la que se encuentra el rodamiento. Hay que tener en cuenta que los rodamientos no dan síntomas de rotura o anomalías hasta que no llegan a la quinta parte de su vida útil [19].

En la primera etapa se generan comportamientos erráticos en elementos cuya frecuencia de trabajo es elevada, principalmente superior a 5 kHz. En esta primera etapa no es necesario la sustitución del rodamiento y, aunque surgen fisuras, no son perceptibles por el ojo humano.

Cuando se alcanzan valores medios es cuando se ingresa en la segunda etapa, donde aparecen grietas ya perceptibles por el ojo humano y se pueden percibir acústicamente, por la generación de pequeñas perturbaciones.

La tercera y cuarta son las más relevantes y es donde las grietas avanzan, generando un aumento en la temperatura de los elementos, favoreciendo su rápido desarrollo hacia la rotura. En este nivel, la percepción acústica es muy severa y fácilmente perceptible por el oído humano.

La quinta es la que provoca una acción correctiva, generando daños importantes ocasionados por la rotura de componentes y pudiendo llegar a la rotura total del equipo [20, 21].

El uso de la vibración, como método de control, ha evolucionado mucho desde mediados del siglo XX. En una primera instancia, los sistemas de control de máquinas que podían valorar el nivel general o nivel de banda ancha, se hacían tomando medidas en milésimas de pulgada o en pulgadas por segundo (PPS).

Cuando surgieron los filtros analógicos, se pudo iniciar la diferenciación de los distintos componentes de frecuencia, generando los primeros espectros. Pero no fue hasta años después, con la aparición de la computadora y la aparición del microprocesador en un único chip, lo que permitió un analizador de espectros propiamente dicho [22].

La primera línea de investigación, tras la aparición del espectro, fue el estudio en la mejora de la calidad de los sistemas de detección, optimizando la señal y los procesos de análisis de datos. Posteriormente se centró en el estudio de los distintos tipos de máquinas y tipología de defectos, cargas, tensiones, desalineación, desbalanceo, lubricación, rodamientos, turbinas, bombas, ventiladores, acoplamientos, cajas de engranajes, compresores, etc., [23].

Todos estos estudios han mejorado y facilitado el análisis, pero no han conseguido solventar el gran problema de predicción del fallo. No existe un cálculo analítico que sea capaz de aglutinar todas las variables que afectan a la vida útil del rodamiento (RLU) [24].

Se han generado nuevas líneas de investigación de predicción a través, de análisis acústicos, que son técnicas menos intrusivas [25]. Este método no evita el monitoreo diario de los equipos, ni el uso de recursos humanos y materiales, tan importantes a la hora de aumentar la eficiencia, la productividad y la competitiva industrial [26, 27].

Estas nuevas técnicas no invasivas, como son los protocolos acústicos, están tratando de mejorar el mantenimiento preventivo, pero tienen el problema del ambiente de trabajo. Estos estudios producen resultados en laboratorios pero en el campo real sus resultados no son satisfactorios [28]. Por todo ello surgen las técnicas de predicción por análisis de vibración, esta es la mejor respuesta al problema, pero el coste de este tipo de mantenimiento es muy elevado debido a la cantidad de variables que interactúan.

Desde que apareció la primera red neuronal a mediados del siglo XX, con la simulación de sistemas biológicos por McCulloch y Pitts [29], mucho ha evolucionado y mejorado tanto en el ámbito analítico como en las herramientas de proceso. El sistema primigenio consistía en un modelo binario computacional, formado por unidades conectadas entre sí, denominadas “neuronas”.

Para este tipo de estudio, son muy recomendables modelos estocásticos que permitan la determinación de relaciones entre las distintas variables que intervienen en la operación real de un sistema mecánico, y que por tanto, puedan estimar/simular el fallo del sistema antes de que se produzca. Este tipo de modelos, requieren secuencias temporales de valores registrados de diversas variables (series temporales multivariantes), con características aleatorias. Entre los modelos más extendidos, se incluyen las regresiones lineales simples y múltiples, los modelos lineales autorregresivos de Box-Jenkins (AR, ARMA y ARIMA) y las redes neuronales artificiales (RNAs) [30, 31].

En el campo de la ingeniería, es este tipo de procesamiento, red neuronal [32], el que puede ofrecer alguna solución al problema de la identificación de todas las variables que actúan y participan en el comportamiento errático o atacan directamente a la RLU de los sistemas rotacionales.

El sistema de actuación se realiza a través de la identificación y clasificación de las variables. Éstas actúan en los procesos y protocolos, buscando la linealidad entre ellas y su influencia en el resultado final generado [33].

Es precisamente esto lo que se busca determinar, cuál es el elemento más influyente y determinante para dedicarle el mayor número de recursos, tanto materiales como humanos. Todo este proceso requiere un entrenamiento del sistema a través de las variables de entrada o inputs [34].

Todos los estudios realizados mediante redes neuronales en el ámbito industrial sobre el comportamiento y RLU de los sistemas de rotación, han sido a través de los estudios en laboratorios hasta su rotura. Pero no se ha realizado el estudio en situaciones reales, en largos periodos de tiempo, para poder determinar si la muestra de datos generado es suficientemente representativa o si existe alguna linealidad en el comportamiento de estos, o la manipulación afecta notablemente a su vida útil [35].

La mejora en los protocolos de predicción es determinante y fundamental para la consecución de objetivos como la productividad económica y la eficiencia en general. Es por ello, que el monitoreo y análisis de datos pueden dar pistas de dónde se producen las mayores incidencias a lo largo del tiempo.

El estudio de un largo periodo de tiempo sobre el mismo equipo y en las mismas condiciones de trabajo, aun habiendo sufrido cambios, permitiría demostrar si estas alteraciones necesarias e imprescindibles, provocan alteraciones de nivel energético en los distintos puntos de control o permanecen constantes.

Otra variable para estudiar es cómo interactúan entre sí las frecuencias características de los rodamientos, cuál de ellas tiene más peso y qué rodamiento es el más afectado por las condiciones de trabajo del equipo, intentado determinar si existe una relación entre éste, sus frecuencias de funcionamiento y la falla del sistema.

Este estudio intenta abordar precisamente esta línea de investigación, no desarrollada ni tratada por otros. Para ello, se ha realizado el monitoreo de datos de una soplante con 500 kW de potencia durante 15 años.

Este equipo consta de un motor eléctrico impulsor que acciona un conjunto de álabes (zona impulsada), sustentados por tres rodamientos con especificaciones diferentes cada uno de ellos. La particularidad de este equipo es que dispone de tres sistemas de rotación que lo fijan a un eje, cada rodamiento tiene unas especificaciones diferentes. Otra particularidad es la estabilidad en su velocidad de funcionamiento.

La mejora de los protocolos de mantenimiento predictivo reportarán una reducción en los consumibles o repuestos y en los accidentes, evitando además emisiones y perjuicio medioambiental, provocando una mejora en la competitividad y fiabilidad empresarial.

En la actualidad se ha avanzado mucho en el análisis vibracional, primero en la mejora del procesamiento de la señal, posteriormente sobre los procesos de análisis y el uso de los sistemas informáticos, y finalmente con la búsqueda de las tipologías de fallos de los rodamientos.

El siguiente paso en la evolución científica ha sido la aplicación de métodos de aproximación inteligente, hasta llegar a las RNA con el propósito de determinar el fallo y la tipología del mismo provocado en los rodamientos. La mayoría de los análisis se han realizado en condiciones muy controladas, sin poder validar los métodos estocásticos para uso en situaciones reales en equipos de estas características.

Las industrias han visto mejorados los sistemas de predicción por vibración. Por ello son usados, como en el caso de la empresa Atlantic Copper, para el monitoreo de sus equipos críticos desde hace casi dos décadas. El tiempo y los recursos materiales y humanos hacen imposible, a día de hoy, aplicar estas técnicas de control para la totalidad de los equipos industriales de una empresa como la anteriormente reseñada.

El problema se encuentra en la metodología de monitoreo, sólo se procede al análisis de densidad de potencia espectral de los valores de amplitud máxima, que son la resultante de los efectos energéticos vibraciones que se producen en ese punto de medida y en ese eje de control. No se aborda el análisis espectral de cada componente constituyente de los rodamientos y mucho menos el de todos los rodamientos del equipo.

Tampoco se analizan la influencia ni el peso que tienen esos elementos en el valor de amplitud máxima, mucho menos se ha abordado la relación entre estas variables, las posiciones de medida y sus ejes de control. Esta sería la mejor solución real para reducir los puntos de medida y mejorar el muestreo, sin contar con la posibilidad de saber cuál es el elemento más sensible. Se podría desarrollar, por ejemplo, la mejora de la frecuencia FTF del rodamiento con un material más resistente a los impactos.

Para poder dar respuesta a las cuestiones anteriores, es necesario una gran muestra de datos durante un periodo elevado, que pueda determinar con total exactitud que siempre es un punto concreto el primero en recibir la energía de vibración.

Este hecho hace que este estudio no se realice de modo habitual, ni mucho menos en condiciones reales. No se encuentran estudios que aborden el monitoreo de un equipo de 500 KW en condiciones reales de funcionamiento con régimen de giro constante durante 15 años, con álabes de más de dos metros de diámetro, analizando tres rodamientos en continuo de las características del SKFNU322, FAGNU322 y SKF6322.

A nivel científico, este análisis ya tendría valor, pero a nivel Industrial no cumpliría las exigencias requeridas. Por ello, es necesario un método de análisis validado que determine en un periodo de tiempo aceptable, cuál es el punto de control más sensible y el elemento que sufre más el efecto vibracional. En este sentido, se decide usar metodologías de aprendizaje profundo, como son el método de propagación de Levenberg-Marquardt, en un equipo de

grandes dimensiones.

Se decide el uso de este algoritmo de optimización no lineal de segundo orden por disponer de una velocidad de convergencia muy rápida. Todo con el objetivo de validar los resultados obtenidos en el análisis de densidad de potencia espectral, quedando así validado su uso, en este caso concreto.

2.2. Objetivos

2.2.1. Objetivo general

El objetivo principal de esta tesis ha sido validar el uso del método de propagación de Levenberg-Marquardt en un equipo soplante en condiciones reales de funcionamiento, para definir qué punto de control de la máquina es el más sensible a las perturbaciones vibracionales y qué elemento rotativo es el que más sufre estos efectos energéticos.

Para obtener este resultado, se ha tenido que desarrollar y definir una nueva metodología que permita validar una técnica óptima de diagnóstico de un elemento mecánico rotativo, basándose en el análisis de señales vibratorias en términos de densidad de potencia mediante aproximación por RNA, con una muestra de medidas de 15 años, en un equipo de impulsión de aire perteneciente al grupo 1, de la ISO 10816 con 500 KW de potencia y en condiciones reales.

Esta tesis aborda, no solo la mejora del método científico de predicción, sino el uso de éste en condiciones reales de funcionamiento, que permita mejorar los sistemas de fiabilidad y rendimiento de los equipos rotativos industriales, aumentando la competitividad económica y reduciendo el impacto ecológico general.

La validación del uso de RNA como método predictivo es otra de las aportaciones de este trabajo. Para ello se ha analizado una amplia muestra, usando valores de muestreo en condiciones reales.

El método de análisis ha sido mediante inteligencia artificial, aplicando redes neuronales a través del método de aproximación de Levenberg- Marquardt.

Se buscaba un procedimiento predictivo de uso real, no de aplicación en laboratorio, por ello se ha analizado una muestra suficientemente amplia. El problema de esta metodología se encuentra en el tamaño de la muestra necesaria para obtener resultados satisfactorios. El estudio validó el método de RNA, tanto para muestras de gran y menor tamaño.

Por lo anteriormente descrito, se usa para el primer análisis la muestra completa, empleada también para el proceso de entrenamiento. Tras esta se realiza una segunda

aproximación sólo con años pares, posteriormente se analizan solo los años impares y se observa que el resultado es el mismo.

Para eliminar el problema del enmascaramiento o ruido de la red neuronal, se realiza otra aproximación sin la variable más determinante. Este proceso se repite, como en el caso anterior con la muestra completa, con los años pares y los impares.

La validación total del método se realiza analizando el valor espectral total y pico de la muestra, y el resultado obtenido sigue siendo el mismo.

Este análisis ha buscado, no sólo la obtención de las variables más determinantes, sino también la validación del efecto de las posiciones de muestreo en campo y su relación con el resto de las frecuencias características.

Para la obtención de los pesos generados por las distintas variables no se siguen las indicaciones de Garson, muy usado en aproximaciones por Matlab. Se ha desarrollado un algoritmo matemático propio que permite la obtención de los pesos en función de los output aportados por el Software Statistic.

Otro avance que aporta este estudio es el análisis espectral de cada frecuencia característica de los elementos constituyente de cada rodamiento. Los software actuales, incluido el Emonitor, que es de referencia a nivel mundial y el más extendido en uso de los complejos industriales, analizan los datos de funcionalidad mediante el valor resultante de todas las perturbaciones generadas o valor de amplitud máxima.

El valor de amplitud máxima no determina qué elemento es el más significativo o sensible a los efectos vibratoriales del movimiento del equipo. Las aplicaciones informáticas, de monitorización de vibraciones, actuales no facilitan el dato de frecuencia específica. Para el desarrollo de este trabajo se ha calculado la frecuencia característica de cada componente y mediante un software propio se han monitoreado las curvas espectrales generadas por el Emonitor.

De este modo se ha obtenido una batería de datos específicos que ha permitido determinar el efecto generado por cada vibración específica y la acción que genera esta en cada punto de control y eje coordinado. Todo ello ha sido posible porque el régimen de giro del equipo es constante, permitiendo una frecuencia de funcionamiento uniforme en todo los años de la muestra.

El requisito básico para este análisis es disponer de un régimen de giro constante en la máquina monitorizada, que permite obtener los puntos de afección en hercios de los espectros de frecuencia, así se puede monitorizar la evolución o los cambios energéticos provocados por

cada elemento constituyente de cada rodamiento, además de las frecuencias típicas de este tipo de equipo. De esta manera, se puede relacionar estos y las afecciones generadas entre ellas junto con los puntos de seguimiento y control.

La línea de trabajo de monitoreo de equipos sigue las pautas generales de muestreo cada dos semanas o en equipos críticos cada semanas, pero no en todos los puntos de control. El problema de este método de análisis está en el número de puntos de control, para el caso estudiado solo la parte impulsada necesita 6 puntos de medida.

En industrias con miles de equipos, el número de personas y de equipos de muestreo es inasumible, esto trae consigo un distanciamiento importante en las muestras, produciendo daños, roturas o funcionamientos incorrectos provocando paradas no programadas y daños con costes superiores a los generados en una buena planificación, como son el cambio total de ejes de impulsión o rectificadores del mismo.

El objetivo principal es validar y mejorar los métodos de mantenimiento predictivo en equipos rotacionales con régimen de funcionamiento constante, mediante la aplicación de método Levenberg-Marquardt en todas las frecuencias características de los distintos elementos constituyentes de los tres rodamientos de trabajo. Permitiendo, no sólo mejorar y validar el método de predicción, sino dando un paso más con el estudio de las relaciones energéticas que cada elemento analizado genera, su interrelación energética con el resto y con los puntos de seguimiento vibracional.

Todo ello, buscando un patrón de funcionamiento común que permita mejorar los sistemas de control y protocolos de mantenimiento de las empresas, con el fin de reducir los recursos materiales y humanos.

2.2.2. Objetivos específicos

Para alcanzar los resultados deseados se plantean los siguientes objetivos específicos:

1. Determinar la posición de medida más afectada por las vibraciones generadas por el equipo.
2. Establecer el eje de medida más afectado por las perturbaciones o efecto energético de la vibración.
3. Definir cuáles son las frecuencias típicas del equipo más sensibles a las acciones mecánicas del funcionamiento de la máquina.
4. Establecer cuál de los tres equipos de sustentación del eje impulsado es el más expuesto al fallo.

5. Determinar cuál o cuáles de las frecuencias características de cada rodamiento es más sensible a la frecuencia global del equipo o amplitud máxima y su relación entre todas ellas.
6. Definir los elementos más sensibles a las acciones vibraciones del equipo y los puntos de muestreo donde es más perceptible el efecto energético de las perturbaciones mecánicas, mediante el diseño y aplicación de varias metodologías.

Para ello se ha seguido los siguientes pasos:

- Diseño de una metodología para la obtención de los valores espectrales de las frecuencias generales del equipo (Amplitud Máxima, SPEED, Alabes) y las específicas de los tres rodamientos que sustentan el eje impulsado. Estos rodamientos tienen unas características especiales por las dimensiones del equipo del eje soportado.
- Análisis por métodos estocásticos, para determinar las frecuencias más determinantes para la variable de salida Amplitud Máxima. Para validar el método se realizarán las siguientes aproximaciones:
 - Estudio con todas las variables. En esta se realizan tres aproximaciones diferentes usando todo el muestreo, los datos del año pares y los de los años impares.
 - Estudio con todas las variables menos la de mayor peso SPEED, con la intención de mostrar que esta variable no enmascara al resto. Para ello, se realizan tres aproximaciones diferentes, usando todo el muestreo, los datos del año par y los de los años impares.
- Metodología de análisis por RNA, para determinar las posiciones y ejes más sensibles para cada variable. Para validar el método se realizan las siguientes aproximaciones:
 - Estudio con todas las variables. En esta se realizan seis aproximaciones diferentes según la posición 3 o 4 y sus correspondientes ejes horizontal, vertical y axial. En este estudio se usan todas las variables.
 - Para la validación del método se repite el estudio sin el uso de la variable SPEED, con la intención de mostrar que ésta no enmascara

los resultados.

- Diseño de una metodología experimental mediante los valores de densidad de potencia de las señales en términos de RMS, de los valores picos y medios de la muestra.
 - Realización de un estudio teórico de densidad de potencia de los espectros de las posiciones de control y sus ejes característicos.
 - Análisis analítico de valores máximos y picos, en términos de RMS, de la Amplitud máxima, SPEED y Alabes, según las posiciones y ejes para determinar la más importante y donde es mayor su afección en relación con los puntos de muestreo.

Desarrollo del estudio de las frecuencias más importantes de los rodamientos, (jaula, bolas, pista interior pista exterior y el segundo armónico de las bolas) para definir la más influyente y su incidencia en cada punto de medida. Este análisis se realiza para cada uno de los rodamientos del eje impulsado de la soplante.

2.2.3. Aportaciones científicas de esta tesis

La principal aportación de esta Tesis Doctoral es la validación del método de propagación de Levenberg-Marquardt en un equipo soplante en condiciones reales de funcionamiento, para definir qué punto de control de la máquina es el más sensible a las perturbaciones vibratorias y qué elemento rotativo es el que más sufre estos efectos energéticos.

Un nuevo protocolo o metodología de mantenimiento predictivo para la monitorización y detección del fallo de un equipo de impulsión de aire por métodos estocásticos, analizando las frecuencias características del equipo y la de los elementos constituyentes de los tres rodamientos soporte de la parte impulsada de la soplante.

La metodología actual, usada en el control de la fiabilidad de las máquinas industriales, sigue las indicaciones de la norma ISO10816. En esta tesis, para la adquisición de datos en campo, se siguen estas directrices por tener reconocimiento a nivel internacional.

Las aportaciones científicas de esta tesis cubren el vacío existente en el análisis real de los valores energéticos obtenidos por el software Emonitor, el cual sólo proporciona valores globales de vibraciones en términos de RMS (mm/s), de las distintas posiciones y ejes de muestreo. Por ello, otra aportación será la descomposición de esta señal en las distintas fuentes generadoras de vibración que tiene el equipo impulsor de aire.

Para tal fin, se ha generado un software propio para el procesamiento de imagen desarrollado por los ingenieros informáticos de Seabery Soluciones, empresa de alto reconocimiento en el ámbito de desarrollos de nuevas tecnologías de procesamiento de imagen y Realidad Aumentada.

Durante los 15 años de muestreo, se han generado un total de 617 medidas en cada una de las posiciones y sus ejes, haciendo un total de 3.702 medidas, estos datos son los facilitados por el Emonitor.

Para el análisis y validación de esta metodología, se han procesado, mediante análisis de imagen, los espectros de frecuencia de cada una de las frecuencias características de los rodamientos que se encuentran en la tabla 5, por cada uno de los 614 puntos de medida en las posiciones 3 y la posición 4 y en los ejes horizontal, vertical y axial, obteniendo un total de 66.312 datos. Todo ello se puede ver en los anexos de datos e imágenes.

La aportación científica sería la incorporación de las técnicas de análisis de imagen para el procesamiento y obtención de datos vibracionales, esta técnica se usa en otros campos pero no en este ámbito [36, 37, 38].

La siguiente aportación será el análisis vibracional, no a través de las amplitudes máximas, sino mediante el análisis de cada una de las 17 frecuencias generadoras del equipo, y no solo relacionándolas entre sí, sino con los puntos de monitorización y control, para determinar el elemento más sensible y el punto de control de mayor afección energética.

Este estudio ha sido realizado mediante análisis de densidad de potencia en términos de RMS (mm/s) con los valores picos, máximos y acumulados de toda la muestra. En la actualidad, la mayor parte de los análisis se realizan en laboratorio [39, 40] con condiciones controladas y un único rodamiento [41]. La virtud de este estudio es el análisis de tres rodamientos de grandes dimensiones trabajando en continuo y en condiciones reales de funcionamiento y con un equipo del grupo 1 [42].

Otra aportación científica se encuentra en cambiar el concepto de monitorización global por el muestreo por puntos de densidad máxima, mediante la obtención y determinación de los puntos críticos y elementos sensibles. Esto facilitará y mejorará la fiabilidad industrial de las máquinas al permitir la reducción de puntos de control, aumentando así el muestreo y reduciendo los tiempos entre tomas.

La siguiente innovación científica es el uso de las arquitecturas de aprendizaje profundo, como son las redes neuronales en muestras reales de funcionamiento en equipos de grupo 1, el nivel más elevado según la norma por el tamaño de equipo de estudio, con potencia de

trabajo de 500 kW, monitorizado en condiciones reales de funcionamiento.

Se ha decidido el uso del método de Levenberg-Marquardt por ser un algoritmo de optimización no lineal de segundo orden y disponer de una velocidad de convergencia muy rápida. Todo con el objetivo de validar los resultados obtenidos en el análisis de densidad de potencia espectral.

Ello ha permitido clasificar las variables más importantes y sus posiciones más determinantes. Para esto, se ha generado un algoritmo matemático propio para la definición del peso porcentual de variables estudiadas. Esta aproximación matemática es válida para los resultados obtenidos por el programa de computacional usado, no siendo válido el uso de otras aproximaciones, como son la de Garson [43].

Otra innovación ha sido la validación del método CNN para uso real, con grandes muestras y pequeñas, realizando aproximaciones con todos los datos muestreados, con los años pares y con los impares, obteniendo linealidad en los resultados obtenidos.

CAPÍTULO III: ESTADO DEL ARTE

3.1. Análisis vibracional

La vibración no es sino el movimiento oscilante de un elemento alrededor de un punto en estado estacionario. Dos son las variables o conceptos más importantes relacionados con ésta, la frecuencia y la amplitud. La primera es una magnitud que determina el número de veces que se produce un efecto y la segunda sería su rango o variación máxima de desplazamiento.

Las señales de vibración de los rodamientos son muy complejas porque se enmascaran y se acoplan entre sí, además resulta difícil de analizar en condiciones normales y severas de funcionamiento.

Se han realizado muchos estudios de análisis de vibración de rodamientos, intentado dar respuesta a esta necesidad del sector industrial mediante el análisis matemático de las vibraciones, generando modelos con la intención de predecir defectos, pero ninguno ha sido definitivo [44, 45].

El problema viene provocado porque el sistema se encuentra en un estado dinámico de movimiento. Esta energía es absorbida en parte por el propio material, de ahí que la rigidez del elemento rodante sea una variable fundamental para el estudio de las fallas [46, 47].

Este estudio se complica porque cada elemento constituyente del cojinete es causa y efecto sobre sí y sobre el resto. Chudzik, abordó el problema de las frecuencias generadas por la pista exterior e interior bajo cargas de tipo radial y axial [48]. Otros estudios abordaron el problema de las diferentes tipologías de fallas con el sistema en desequilibrio [49], a través del análisis por procedimiento de elementos finitos [50, 51].

En los modelos, la señal de vibración de un defecto se establece a través de la serie de impulsos, que se generan al golpear los elementos móviles sobre la superficie coincidente, generando resonancias en las estructuras del rodamiento y del soporte. El golpeteo se provoca al estar el sistema en continuo movimiento. Los impulsos generan perturbaciones periódicas, pudiendo determinarse de esta manera la frecuencia de los mismos, según la posición en la que se encuentren [52, 53].

Los efectos provocados por las jaulas de las bolas FTF y las propias bolas BSD, son uno de los puntos más analizados para determinar estas relaciones no lineales a través de metodologías diferentes como aproximaciones por deformación elástica hertziana o

ecuaciones de movimiento como Lagrange, [54] obteniendo buenos resultados, el siguiente paso en las investigaciones sería hacia la relación no solo de estos dos elementos si no el del total de elementos que compone un rodamiento.

La geometría (elementos de rodadura, jaula y pistas) y la velocidad de marcha de los rodamientos son los que determinan precisamente las frecuencias características de éstos [55, 56, 57].

Cada componente presenta una frecuencia de rotura única y se definen cuatro fundamentales según el lugar donde se produzca el defecto. Si éste se genera en las bolas se tendrá el BSF; si se produce por la frecuencia de rotación de la jaula sería el FTF; si fuera por el paso en la pista interior se tendría el BPIR y en el caso de la pista exterior BPOR [58, 59].

A continuación, se muestran las expresiones algebraicas de cada tipo de fallo [60, 61].

- La frecuencia a la que se encuentran girando las bolas o rodillos (BSF) ésta está provocada por el movimiento rotativo de las bolas o rodillos alrededor de su propio eje.

$$BSF = 0.5N \times \left(\frac{D}{d}\right) \times \left[1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2\right] \quad (1)$$

- La frecuencia del defecto en las bolas (2BSF) será dos veces la frecuencia de giro de las bolas o rodillos, también conocida como frecuencia rotacional; ésta se produce por el impacto de las bolas con las pistas interior y exterior en cada una de las vueltas completas.

$$2BSF = N \times \left(\frac{D}{d}\right) \times \left[1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2\right] \quad (2)$$

- La frecuencia de defecto de rotación del cuerpo (FTF) o soporte de las bolas se puede calcular con la siguiente expresión.

$$FTF = 0.5N \times \left[1 - \left(\frac{d}{D}\right)\right] \quad (3)$$

- La frecuencia de defecto producido en la pista interior o paso de bola (BPIR) se calcula con la siguiente expresión.

$$BPIR = 0.5Nn \times \left[1 + \left(\frac{d}{D} \right) \right] \quad (4)$$

- La frecuencia de defecto producido en la pista exterior o paso de bola (BPOR) se calcula con la siguiente expresión.

$$BPOR = 0.5Nn \times \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right) \right] \quad (5)$$

Donde:

N = velocidad angular del eje en revoluciones por segundo (rpm).

D = diámetro medio del rodamiento en unidades de medida pulgadas.

d = diámetro de la circunferencia de rodadura de las bolas o rodillos, en la unidad de medida pulgadas.

n = número de rodillos o bolas que formen el rodamiento. Todo esto se puede ver en la imagen 1.

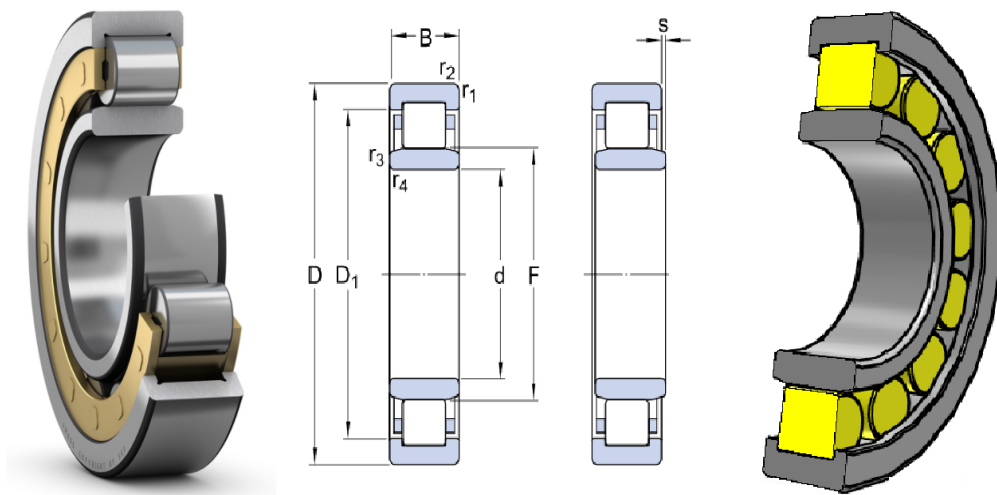


Imagen 1. Elementos y geometría del rodamiento.

- La frecuencia de álabe es la frecuencia generada por el paso de álbes y viene determinada por su número y por la velocidad de giro.

$$\text{Álbes (Fpa)} = Na \times \left[\frac{RPM}{60} \right] \quad (6)$$

Donde:

F_{pa} = frecuencia de paso de álabe.

N_a = número de álabes.

RPM = velocidad de giro del equipo.

Este tipo de esfuerzo no es determinante en la vida útil de la máquina, pero sí produce una aceleración en la destrucción del rodamiento, acortando su vida útil. Esta vibración se genera principalmente por problemas en las partes fijas y el rotor.

Los elementos de soporte en equipos con movimiento rotacional son los rodamientos, que soportan la mayor parte de las cargas dinámicas. Este hecho los hace ser elementos sensibles y críticos del buen funcionamiento.

Los motivos por los que un rodamiento sufre una rotura son provocados, a priori, por el exceso de vibraciones. Las causas de estas vibraciones vienen por un mal diseño del mismo o por errores en la instalación del equipo o mal sistema de mantenimiento [62].

El análisis predictivo de un equipo rotativo ha llegado gracias a la transformación de las señales provocadas por las vibraciones que generan estos equipos.

La mayoría de las investigaciones en este campo de diagnosis dan por sentado que el método de análisis de señales vibratorias es el que mejor resultado da.

Estas señales se procesan en el dominio de la frecuencia, que fue posible gracias al matemático Jean Baptiste Fourier, quien consiguió relacionar la forma de las ondas generadas por la vibración con la frecuencia generando su espectro vibratorio [63].

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) * e^{-j2\pi ft} dt \quad (7)$$

Descomponiendo la vibración, o, la onda generada en ondas simples según su frecuencia característica y representando cada una de ellas de forma independiente, se obtiene la representación en el dominio de la frecuencia de esta perturbación. Esta representación recibe el nombre de espectro de frecuencias y su magnitud es la densidad de potencia espectral.

Este sistema permite no enmascarar ni ocultar ondas pequeñas por otras de gran amplitud, y evitan en parte las deficiencias generadas por la FFT, como son el aliasing, ventana o empalizada [64].

La transformada de Fourier presenta limitaciones como es el “aliasing”. Esto es debido a que en el muestreo de la señal. Ésta queda limitada en su punto máximo, lo cual puede producir un resultado diferente al esperado, esto se produce cuando un sistema muestrea de manera uniforme una señal analógica a una frecuencia y esta excede la frecuencia más alta de la señal en un factor de al menos dos unidades, la señal analógica original se puede recuperar de los valores discretos generados por el muestreo, según queda definido en el teorema de Nyquist [65].

El segundo problema que presenta el uso de FFT (Fast Fourier Transform) es la ventana o leakage [66], debido a que el registro de tiempo que se obtiene y que es repetido periódicamente se encuentra fuera del tiempo de representación. Este problema se puede solucionar mediante el uso de ventanas, siendo la más usada la de Hanning [67].

La transformada rápida de Fourier es un algoritmo que permite representar la onda en el dominio de la frecuencia mediante series de curvas sinusoidales, expresadas en el dominio de la frecuencia [68]. Al generar un sumatorio de estas señales sinusoidales de periodos, permitirá calcular la Transformada Discreta de Fourier (DFT) [69].

$$\Delta f = \frac{fs}{N} \quad (8)$$

$$f_0; \frac{f_0}{2}; \frac{f_0}{3}; \frac{f_0}{4}; \dots \frac{f_0}{N} \quad (9)$$

En esta expresión algebraica se considera el (Δf) como la resolución de la señal en el dominio de la frecuencia (fs) la frecuencia característica y (N) la ventana o el número de líneas de la señal.

Al analizar la expresión se observa que para mejorar la resolución se deberá disminuir la frecuencia característica de muestreo o aumentar el intervalo de muestra.

El análisis de señales en el dominio de la frecuencia genera grandes impedimentos para efectuar un análisis certero de la señal, por ello surge el concepto de energía de la señal, a través de la densidad de potencia espectral (PSD Power Spectral Density) [70].

La densidad de potencia espectral de cada frecuencia podría definirse como la cantidad de energía contenida en cada frecuencia característica [71].

La densidad de potencia espectral de una señal periódica sigue la siguiente expresión analítica:

$$PSD(x(i)) = \frac{1}{T} \sum (x(i)^2 \Delta T) \quad (10)$$

La secuencia $x(i)$ para ΔT , es la potencia media del intervalo o la suma de las potencias de cada una de las componentes independientemente. La manera más sencilla para estimar esta densidad de potencia es pasar los datos de una ventana definida de la muestra [72].

La ventana definida se le denomina periodograma y la ventaja de este método estriba en poder discernir frecuencias escondidas [73, 74]. A este método de procesamiento de señal se le denomina transformada de Fourier, el problema de este método estriba en la selección correcta de la ventana.

Existen otros métodos que mejoran la precisión del análisis, uno de ellos es la transformada de Hilbert HT (Hilbert Transform) [75], que analiza la envolvente de la señal. Esto permite obtener un PSD mejorado y facilita el muestreo en procesos que se producen a baja frecuencia, modulando precisamente la señal primaria [76].

Este método más preciso para el análisis estudia la envolvente de la señal. Esto logra un PSD mejorado y optimiza el muestreo en las vibraciones que se generan a baja frecuencia, modulando la señal primaria [77].

El método seguido fue el de transformar dos funciones $s(t)$ y $1/(\pi t)$ en una tercera. Esta modula la amplitud de la señal o denominado también como la envolvente de la misma, como se expresa en la siguiente expresión:

$$\bar{x}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x(u) \frac{1}{t-u} du \quad (11)$$

Este método consigue amplificar los sucesos que se producen a baja frecuencia, a través de los componentes que forman la envolvente de la señal, pero aunque el sistema aporta mejoras, también tiene sus deficiencias puesto que es muy sensible al ruido [78, 79].

El problema se solucionó con la incorporación de un proceso de tratamiento de datos, aportando información de las variables de estudio principales en el tratamiento de señales, como son el tiempo y la frecuencia [80]. A este proceso se le conoce como Transformada de Wavelet (WT) que no fue de aplicación en la ingeniería hasta la aparición de Stephanie Mallat [81, 82, 83].

Este nuevo algoritmo de procesamiento de señal no se usó hasta finales del siglo XX en la en el campo industrial con la incorporación de nuevos filtros espejo, que son aproximaciones matemáticas piramidales con bases orto-normales de funciones. Esto permitió

su uso en la detección y el estudio de las distintas fallas producidas en ejes y rodamientos además de uso en análisis de otros componentes constitutivos de los equipos y maquinaria industrial como son los engranajes [84, 85]

La transformada de Wavelet generó variaciones y mejoras como es la versión continua o CWT, que analiza las señales mediante coeficientes de correlación, y no usa por contrario la señal completa.

La formulación matemática de esta se puede ver en la siguiente expresión.

$$T(a, b) = w(a) \int_{-\infty}^{\infty} x(t) W \frac{t - b}{a} dt \quad (12)$$

Donde $x(t)$ es una señal temporal y W es la función principal de Wavelet, otro termino es $w(a)$ que sería la función de pesos.

Los términos b y a son factores relativos a la posición y a la escala y donde los términos resultantes serían $T(a, b)$ [86].

La transformada de Wavelet discreta es una mejora a la Wavelet continua y es usual trabajar con ella porque mejora el procesamiento computacional en el campo de la discretización, usando en este método una rejilla diádica como elemento de escala [87].

Esto se puede ver en la siguiente expresión.

$$T(2^k, b) = \frac{1}{2^k} \sum_0^N x(i) W \frac{i - b}{2^k} \quad (13)$$

Donde k es el valor de la octava, teniendo en consideración el rango del espectro analizado si es de baja o alta frecuencia.

El campo de la electrónica y la informática no ha dejado de generar mejoras como son el análisis de multirresolución mediante la incorporación de filtros y técnicas de filtrado y el procesamiento por paquetes que permite descomponer los niveles altos de frecuencia [88].

Se han obtenido los datos de muestreo de un equipo soplante, para intentar encontrar una relación o linealidad entre los distintos parámetros que afectan al funcionamiento de los rodamientos [89].

Otros estudios abordan el problema experimentando con Máquinas de soporte vectorial (VSM) [90], buscando un diagnóstico temprano de la falla del rodamiento de bolas a través del procesamiento de señal.

Existen otros estudios realizados dentro de laboratorio y durante periodos muy cortos

de tiempo, donde se ha trabajado con el procesamiento de la señal a través de la transformada de Wavelet [91].

Otros se centran en el diagnóstico de fallas de rodamientos de bolas utilizando máquina vectorial de apoyo (SVM) [92, 93].

Estas mejoras hacen de este método un sistema validado de predicción de fallos, en el ámbito industrial del mantenimiento predictivo, siendo uno de los sistemas más usados en el tratamiento de señales de máquinas rotativas, [94, 95, 96, 97, 98]. A todo esto hay que sumar el análisis de inteligente de diagnosis de datos ANN [99, 100, 101, 102] que veremos a continuación.

3.2. Análisis neuronal

El motivo por el cual son de aplicación los métodos estocásticos es debido a la necesidad de interrelacionar los paquetes energéticos generados por cada variable, tomados en los distintos puntos de control, con métodos de decisión, clasificación y relación. Permitiendo así la obtención de la interacción e interrelación de estas entre sí y los puntos de seguimiento.

Se han desarrollado clasificadores inteligentes diferentes a lo largo del tiempo, como son los enfoques estadísticos clásicos de decisión y los árboles de decisión [103]. Esto ha progresado en el tiempo gracias a los nuevos métodos de procesamiento informático, dando lugar a aproximaciones, como son la lógica borrosa (Fuzzy logic) [104, 105].

El siguiente avance en esta tecnología vino provocada por la aparición de los algoritmos genéticos (Genetic Algorithms) [106], usado en la detección de fallos de señales de vibración en términos de velocidad y no de frecuencia. Esto ha aportado buenos resultados y efectividad en las características de los clasificadores de detección en rodamientos, con defectos con equipos pertenecientes al grupo 4 o 5 de baja potencia de trabajo y ejes menores a 15 mm. [107].

Otras técnicas de procesamiento matemático usaron máquinas de soporte vectorial (Support Vector Machines) [108] para los defectos generados sólo en la parte del elemento impulsor, en este caso en motores eléctricos trifásicos en la fase de arranque, todo ello, sin considerar el funcionamiento en continuo con equipos de pequeñas potencias y en la mayoría de los casos, estos análisis fueron abordados en condiciones controladas de laboratorio [109].

Los mayores avances en este término llegaron con la validación del método en equipo de grado 3, según la norma ISO, para potencias de 50 a 75 KW. Han usado, principalmente, el clasificador SVM, estas pruebas han sido realizadas en la parte impulsora o motor eléctrico

trifásico, usando, en este caso, ensayos en laboratorio y uno en condiciones controladas industriales con muestreo total de 34 medidas, sin valorar el peso de las acciones generadas por las distintas partes del rodamiento ni la afección con los puntos de control [110].

Donde más ha avanzado el uso del SVM ha sido en el análisis y la tipología del defecto de rodadura, a través de la descomposición adaptativa de la señal en distintas funciones, mediante el análisis de las densidades de potencia generadas y la entropía obtenida de la energía [111, 112].

Tras este apareció una nueva revolución en el campo del diagnóstico precoz o mantenimiento predictivo con la aparición de las redes neuronales artificiales.

Las Redes Neuronales Artificiales (RNA Artificial Neural Network) son algoritmos matemáticos que permiten aproximar las relaciones que existen entre las variables de entrada y otras variables denominadas output o variables de salidas [113].

Este método es un sistema no paramétrico, por lo que no sigue ningún tipo de patrón establecido a la hora de buscar las relaciones entre variables. Estos sistemas pueden aprender mediante entrenamiento a partir de un conjunto de datos y crear un todo matemático que para entender tanto las relaciones entre variables de entrada y salida como predecir una variable de salida a partir de otra variable de entrada [114].

El objetivo generar de estos sistemas es el de identificar patrones de relación del mismo modo que hace el cerebro humano, así puede clasificar formas o muestras posteriormente sin tener la necesidad de un personal experto en la materia en cuestión [115].

La gran ventaja de estos sistemas de aproximación estriba en la no necesidad de modelizar el sistema, es necesario solamente disponer de un gran número muestras con las distintas entradas y las respuestas dadas por el sistema como variables de salida [116].

Al incluir los datos en el algoritmo, este es capaz de crear un modelo por sí solo, sin la intervención del humano. Esta fase, en la que el algoritmo aprende de los datos introducidos, se denomina entrenamiento de red, tras este proceso se debe evaluar la red y ver si el resultado obtenido es concluyente [117].

Una red neuronal permite determinar al investigador las relaciones de las variables de entrada y de salida estudiados, aplicando un proceso de patrones a los datos obtenidos en la monitorización, simulando al de la sinapsis neuronal.

Se puede decir que se está reproduciendo la forma de funcionar de nuestro cerebro en una máquina. La máquina proporciona un conocimiento exhaustivo de los datos y sus patrones,

facilitando al usuario el trabajo de la toma de decisiones [118].

El ser humano es capaz de desarrollar técnicas diversas con resultado satisfactorio, partiendo de conceptos y procesos naturales. Por ejemplo, el Radar surge del sistema de detección de objetos desarrollado, entre otros, los murciélagos mediante la emisión de una tipología específica de ondas ultrasónicas, su detección, recepción, análisis y finalmente su procesamiento interior.

Una de las obsesiones de los analistas matemáticos y físicos o estudiosos de las últimas décadas ha sido crear una máquina capaz de simular y copiar la “máquina suprema”, el cerebro humano, este sigue siendo a día de hoy un universo por descubrir. De esta idea surgen las técnicas RNA [119].

Una neurona biológica es una célula humana o animal, muy diferente a las demás. La neurona es capaz de transmitir información a las demás células del cuerpo. Están formadas por un núcleo central del que sale el axón, una rama principal, él es el encargado de interconectar unas neuronas con otras.

La unión entre neuronas se realiza gracias a las dendritas, estructuras capaces de liberar los marcadores sinápticos, que son elementos y sustancias químicas junto a impulsos eléctricos capaces de transmitir la información entre ellas [120].

En términos generales, son las dendritas las responsables de recibir la información, y el núcleo junto con la procesa y el axón, la transporta a la siguiente neuronal. Las distintas capas de neuronas biológicas y la información guardada en ellas es la responsable que permite que el cerebro pueda y sea capaz de aprender.

En la mayoría de las situaciones y ocasiones, una neurona recibe información de miles de neuronas y otras estructuras transmitiendo información a otras miles en todo un ente interconectado e interrelacionado entre sí [121]. El procesamiento escalonado de toda esta información, de esta increíble máquina de procesamiento, se puede simular mucho al computador informático secuencial muy parecido al tipo Von Neumann [122].

En los sistemas de RNA se desarrolla la unión de varias neuronas, todas conectadas entre sí con la capacidad de tratar y transmitir información de manera análoga a lo que hace el cerebro, todo con el fin de buscar una interrelación o resultado de correlación lineal entre estas variables. El algoritmo es capaz de esta forma de encontrar las operaciones y aproximaciones necesarias para realizar, por cada una de las capas y a través de los datos, el aprendizaje por el método de prueba y error [123].

En el cerebro humano hay alrededor de más de cien mil millones de neuronas y del orden de 10¹⁴ sinapsis teniendo en cuenta a todo el sistema nervioso. Cada neurona puede disponer de unas mil conexiones para las entradas y otras tantas para las de salida [124].

Una neurona biológica tarda en procesar una operación unos pocos milisegundos, este tiempo es casi un millón de veces mayor que el de un hardware informático computacional actual. La clave del éxito biológico del procesamiento está en su capacidad de conectividad, con sistemas neuronales artificiales, no es del todo posible obtener esas capacidades de conexión. La conectividad de las RNA es miles de veces menor que el de la las biológicas, pero aun así han dado un giro importantísimo para el procesamiento de datos [125].

Las redes neuronales artificiales o su concepto comenzaron en la primera mitad del siglo XX, pero no fue hasta la segunda mitad de este siglo cuando generó la suficiente capacidad de análisis computacional y los algoritmos necesarios para que el sistema empezara a ser útil para la ciencia en general.

El primero en acercar la idea del sistema de análisis neuronal al procesamiento informático mediante equipos computacionales fue Alan Turing. Los primeros investigadores teóricos que desarrollaron la computación neuronal fueron Warren McCulloch y Walter Pitts, en su obra de 1943. Donde describieron una red neuronal básica mediante componentes eléctricos [126].

Fue Karl Lashley el que descubre la forma no centralizada de almacenamiento de información producida en el cerebro, esta se almacena encima de él. Fue en el Congreso de Dartmouth en el año 1956 el punto de inflexión donde se considera el nacimiento de la inteligencia artificial [127].

El investigador Frank Rosenblat, según el trabajo de Warren McCulloch y Walter Pitts, desarrolló el concepto del Perceptron, este es un sistema matemático gracias al cual se generaría y desarrollarían las redes neuronales. Rosenblat introduce un nuevo concepto el del peso de las variables, este es un número real que relaciona la interacción entre las variables input y las output, de este modo se consiguieron usar redes neuronales con la posibilidad de tomar decisiones sencillas del tipo binario y crear funciones lógicas [128].

Stephen Grossberg definió y desarrolló la red Avalancha, esta es capaz de describir ecuaciones diferenciales continuas, capaz así de reconocer el habla o aprender a interpolar los movimientos de los brazos de un robot de forma satisfactoria [129].

El siguiente paso vino con el desarrollo del Perceptron multicapa, pasando de una solo capa a más de una. Apareciendo así los conceptos de capa de salida, entrada y oculta. Esto

permitía variables binarias de entrada y salida donde se introducían los pesos umbral de cada neurona de modo manual [130].

A finales de la década de los sesenta surgieron discrepancias que retrasarían el nuevo desarrollo de las RNA y no fue hasta principios de la década de los ochenta cuando Marvin Minsky y Seymour Papert, fueron capaces de validar y demostrar matemáticamente que el Perceptrón era una aproximación débil [131].

El concepto y la definición de aprendizaje de propagación hacia atrás o backpropagation vino desarrollada por Paul Werbos, cuyo desarrollo requirió casi una década quedando instaurada mediados de los 80 [132].

Gracias al algoritmo backpropagation fue necesario el uso de neuronas sigmoideas. Una función sigmoide es aquella que permite describir una evolución que sería la que requieren muchos procesos naturales para su aprendizaje. Esta función suele adquirir forma de “S” y que sigue la siguiente expresión matemática [133].

$$P(t) = \frac{1}{1 + e^{-t}} \quad (14)$$

El algoritmo de propagación hacia atrás permite que las entradas y salidas adquieran más precisión con la posibilidad de adquirir valores decimales comprendidos entre el valor 0 y el 1. Este avance permite que las variables input y output dejen de tener carácter binario. Se crea de esta manera la primera función de activación [134].

La posibilidad de dar mayor precisión a los pesos de redes hace que se pueda tener salidas muy sensibles a la variación de los pesos, por todo ello pequeñas variaciones de estos generan cambios sustanciales permitiendo así la posibilidad de hallar resultados y relaciones, entre las variables, más óptimos [135].

La metodología de backpropagation hace posible el estudio de una nueva funcionalidad, que es la de entrenar las redes multicapa de forma no seguida sin supervisión. Este algoritmo tiene la capacidad de calcular el error que se obtiene a la salida e ir propagando hacia detrás el mismo en las distintas capas precedentes, realizando ajustes en cada una de las iteraciones permitiendo el aprendizaje de la propia red.

En 1989, surgen las Redes neuronales convulsionales, estas son redes multicapa que hacen posible el procesamiento no sólo de datos sino también de imágenes, inspirándose en el córtex visual de los animales la primera fue creada por Yann LeCun [136].

A finales del siglo XX surgen un nuevo procedimiento de aproximación inteligente, las denominadas Redes neuronales recurrentes (Long short term memory/Recurrent Neural

Network) son, como las anteriores, redes multicapas con conexiones bidireccionales, tanto hacia delante como hacia detrás, esto permite procesar datos de tipo “Time series” [137].

Deep Belief Networks (DBN) son modelos de procesamiento profundos, considerados con múltiples capas concatenadas en serie. Estas son demasiado difíciles de entrenar y que permitieron el entrenamiento de decenas o cientos de capas ocultas. Se puede definir las DBN como un poderoso modelo generativo jerárquico que permite la extracción de características entre las distintas variables [138].

En la primera mitad de la década del 2010, surgen las Generative Adversarial Networks, estas redes neuronales son capaces de ser entrenadas para crear una serie de datos basada en los valores de entrada input.

Estas redes tienen dos elementos diferenciados, uno capaz de crear datos no naturales y otro capaz de reconocer y definir si la muestra de datos adquiridos es artificial, o por el contrario tiene una secuencia natural.

Tras este proceso se crean datos artificiales muy parecidos a los obtenidos en condiciones reales. La utilidad de este tipo de redes es entre otros, la mejora de imágenes, la creación de textos en imágenes y desarrollo de moléculas para la industria farmacéutica [139].

La evolución de las RNA se pueden definir en cuatro periodos, una primera comprendida entre la década de los cuarenta hasta los setenta, en las que se fundaron las bases y los conceptos básicos, la siguiente parte comprendida entre este y principios de los ochenta, hubo una bajada en los desarrollos por el escepticismo de la comunidad científica.

Las dos últimas décadas del siglo XX tiene un nuevo resurgimiento con el algoritmo de alimentación hacia atrás o backpropagation, y en esta última fase que comienza a mediados de la primera década del siglo XXI, con el uso de los sistemas computaciones usados principalmente en el procesamiento de imágenes GPU (unidad de procesamiento de gráficos) por último tenemos la aparición de las redes con multicapas DBN [140].

Una neurona artificial o sistemas conexionistas son un algoritmo matemático que recibe diversas entradas, proveniente de otras neuronas, se combinan y produce una o varias salidas. Una red neuronal es la unión de un conjunto de neuronas artificiales con una arquitectura de capas capaz de aproximar relaciones para resolver problemas o tomar ciertas decisiones.

Los elementos de una neurona artificial son:

Entradas (X_1, X_2, \dots): son las variables de entrada a la neurona, es la manera que tiene el algoritmo de recibir información y los datos.

Pesos sinápticos ($W_1, W_2\dots$): es un número real, indica la importancia relativa de una entrada o variable en la respuesta del sistema o en la salida.

Función de entrada (FE) ($\sum_j x_j w_j$): las entradas modificadas por los pesos sinápticos proporcionan un valor numérico único de este modo este valor es el que se introduce en la función de activación.

$$FE = (x_1 \times w_1 + x_2 \times w_2 + \dots + x_n \times w_n) \quad (15)$$

Función de activación es la encargada de determinar el estado general de la neurona, transformando la función de entrada o input en un valor de estado de activación. El rango de valores está entre $[0,1]$ o $[-1,1]$.

Valor de salida (Y_j) es un valor final tras aplicar a los valores de entrada todo el algoritmo matemático de la neurona.

Existen diversos tipos de función de red o propagación, su elección depende del sistema y puede ser válida cualquier función continua y derivable n veces, esta resulta de la combinación de las distintas entradas ponderadas con un valor umbral [141].

A continuación se enumeran las más típicas:

- Función de red lineal:

$$X = \sum_{i=1}^N w_i x_i + b_i \quad (16)$$

- Función de red lineal:

$$X = \sum_{i=1}^N \| w_i x_i \| + b_i \quad (17)$$

La neurona recibe los valores de entrada y los modifica con los pesos, suma estas multiplicaciones para crear la función de entrada neta. Esta entrada neta es la que hará que se active o no la neurona, hay distintos tipos de función de activación en relación a el tipo de aproximación [142].

A continuación se enumeran las más típicas:

- Función escalón es una función binaria se activa o no se activa:

$$f(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (18)$$

- Función de red lineal, donde m es la pendiente, estas aproximaciones tienen una convergencia inestable debido a que la función no está normalizada.

$$f(x) = mX \quad (19)$$

- Función sigmoideal, los valores de salida se establecen dentro del rango comprendido entre 0 y 1.

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (20)$$

- Función sigmoideal de tangente hiperbólica, los valores de salida se establecen dentro del rango comprendido entre -1 y 1.

$$f(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (21)$$

- Función Gausiana.

$$f(x) = \exp \left[-\frac{\|x\|^2}{2\sigma^2} \right] \quad (22)$$

- Función multicuadráticas.

$$f(n) = \sqrt{\|x - c\|^2 + a^2} \quad (23)$$

- Función multicuadráticas inversas.

$$f(n) = (\|x - c\|^2 + a^2)^{-1/2} \quad (24)$$

La función sigmoideal y la tangente se diferencian principalmente en su rango de valor de salida, en varias ocasiones se elegirá un valor u otro en función de la neurona de salida que se conecte o se esté analizando [143].

La organización de las distintas neuronas da lugar a los distintos tipos de redes. Los conceptos fundamentales que diferencian las redes son: número de capas, número de neuronas por capa, grado de conexiones y tipo de conexión.

La diferenciación más simple y usual en función de la topología y entre las arquitecturas es la siguiente:

Redes monocapa o perceptrón simple corresponde a la red más sencilla y simple, está compuesta por una capa de neuronas artificiales que proyectan las entradas a una sola capa de salida compuesta por un conjunto de neuronas donde se realizan los cálculos.

Redes multicapa: se componen de varios grupos de neuronas, capas, interconectados. Se suelen dividir en capa de entrada, capas ocultas y de salida en definitiva es una generalización de redes monocapa con la diferencia que está compuesta por una capa de neuronas de entrada y otra de salida y esta dispone de un conjunto de capas ocultas o intermedias [144].

El proceso de aprendizaje es el encargado de encontrar los pesos sinápticos de las neuronas y adaptarlos a los datos de entrada, su función es la de enseñar a la red y a su vez la de localizar las posibles respuestas que se buscan en el muestreo de los datos de entrada.

Este proceso de formación o entrenamiento acaba cuando los pesos sinápticos se mantienen estables por mucho que repitamos la aproximación repetidamente.

En el aprendizaje supervisado todo el proceso se realiza bajo el control de un agente externo y es este el encargado de encontrar la respuesta que debería dar el sistema a una excitación concreta.

El mismo agente comprueba si los datos de salida son los que se debería esperar o no y si no. En el caso de resultado favorable pararía el proceso en caso negativo iteraría hasta encontrar el resultado esperado.

En los inicios de las RNA esto lo hacia el propio investigador. En el momento actual este concepto solo se usa para redes de las que se pueden obtener pasos intermedios en el aprendizaje [145].

Cuando se realiza un aprendizaje no supervisado es la propia red, por si sola, la que es capaz de ajustar los valores de los pesos sinápticos de este modo puede obtener una salida óptima. Esta es la línea actual de investigación en este campo y son muchos algoritmos de este tipo que hay y son los más utilizados.

Las ventajas de las redes neuronales frente a otros tipos de análisis de datos son claras debido a que en un análisis adaptativo, este es capaz de aprender a interpretar y reproducir una secuencia mediante la técnica del entrenamiento, partiendo de unos datos iniciales. La segunda mejora viene de que no es necesario a priori saber cómo funcionan estos datos o su interacción, para que la red proporcione un modelo parecido al modelo real.

Se dice que una red es capaz de representar la información tratada en la etapa de aprendizaje cuando tiene la capacidad de Auto-organización. Cuando se usan en tareas de “clustering” son capaces de organizar las muestras en conjuntos según ciertas tipologías, esta ventaja es usada principalmente en el procesamiento de imágenes [146].

El “Clustering” o clasificación de patrones son capaces de encontrar patrones de este tipo de aplicaciones se han usado mucho en problemas de minería de datos.

Otra ventaja está en la tolerancia a fallos, son capaces de reconocer relaciones y patrones en aproximaciones con mucho ruido, distorsionadas e incompletas. Los datos no tienen una calidad buena para aun así obtener redes usables.

Una de las grandes necesidades en cualquier ámbito, y sobre todo en el tema de la medicina o la industria, es el poder disponer de sistemas que puedan operar a tiempo real, y ésta es otra gran ventaja sumada a la mejora del procesamiento informático de las GPU’s [147].

La versatilidad de estos algoritmos estriba en la posibilidad de integrarse dentro de otras tecnologías, esto se debe a la incorporación recientemente de desarrollos informáticos con microprocesadores específicos para el procesamiento de datos, que permite resolver y analizar problemas complejos dentro del campo industrial [148].

Existen muchísimas aplicaciones para este tipo de algoritmos [149, 150] algunos de los tipos más usuales serían:

Reconocimiento, clasificación y asociación de imágenes [151], este es uno de los usos en los que más incidencia tiene los análisis RNA, porque permiten encontrar un patrón entre las variables de entrada y salida.

Otro campo sería el del análisis en tiempo real de señales, se analizan las señales como por ejemplo la voz y la RNA es capaz de reconocer similitudes y elementos como serían palabras o sílabas, llegado el caso es capaz, mediante un entrenamiento, el del reconocimiento del tono del locutor [152, 153].

También se usa en aplicaciones de control en la industria del proceso, en medicina [154], en gestión financiera, se usan para crear modelos que permitan predecir situaciones y ver las tendencias de las variables económicas a futuro.

En la industria automotriz [155], se le ha sacado bastante provecho a las RNA para la toma de decisiones en cambios ambientes debido a que a través del uso de métodos tradicionales sería casi imposible de resolver.

Los CNNs o Computational Neural Networks son modelos matemáticos inspirados en la arquitectura neuronal del cerebro humano. Las CNNs pueden reconocer patrones y aprender de sus interacciones con el medio ambiente. Las estructuras más ampliamente investigadas y utilizadas son las redes de alimentación de múltiples capas muy usada en el ámbito industrial [156, 157].

En una CNN de avance de cuatro capas típica, los elementos de proceso en cada capa se denominan nodos o neuronas. Hay nodos g , n , m y s en las capas de entrada, ocultas, ocultas y de salida.

Los parámetros asociados a cada una de estas conexiones se denominan pesos. Todas las conexiones son feed forward; es decir, permiten la transferencia de información sólo de una capa anterior a las capas consecutivas siguientes.

La arquitectura de un nodo típico consiste en que cada nodo j recibe señales entrantes de cada nodo i en la capa anterior asociando cada señal entrante (x_i) es un peso (W_{ji}).

La señal entrante efectiva (I_j) al nodo j es la suma ponderada de todas las señales entrantes:

$$I_j = \sum_{i=1}^g x_i W_{ji} \quad (25)$$

La señal entrante efectiva, I_j , pasa a través de una función de activación (a veces denominada función de transferencia) para producir la señal saliente (y_j) del nodo j .

En este estudio se utilizará la función lineal ($y_j = I_j$) en la capa de salida y se usará la función no lineal sigmoide en las capas ocultas en el que I_j puede variar en el rango $(-\infty, \infty)$, pero y_j está delimitado entre 0 y 1.

$$y_j = f(I_j) = \frac{1}{1 + \exp(-I_j)} \quad (26)$$

Debido al uso de funciones sigmoides en el modelo CNN, los valores de las variables de datos deben normalizarse en el rango $[0, 1]$ antes de aplicar la metodología CNN.

Para determinar el conjunto de pesos se realiza un proceso correctivo-repetitivo llamado 'aprendizaje' o 'entrenamiento'. Este entrenamiento forma las interconexiones entre neuronas utilizando entradas y salidas conocidas (conjuntos o patrones de entrenamiento), y presentándolos a la CNN de alguna manera ordenada, ajustando los pesos de interconexión hasta que se alcancen las salidas deseadas.

La intensidad de estas interconexiones se ajusta utilizando una técnica de convergencia de errores que se produzca una salida deseada para una entrada dada.

Hay muchos métodos de entrenamiento. En este trabajo, se propone utilizar una variación del algoritmo de retro propagación [158], conocido como el algoritmo de Levenberg-

Marquardt [159]. Este es un algoritmo de optimización no lineal de segundo orden con una velocidad de convergencia muy rápida y es recomendado por muchos autores [160, 161].

El algoritmo de Levenberg-Marquardt funciona al suponer que la función subyacente, que es modelada por la red neuronal, es lineal. Basándose en este cálculo, el mínimo se puede determinar exactamente en un solo paso [162].

El mínimo calculado es probado, y si el error es menor, el algoritmo mueve los pesos al nuevo punto. Este proceso se repite iterativamente en cada generación. Puesto que la suposición lineal es infundada, puede conducir fácilmente a Levenberg-Marquardt a probar un punto que es inferior (quizás descontroladamente inferior) al actual.

El aspecto relevante de Levenberg-Marquardt es que la determinación del nuevo punto es realmente un compromiso entre un paso en la dirección del descenso más escarpado y el salto antes mencionado [163].

Los pasos exitosos son aceptados y llevan a un fortalecimiento del supuesto de linealidad (que es aproximadamente verdadero cerca de un mínimo). Los pasos infructuosos se rechazan y conducen a un paso de bajada más cauteloso. Así, Levenberg-Marquardt cambia continuamente su enfoque y puede hacer un progreso muy rápido.

El algoritmo de Levenberg-Marquardt utiliza la fórmula de actualización:

$$\Delta W = -(Z^T Z + \lambda I)^{-1} Z^T \epsilon \quad (27)$$

Donde:

ϵ : es el vector de errores de caso.

Z : es la matriz de derivadas parciales de estos errores con respecto a los pesos.

W : son los pesos.

I : es la matriz de identidad.

El primer término de la fórmula de Levenberg-Marquardt representa la hipótesis linealizada; la segunda, una etapa de descenso gradiente. El parámetro de control λ gobierna la influencia relativa de estos dos enfoques.

Cada vez que Levenberg-Marquardt logra bajar el error, disminuye el parámetro de control por un factor de 10, reforzando así el supuesto lineal e intentando saltar directamente al mínimo. Cada vez que falla en reducir el error, aumenta el parámetro de control por un factor

de 10, dando más influencia al paso de descenso del gradiente y también haciendo que el tamaño del paso sea menor, esta metodología es muy usada para la predicción en el sector industrial [164, 165].

Época es el período de tiempo que abarca todas las iteraciones realizadas después de mostrar todos los patrones. Los pesos se actualizan al final de cada época. En este estudio, el aprendizaje será controlado por el método de validación cruzada [166, 167, 168].

El número de épocas, capas ocultas y nodos en las capas ocultas se determinó por ensayo y error. Las CNN, con intervalos de 100-500 épocas, 1-2 capas ocultas y 2-14 nodos ocultos fueron sucesivamente entrenadas, con el conjunto de datos de calibración. La CNN que produjo el mejor rendimiento en el conjunto de validación, dentro de un grupo de 30 repeticiones es la que se selecciona [161].

La simulación de las frecuencias características de los rodamientos se realizó mediante redes neuronales computacionales o artificiales (CNNs). CNNs son modelos matemáticos inspirados en la arquitectura neuronal de los sistemas nerviosos biológicos. Las estructuras más ampliamente estudiadas y utilizadas son redes de alimentación de múltiples capas o perceptrones multicapa [159].

Estos modelos "aprenden" de una manera iterativa, en la que el conjunto de datos se introduce a la red neuronal los tiempos necesarios hasta llegar a un determinado nivel de error (una iteración donde se introducen todos los conjuntos de datos a la CNN).

Estas CNNs supervisadas permiten el análisis de conjuntos de datos complejos y la determinación de relaciones no lineales entre variables dependientes e independientes. Una descripción detallada de perceptrones multicapa CNNs rendimiento se puede encontrar en [169, 170, 171].

Una CNN de alimentación de tres o cuatro capas típicas tiene una capa de entrada, una o dos capas ocultas y una capa de salida. Los elementos de proceso en cada capa se llaman nodos o neuronas. Una CNN con nodos k , n , m y s en las capas de entrada, ocultas primero, ocultas y de salida, respectivamente, tiene la notación de (k, n, m, s) . Los parámetros asociados a cada una de estas conexiones se denominan pesos.

Existen muchos métodos de calibración o aprendizaje de CNN. En este trabajo, el algoritmo de retro propagación estándar se aplicó y resolvió utilizando el paquete de software STATISTICA® Neural Network de Stat Soft (2005).

El mejor método para asegurar que el sobre entrenamiento no se produce es monitorear periódicamente (al final de cada época) el error cuadrático suma para el subconjunto CS y el

subconjunto SS (proceso que se denomina validación interna). Es normal que el error cuadrado suma para el subconjunto CS disminuya continuamente con el entrenamiento. Sin embargo, esto puede estar obligando a la red neuronal para ajustar el ruido en el subconjunto CS.

Para evitar este problema, el entrenamiento se detiene al final de cada época y se calcula el error cuadrado suma del subconjunto (SS). Cuando el error de suma cuadrada del subconjunto (SS) comienza a aumentar, el entrenamiento debe ser detenido y los pesos de la época que proporcionaron un error mínimo para el subconjunto SS deben ser probados con el subconjunto (TS). Esta última fase también se denomina fase de generalización o validación externa.

Todas las variables del subconjunto de datos CSS utilizadas para la formación de los modelos se estandarizaron sustrayendo la media y dividiendo por la desviación estándar. También se transformaron todas las variables del subconjunto de datos (TS) utilizadas para la generalización o verificación de los modelos utilizando la media y la desviación estándar de las mismas variables en el subconjunto de datos CSS. Este procedimiento tiene como objetivo evitar el enmascaramiento de rasgos de interés [172, 173].

El número de capas ocultas (una o dos) y de neuronas ocultas en cada capa oculta de la red neuronal fueron identificados por varios ensayos utilizando el subconjunto de datos CSS. Este procedimiento de prueba y error comenzó con dos neuronas ocultas en una sola capa oculta inicialmente, y el número de neuronas ocultas se incrementó hasta el número de variables de entrada más 10 con un paso unitario en cada ensayo.

Un problema inherente asociado con CNNs es su tendencia a conseguir pegado en mínimos locales. Para resolver este problema, una misma arquitectura CNN fue entrenada 30 veces, comenzando con un conjunto aleatorio de pesos [171].

Este nivel de repetición permite seleccionar una CNN que está entre el mejor 14% de la distribución de todas las CNN posibles con esta configuración en el nivel de confianza del 99% [174].

Se calcularon cuatro medidas de exactitud en las fases de calibración y validación de cada CNN: el coeficiente de determinación (R^2), la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE), el coeficiente de eficiencia (E2) y el índice de persistencia (PI) [175, 176, 177].

El modelo CNN que se desempeñó bien tanto en el conjunto de datos no visto y el conjunto de datos de calibración fue seleccionado [178, 179].

En este trabajo se presentan tres bloques CNN combinados en secuencia para el modelado de entradas y salidas. El primer bloque se utiliza para modelar las entradas en el que

se incluyen todos los años de muestreo, todas las frecuencias características y las posiciones.

El segundo estudio de CNN aborda el análisis con todos los años pares y otro con los impares, en cada una de las seis posiciones de medida, posteriormente, se realiza el análisis quitando la variable más determinante para comprobar que sigue existiendo linealidad con los resultados y no existe variación sin la frecuencia de más peso.

CAPÍTULO IV: MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Área en estudio

El equipo a estudiar es un conjunto soplante perteneciente a la empresa Atlantic Copper, ubicada en la Avda. Francisco Montenegro en Huelva, por secreto industrial no se podrá indagar en el proceso productivo, ni las implicaciones de este equipo al conjunto, sólo se indicarán sus datos técnicos y referencia. La fiabilidad ha llevado a esta empresa a desarrollar unos de los programas de control más especializados del sector, con la monitorización de equipos desde hace más de 20 años, buscando la durabilidad y predicción de fallos en estos.

Para llevar a cabo este proceso, tienen instrumental y personal especializado que muestrean diariamente los equipos en varias posiciones, estudiando sus variaciones he intentado prevenir el fallo. Se han obtenido los datos de muestreo de un equipo soplante, para intentar encontrar una relación o linealidad entre los distintos parámetros que afectan al funcionamiento de los rodamientos. Este estudio seguirá la línea de la RNA para su análisis el tamaño de la muestra analizada aporta valor y confianza a los resultados obtenidos.

4.2. Equipo estudiado

El equipo es una soplante y consta de dos partes diferenciadas, el sistema de impulsión o motor Framesize 400 de 3190 kg., con unas dimensiones de 1900 x 910 mm., fijado a una bancada de acero de 2100 x 3900 x 300 mm., Ésta a su vez sirve de soporte y unión al sistema, formado por el equipo impulsor y por un ventilador de 2075 mm de diámetro, todo ello se encuentra unido por un eje de 95 mm y 3900 mm de longitud. Esta máquina, está referenciada con el número FRL104, fue diseñada para la impulsión de fluidos y tiene las características técnicas que pueden verse en la tabla siguiente:

Fabricante	WITT&SOHN	Tipo	P-RFS9/630/2075/5 VA
N.º Bastidor	69069-00-NEK	N.º serie	95 045
Control	LURGI / KORTING	Presión de trabajo (Pa)	16500
Diseñado	WTT-Standard	Tª de trabajo (°C)	72
Aparato	95 045/1.1	Presión de diseño (Pa)	19800
Año	1995	Tª máx. (°C)	100

Tabla 1. Datos del equipo FRL104.

Las dimensiones se pueden visualizar mejor en las siguientes figuras con vistas en planta y alzado. Como se puede observar en el lado derecho el motor impulsor Frame que acciona el conjunto de álabes ubicado en el margen izquierdo de las siguientes imágenes.

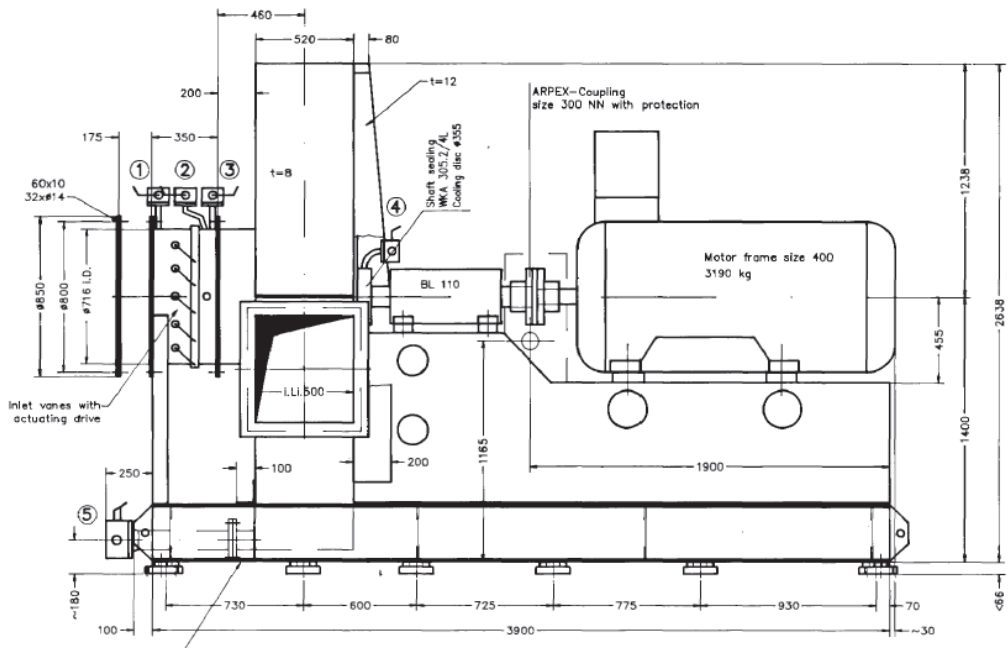


Imagen 3. Vista en alzado de la soplante FRL104.

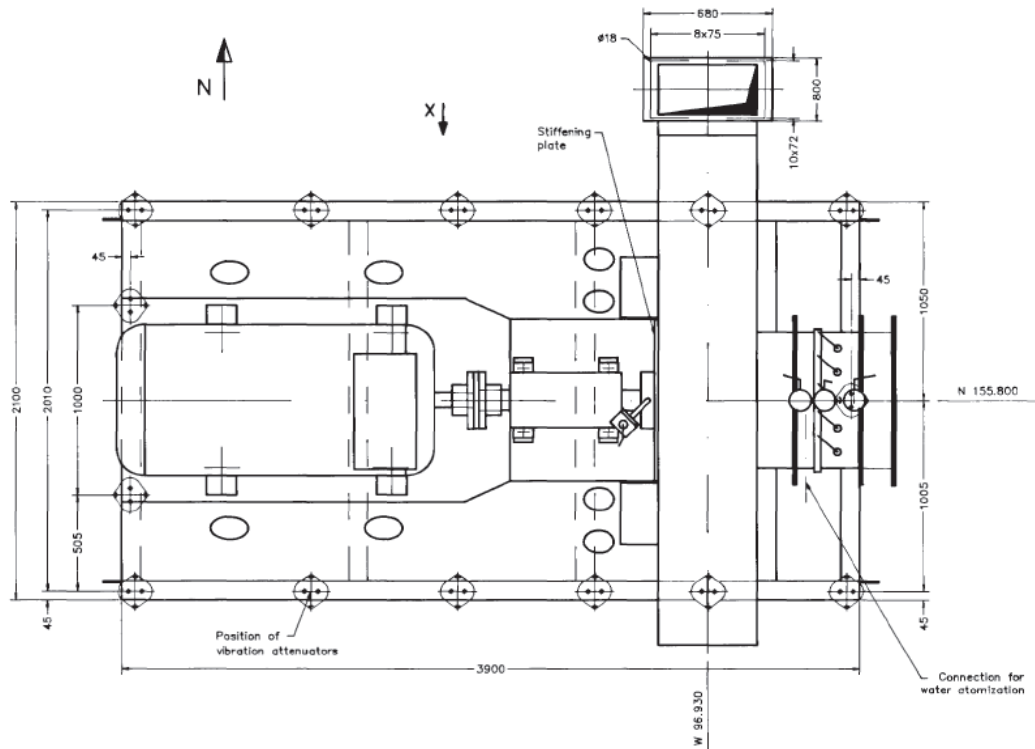


Imagen 4. Vista en planta de la soplante FRL104.

La impulsión de los álabes del ventilador se realiza a través de un acoplador identificado en la imagen 1 como BL110, quedando el eje dividido en dos secciones, la parte del motor de 1900 mm y la parte del ventilador de 2000 mm. Este tramo está soportado por tres rodamientos

el SKF6322, el FAGNU322 y el SKFNU322.

El sistema de accionamiento mecánico se realiza mediante un eje de 95 mm., de diámetro movido por el motor eléctrico de 500 KW.

4.3. Elementos de sujeción

Este equipo, como la mayoría de las máquinas modernas que funcionan a velocidades y cargas grandes, tiene como elemento de transmisión mecánica un eje soportado por rodamientos. Son estos elementos los primeros en causar el fallo del sistema. Por ello es tan importante tener un buen diseño, una apropiada selección de estos y un exhaustivo plan de testeo, debido a que son el primer indicador de problemas.

En el equipo estudiado, parte impulsada, se encuentran tres tipos diferentes de cojinetes cuyas características técnicas se muestran en las siguientes tablas 2, 3 y 4.

RODAMIENTO SKF6322

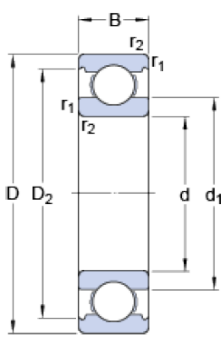
Carga dinámica básica	C 203 kN	d 110 mm	
Carga estática básica	C0 180 kN	D 240 mm	
Carga límite de fatiga	Pu 5.7 kN	B 50 mm	
Velocidad de referencia	6000 r/min	$d_1 \approx 149.5$ mm	
Velocidad límite	5300 r/min	$D_2 \approx 207$ mm	
Factor de cálculo	kr 0.03	$r_{1,2} = 3$ mm	

Tabla 2. Características de rodamiento SKF6322.

RODAMIENTO SKFNU322

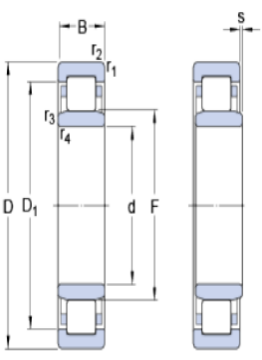
Carga dinámica básica	C 530 kN	d 110 mm	
Carga estática básica	C0 540 kN	D 240 mm	
Carga límite de fatiga	Pu 61 kN	B 50 mm	
Velocidad de referencia	3000 r/min	$D_1 \approx 200$ mm	
Velocidad límite	3400 r/min	F 143 mm	
Factor de cálculo	kr 0.15	$r_{1,2} = 3$ mm	

Tabla 3. Características de rodamiento SKFNU322.

RODAMIENTO FAGNU322

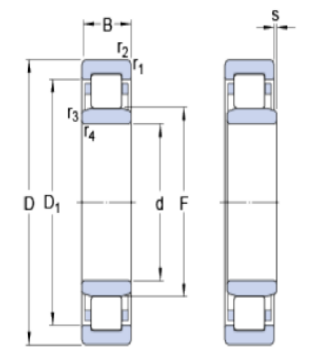
Carga dinámica básica	C 415 kN	d 110 mm	
Carga estática básica	C0 475 kN	D 240 mm	
Carga límite de fatiga	Pu 61 kN	B 50 mm	
Velocidad de referencia	3000 r/min	$D_1 \approx 200$ mm	
Velocidad límite	3000 r/min	F 143 mm	
Factor de cálculo	kr 0.15	$r_{1,2} = 3$ mm	

Tabla 4. Características de rodamiento FAGNU322.

Como se muestran en las tablas anteriormente expuestas, estos rodamientos alcanzan un tamaño nominal de 240 mm, con una carga nominal de 415 kN, esto nos da una idea de la envergadura del equipo y la importancia que tienen esos elementos para el buen funcionamiento del mismo.

Según vimos en el capítulo de estado del arte, las frecuencias vibratorias de cada elemento están sujetas a las ecuaciones de la uno a la 6 de esta Tesis, y por la cual podemos determinar en función de la velocidad de giro del eje la frecuencia fundamental de cada elemento.

Las frecuencias fundamentales de los rodamientos soportantes del eje de la soplante son los expresados en la siguiente tabla. Para ello se siguen las indicaciones de la norma ISO 10816.3 [180].

Frecuencias	SKF6322	FAGNU322	SKFNU322
FTF	568.58	608.81	601.96
BSF	2986	3938.1	3735.4
2BSF	5971.9	7876.1	7470.9
BPOR	4550.5	7911.9	8425.9
BPIR	7366.6	11452	12434
SPEED	1490	1490	1490
Álabes	13410	13410	13410

Tabla 5. Frecuencias en Hz., de los rodamientos.

En este trabajo no sólo se han tenido en cuenta las frecuencias características de rotura de las distintas partes que constituyen un rodamiento, sino también se ha prestado atención a la frecuencia de giro del sistema, que en el caso de estudio dispone de un régimen de movimiento continuo sin aceleraciones, generando un movimiento estable con una velocidad angular constante.

Otro factor para tener en cuenta son los elementos impulsados, en este equipo son álabes de impulsión de aire, que como todo elemento en movimiento va a generar una frecuencia característica.

4.4. Adquisición, procesamiento y análisis de datos

4.4.1. Análisis de vibración

Para el procesamiento de datos se ha usado el analizador Entek IRD y un software Odyssey Emonitor, facilitando el monitoreo en continuo de datos [181].

Este equipo de supervisión y control permite, desde el punto de vista vibratorio, generar gráficas de tendencia de los niveles de energía de vibración, sus frecuencias características y alarmas dinámicas, adelantándose y pudiendo evitar fallas imprevistas en el mismo.

El hardware del equipo consta de una interfaz con 16 canales que son el medio conductor entre el palpador y la CPU, esta trabaja con un voltaje nominal de 24 v a una corriente continua de 3.6 mA; un multiplexor con 4 filtros de paso alto, un integrador para generar las señales de aceleración en función de la velocidad y análogamente la velocidad en función del desplazamiento, derivando ambas funciones de partida.

Otro elemento para destacar es el filtro antialiasing que es un filtro utilizado antes del muestreador de señal para evitar el alias espectral de una señal para satisfacer el teorema de muestreo [182] que elimina frecuencias de alta, evitando la aparición de aliasing [183] en la señal recibida y por último el convertidor análogo digital que captura hasta 51,2 kHz con una resolución de 16 bit.

Todo este sistema no tendría lugar de ser sin la herramienta que pone en funcionamiento y procesa el conjunto, para ello se usa un software de mantenimiento, Odyssey Emonitor, generando un despliegue gráfico de los datos obtenidos en el muestreo, valores globales, espectros, forma de ondas, velocidad, entre otros.

La obtención de datos se ha llevado a cabo cumpliendo las especificaciones de la norma ISO 10816 usada en numerosos estudios [184, 185] y en concreto la parte 3, que dice la norma que es de aplicación para sistema o complejos industriales rotativos con potencia superior a 15 kW y velocidad de giro comprendida entre 120 y 15000 rpm., según la norma anteriormente referenciada.

Como se indicó en la introducción, esta norma es solo de aplicación al sistema soplante. Para la parte del motor se tendría que seguir las indicaciones incluidas en la norma ISO 2373, que no se abordan en este estudio [186, 187].

Tras la determinación de la norma de aplicación, se establece la clase del equipo. Ésta se hace en función de la potencia de consumo del sistema impulsor, el equipo tiene una potencia de 500 kW y altura de eje mayor de 315 mm, se encuentra en el grupo 1.

El grupo 1 está formado por cuatro niveles de riesgo que van desde la A hasta la D, el nivel más benévolo corresponde al nivel A, que hace mención de máquinas nuevas o casi nuevas, cuyo funcionamiento no presenta ningún tipo de anomalía o vibración.

En el segundo nivel, B, la norma indica que en este intervalo de vibración la máquina no presenta problemas para funcionar en un periodo relativamente grande, sin problemas ni cortes en sus características funcionales y no afectando al sistema de producción.

El tercer estado, nivel C, es cuando el comportamiento del equipo produce un funcionamiento no satisfactorio para el sistema operativo al que se encuentra unido, pudiendo condicionar la integridad del proceso en un periodo no muy largo de tiempo. En tal caso, se produce un mantenimiento correctivo.

El último nivel es el D, que corresponde al estado más severo y en el que se producen daños al sistema y la paralización de la línea de fabricación.

Otro aspecto para tener en consideración es la de clasificar la flexibilidad del conjunto de soporte rígidos y flexibles. Las condiciones de soporte están determinadas por la relación entre las flexibilidades de la máquina y la base.

Si la frecuencia natural de una máquina combinada es menor y el sistema de apoyo en la dirección de la medición es mayor que su frecuencia de excitación principal en al menos 25%, en tal caso el soporte del sistema es considerado rígido. En el resto de los casos, este apoyo puede considerarse flexible.

Como ejemplos típicos, los motores eléctricos de tamaño grande y mediano, principalmente con bajas velocidades, tendrían normalmente soportes, mientras que los turbogeneradores o compresores con potencia superior a 10 MW y conjuntos de máquinas verticales tendrían generalmente soportes flexibles.

Está comprobado que existen desalineaciones en equipos con potencias elevadas, pero incluso en equipos con potencia inferiores a 300 kW también se detecta que la desalineación es una de las causas que generan problemas para la estabilidad del conjunto y los sistemas de sustentación de los ejes, generando desviaciones entre el sistema impulsor y el impulsado.

Los límites máximos permitidos por la norma son los pertenecientes a un equipo situado en el grupo 1, que hace mención de equipos con potencia superior a 300 kW y con motores de ejes con altura superior o igual a 315 mm. En este estudio hay un equipo con una potencia de 500 kW, por usar un motor ABB de 6000 V, (HXR400LH4L).

Antes de abordar los valores que delimitan el funcionamiento mínimo y máximo de este tipo de equipos, se debe abordar la unidad más significativa para tener menos discrepancias en alta y baja frecuencias. La norma basa su nivel de severidad en función del nivel máximo de amplitud o valor pico.

Existen muchas formas de medir el valor máximo de amplitud, pero esta norma usa la unidad de medida RMS (Root Mean Square) y aunque existen otras metodologías esta Tesis seguirá lo establecido en la norma internacional anteriormente reseñada [188, 189].

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{I=1}^N X(i)^2} \quad (28)$$

Por todo lo anterior expuesto, equipo con eje flexible, potencia superior a 300 kW, y velocidad de 1500 rpm, el equipo tendría un nivel de funcionamiento comprendido entre 0,18 a 11 RMS, siendo el valor máximo crítico de 7,1 RMS, donde se aplicaría un mantenimiento correctivo.

Estos niveles de severidad se aglutinan en cuatro estamentos según el riesgo intrínseco. Los niveles están definidos por letras que van desde el nivel A al nivel D, y sus valores se pueden ver en la tabla adjunta:

Velocidad RMS (mm/s)	Grupo 1		Grupo 2		Grupo 3		Grupo 4		Grupo 5
	Rígido	Flexible	Rígido	Flexible	Rígido	Flexible	Rígido	Flexible	
0.18 – 0.28	A	A	A	A	A	A	A	A	A
0.28 – 0.45									
0.45 – 0.71			B	B	B		B	B	B
0.71 – 1.4									
1.4 – 1.8	B	B	C	B	B	C	C	C	
1.8 – 2.3									
2.3 – 2.8									
2.8 – 3.5	C	B	C	C	B	C	C	D	
3.5 – 4.5									
4.5 – 7.1	D	D	D	D	D	D	D	D	
7.1 - 11									
>11									

Tabla 6. Nivel de severidad según norma ISO1816 para equipos con velocidad superior a 600 rpm.

Tras conocer los niveles de riesgo que marca la norma ISO 10816-3 y los niveles críticos de funcionamiento, se aborda el proceso seguido para la monitorización y obtención de datos.

El equipo consta de dos puntos de medida identificados con el número 3 y 4; en cada punto se realiza el muestreo en las tres coordenadas del espacio X, Y, Z, identificados como, ejes horizontal, vertical y axial, en este estudio.

Identificación	Número	Ubicación
Sopl. LA H	003	Horizontal
Sopl. LA V	003	Vertical
Sopl. LA A	003	Axial
Sopl. LOA H	004	Horizontal
Sopl. LOA V	004	Vertical
Sopl. LOA A	004	Axial

Tabla 7. Posiciones de muestreo de la Soplante FRL104.

Para la toma de datos se siguieron varias premisas. La primera es el uso de un acelerómetro con nivel de sensibilidad de 100 mV/g, esto implica que por cada 1 g el traductor emite una señal de 1 mV.

El tipo de traductor será con desplazamiento con contacto, esto permite un rango de frecuencia de 10.000 Hz. Este tipo de dispositivo dispone de preamplificador para mejorar el

valor de la señal gracias a su baja impedancia, debido a que la señal emitida es de bajo valor.

El sistema de fijación será por imán y base de montaje rápida, que permite alcanzar fallas en un intervalo de frecuencia mayor, mejorando su rango y obteniendo una sensibilidad de medida comprendida entre 0-300 Hz, entendiéndose sensibilidad como el cociente producido entre dos variables, como son la tensión de salida en voltios y la vibración que provoca.

Todo acelerómetro genera su propio ruido, se desaconseja usar equipos de medida que superen los 300 Hz., el usado en el estudio es de 100 mV/g que genera un ruido bajo.

Otra variable importante es la resolución en términos de frecuencia, esta viene determinada por el ancho de banda con que se lleva a cabo el muestreo y análisis. Ésta permite determinar la distancia entre frecuencias en un espectro.

El cálculo del ancho de banda (AB), viene determinado por el producto del rango de frecuencias (RF) y el factor de ventana (FV) partido por el número de líneas (NL), según la siguiente expresión:

$$AB = \frac{(RF) * (FV)}{NL} \quad (29)$$

Existen tres tipos de ventanas, rectangular, hanning y flap top, dando un valor de 1, 1.5 y 3.6 respectivamente.

El monitoreo se realiza con una ventana hanning, un número de líneas de 3200, y un rango para velocidad de 60.000 y 300.000 Hz para aceleración, obteniendo un ancho de banda de 28 CPM para velocidad y 140 CPM para la aceleración.

También, se debe determinar la resolución que viene determinada por el cociente entre la frecuencia máxima y el número de líneas, siendo mayor al aumentar el número de líneas. Según la siguiente expresión se obtiene una resolución de 18 CPM para la velocidad y 93 CPM para la aceleración.

$$\text{Resolución} = \frac{(\text{Frecuencia Max})}{(\text{N}^\circ \text{ de líneas})} \quad (30)$$

El estudio y correcta evaluación de parámetros ayudan a suavizar el efecto de pendiente de esquí típico en la representación espectral de este tipo de señales.

Para el diagnóstico, discriminación, existencia y severidad de las fallas, la norma ISO 10816 determina que la evaluación se realiza mediante el nivel espectral en base a la velocidad. Esta presenta mayor uniformidad tanto a baja como a alta frecuencia, mejorando el análisis a

través de unidad de desplazamiento y aceleración.

Las velocidades presentan un comportamiento espectral, generando mejor muestreo a bajas frecuencias. En el caso de la aceleración, la respuesta es contraria, dando mejores niveles a alta frecuencia.

El estudio y correcta evaluación de parámetros ayudan a suavizar el efecto provocado por la integración digital, causante del efecto pendiente de esquí, típico en la representación espectral de este tipo de señales al integrar el ruido, que puede llegar a enmascarar defectos debido a la atenuación de las frecuencias de alta y el realce de las componentes generadas en baja frecuencia.

La integración digital se realiza sobre el espectro vibratorio de la vibración generada por el equipo, y pondera las señales de baja frecuencia, actuando menos sobre las de alta, esto se debe a que la velocidad es inversamente proporcional a la frecuencia.

$$V(f) = \frac{c_1 A(f)}{f} \quad (31)$$

En el caso del desplazamiento, se ve afectado igualmente por la frecuencia, pero en el caso de la velocidad, ésta lo hace de un modo exponencial.

$$V(f) = \frac{c_1 A(f)}{f^2} \quad (32)$$

Donde:

A(f): Aceleración a la frecuencia f.

V(f): Velocidad a la frecuencia f.

D(f): Desplazamiento a la frecuencia f.

C₁ y C₂: constantes según las unidades de medida.

Según los parámetros expuestos, se han obtenido los niveles máximos de RMS de cada posición y en cada eje coordenado durante los 15 años de muestreo, obteniendo un total de 617 medidas en cada una las posiciones en cada eje y por cada variable de estudio.

El número de medidas se realiza para que la muestra sea suficientemente representativa, según el teorema central del límite [190], la suma de las variables independientes de varianza finita y de la misma distribución tienden a una distribución normal cuando el número de variables es grande. Si se supone una distribución normal, el error Er se podría estimar al calcular la media global gracias a los N datos de medida según la siguiente ecuación [191].

$$E_r = \sqrt{\frac{2}{N}} \quad (33)$$

En este estudio se ha considerado un error de 5% para el muestreo de cada frecuencia característica y un error por cada una de las posiciones de 2,5 %.

De los tres puntos de medida, sólo uno disponía de monitorización en continuo, el resto se hacía a modo reducido en periodos comprendidos entre siete y quince días. De ahí que se ha obtenido el valor de medida que se realizaba en el mismo momento, obteniendo alrededor de seiscientas medidas en esos quince años por cada una de las posiciones.

El estudio y análisis de cada una de ellas y su evaluación se realizarán a un nivel más exhaustivo cuando se valoran los niveles según norma y haciendo una comparativa entre ambos, puesto que estos son valores espectrales de desplazamiento sin integración digital. Para el análisis se usarán los valores según norma de aplicación ISO 10816, estos serán los valores de velocidad en términos de RMS.

A continuación, se muestran los resultados de velocidad a nivel de amplitud máxima o pico en términos de RMS, durante el periodo de muestreo y en cada una de las distintas posiciones.

En la siguiente figura se puede ver los resultados a lo largo de toda la muestra de la posición 3.

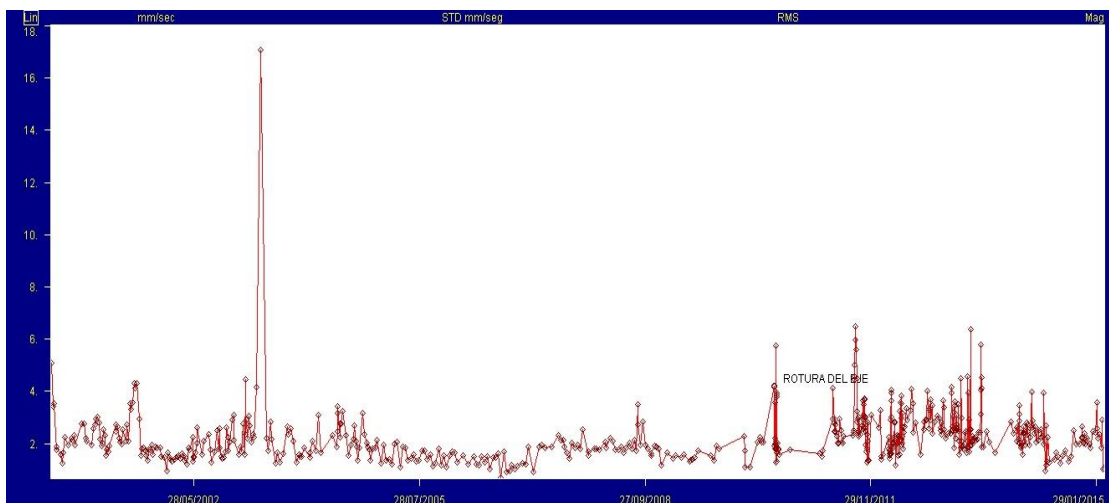


Figura 1. Vista general de amplitud máxima en la posición 3 axial en términos de RMS (mm/s).

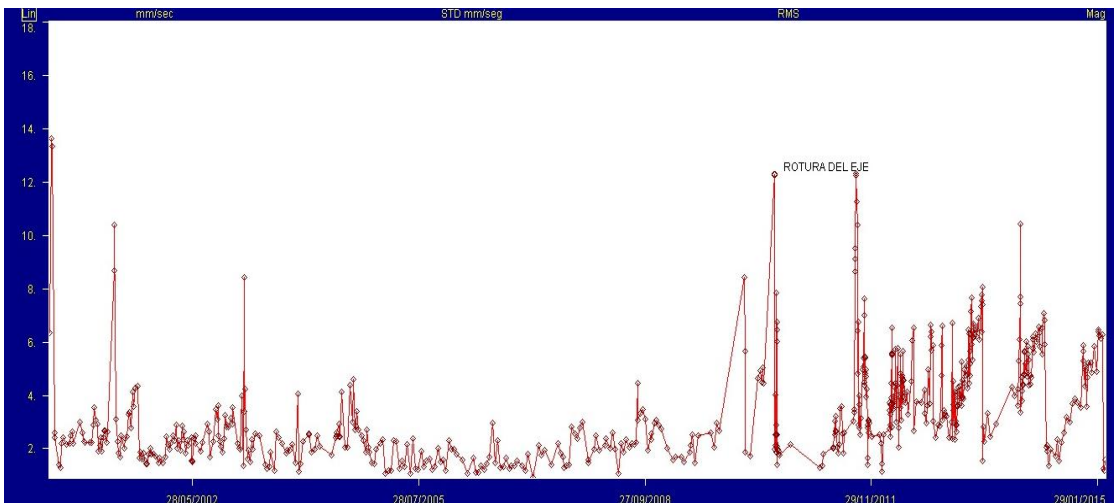


Figura 2. Vista general de amplitud máxima en la posición 3 vertical en términos de RMS (mm/s).

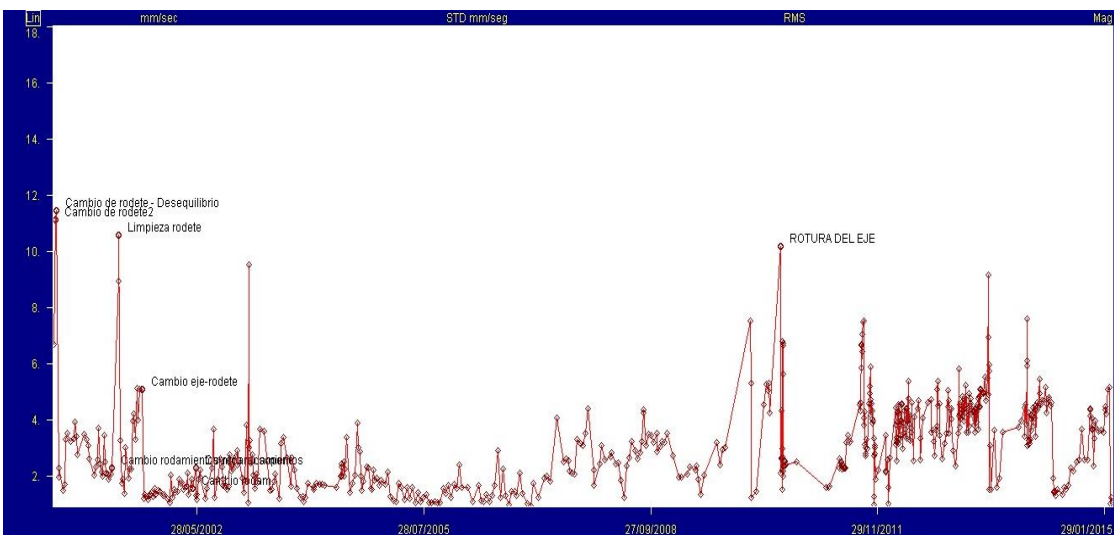


Figura 3. Vista general de amplitud máxima en la posición 3 horizontal en términos de RMS (mm/s).

Como se puede ver en las figuras de las tres posiciones del eje 3, axial, horizontal y vertical, se pasa de valores aceptables, según la norma menos de 7,11 RMS, a valores en los que se precisaría la actuación, superiores a los 7,11 RMS donde no se puede garantizar el correcto funcionamiento del equipo, provocando la parada inminente de éste. Este tipo de comportamiento es el que se conoce donde los valores energéticos suben en un periodo de tiempo corto se conoce como curva de esquí.

A continuación, se muestran los resultados de amplitud máxima en la posición 4 y sus respectivos ejes.

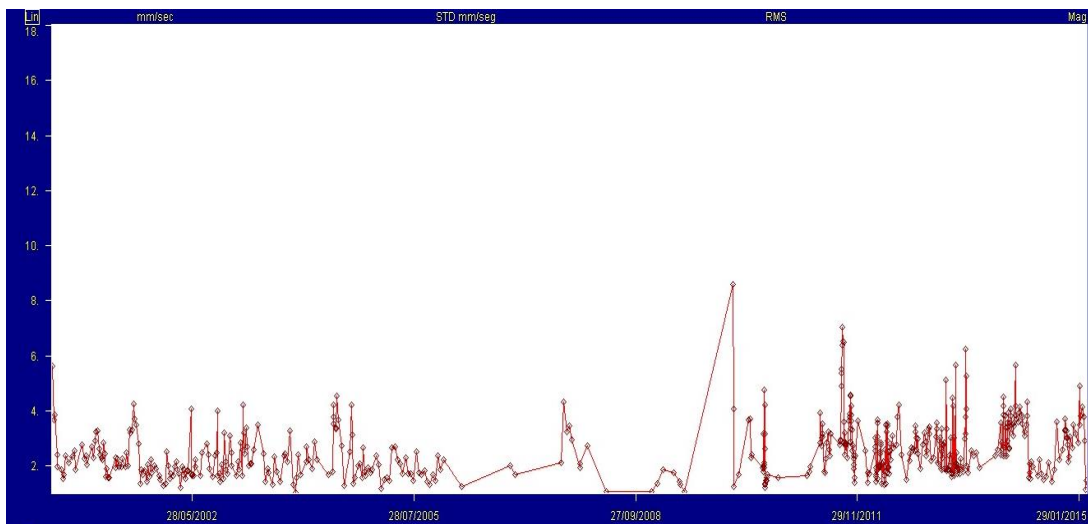


Figura 4. Vista general de frecuencias en la posición 4 axial en términos de RMS (mm/s).

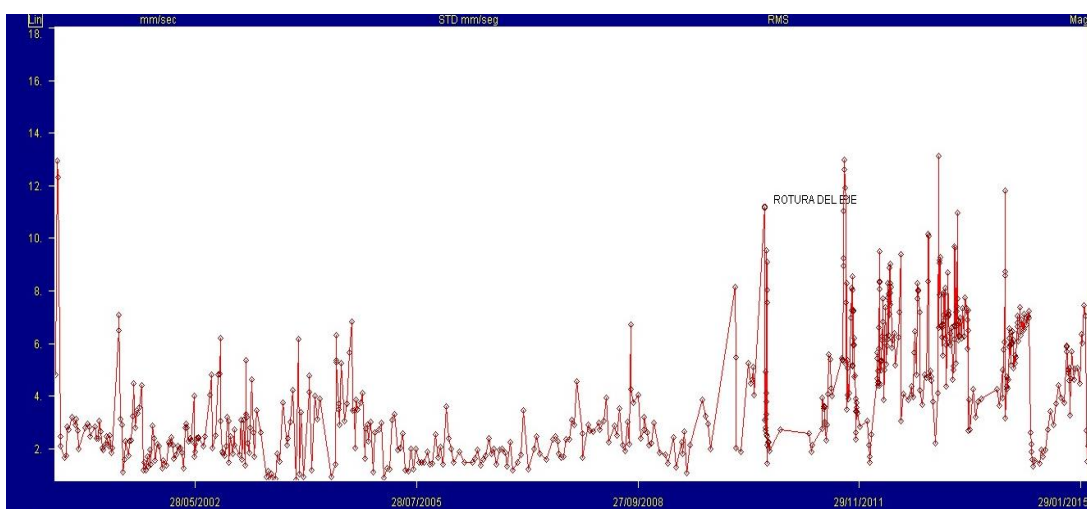


Figura 5. Vista general de frecuencias en la posición 4 vertical en términos de RMS (mm/s).

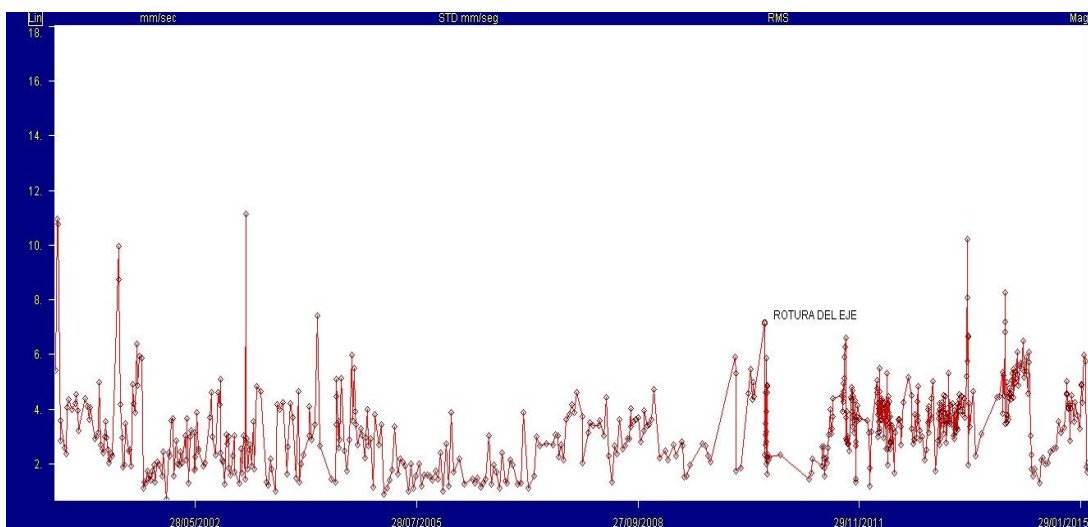


Figura 6. Vista general de frecuencias en la posición 4 horizontal en términos de RMS (mm/s).

Como se vio en la posición 3, se observa como es en la posición 4, la muestra tiene una secuencia alternativa pasando de valores aceptables a críticos en un corto periodo de tiempo, los niveles aceptables medios y críticos son definidos por la norma ISO 10816 y están expresado en la tabla 6.

Un hecho significativo que se visualiza en todas las figuras es la rapidez como en pocos días se pasa de un equipo en correcto funcionamiento a uno donde se tiene que producir el paro o la rotura del equipo con el correspondiente mantenimiento correctivo y el paro de la producción.

A continuación, se muestran los niveles comparativos en función de la norma ISO y algunas de las correcciones que se llevaron a cabo debido a superar los niveles máximos aconsejables.



Figura 7. Vista general de frecuencias en la posición 3 axial en términos de RMS (mm/s).

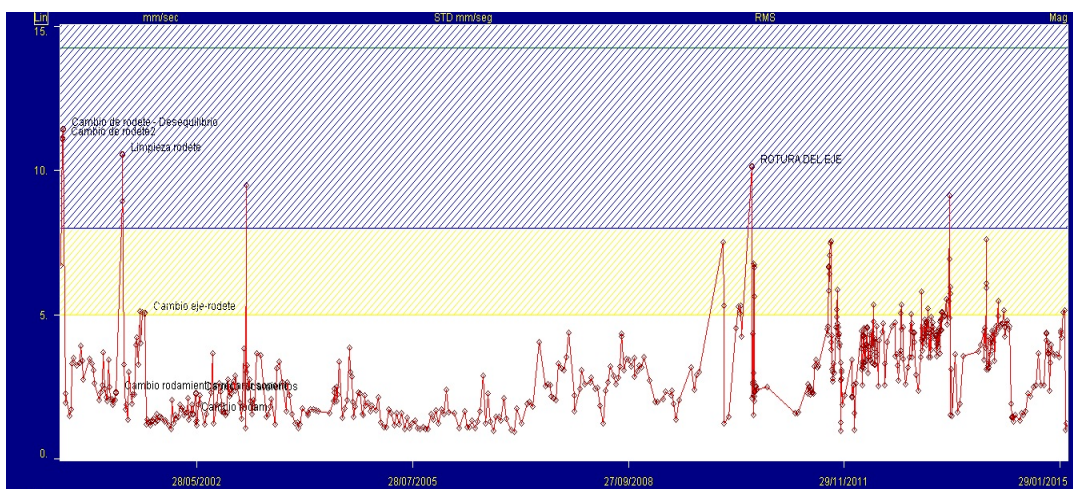


Figura 8. Vista general de frecuencias en la posición 3 vertical en términos de RMS (mm/s).

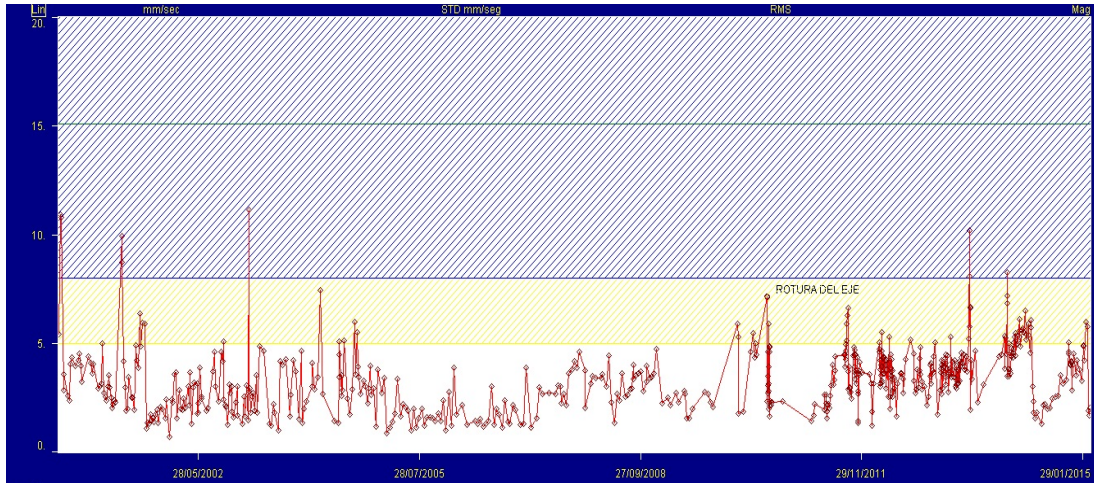


Figura 9. Vista general de frecuencias en la posición 3 horizontal en términos de RMS (mm/s).

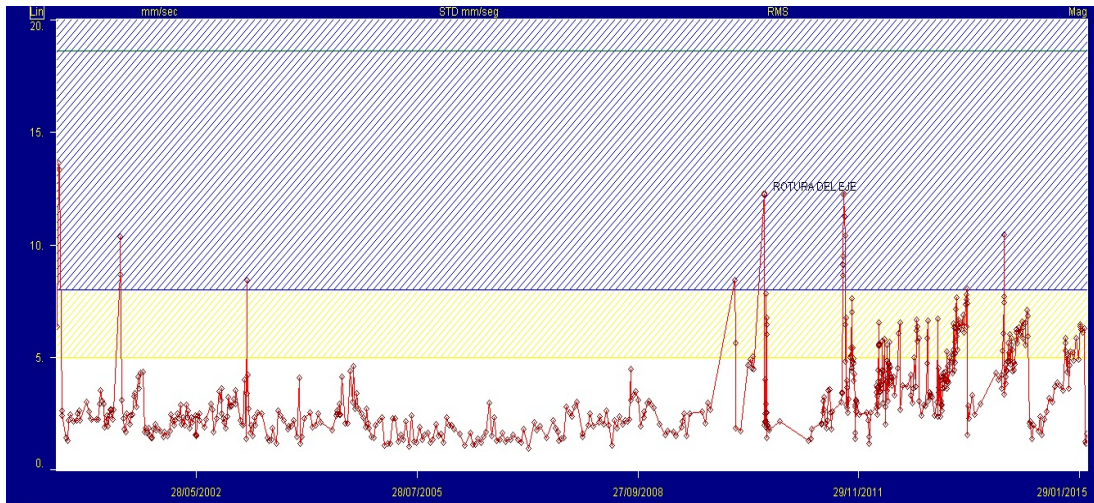


Figura 10. Vista general de frecuencias en la posición 4 axial en términos de RMS (mm/s).

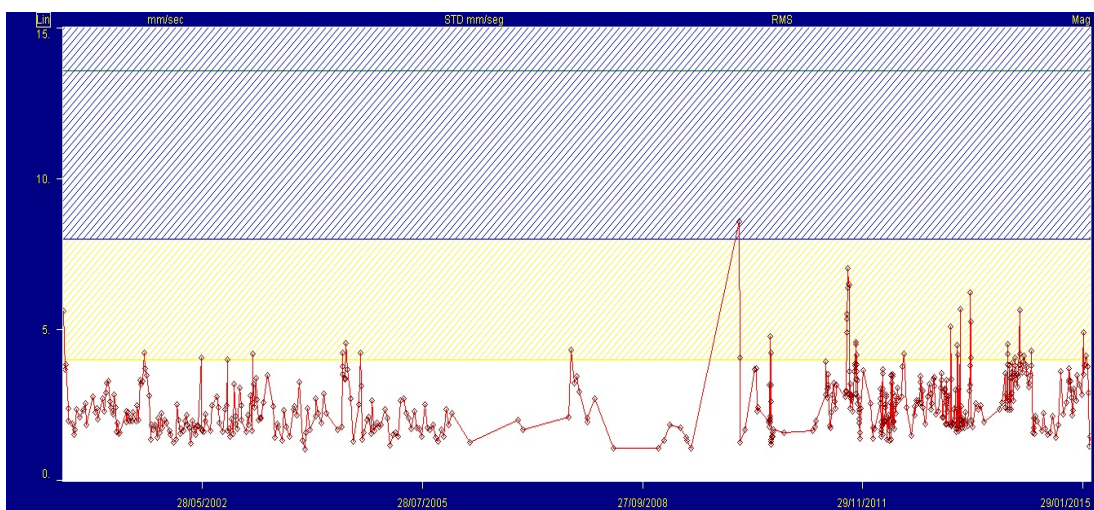


Figura 11. Vista general de frecuencias en la posición 4 vertical en términos de RMS (mm/s).

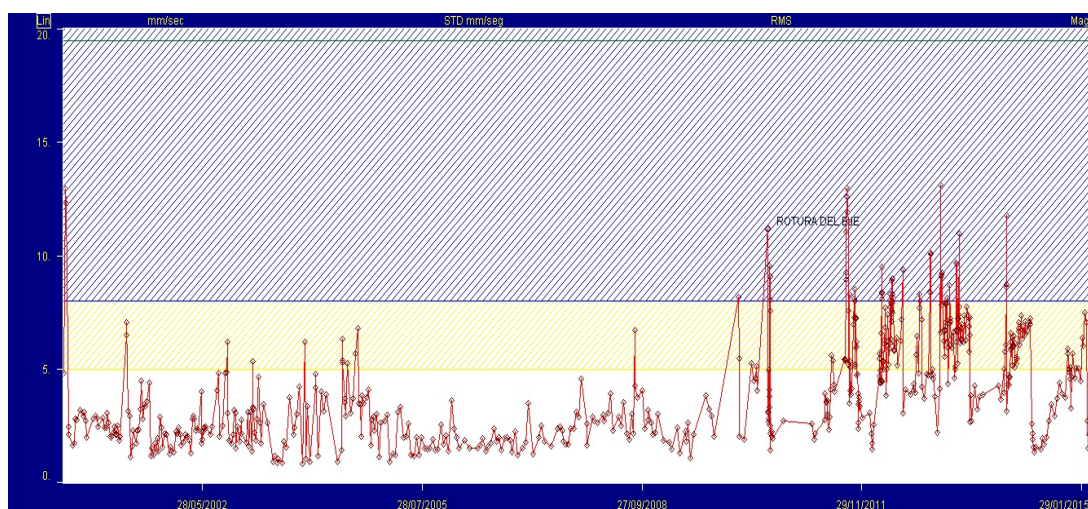


Figura 12. Vista general de frecuencias en la posición 4 horizontal en términos de RMS (mm/s).

El cambio de valor entre medidas casi próximas en el tiempo; es por lo que lleva, a las entidades industriales, a un control de medida exhaustivo a los equipos críticos. Estos valores son fundamentales para determinar los planes de mantenimiento predictivo y preventivo, intentando evitar a toda costa una acción correctiva que implicaría un sobre coste en material, recursos humanos y tiempo.

Durante los quince años de monitoreo se han producido niveles de RMS que han provocado una actuación correctiva, hecho por el cual se tomó la determinación de realizar un muestreo continuo del equipo dada la importancia que tenía este equipo para la integridad de la producción del complejo industrial.

En este periodo de vida útil se producen muchas acciones correctivas a pesar de disponer de un sistema de mantenimiento predictivo, donde se engloban todas las medidas preventivas y control de los equipos, apoyados por sistemas de Gestión de Mantenimiento Asistidos por Ordenador (GMAO).

Averiguar la causa y motivo de fallo es en muchas situaciones casi imposible, porque en él participan variables tan dispares como diseño, montaje, uso, condiciones puntuales y regulares de funcionamiento y todas ellas pueden haber contribuido al fallo mecánico.

Siempre se tuvo la idea de que el error venía producido o se aplicaba principalmente en dispositivos de larga vida de uso o dispositivos que había sufrido grandes modificaciones en sus condiciones de trabajo nominal, pero se demostró que esto no era cierto y existen varios modelos de evolución del fallo, los cuales no estaban relacionados con la vida del equipo y la naturaleza del colapso era en la gran mayoría de los casos aleatoria como se pueden ver en los seis modelos de Weibull y de todos ellos fue el modelo de Nowlan el que se producía con mayor periodicidad casi un 70 %, donde se veían implicados factores del sistema, humanos,

de diseño y de calidad de los materiales usados.

En el estudio se ha determinado que el tiempo transcurrido desde el síntoma hasta el fallo ha sido cortísimo, en muchos casos menores al L10 de 10.000 horas establecido por el fabricante, porque los ensayos se realizan en condiciones ideales de funcionamiento. Por ello no se pueden tomar los valores aportados por el fabricante como válidos para planificar el plan preventivo.

El software Emonitor, facilitado por Atlantic Copper, proporciona los datos numéricos en términos de RMS (mm/s) de las cuatro posiciones y sus tres ejes característicos, horizontales, verticales y axiales, de la variable de Amplitud Máxima, que es el valor resultante de todas las interacciones vibracionales generadas por el equipo y sus componentes en ese punto.

Se debe destacar que la toma de datos en campo fue realizada por personal cualificado con nivel categoría I o II según la ISO 18436-2, cumpliendo todos los estándares de calidad, hecho que le da a esta investigación mayor prestigio a diferencia con otras publicaciones y tesis donde no se especifica.

El software Emonitor si facilita las gráficas en cascada de los espectros de frecuencia, no así el valor numérico de las frecuencias generadas por cada uno de los elementos generadores de vibración de los rodamientos y del propio equipo.

Por ello, se procesó manualmente la obtención de cada una de las gráficas de las frecuencias características de cada componente de estudio. En este caso sería la frecuencia de las jaulas FTF, la generada por las bolas BSF, la de su segundo armónico 2BSF, la generada en la pista interior BPIR y la generada en la pista exterior BPOR. Además de estas se incluyeron en la adquisición de datos la generada por la frecuencia de giro de la máquina, identificada en esta tesis como SPEED y la propia del giro de los álabes (ALABES).

Con todas estas imágenes procesadas por el doctorando y que pueden ser visualizadas en el Anexo de gráficas obtenidas por Emonitor, se usó un software desarrollado y facilitado por la empresa Seabery Soluciones, en el cual participó el doctorando, para el procesamiento de imagen, que por motivos de privacidad no se incluye en esta tesis.

Esta empresa, de alto reconocimiento en el ámbito de desarrollos de nuevas tecnologías de procesamiento de imagen y Realidad Aumentada, ha obtenido el premio Auggie en dos ocasiones, siendo el mayor certamen y evento sobre esta novedosa tecnología [192]. La técnica usada sigue los principios de sistema de marcador fiducial [193, 194], para estimación por cámara y el procesamiento de estas imágenes por análisis de pixel.

Esta tesis aborda y determina de esta forma la influencia de las frecuencias características de los rodamientos, la de giro de la propia máquina y los álabes, para deducir cómo afectan dichas variables a los valores de amplitud máxima permitidos por norma. El proceso de obtención de los valores de amplitud máxima y el de las frecuencias características de cada rodamiento se realizó a través del procesador de señal, para ello se siguieron los siguientes pasos:

- Primero se determina qué posición y en qué eje se va a analizar la frecuencia, como ejemplo se usará la posición 3 del eje horizontal.

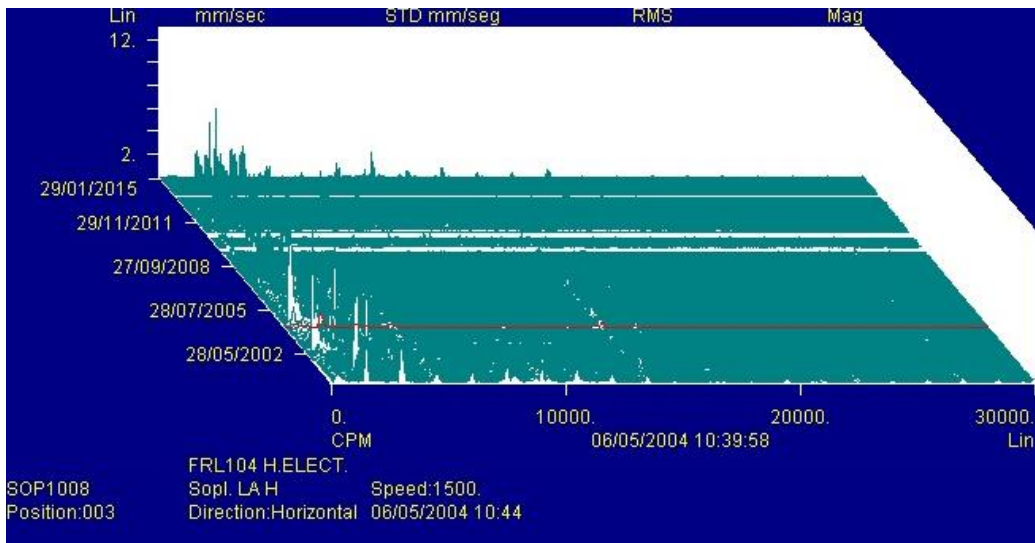


Figura 13. Valores en cascada de la posición 3 H y en rojo el espectro del 06-05-14.

- Segundo se busca la frecuencia de estudio, en el modelo de ejemplo se ha usado la velocidad de álabes, que es común a los 3 rodamientos y tiene una frecuencia de banda de 13410 Hz.



Figura 14. Intervalo de medida de la frecuencia ÁLABES en la posición 3 eje horizontal en términos de RMS (mm/s).

- Por último, se obtiene la gráfica con la evolución de esa frecuencia a lo largo de los 15 años de muestreo.

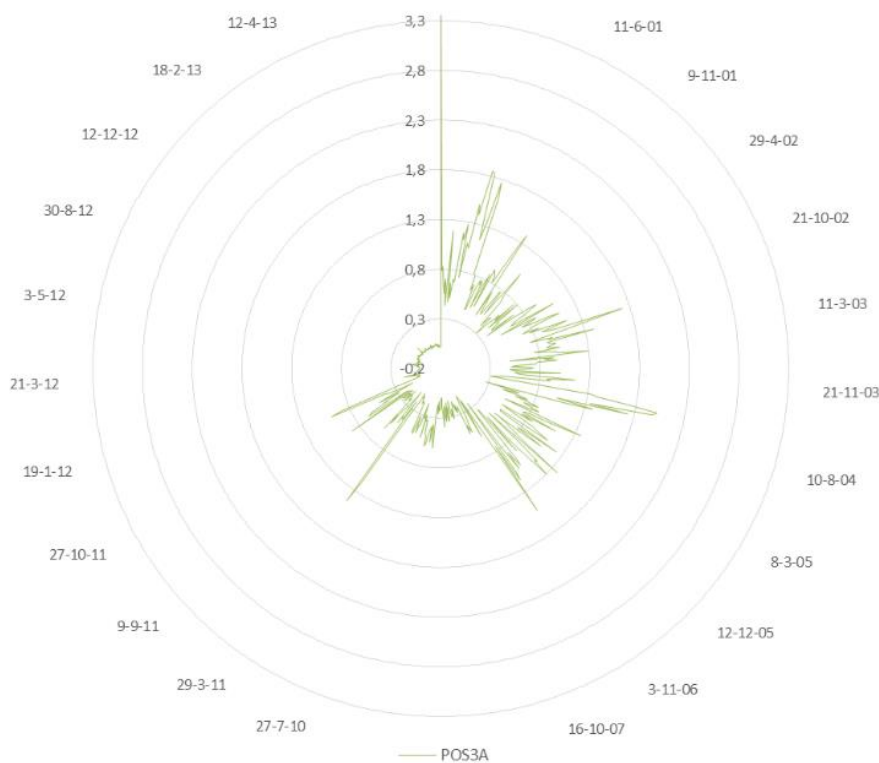


Figura15. Frecuencia característica de los álabes en la posición 3 axial en términos de RMS (mm/s).

Este proceso se realizó con cada una de las frecuencias características de los rodamientos y que se encuentran en la tabla 5 por cada uno de los 614 puntos de medida de los 15 años de muestreo en la posición 3 y la posición 4 y en los ejes horizontal, vertical y axial, obteniendo un total de 66312 medidas. Todas estas medidas procesadas manualmente se pueden visualizar en el Anexo Muestreo obtenido por procesamiento de imagen.

4.4.2. Análisis neuronal

El uso de métodos estocásticos es una de las nuevas técnicas de predicción y de interpretación de relaciones no lineales, el problema se encuentra en el tamaño de las muestras y la validación de los resultados.

Los puntos de medición de monitoreo se suelen hacer en laboratorio y estos no abordan ni responden al desempeño de las condiciones reales de trabajo [195], también tienen el problema del número limitado de muestras, hay pocas empresas que tengan implementado este sistema de control desde hace años, y permitan así la validación de estas técnicas en

condiciones reales de trabajo.

La selección de un conjunto apropiado de variables de entrada de los candidatos disponibles es una consideración importante en el modelado de la CNN [196, 197].

Es decir, cuánto y qué variables de entrada (incluyendo los retrasos de tiempo) explican el nivel de varianza más alto y proporcionan el error más bajo en las fases de calibración y validación. Una selección incorrecta de las variables de entrada podría incurrir en efectos no deseados como el efecto [198]

Muchos de los enfoques neuronales utilizados en la literatura especializada han adoptado metodologías tales como auto correlación y análisis de funciones de auto correlación parcial, análisis de correlación cruzada lineal o análisis espectral [199] para resolver este problema. Sin embargo, parece evidente que estas metodologías están diseñadas para capturar las medidas de dependencia lineal entre las posibles entradas y salidas del modelo.

Aunque se ha realizado un aprendizaje no supervisado de la red, se va a intentar aplicar ciertas tecnologías sencillas de minería de datos para obtener la jerarquía de los resultados y otras características de las redes creadas.

Aplicar técnicas de minería de datos en redes neuronales no supervisadas requiere cautela, existe bastante información sobre este campo en la bibliografía y todos coinciden en que no se pueden sacar conclusiones sin hacer un estudio repetitivo de varias redes creadas con el mismo software. No todas las redes, aunque sean parecidas funcionan de la misma forma, ni todos los software proporcionan al usuario los mismo datos [200].

En el artículo de Ibrahim (2013) se exponen varias formas de como jerarquizar las variables introducidas en una red neuronal partiendo de los pesos sinápticos de las capas ocultas y de salida. Después de ver lo que se hace en otras publicaciones y cuáles son los resultados, se ha decidido recurrir a la fórmula de Garson, más que conocida en jerarquización de variables con RNA.

Al inicio de los estudios de sensibilidad de variables, con métodos basados en las magnitudes de los pesos sinápticos, se pensaba que las variables cuyos pesos eran mayores en las capas ocultas eran las que mayor importancia tenían en el modelo. Esto fue desechado de forma rápida ya que es necesario también tener cuenta la capa de salida y otras si existieran. [201, 202]

El proceso de análisis consistió en analizar toda la serie de frecuencias características como inputs, tomando como valor de salida de la red neuronal el valor de amplitud máxima correspondiente a éstas. Esta secuencia se repitió en cada una de las tomas de muestreo y en

cada una de las posiciones.

El objetivo inicial fue determinar qué frecuencia resulta más determinante o de mayor peso en el valor de amplitud máxima que determinará la viabilidad y el correcto funcionamiento de nuestra máquina.

El segundo objetivo fue valorar si el proceso de aprendizaje de RNA es válido, para ello se repetirá la secuencia anterior, pero sólo para los años pares y se comparará el resultado con la secuencia inicial. Al obtener un resultado favorable se volvió a procesar toda la serie de datos pero en esta ocasión con la muestra de años pares e impares por separado, el propósito de ello fue validar el método con muestra de mayor y menor tamaño.

Tras este estudio, se analizó cuál es la frecuencia característica más determinante y se suprime del análisis neuronal, volviendo a repetir el proceso, pero en esta ocasión sin ella, para valorar hasta qué punto enmascara el resultado y es decisiva en relación a la Amplitud Máxima.

Tras esta aproximación, se procedió a la repetición del proceso para todos los años impares y pares, tras el análisis se compararon los resultados obtenidos.

Por último, se determinó la frecuencia más decisiva en cada una de las posiciones de muestreo. Tras este primer estudio, se repitió el mismo proceso sólo con años pares e impares para contrastarlos entre todos, con el objetivo de dar validez al estudio por RNA.

CAPÍTULO V: RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LA APROXIMACIÓN POR LEVENBERG-MARQUART

A continuación, se muestran el análisis y los resultados obtenidos por RNA. Este estudio está formado por tres partes diferenciadas, en la primera se evaluará la relación de todas las variables con todos los años de muestreo y se compararán estos con el mismo estudio, pero sólo con los años pares y posteriormente con los impares.

Tras esta primera evaluación, se repetirá el análisis, pero quitando la variable de mayor peso, con la intención de valorar cómo influye esta al conjunto. Se intentará validar esto haciendo de nuevo el procesamiento con todos los años, los pares y los impares.

El tercer bloque tendrá como objetivo la obtención de las variables más determinantes según las posiciones de muestreo. Tras este análisis, se retirará la variable de más peso y se volverá a analizar los valores a través de la red neuronal.

La intención de este estudio será determinar primero qué posición de medida tiene más incidencia y las frecuencias más determinantes en cada una de estas.

5.1. Análisis con todas las variables

El primer estudio consistió en el procesamiento de los datos de todos los años y de todas las posiciones. Para ello se realizó el análisis de cada posición repitiendo la secuencia 30 veces, tomando las 3 épocas con mayor correlación y de cada una de ellas se toman las 3 frecuencias con mayor peso.

Las frecuencias de mayor peso son las que menor valor numérico tienen, siendo ésta la que alcanza un valor de 1. Si esta frecuencia es la más incidente en cada una de las épocas seleccionadas, tendría un valor de 3, siendo el valor máximo que tendría la frecuencia más determinante. Pero al tener 6 posiciones, este valor habría que multiplicarlo, obteniendo un valor máximo de 18.

Al determinar cuál sería el valor de la frecuencia de menor incidencia, ésta sería la que obtuviera un valor de 288. Este valor se obtiene al multiplicar el número de posiciones por las épocas consideradas, características y el peso determinado, con un valor máximo que será el número total de variables.

Ésta sería la posición máxima que podría obtener un input o frecuencia característica. Todo esto sirve para determinar el intervalo de actuación, pero para determinar el peso

porcentual se usa la siguiente expresión:

$$PP = 100 \left(\frac{PT - NV}{PM} \right) \quad (34)$$

Donde:

PP = peso porcentual, que será la linealidad existente entre esa variable o inputs con el valor de salida de la RNA, en este estudio amplitud máxima.

NV = número total de variables de estudios o inputs.

PT = peso total, será el valor máximo que puede alcanzar una variable de entrada.

PM = peso mínimo, el valor mínimo que puede alcanzar una variable.

$$PT = ((NP - R) * NV) - P \quad (35)$$

Donde:

NP = N° posiciones de medidas.

R = repeticiones.

NE = N° épocas de estudio.

P = peso de cada variable o la suma obtenida del valor de cada repetición.

$$PM = \frac{NP * NV * 3}{100} \quad (36)$$

5.1.1. Análisis con todas las variables de todos los años

Se comprueba que la frecuencia determinante es la generada por la propia velocidad de funcionamiento de la máquina, que alcanza un valor porcentual del valor de amplitud máxima del 97,41%.

A partir de ésta, el siguiente valor en incidencia es el generado por la frecuencia de las bolas, su segundo armónico, del rodamiento SKFNU322. Su frecuencia principal está en el noveno lugar con un valor significativamente menor (78,89%). Del primer estudio se obtienen los resultados que se muestran en la siguiente tabla.

ORDEN	FRECUENCIA	REPETICIÓN	PESO	PESO TOTAL	PESO TOTAL %
1	SPEED	6	25	25	97,41
2	2BSF SKFNU322	5	59	75	78,89
3	2BSF FAGNU322	3	35	83	75,93
4	BPIR SKF6322	1	10	90	73,33
5	BPIR FAGNU322	4	58	90	73,33
6	FTF SKF6322	2	28	92	72,59
7	ÁLABES	4	65	97	70,74
8	BSF SKF6322	1	20	100	69,63
9	BSF SKFNU322	1	20	100	69,63
10	BSF FAGNU322	1	21	101	69,26
11	BPIR SKFNU322	4	76	108	66,67
12	FTF FAGNU322	2	44	108	66,67
13	2BSF SKF6322	2	45	109	66,30

Tabla 8. Resultado del RNA con todas las variables de todos los años.

En las siguientes figuras se puede ver cómo varía SPEED y el segundo armónico de la frecuencia del rodamiento SKFNU322 en función de la amplitud máxima.

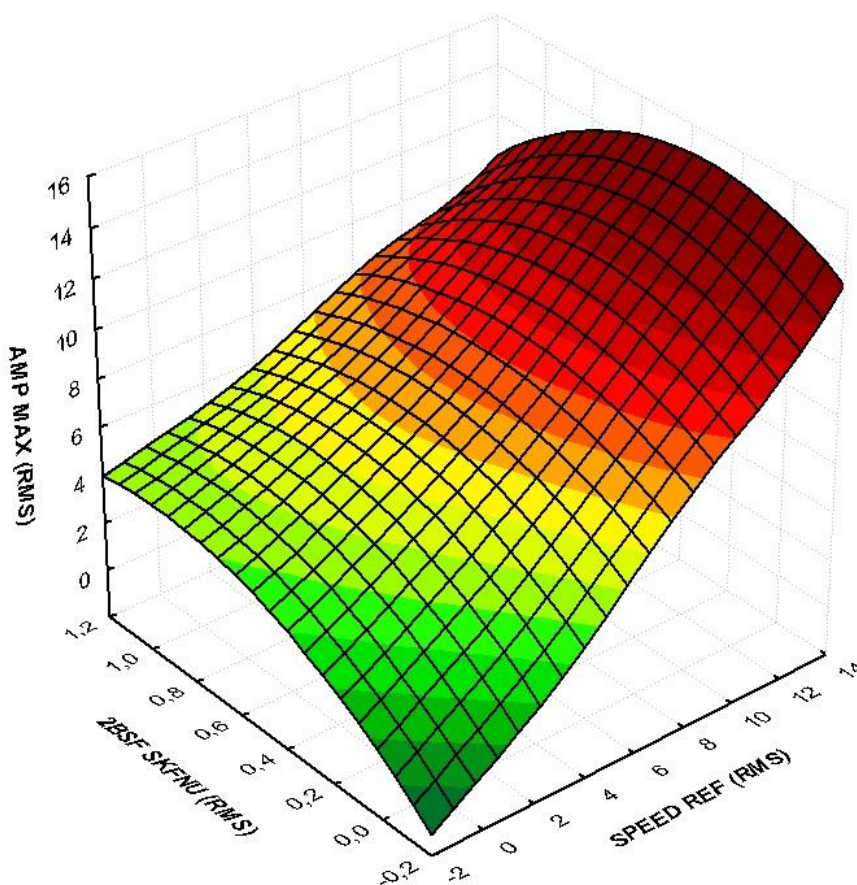


Figura 16. Comparativa AMP MAX – 2BSF SKFNU322– SPEED en términos de RMS.

Se puede comprobar que el valor más alto de amplitud máxima se encuentra en la posición 4 vertical, al igual que le pasa a SPEED, esto denota su linealidad.

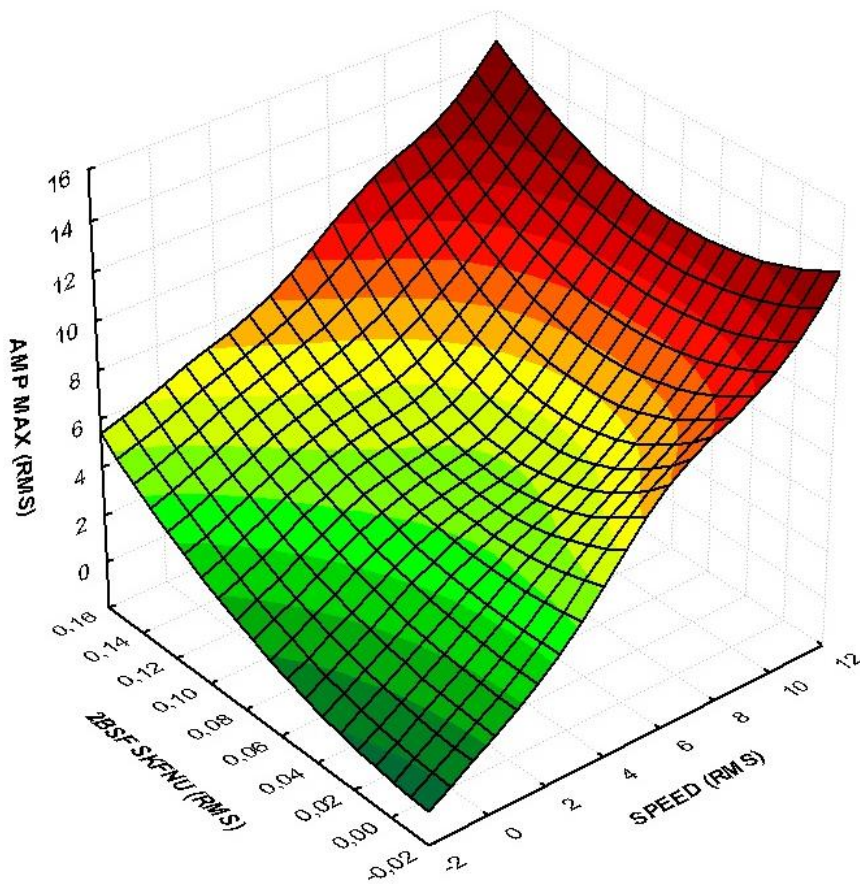


Figura 17. Comparativa AMP MAX – 2BSF SKFNU322 – SPEED en términos de RMS.

Siguiendo con los pesos porcentuales, el cuarto y quinto puesto está ocupado por la frecuencia generada por la pista interior del rodamiento SKF6322 y FAGNU322, con el mismo peso porcentual (73,33%).

En el sexto lugar se encuentra la jaula del rodamiento SKF6322, con una variación similar a las anteriores (72,59 %), a excepción de la primera y la segunda.

El siguiente puesto lo ocupa la frecuencia característica de los álabes de la soplante, con un peso de 70,74 %.

La octava, novena y décima la ocupan las frecuencias fundamentales de las bolas de los tres rodamientos y todas ellas con casi el mismo peso porcentual (69,63%, 69,63% y 69,23%).

En las tres últimas posiciones se encuentran la pista interior del SKFNU322, la jaula de bolas del FAGNU322 y el segundo armónico de las bolas del SKF6322, todos ellos con un peso muy parecido comprendido entre 66,67% y 66,30 %.

5.1.2. Análisis de todas las variables de años pares

Tras este primer estudio, se realiza un segundo sólo con los años pares. El resultado es el que se muestra en la siguiente tabla.

ORDEN	FRECUENCIA	REPETICIÓN	PESO	PESO TOTAL	PESO TOTAL %
1	SPEED	6	21	21	98,89
2	2BSF FAGNU322	6	91	91	72,96
3	BPIR SKFNU322	3	43	91	72,96
4	ÁLABES	4	65	97	70,74
5	BSF SKF6322	2	36	100	69,63
6	FTF SKF6322	1	21	101	69,26
7	BPOR SKFNU322	1	21	101	69,26
8	FTF SKFNU322	1	21	101	69,26
9	BSF FAGNU322	1	22	102	68,89
10	FTF FAGNU322	1	22	102	68,89
11	BPOR FAGNU322	1	23	103	68,52
12	2BSF SKF6322	2	41	105	67,78
13	2BSF SKFNU322	4	79	111	65,56

Tabla 9. Resultado del RNA con todas las variables de años pares.

Como se vio en el primer estudio es la frecuencia de giro del equipo la que genera un mayor peso, con un valor de 98,89%. Este valor es levemente superior al del primer análisis y como en el caso anterior, la diferencia del peso de ésta con el resto de los valores es sustancial.

La segunda posición la ocupa el 2BSF FAGNU322 con un 72,96%; el salto porcentual entre la primera posición y la segunda es algo mayor que en el primer estudio.

En tercera posición aparece la frecuencia de la pista interior del rodamiento SKFNU322, con un 72,96%. Esta frecuencia ocupaba la décima posición en el primer estudio, donde se analizan todos los valores de todos los años.

La cuarta posición la ocupa la frecuencia de los álabes, con un valor de 70,74%, algo superior que en el primer estudio. El siguiente es el BSF SKF6322, con un 69,63%, que presenta el mismo valor que se encuentra en el estudio de todos los años.

La sexta y séptima posición la ocupan la jaula del rodamiento SKF6322 y la pista exterior del SKFNU322, con un 69,23%.

Como comparación con el primer estudio (todos los años) y este segundo (años pares), se puede decir que la frecuencia predominante es la del equipo.

A continuación, se observan las frecuencias que se mantienen constantes o en posiciones similares, como es el segundo armónico del rodamiento FAGNU322. También se mantiene la frecuencia de los álabes y el BSF SKF6322.

En las siguientes figuras se puede visualizar cómo afectan las primeras variables con la de salida de la RNA, en este caso es en la posición 4 vertical donde el valor alcanzado es mayor, tanto en la componente SPEED como en la del segundo armónico del rodamiento.

Además, se percibe en ambas figuras cómo es la frecuencia de giro del equipo la que más influye en la AMP MAX.

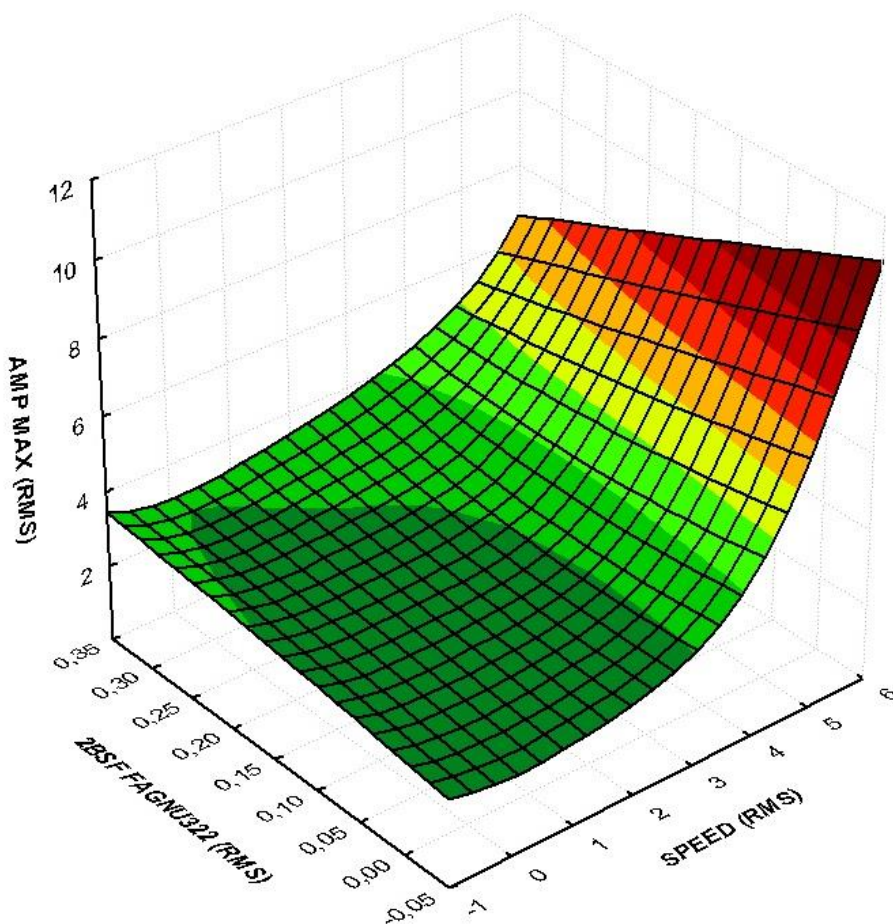


Figura 18. Comparativa AMP MAX – 2BSF FAGNU322 – SPEED en términos de RMS.

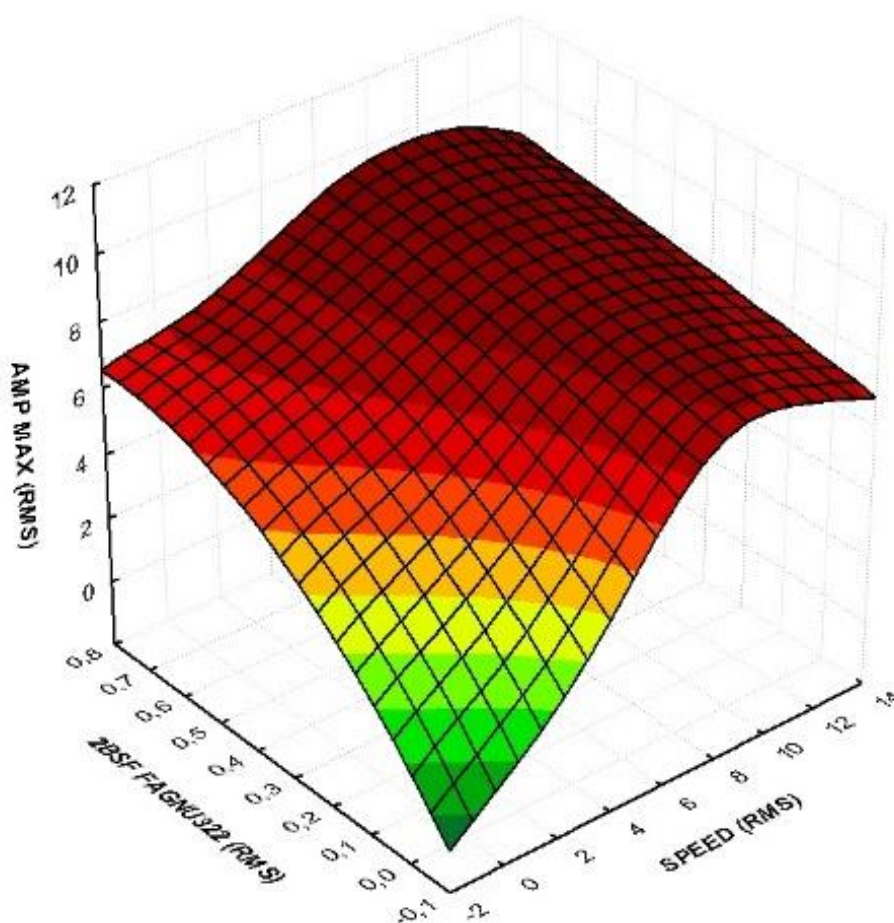


Figura 19. Comparativa AMP MAX – 2BSF SKFNU322 – SPEED en términos de RMS.

5.1.3. Análisis de todas las variables de años impares

Para tener una idea más clara del peso de las frecuencias, su posición y validar el análisis de RNA, se realiza de nuevo todo el estudio, pero esta vez solo con los años impares.

En este estudio se puede confirmar que la frecuencia más determinante en los 3 supuestos es la velocidad del equipo, con un peso muy parecido al del estudio de años impares e igual que al de todos los años, con un valor de 97,41%.

En segunda posición se encuentra la frecuencia del rodamiento BSF SKF6322, que aumenta casi 5 puntos porcentuales con los casos anteriores. La tercera posición es la del armónico de bolas del rodamiento SKFNU322, con un valor de 72,96%. Muy cerca de éste se encuentra la frecuencia de la pista interior del SKFNU322, que casi iguala el valor del estudio de los años pares, con un porcentaje de 72,59%.

La quinta es para la jaula del FAGNU322, que pasa de 66,67% y 68,89%, del primer y segundo estudio, al 71,48% de este último.

El siguiente elemento es el segundo armónico de las bolas del rodamiento SKF6322, que ya ocupaba en este estudio la segunda posición, tras la frecuencia característica del equipo. En séptima posición se encuentra la frecuencia de los álabes que en los tres supuestos ha mantenido su mismo peso (70,74%).

En octava posición está la pista interior del rodamiento SKF6322 con un 70,74%, esta frecuencia resurge desde el primer estudio y baja con relación a éste cerca de un 3%. La frecuencia siguiente es la FTF SKFNU322, con un valor casi parejo al estudio con años pares. El siguiente es el BPOR SKF6322 que no se registró en el primer estudio y en el segundo tenía un peso porcentual mayor. Por último, se encuentra la frecuencia fundamental de las bolas del FAGNU322.

Los resultados descritos se muestran en la siguiente tabla.

ORDEN	FRECUENCIA	REPETICIÓN	PESO	PESO TOTAL	PESO TOTAL %
1	SPEED	6	25	25	97,41
2	BSF SKF6322	2	23	87	74,44
3	2BSF SKFNU322	3	43	91	72,96
4	BPIR SKFNU322	1	12	92	72,59
5	FTF FAGNU322	3	47	95	71,48
6	2BSF SKF6322	2	33	97	70,74
7	ÁLABES	1	17	97	70,74
8	BPIR SKF6322	3	49	97	70,74
9	2BSF FAGNU322	3	52	100	69,63
10	FTF SKFNU322	1	20	100	69,63
11	BPOR FAGNU322	1	21	101	69,26
12	BPOR SKF6322	2	39	103	68,52
13	BSF FAGNU322	3	56	104	68,15

Tabla 10. Resultado del RNA con todas las variables de años impares.

En las siguientes figuras se puede visualizar cómo afectan las primeras variables con la de salida de la RNA.

Es significativo ver cómo el valor de SPEED alcanza su máximo en la posición horizontal, con la frecuencia de bolas del SKF6322. Sin embargo, el valor energético máximo se alcanza cuando se relaciona con el del rodamiento BSF FAGNU322, como se ve en la posición 3 vertical.

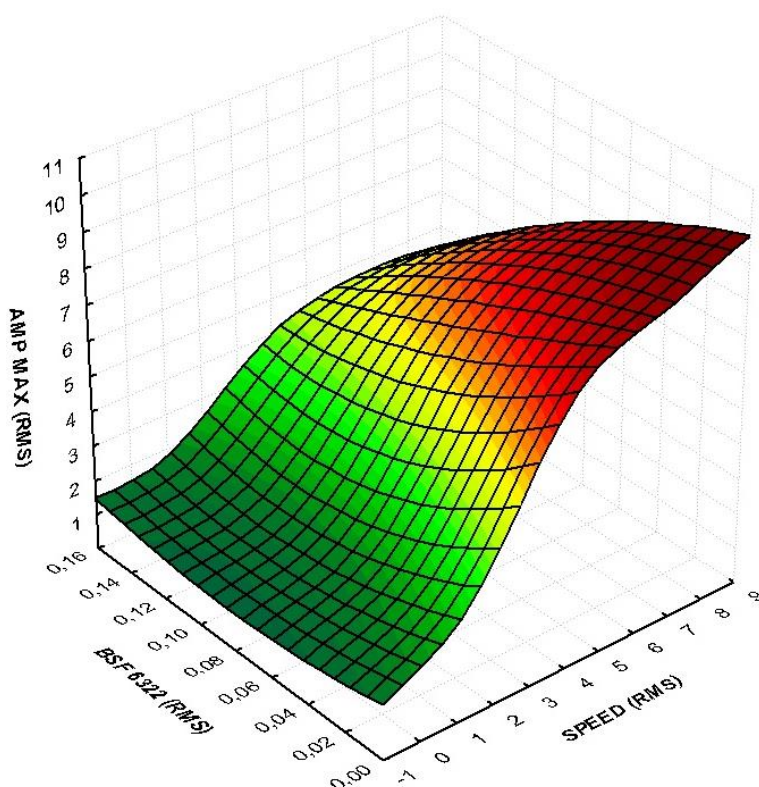


Figura 20. Comparativa AMP MAX –BSF 6322 – SPEED en términos de RMS.

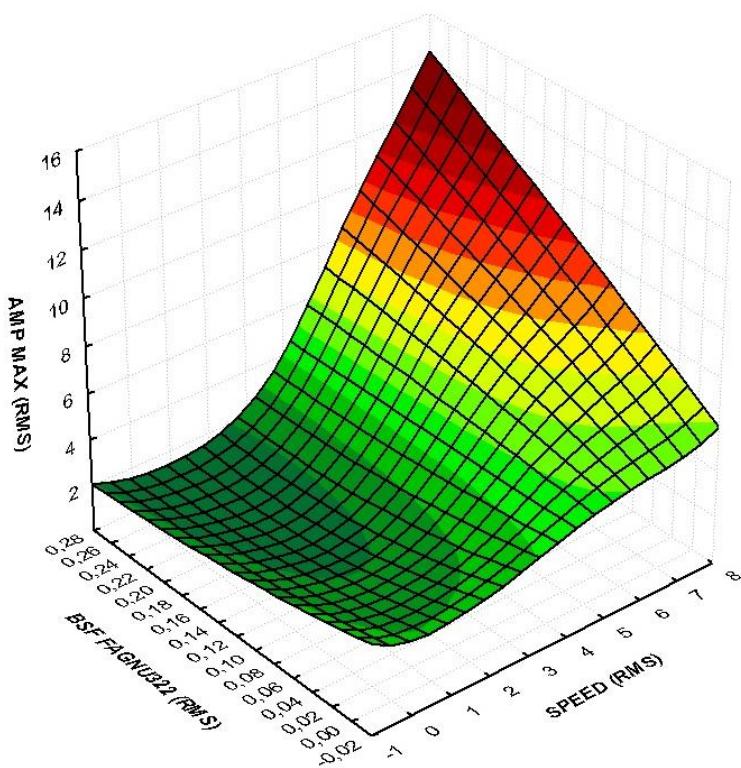


Figura 21. Comparativa AMP MAX –2BSF SKFNU322 – SPEED en términos de RMS.

5.1.4. Resultado del análisis de todas las variables

A continuación, se elabora una comparativa para poder resumir los resultados de los tres estudios:

ORDEN	TODOS LOS AÑOS	PESO TOTAL %	AÑOS PARES	PESO TOTAL %	AÑOS IMPAR	PESO TOTAL %
1	SPEED	97,41	SPEED	76,98	SPEED	97,41
2	2BSF SKFNU322	78,89	2BSF FAGNU322	75,79	BSF SKF6322	74,44
3	2BSF FAGNU322	75,93	BPIR SKFNU322	73,41	2BSF SKFNU322	72,96
4	BPIR SKF6322	73,33	ÁLABES	73,02	BPIR SKFNU322	72,59
5	BPIR FAGNU322	73,33	BSF SKF6322	72,62	FTF FAGNU322	71,48
6	FTF SKF6322	72,59	FTF SKF6322	72,22	2BSF SKF6322	70,74
7	ÁLABES	70,74	BPOR SKFNU322	72,22	ÁLABES	70,74
8	BSF SKF6322	69,63	FTF SKFNU322	72,22	BPIR SKF6322	70,74
9	BSF SKFNU322	69,63	BSF FAGNU322	71,83	2BSF FAGNU322	69,63
10	BSF FAGNU322	69,26	FTF FAGNU322	71,43	FTF SKFNU322	69,63
11	BPIR SKFNU322	66,67	BPOR FAGNU322	71,43	BPOR FAGNU322	69,26
12	FTF FAGNU322	66,67	2BSF SKF6322	67,06	BPOR SKF6322	68,52

Tabla 11. Resultado del RNA con todas las variables todos los años, años pares e impares.

En la tabla anterior, se observa la comparativa de los tres estudios con las frecuencias características, su posición y peso. El primer resultado es la frecuencia del equipo, que constituye la primera posición en todos los casos y con pesos casi idénticos, adquiriendo un valor determinante en la amplitud máxima resultante.

Otro elemento para destacar es la frecuencia de los álabes, que como en el caso anterior, repite su valor porcentual en los tres estudios. Esto tiene una importancia fundamental, dando veracidad al resto de valores y pudiendo considerar que, tanto la

frecuencia de velocidad del equipo como la de los álabes, tienen una relación lineal con la variable de salida.

En el estudio de todas las frecuencias características de los rodamientos, se puede decir que las más determinantes y frecuentes son las generadas por las bolas de los rodamientos SKFNU322 y FAGNU322, que son detectadas a través de sus segundos armónicos. También, son determinantes las generadas por las pistas interiores de los rodamientos SKFNU322 y FAGNU322. Por último, se situaría la frecuencia de bolas del rodamiento SKF6322.

5.2. Análisis sin la frecuencia característica del equipo

En esta segunda parte del estudio, se repite todo el proceso de análisis, pero sin la variable de mayor peso (SPEED). Este estudio ayuda a determinar hasta qué punto la frecuencia SPEED falsea los resultados de RNA, variando los porcentajes y posición del resto de frecuencias.

5.2.1. Análisis sin SPEED de todos los años

A continuación, se muestra los resultados con todos los años.

ORDEN	FRECUENCIA	REPETICIÓN	PESO	PESO TOTAL	PESO TOTAL %
1	2BSF SKFNU322	5	38	53	86,11
2	BPIR FAGNU322	3	38	83	74,21
3	BSF SKF6322	1	10	85	73,41
4	ÁLABES	2	26	86	73,02
5	BPOR SKFNU32	4	58	88	72,22
6	BPIR SKF6322	3	44	89	71,83
7	BSF FAGNU322	3	45	90	71,43
8	2BSF SKF6322	2	30	90	71,43
9	BPIR SKFNU322	3	47	92	70,63
10	2BSF FAGNU322	5	79	94	69,84
11	BPOR SKF6322	1	21	96	69,05
12	BPOR FAGNU322	4	68	98	68,25

Tabla 12. Resultado del RNA sin SPEED de todos los años.

Tras eliminar la frecuencia de mayor peso, se observa que la primera variable determinante es el segundo armónico del rodamiento SKFNU322 y si se compara con el análisis incluyendo la variable SPEED, en aquel caso era la segunda de mayor peso, sin embargo, en este caso su valor porcentual ha aumentado de 78,89% a 86,11%.

La segunda es la frecuencia interior del rodamiento FAGNU322, con un valor de 74,21%, variando muy poco con el primer estudio (73,33%). En ese estudio, se encontraba en la quinta posición y en este ocupa la segunda. Si se considera la posibilidad de quitar la frecuencia SPEED, esta variable ha subido 3 posiciones. La tercera es BSF SKF6322, con un valor de 73,41% teniendo anteriormente 69,63%, un aumento considerable tanto en posiciones como en valor.

La cuarta la dispone la frecuencia de los Álabes, que sufre un aumento de algo menos del 3%. La siguiente frecuencia es BPOR SKFNU322, con un 72,22%, donde se puede destacar que en todo el estudio anterior sólo aparece en el análisis de años par y con un valor de 69,26%.

En sexta posición esta BPIR SKF6322 con 71,83%, disminuye algo menos de un 2% en relación con el primer análisis. La siguiente variable es la BSF FAGNU322, que al igual que su armónico bajan un 3% y pasa de la tercera a la 7 posición.

Por último, aparecen dos variables que no se mostraban en el primer estudio, BPOR SKF6322 y BPOR FAGNU322, ambas con un valor muy similar de 69,05% y 68,25%. En las siguientes figuras se puede visualizar cómo interaccionan las frecuencias de la pista interior del FAGNU322 con la del rodamiento del SKFNU322 y la amplitud máxima.

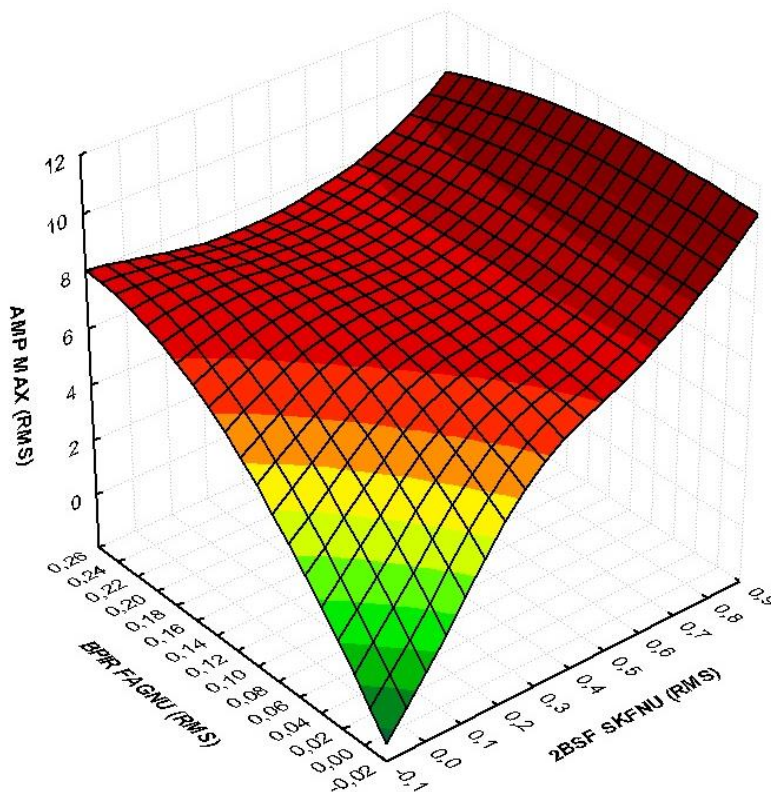


Figura 22. Comparativa AMP MAX – 2BSF SKFNU322–BPIR FAGNU322 en términos de RMS.

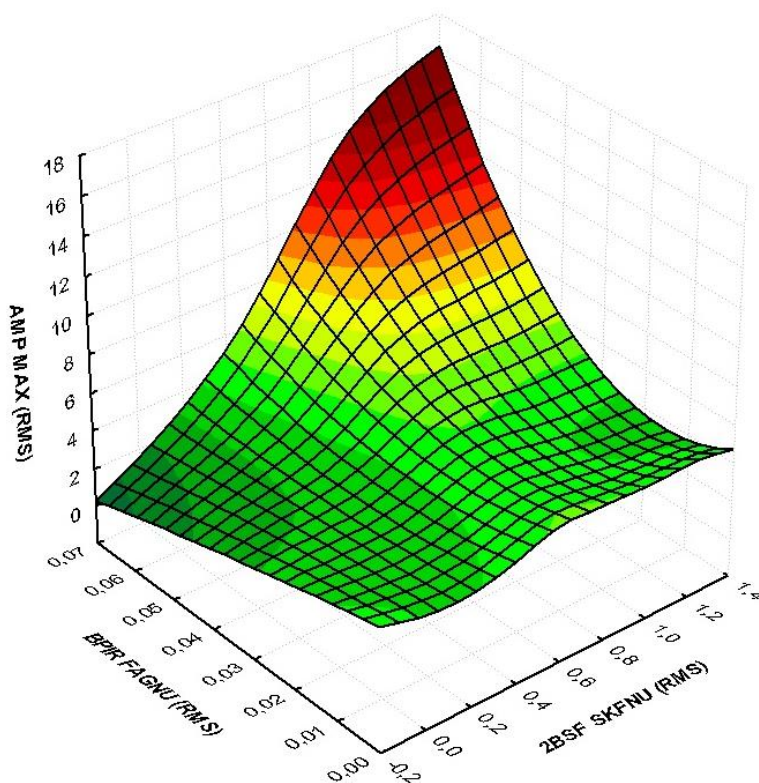


Figura 23. Comparativa AMP MAX – 2BSF SKFNU322 – BPIR FAGNU322 en términos de RMS.

Se puede observar que en la posición 4 vertical el valor medio de ambas variables es mayor. En la posición 4 horizontal se alcanza el valor más elevado de la amplitud máxima relacionándola con BPIR FAGNU322. Se puede observar en las siguientes figuras que el valor mayor se encuentra en la posición 4 vertical.

5.2.2. Análisis sin SPEED de años pares

Como en el caso anterior, con todos los años, el valor de mayor incidencia es el segundo armónico de las bolas del rodamiento SKFNU322, aunque con un valor porcentual menor, pasando de 86,11% al 76,98 %. En la segunda posición aparece el FTF SKF6322 que no se encontraba en el estudio anterior.

La tercera y cuarta posición la tienen las frecuencias 2BSF SKF6322 y Álabes, igual que en el estudio con todos los años e incluso mantienen sus valores porcentuales 73,41% y 73,02% respectivamente.

La quinta posición la ocupa la frecuencia 2BSF FAGNU322, que sube dos posiciones con relación al estudio de todos los años sin SPEED, aumentando su valor en 1,21%. El siguiente es BPOR SKFNU322 que, aunque baja una posición, mantiene el mismo valor

porcentual de 72,22%.

Las siguientes posiciones la ocupan las frecuencias BSF SKFNU322 y BPOR FAGNU322, con el mismo valor porcentual de 72,22%. Si se compara con el análisis primero de años pares con SPEED, mantiene la misma posición, con un aumento del 1,98%. En el caso de BPOR FAGNU322, sube tanto comparándolo con el estudio de todos los años sin SPEED, como en el de años pares con SPEED.

En la posición novena y décima están BSF FAGNU322 y BPIR SKFNU322, que aumentan muy poco su valor porcentual, con relación al estudio total sin SPEED y alternan sus posiciones. Por último, la variable BPOR SKF6322 mantiene la misma posición con un valor algo superior, pasando de 69,05% a 71,43%.

Todos los resultados se muestran en la siguiente tabla para los años pares:

ORDEN	FRECUENCIA	REPETICIÓN	PESO	PESO TOTAL	PESO TOTAL %
1	2BSF SKFNU322	4	46	76	76,98
2	FTF SKF6322	3	34	79	75,79
3	2BSF SKF6322	3	40	85	73,41
4	ÁLABES	2	26	86	73,02
5	2BSF FAGNU322	5	72	87	72,62
6	BPOR SKFNU322	3	43	88	72,22
7	BSF SKFNU322	1	13	88	72,22
8	BPOR FAGNU322	1	13	88	72,22
9	BSF FAGNU322	2	29	89	71,83
10	BPIR SKFNU322	4	60	90	71,43
11	BPOR SKF6322	1	15	90	71,43
12	BPIR FAGNU322	4	71	101	67,06
13	BSF SKF6322	3	59	104	65,87

Tabla 13. Resultado del RNA sin SPEED de años pares.

En las siguientes figuras se muestra cómo interaccionan las frecuencias de las bolas del rodamiento SKFNU322, el FTF SKF6322 y la amplitud máxima. Se puede determinar cómo la amplitud máxima es más alta cuanto menor es el valor de RMS de las otras dos variables.

En las siguientes figuras se observa como aumenta considerablemente el valor de la amplitud, aumentando un poco los valores de BSF SKFNU322.

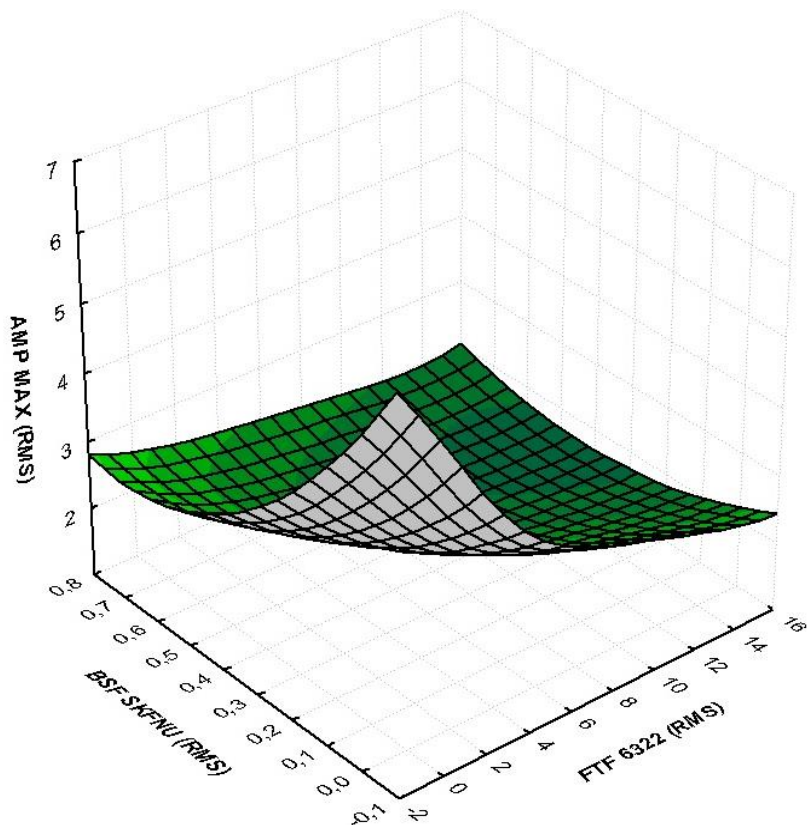


Figura 24. Comparativa AMP MAX –BSF SKFNU322 – FTF SKF6322 en términos de RMS.

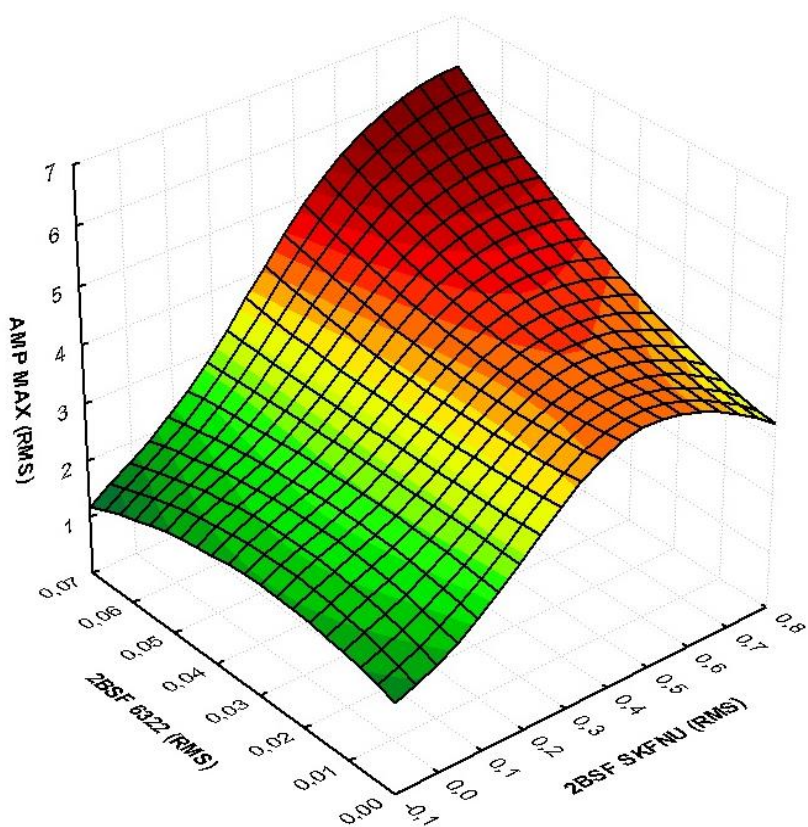


Figura 25. Comparativa AMP MAX –2BSF SKFNU322 –2BSF SKF6322 en términos de RMS.

5.2.3. Análisis sin SPEED de años impares

Al realizar el análisis con los años impares sin la frecuencia determinante se obtienen los siguientes resultados.

ORDEN	FRECUENCIA	REPETICIÓN	PESO	PESO TOTAL	PESO TOTAL %
1	2BSF SKFNU322	5	34	49	87,70
2	BPIR SKFNU322	4	48	78	76,19
3	FTF FAGNU322	3	41	86	73,02
4	BSF SKF6322	3	43	88	72,22
5	BSF FAGNU322	1	15	90	71,43
6	BPIR SKF6322	4	61	91	71,03
7	ÁLABES	3	47	92	70,63
8	FTF SKFNU322	2	33	93	70,24
9	FTF SKF6322	2	34	94	69,84
10	BPOR SKF6322	1	19	94	69,84
11	BPOR SKFNU322	2	36	96	69,05
12	2BSF SKF6322	1	21	96	69,05
13	BPOR FAGNU322	3	52	97	68,65

Tabla 14. Resultado del RNA sin SPEED de años impares.

Al estudiar los valores se observa cómo es de nuevo el valor 2BSF SKFNU322 el que ocupa el puesto más elevado, al igual que en los dos estudios anteriores. De esta manera, se puede afirmar, a través de los resultados la existencia de linealidad entre esta variable y el valor de salida de la RNA.

En este caso BPIR SKFNU322 y FTF FAGNU322, ocupan la segunda y tercera posición. Las frecuencias álabes y BPOR SKFNU322 bajan a la séptima y onceava posición.

Sin embargo, las frecuencias BSF SKF6322, BSF FAGNU322 y BPIR SKF6322 varían poco sus posiciones según los estudios anteriores, ocupando la cuarta, quinta y sexta posición con valores de pesos porcentuales muy similares.

Otro valor que no varía sustancialmente, ni su posición ni su peso porcentual en la RNA es el de la frecuencia BPOR SKF6322, ocupando en los tres estudios las posiciones décima y décimo primera, con valores comprendidos entre 69,05% y 71,43%.

En las siguientes figuras se pueden comparar las frecuencias más determinantes del estudio de años pares, como han sido la amplitud máxima con las frecuencias de bolas y la pista interior del rodamiento SKFNU322.

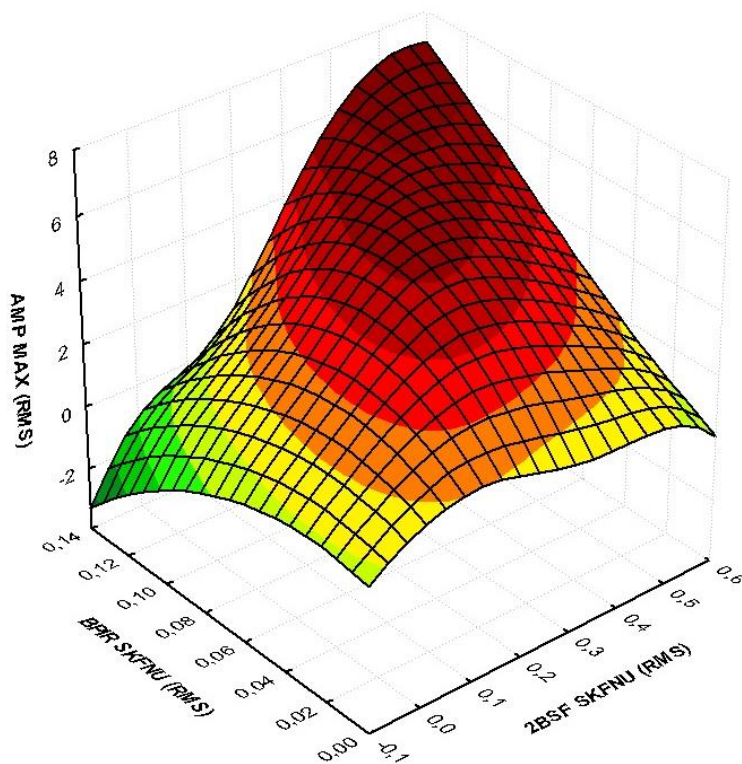


Figura 26. Comparativa AMP MAX – 2BSF SKFNU322 – BIPR SKFNU322 en términos de RMS.

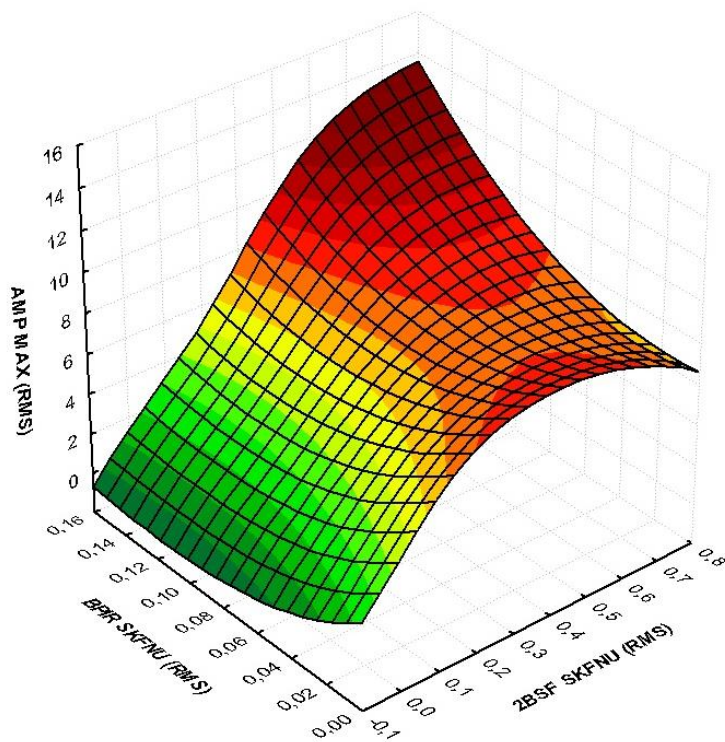


Figura 27. Comparativa AMP MAX – 2BSF SKFNU322 – BIPR SKFNU322 en términos de RMS.

Se confirma lo visto en los casos anteriores, la frecuencia generada por el segundo armónico de las bolas de los rodamientos es la de mayor peso y es en la posición 4 vertical donde más se acentúa su efecto vibracional.

5.2.4. Resultado del análisis sin la frecuencia característica del equipo

Al realizar un estudio comparativo de los tres análisis, sin considerar la frecuencia de mayor peso SPEED, la variable que en este momento alcanza mayor valor es la generada por 2BSF SKFNU322, con valores similares en las tres comparativas.

Otro elemento que se mantiene muy constante en todos los estudios en valor de peso porcentual (73,41%, 73,41% y 72,22%), es el de la frecuencia BSF SKF6322.

También mantienen valores estables la frecuencia de los álabes, menos en el estudio de años impar por la entrada de dos variables que nunca habían tenido peso, como es BPIR SKFNU322 y FTF FAGNU322, pudiéndolas considerar como ruido de la propia RNA.

Comparando los resultados del primer estudio y este segundo sin SPEED, se puede considerar que la frecuencia de los álabes ocuparía la tercera posición. A continuación, se encuentra la BSF FAGNU322, que en los tres análisis tiene valores similares oscilando entre los 71,43% y 72,62%.

En resumen, si se comparan los resultados obtenidos del análisis con todas las variables y este último, se puede ver que hay valores muy parejos, siendo más importancia el provocado por el propio giro de la máquina, seguido por las frecuencias características de las bolas de los rodamientos.

El valor que ocuparía la segunda posición en incidencia, en relación con los valores de salida de nuestra RNA, sería la generada por las bolas del rodamiento SKFNU322, seguidos por el FAGNU322 y por último el BSF SKF6322.

Otra variable que ha destacado en todos los análisis ha sido la frecuencia de giro de los álabes, tanto por su valor como posición en todos los análisis.

Sobre el porcentaje de peso de cada una de las variables, se puede decir que la SPEED tiene un peso del 97-98%, y seguidos por esta a más distancia el resto. La siguiente alcanza una cuota de aproximadamente el 80%, que sería la BSF SKFNU322, el resto de las variables oscilan entre el 70% y el 74%.

Todo ello se puede ver en la siguiente tabla comparativa.

ORDEN	TODOS LOS AÑOS	PESO TOTAL %	AÑOS PAR	PESO TOTAL %	AÑOS IMPAR	PESO TOTAL %
1	2BSF SKFNU322	86,11	2BSF SKFNU322	76,98	2BSF SKFNU322	87,70
2	BPIR FAGNU322	74,21	FTF SKF6322	75,79	BPIR SKFNU322	76,19
3	BSF SKF6322	73,41	2BSF SKF6322	73,41	FTF FAGNU322	73,02
4	ÁLABES	73,02	ÁLABES	73,02	BSF SKF6322	72,22
5	BPOR SKFNU322	72,22	2BSF FAGNU322	72,62	BSF FAGNU322	71,43
6	BPIR SKF6322	71,83	BPOR SKFNU322	72,22	BPIR SKF6322	71,03
7	BSF FAGNU322	71,43	BSF SKFNU322	72,22	ÁLABES	70,63
8	2BSF SKF6322	71,43	BPOR FAGNU322	72,22	FTF SKFNU322	70,24
9	BPIR SKFNU322	70,63	BSF FAGNU322	71,83	FTF SKF6322	69,84
10	2BSF FAGNU322	69,84	BPIR SKFNU322	71,43	BPOR SKF6322	69,84
11	BPOR SKF6322	69,05	BPOR SKF6322	71,43	BPOR SKFNU322	69,05
12	BPOR FAGNU322	68,25	BPIR FAGNU322	67,06	2BSF SKF6322	69,05

Tabla 15. Resultado del RNA sin SPEED de todos los años, años pares e impares.

5.3. Análisis según posiciones con todas las variables

Tras este estudio, donde se ve cuáles son las frecuencias más determinantes y su valor, se intentará determinar cuál sería la posición de medida donde su incidencia es mayor. Para ello, se repite el análisis para todas las variables, tanto en la posición 3 como en la 4 y cada uno de sus ejes, horizontal, vertical y axial.

5.3.1. Posición 3 axial

Se inicia el estudio con la posición 3 Axial, cuyos resultados se pueden ver en la siguiente tabla:

ORDEN	FRECUENCIA	REPETICIÓN	PESO	PESO TOTAL	PESO TOTAL %
1	SPEED	3	15	15	95,56
2	BPIR SKF6322	2	14	30	84,44
3	2BSF SKFNU322	1	7	39	77,78
4	BPOR SKF6322	1	9	41	76,30
5	BSF SKF6322	1	14	46	72,59
6	BPIR SKFNU322	2	32	48	71,11
7	2BSF FAGNU322	2	35	51	68,89
8	BPIR FAGNU322	1	21	53	67,41
9	ÁLABES	3	54	54	66,67
10	FTF SKF6322	2	43	59	62,96

Tabla 16. Resultado del RNA de todas las variables con todos los años POS3A.

Como en todos los casos anteriores, es la frecuencia SPEED la que ocupa la primera posición, con un valor sobresaliente en relación con el resto.

La segunda es la BPIR SKF6322, que aumenta su posición en relación con todos los estudios anteriores, tanto en posición como en valor de peso porcentual de un 71% a casi un 85%.

La tercera posición la ocupa 2BSF SKFNU322, esta fue considerada la variable más importante tras la SPEED con un valor de 77,78%. Obteniendo en este el valor porcentual más bajo obtenido de todos los procesos de RNA realizados.

BPOR SKF6322 tiene la cuarta y surge como nueva con un valor de 76,30%. La siguiente es BSF SKF6322, que estaría en un valor porcentual similar a los estudios anteriores. Esto mismo le ocurre a la siguiente frecuencia BPIR SKFNU322, que aumenta levemente su peso. Se determina que la variable Alabes ha bajado a la novena posición, con un descenso de aproximadamente un 4% en relación con el resto del análisis de RNA.

5.3.2. Posición 3 horizontal

En el siguiente estudio se analizará sólo el eje horizontal de la posición tercera con todas las variables. El resultado se muestra en la siguiente tabla.

ORDEN	FRECUENCIA	REPETICIÓN	PESO	PESO TOTAL	PESO TOTAL %
1	SPEED	3	9	9	100,00
2	BPIR FAGNU322	2	25	41	76,30
3	FTF FAGNU322	1	13	45	73,33
4	BSF SKF6322	3	46	46	72,59
5	BPIR SKF6322	1	17	49	70,37
6	FTF SKF6322	1	18	50	69,63
7	BPIR SKFNU322	2	37	53	67,41
8	BSF FAGNU322	1	21	53	67,41
9	FTF SKFNU322	1	21	53	67,41
10	2BSF FAGNU322	3	57	57	64,44

Tabla 17. Resultado del RNA de todas las variables con todos los años POS3H.

En esta posición se obtiene un resultado muy particular, porque desaparecen frecuencias tan determinantes como son BSF SKFNU322 y Álabes. Otras aumentan en posición y valor, como BPIR FAGNU322 y FTF FAGNU322.

Solo hay una variable que mantiene su valor porcentual en relación con el estudio anterior y es BSF SKF6322 con un 72,59%.

5.3.3. Posición 3 vertical

En la posición 3 vertical, vuelve a aparecer como variable de referencia SPEED, seguida por BSF FAGNU322 y su segundo armónico.

El siguiente es la frecuencia de la pista interior del SKFNU322, que aumenta su valor en relación con los dos casos anteriores, con un 72,59%, al igual que FTF SKF6322, que también aumenta. Esto mismo ocurre con FTF SKF6322.

El segundo armónico del rodamiento SKF6322 baja su valor porcentual y su posición, pero poco en relación con el resto, sobre todo si se compara con 2BSF SKFNU322. Éste pasa de estar en segundo lugar en la posición axial a no aparecer en la horizontal y reaparecer en el séptimo lugar. Esto mismo le ocurre a la frecuencia de los álabes, pasando de un 66,67% a un 68,15%.

FTF SKF6322 repite su valor en relación con la posición horizontal, no como BPOR FAGNU322 que baja de 77,78%, obtenido en la posición horizontal y se asemeja al valor de la posición axial.

Los siguientes son BPOR SKFNU322, que aparece por primera vez y BPIR FAGNU322, que sufre una bajada considerable en relación con la POS3A y POS3V. Todo esto se puede visualizar en la siguiente tabla.

ORDEN	FRECUENCIA	REPETICIÓN	PESO	PESO TOTAL	PESO TOTAL %
1	SPEED	3	10	10	99,26
2	2BSF FAGNU322	3	40	40	77,04
3	BSF FAGNU322	2	30	46	72,59
4	BPIR SKFNU322	1	14	46	72,59
5	FTF SKF6322	1	14	46	72,59
6	2BSF SKF6322	1	15	47	71,85
7	2BSF SKFNU322	2	32	48	71,11
8	ÁLABES	2	36	52	68,15
9	BPOR FAGNU322	2	44	60	62,22
10	BPIR SKF6322	1	28	60	62,22

Tabla 18. Resultado del RNA de todas las variables con todos los años POS3V.

5.3.4. Posición 4 axial

En este análisis de RNA se repite el resultado de las anteriores, en lo que se refiere a la frecuencia de referencia de la máquina. La 2BSF FAGNU322 ocupa el segundo lugar, con 75,76% muy lejos de la primera.

Esta variable, junto con su segundo armónico, que ocupa la posición novena, hace que alcancen un valor porcentual algo menor que en la posición 3 vertical, considerando por ello que es en ésta última donde mayor incidencia tiene.

La tercera posición la obtiene la frecuencia de los álabes con un 74,81%, alcanzando su valor más elevado de todas las posiciones estudiadas hasta el momento. La siguiente es BPIR SKFNU322, que con sus 74,07% alcanza su valor más elevado registrado hasta el momento, a diferencia de BPOR SKF6322, que baja en relación con la POS3A.

Las dos siguientes son ocupadas por la frecuencia de las bolas del rodamiento BSF SKFNU322, obteniendo el valor porcentual más alto conseguido hasta el momento.

El resto de las frecuencias, FTF SKF6322 y BSF FAGNU322, bajan en relación con las posiciones anteriores.

ORDEN	FRECUENCIA	REPETICIÓN	PESO	PESO TOTAL	PESO TOTAL %
1	SPEED	3	12	12	97,78
2	2BSF FAGNU322	1	10	42	75,56
3	ÁLABES	2	27	43	74,81
4	BPIR SKFNU322	1	12	44	74,07
5	BPOR SKF6322	1	15	47	71,85
6	2BSF SKFNU322	3	49	49	70,37
7	BSF SKFNU322	1	20	52	68,15
8	FTF SKF6322	1	22	54	66,67
9	BSF FAGNU322	1	24	56	65,19
10	2BSF SKF6322	2	43	59	62,96

Tabla 19. Resultado del RNA de todas las variables con todos los años POS4A.

5.3.5. Posición 4 horizontal

En esta RNA, la primera posición la ocupa SPEED. Como en todos los casos anteriores, la siguiente variable es 2BSF FAGNU322, con sus 77,04% obtiene el mismo valor que en POS3V, pero en esta serie no aparece su armónico, por ello su valor porcentual es menor. El que sí adquiere su mayor peso es FTF SKF6322, en relación con todos los estudios realizados hasta ahora. Esto mismo le ocurre a la frecuencia de bolas del SKF6322, que con la suma de su armónico obtiene el mayor valor con 69,63% y 68,89% respectivamente.

El resto de las variables bajan en relación con los casos anteriores. Hay que destacar la no aparición de la frecuencia de giro de los álabes, todo esto se puede ver en la tabla adjunta a continuación.

ORDEN	FRECUENCIA	REPETICIÓN	PESO	PESO TOTAL	PESO TOTAL %
1	SPEED	3	16	16	94,81
2	2BSF FAGNU322	2	24	40	77,04
3	BPIR SKFNU322	1	13	45	73,33
4	FTF SKF6322	2	29	45	73,33
5	BPIR FAGNU322	1	16	48	71,11
6	2BSF SKF6322	1	18	50	69,63
7	BSF SKF6322	1	19	51	68,89
8	BPOR SKFNU322	1	21	53	67,41
9	FTF FAGNU322	2	37	53	67,41
10	2BSF SKFNU322	3	54	54	66,67

Tabla 20. Resultado del RNA de todas las variables con todos los años POS4H.

5.3.6. Posición 4 vertical

En esta última RNA vuelve a aparecer la frecuencia SPEED como valor más determinante, seguido de 2BSF SKFNU322, que junto a su frecuencia general consiguen obtener el valor más elevado de todas las posiciones. El resto de las frecuencias no alcanzan el valor máximo obtenido en los análisis de RNA realizado en cada una de las posiciones.

Todos estos resultados se pueden verificar en la tabla adjunta.

ORDEN	FRECUENCIA	REPETICIÓN	PESO	PESO TOTAL	PESO TOTAL %
1	SPEED	3	9	9	100,00
2	2BSF SKFNU322	3	39	39	77,78
3	BPIR FAGNU322	1	13	45	73,33
4	ÁLABES	2	30	46	72,59
5	2BSF FAGNU322	1	14	46	72,59
6	BSF SKFNU322	1	18	50	69,63
7	FTF FAGNU322	1	18	50	69,63
8	FTF SKFNU322	1	20	52	68,15
9	BPIR SKFNU322	1	23	55	65,93
10	FTF SKF6322	1	23	55	65,93

Tabla 21. Resultado del RNA de todas las variables con todos los años POS4V.

5.3.7. Resultado del estudio

Como conclusión del estudio de las posiciones de medida y sus respectivos ejes, se puede decir que la variable más determinante es la de giro de la propia máquina referenciada por SPEED, al igual que se observó en los estudios anteriores, confirmando una de las teorías.

También, se puede afirmar que su valor máximo se percibe en la posición POS3H y POS4V, siendo más incidente en esta última, como se observa en las figuras siguientes.

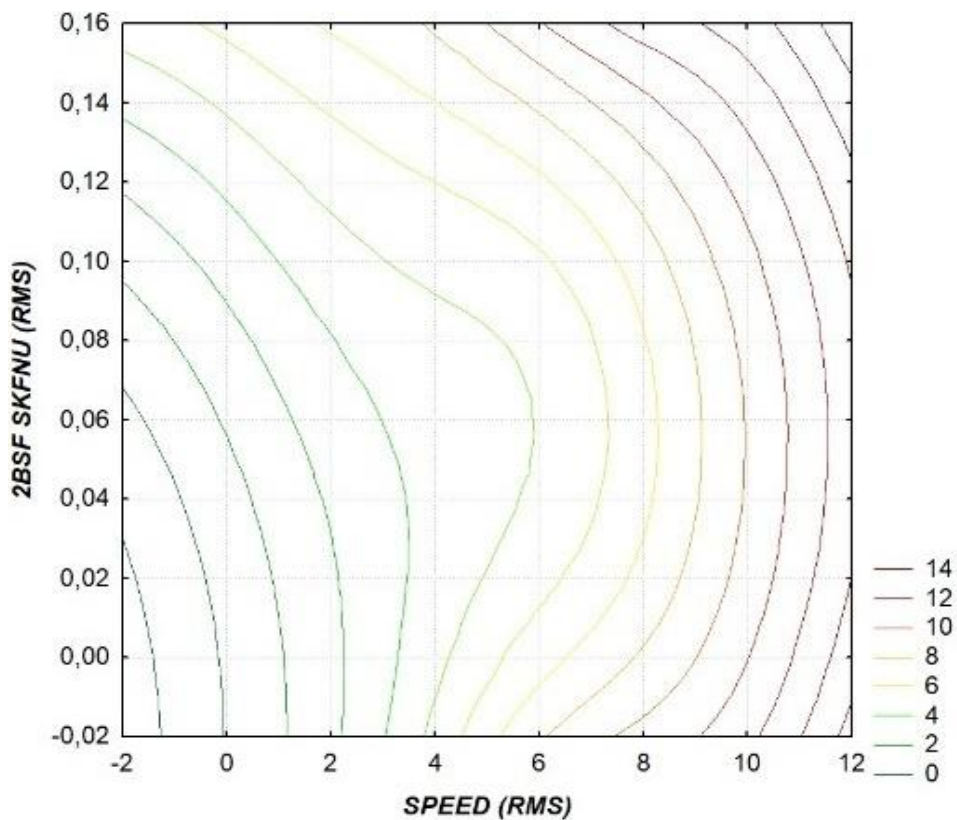


Figura 28. Comparativa AMP MAX posición 3 horizontal – 2BSF SKFNU322 – SPEED en términos de RMS.

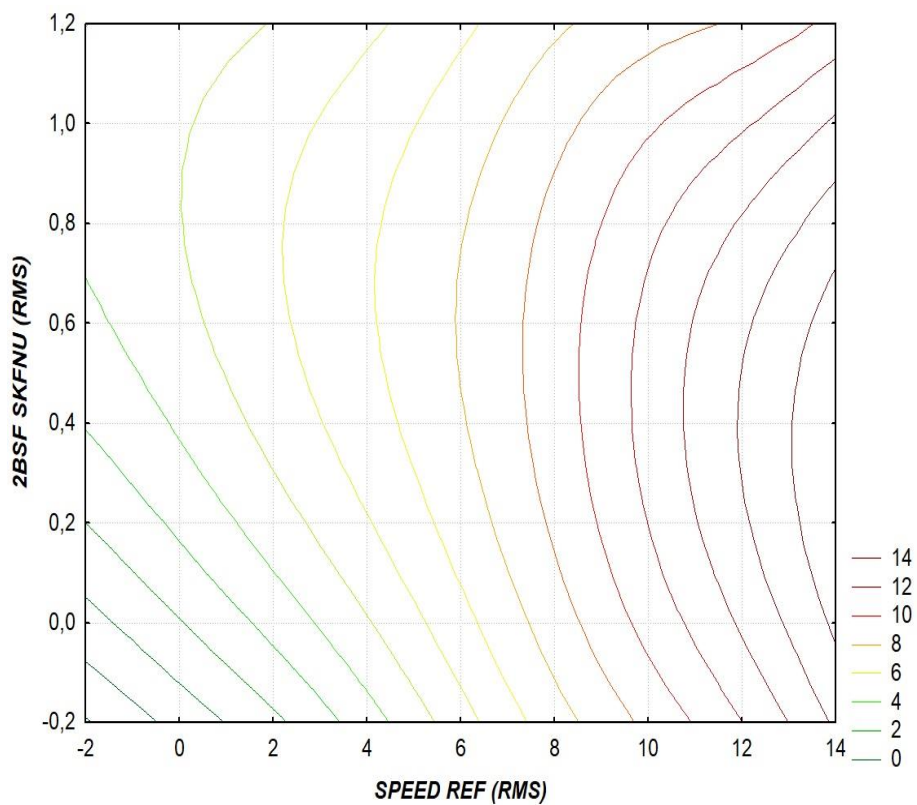


Figura 29. Comparativa AMP MAX posición 4 vertical – 2BSF SKFNU322 – SPEED en términos de RMS.

La siguiente frecuencia por peso porcentual es la 2BSF FAGNU322, alcanzando un valor máximo con su armónico en la POS3V, seguido muy de cerca por 2BSF SKFNU322, pero su mayor incidencia no se encuentra en POS3V sino en la POS4V.

Otra variable determinante ha sido la frecuencia de los álabes, que alcanza su valor máximo en la POS4A. Sin embargo, lo más significativo es comprobar que dicha variable no genera incidencia en las posiciones horizontales ni en la tres ni en la cuatro.

Tras estas, se encuentra la frecuencia de bolas del tercer rodamiento, pero con un valor menos determinante que los anteriores y la posición donde mayor incidencia se detecta es en la POS4H.

Por último, se realiza el análisis de peso de todas las variables en cada una de las posiciones y el resultado obtenido ha sido que la posición de mayor peso es la POS4A. Todo esto se puede ver en la siguiente tabla.

ORDEN	POS3A	PESO TOTAL %	POS3H	PESO TOTAL %	POS3V	PESO TOTAL %
1	SPEED	95,56	SPEED	100,00	SPEED	99,26
2	BPIR SKF6322	84,44	BPIR FAGNU322	76,30	2BSF FAGNU322	77,04
3	2BSF SKFNU322	77,78	FTF FAGNU322	73,33	BSF FAGNU322	72,59
4	BPOR SKF6322	76,30	BSF SKF6322	72,59	BPIR SKFNU322	72,59
5	BSF SKF6322	72,59	BPIR SKF6322	70,37	FTF SKF6322	72,59
6	BPIR SKFNU322	71,11	FTF SKF6322	69,63	2BSF SKF6322	71,85
7	2BSF FAGNU322	68,89	BPIR SKFNU322	67,41	2BSF SKFNU322	71,11
8	BPIR FAGNU322	67,41	BSF FAGNU322	67,41	ÁLABES	68,15
9	ÁLABES	66,67	FTF SKFNU322	67,41	BPOR FAGNU322	62,22
10	FTF SKF6322	62,96	2BSF FAGNU322	64,44	BPIR SKF6322	62,22

Tabla 22. Resultado del RNA de todas las variables con todos los años, Posición 3.

ORDEN	POS4A	PESO TOTAL %	POS4H	PESO TOTAL %	POS4V	PESO TOTAL %
1	SPEED	97,78	SPEED	94,81	SPEED	100,00
2	2BSF FAGNU322	75,56	2BSF FAGNU322	77,04	2BSF SKFNU322	77,78
3	ÁLABES	74,81	FTF SKF6322	73,33	BPIR FAGNU	73,33
4	BPIR SKFNU322	74,07	BPIR SKFNU322	73,33	ÁLABES	72,59
5	BPOR SKF6322	71,85	BPIR FAGNU322	71,11	2BSF FAGNU322	72,59
6	2BSF SKFNU322	70,37	2BSF SKF6322	69,63	BSF SKFNU322	69,63
7	BSF SKFNU322	68,15	BSF SKF6322	68,89	FTF FAGNU322	69,63
8	FTF SKF6322	66,67	FTF FAGNU	67,41	FTF SKFNU322	68,15
9	BSF FAGNU322	65,19	BPOR SKFNU	67,41	BPIR SKFNU322	65,93
10	2BSF SKF6322	62,96	2BSF SKFNU	66,67	FTF SKF6322	65,93

Tabla 23. Resultado del RNA de todas las variables con todos los años, Posición 4.

5.4. Análisis según posiciones sin SPEED

El siguiente estudio de RNA se realiza teniendo en consideración las posiciones de medida tres y cuatro, al igual que los ejes horizontal, vertical y axial, pero eliminando la variable de mayor peso porcentual, que ha sido la propia velocidad de referencia del equipo denominada en este estudio como SPEED.

5.4.1. Posición 3 axial

Analizando los resultados obtenidos en la posición 3 axial, sin la variable SPEED, se obtienen resultados dispares. Por un lado, la variable más determinante tras retirar la frecuencia característica de la máquina es la frecuencia de la pista interior del rodamiento SKF6322, en el análisis anterior ocupaba el segundo puesto.

Por ello, era de esperar que ahora ocupará el primer lugar, sin embargo, el segundo puesto lo ocupa FTF SKF6322, que ocupaba el último puesto en el estudio anterior.

Otra variable que aumenta su posición, pasando del séptimo lugar al tercero, es el segundo armónico de la frecuencia de bolas del FAGNU322. También aumenta BPIR FAGNU322, pasando de la octava a la quinta. La única variable que se mantiene en sus valores es la generada por los álabes y la BSF FAGNU322.

Hay que destacar que surge una variable que no aparecía en el estudio anterior y es BPOR FAGNU322, que pasa a la octava posición, como se puede ver en la tabla adjunta.

ORDEN	FRECUENCIA	REPETICIÓN	PESO	PESO TOTAL	PESO TOTAL %
1	BPIR SKF6322	2	14	29	84,13
2	FTF SKF6322	1	12	42	73,81
3	2BSF FAGNU322	2	28	43	73,02
4	2BSF SKFNU322	1	13	43	73,02
5	BPIR FAGNU322	2	29	44	72,22
6	2BSF SKF6322	1	15	45	71,43
7	BSF FAGNU322	1	16	46	70,63
8	BPOR FAGNU322	1	17	47	69,84
9	ÁLABES	1	19	49	68,25
10	BSF SKF6322	1	24	54	64,29

Tabla 24. Resultado del RNA de todas las variables con todos los años, Posición 4A.

5.4.2. Posición 3 horizontal

En la posición 3 horizontal se observa en primer lugar la frecuencia 2BSF SKFNU322, que no aparecía en el primer estudio. En segunda posición aparece el segundo armónico del BSF FAGNU322, que en el primer estudio se encontraba en la última posición.

En tercera posición está la frecuencia BPOR FAGNU322, con un valor del 77,78%, que aparece en este análisis tras retirar la frecuencia de giro de la máquina. Esto mismo ocurre con la frecuencia BPOR SKFNU322, con un 71,43%.

El resto de las variables pierden posiciones en relación con el estudio con SPEED, como son FTF SKF6322, FTF FAGNU322 y BPIR SKF6322.

Todos los resultados se pueden observar en la tabla 25.

ORDEN	FRECUENCIA	REPETICIÓN	PESO	PESO TOTAL	PESO TOTAL %
1	2BSF SKFNU322	3	29	29	84,13
2	2BSF FAGNU322	2	21	36	78,57
3	BPOR FAGNU322	2	22	37	77,78
4	BPIR FAGNU322	1	13	43	73,02
5	BPIR SKF6322	2	29	44	72,22
6	FTF FAGNU322	1	14	44	72,22
7	BPOR SKFNU322	1	15	45	71,43
8	2BSF SKF6322	1	15	45	71,43
9	FTF SKF6322	1	17	47	69,84
10	BPIR SKFNU322	1	18	48	69,05

Tabla 25. Resultado del RNA de todas las variables con todos los años, Posición 4H.

5.4.3. Posición 3 vertical

En este análisis se observa que la frecuencia de más peso pasa a ser BPIR SKFNU, que ocupaba en el estudio anterior la tercera posición. Las que ocupaban la segunda y tercera (BSF FAGNU y su segundo armónico) pasan ahora a la tercera y quinta posición.

Ascienden las variables 2BSF SKFNU y álabes, que pasan de séptima a segunda posición. La primera y la segunda pasan de octava a la sexta. Otra frecuencia que baja es la FTF SKF6322, que cae un puesto y surgen dos variables nuevas, BPOR SKFNU y BPIR FAGNU.

ORDEN	FRECUENCIA	REPETICIÓN	PESO	PESO TOTAL	PESO TOTAL %
1	BPIR SKFNU322	3	32	32	81,75
2	2BSF SKFNU322	2	17	32	81,75
3	BSF FAGNU322	3	36	36	78,57
4	FTF FAGNU322	1	10	40	75,40
5	2BSF FAGNU322	2	29	44	72,22
6	ÁLABES	1	15	45	71,43
7	FTF SKF6322	1	17	47	69,84
8	BPOR FAGNU322	1	18	48	69,05
9	BPOR SKFNU322	1	19	49	68,25
10	BPIR FAGNU322	1	21	51	66,67

Tabla 26. Resultado del RNA de todas las variables con todos los años, Posición 4V.

5.4.4. Posición 4 axial

En esta posición, la frecuencia más importante es 2BSF SKFNU322, con un 92,86%, siendo su valor más elevado hasta el momento y posicionándose en todos los análisis como una variable determinante.

El segundo puesto lo tiene la frecuencia de los álabes con un 82,54%, siendo también su puesto más alto hasta el momento. El siguiente valor también aumenta su peso porcentual, obteniendo en este estudio su máximo índice, con un 76,19%. Esto mismo sucede con las frecuencias BPOR SKFNU322 y FTF SKFNU322.

Es de destacar que las cuatro frecuencias del rodamiento SKFNU322 aparecen en las primeras posiciones y con valores más elevados que en el resto de las posiciones, lo que da a entender que es en esta posición y eje donde muestra su mayor incidencia.

Las cinco frecuencias restantes son ocupadas por las variables características del rodamiento FAGNU322, desde la jaula hasta el segundo armónico de la frecuencia de giro de las bolas. Esto se puede interpretar como que es en esta posición donde mejor se reflejan las perturbaciones de éste. Los resultados se pueden observar en la siguiente figura.

ORDEN	FRECUENCIA	REPETICIÓN	PESO	PESO TOTAL	PESO TOTAL %
1	2BSF SKFNU322	3	18	18	92,86
2	ÁLABES	3	31	31	82,54
3	2BSF SKF6322	1	9	39	76,19
4	BPIR SKFNU322	1	10	40	75,40
5	BPOR SKFNU322	2	26	41	74,60
6	FTF SKFNU322	1	14	44	72,22
7	FTF FAGNU322	1	17	47	69,84
8	BPIR FAGNU322	1	20	50	67,46
9	BSF FAGNU322	2	37	52	65,87
10	BPOR FAGNU322	1	23	53	65,08

Tabla 27. Resultado del RNA de todas las variables con todos los años, Posición 4A.

5.4.5. Posición 4 horizontal

La primera variable característica de esta posición es el segundo armónico de las bolas del rodamiento SKFNU322, pero con un 80,95%, bastante inferior a la posición 4 axial. La segunda posición, con un 75,40%, la ocupa BPOR FAGNU322, que aun ocupando este puesto tiene un valor porcentual menor que en la posición 3 horizontal.

El siguiente es el BPIR SKFNU322, que con un 75,40%, alcanza el valor máximo hasta el momento de la posición 3 vertical, eso mismo ocurre con el resto de las variables.

Todos los resultados se muestran en la siguiente tabla.

ORDEN	FRECUENCIA	REPETICIÓN	PESO	PESO TOTAL	PESO TOTAL %
1	2BSF SKFNU	3	33	33	80,95
2	BPOR FAGNU	3	40	40	75,40
3	BPIR SKFNU	2	25	40	75,40
4	2BSF FAGNU	2	29	44	72,22
5	BSF 6322	1	14	44	72,22
6	2BSF 6322	1	14	44	72,22
7	BPOR SKFNU	2	34	49	68,25
8	FTF 6322	1	21	51	66,67
9	BPIR FAGNU	2	37	52	65,87
10	BPIR 6322	1	22	52	65,87

Tabla 28. Resultado del RNA de todas las variables con todos los años, Posición 4H.

5.4.6. Posición 4 vertical

Los resultados de este estudio se pueden ver en la siguiente gráfica.

ORDEN	FRECUENCIA	REPETICIÓN	PESO	PESO TOTAL	PESO TOTAL %
1	2BSF SKFNU322	2	8	23	88,89
2	BSF SKF6322	3	36	36	78,57
3	BPIR FAGNU322	2	27	42	73,81
4	BPIR SKFNU322	2	28	43	73,02
5	FTF SKF6322	1	13	43	73,02
6	BSF SKFNU322	1	13	43	73,02
7	BPOR SKFNU322	1	13	43	73,02
8	ÁLABES	2	29	44	72,22
9	2BSF SKF6322	2	38	53	65,08
10	BPOR FAGNU322	2	43	58	61,11

Tabla 29. Resultado del RNA de todas las variables con todos los años, Posición 4V.

Como en el caso anterior, la frecuencia determinante ha sido 2BSF SKFNU322, pero no ha alcanzado su valor máximo. Éste se registró en la POS4A, pero si se le suma el valor de su frecuencia natural BSF SKFNU322, que se encuentra en la sexta posición con 73,02%, se obtiene que es en esta posición donde la frecuencia, generada por las bolas del rodamiento

SKFNU322, alcanza su valor más elevado.

La segunda frecuencia determinante es la BSF SKF6322, que con sus 78,57%, obtienen el valor más alto registrado de todas las posiciones. Lo mismo le ocurre a la siguiente BPIR FAGNU322 con sus 73,81%, el resto de las frecuencias se encuentran por debajo de los valores obtenidos en el resto de las muestras.

5.4.7. Resultado del estudio

Como resultado del estudio de las posiciones de medida y sus respectivos ejes, se puede decir que la variable más determinante es la generada por el segundo armónico de la frecuencia de giro de las bolas del rodamiento BSF SKFNU322 y alcanza su valor máximo en la posición POS4H, con un 92,86%, muy seguida de la POS4V con un 88,89%.

En esta segunda se alcanzan valores picos mayores, como se puede ver en las siguientes figuras.

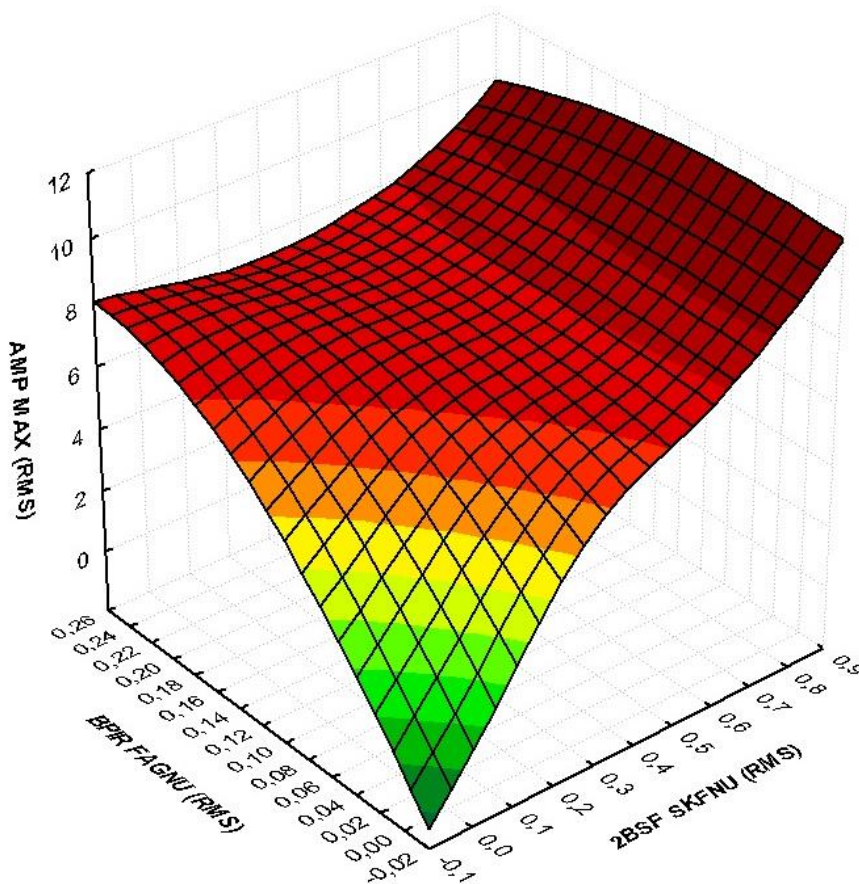


Figura 30. Comparativa AMP MAX – 2BSF SKFNU322 – BPIR FAGNU322 en términos de RMS.

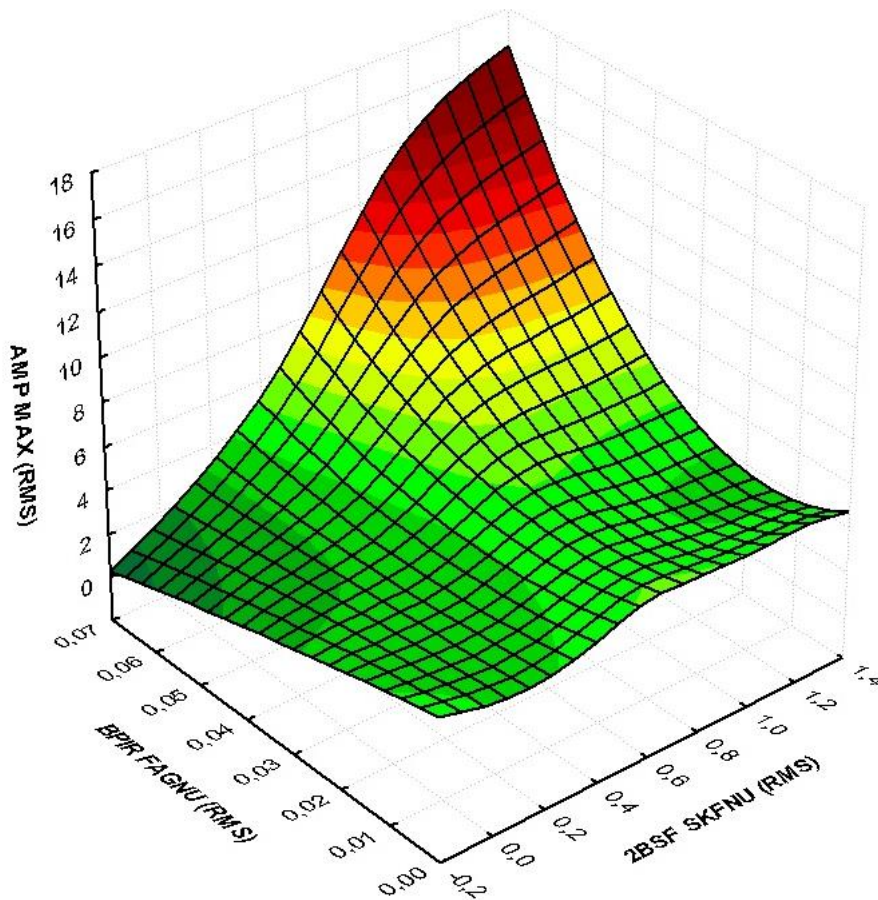


Figura 31. Comparativa AMP MAX – 2BSF SKFNU322 – BPIR FAGNU322 en términos de RMS.

Además, esta frecuencia está presente en todas las posiciones de medida como frecuencia determinante menos en la POS3A, que obtiene la cuarta y en la POS3V la segunda posición.

Este resultado no coincide con el estudio con la variable SPEED. En él, era la variable 2BSF FAGNU322 la predominante tras la frecuencia característica del giro de la máquina, en este caso ha sido superada por la generada por las bolas del SKFNU322.

Otra variable determinante que ha obtenido un resultado parejo al estudio anterior ha sido la frecuencia de los álabes, que alcanza su valor máximo en la POS4A, mostrando que el empuje de estos incide más en los ejes axiales que lo que sería en los ejes horizontales o verticales.

Sin embargo, lo más significativo es comprobar que dicha variable no genera incidencia en las posiciones horizontales, ni en la posición tres, ni en la cuatro.

En la siguiente figura se puede observar la comparativa entre la amplitud máxima en relación con la frecuencia de giro de las bolas del rodamiento FAGNU322 y los álabes en la posición 4 en el eje axial.

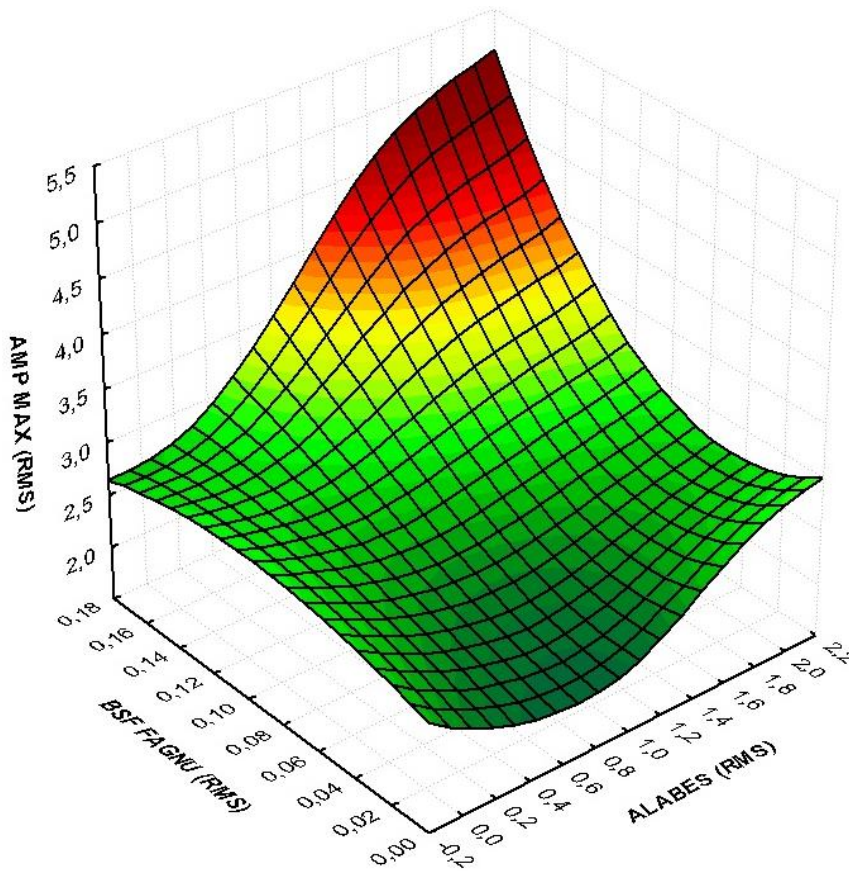


Figura 32. Comparativa AMP MAX – ÁLABES – BSF FAGNU322 en términos de RMS.

Por último, se realiza el análisis de peso de todas las variables en cada una de las posiciones y el resultado obtenido ha sido que la posición de mayor peso es la POS4A, pero muy próximo la POS4V.

Hay que tener en consideración que este estudio no cuenta con la variable de más peso que sería la generada por la frecuencia de giro del propio equipo y como hemos visto en los casos anteriores era una de las variables que más incidían en la Amplitud Máxima.

En esta primera tabla se ven los resultados obtenidos en la posición 3 y sus tres ejes coordenados de media, horizontal, vertical y axial.

ORDEN	POS3A	PESO TOTAL %	POS3H	PESO TOTAL %	POS3V	PESO TOTAL %
1	BPIR SKF6322	84,13	2BSF SKFNU322	84,13	BPIR SKFNU322	81,75
2	FTF SKF6322	73,81	2BSF FAGNU322	78,57	2BSF SKFNU322	81,75
3	2BSF FAGNU322	73,02	BPOR FAGNU322	77,78	BSF FAGNU322	78,57
4	2BSF SKFNU322	73,02	BPIR FAGNU322	73,02	FTF FAGNU322	75,40
5	BPIR FAGNU322	72,22	BPIR SKF6322	72,22	2BSF FAGNU322	72,22
6	2BSF SKF6322	71,43	FTF FAGNU322	72,22	ÁLABES	71,43
7	BSF FAGNU322	70,63	BPOR SKFNU322	71,43	FTF SKF6322	69,84
8	BPOR FAGNU322	69,84	2BSF SKF6322	71,43	BPOR FAGNU322	69,05
9	ÁLABES	68,25	FTF SKF6322	69,84	BPOR SKFNU322	68,25
10	BSF SKF6322	64,29	BPIR SKFNU322	69,05	BPIR FAGNU322	66,67

Tabla 30. Resumen resultado del RNA de todas las variables con todos los años, Posición 3.

Lo primero a destacar es que el rodamiento SKFNU322 es el que ocupa las primeras posiciones, tanto en la posición horizontal como vertical.

El segundo rodamiento sería el SKF6322 que sólo ocupa las primeras posiciones en el eje axial.

El rodamiento FAGNU322 aparece, pero en posiciones muy retrasadas. Todo esto indicaría que en la posición 3 es el rodamiento SKFNU322 el que más afección energética generada por la vibración produce.

En esta segunda tabla se observan los resultados obtenidos en la posición 4 y sus tres ejes coordenados de media, horizontal, vertical y axial.

ORDEN	POS4A	PESO TOTAL %	POS4H	PESO TOTAL %	POS4V	PESO TOTAL %
1	2BSF SKFNU322	92,86	2BSF SKFNU322	80,95	2BSF SKFNU322	88,89
2	ÁLABES	82,54	BPOR FAGNU322	75,40	BSF SKF6322	78,57
3	2BSF SKF6322	76,19	BPIR SKFNU322	75,40	BPIR FAGNU322	73,81
4	BPIR SKFNU322	75,40	2BSF FAGNU322	72,22	BPIR SKFNU322	73,02
5	BPOR SKFNU322	74,60	BSF SKF6322	72,22	FTF SKF6322	73,02
6	FTF SKFNU322	72,22	2BSF SKF6322	72,22	BSF SKFNU322	73,02
7	FTF FAGNU322	69,84	BPOR SKFNU322	68,25	BPOR SKFNU322	73,02
8	BPIR FAGNU322	67,46	FTF SKF6322	66,67	ÁLABES	72,22
9	BSF FAGNU322	65,87	BPIR FAGNU322	65,87	2BSF SKF6322	65,08
10	BPOR FAGNU322	65,08	BPIR SKF6322	65,87	BPOR FAGNU322	61,11

Tabla 31. Resumen resultado del RNA de todas las variables con todos los años, Posición 4.

5.5. Conclusiones del Capítulo V

El objetivo principal es validar el uso del método de propagación de Levenberg-Marquardt, en un equipo soplante, para definir el punto de control de la máquina y qué elemento rotativo es el que más sufre y genera estos efectos energéticos.

Primero se abordan las conclusiones obtenidas del análisis de la determinación de la posición y eje de medida más sensible al efecto energético vibracional, en relación a la variable de salida, amplitud máxima de la red neuronal, y después se muestran las conclusiones de la determinación de la variable de mayor peso.

5.5.1. Caracterización por RNA para la determinación de la posición y eje más sensible

Los resultados de las aproximaciones estocásticas de los pesos acumulados máximos

de las aproximaciones según las posiciones y ejes de medida se muestran las siguientes tablas:

N°	POSICIÓN 3 AXIAL		POSICIÓN 3 HORIZONTAL		POSICIÓN 3 VERTICAL	
	FRECUENCIA	PESO %	FRECUENCIA	PESO %	FRECUENCIA	PESO%
1	SPEED	95,56	SPEED	100,00	SPEED	99,26
2	BPIR 6322	84,44	BPIR FAGNU	76,30	2BSF FAGNU	77,04
3	2BSF SKFNU	77,78	FTF FAGNU	73,33	BSF FAGNU	72,59
4	BPOR 6322	76,30	BSF 6322	72,59	BPIR SKFNU	72,59
5	BSF 6322	72,59	BPIR 6322	70,37	FTF 6322	72,59
6	BPIR SKFNU	71,11	FTF 6322	69,63	2BSF 6322	71,85
7	2BSF FAGNU	68,89	BPIR SKFNU	67,41	2BSF SKFNU	71,11
8	BPIR FAGNU	67,41	BSF FAGNU	67,41	ALABES	68,15
9	ALABES	66,67	FTF SKFNU	67,41	BPOR FAGNU	62,22
10	FTF 6322	62,96	2BSF FAGNU	64,44	BPIR 6322	62,22
P. Acumulado		743,70		728,89		729,63

N°	POSICIÓN 4 AXIAL		POSICIÓN 4 HORIZONTAL		POSICIÓN 4 VERTICAL	
	FRECUENCIA	PESO %	FRECUENCIA	PESO %	FRECUENCIA	PESO%
1	SPEED	97,78	SPEED	94,81	SPEED	100,00
2	2BSF FAGNU	75,56	2BSF FAGNU	77,04	2BSF SKFNU	77,78
3	ALABES	74,81	FTF 6322	73,33	BPIR FAGNU	73,33
4	BPIR SKFNU	74,07	BPIR SKFNU	73,33	ALABES	72,59
5	BPOR 6322	71,85	BPIR FAGNU	71,11	2BSF FAGNU	72,59
6	2BSF SKFNU	70,37	2BSF 6322	69,63	BSF SKFNU	69,63
7	BSF SKFNU	68,15	BSF 6322	68,89	FTF FAGNU	69,63
8	FTF 6322	66,67	FTF FAGNU	67,41	FTF SKFNU	68,15
9	BSF FAGNU	65,19	BPOR SKFNU	67,41	BPIR SKFNU	65,93
10	2BSF 6322	62,96	2BSF SKFNU	66,67	FTF 6322	65,93
P. Acumulado		788,89		794,81		863,70

Tabla 32. Resultado del peso porcentual acumulado y medio en las aproximaciones por RNA de la posición 3 y 4.

Las conclusiones del estudio son:

1. El estudio determina que la posición 4 es la más desfavorable y la que antes percibe los efectos energéticos vibratoriales, generados por los elementos constituyentes del rodamiento. Se obtiene en la posición 3 un peso porcentual acumulado de 734,07%, frente a los de la posición 4, que alcanzan los 815,8%.
2. En relación al eje, se puede afirmar que el eje vertical de la posición 4 es el más sensible

a la energía en densidad de potencia espectral, con un peso porcentual acumulado total de 1593,33%; tras él se encuentra el eje axial, con 1532,59% y por último se encuentra el horizontal. Se concluye que el eje donde antes se perciben las perturbaciones vibratorias es en el eje vertical.

5.5.2. Caracterización por RNA para la determinación de la variable de mayor peso

Los resultados de las aproximaciones estocásticas se resumen en la siguiente tabla donde:

- La primera corresponde al valor medio ponderado de las aproximaciones con y sin SPEED, durante todos los años y años pares e impares.
- La segunda es el valor medio ponderado de las aproximaciones, con la variable SPEED de todos los años, años pares e impares.
- La tercera, pertenece al valor medio ponderado de las aproximaciones sin la variable SPEED en todos los años, años pares y años impares.
- La cuarta corresponde a la aproximación con SPEED de todos los años, años pares e impares.

Nº	APROXIMACIÓN 1		APROXIMACIÓN 2		APROXIMACIÓN 3		APROXIMACIÓN 4	
	FRECUENCIA	PESO %	FRECUENCIA	PESO %	FRECUENCIA	PESO%	FRECUENCIA	PESO %
1	SPEED	97,90	SPEED	97,90	2BSF SKFNU	83,60	SPEED	97,90
2	2BSF SKFNU	73,64	2BSF SKFNU	72,89	ALABES	72,22	2BSF FAGNU	72,84
3	2BSF FAGNU	72,20	2BSF FAGNU	72,84	BSF FAGNU	71,75	2BSF SKFNU	72,47
4	ALABES	71,72	BSF 6322	71,23	BPIR SKFNU	71,56	BSF 6322	71,23
5	BPIR SKFNU	71,72	ALABES	70,75	2BSF 6322	71,30	ALABES	70,74
6	BSF SKF6322	70,87	BPIR SKFNU	70,74	BPIR FAGNU	69,84	BPIR SKFNU	70,74
7	BSF FAGNU	70,16	FTF FAGNU	69,01	BSF 6322	69,84	BSF SKFNU	70,00
8	2BSF 6322	69,78	BSF FAGNU	68,77	FTF 6322	69,18	FTF FAGNU	69,01
9	BPIR FAGNU	70,72	FTF 6322	68,52	BPIR 6322	67,86	BSF FAGNU	68,77
10	FTF 6322	70,34	BPIR 6322	68,44	2BSF FAGNU	67,67	FTF 6322	68,52

Tabla 33. Resultado de todas las aproximaciones por RNA.

Las conclusiones del estudio son:

1. El estudio determina que es la frecuencia SPEED la que mayor peso porcentual tiene en todas las aproximaciones estocásticas, y las medias ponderadas por repetición, alcanzando

un valor de 97,9 % en relación a la variable de salida de la red neuronal.

2. La variable 2BSF SKFNU322 consigue un valor porcentual comprendido entre el 83,60% y el 72,47%, alcanzando como media la segunda posición en todas las aproximaciones. Como conclusión, es el rodamiento SKFNU322 y la jaula del mismo el elemento que más perturbaciones genera tras la variable SPEED.
3. Se concluye que la tercera variable es la generada por el segundo armónico de bolas del rodamiento FAGNU322, con un valor porcentual medio de 103,53%.
4. La cuarta variable es la generada por la frecuencia de giro de los álabes, con un valor porcentual acumulado medio de 71,35%.

CAPÍTULO VI: RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LA APROXIMACIÓN POR DENSIDAD DE POTENCIA

Tras el estudio por redes neuronales, se evalúan los resultados obtenidos de todas las frecuencias características de los tres rodamientos y de las dos frecuencias típicas de la máquina, la amplitud máxima, SPEED y Álabes, a través, de los valores de densidad de potencia en términos de RMS.

El primer estudio se realiza de los valores de amplitud máxima en términos de RMS.

6.1. Estudio comparativo de espectros

Las secuencias en cascada del periodo de monitoreo en cada una de las posiciones y sus ejes coordenados muestran el nivel de vibración y su evolución.

6.1.1. Estudio posición 3

A continuación, se muestra esta evolución en cada una de las posiciones y sus ejes de medida. Se comenzará por la posición 3 horizontal.

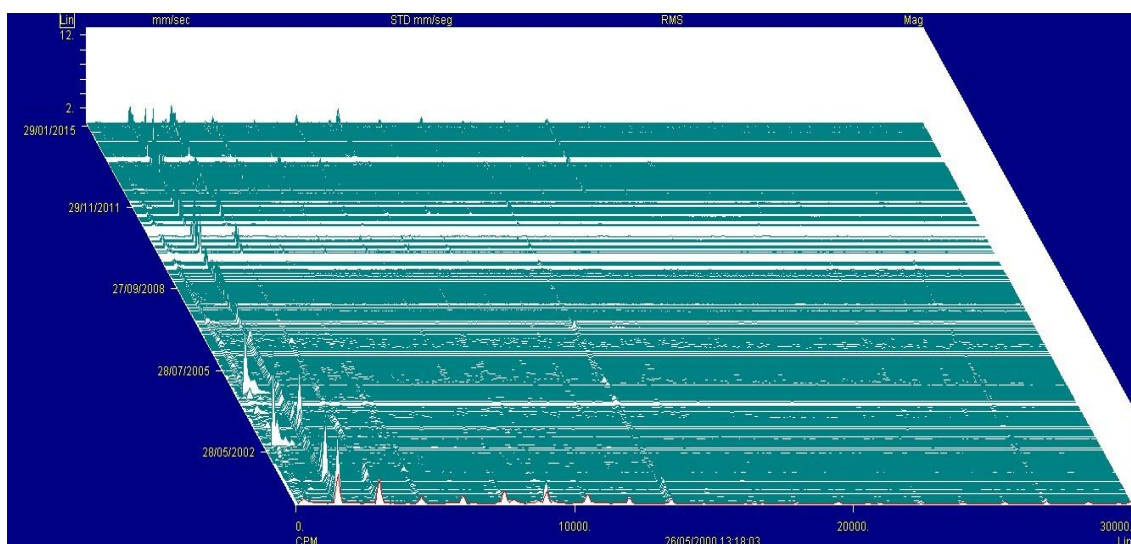


Figura 33. Cascada espectral, posición 3 horizontal datos en términos de RMS.

La primera característica que se detecta en el eje horizontal de la posición 3 es que los valores máximos se encuentran dentro del rango de frecuencias comprendidas entre 0 y 16000 Hz. Otra característica es ver como los valores picos surgen rápidamente en el muestreo, no siguiendo una evolución lineal.

Los valores picos de las distintas frecuencias no alcanzan valores superiores a los 10 RMS, este dato será fundamental para determinar el punto más sensible de medida.

Tras la primera figura se analiza ahora y se compara la gráfica en cascada de la posición 3 vertical.

Lo primero que se puede ver es que el diagrama espectral es más incidente con valores picos superiores, esto indica que esta posición es más sensible a las perturbaciones vibraciones que la posición horizontal.

También se puede comprobar que sufre valores pico de mayor intensidad, alcanzando hasta los 40 RMS, son estos los que determinan la vida útil del sistema.

Otro dato interesante es comprobar que las frecuencias de mayor impacto se encuentran en el intervalo comprendido entre los 500 y 1700 Hz, precisamente donde se encuentra la frecuencia de giro del equipo SPEED.

Otra característica que se aprecia y comparte con la posición horizontal es que las variables más determinantes están en la primera parte del rango espectral y no superan los 2000 Hz.

Todo esto se puede ver en siguiente gráfico.

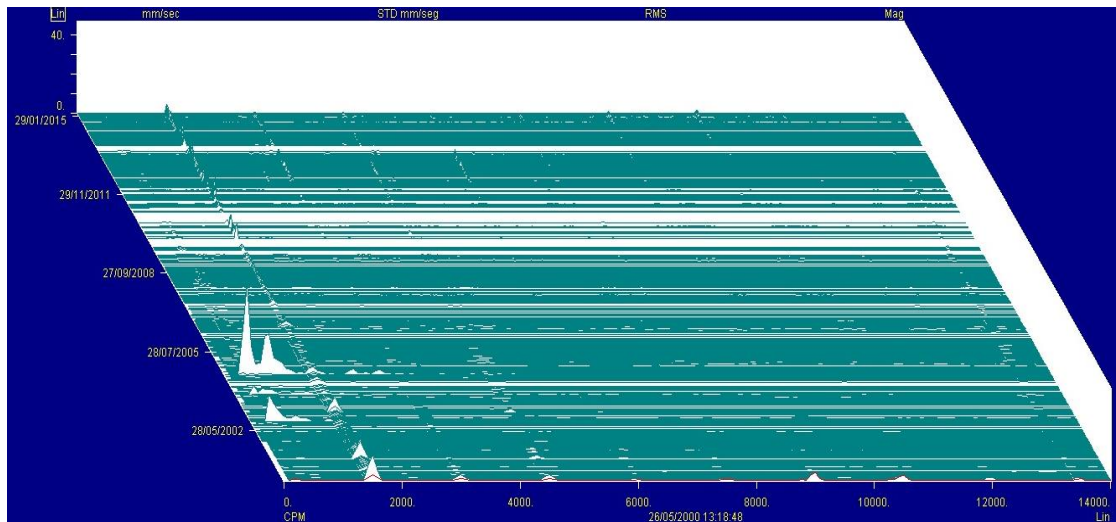


Figura 34. Cascada espectral, posición 3 vertical en términos de RMS.

En la siguiente figura se ve el espectro en cascada de la posición 3 en el eje axial.

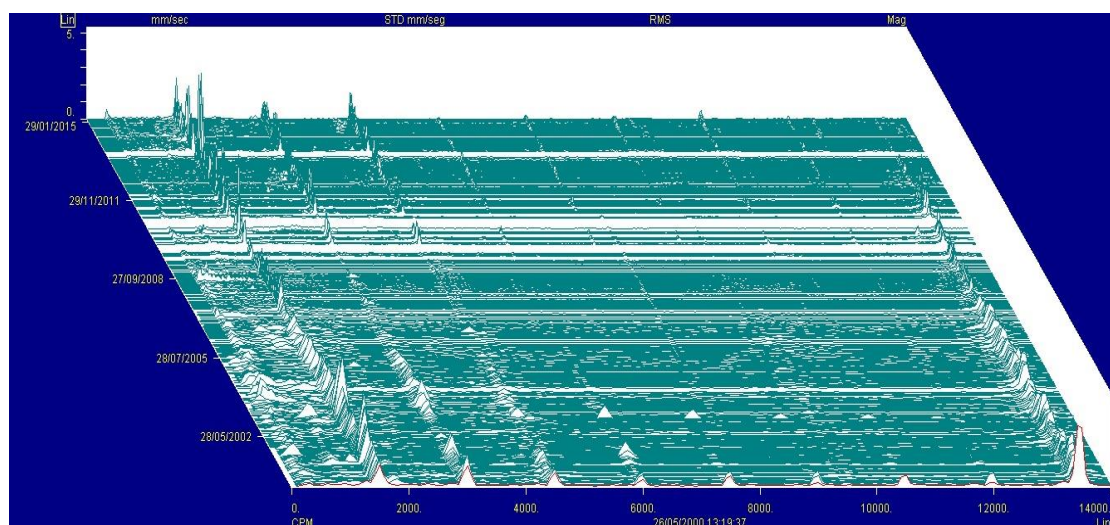


Figura 35. Cascada espectral, posición 3 axial en términos de RMS.

En la figura anterior se ve el espectro en cascada de la posición 3 en el eje axial, donde los valores pico son menores que en los otros dos ejes. Otra característica importante en la aparición de una nueva variable que no era percibida en las anteriores, esta se encuentra situada en la frecuencia 13000 Hz.

La frecuencia 13400 Hz corresponde con la del giro de los álabes, esto indica que esta perturbación genera más incidencia en esta posición y ayuda a mejorar el muestreo para predecir fallos en su funcionamiento. También destaca la frecuencia de giro de la soplante, pero con valores menores que en los ejes anteriores.

6.1.2. Estudio posición 4

Tras el estudio en la posición 3 y sus ejes, se pasa ahora a analizar la muestra espectral en la posición 4 horizontal.

Lo primero a destacar es que se obtienen valores mayores que en la posición 3, hasta 40 RMS. Sin embargo, en este caso, estas perturbaciones no corresponden a las frecuencias SPEED ni Álabes, porque se encuentran en el intervalo de frecuencia comprendido entre los 500 y 1000 Hz.

La frecuencia SPEED si aparece, pero a niveles más bajos al igual que pasa con la frecuencia de los álabes.

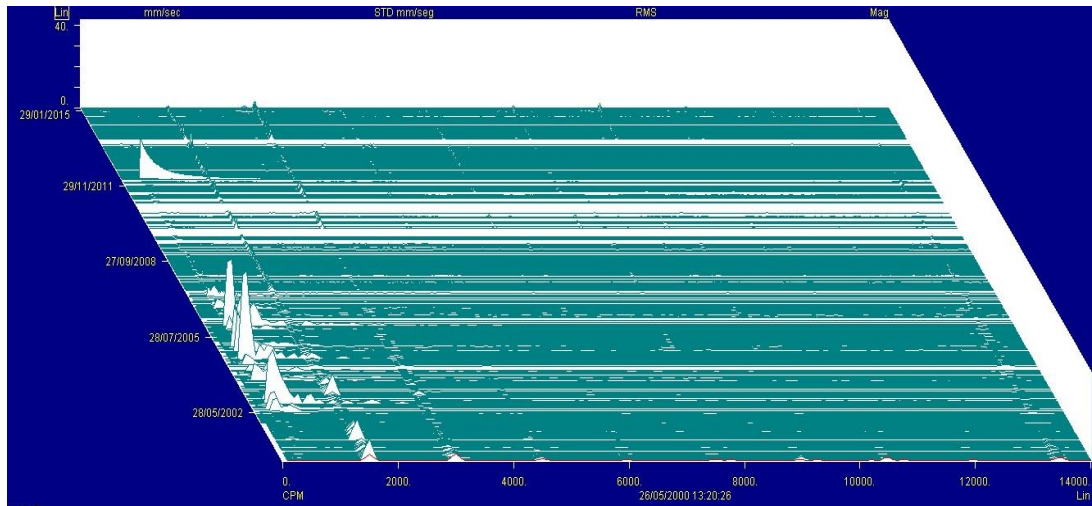


Figura 36. Cascada espectral, posición 4 horizontal en términos de RMS.

Tras el estudio en la posición 4 en el eje horizontal, se pasa ahora al eje vertical. Como en los casos anteriores, son destacables las frecuencias comprendidas entre los 500 y 1500 Hz., siendo estas las que mayor impacto generan.

Además, en este eje se alcanzan los valores pico más elevado de todas las posiciones y ejes estudiados hasta el momento. También se puede ver la acción de los álabes, pero a niveles más bajos. Todo esto se puede ver en la siguiente figura.

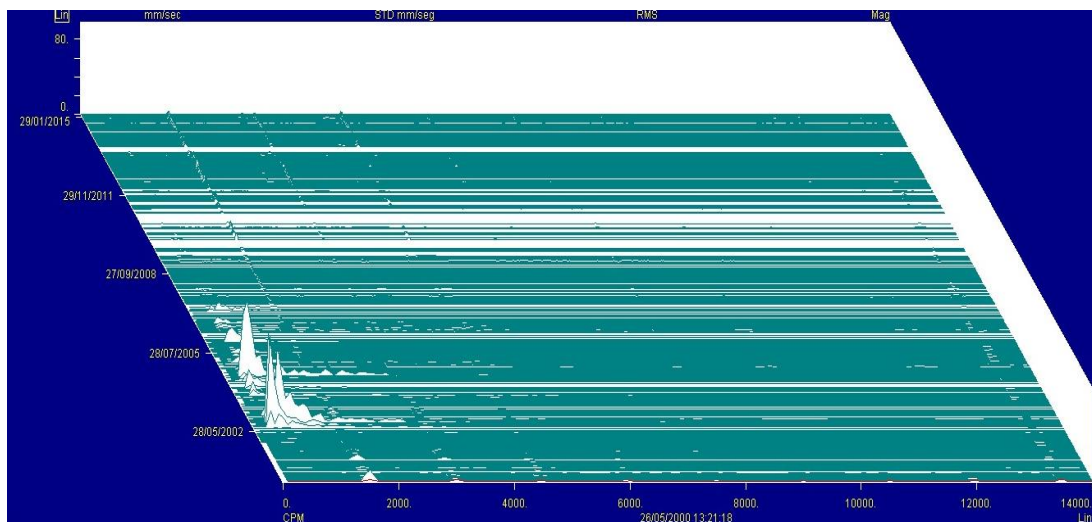


Figura 37. Cascada espectral, posición 4 vertical en términos de RMS.

Por último, se analiza la posición 4 el eje axial. Como en los casos anteriores, se aprecian las vibraciones a baja frecuencias, donde se encuentra la velocidad del equipo SPEED y la frecuencia de los álabes, siendo en este punto, donde se alcanzan los valores más elevados de SPEED y de álabes.

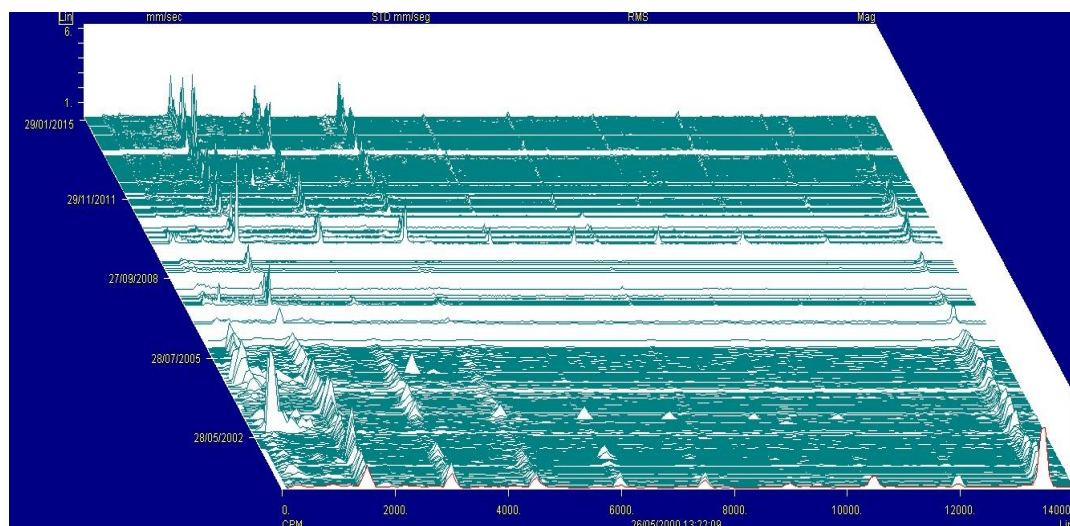


Figura 38. Cascada espectral, posición 4 axial en términos de RMS.

6.1.3. Resultado del estudio

Se puede afirmar que, tras el estudio de la representación espectral de las dos posiciones y sus respectivos ejes, los valores de mayor intensidad se encuentran en las posiciones verticales. En el caso de la posición 3 existen niveles máximos en el eje vertical, con valores cercanos a 40 RMS. Sin embargo, en el horizontal no llegan a 12 RMS y en el axial a 6 RMS, siendo en el eje horizontal casi un 1/4 menor del vertical y el axial queda en 1/8 del valor límite alcanzado en esta posición.

En la posición 4 se repiten los resultados obtenidos en la posición 3, pero las diferencias porcentuales son mayores que, en el eje vertical, alcanzando valores de 80 RMS. En el eje horizontal se obtiene la mitad que se alcanza en el eje vertical y en el caso del eje axial solo una décimo sexta parte.

Tras esta primera evaluación, se observa que los niveles, a nivel espectral, alcanza mayores valores en la posición 4 que en la 3, en ambas el eje determinante es el vertical.

Otra característica a destacar, es que la frecuencia de los álabes es más determinante en los ejes axiales, tanto en la posición 3 como en la 4.

6.2. Estudio comparativo de Amplitud Máxima en RMS

6.2.1. Posición 3

Tras el estudio anterior, donde se visualizan los valores picos, se pasa ahora a estudiar

los valores de amplitud máxima generada por la integración digital de cada espectro. Este análisis se realizará en todas las posiciones y ejes con el objetivo de cuantificar y validar los resultados aportados por las cascadas espectrales.

La primera posición de estudio será la 3, donde hay valores medios mayores en el eje vertical con valores de 3,46 RMS, superiores al horizontal con 3,12 RMS. Por último, el eje axial consigue un valor medio en RMS de 2,27.

Estos datos indican que los valores energéticos más incidentes se encuentran en la posición vertical, dando peso al análisis realizado por las cascadas espectrales.

Otro valor importante se encuentra en los valores pico. En este caso, el valor máximo se encuentra en la posición vertical, con 13,34 RMS seguido del horizontal, con 11,44 RMS y por último el eje axial, con 7,08 RMS.

También se puede visualizar como la forma lineal sigue patrones muy similares en todas las posiciones. Esto es fundamental para abordar el problema del elevado número de zonas de muestreo en los equipos de trabajo, con ello se podría hacer más incidencia en los puntos más sensibles a las perturbaciones, ahorrando tiempo y coste. Todo esto se puede visualizar en la siguiente figura.

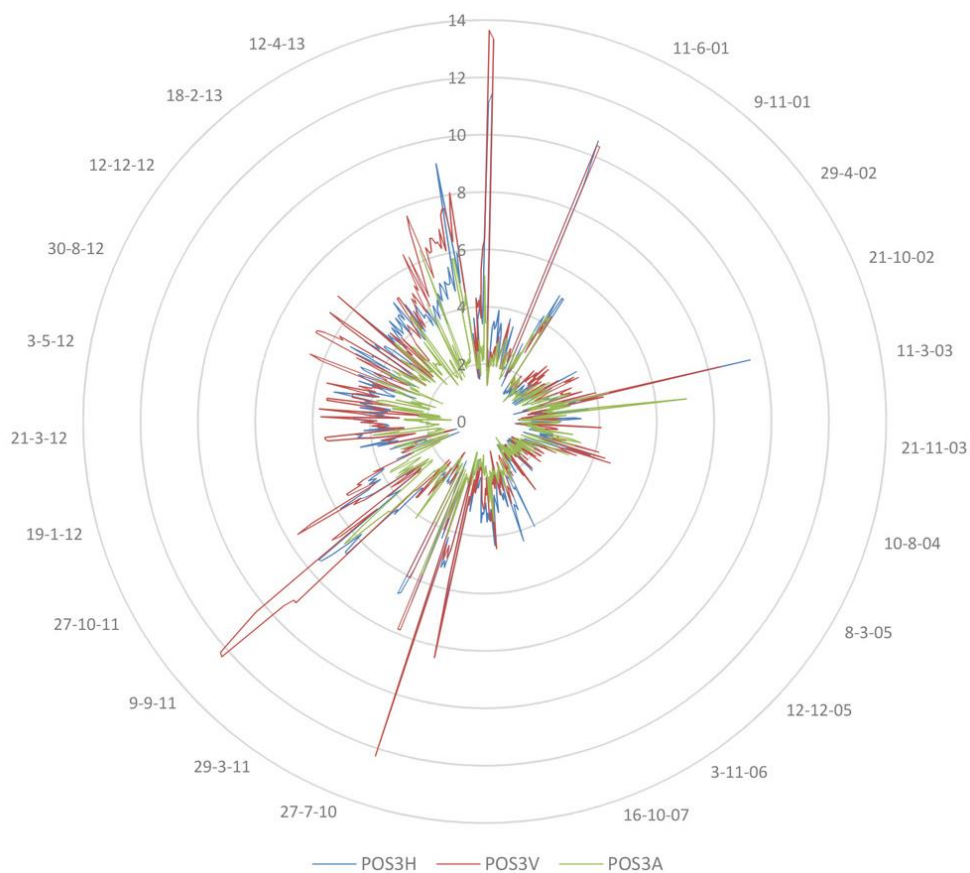


Figura 39. Gráfico comparativo de los resultados de Amplitud Máxima en RMS, posición 3.

6.2.2. Posición 4

En la posición 4, al igual que en el caso anterior, se detecta que el valor máximo se encuentra en la posición vertical, seguido por la posición horizontal, alcanzando un 84,39% del valor del eje vertical y por último la axial, con un 60,28% del máximo (4,23 RMS, 3,57 RMS, 2,55 RMS).

Sobre los valores pico se observa que se repite la secuencia de la posición anterior. El valor máximo está en el eje vertical con 13,12 RMS, seguido del horizontal con 11,15 RMS y el último el axial, con 8,58 RMS, todo ello se puede ver en la siguiente figura.

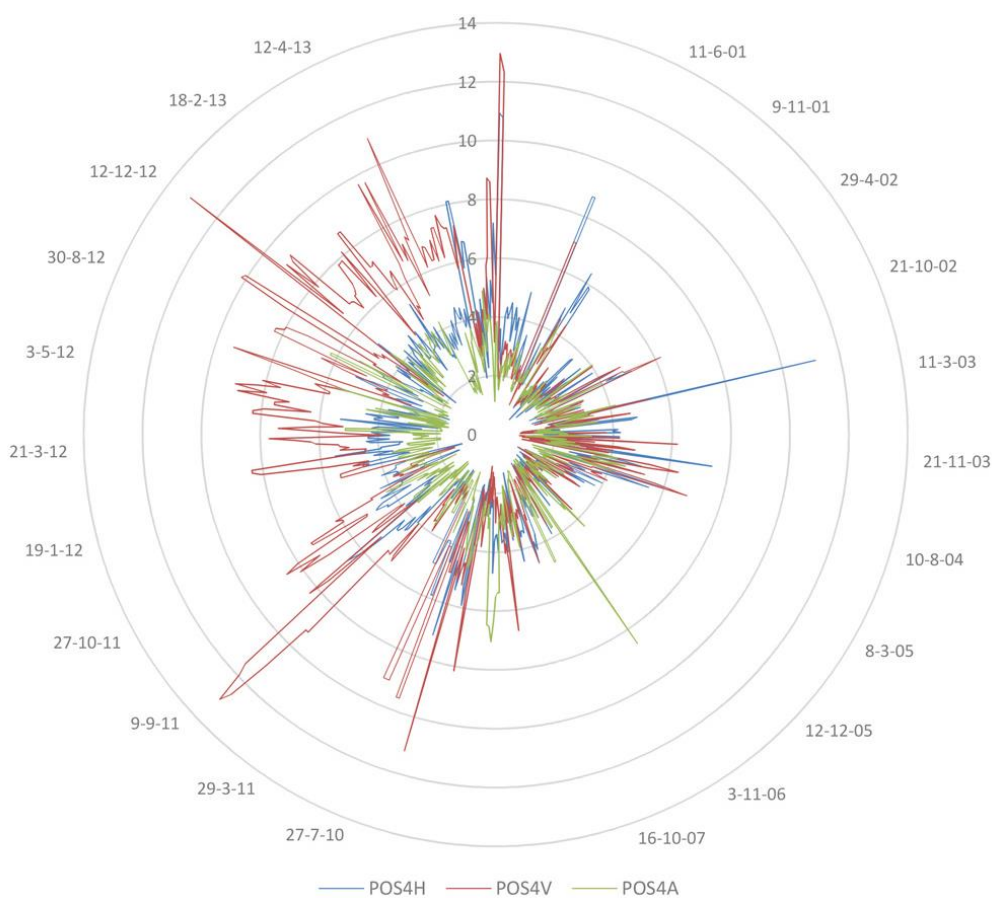


Figura 40. Gráfico comparativo de los resultados de Amplitud Máxima en RMS, posición 4.

También se observa, como en todos los ejes el valor de amplitud máxima sigue un patrón común en todos ellos, variando solo su módulo de incidencia. Este hecho valida el resultado obtenido en la posición 3.

En la posición 4 se percibe que los valores son más intensos en el eje vertical, en comparación con el resto de ejes.

A continuación, se analizarán ambas posiciones para determinar en cuál de ellas son mayores los niveles de vibración y las frecuencias que afectan más a la variable de salida o Amplitud Máxima.

6.2.3. Estudio comparativo y resultados

En el siguiente estudio se comparan los valores obtenidos de los ejes, entre las posiciones 3 y 4, la intención es determinar cuál de ellas es más sensible a este tipo de perturbaciones. Para todo ello se analizan las siguientes figuras con los niveles de amplitud máxima entre las posiciones 3 y 4 en el eje axial.

El valor medio máximo alcanzado por la posición 3 es algo inferior al de la posición 4, el primero, con un 2,27 RMS y el segundo, con 2,55 RMS. En valores pico ocurre lo mismo, obteniendo en la posición 3 (7,08 RMS) y en la 4 (8,58 RMS). También se muestra que siguen en ambas posiciones un mismo patrón de comportamiento.

Con todo ello se puede decir que, en el caso del eje axial, la posición 4 es la más sensible. Esto se puede visualizar en la siguiente figura.

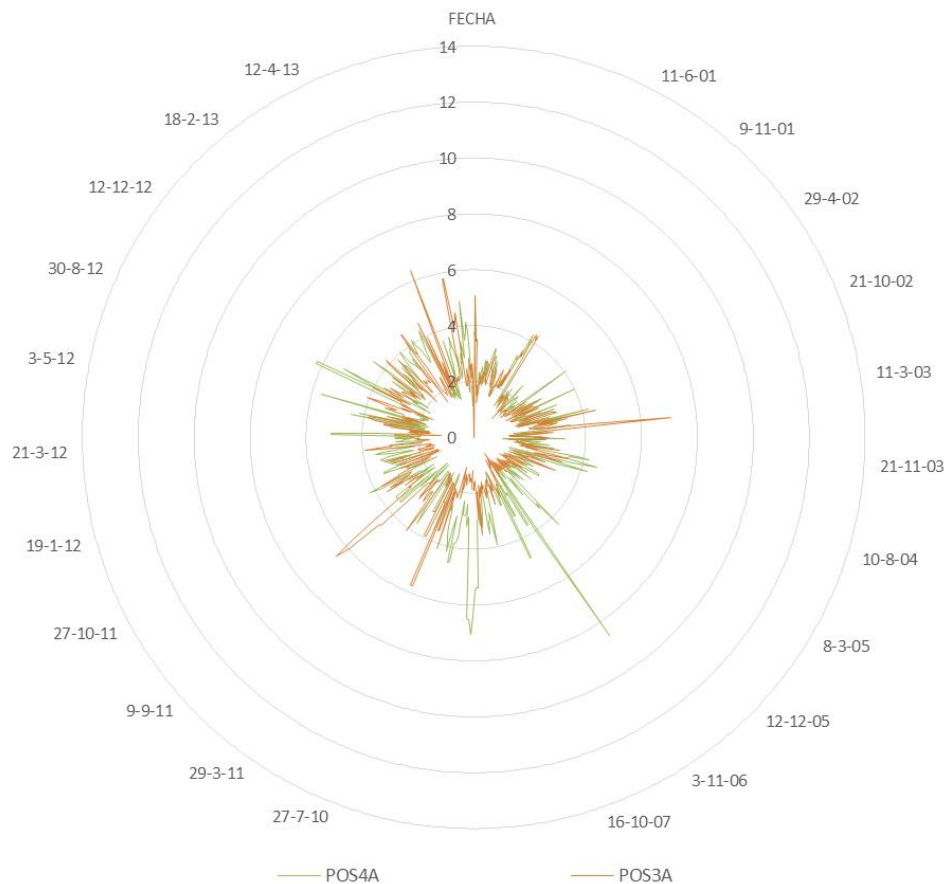


Figura 41. Gráfico comparativo de los resultados de Amplitud Máxima en RMS eje axial.

A continuación, se analiza el eje horizontal, al igual que en el caso anterior, los valores son muy parejos, alzando un valor más elevado en la posición 4 con 4,23 RMS y en la posición 3 con solo 3,46 RMS.

Al analizar los valores picos se obtiene un resultado parejo, con valores muy próximos en ambas posiciones, obteniendo un 11,44 RMS en la posición 3 y 11,15 RMS en la posición 4.

Aun teniendo un valor algo menor en la posición 4, son los valores medios los que indican que a lo largo de toda la serie de muestreo es la posición vertical la más sensible.

También se ve que las variaciones generadas por el equipo forman señales similares, tanto en una posición como en otra.

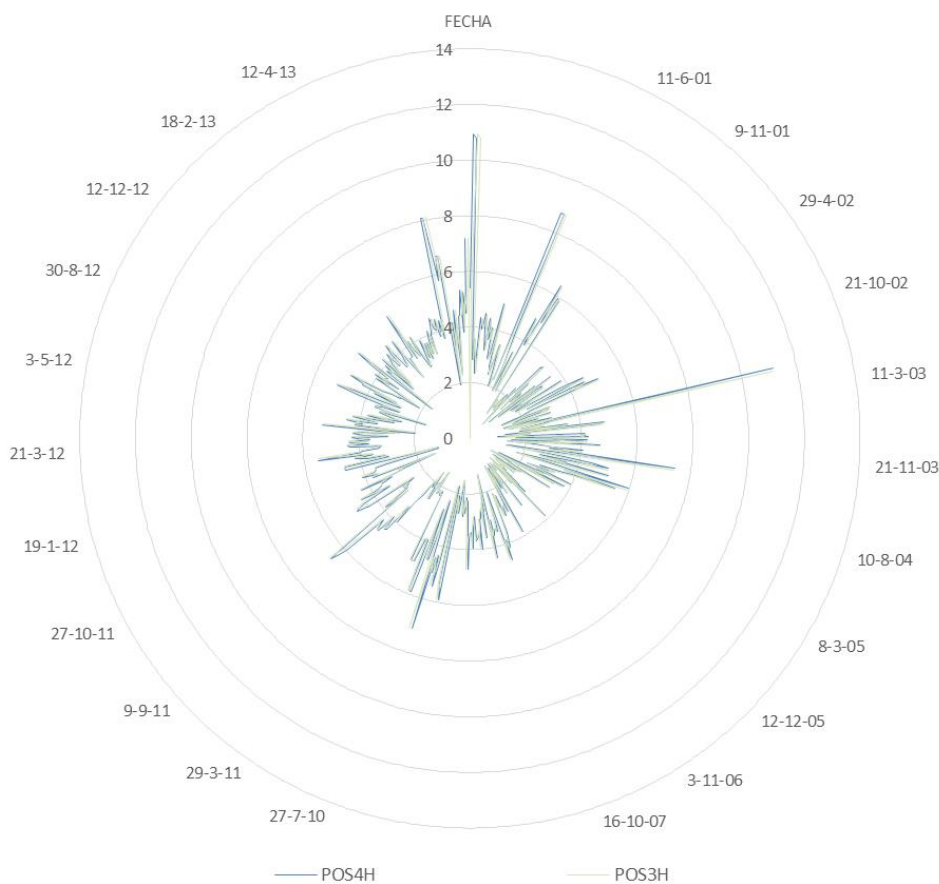


Figura 42. Gráfico comparativo de los resultados de Amplitud Máxima en RMS eje horizontal.

En la siguiente figura, eje vertical, se sigue repitiendo la secuencia apreciada en las figuras anteriores, visualizando un nivel más elevado en el eje vertical que en el horizontal (3,46 y 4,23 RMS).

El análisis de valores pico aporta valores muy parejos e incluso algo superiores en la

posición 3, con 13,63 RMS y en la 4 13,12 RMS, aunque los valores energéticos medios, al igual que en la posición horizontal, son más acusados en el eje vertical.

También es significativo comprobar cómo ambas posiciones tienen el mismo patrón, reflejando la vibración igualmente en ambas, variando solo su valor nominal.

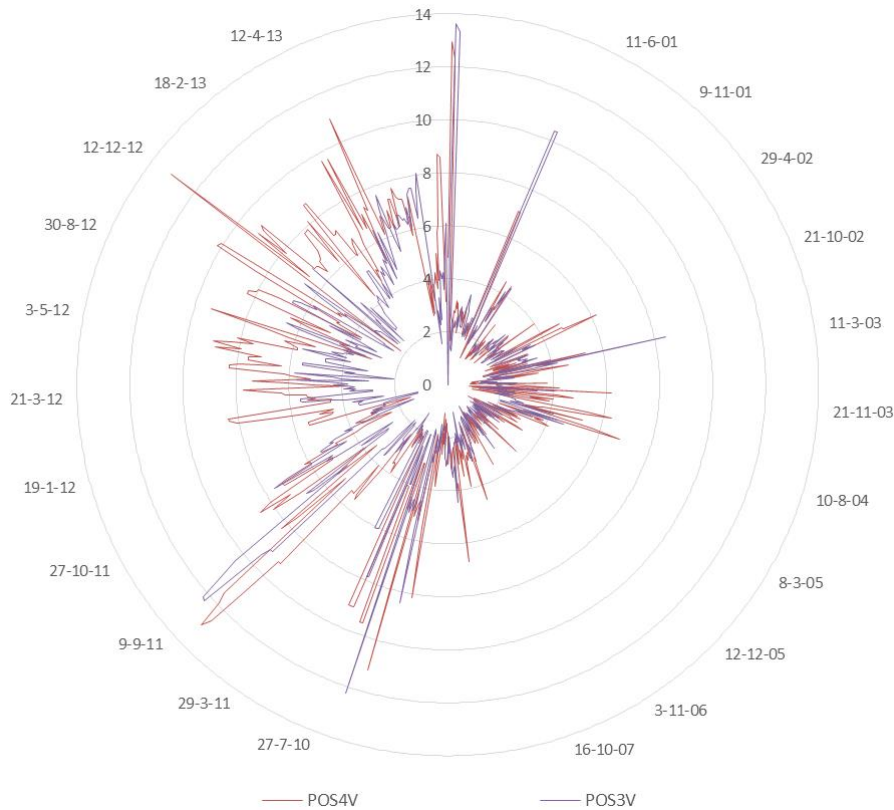


Figura 43. Gráfico comparativo de los resultados de Amplitud Máxima en RMS, eje vertical.

En las figuras expuestas, se puede comprobar que las mayores amplitudes o valores pico en términos de RMS se encuentran en la posición cuatro, dentro de los tres ejes, el que mayor valor tiene es el de la posición vertical.

También se ha comprobado que las perturbaciones siguen un patrón común en cada eje de medida, esto ayudará a reducir costes en el mantenimiento predictivo, pudiendo hacer un muestreo más intenso sólo en el eje más sensible a las vibraciones del equipo.

6.3. Estudio de Frecuencias

6.3.1. Estudio de frecuencia SPEED

Tras el estudio anterior se pasará a estudiar los valores de la frecuencia característica de la máquina, que se encuentra a una frecuencia de 1490 Hz. Este análisis se realizará en

todas las posiciones y ejes con el objetivo de cuantificar y validar lo resultados aportados por las cascadas espectrales y los valores en amplitud máxima.

La primera posición de estudio será la 3 y sus tres ejes, donde se obtienen los siguientes valores: en el eje horizontal un valor medio de RMS 2,17, en el vertical 2,48 y en el axial 1,26 RMS respectivamente. Por lo que se vuelve a reproducir los resultados anteriores, obteniendo el mayor nivel energético en el eje vertical.

Si se analizan los resultados según los valores picos, se obtiene: en el eje horizontal 9,82 RMS, en el vertical 11,38 RMS y en el axial 5,32 RMS. Se comprueba que vuelve a ser el eje vertical el más sensible a la frecuencia de giro del equipo, como se puede ver en la siguiente figura.

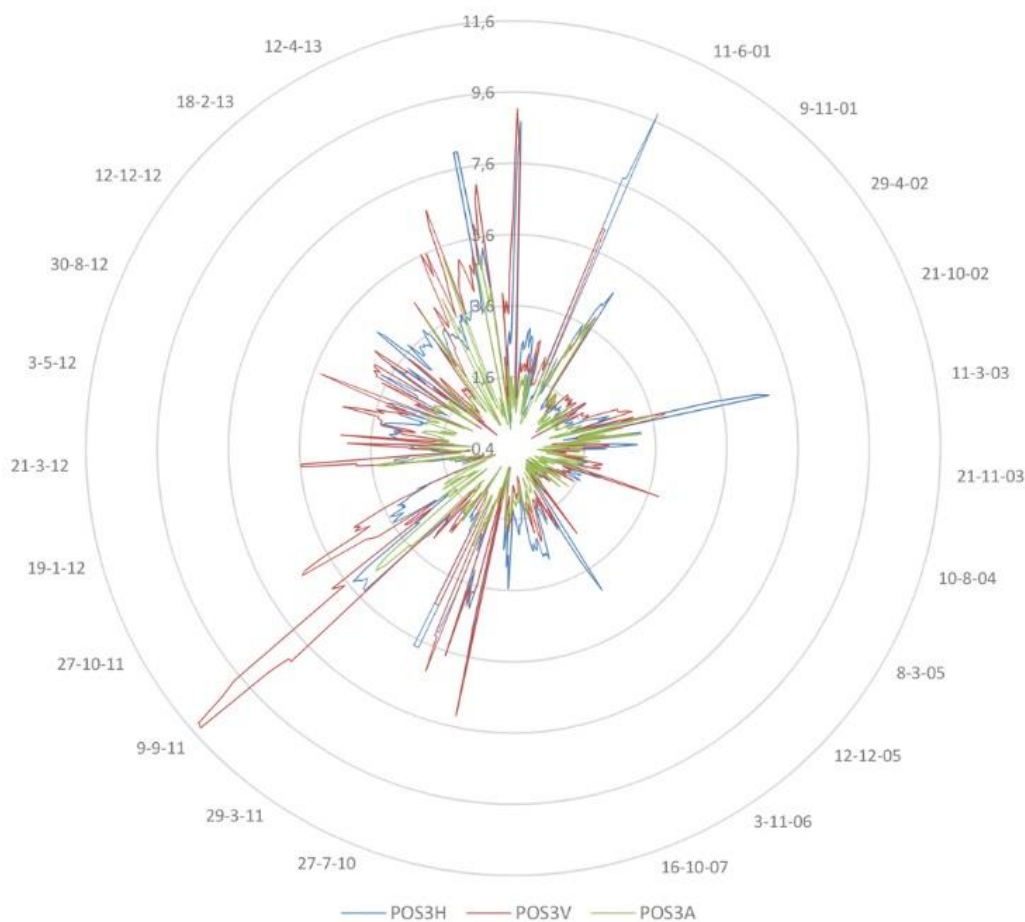


Figura 44. Gráfico comparativo de SPEED en RMS, posición 3, horizontal, vertical y axial.

Después de analizar la frecuencia SPEED en la posición 3, se pasa a estudiar esta misma en la posición 4. Tras el estudio, se obtienen los siguientes valores: en el eje horizontal 1,61 RMS, en el vertical 2,61RMS y en el axial 1,34 RMS respectivamente. Por lo que se vuelve a reproducir los resultados anteriores obteniendo, el mayor nivel energético en el eje vertical.

Los resultados según los valores picos que se obtienen son los siguientes: en el eje horizontal se obtiene un valor máximo de 10,04 RMS, en el vertical 11,64 RMS y en el axial 5,76 RMS, respectivamente. Se comprueba que vuelve a ser el eje vertical el más sensible a la frecuencia de giro del equipo.

Estos resultados se pueden comprobar en la siguiente figura.

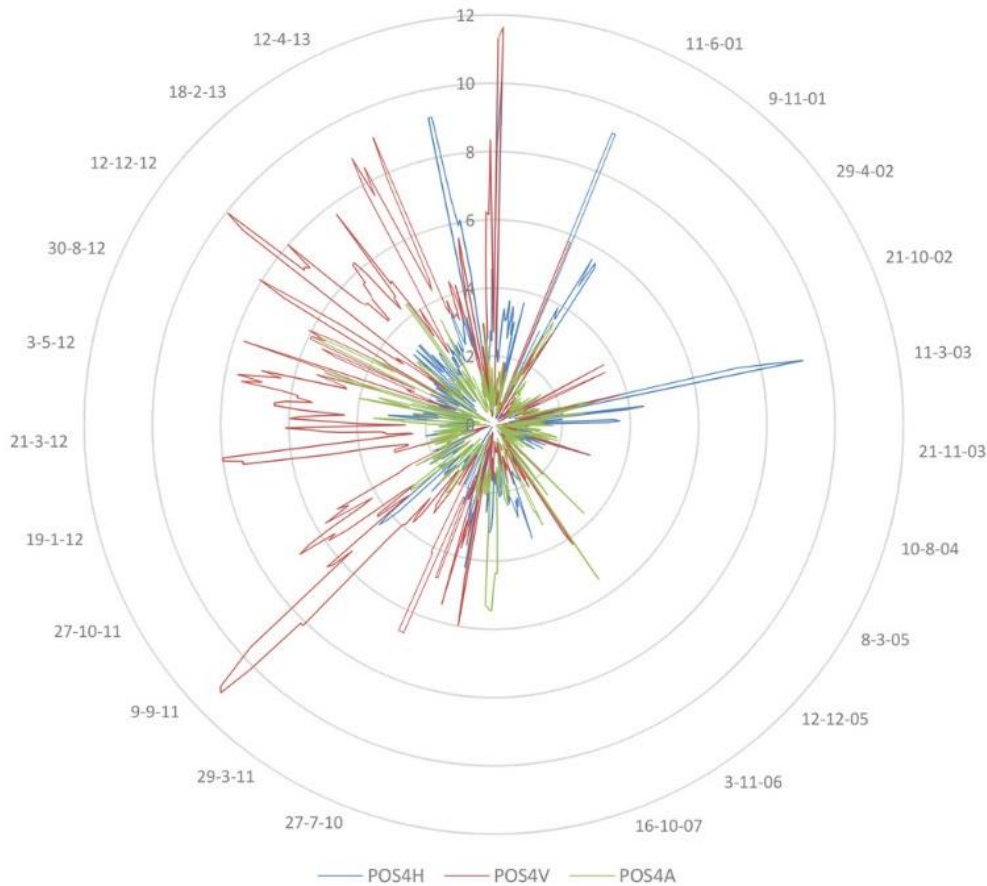


Figura 45. Gráfico comparativo de los resultados de SPEED en RMS, posición 4, horizontal, vertical y axial.

A diferencia con los casos anteriores, se ve que el eje horizontal de la posición 3 obtiene un valor algo más elevado que en la posición 4, en lo que se refiere a nivel medio, pasando de 2,16 RMS a 1,61 RMS. Sin embargo, en valores picos sigue cumpliéndose los resultados anteriores donde el nivel mayor se encuentra en la posición 4.

Una de las características más importantes que se puede ver en el gráfico es que en ambas posiciones la forma generada por la función a lo largo de los años de muestreo es casi idéntica, dando valores singularmente superiores en la posición 4.

En el caso del estudio en el eje vertical, si se cumple los resultados anteriores, siendo la posición 4 la más determinante con 2,61 RMS en lugar de los 2,48 RMS de la posición 3

en valores medios.

Al comparar los valores picos de ambas posiciones, se obtienen valores parejos con 11,61 RMS en la posición 4 y 11,38 RMS en la posición 3, lo que confirma que es la posición 4 la más sensible.

Estos resultados se pueden comprobar en la siguiente figura.

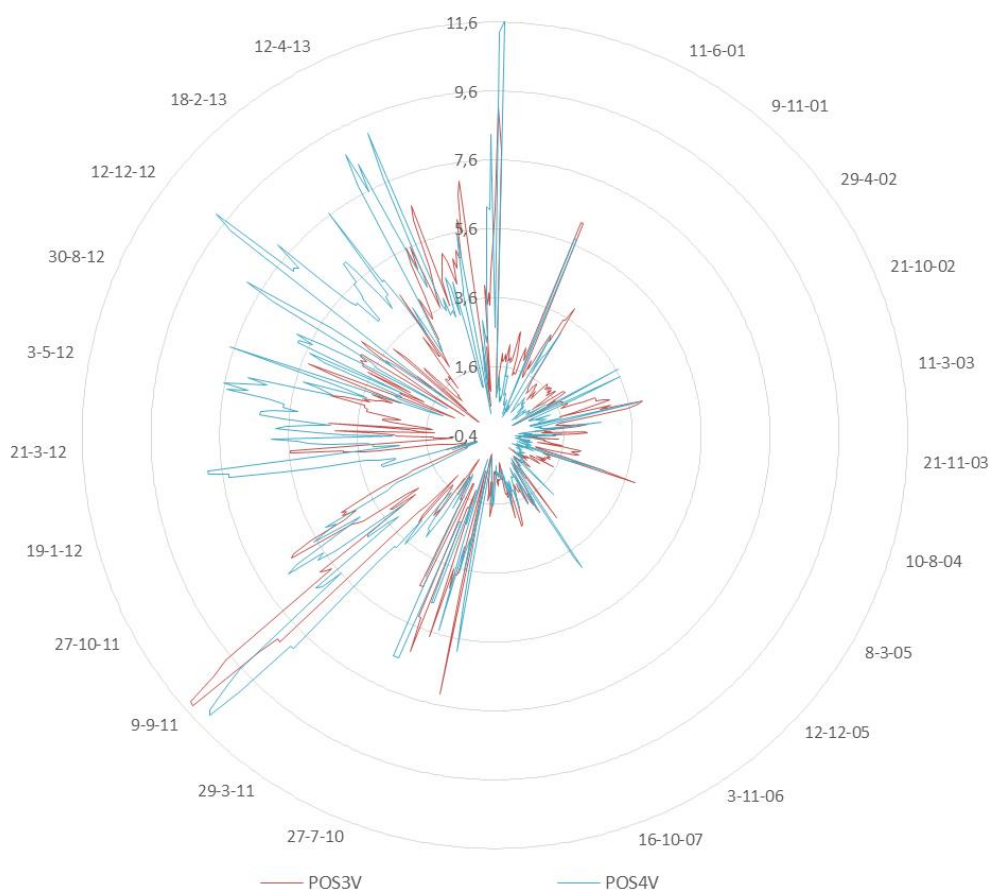


Figura 46. Gráfico comparativo de los resultados de SPEED en RMS, eje vertical.

También se comprueba, al igual que en el eje vertical, que la forma de la función es casi idéntica en todo su muestreo, lo que ayuda a pensar que se podría monitorear sólo la posición más determinante, con las ventajas que ello tendría.

En la siguiente figura se ve la relación entre las posiciones tres y cuatro en el eje horizontal de la frecuencia de giro de la máquina, definida como SPEED.

Hay que destacar la linealidad del patrón de esta frecuencia, entre ambas posiciones, variando solamente el valor de su amplitud, como se ha visto en los estudios anteriores.

Todo ello da más fuerza a una de las ideas principales de este estudio, que es la

reducción de los puntos de control y medida, para mejorar las actuaciones predictivas de mantenimiento de equipos rotativos.

Estos resultados se pueden visualizar en la siguiente figura.

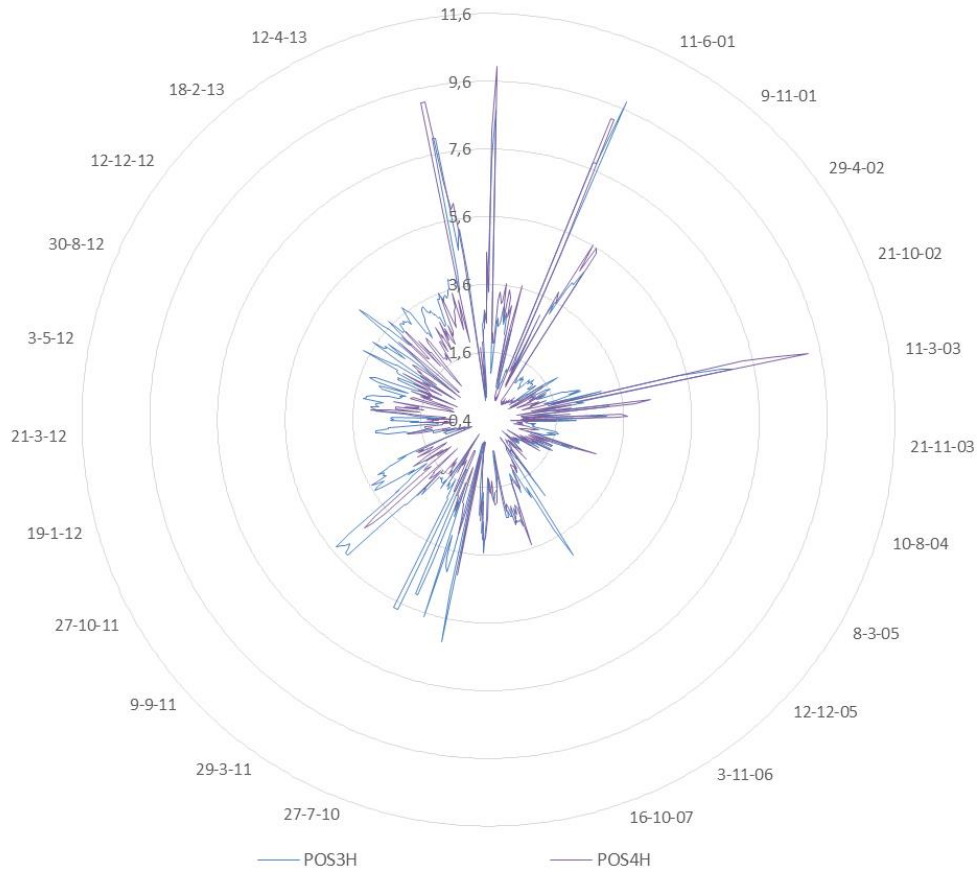


Figura 47. Gráfico comparativo de los resultados de SPEED en RMS, eje horizontal.

En el eje axial se vuelve a validar los resultados anteriores, siendo más destacables los de la posición 4 tanto en valores medios (1,25 RMS y 1,34 RMS) como en valores picos (5,32 RMS y 5,76 RMS).

A diferencia de los casos anteriores, se observa que en este eje la secuencia no es exactamente la misma en una posición que en otra. Se obtienen valores picos en una posición que no son detectados en la otra, como los sucedidos en los periodos comprendidos entre el 2006 al 2009 y del 2012 al 2013, en la posición 4.

Lo más importante es que estas se producen en la posición 4, la posición que se determina como la más sensible. Pero además su valor, aun siendo importante, es casi la mitad al obtenido en el eje vertical.

En la siguiente figura se puede ver la relación entre las posiciones tres y cuatro en el eje axial de la variable SPEED. Lo primero, es destacar la linealidad de esta frecuencia en ambas

posiciones, al igual que se ve en los análisis de las posiciones horizontal y vertical. Todo ello se muestra en la siguiente figura.

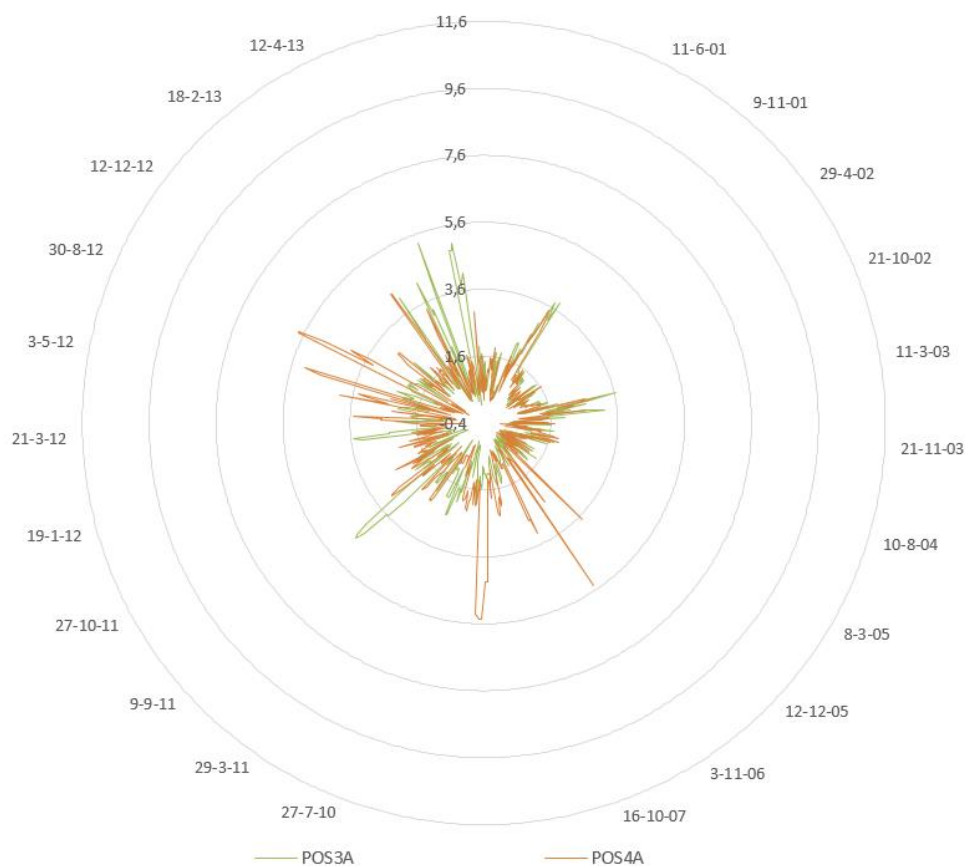


Figura 48. Gráfico comparativo de los resultados de SPEED en RMS, eje axial.

Como conclusión se puede afirmar que la variable de giro del equipo, con una frecuencia de referencia de 1490 Hz, encuentra sus valores máximos tanto a nivel medio como de pico, en la posición 4 y en concreto en su eje vertical. También se ha demostrado que sigue un patrón común, tanto en el eje horizontal como en el vertical.

6.3.2. Estudio de frecuencia de Álabes

A continuación, se realiza el estudio de la frecuencia de los álabes en todas las posiciones y ejes.

En la posición 3 se obtiene un valor más elevado en el eje axial, con 3,39 RMS, obteniendo en los otros dos ejes, horizontal y vertical, 0,18 RMS y 0,13 RMS respectivamente.

En el caso de valores pico, el valor más alto se encuentra también en la posición axial,

con 3,35 RMS, teniendo en el eje horizontal 1,21 RMS y en el vertical 0,97 RMS.

A diferencia con todos los estudios anteriores, donde el valor más importante se encontraba en el eje vertical, en este caso es el axial donde afecta más esta frecuencia.

También se puede comprobar que esta frecuencia no genera un patrón común en todos los ejes.

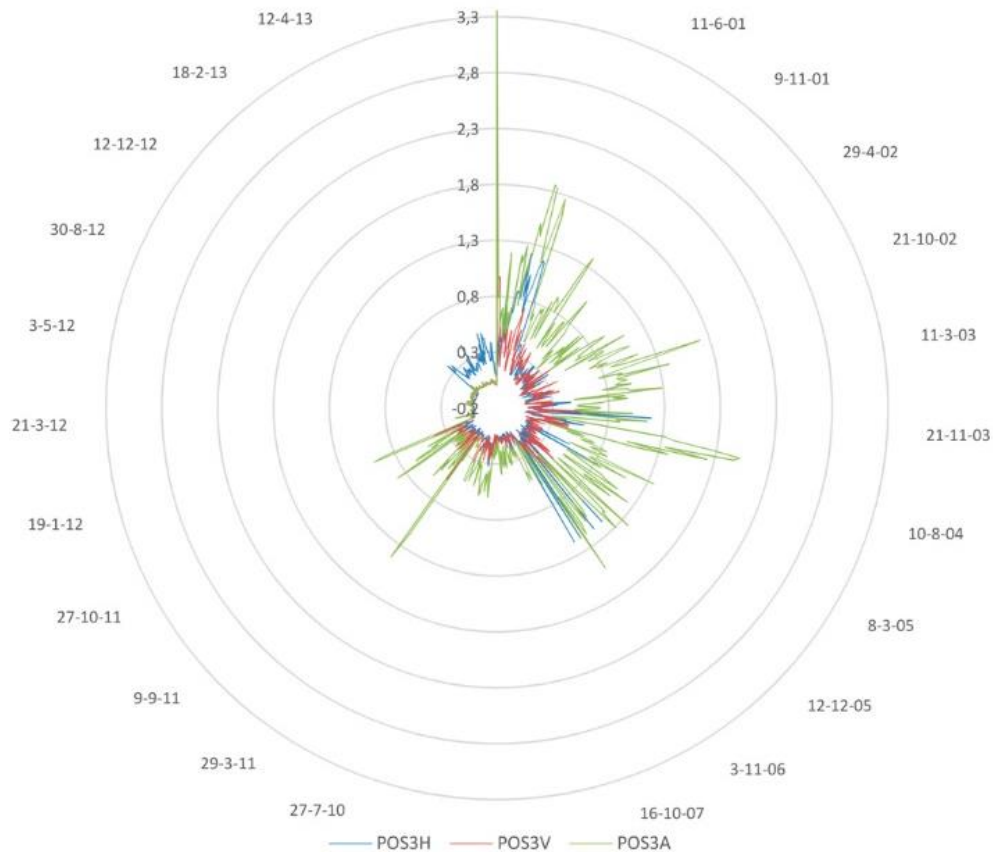


Figura 49. Gráfico comparativo de los resultados de los Álabes en RMS, posición 3, horizontal, vertical y axial.

Si se realiza el estudio, considerando la posición 4, también se puede ver a través de la figura, que se repite la secuencia obtenida en la posición 3, teniendo el valor más elevado en el eje axial con 0,42 RMS.

En la posición 4 horizontal se obtiene 0,21 RMS, en el vertical 0,27 RMS, siendo casi la mitad que el valor medio obtenido en el eje axial. Esto indica que esta frecuencia causa más efecto en el eje axial, lo cual, sería una buena razón para tomarlo como referencia para predecir fallos provocados por un mal funcionamiento de los álabes.

También se puede comprobar por la gráfica que esta frecuencia no genera un patrón común en todos los ejes, al igual que pasaba en la posición 3.

Tras el análisis comparativo de los resultados de los álabes de la posición 3 y sus ejes, se aborda el análisis de la frecuencia característica de los álabes en la posición 4 y sus tres ejes de control, al igual que en el caso anterior.

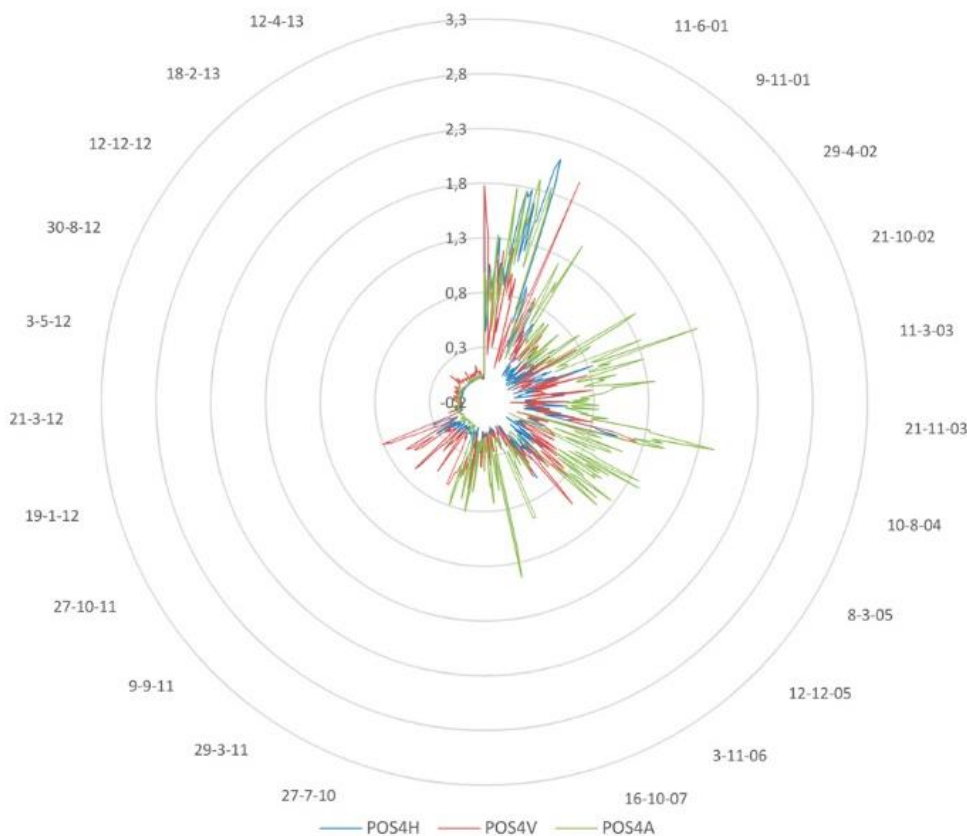


Figura 50. Gráfico comparativo de los resultados de los Álabes en RMS, posición 4, horizontal, vertical y axial.

Se comprueba que los valores más importantes están en el eje axial y que entre los mismos esta vibración no sigue un mismo patrón, por ello se pasa a analizar los ejes en función de las posiciones.

El primer análisis se hará tomando como referencia el eje horizontal. Al realizar este, se puede comprobar que entre posiciones sí existe más similitud, esto indica que la frecuencia de los álabes genera perturbaciones comunes en esa dirección y es en la posición 4 donde son más influyentes, por lo que denotan los valores 1,21 RMS para la posición 3 y 2,12 RMS para la 4.

En la siguiente figura se puede ver el resultado en el eje horizontal de la posición 3 y 4. Se observa linealidad en todo el periodo de muestreo entre estas posiciones tomando el mismo eje de referencia.

Esto indica que la frecuencia genera el mismo patrón dentro del mismo eje de referencia, lo que demuestra es que el valor absoluto es más intenso en la posición 4. Este patrón se ha repetido en todos los estudios, realizados hasta el momento.

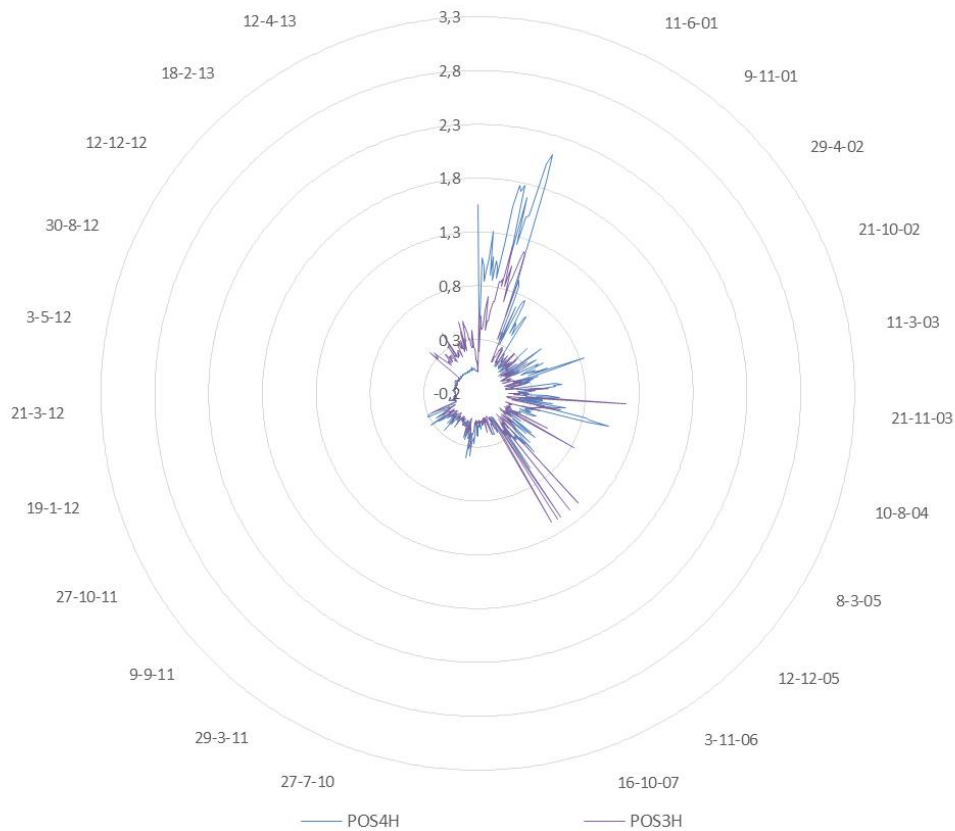


Figura 51. Gráfico comparativo de los resultados de los Álabes en RMS, eje horizontal.

Al repetir el estudio en el eje vertical, se puede ver que es también la posición 4 donde afecta más, con 0,13 RMS en la posición tercera y 0,27 RMS en la cuarta, pasando lo mismo con los valores pico, 0,97 RMS y 1,98 RMS respectivamente.

También se puede ver como realizando la comparativa de ejes entre posiciones, la frecuencia de los álabes sigue un patrón común.

Otra característica para destacar es que, entre los dos ejes evaluados hasta el momento, ha sido el eje horizontal el que mayores valores alcanza, a diferencia de todos los estudios realizados anteriormente, donde era el eje vertical el más representativo.

En la siguiente figura se puede ver la comparativa de la frecuencia característica de los álabes de la maquina rotativa en las posiciones 3 y 4 en el eje vertical, con el fin de comparar si existe linealidad y sus valores máximos.

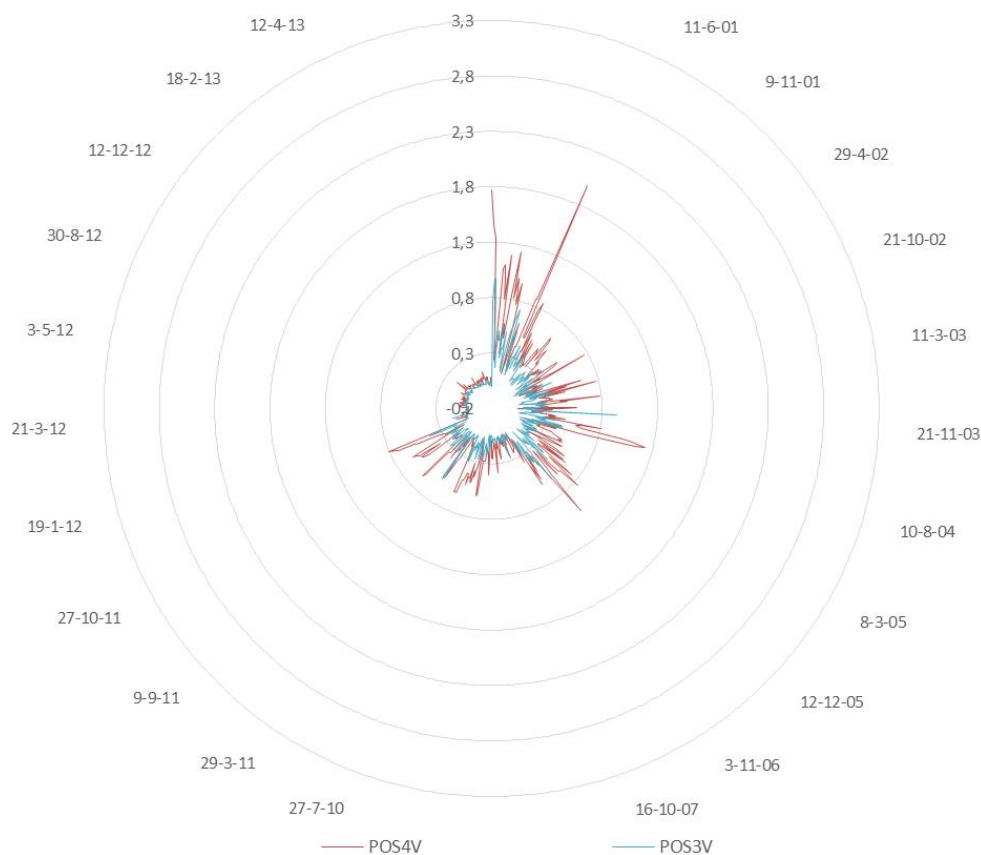


Figura 52. Gráfico comparativo de los resultados de los Álabes en RMS, eje vertical.

Cuando se analiza el eje axial cambia totalmente los resultados obtenidos hasta el momento y se obtienen valores más elevados en la posición 3 que en la 4. En la primera se obtiene un valor medio de 0,39 RMS y en la segunda 0,42 RMS.

Si se analizan los resultados de valor pico, se repite el resultado obteniendo, con 3,35 RMS en la posición 3 y 1,94 RMS en la posición 4, es la primera vez en todos los estudios realizados donde la posición más determinante es la tercera.

También es destacable que los valores más elevados, de entre las dos posiciones y sus respectivos ejes, han sido los obtenidos en la posición 3 y su eje axial, aunque con valores muy cercanos a los de la posición 4 axial.

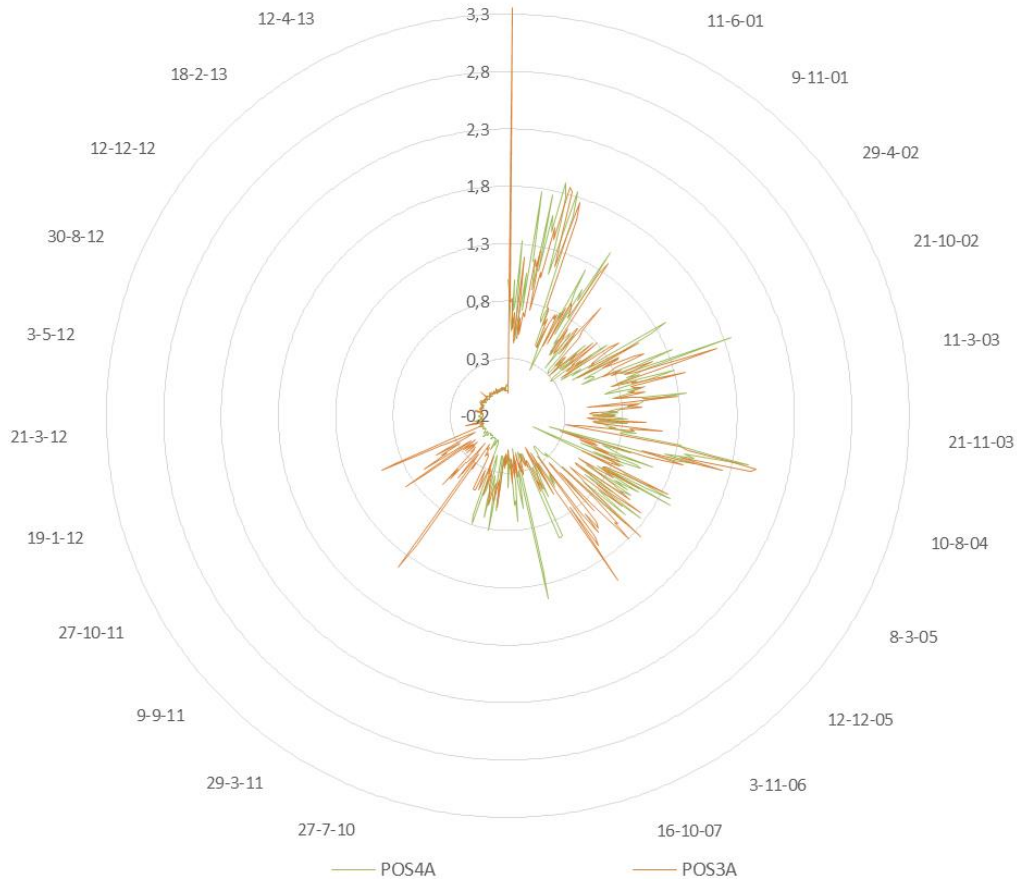


Figura 53. Gráfico comparativo de los resultados de los Álabes en RMS, eje axial.

6.3.3. Comparativa entre SPEED y Álabes

Realizados los estudios de frecuencia, ahora se pasa a relacionar la frecuencia de los Álabes y SPEED, para poder valorar su influencia en relación con la amplitud máxima, que es el valor determinante según norma para considerar bueno o no el funcionamiento de un equipo.

En la siguiente figura se puede ver la comparativa de la frecuencia característica de la máquina y los álabes en las posiciones 4 eje vertical y posición 3 eje axial.

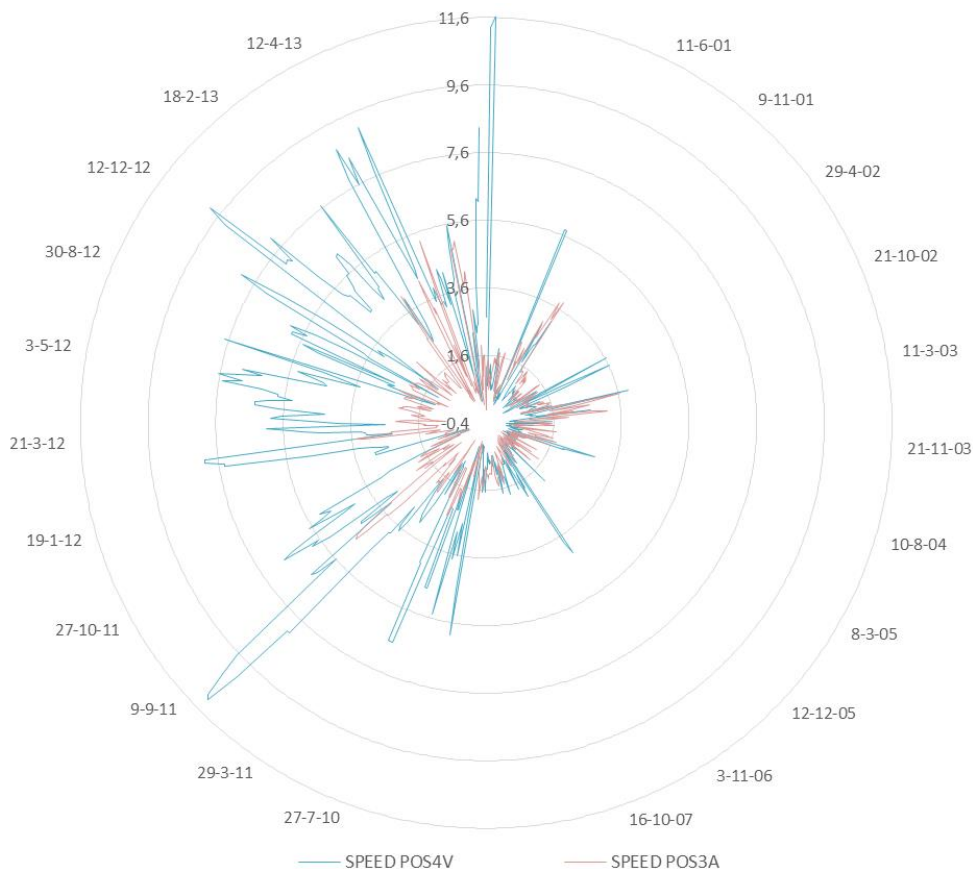


Figura 54. Gráfico comparativo RMS de SPEED POS4V y Álabes POS3A.

Al realizar la comparativa se ve claramente que es la generada por la frecuencia de funcionamiento de la máquina la que mayor incidencia tiene en el sistema, con un valor medio de 2,61 RMS y casi 10 veces menor el valor máximo generado por los Álabes, con un valor de 0,39 RMS.

Si se comparan los valores pico se obtiene el mismo resultado, con un 11,64 RMS para SPEED y un 3,35 RMS para los álabes.

6.4. Análisis del rodamiento FAGNU322

6.4.1. Análisis de la frecuencia FTF

La siguiente parte del estudio aborda cómo se comportan las frecuencias características del rodamiento FAGNU322.

El análisis se realiza tomando los valores de todo el muestreo en las posiciones de medida, posición 3 y 4, y en los tres ejes coordenados, horizontal vertical y axial.

Tras el análisis de las cinco frecuencias más importantes del rodamiento FAGNU322, se compara la de mayor valor energético en términos de RMS con la generada por el giro de la máquina SPEED y los álabes. El propósito es hallar las frecuencias más determinantes y los puntos donde mayor es su efecto.

Se empieza analizando la frecuencia generada por la jaula del rodamiento referenciada en este estudio como FTF, en la posición 3 vertical. Para ello se calcula la suma de valores obtenidos a lo largo de todo el estudio en cada una de las posiciones y sus ejes, esto mismo se realiza con la media y el valor máximo o valor pico, todo en términos de RMS.

El resultado se muestra en la siguiente tabla:

POSICIÓN	FTF POS3H FAGNU322	FTF POS3V FAGNU322	FTF POS3A FAGNU322
SUMA TOTAL	69,59	107,82	52,89
MEDIA	0,11	0,18	0,09
VALOR PICO	2,60	5,05	0,45

Tabla 34. Resumen de frecuencia FTF - FAGNU322 en términos de RMS posición 3.

Se observa que los valores máximos acumulados en toda la muestra de ensayos se encuentran en la posición 3 vertical, con un valor de 107,82 RMS, tras éste se encuentra el valor 107,82 RMS perteneciente al eje horizontal.

En la siguiente figura se pueden ver los resultados de la posición 3 en todos los ejes.

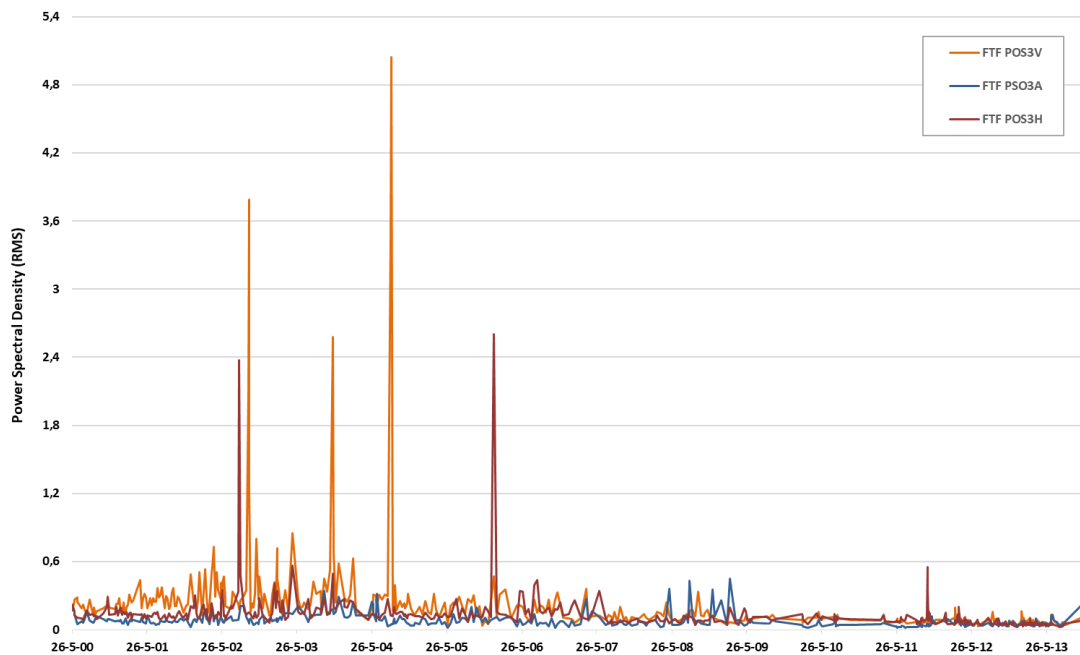


Figura 55. Gráfico comparativo de la frecuencia FTF – FAGNU322 en RMS posición 3 (H, V, A).

Tras el análisis de la frecuencia FTF en la posición 3, se procede a evaluar los valores energéticos en la posición 4.

Para este estudio, se calcula la suma de valores obtenidos a lo largo de todo el estudio en cada una de las posiciones y sus ejes, esto mismo se realiza con la media y el valor máximo o valor pico, todo en términos de RMS.

El resultado se muestra en la siguiente tabla:

POSICIÓN	FTF POS4H FAGNU322	FTF POS4V FAGNU322	FTF POS4A FAGNU322
SUMA TOTAL	158,04	217,47	57,72
MEDIA	0,26	0,35	0,11
VALOR PICO	13,07	10,06	1,38

Tabla 35. Resumen de frecuencia FTF del rodamiento FAGNU322 en términos de RMS posición 4.

Los valores máximos acumulados en toda la muestra de ensayos, se encuentran en la posición 4 vertical con un valor de 217,47 RMS, tras este se encuentra la posición 4 horizontal con un valor de 158,04 RMS.

En la siguiente figura se pueden ver los resultados de la posición 4 en todos los ejes.

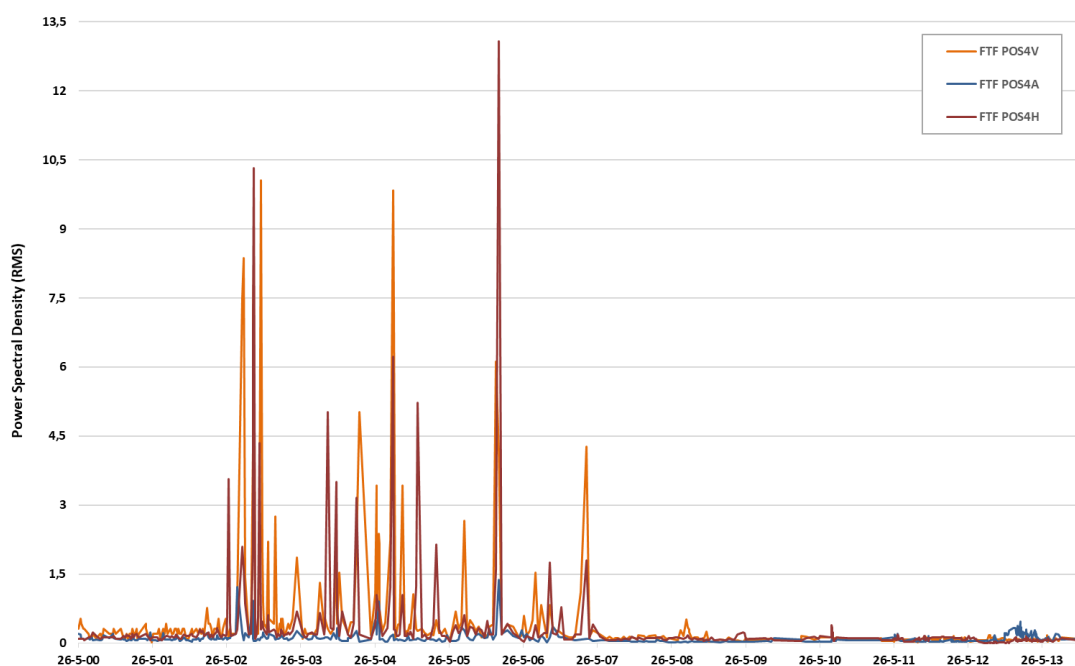


Figura 56. Gráfico comparativo de la frecuencia FTF – FAGNU322 en RMS posición 4 (H, V, A).

Al realizar la comparativa entre los valores máximos acumulados de las posiciones 3 y 4, se observa que en la posición 4 vertical hay un valor de 217,47 RMS y de la posición 3 el valor máximo se encuentra en el eje vertical, con 107, 82 RMS.

Si se analizan las segundas posiciones, se puede ver que son los ejes horizontales los siguientes más afectados por esta frecuencia, con 158,04 RMS y 69,59 RMS, para las posiciones 4 y 3 horizontal, respectivamente.

Todo ello indica que esta frecuencia causa mayor efecto en los ejes verticales y sobre todo en la posición 4.

Esto lleva a hacer hincapié, de cara al mantenimiento predictivo, en estos dos ejes, para predecir una falla provocada por FTF. Dentro de las dos posiciones, la posición 4 sufre más del doble con respecto a la posición 3.

En el siguiente gráfico se compara la frecuencia de la jaula en los ejes más determinantes de cada posición.

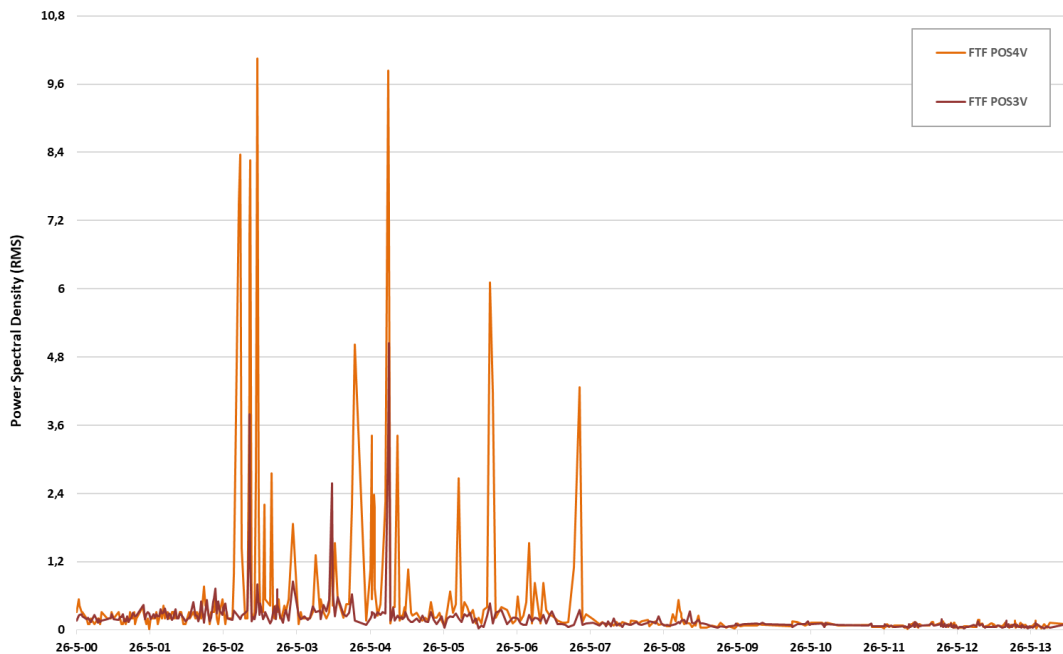


Figura 57. Gráfico comparativo de la frecuencia FTF – FAGNU322 en RMS posición 4V y 3V.

El gráfico muestra otro elemento importantísimo para este estudio y es la linealidad de los resultados, generando un patrón muy parejo entre las posiciones 3 y 4 vertical. Esta conclusión ayuda a pensar que se podría predecir el fallo de la jaula del rodamiento monitorizando sólo la posición 4 vertical.

6.4.2. Análisis de la frecuencia BSF

A continuación, se analiza la frecuencia generada por las bolas del rodamiento referenciada en este estudio como BSF, en la posición 3 vertical. Para ello se calcula la suma de valores obtenidos a lo largo de todo el estudio en cada una de las posiciones y sus ejes.

Esto mismo se realiza con la media y el valor máximo o valor pico, todo en términos de RMS.

El resultado se muestra en la siguiente tabla:

POSICIÓN	BSF POS3H FAGNU322	BSF POS3V FAGNU322	BSF POS3A FAGNU322
SUMA TOTAL	26,68	43,16	25,50
MEDIA	0,04	0,07	0,04
VALOR PICO	0,14	0,67	0,18

Tabla 36. Resumen de frecuencia BSF del rodamiento FAGNU322 en términos de RMS posición. 3.

Los valores máximos acumulados en toda la muestra de ensayos se encuentran en la posición 3 vertical, con un valor de 43,16 RMS, tras este valor, se encuentra la posición 3 horizontal, con 26,68 RMS.

En la siguiente figura se pueden ver los resultados de la posición 3 en todos los ejes.

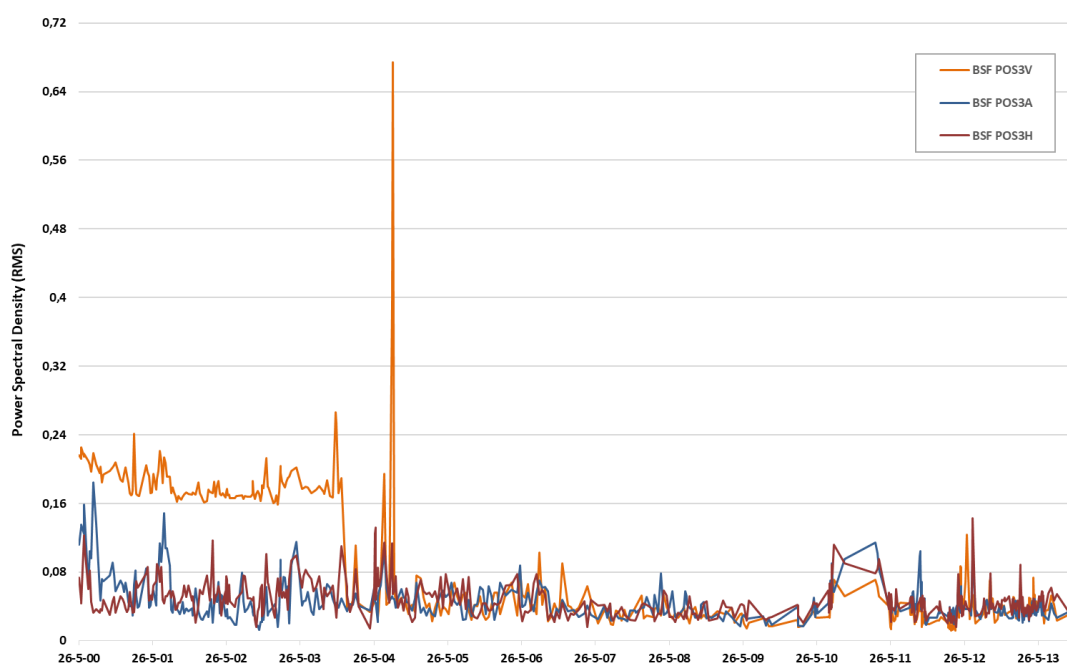


Figura 58. Gráfico comparativo de la frecuencia BSF – FAGNU322 en RMS posición 3 (H, V, A).

Tras el análisis de la frecuencia BSF en la posición 3, se procede a evaluar los valores energéticos en la posición 4.

Para este estudio, se calcula la suma de valores obtenidos a lo largo de todo el estudio en cada una de las posiciones y sus ejes, esto mismo se realiza con la media y el valor máximo o valor pico todo en términos de RMS.

El resultado se muestra en la siguiente tabla:

POSICIÓN	BSF POS4H FAGNU322	BSF POS4V FAGNU322	BSF POS4A FAGNU322
SUMA TOTAL	31,12	44,13	28,16
MEDIA	0,05	0,07	0,05
VALOR PICO	0,60	1,39	0,17

Tabla 37. Resumen de frecuencia BSF del rodamiento FAGNU322 en términos de RMS posición 4.

Los valores máximos acumulados en toda la muestra de ensayos, se encuentran en la posición 4 vertical, con un valor de 44,13 RMS, tras este se encuentra la posición 4 horizontal con 31,12 RMS.

En la siguiente figura se pueden observar los resultados de la posición 4 en todos los ejes.

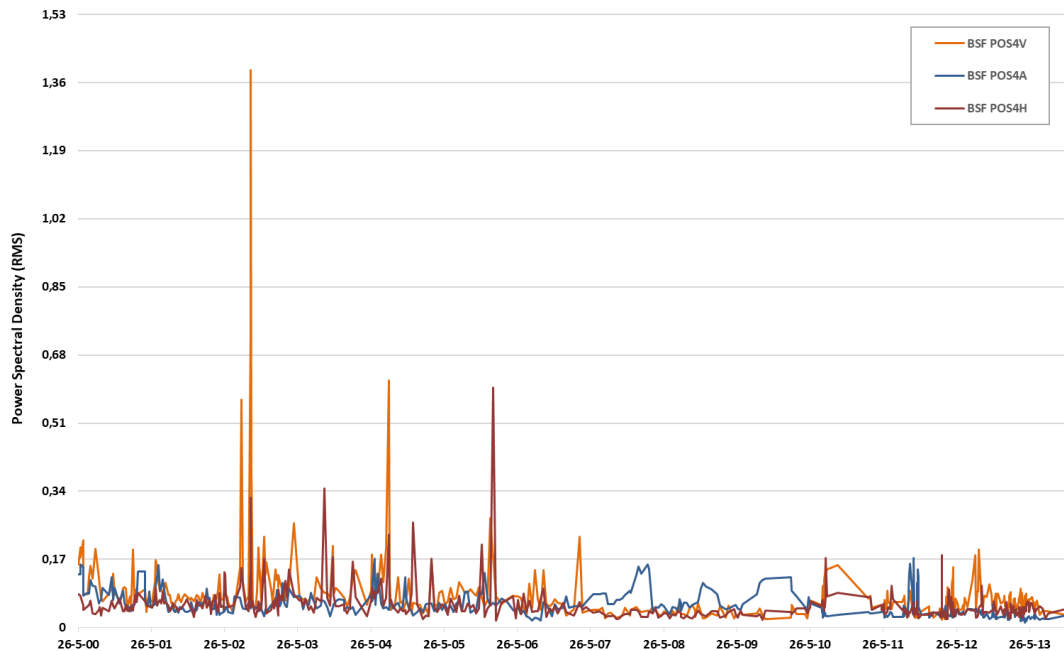


Figura 59. Gráfico comparativo de la frecuencia BSF – FAGNU322 en RMS posición 4 (H, V, A).

Al realizar la comparativa entre los valores máximos acumulados en las posiciones 3 y 4 vertical, se observa que en la posición 4 hay un valor de 43,16 RMS y el de la posición 3 es de 43,13 RMS.

Si se analizan las segundas posiciones se observa que son los ejes horizontales los siguientes más afectados por esta frecuencia, con 31,12 RMS para la posición 4 y 26,68 RMS para la 3 horizontal.

Todo ello indica que esta frecuencia causa mayor efecto en los ejes verticales y en este caso y por muy poco, en la posición 4.

Esto llevaría a hacer hincapié de cara al mantenimiento predictivo en estos dos ejes, horizontal y vertical, para predecir una falla provocada por BSF. Dentro de las dos posiciones, la posición 4 sufre un poco más con respecto a la 3.

En el siguiente gráfico se compara la frecuencia de BSF en los ejes más determinantes de cada posición. El gráfico muestra otro elemento importantísimo, como en el caso de la frecuencia FTF, y es la linealidad de los resultados, generando un patrón muy parejo entre las posiciones 3 y 4 vertical.

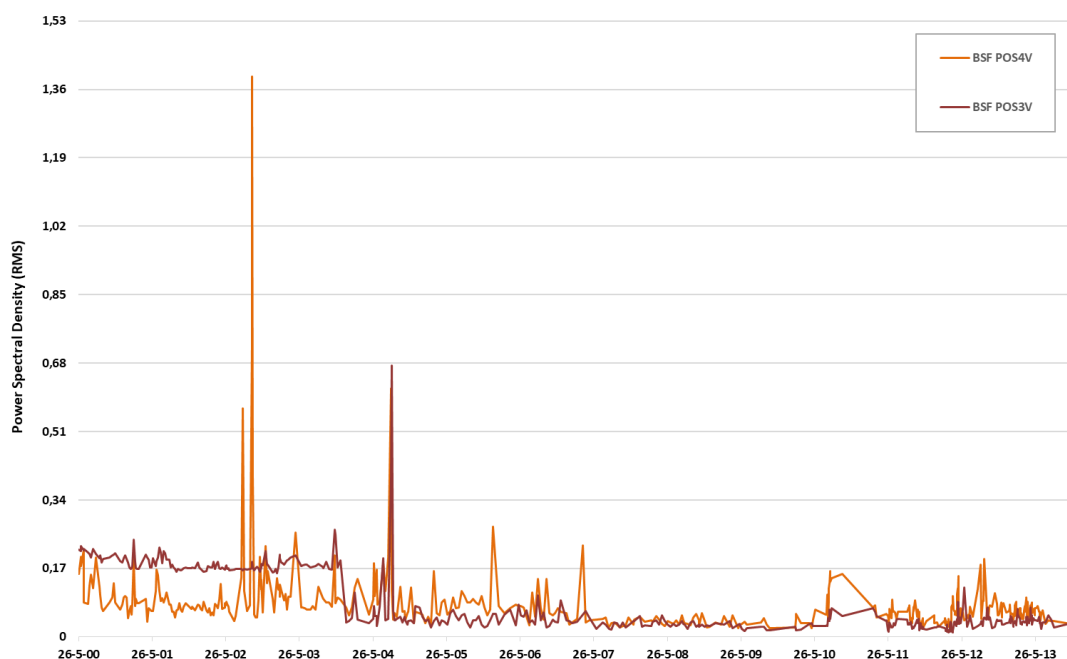


Figura 60. Gráfico comparativo de la frecuencia BSF – FAGNU322 en RMS posición 4V y 3V.

Esta conclusión ayuda a pensar que se podría predecir el fallo de la frecuencia de bolas del rodamiento monitorizando sólo la posición 4 vertical.

6.4.3. Análisis de la frecuencia BPOR

La siguiente parte del estudio aborda cómo se comportan las frecuencias características del rodamiento FAGNU322, en este caso se analiza la de la pista exterior o BPOR.

Se empieza analizando la posición 3 vertical, para ello se calcula la suma de valores obtenidos a lo largo de todo el estudio en cada una de las posiciones y sus ejes, esto mismo se realiza con la media y el valor máximo o valor pico, todo en términos de RMS.

El resultado se muestra en la siguiente tabla:

POSICIÓN	BPOR POS3H FAGNU322	BPOR POS3V FAGNU322	BPOR POS3A FAGNU322
SUMA TOTAL	32,25	29,80	23,27
MEDIA	0,05	0,05	0,04
VALOR PICO	0,50	0,35	0,14

Tabla 38. Resumen de frecuencia BPOR del rodamiento FAGNU322 en términos de RMS posición 3.

Los valores máximos acumulados en toda la muestra de ensayos se encuentran en la posición 3 horizontal, con un valor de 32,25 RMS, tras este valor le sigue la posición 3 vertical, con un valor de 29,80 RMS.

En la siguiente figura se observan los resultados de la posición 3 en todos los ejes.

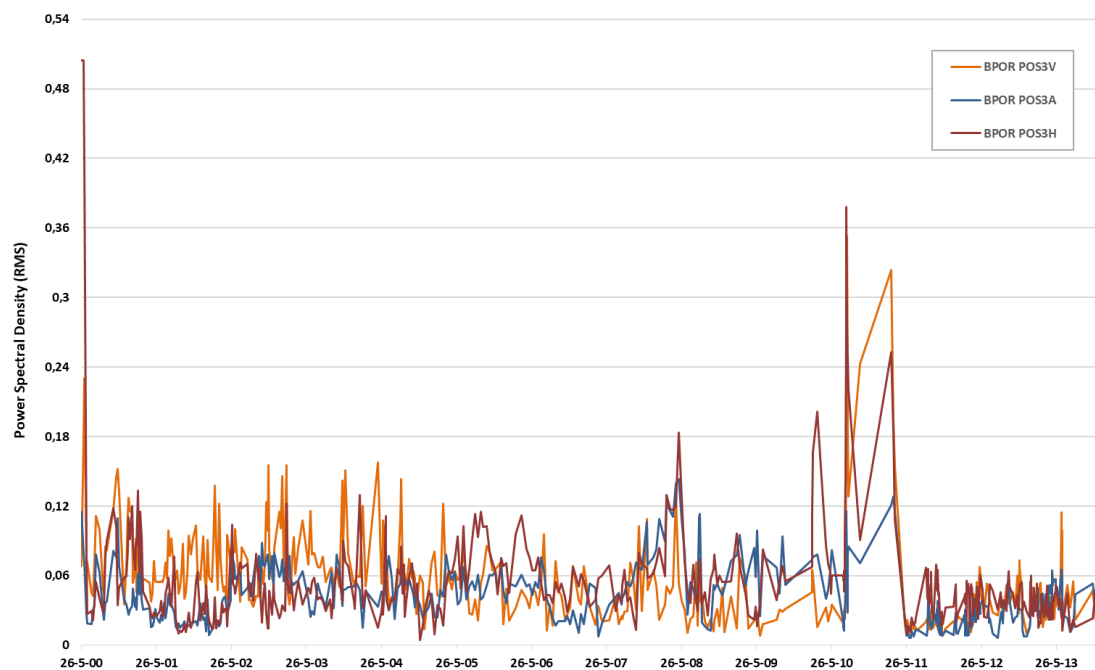


Figura 61. Gráfico comparativo de la frecuencia BPOR – FAGNU322 en RMS posición 3 (H, V, A).

Tras el análisis de la frecuencia BPOR, en la posición 3, se procede a evaluar los valores energéticos en la posición 4.

Para este estudio, se calcula la suma de valores obtenidos a lo largo de todo el estudio en cada una de las posiciones y sus ejes, esto mismo se realiza con la media y el valor máximo o valor pico, todo en términos de RMS.

El resultado se muestra en la siguiente tabla:

POSICIÓN	BPOR POS4H FAGNU322	BPOR POS4V FAGNU322	BPOR POS4A FAGNU322
SUMA TOTAL	42,74	38,22	28,03
MEDIA	0,07	0,06	0,05
VALOR PICO	0,42	0,54	0,41

Tabla 39. Resumen de frecuencia BPOR - FAGNU322 en términos de RMS posición 4.

Los valores máximos acumulados en toda la muestra de ensayos, se encuentran en la posición 4 horizontal, con un valor de 42,74 RMS, tras este se encuentra la posición 4 vertical, con un valor de 38,22 RMS.

En la siguiente figura se pueden observar los resultados de la posición 4 en todos los ejes.

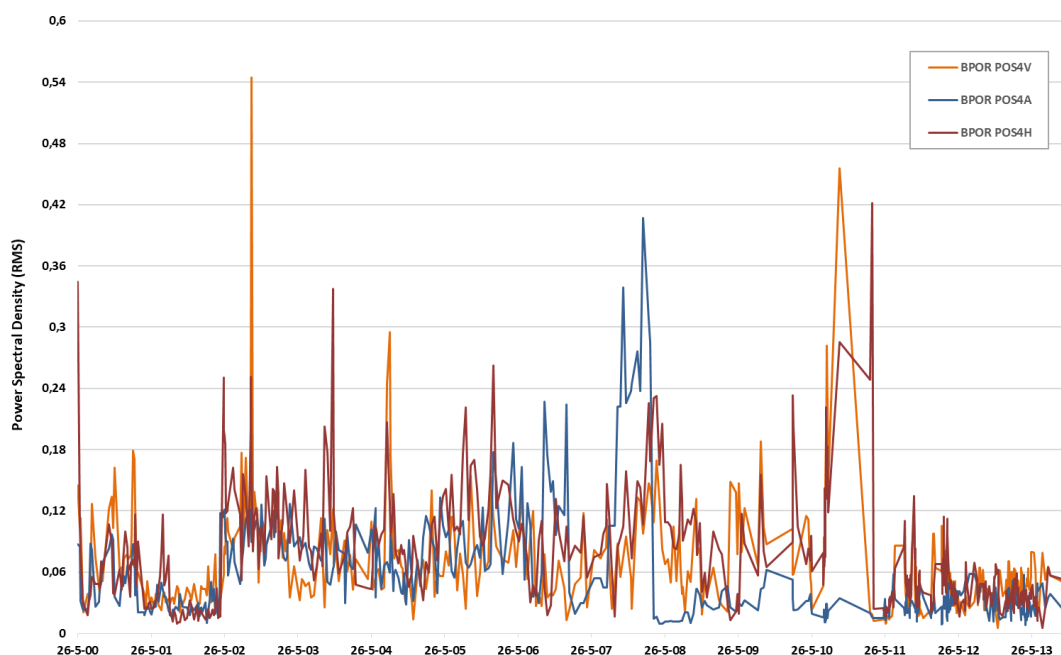


Figura 62. Gráfico comparativo de la frecuencia BPOR – FAGNU322 en RMS posición 4 (H, V, A).

Al realizar la comparativa entre los valores máximos acumulados, en toda la muestra de ensayos de las posiciones 3 y 4, se comprueba que en la posición 4 horizontal se obtiene un valor de 42,74 RMS y de la posición 3 el valor máximo se encuentra en el eje horizontal, con 32,25 RMS.

Si se analizan las segundas posiciones, se puede ver como son los ejes verticales los más importantes, a diferencia de los casos anteriores, que se encontraban en el eje horizontal. Los valores obtenidos son 38,22 RMS para la posición 4 vertical y 29,80 RMS para la 3

vertical.

Todo ello indica que esta frecuencia causa mayor efecto en los ejes horizontales y en este caso en la posición 4.

Esto llevaría a hacer hincapié de cara al mantenimiento predictivo en estos dos ejes, horizontal y vertical, para predecir una falla provocada por BPOR, y dentro de las dos posiciones la posición 4 sufre más con respecto a la posición 3.

En el siguiente gráfico se compara la frecuencia de BPOR en los ejes más determinantes de cada posición.

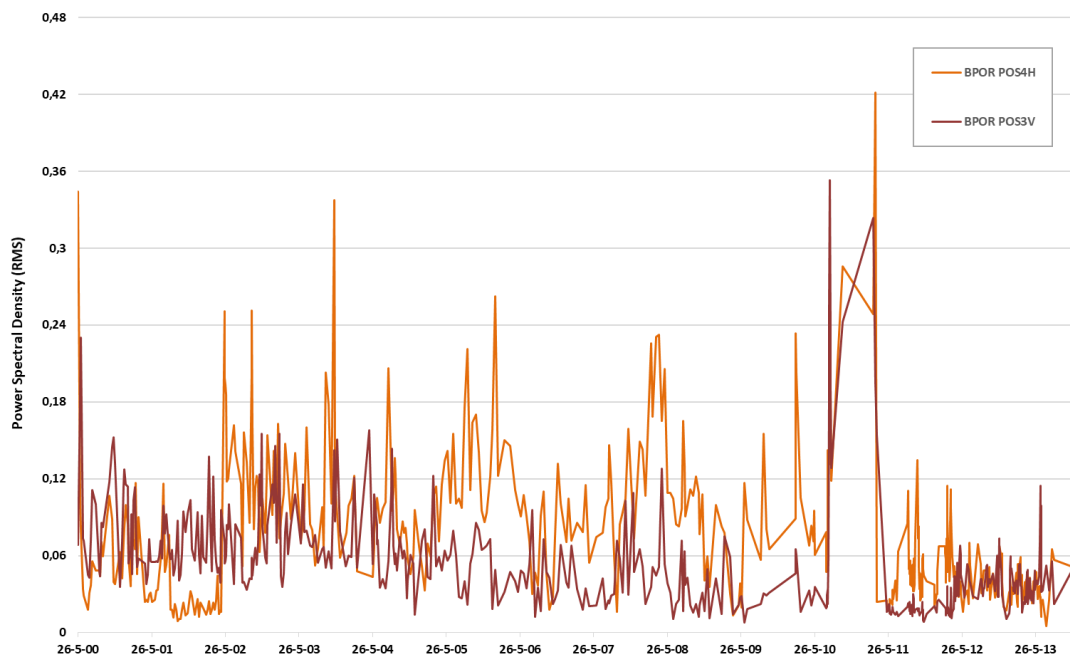


Figura 63. Gráfico comparativo de la frecuencia BPOR – FAGNU322 en RMS posición 4H y 3H.

El gráfico muestra la linealidad de los resultados, generando un patrón muy parejo entre ambas posiciones. Esto ayuda a pensar que se podría predecir el fallo en la posición 4 horizontal.

En todos los casos anteriores se encontraban los mayores valores en los ejes verticales, sin embargo, esta frecuencia genera mayor afección en el eje horizontal, aun así sigue siendo la posición 4 la más afectada.

6.4.4. Análisis de la frecuencia BPIR

La siguiente parte aborda cómo se comportan las frecuencias características del rodamiento FAGNU322, para ello se realiza el análisis de la frecuencia generada por la pista

interior del rodamiento.

Se analiza la posición 3 vertical, calculando la suma de valores obtenidos a lo largo de todo el estudio en cada una de las posiciones y sus ejes, esto mismo se realiza con la media y el valor máximo o valor pico, todo en términos de RMS.

El resultado se muestra en la siguiente tabla:

POSICIÓN	BPIR POS3H FAGNU322	BPIR POS3V FAGNU322	BPIR POS3A FAGNU322
SUMA TOTAL	14,38	17,43	16,92
MEDIA	0,02	0,03	0,03
VALOR PICO	0,14	0,25	0,13

Tabla 40. Resumen de frecuencia BPIR del rodamiento FAGNU322 en términos de RMS posición 3.

Se ve que los valores máximos acumulados en toda la muestra de ensayos se encuentran en la posición 3 vertical, con un valor de 17,43 RMS, tras este valor le sigue la posición 3 axial, con un valor de 16,92 RMS.

En la siguiente figura se observan los resultados de la posición 3 en todos los ejes.

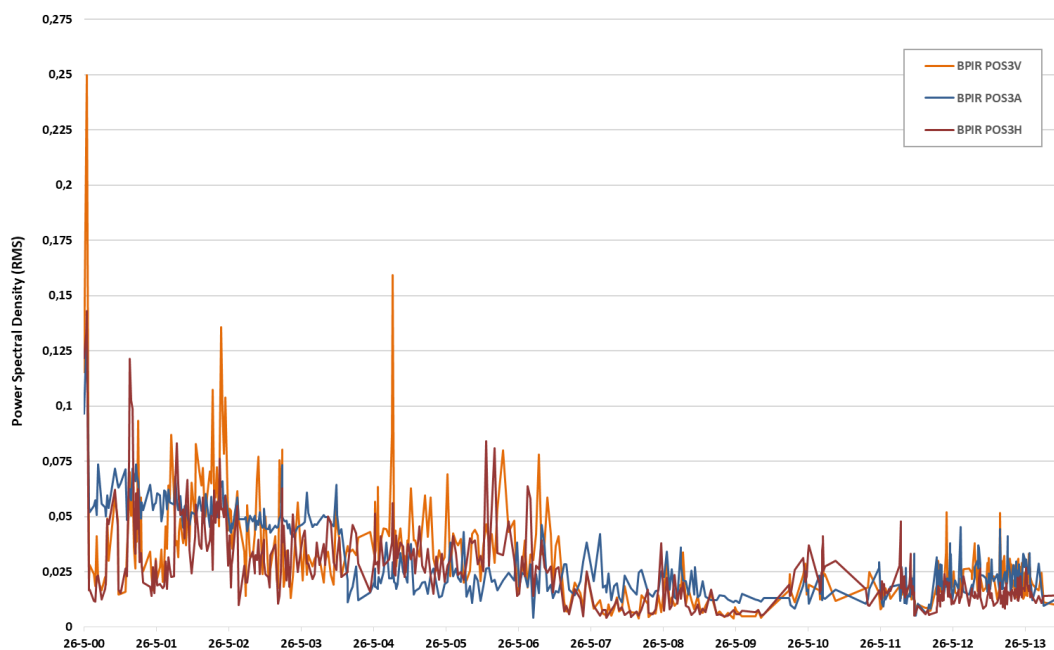


Figura 64. Gráfico comparativo de la frecuencia BPIR – FAGNU322 en RMS posición 3 (H, V, A).

Tras el análisis de la frecuencia BPIR en la posición 3, se procede a evaluar los valores energéticos en la posición 4.

Para este estudio, se calcula la suma de valores obtenidos a lo largo de todo el estudio en cada una de las posiciones y sus ejes, esto mismo se realiza con la media y el valor máximo

o valor pico, todo en términos de RMS.

El resultado se muestra en la siguiente tabla:

POSICIÓN	BPIR POS4H FAGNU322	BPIR POS4V FAGNU322	BPIR POS4A FAGNU322
SUMA TOTAL	14,21	22,82	12,40
MEDIA	0,02	0,04	0,02
VALOR PICO	0,13	0,39	0,13

Tabla 41. Resumen de frecuencia BPIR del rodamiento FAGNU322 en términos de RMS posición 4.

Los valores máximos acumulados, en toda la muestra de ensayos, se encuentran en la posición 4 vertical, con un valor de 22,82 RMS, tras este se encuentra la posición 4 horizontal, con un valor de 14,21 RMS.

En la siguiente figura se pueden observar los resultados de la posición 4 en todos los ejes.

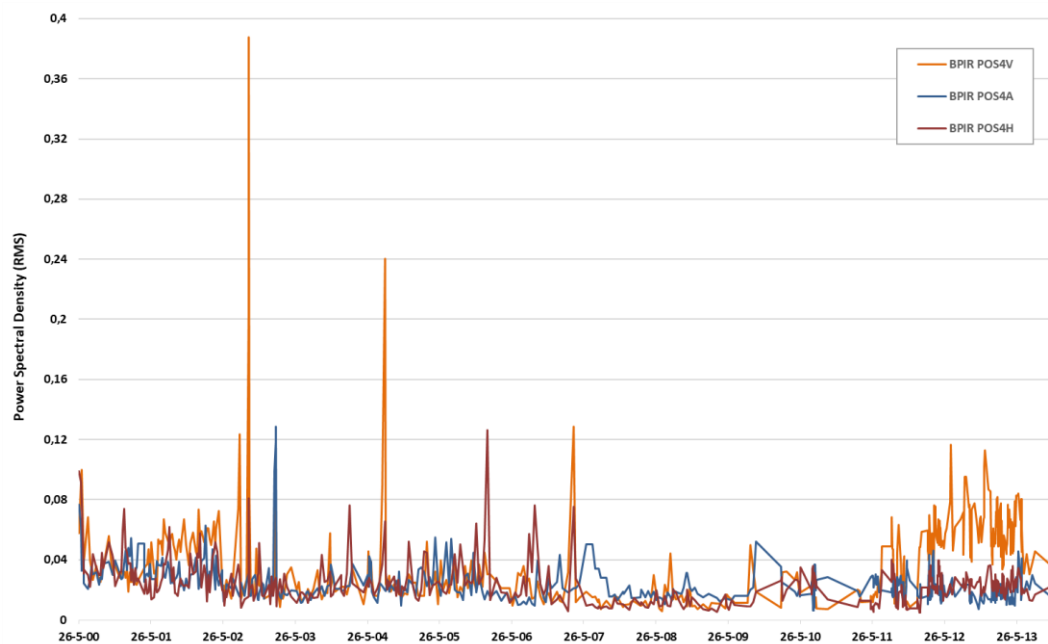


Figura 65. Gráfico comparativo de la frecuencia BPIR – FAGNU322 en RMS posición 4 (H, V, A).

Al realizar la comparativa entre los valores máximos acumulados de las posiciones 3 y 4, se observa que en la posición 4 vertical se alcanza un valor de 22,82 RMS y de la posición 3 el valor máximo se encuentra en el eje vertical, con 17,43 RMS.

Si se analizan las segundas posiciones, se observa que son los ejes horizontales, al igual que el resto de las frecuencias, sin contar con BPIR. Los valores obtenidos son 14,21 RMS y 14,38 RMS, para las posiciones 4 y 3 horizontal, respectivamente.

Todo ello indica que esta frecuencia causa mayor efecto en los ejes verticales y en este caso en la posición 4.

Esto llevaría a hacer hincapié de cara al mantenimiento predictivo en estos dos ejes, horizontal y vertical, para predecir una falla provocada por BPIR, y dentro de las dos posiciones la posición 4 sufre más con respecto a la posición 3.

En el siguiente gráfico se compara la frecuencia de BPIR en los ejes más determinantes de cada posición.

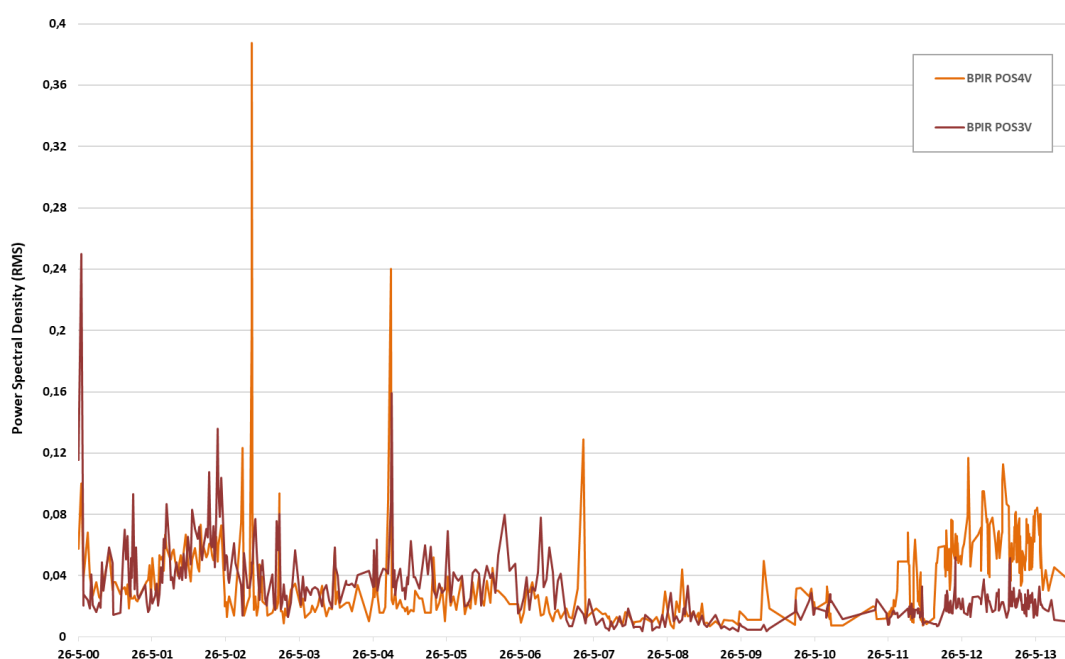


Figura 66. Gráfico comparativo de la frecuencia BPIR – FAGNU322 en RMS posición 4V y 3V.

El gráfico muestra otro elemento importantísimo, como en el caso de la frecuencia BPOR, y es la linealidad de los resultados, generando un patrón muy parejo entre las posiciones 3 y 4 vertical.

Esta conclusión ayuda a pensar que se podría predecir el fallo de la frecuencia de la pista interior del rodamiento monitorizando sólo la posición 4 vertical.

6.4.5. Análisis de la frecuencia 2BSF

Se sigue analizando la frecuencia generada por las bolas, concretamente su segundo armónico referenciado en este estudio como 2BSF.

Lo primero será analizar la posición 3 vertical. Para ello, se calcula la suma de valores obtenidos a lo largo de todo el estudio en cada una de las posiciones y sus ejes, esto mismo

se realiza con la media y el valor máximo o valor pico, todo en términos de RMS.

El resultado se muestra en la siguiente tabla:

POSICIÓN	2BSF POS3H FAGNU322	2BSF POS3V FAGNU322	2BSF POS3A FAGNU322
SUMA TOTAL	64,62	63,22	61,11
MEDIA	0,11	0,10	0,10
VALOR PICO	0,66	0,63	0,62

Tabla 42. Resumen de frecuencia 2BSF del rodamiento FAGNU322 en términos de RMS posición 3.

Se observa que los valores máximos acumulados en toda la muestra de ensayos se encuentran en la posición 3 horizontal, con un valor de 64,62 RMS, tras este valor le sigue la posición 3 vertical, con un valor de 63,22 RMS.

En la siguiente figura se pueden comprobar los resultados de la posición 3 en todos los ejes.

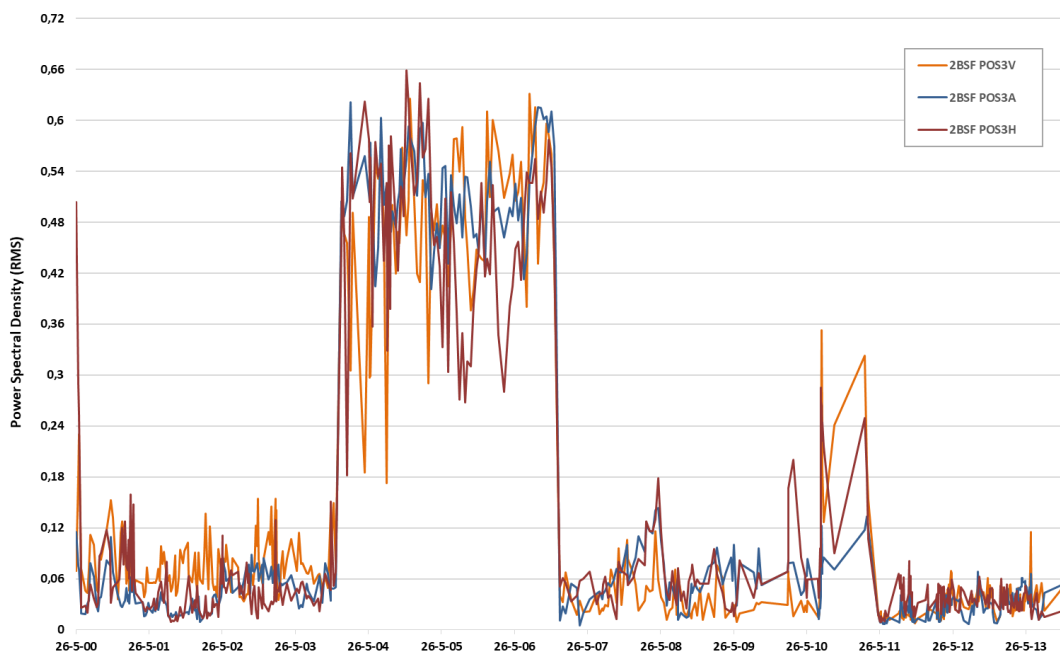


Figura 67. Gráfico comparativo de la frecuencia 2BSF – FAGNU322 en RMS posición 3 (H, V, A).

Tras el análisis de la frecuencia BPIR en la posición 3, se procede a evaluar los valores energéticos en la posición 4.

Para este estudio, se calcula la suma de valores obtenidos a lo largo de todo el estudio en cada una de las posiciones y sus ejes, esto mismo se realiza con la media y el valor máximo o valor pico, todo en términos de RMS.

El resultado se muestra en la siguiente tabla:

POSICIÓN	2BSF POS4H FAGNU322	2BSF POS4V FAGNU322	2BSF POS4A FAGNU322
SUMA TOTAL	42,58	39,22	28,01
MEDIA	0,07	0,06	0,05
VALOR PICO	0,42	0,80	0,40

Tabla 43. Resumen de frecuencia 2BSF del rodamiento FAGNU322 en términos de RMS posición 4.

Se determina que los valores máximos acumulados en toda la muestra de ensayos se encuentran en la posición 4 horizontal, con un valor de 42,58 RMS, tras este se encuentra la posición 4 vertical, con un valor de 39,22 RMS.

En la siguiente figura se muestran los resultados de la posición 4 en todos los ejes.

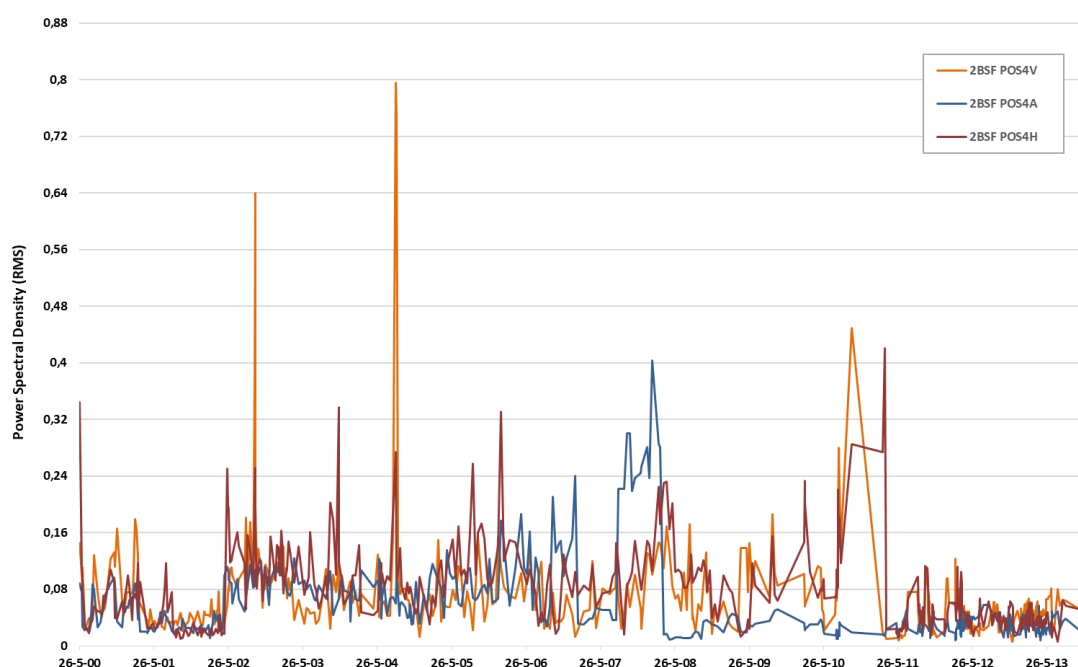


Figura 68. Gráfico comparativo de la frecuencia 2BSF – FAGNU322 en RMS posición 4 (H, V, A).

Al realizar la comparativa entre los valores máximos acumulados de las posiciones 3 y 4, se determina que en la posición 3 horizontal se obtiene un valor de 64,62 RMS y de la posición 4 el valor máximo se encuentra en el eje horizontal con 42,85 RMS.

Si se analizan las segundas posiciones, se observa que son los ejes verticales, al igual que la frecuencia BPOR, los más importantes. Los valores de esta frecuencia son 42,58 y 63,22 RMS, respectivamente, para las posiciones 4 y 3 horizontal.

Todo ello indica que esta frecuencia causa mayor efecto en los ejes horizontales y en este caso en la posición 3, siendo esta frecuencia la única que tiene más incidencia en la posición 3.

Esto llevaría a hacer hincapié de cara al mantenimiento predictivo en estos dos ejes, horizontal y vertical, para predecir una falla provocada por 2BSF, y dentro de las dos posiciones, la posición 3 sufre más con respecto a la posición 4. En el siguiente gráfico se compara la frecuencia de 2BSF en los ejes más determinantes de cada posición.

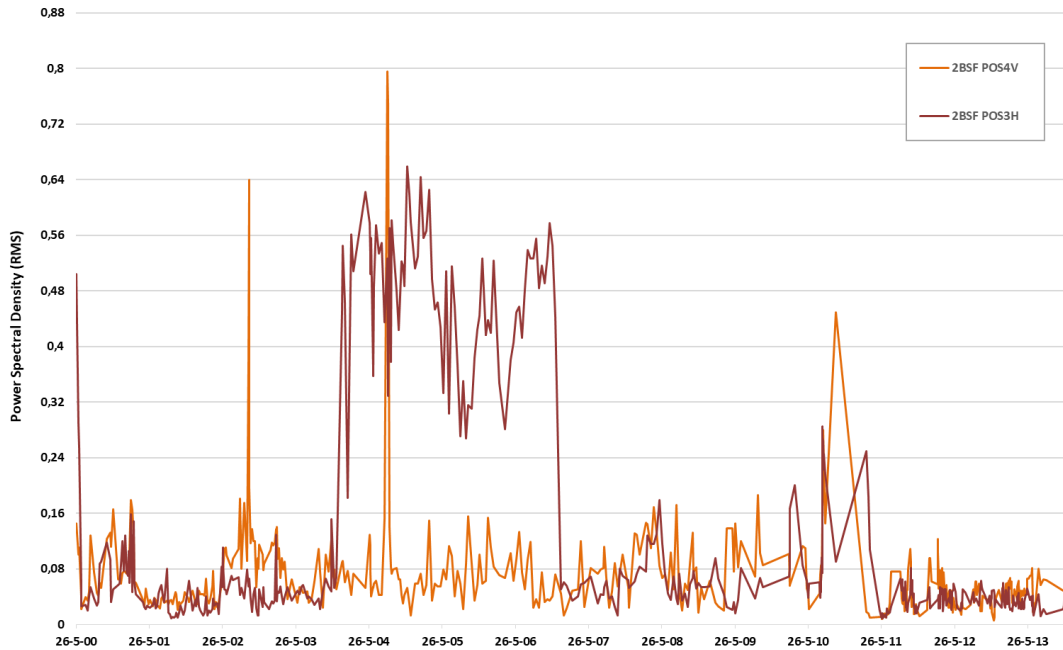


Figura 69. Gráfico comparativo de la frecuencia 2BSF – FAGNU322 en RMS posición 4V y 3H.

El gráfico muestra otro elemento importantísimo, como en el caso de la frecuencia BPIR, y es la linealidad de los resultados, generando un patrón muy parejo entre las posiciones 4 vertical y horizontal. Esta conclusión ayuda a pensar que se podría predecir el fallo de la frecuencia de la pista interior del rodamiento monitorizando sólo la posición 4 vertical.

6.4.6. Resultado del análisis de las frecuencias características

El resultado final de este rodamiento es que las variables más significativas son las generadas por la jaula de bolas definidas como FTF, la provocada por las bolas en su segundo armónico y en el principal (BSF, 2 BSF), la generada por las bolas en la pista exterior o BPOR, y la generada en la pista interior o BPIR. Tras el análisis de todas las variables significativas del rodamiento FAGNU322 y su influencia en cada posición y eje de medida, se muestra en la siguiente tabla los resultados obtenidos en términos de RMS.

VARIABLE	FTF Pos4V	BSF Pos4V	BPOR Pos4H	BPIR Pos4V	2BSF Pos3H
SUMA TOTAL	217,471	44,126	42,74	22,819	64,616
MEDIA	0,355	0,072	0,07	0,037	0,105
VALOR PICO	10,056	1,392	0,42	0,388	0,659

Tabla 44. Resumen de frecuencias del rodamiento FAGNU322 en términos de RMS.

Como resumen se observa que la frecuencia más determinante ha sido la generada por la jaula del propio rodamiento, tanto en valores medio como en valores pico. El resto de los valores son inferiores en comparación con ésta. Las posiciones donde se generan estos valores máximos han sido: en FTF la posición 4 vertical, el 2BSF se obtiene en la posición 3 horizontal. La siguiente es la BSF que también se encuentra en la posición 4 vertical.

Las otras dos restantes, BPOR y BPIR, se encuentran en los ejes horizontal y vertical de las posiciones 4 y 3 respectivamente. Las tres frecuencias más importantes generan su mayor influencia en los ejes verticales, tanto en la posición 3 como en la 4. Para discernir qué variable es la predominante, se analizan las frecuencias FTF en la posición 4 vertical y la 2BSF en la posición 3 vertical.

Se observa cómo el valor de FTF genera picos muy característicos a lo largo de todo el muestreo. Por ello, y a pesar de tener un valor medio menor, es más determinante para el buen funcionamiento, por elevar los valores de Amplitud Máxima que determinan los niveles máximos de funcionamiento según la ISO 10816. Todo ello se puede observar en el siguiente gráfico.

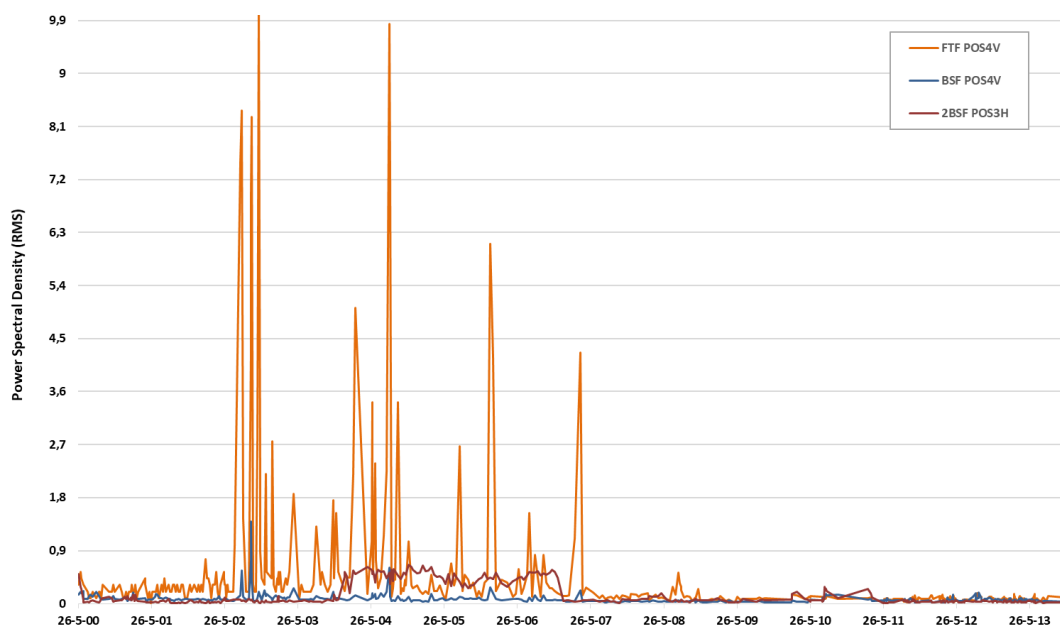


Figura 70. Gráfico comparativo de las frecuencias más importantes del rodamiento FAGNU322.

6.4.7. Análisis de FTF con SPEED y Álabes

Tras el estudio de las variables del rodamiento FAGNU322, se comparan estos con los resultados de las otras dos variables de estudio, como son la frecuencia de giro de la máquina denominada SPEED y la de los Álabes. En la tabla 43 se pueden ver los resultados.

VARIABLE	SPEED Pos4V	FTF Pos4V	ÁLABES Pos3A
SUMA TOTAL	1606,085	217,471	245,778
MEDIA	2,612	0,355	0,399
VALOR PICO	11,644	10,056	3,354

Tabla 45. Resumen de frecuencias SPEED, ÁLABES y FTF en términos de RMS.

Se observa en la tabla que la frecuencia más importante es la provocada por la propia máquina, muy por encima de los álabes y de la jaula del rodamiento o FTF.

Al comprobar los valores picos se vuelve a tener como referencia a SPEED, con 11,644 RMS, pero en este caso la segunda no es la generada por los álabes sino por la frecuencia FTF FAGNU322, quedando en tercer lugar la de los álabes, como se muestra en la siguiente figura.

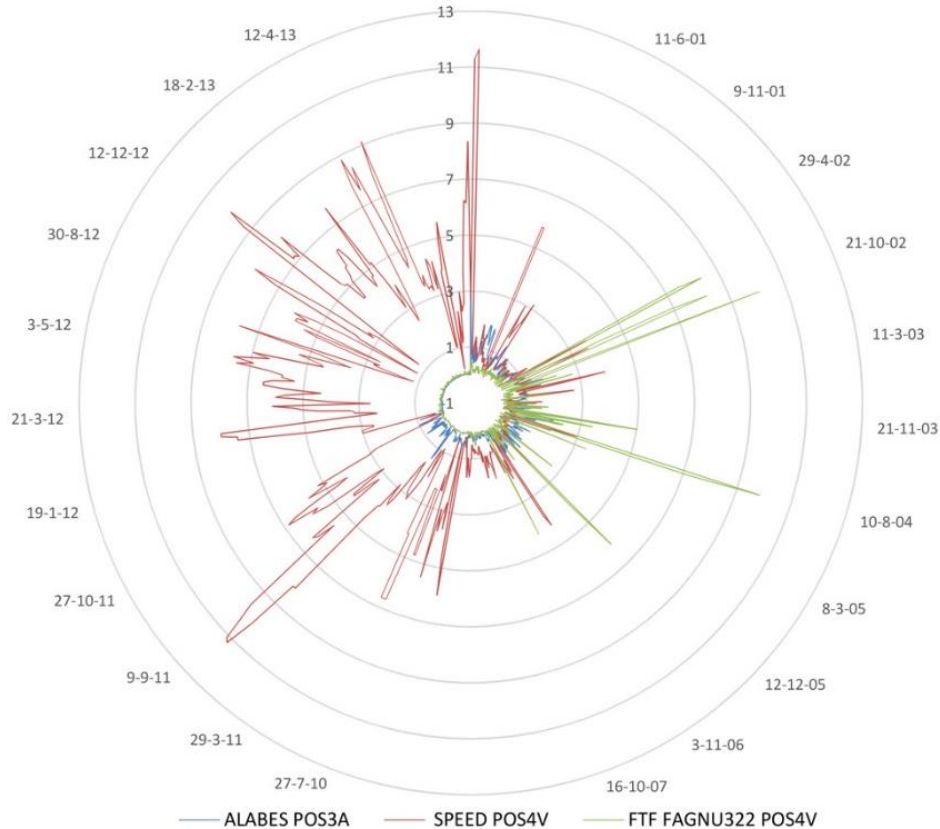


Figura 71. Comparativa de las frecuencias SPEED, ÁLABES y FTF FAGNU322 en términos de RMS.

6.5. Análisis del rodamiento SKFNU322

6.5.1. Análisis de la frecuencia FTF

La siguiente parte del estudio aborda cómo se comportan las frecuencias características del rodamiento SKFNU322, empezando por la frecuencia generada por la jaula del rodamiento.

El análisis se realiza tomando los valores de todo el muestreo en las posiciones de medida, y en los tres ejes coordenados.

Tras el análisis de las cinco frecuencias más importantes del rodamiento SKFNU322, se comparará la de mayor valor energético en términos de RMS, con la generada por el giro de la máquina SPEED y los álabes, con el propósito de discernir las frecuencias más determinantes y los puntos donde mayor es su efecto.

El análisis de las frecuencias características del rodamiento busca encontrar la frecuencia más determinante y la posición y eje donde su influencia es más determinante.

Se empieza analizando la frecuencia generada por la jaula del rodamiento en la posición 3 vertical. Para ello se calcula la suma de valores obtenidos a lo largo de todo el estudio en cada una de las posiciones y sus ejes, esto mismo se realiza con la media y el valor máximo o valor pico, todo en términos de RMS.

El resultado se muestra en la siguiente tabla:

POSICIÓN	FTF POS3H SKFNU322	FTF POS3V SKFNU322	FTF POS3A SKFNU322
SUMA TOTAL	52,48	55,88	51,59
MEDIA	0,09	0,08	0,10
VALOR PICO	0,52	1,34	0,56

Tabla 46. Resumen de frecuencia FTF del rodamiento SKFNU322 en términos de RMS posición 3.

Se determina que los valores máximos acumulados en toda la muestra de ensayos se encuentran en la posición 3 vertical, con un valor de 55,88 RMS, tras éste se encuentra el valor 52,48 RMS perteneciente al eje horizontal.

Al analizar los valores pico se observa que el valor en el caso del eje vertical es más del doble al del resto, es por ello que el eje más determinante sería el vertical.

En la siguiente figura se ven los resultados de la posición 3 en todos los ejes.

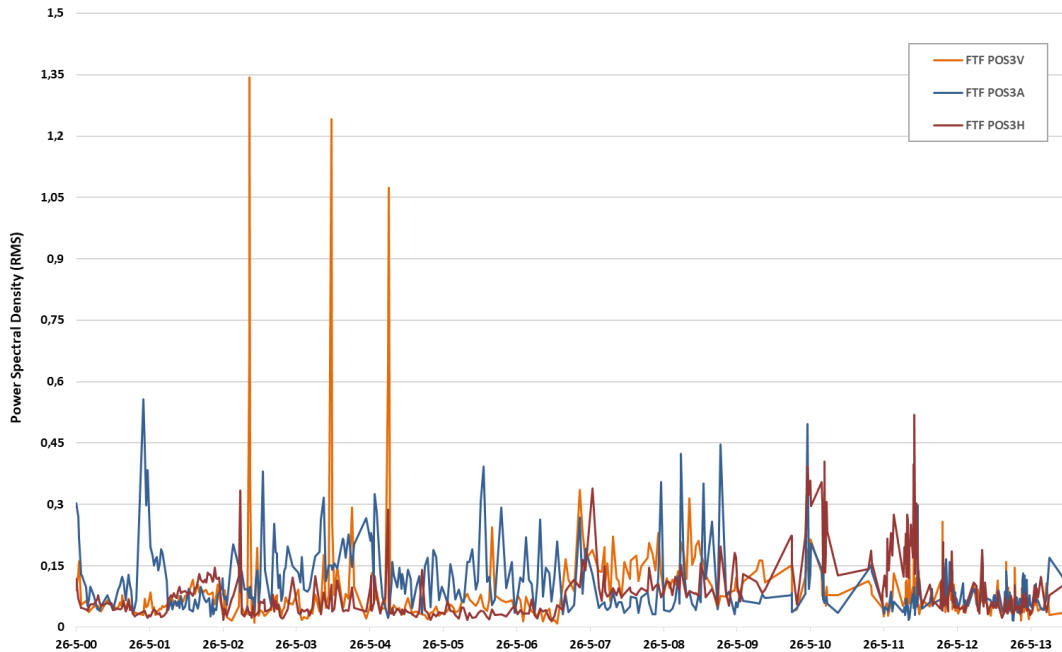


Figura 72. Gráfico comparativo de la frecuencia FTF – SKFNU322 en RMS posición 3 (H, V, A).

Tras el análisis de la frecuencia FTF en la posición 3, se procede a evaluar los valores energéticos en la posición 4.

Para este estudio, se calcula la suma de valores obtenidos a lo largo de todo el estudio en cada una de las posiciones y sus ejes, esto mismo se realiza con la media y el valor máximo o valor pico, todo en términos de RMS.

El resultado se muestra en la siguiente tabla:

POSICIÓN	FTF POS4H SKFNU322	FTF POS4V SKFNU322	FTF POS4A SKFNU322
SUMA TOTAL	94,97	97,48	59,04
MEDIA	0,17	0,16	0,11
VALOR PICO	7,61	7,75	1,18

Tabla 47. Resumen de frecuencia FTF del rodamiento SKFNU322 en términos de RMS posición 4.

Se muestra que los valores máximos acumulados, en toda la muestra de ensayos se encuentran en la posición 4 vertical, con un valor de 97,48 RMS, tras este le sigue la posición 4 horizontal con un valor de 94,97 RMS.

En la siguiente figura 73 se pueden observar los resultados de la posición 4 en todos los ejes.

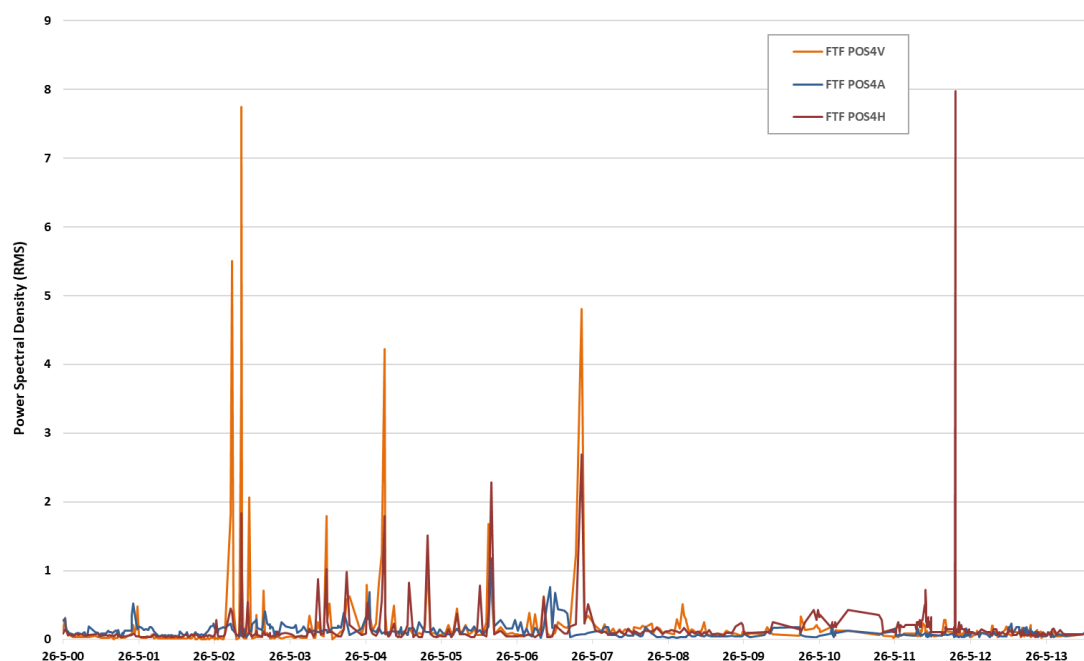


Figura 73. Gráfico comparativo de la frecuencia FTF – SKFNU322 en RMS posición 4 (H, V, A).

Al realizar la comparativa entre los valores máximos acumulados de las posiciones 3 y 4, se ve que en la posición 4 vertical aparece un valor de 97,48 RMS y de la posición 3 el valor máximo se encuentra en el eje vertical con 55,88 RMS.

Si se analizan las segundas posiciones, se observa que son los ejes horizontales los siguientes más afectados por esta frecuencia, con 94,97 RMS y 52,48 RMS, para las posiciones 4 y 3 horizontal, respectivamente. Todo ello muestra que esta frecuencia causa mayor efecto en los ejes verticales y sobre todo en la posición 4.

Esto llevaría a hacer hincapié de cara al mantenimiento predictivo en estos dos ejes, para predecir una falla provocada por FTF, y dentro de las dos posiciones la posición 4 sufre más del doble con respecto a la posición 3 en valores total y en valores pico, casi 14 veces superior.

En el siguiente gráfico se compara la frecuencia de la jaula en los ejes más determinantes de cada posición.

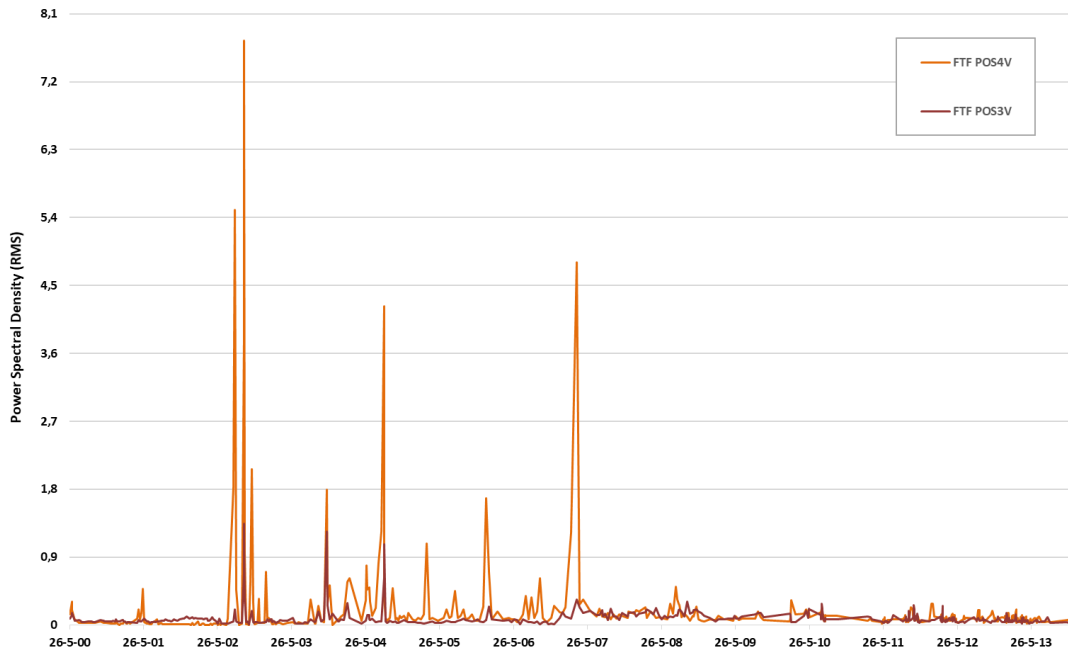


Figura 74. Gráfico comparativo de la frecuencia FTF – SKFNU322 en RMS posición 4V y 3V.

La figura muestra otro elemento importantísimo para el estudio y es la linealidad de los resultados, generando un patrón muy parejo entre las posiciones 3 y 4 vertical. Esta conclusión ayuda a pensar que se podría predecir el fallo de la jaula del rodamiento monitorizando sólo la posición 4 vertical.

6.5.2. Análisis de la frecuencia BSF

La siguiente parte del estudio aborda cómo se comportan las frecuencias características del rodamiento SKFNU322, tomando ahora la frecuencia generada por las bolas del rodamiento.

Se continúa analizando la frecuencia generada por las bolas del rodamiento (BSF), en la posición 3 vertical. Para ello se calcula la suma de valores obtenidos a lo largo de todo el estudio, en cada una de las posiciones y sus ejes, esto mismo se realiza con la media y el valor máximo o valor pico, todo en términos de RMS.

El resultado se muestra en la siguiente tabla:

POSICIÓN	BSF POS3H SKFNU322	BSF POS3V SKFNU322	BSF POS3A SKFNU322
SUMA TOTAL	29,25	38,19	47,72
MEDIA	0,05	0,06	0,08
VALOR PICO	0,57	0,67	0,69

Tabla 48. Resumen de frecuencia BSF del rodamiento SKFNU322 en términos de RMS posición 3.

Los valores máximos acumulados en toda la muestra de ensayos se encuentran en la posición 3 axial, con un valor de 47,72 RMS, este valor viene seguido de la posición 3 vertical, con un valor de 38,19 RMS.

En la siguiente figura se observan los resultados de la posición 3 en todos los ejes.

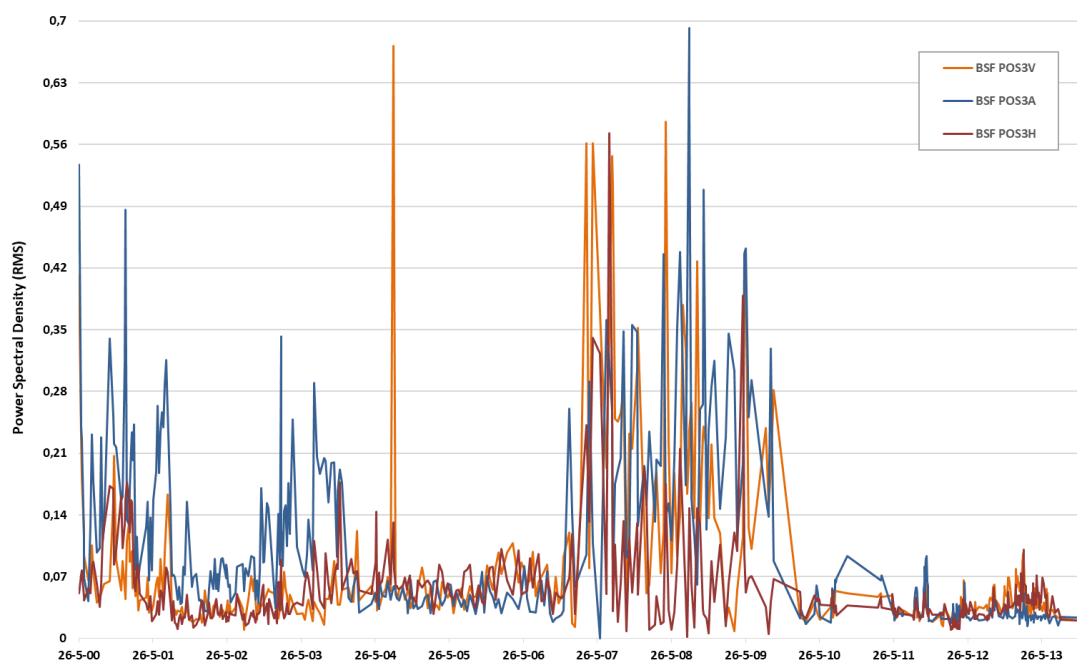


Figura 75. Gráfico comparativo de la frecuencia BSF – SKFNU322 en RMS posición 3 (H, V, A).

Tras el análisis de la frecuencia BSF en la posición 3, se procede a evaluar los valores energéticos en la posición 4.

Para este estudio se calcula la suma de valores obtenidos a lo largo de toda la muestra, en cada una de las posiciones y sus ejes, esto mismo se realiza con la media y el valor máximo o valor pico, todo en términos de RMS. El resultado se muestra en la siguiente tabla:

POSICIÓN	BSF POS4H SKFNU322	BSF POS4V SKFNU322	BSF POS4A SKFNU322
SUMA TOTAL	41,48	56,81	48,11
MEDIA	0,07	0,09	0,09
VALOR PICO	0,93	0,73	0,63

Tabla 49. Resumen de frecuencia BSF del rodamiento SKFNU322 en términos de RMS posición 4.

Los valores máximos acumulados en toda la muestra de ensayos, se encuentran en la posición 4 vertical, con un valor de 56,81 RMS, tras este se encuentra la posición 4 axial, con un valor de 48,11 RMS.

En la siguiente figura se observan los resultados de la posición 4 en todos los ejes.

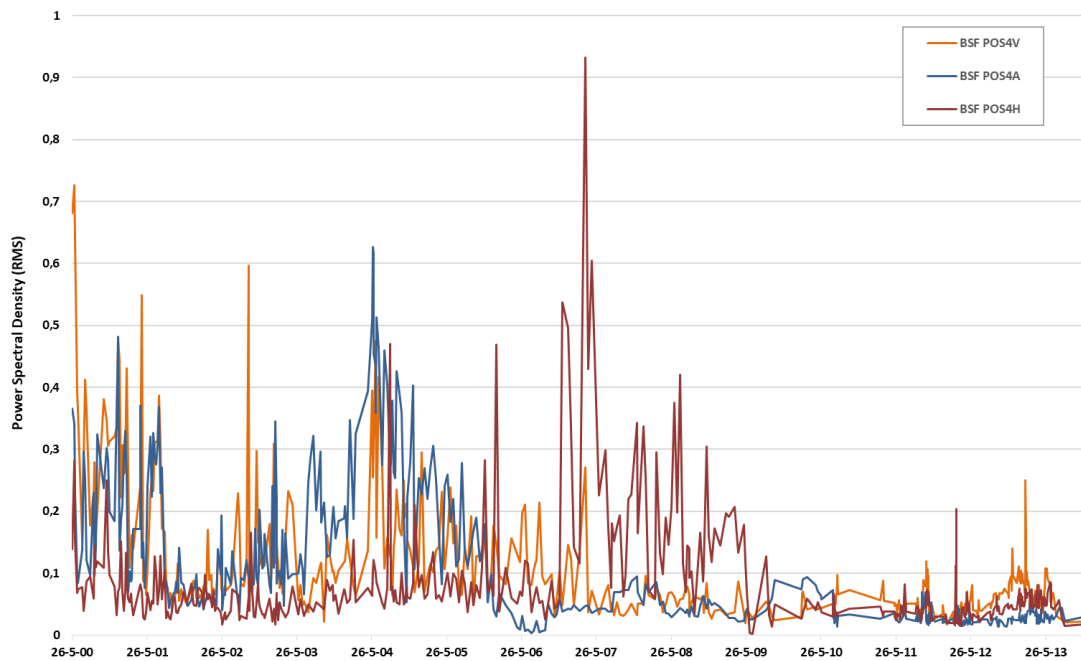


Figura 76. Gráfico comparativo de la frecuencia BSF – SKFNU322 en RMS posición 4 (H, V, A).

Al realizar la comparativa entre los valores máximos acumulados en toda la muestra de ensayos de las posiciones 3 y 4, se observa que en la posición 4 vertical se obtiene un valor de 56,81 RMS y en la posición 3 el valor máximo se encuentra en el eje axial, con 47,72 RMS.

Al analizar las segundas posiciones se determina que son los ejes verticales, para la posición 3 y axial para la 4, los siguientes más afectados, con 38,19 RMS y 48,11 RMS, respectivamente.

Todo ello indica que esta frecuencia causa mayor efecto en los ejes verticales y axiales y en este caso en la posición 4.

Esto llevaría a hacer hincapié de cara al mantenimiento predictivo, en estos dos ejes, horizontal y vertical, para predecir una falla provocada por BSF. Dentro de las dos posiciones, la posición 4 sufre un poco más con respecto a la posición 3.

En el siguiente gráfico se compara la frecuencia de BSF en los ejes más determinantes de cada posición.

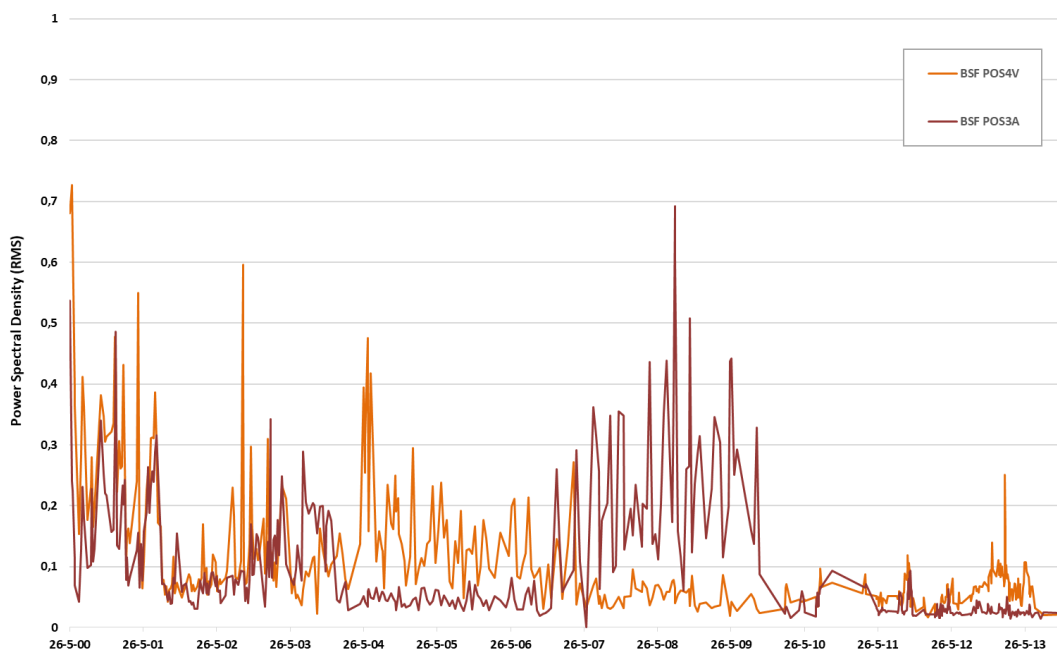


Figura 77. Gráfico comparativo de la frecuencia BSF – SKFNU322 en RMS posición 4V y 3A.

El gráfico muestra otro elemento importantísimo, como en el caso de la frecuencia FTF, y es la linealidad de los resultados, generando un patrón muy parejo entre las posiciones 3 y 4 vertical.

Esta conclusión ayuda a pensar que se podría predecir el fallo, de la frecuencia de bolas del rodamiento, monitorizando sólo la posición 4 vertical.

6.5.3. Análisis de la frecuencia BPOR

La siguiente parte del estudio aborda cómo se comporta la frecuencia generada por la pista exterior del rodamiento SKFNU322. Se analiza la frecuencia generada por las bolas en la pista exterior del rodamiento referenciada en este estudio como BPOR.

El primer análisis se realiza a la posición 3 vertical. Para ello se calcula la suma de valores obtenidos a lo largo de todo el estudio, en cada una de las posiciones y sus ejes, esto mismo se realiza con la media y el valor máximo o valor pico, todo en términos de RMS. El resultado se muestra en la siguiente tabla:

POSICIÓN	BPOR POS3H SKFNU322	BPOR POS3V SKFNU322	BPOR POS3A SKFNU322
SUMA TOTAL	19,34	16,39	10,51
MEDIA	0,03	0,03	0,02
VALOR PICO	0,35	0,21	0,10

Tabla 50. Resumen de frecuencia BPOR del rodamiento SKFNU322 en términos de RMS posición 3.

Los valores máximos acumulados en toda la muestra de ensayos se encuentran en la posición 3 horizontal, con un valor de 19,34 RMS, tras este valor se encuentra la posición 3 vertical, con un valor de 16,39 RMS.

En la siguiente figura se ven los resultados de la posición 3 en todos los ejes.

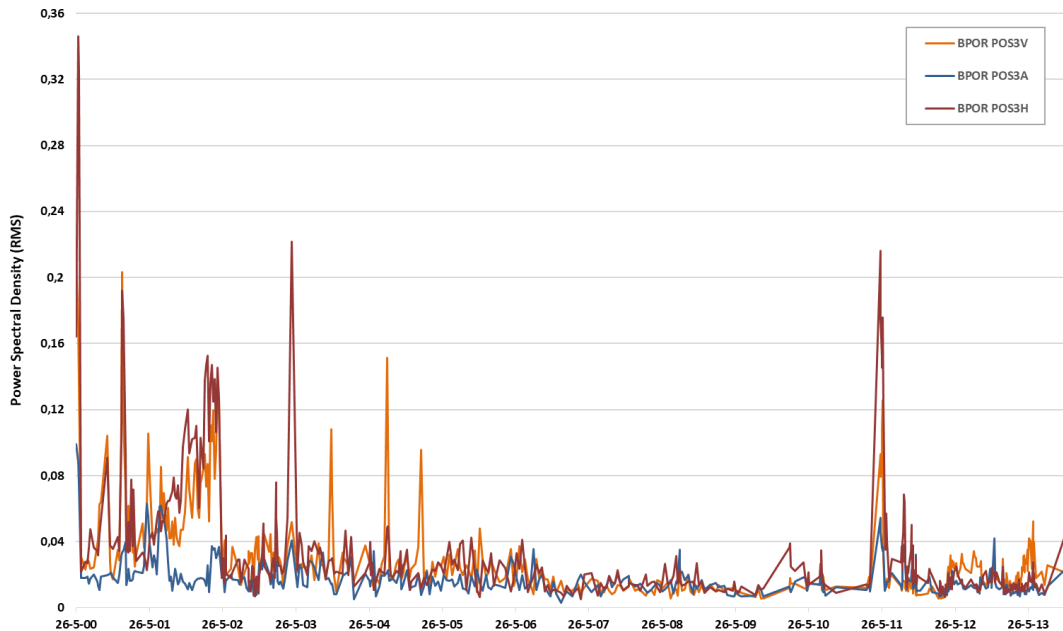


Figura 78. Gráfico comparativo de la frecuencia BPOR – SKFNU322 en RMS posición 3 (H, V, A).

Tras el análisis de la frecuencia BPOR, en la posición 3, se procede a evaluar los valores energéticos en la posición 4.

Para este estudio se calcula la suma de valores obtenidos a lo largo de todo el estudio, en cada una de las posiciones y sus ejes, esto mismo se realiza con la media y el valor máximo o valor pico, todo en términos de RMS.

El resultado se muestra en la siguiente tabla:

POSICIÓN	BPOR POS4H SKFNU322	BPOR POS4V SKFNU322	BPOR POS4A SKFNU322
SUMA TOTAL	20,65	16,50	28,45
MEDIA	0,03	0,03	0,05
VALOR PICO	0,31	0,27	0,41

Tabla 51. Resumen de frecuencia BPOR del rodamiento SKFNU322 en términos de RMS posición 4.

Los valores máximos acumulados, en toda la muestra de ensayos, se encuentran en la posición 4 axial, con un valor de 28,45 RMS, tras este se encuentra la posición 4 horizontal, con un valor de 20,65 RMS.

En la siguiente figura se ven los resultados de la posición 4 en todos los ejes.

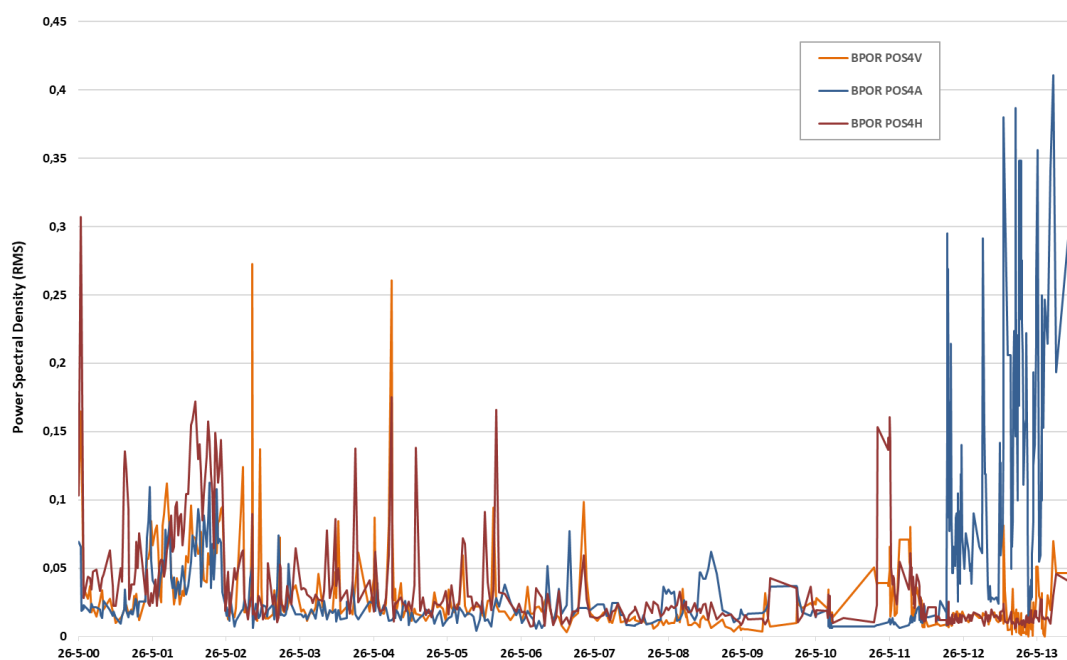


Figura 79. Gráfico comparativo de la frecuencia BPOR – SKFNU322 en RMS posición 4 (H, V, A).

Al realizar la comparativa entre los valores máximos acumulados, en toda la muestra de ensayos de las posiciones 3 y 4, se observa que en la posición 4 axial se obtiene un valor de 28,45 RMS y en la posición 3 el valor máximo se encuentra en el eje horizontal, con 19,34 RMS.

Si se analizan las segundas posiciones se determina que son los ejes horizontales, en ambas posiciones los que mayor valor total alcanzan, con 20,65 RMS y 19,34 RMS, para las posiciones 4 y 3, respectivamente.

Todo ello indica que esta frecuencia causa mayor efecto en el eje axial y en este caso en la posición 4.

Esto llevaría a hacer hincapié, de cara al mantenimiento predictivo, en estos dos ejes, horizontal y axial, para predecir una falla provocada por BPOR. Dentro de las dos posiciones la 4 sufre más con respecto a la posición 3.

En el siguiente gráfico se compara la frecuencia de BPOR en los ejes más determinantes de cada posición.

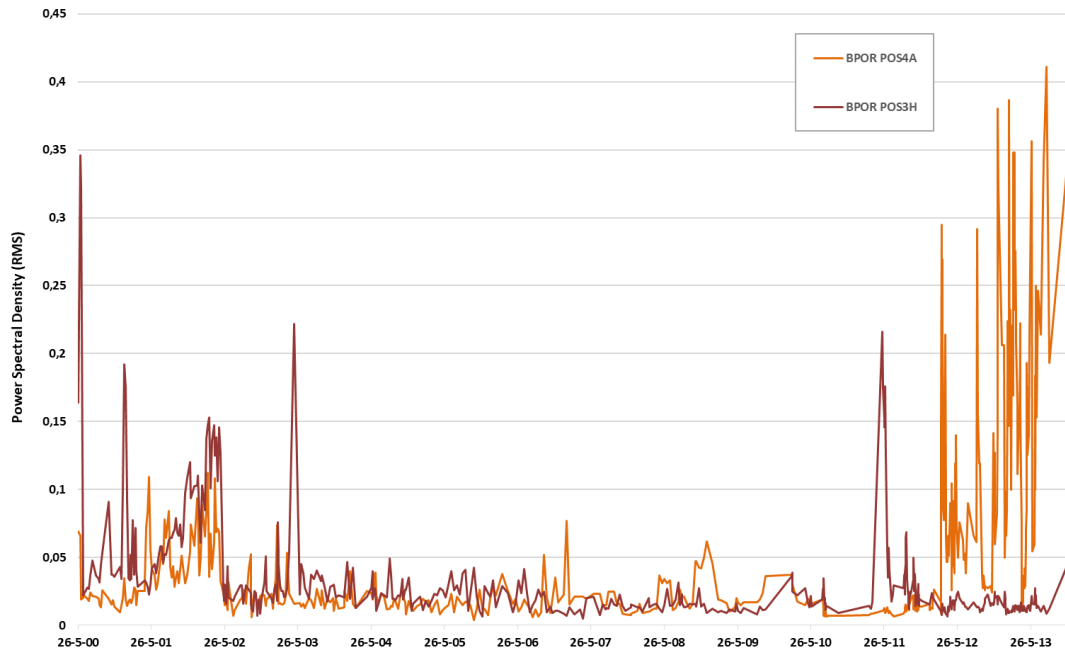


Figura 80. Gráfico comparativo de la frecuencia BPOR – SKFNU322 en RMS posición 4A y 3H.

El gráfico muestra otro elemento importantísimo, como en el caso de la frecuencia BSF, y es la linealidad de los resultados, generando un patrón muy parejo entre las posiciones 3 y 4 y sus ejes horizontal y axial, respectivamente.

Esta conclusión ayuda a pensar que se podría predecir el fallo, de la frecuencia de la pista exterior del rodamiento, monitorizando sólo la posición 4 axial.

Hay que destacar que en todos los casos anteriores se encontraban los mayores valores en los ejes verticales. Sin embargo, esta frecuencia genera mayor afección en el eje axial, aun así sigue siendo la posición 4 la más afectada.

6.5.4. Análisis de la frecuencia BPIR

La siguiente parte del estudio aborda cómo se comporta la frecuencia generada por la pista interior del rodamiento SKFNU322.

Se empieza analizando la posición 3 vertical. Para ello se calcula la suma de valores obtenidos a lo largo de todo el estudio, en cada una de las posiciones y sus ejes, esto mismo se realiza con la media y el valor máximo o valor pico, todo en términos de RMS. El resultado se muestra en la tabla 50.

POSICIÓN	BPIR POS3H SKFNU322	BPIR POS3V SKFNU322	BPIR POS3A SKFNU322
SUMA TOTAL	36,36	42,15	52,05
MEDIA	0,06	0,07	0,08
VALOR PICO	0,46	0,54	0,59

Tabla 52. Resumen de frecuencia BPIR del rodamiento SKFNU322 en términos de RMS posición 3.

Los valores máximos acumulados, en toda la muestra de ensayos, se encuentran en la posición 3 axial, con un valor de 52,05 RMS, tras este valor es la posición 3 vertical, con un valor de 42,15 RMS la que más peso tiene.

En la siguiente figura se observan los resultados de la posición 3 en todos los ejes.

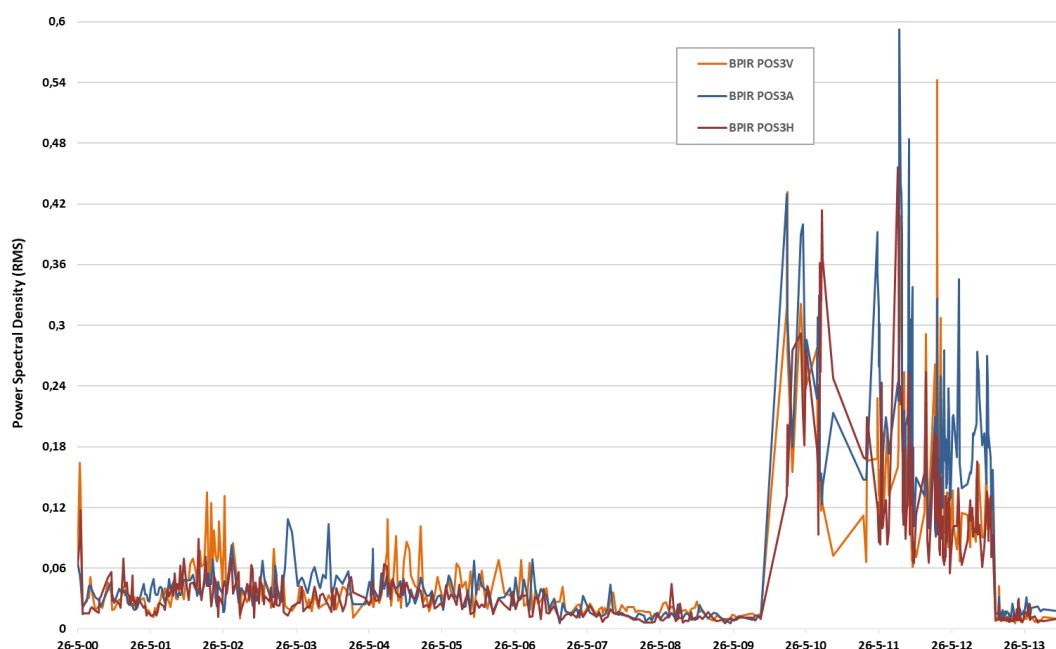


Figura 81. Gráfico comparativo de la frecuencia BPIR – SKFNU322 en RMS posición 3 (H, V, A).

Tras el análisis de la frecuencia BPIR en la posición 3, se procede a evaluar los valores energéticos en la posición 4.

Para este estudio se calcula la suma de valores obtenidos a lo largo de todo el estudio en cada una de las posiciones y sus ejes, esto mismo se realiza con la media y el valor máximo o valor pico, todo en términos de RMS.

El resultado se muestra en la siguiente tabla:

POSICIÓN	BPIR POS4H SKFNU322	BPIR POS4V SKFNU322	BPIR POS4A SKFNU322
SUMA TOTAL	51,20	29,07	18,11
MEDIA	0,08	0,05	0,03
VALOR PICO	0,48	0,43	0,15

Tabla 53. Resumen de frecuencia BPIR del rodamiento SKFNU322 en términos de RMS posición 4.

Los valores máximos acumulados, en toda la muestra de ensayos, se encuentran en la posición 4 horizontal, con un valor de 51,2 RMS, tras éste se encuentra la posición 4 vertical, con un valor de 29,07 RMS.

En la siguiente figura se observan los resultados de la posición 4 en todos los ejes.

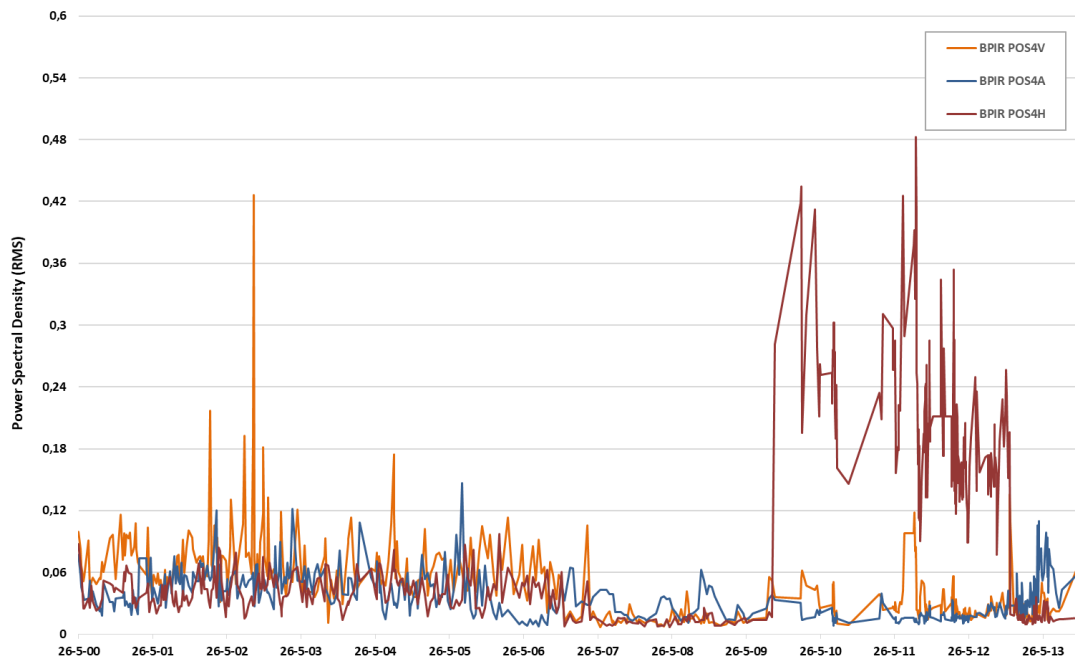


Figura 82. Gráfico comparativo de la frecuencia BPIR – SKFNU322 en RMS posición 4 (H, V, A).

Al realizar la comparativa entre los valores máximos acumulados, en toda la muestra de ensayos de las posiciones 3 y 4, se ve que en la posición 4 horizontal hay un valor de 51,2 RMS y el de la posición 3 el valor máximo se encuentra en el eje axial, con 52,02 RMS.

Si se analizan las segundas posiciones se determina que son los ejes verticales, los valores de esta frecuencia son 29,07 RMS y 42,15 RMS, para las posiciones 4 y 3 vertical, respectivamente.

Todo ello indica que esta frecuencia causa mayor efecto en el eje axial y en este caso en la posición 4.

Esto llevaría a hacer hincapié de cara al mantenimiento predictivo en estos dos ejes, axial y vertical, para predecir una falla provocada por BPIR. Dentro de las dos posiciones, la posición 3 axial sufre más con respecto a la posición 4 horizontal.

En el siguiente gráfico se compara la frecuencia de BPIR en los ejes más determinantes de cada posición.

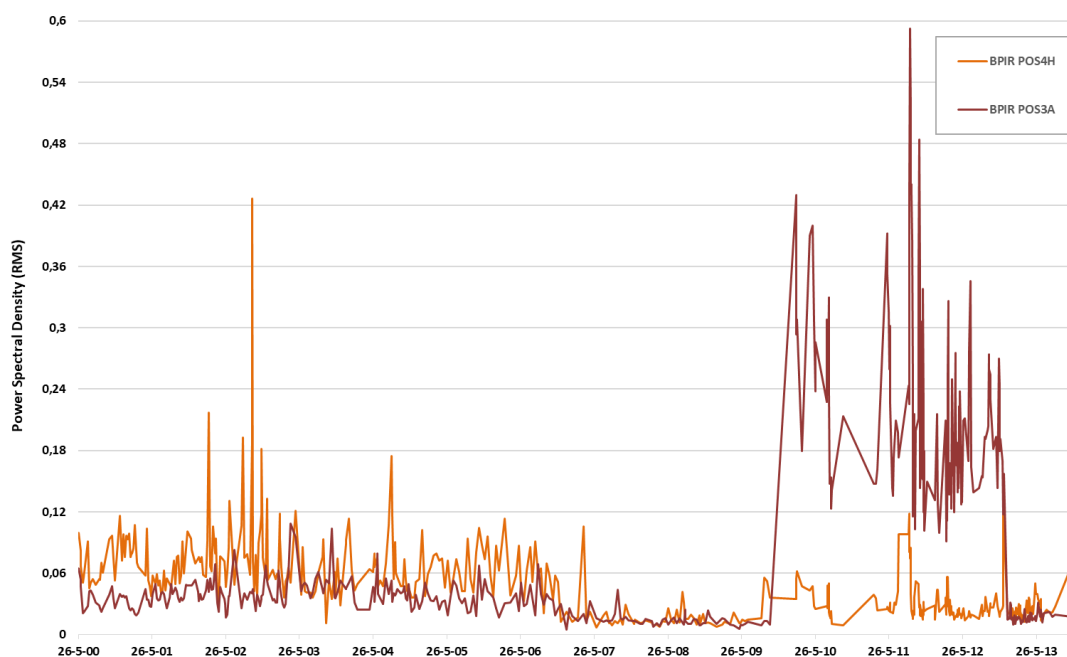


Figura 83. Gráfico comparativo de la frecuencia BPIR – SKFNU322 en RMS posición 4H y 3A.

El gráfico muestra otro elemento importantísimo, como en el caso de la frecuencia BPOR, y es la linealidad de los resultados, generando un patrón muy parejo entre las posiciones 3 y 4 y sus respectivos ejes axial y horizontal.

Esta conclusión ayuda a pensar que se podría predecir el fallo de la frecuencia de la pista interior del rodamiento monitorizando sólo la posición 3 axial, pero muy próxima a la posición 4 horizontal.

6.5.5. Análisis de la frecuencia 2BSF

La siguiente parte del estudio aborda cómo se comporta la frecuencia generada por el segundo armónico de la frecuencia de bolas del rodamiento SKFNU322.

Se continúa analizando la posición 3 vertical, para ello se calcula la suma de valores obtenidos a lo largo de todo el estudio en cada una de las posiciones y sus ejes, esto mismo se realiza con la media y el valor máximo o valor pico, todo en términos de RMS.

El resultado se muestra en la siguiente tabla:

POSICIÓN	2BSF POS3H SKFNU322	2BSF POS3V SKFNU322	2BSF POS3A SKFNU322
SUMA TOTAL	88,87	119,70	40,99
MEDIA	0,14	0,20	0,07
VALOR PICO	1,23	1,57	0,50

Tabla 54. Resumen de frecuencia 2BSF del rodamiento SKFNU322 en términos de RMS posición 3.

Los valores máximos se encuentran en la posición 3 vertical, con un valor de 119,70 RMS, tras este valor se encuentra la posición 3 horizontal, con un valor de 88,87 RMS. En la siguiente figura se pueden observar los resultados de la posición 3 en todos los ejes.

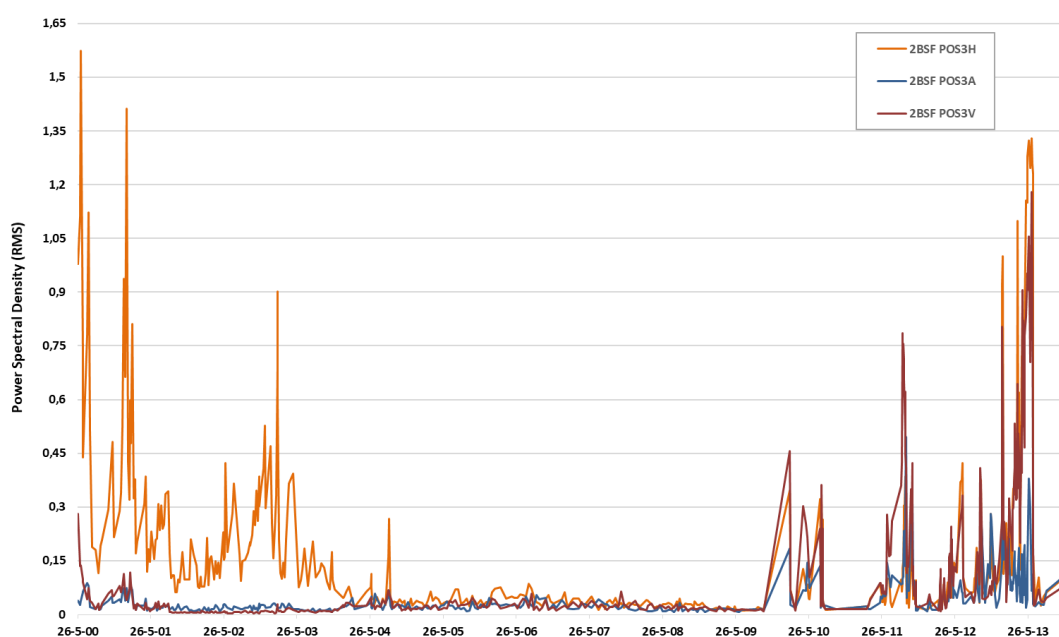


Figura 84. Gráfico comparativo de la frecuencia 2BSF – SKFNU322 en RMS posición 3 (H, V, A).

Tras el análisis de la frecuencia BPIR, en la posición 3, se procede a evaluar los valores energéticos en la posición 4. El resultado se muestra en la siguiente tabla:

POSICIÓN	2BSF POS4H SKFNU322	2BSF POS4V SKFNU322	2BSF POS4A SKFNU322
SUMA TOTAL	117,04	69,86	49,76
MEDIA	0,19	0,11	0,09
VALOR PICO	1,32	1,00	0,94

Tabla 55. Resumen de frecuencia 2BSF del rodamiento SKFNU322 en términos de RMS posición 4.

Los valores máximos acumulados, en toda la muestra de ensayos, se encuentran en la posición 4 horizontal, con un valor de 117,04 RMS, tras este se encuentra la posición 4 vertical, con un valor de 69,86 RMS. En la siguiente figura se observan los resultados de la

posición 4 en todos los ejes.

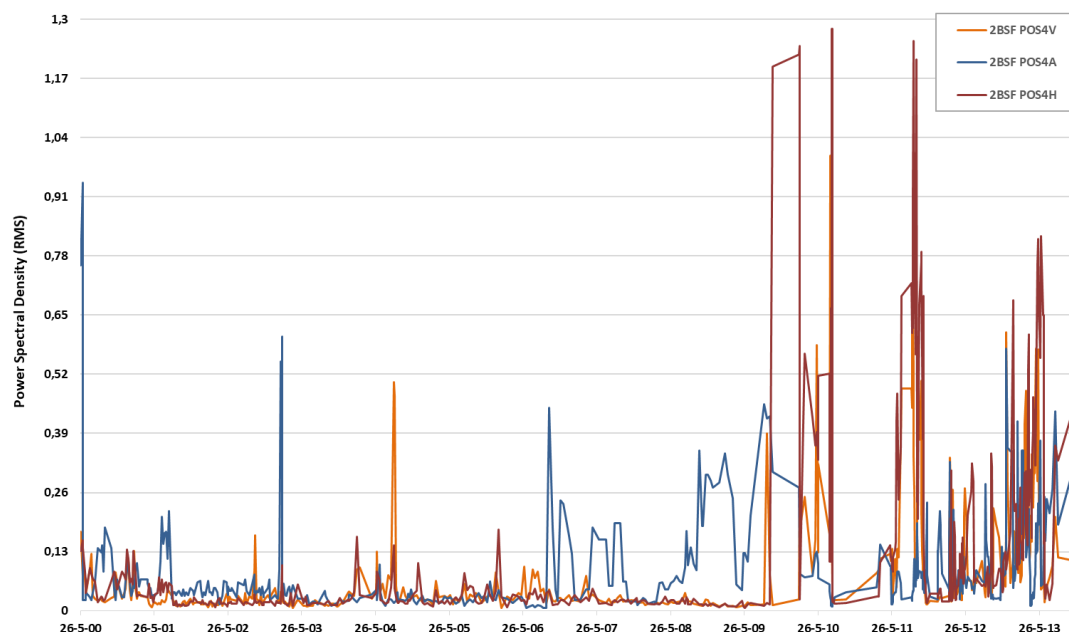


Figura 85. Gráfico comparativo de la frecuencia 2BSF – SKFNU322 en RMS posición 4 (H, V, A).

Al realizar la comparativa entre los valores máximos acumulados, en toda la muestra de ensayos de las posiciones 3 y 4, se ve como en la posición 3 vertical alcanza un valor de 119,7 RMS y el de la posición 4 el valor máximo se encuentra en el eje horizontal, con 117,04 RMS.

Si se analizan las segundas posiciones, el eje horizontal de la posición 3 alcanza un valor de 88,87 RMS, seguido de la posición 4 horizontal, con un valor de 69,86 RMS. Todo ello indica que esta frecuencia causa mayor efecto en los ejes horizontales para la posición 4 y vertical para la 3, en este caso es la posición 3 la que obtiene un valor algo superior.

Esto llevaría a hacer hincapié de cara al mantenimiento predictivo en estos dos ejes, horizontal y vertical, para predecir una falla provocada por 2BSF, y dentro de las dos posiciones, la posición 3 sufre más con respecto a la posición 4.

En el siguiente gráfico se compara la frecuencia de 2BSF en los ejes más determinantes de cada posición.

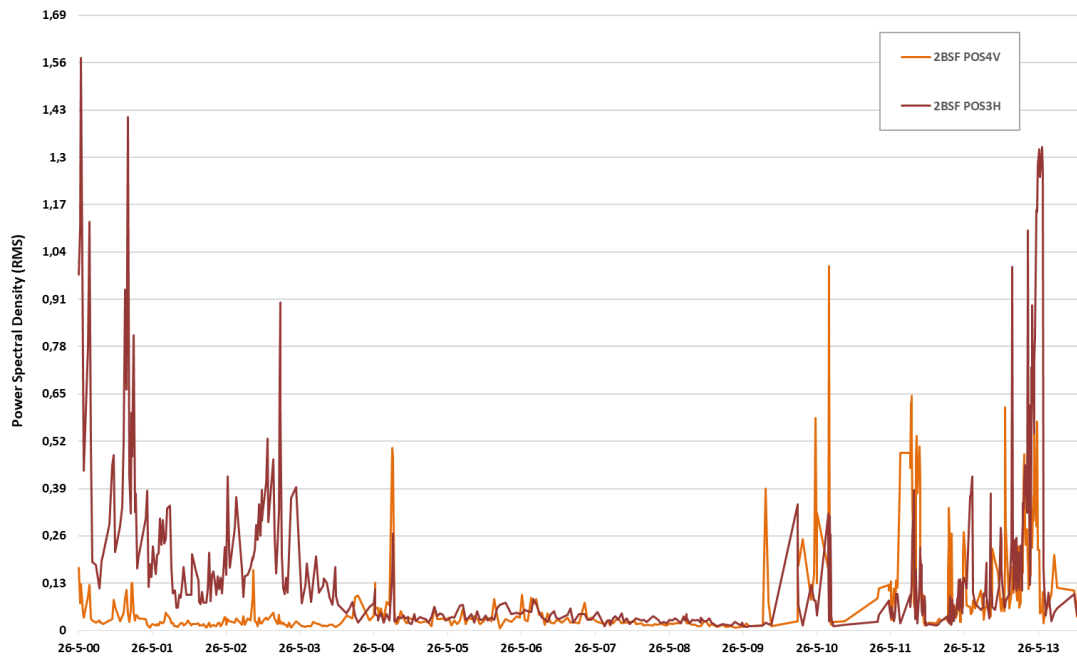


Figura 86. Gráfico comparativo de la frecuencia 2BSF – SKFNU322 en RMS posición 4V y 3H.

El gráfico muestra otro elemento importantísimo, como en el caso de la frecuencia BPIR, y es la linealidad de los resultados, generando un patrón muy parejo entre las posiciones 4 vertical y horizontal. Esta conclusión ayuda a pensar que se podría predecir el fallo de la frecuencia de la pista interior del rodamiento monitorizando sólo la posición 3 vertical.

6.5.6. Resultado del análisis de las frecuencias características

El resultado de este estudio es que las variables más significativas de un rodamiento son FTF, BSF, BPOR, BPIR y por último 2BSF. Tras el análisis de todas las variables del rodamiento SKFNU322 y su influencia en cada posición y eje de medida, se muestran los resultados obtenidos en términos de RMS.

VARIABLE	FTF Pos4V	BSF Pos4V	BPOR Pos4A	BPIR Pos3A	2BSF Pos3V
SUMA TOTAL	97,480	56,812	28,448	52,048	119,701
MEDIA	0,159	0,093	0,053	0,085	0,195
VALOR PICO	7,747	0,727	0,411	0,593	1,573

Tabla 56. Resumen de frecuencias del rodamiento en términos de RMS.

Se observa que la frecuencia más determinante en valores pico ha sido la generada por la jaula del propio rodamiento, pero la segunda en valor medio. Tras esta frecuencia está la del segundo armónico de las bolas. El resto de los valores son inferiores en comparación con

estos dos.

Las posiciones donde se generan estos valores máximos han sido: en FTF la posición 4 en el eje vertical, el 2BSF se obtiene en la posición 3 eje vertical. La siguiente es la BSF que también se encuentra en la posición 4 en el eje vertical.

Las otras dos restantes, BPOR y BPIR, se encuentran en los ejes axiales del eje 4 y del 3 respectivamente. Las frecuencias generan su mayor influencia en los ejes verticales, tanto en la posición 3 como en la 4, para las 3 frecuencias más importantes. Las otras dos son más perceptibles en los ejes axiales, dejando el eje horizontal como el menos importante.

Para discernir qué variable es la predominante, se analizan las frecuencias FTF en la posición 4 vertical y la 2BSF en la posición 3 vertical. Se observa como el valor de FTF genera picos muy característicos a lo largo de todo el muestreo.

Por ello, y a pesar de tener un valor medio menor, es más determinante para el buen funcionamiento, por elevar los valores de Amplitud Máxima que determinan los niveles máximos de funcionamiento según la ISO 10816.

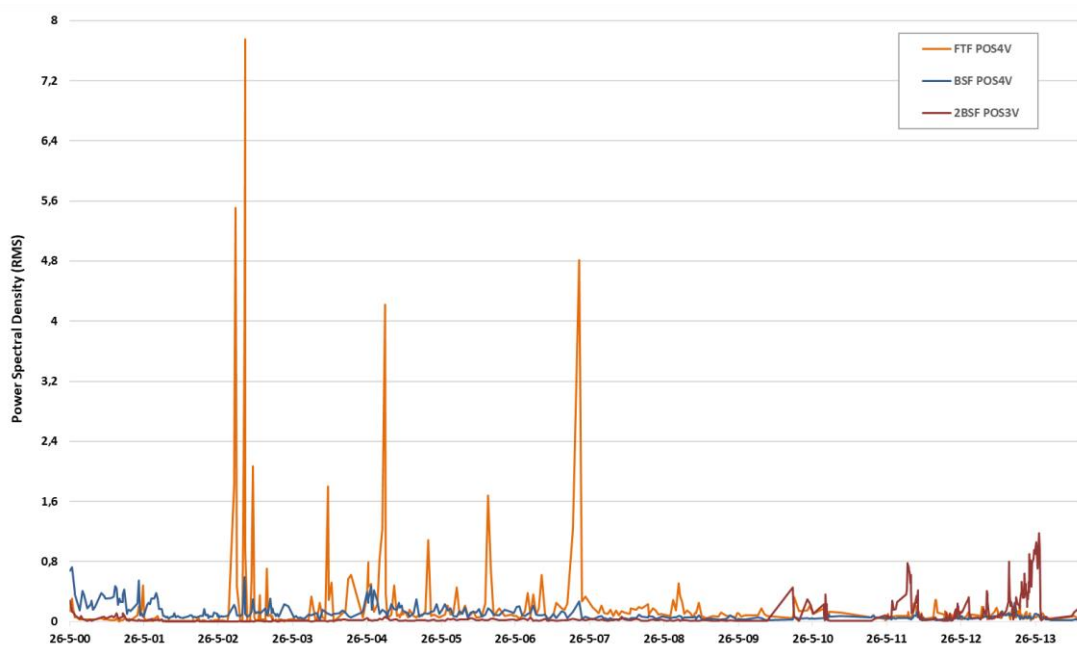


Figura 87. Gráfico comparativo de las frecuencias más importantes del rodamiento SKFNU322.

6.5.7. Análisis de FTF con SPEED y Álabes

Tras el estudio de las variables del rodamiento SKFNU322, se comparan estos con los resultados de las otras dos variables de estudio, como son la frecuencia de giro de la máquina denominada SPEED y la de los Álabes.

A continuación, se muestra la tabla de resultados en términos de RMS.

VARIABLE	SPEED Pos4V	FTF Pos4V	ÁLABES Pos3A
SUMA TOTAL	1606,085	97,480	245,778
MEDIA	2,612	0,159	0,399
VALOR PICO	11,644	7,747	3,354

Tabla 57. Resumen de frecuencias SPEED, ÁLABES y FTF en RMS.

Se observa en la tabla que la frecuencia más importante es la provocada por la propia máquina, muy por encima de los álabes y de la jaula del rodamiento o FTF.

Al comprobar los valores picos se vuelve a tener como referencia a SPEED, con 11,644 RMS, pero en este caso la segunda no es la generada por los álabes sino por la frecuencia FTF SKFNU322, quedando en tercer lugar la de los álabes, como se muestra en la figura.

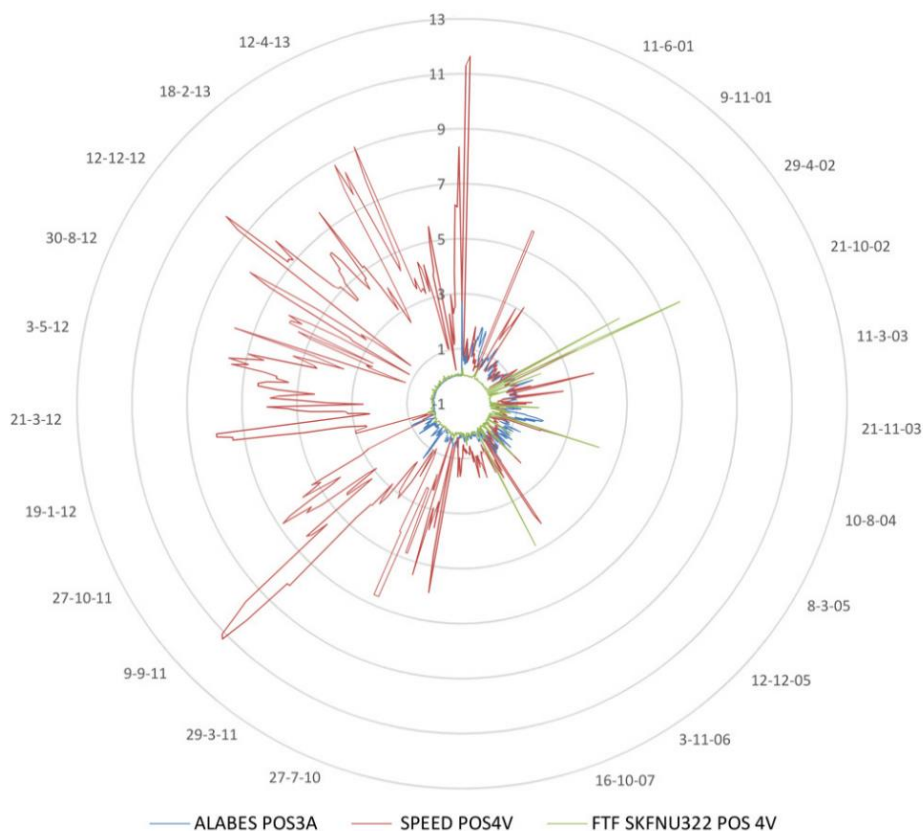


Figura 88. Comparación de las frecuencias SPEED, ÁLABES y FTF en RMS.

6.6. Análisis del rodamiento SKF6322

6.6.1. Análisis de la frecuencia FTF

La siguiente parte del estudio aborda cómo se comportan las frecuencias

características del rodamiento SKF6322.

La siguiente frecuencia de estudio será la generada por la jaula del rodamiento SKF6322, referenciada en este estudio como FTF.

El análisis se realiza tomando los valores de todo el muestreo en las posiciones de medida, posición 3 y 4, y en los tres ejes coordenados, horizontal vertical y axial.

Tras el análisis de las cinco frecuencias más importantes del rodamiento SKF6322, se compara la de mayor valor energético en términos de RMS con la generada por el giro de la máquina SPEED y los álabes, con el propósito de discernir las frecuencias más determinantes y los puntos donde mayor es su efecto.

El análisis de las frecuencias características del rodamiento busca encontrar la frecuencia más determinante y la posición y eje donde su influencia es más determinante.

El análisis de la frecuencia generada por la jaula del rodamiento, en la posición 3 vertical, se realiza calculando la suma de valores obtenidos a lo largo de todo el estudio, en cada una de las posiciones y sus ejes.

Esto mismo se realiza con la media y el valor máximo o valor pico, todo en términos de RMS.

El resultado se muestra en la siguiente tabla:

POSICIÓN	FTF POS3H SKF6322	FTF POS3V SKF6322	FTF POS3A SKF6322
SUMA TOTAL	86,20	112,64	45,72
MEDIA	0,14	0,18	0,07
VALOR PICO	2,45	5,87	0,74

Tabla 58. Resumen de frecuencia FTF del rodamiento SKF6322 en términos de RMS posición 3.

Los valores máximos acumulados en toda la muestra de ensayos se encuentran en la posición 3 vertical, con un valor de 112,64 RMS, tras éste se encuentra el valor 86,2 RMS perteneciente al eje horizontal.

En la siguiente figura se pueden observar los resultados de la posición 3 en todos los ejes.

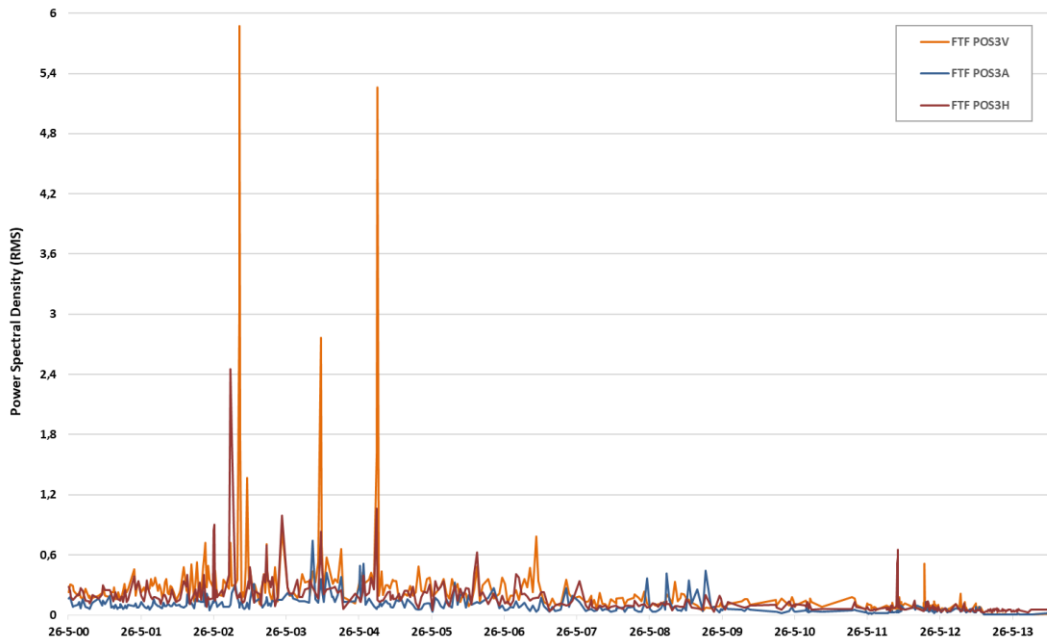


Figura 89. Gráfico comparativo de la frecuencia FTF – SKF6322 en RMS posición 3 (H, V, A).

Tras el análisis de la frecuencia FTF en la posición 3, se procede a evaluar los valores energéticos en la posición 4.

El resultado se muestra en la siguiente tabla:

POSICIÓN	FTF POS4H SKF6322	FTF POS4V SKF6322	FTF POS4A SKF6322
SUMA TOTAL	234,17	318,64	64,42
MEDIA	0,38	0,52	0,12
VALOR PICO	19,92	53,50	1,34

Tabla 59. Resumen de frecuencia FTF del rodamiento SKF6322 en términos de RMS posición 4.

Los valores máximos acumulados en toda la muestra de ensayos, se encuentran en la posición 4 vertical, con un valor de 318,64 RMS, tras este se encuentra la posición 3 vertical con, un valor de 234,17 RMS.

La siguiente frecuencia es la generada por la jaula de bolas e incide su efecto vibratorio en el eje axial de la posición 4.

En relación con los valores picos, obtenemos el mismo resultado que en los valores medios, siendo el eje vertical de la posición 4 el más determinante y donde más se percibe la frecuencia de la jaula de bolas.

A continuación, en la siguiente figura, se pueden ver los resultados de la posición 4 en los ejes horizontal, vertical y axial.

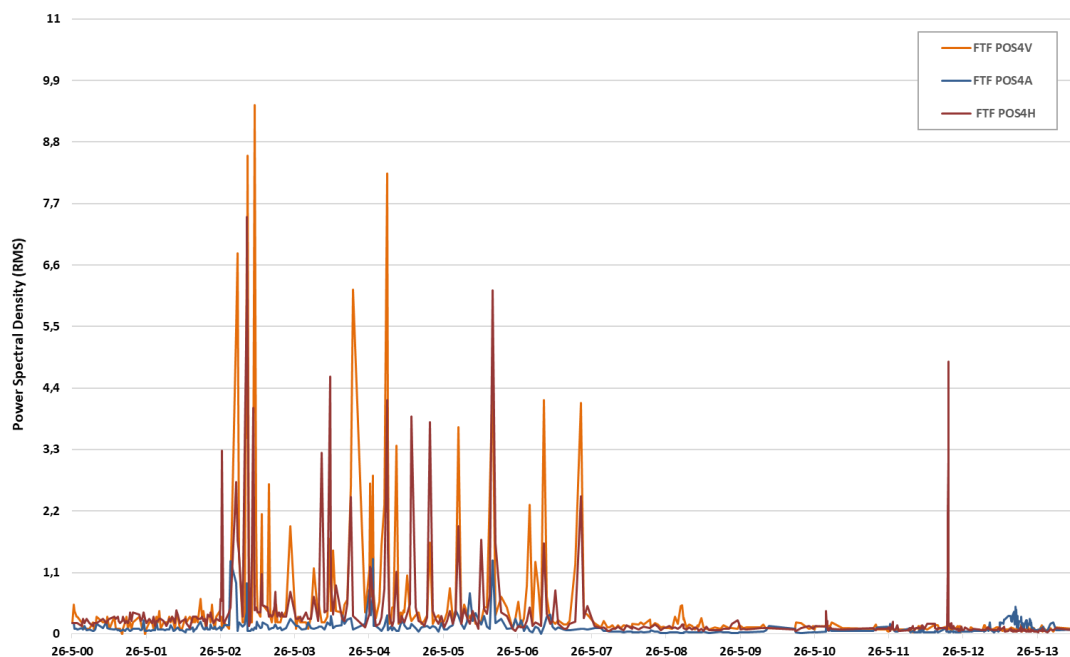


Figura 90. Gráfico comparativo de la frecuencia FTF – SKF6322 en RMS posición 4 (H, V, A).

Al realizar la comparativa entre los valores máximos acumulados, en toda la muestra de ensayos de las posiciones 3 y 4, se determina que en la posición 4 vertical adquiere un valor de 318,64 RMS y en la posición 3 el valor máximo se encuentra en el eje vertical, con 112,65 RMS.

Si se analizan las segundas posiciones, se ve que son los ejes horizontales los siguientes más afectados por esta frecuencia, con 234,17 y 86,21 RMS, para las posiciones 4 y 3 horizontal.

Todo ello indica que esta frecuencia causa mayor efecto en los ejes verticales y sobre todo en la posición 4.

Esto llevaría a hacer hincapié de cara al mantenimiento predictivo en estos dos ejes, para predecir una falla provocada por FTF, y dentro de las dos posiciones, la posición 4 sufre más del doble con respecto a la posición 3.

En el siguiente gráfico se compara la frecuencia de la jaula en los ejes más determinantes de cada posición.

El gráfico muestra la linealidad de los resultados, generando un patrón muy parejo entre las posiciones 3 y 4 vertical. Esta conclusión ayuda a pensar que se podría predecir el fallo de la jaula del rodamiento monitorizando sólo la posición 4 vertical.

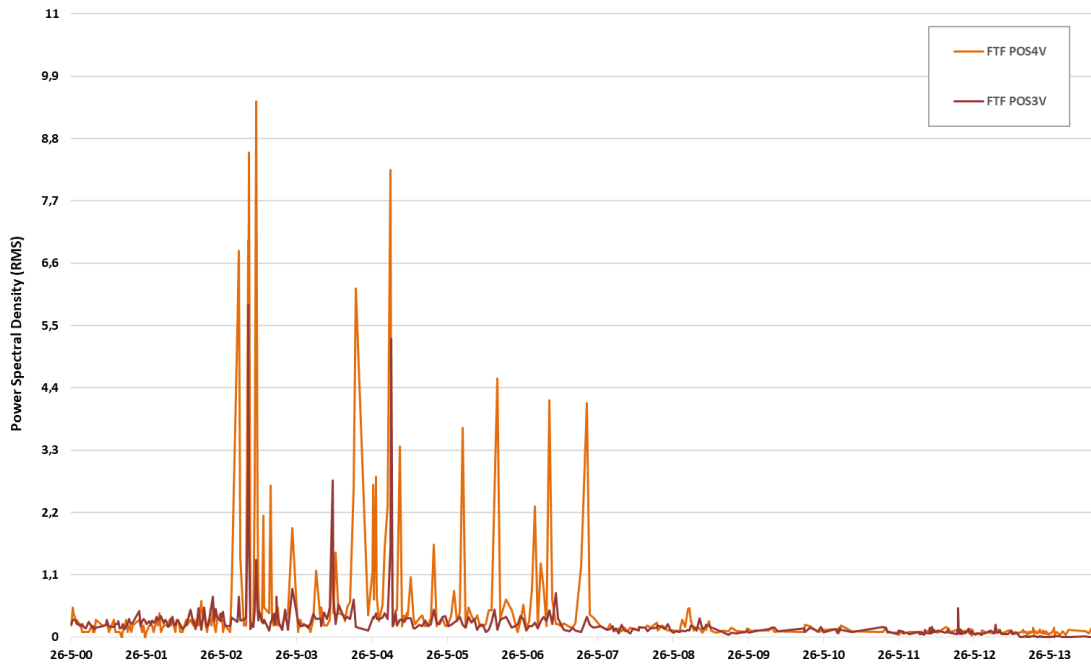


Figura 91. Gráfico comparativo de la frecuencia FTF – SKF6322 en RMS posición 4V y 3V.

6.6.2. Análisis de la frecuencia BSF

El siguiente paso será analizar la frecuencia generada por las bolas del rodamiento referenciada en este estudio como BSF, en la posición 3 vertical. Para ello se calcula la suma de valores obtenidos a lo largo de todo el estudio en cada una de las posiciones y sus ejes, esto mismo se realiza con la media y el valor máximo o valor pico, todo en términos de RMS.

El resultado se muestra en la siguiente tabla:

POSICIÓN	BSF POS3H SKF6322	BSF POS3V SKF6322	BSF POS3A SKF6322
SUMA TOTAL	29,11	21,71	20,96
MEDIA	0,05	0,04	0,03
VALOR PICO	0,25	0,66	0,19

Tabla 60. Resumen de frecuencia BSF del rodamiento SKF6322 en términos de RMS posición 3.

Los valores máximos acumulados en toda la muestra de ensayos se encuentran en la posición 3 horizontal, con un valor de 29,11 RMS, tras este valor se encuentra la posición 3 vertical, con un valor de 21,71 RMS.

En la siguiente figura se puede ver los resultados de la posición 3 en todos los ejes.

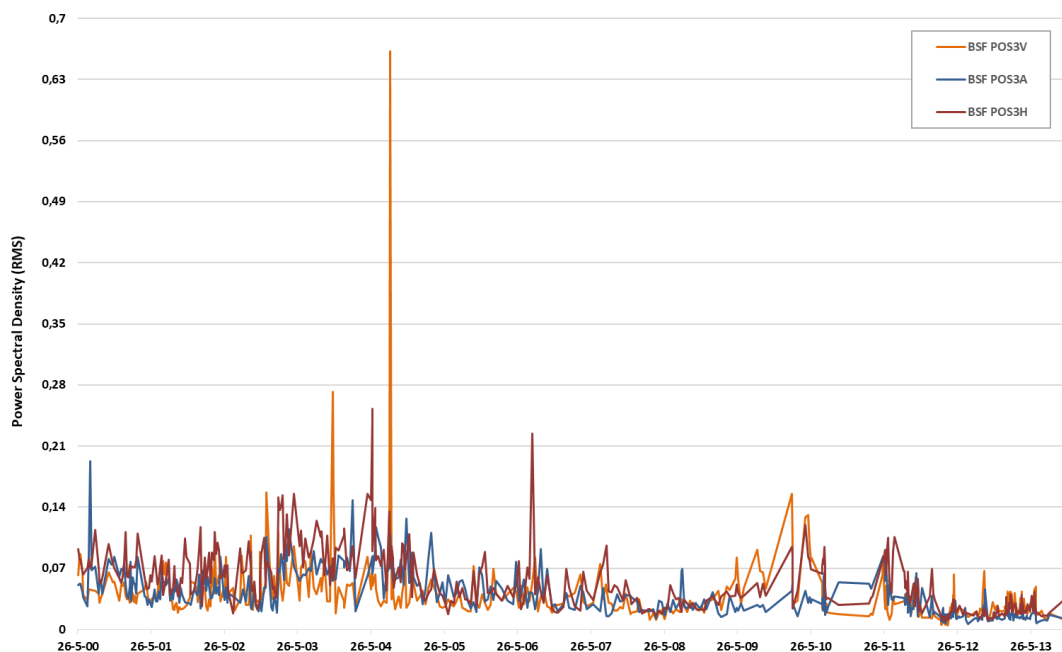


Figura 92. Gráfico comparativo de la frecuencia BSF – SKF6322 en RMS posición 3 (H, V, A).

Tras el análisis de la frecuencia BSF en la posición 3, se procede a evaluar los valores energéticos en la posición 4.

Para este estudio, se calcula la suma de valores obtenidos a lo largo de todo el estudio en cada una de las posiciones y sus ejes, esto mismo se realiza con la media y el valor máximo o valor pico, todo en términos de RMS.

El resultado se muestra en la siguiente tabla:

POSICIÓN	BSF POS4H SKF6322	BSF POS4V SKF6322	BSF POS4A SKF6322
SUMA TOTAL	35,44	62,10	37,87
MEDIA	0,06	0,10	0,07
VALOR PICO	0,62	2,07	2,08

Tabla 61. Resumen de frecuencia BSF del rodamiento SKF6322 en términos de RMS posición 4.

Los valores máximos acumulados se encuentran en la posición 4 vertical, con un valor de 62,1 RMS, tras este se encuentra la posición 4 horizontal, con un valor de 35,44 RMS.

En la siguiente figura se puede observar los resultados de la posición 4 en todos los ejes.

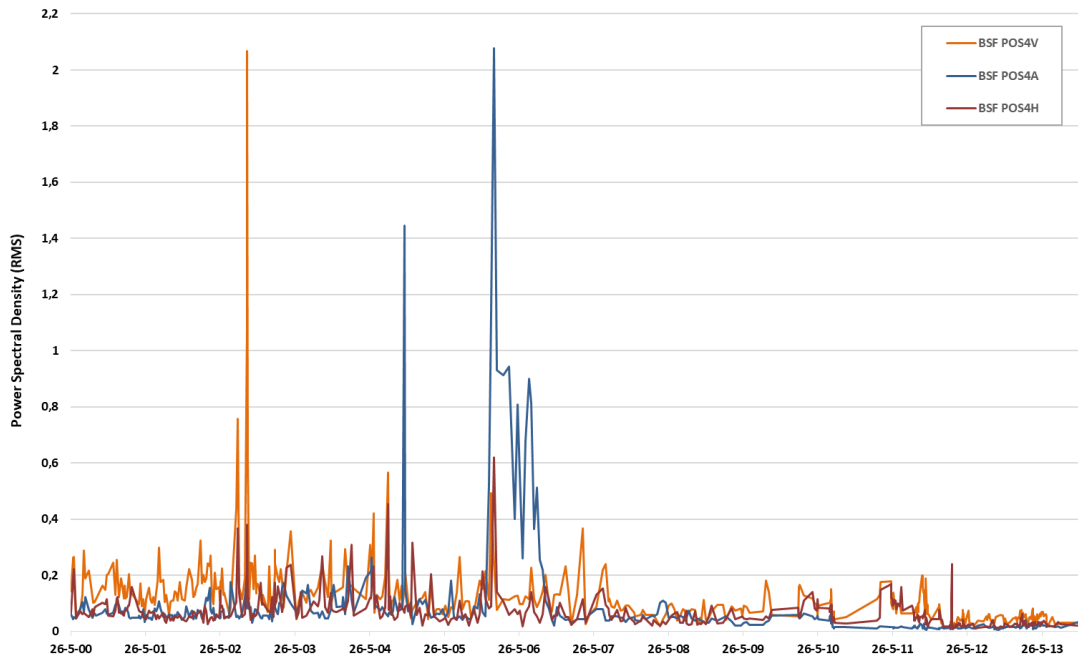


Figura 93. Gráfico comparativo de la frecuencia BSF – SKF6322 en RMS posición 4 (H, V, A).

Al realizar la comparativa entre las posiciones 3 y 4, se puede ver que en la posición 4 vertical se obtiene un valor de 62,1 RMS y el de la posición 3 se encuentra en el eje horizontal, con 29,11 RMS.

Al analizar las segundas posiciones se observa que son los ejes horizontales los siguientes más afectados por esta frecuencia, con 35,44 y 21,71 RMS, respectivamente, para las posiciones 4 y 3 en los ejes horizontal y vertical.

Todo ello indica que esta frecuencia causa mayor efecto en los ejes verticales y en este caso en la posición 4.

Esto llevaría a hacer hincapié de cara al mantenimiento predictivo en estos dos ejes, horizontal y vertical, para predecir una falla provocada por BSF, y dentro de las dos posiciones la posición 4.

En el siguiente gráfico se compara la frecuencia de BSF en los ejes más determinantes de cada posición.

El gráfico muestra otro elemento importantísimo, como en el caso de la frecuencia FTF, y es la linealidad de los resultados, generando un patrón muy parejo entre las posiciones 3 y 4 vertical.

Esta conclusión ayuda a pensar que se podría predecir el fallo de la frecuencia de bolas del rodamiento monitorizando sólo la posición 4 vertical.

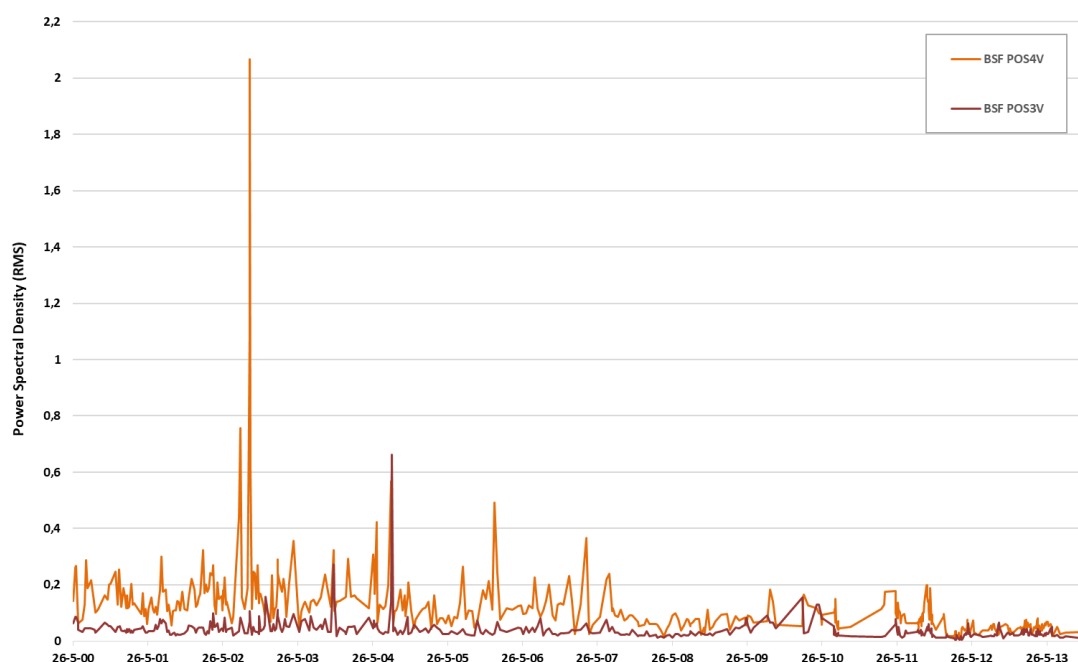


Figura 94. Gráfico comparativo de la frecuencia BSF – SKF6322 en RMS posición 4V y 3V.

6.6.3. Análisis de la frecuencia BPOR

La siguiente parte del estudio aborda cómo se comportan las frecuencias características del rodamiento SKF6322. Se continúa analizando la frecuencia generada por las bolas en la pista exterior del rodamiento referenciada en este estudio como BPOR.

Se continúa analizando la posición 3 vertical, para ello se calcula la suma de valores obtenidos en cada una de las posiciones y sus ejes, esto mismo se realiza con la media y el valor máximo o valor pico, todo en términos de RMS.

El resultado se muestra en la siguiente tabla:

POSICIÓN	BPOR POS3H SKF6322	BPOR POS3V SKF6322	BPOR POS3A SKF6322
SUMA TOTAL	17,38	18,01	26,21
MEDIA	0,03	0,03	0,04
VALOR PICO	0,25	0,36	0,21

Tabla 62. Resumen de frecuencia BPOR del rodamiento SKF6322 en términos de RMS posición 3.

Los valores máximos acumulados se encuentran en la posición 3 axial, con un valor de 26,21 RMS, tras este aparece la posición 3 vertical, con un valor de 18,01 RMS.

En la siguiente figura se pueden observar los resultados de la posición 3 en todos los ejes.

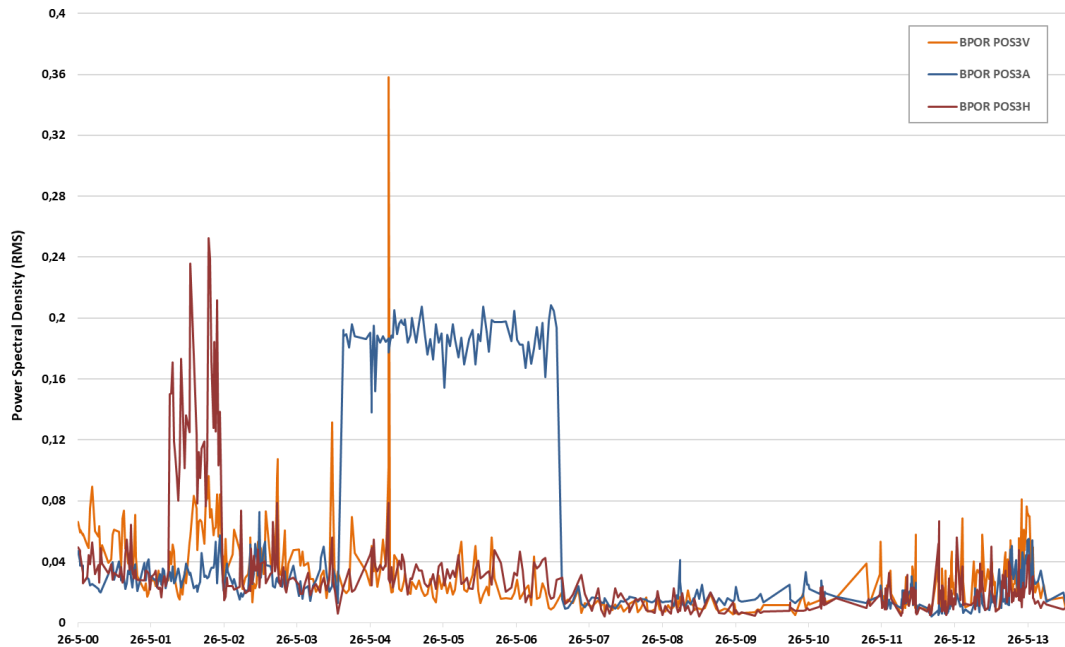


Figura 95. Gráfico comparativo de la frecuencia BPOR – SKF6322 en RMS posición 3 (H, V, A).

Tras el análisis de la frecuencia BPOR en la posición 3, se procede a evaluar los valores energéticos en la posición 4.

Para este estudio, se calcula la suma de valores obtenidos en cada una de las posiciones y sus ejes, esto mismo se realiza con la media y el valor máximo o valor pico, todo en términos de RMS.

El resultado se muestra en la siguiente tabla:

POSICIÓN	BPOR POS4H SKF6322	BPOR POS4V SKF6322	BPOR POS4A SKF6322
SUMA TOTAL	14,98	18,35	13,76
MEDIA	0,02	0,03	0,03
VALOR PICO	0,24	1,13	0,13

Tabla 63. Resumen de frecuencia BPOR del rodamiento SKF6322 en términos de RMS posición 4.

Los valores máximos acumulados se encuentran en la posición 4 vertical, con un valor de 18,35 RMS, tras este se encuentra la posición 4 horizontal, con un valor de 14,98 RMS.

En la siguiente figura se pueden observar los resultados de la posición 4 en todos los ejes.

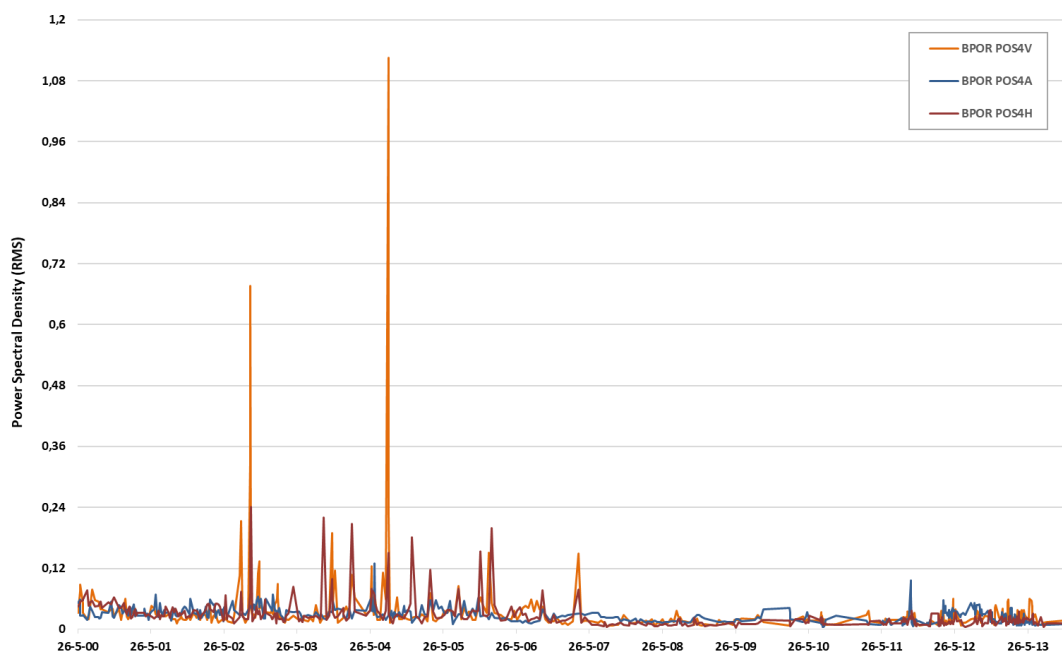


Figura 96. Gráfico comparativo de la frecuencia BPOR – SKF6322 en RMS posición 4 (H, V, A).

Al realizar la comparativa entre los valores máximos acumulados de las posiciones 3 y 4, se observa que en la posición 3 axial aparece un valor de 26,21 RMS y el de la posición 4 se encuentra en el eje vertical con 18,35 RMS.

Si se analizan las segundas posiciones se puede observar que son el eje vertical, con 18,01 RMS para la posición 3 y el horizontal para la posición 4, con 14,98 RMS, los que obtienen mayor valor total. Todo ello indica que esta frecuencia causa mayor efecto en el eje axial y en este caso en la posición 3.

Esto llevaría a hacer hincapié en estos dos ejes, axial y vertical, para predecir una falla provocada por BPOR, y dentro de las dos posiciones la posición 3 sufre más con respecto a la posición 4.

En el siguiente gráfico se compara la frecuencia de BPOR en los ejes más determinantes de cada posición.

Se muestra otro elemento importantísimo, como en el caso de la frecuencia BSF, y es la linealidad de los resultados.

Esta conclusión ayuda a pensar que se podría predecir el fallo de la frecuencia de la

pista exterior del rodamiento monitorizando sólo la posición 3 axial.

Hay que destacar que en todos los casos anteriores se encuentran los mayores valores en los ejes verticales, sin embargo, esta frecuencia genera mayor afección en el eje axial y en concreto en la posición 3.

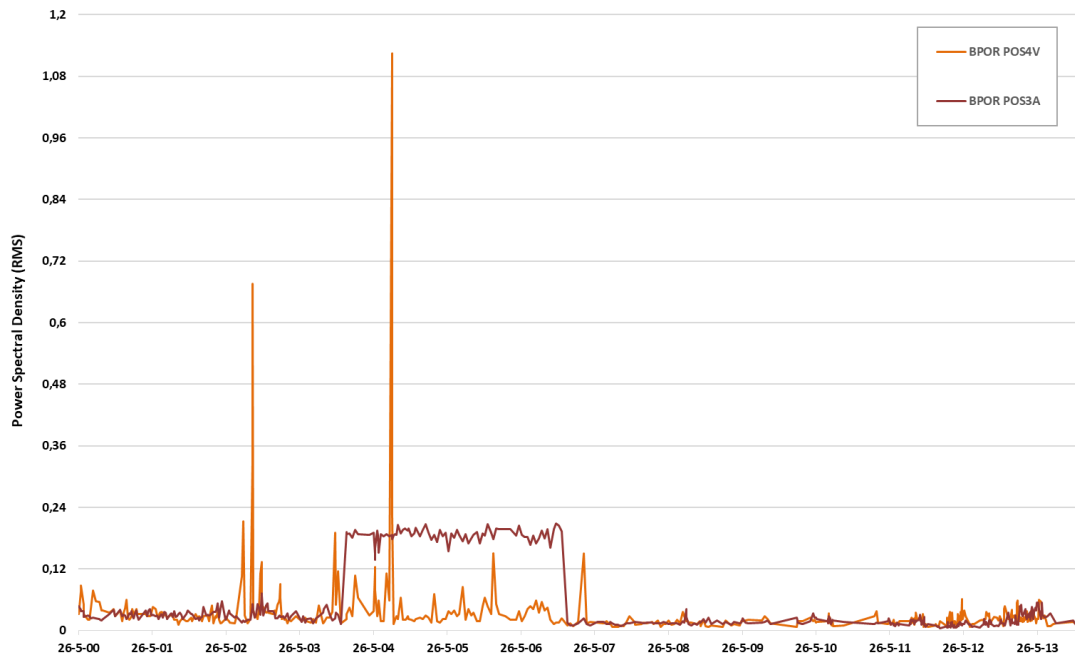


Figura 97. Gráfico comparativo de la frecuencia BPOR – SKF6322 en RMS posición 4V y 3V.

6.6.4. Análisis de la frecuencia BPIR

La siguiente parte del estudio aborda cómo se comportan las frecuencias características del rodamiento SKF6322. Se continúa analizando la frecuencia generada por las bolas en la pista interior del rodamiento referenciada en este estudio como BPIR.

Se inicia el estudio analizando la posición 3 vertical, para ello se calcula la suma de valores obtenidos en cada una de las posiciones y sus ejes, esto mismo se realiza con la media y el valor máximo o valor pico, todo en términos de RMS. El resultado se muestra en la siguiente tabla:

POSICIÓN	BPIR POS3H SKF6322	BPIR POS3V SKF6322	BPIR POS3A SKF6322
SUMA TOTAL	14,43	15,08	8,84
MEDIA	0,02	0,02	0,01
VALOR PICO	0,17	0,16	0,07

Tabla 64. Resumen de frecuencia BPIR del rodamiento SKF6322 en términos de RMS posición 3.

Los valores máximos acumulados en toda la muestra de ensayos se encuentran en la posición 3 vertical, con un valor de 15,08 RMS, tras este valor se obtiene el de la posición 3 vertical, con un valor de 14,43 RMS.

En la siguiente figura se ven los resultados de la posición 3 en todos los ejes.

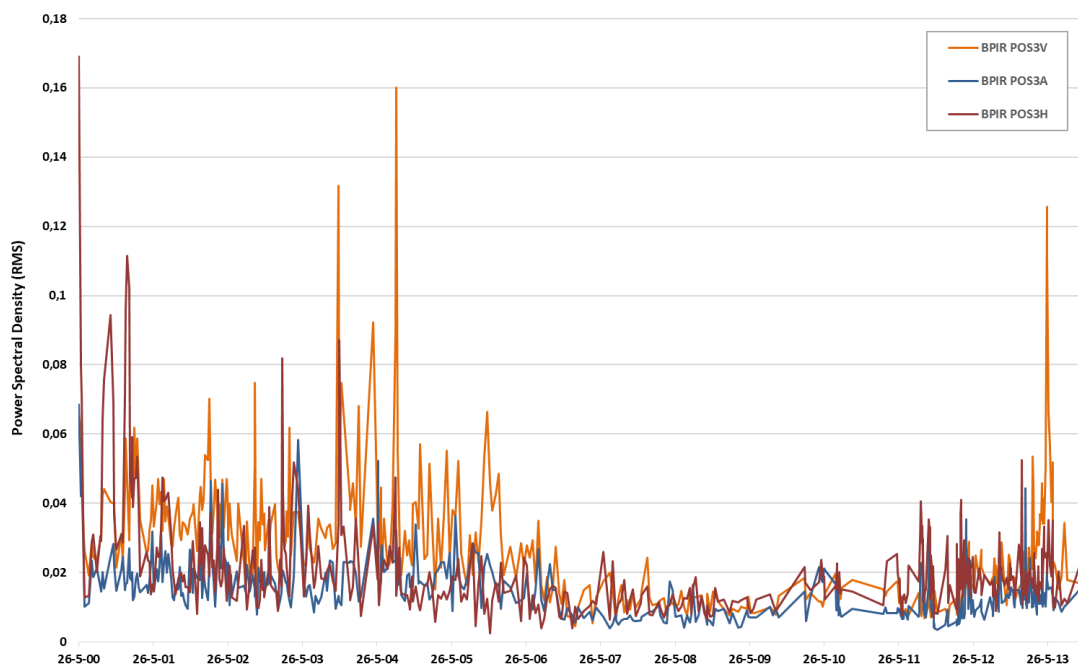


Figura 98. Gráfico comparativo de la frecuencia BPIR – SKF6322 en RMS posición 3 (H, V, A).

Tras el análisis de la frecuencia BPIR en la posición 3, se procede a evaluar los valores energéticos en la posición 4.

Para este estudio, se calcula la suma de valores en cada una de las posiciones y sus ejes, esto mismo se realiza con la media y el valor máximo o valor pico, todo en términos de RMS.

El resultado se muestra en la siguiente tabla:

POSICIÓN	BPIR POS4H SKF6322	BPIR POS4V SKF6322	BPIR POS4A SKF6322
SUMA TOTAL	15,47	15,97	7,96
MEDIA	0,03	0,02	0,01
VALOR PICO	0,29	0,47	0,06

Tabla 65. Resumen de frecuencia BPIR del rodamiento SKF6322 en términos de RMS posición 4.

Los valores máximos acumulados se encuentran en la posición 4 vertical, con un valor de 15,97 RMS, tras este se encuentra la posición 4 horizontal, con un valor de 15,47 RMS. Los valores máximos son muy similares pero los valores picos son mayores en el caso del

eje vertical.

En la siguiente figura se pueden ver los resultados de la posición 4 en todos los ejes.

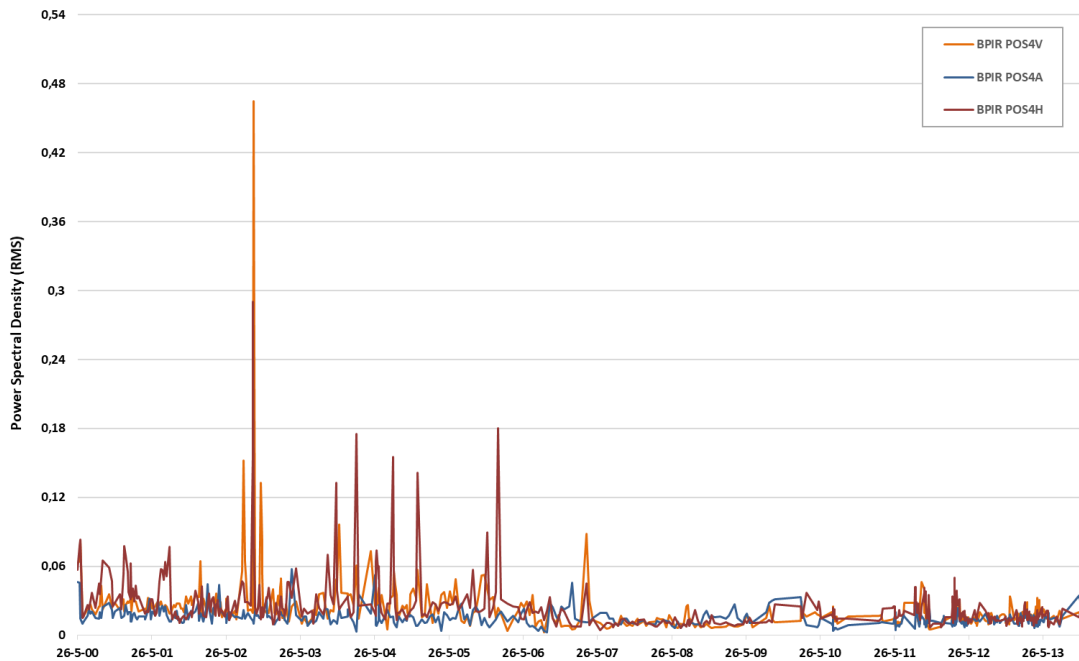


Figura 99. Gráfico comparativo de la frecuencia BPIR – SKF6322 en RMS posición 4 (H, V, A)

Al realizar la comparativa entre los valores máximos acumulados de las posiciones 3 y 4, se puede observar que en la posición 4 vertical hay un valor de 15,97 RMS y el de la posición 3 el valor máximo se encuentra en el eje vertical con 15,08 RMS.

Al analizar las segundas posiciones se observan que son los ejes horizontales y los valores de esta frecuencia son 15,47 RMS y 14,43 RMS, respectivamente, para las posiciones 4 y 3 horizontal.

Todo ello indica que esta frecuencia causa mayor efecto en los ejes verticales y en este caso en la posición 4.

Esto llevaría a hacer hincapié en estos dos ejes, horizontal y vertical, para predecir una falla provocada por BPIR, y dentro de las dos posiciones la posición 4 sufre más con respecto a la posición 3.

En el siguiente gráfico se compara la frecuencia de BPIR en los ejes más determinantes de cada posición.

El gráfico muestra otro elemento importantísimo, como en el caso de la frecuencia BPOR, y es la linealidad de los resultados.

Esta conclusión ayuda a pensar que se podría predecir el fallo de la frecuencia de la pista interior del rodamiento monitorizando sólo la posición 4 vertical.

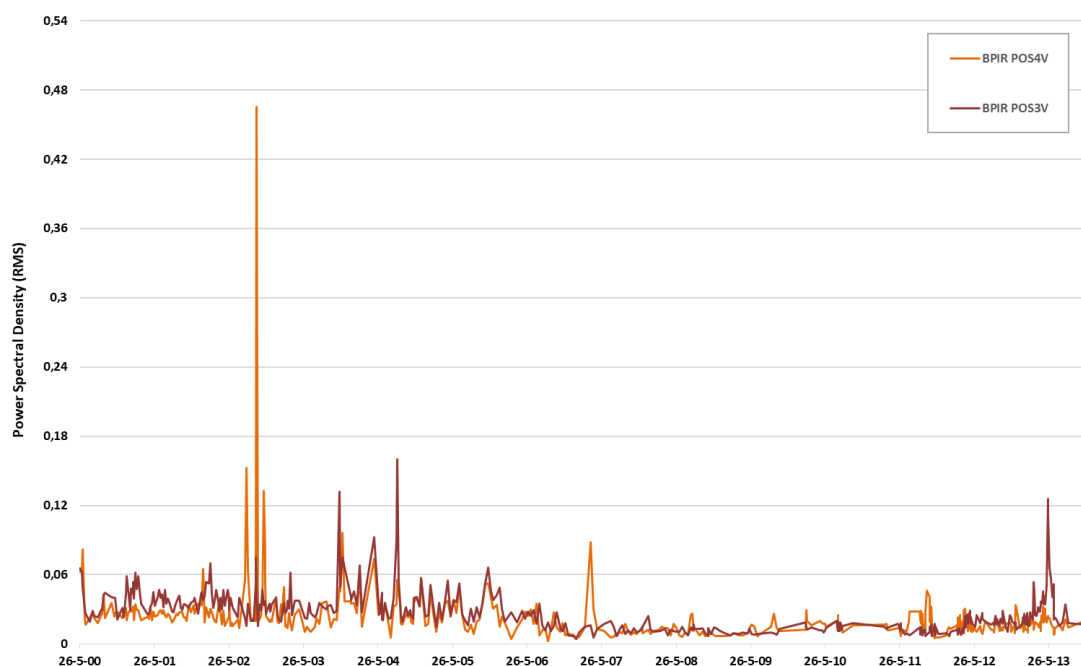


Figura 100. Gráfico comparativo de la frecuencia BPIR – SKF6322 en RMS posición 4V y 3V.

6.6.5. Análisis de la frecuencia 2BSF

La siguiente parte del estudio aborda cómo se comportan las frecuencias características del rodamiento SKF6322. Se continúa analizando la frecuencia generada por las bolas en este caso su segundo armónico referenciada en este estudio como 2BSF.

Se sigue analizando la posición 3 vertical, para ello se calcula la suma de valores obtenidos en cada una de las posiciones y sus ejes, esto mismo se realiza con la media y el valor máximo o valor pico todo en términos de RMS.

El resultado se muestra en la siguiente tabla:

POSICIÓN	2BSF POS3H SKF6322	2BSF POS3V SKF6322	2BSF POS3A SKF6322
SUMA TOTAL	14,22	20,81	10,05
MEDIA	0,02	0,03	0,02
VALOR PICO	0,11	0,17	0,08

Tabla 66. Resumen de frecuencia 2BSF del rodamiento SKF6322 en términos de RMS posición 3.

Los valores máximos acumulados en toda la muestra de ensayos se encuentran en la posición 3 vertical, con un valor de 20,81 RMS, tras este valor se continúa con la posición 3

horizontal, con un valor de 14,22 RMS.

En la siguiente figura se pueden observar los resultados de la posición 3 en todos los ejes.

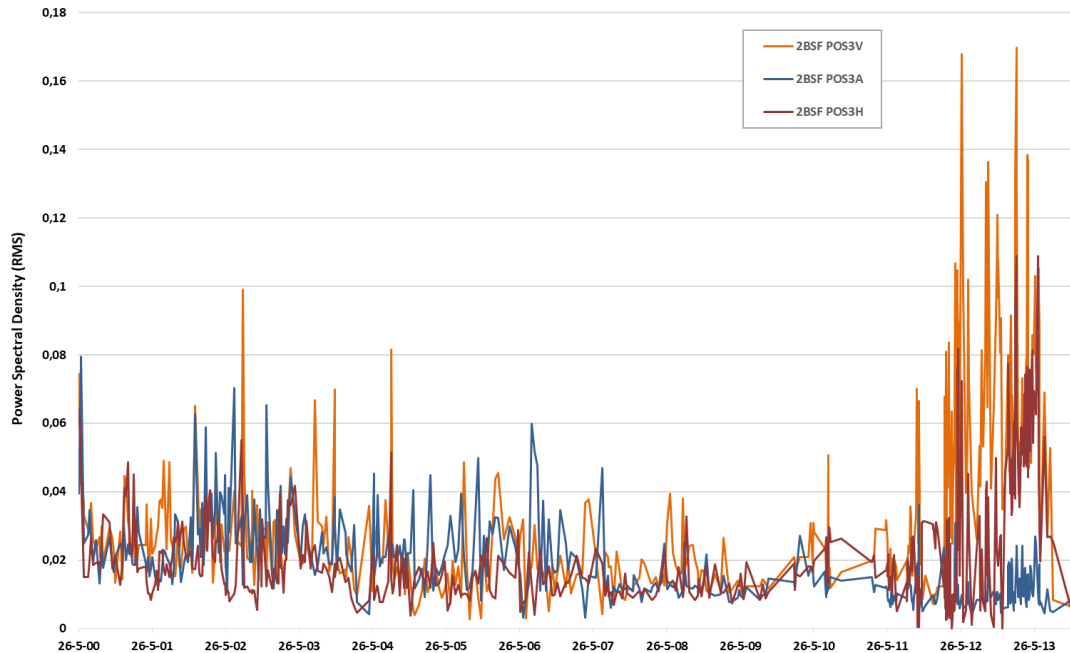


Figura 101. Gráfico comparativo de la frecuencia 2BSF – SKF6322 en RMS posición 3 (H, V, A).

Tras el análisis de la frecuencia BPIR en la posición 3, se procede a evaluar los valores energéticos en la posición 4.

Para este estudio, se calcula la suma de valores obtenidos en cada una de las posiciones y sus ejes, esto mismo se realiza con la media y el valor máximo o valor pico, todo en términos de RMS.

El resultado se muestra en la siguiente tabla:

POSICIÓN	2BSF POS4H SKF6322	2BSF POS4V SKF6322	2BSF POS4A SKF6322
SUMA TOTAL	18,32	20,26	9,04
MEDIA	0,03	0,03	0,02
VALOR PICO	0,38	0,27	0,07

Tabla 67. Resumen de frecuencia 2BSF del rodamiento SKF6322 en términos de RMS posición 4.

Los valores máximos acumulados se encuentran en la posición 4 vertical, con un valor de 20,26 RMS, tras este se encuentra la posición 4 horizontal, con un valor de 18,32 RMS.

En la siguiente figura se pueden ver los resultados de la posición 4 en todos los ejes.

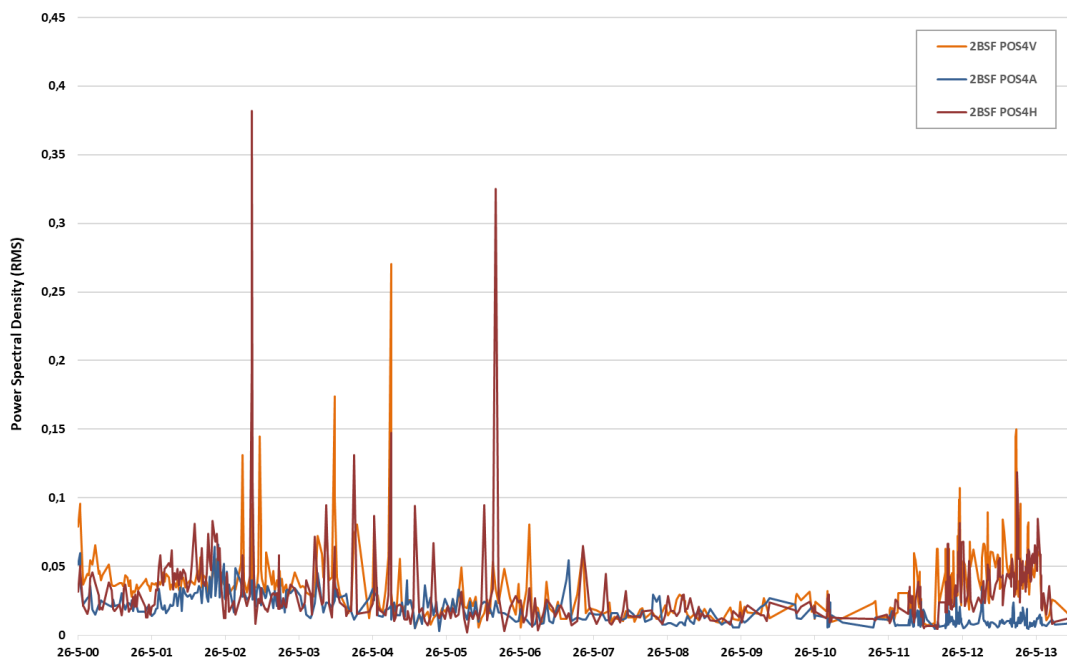


Figura 102. Gráfico comparativo de la frecuencia 2BSF – SKF6322 en RMS posición 4 (H, V, A).

Al realizar la comparativa entre los valores máximos acumulados de las posiciones 3 y 4, se observa que en la posición 3 vertical se obtiene un valor de 20,81 RMS y el de la posición 4 se encuentra en el eje vertical, con 20,26 RMS.

Si se analizan las segundas posiciones se ve que son los ejes horizontales, los más importantes. Los valores de esta frecuencia son 18,32 y 14,22 RMS, respectivamente, para las posiciones 4 y 3 horizontal.

Todo ello indica que esta frecuencia causa mayor efecto en los ejes verticales y en este caso en la posición 4, siendo esta frecuencia la única que tiene más incidencia en la posición 3.

Esto llevaría a hacer hincapié en estos dos ejes, horizontal y vertical, para predecir una falla provocada por 2BSF, y dentro de las dos posiciones la posición 3 sufre más con respecto a la posición 4.

En el siguiente gráfico se compara la frecuencia de 2BSF en los ejes más determinantes de cada posición.

El gráfico muestra otro elemento importantísimo, como en el caso de la frecuencia BPIR, y es la linealidad de los resultados. Esta conclusión ayuda a pensar que se podría predecir el fallo de la frecuencia del segundo armónico de la frecuencia de bolas del rodamiento, monitorizando sólo la posición 4 vertical.

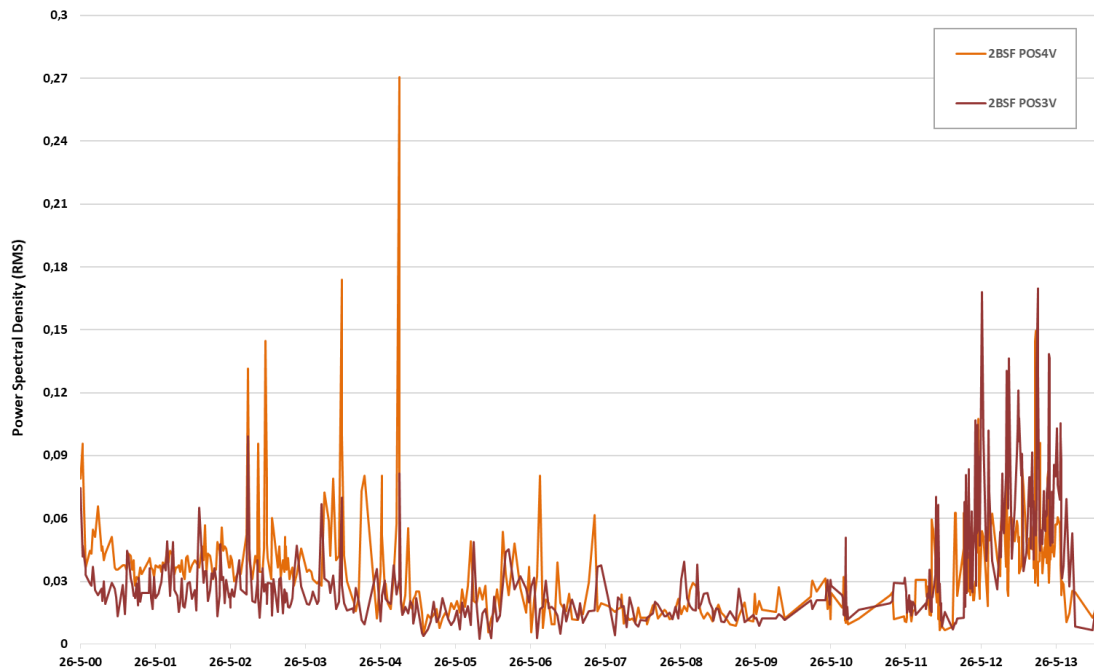


Figura 103. Gráfico comparativo de la frecuencia 2BSF – SKF6322 en RMS posición 4V y 3H.

6.6.6. Resultado del análisis de las frecuencias características

Tras el análisis de todas las variables significativas del rodamiento SKF6322 y su influencia en cada posición y eje de medida, se muestra en la siguiente tabla los resultados en términos de RMS.

VARIABLE	FTF Pos4V	BSF Pos4V	BPOR Pos4A	BPIR Pos3A	2BSF Pos3V
SUMA TOTAL	218,639	62,103	26,207	15,466	20,260
MEDIA	0,357	0,101	0,043	0,025	0,033
VALOR PICO	9,463	2,067	0,209	0,291	0,270

Tabla 68. Resumen de frecuencias del rodamiento en términos de RMS.

Las posiciones donde se generan estos valores máximos han sido: en la posición 4 vertical tanto para FTF, BSF como para 2BSF.

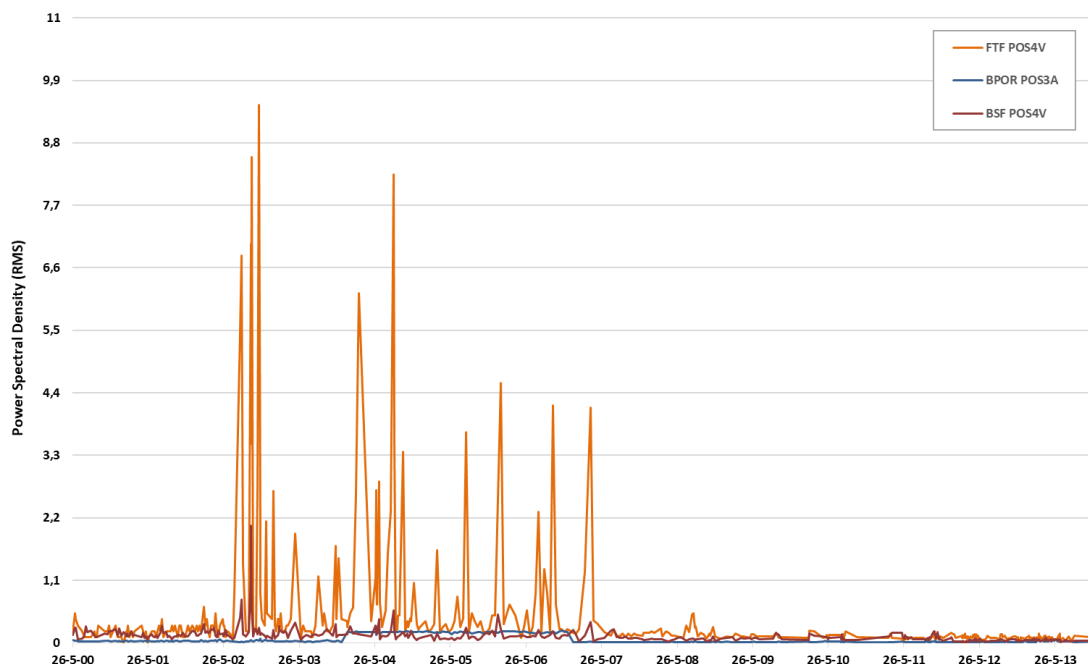


Figura 104. Gráfico resumen del rodamiento SKF6322 en RMS.

Las otras dos restantes, BPOR y BPIR, se encuentran en los ejes 3 axial y 4 horizontal, respectivamente. Las frecuencias generan su mayor influencia en el eje vertical, seguido del axial, dejando el eje horizontal como el menos importante.

6.6.7. Análisis de FTF con SPEED y Álabes

Tras el estudio de las variables del rodamiento SKF6322, se comparan estos la frecuencia de giro de la máquina denominada SPEED y la de los Álabes. A continuación, se muestra la tabla de resultados en términos de RMS.

VARIABLE	SPEED Pos4V	FTF Pos4V	ÁLABES Pos3A
SUMA TOTAL	1606,085	218,639	245,778
MEDIA	2,612	0,357	0,399
VALOR PICO	11,644	9,463	3,354

Tabla 69. Resumen de frecuencias SPEED, ÁLABES y FTF en términos de RMS.

Se observa en la tabla que la frecuencia más importante es la provocada por la propia máquina, muy por encima de los álabes y de la jaula del rodamiento o FTF.

Al comprobar los valores picos se vuelve a obtener como referencia a SPEED, con 11,644 RMS, pero en este caso la segunda no es la generada por los álabes sino por la frecuencia FTF SKF6322, quedando en tercer lugar la de los álabes.

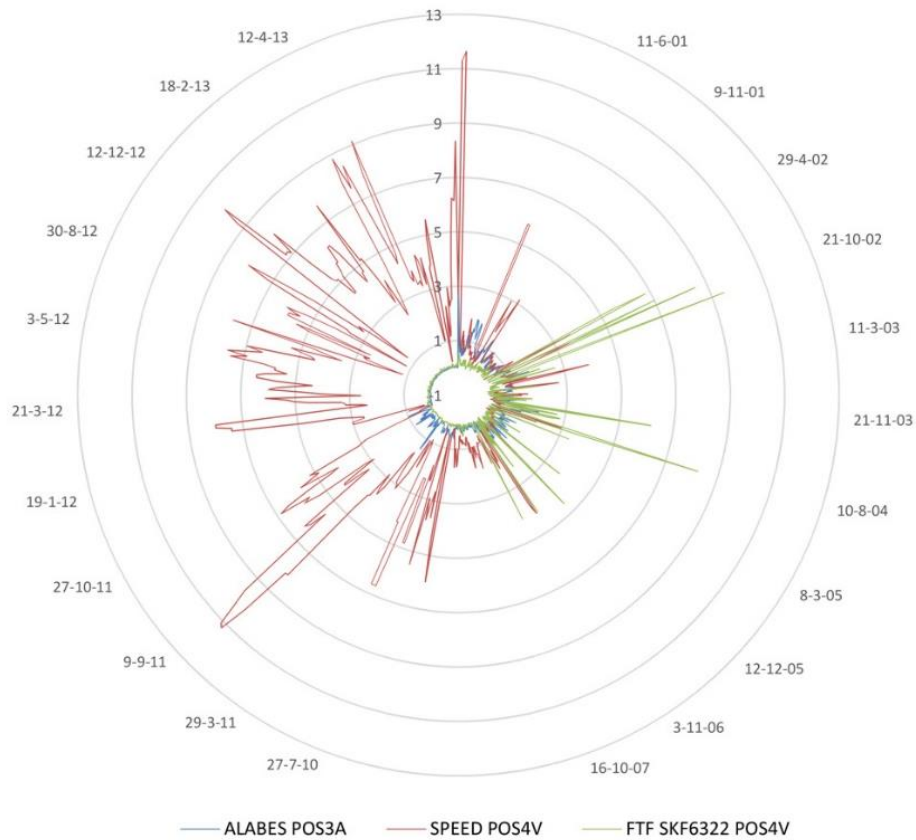


Figura 105. Comparativa de las frecuencias SPEED, ÁLABES y FTF SKF6322 en términos de RMS.

6.7. Análisis por RMS de la frecuencia más determinante de cada rodamiento

Tras analizar todos los rodamientos y su comparativa con las frecuencias típicas de este tipo de máquinas, se pasa a evaluar y comparar la frecuencia más determinante de cada rodamiento en relación con los otros dos.

Con este análisis se puede determinar qué elemento del rodamiento es el más susceptible a fallo y de los tres cuál está más expuesto a ello.

En la siguiente tabla se puede ver de cada rodamiento la frecuencia más significativa, su posición de medida y eje.

También se pueden valorar los valores totales y máximos.

VARIABLE	FTF FAGNU322 Pos4V	FTF SKF6322 Pos4V	FTF SKFNU322 Pos4V
SUMA TOTAL	217,471	218,639	97,480
MEDIA	0,355	0,357	0,159
VALOR PICO	10,056	9,463	7,747

Tabla 70. Resumen de frecuencias FTF de los tres rodamientos en términos de RMS.

Al realizar el análisis se puede decir que el riesgo de fallo de la jaula de los rodamientos FANU322 y SKF6322 es casi la misma, según los valores de suma total.

El análisis del valor pico aporta una valoración similar a la del valor cómputo total, arrojando valores casi parejos.

Se podría decir que la jaula de los rodamientos FANU322 y SKF6322 tiene un comportamiento similar. Para poder decir, si de cara al mantenimiento predictivo, se puede hacer la evaluación de ambos monitorizando uno sólo.

En la figura siguiente se puede ver como la linealidad de las frecuencias es casi perfecta, esto da confianza, para este caso concreto, que se podría realizar la monitorización de una posición y un solo eje para predecir la falla de los tres rodamientos.

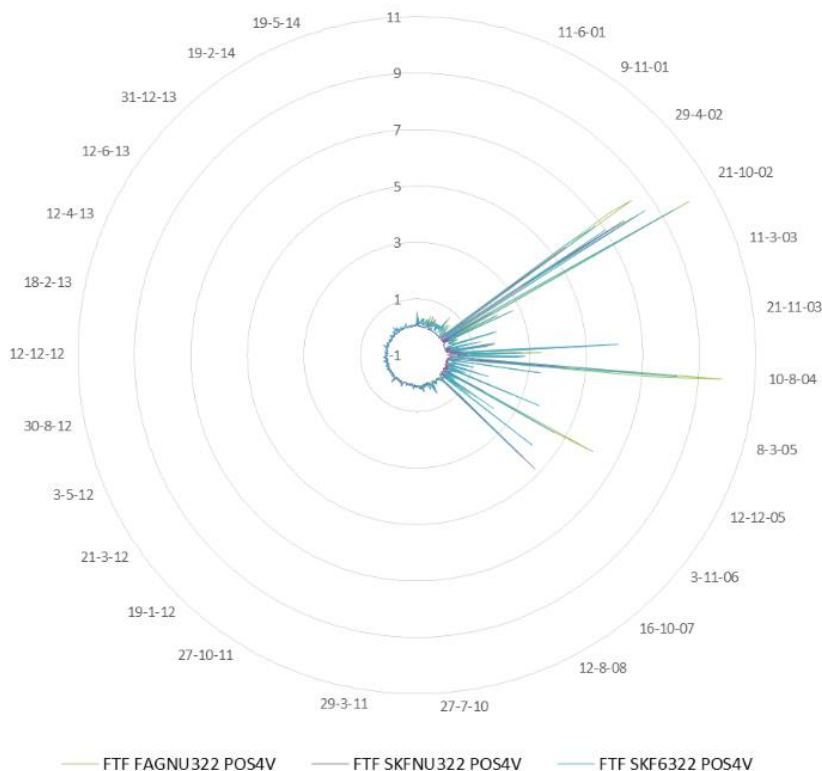


Figura 106. Gráfico de frecuencias FTF posición 4 V (RMS) (FANUG322-SKFNU322-SKF6322).

6.8. Conclusiones del Capítulo VI

6.8.1. Conclusiones del análisis del rodamiento FAGNU322

Se obtienen las siguientes conclusiones:

1. El estudio determina que la posición 4 es la más desfavorable y la que antes percibe los efectos energéticos vibracionales, generados por los elementos constituyentes del rodamiento en términos de RMS (mm/s). Se alcanza un valor acumulado en toda la serie 3.5 veces mayor que el de la posición 3.
2. En relación al eje, se puede afirmar que son los ejes verticales los más sensibles a la energía en densidad de potencia espectral, provocada por los elementos rotativos del rodamiento FAGNU322, y en concreto, el eje vertical de la posición 4.
3. En el análisis y comparativa de los valores acumulados máximos de las frecuencias de los elementos del rodamiento, se puede afirmar que es la generada por la jaula de éste la que alcanza un valor energético más elevado con 217,41 RMS (mm/s), en términos energéticos acumulados, muy por encima de la segunda variable, que es la frecuencia del segundo armónico de bolas, con 64,61 RMS (mm/s).
4. Los valores de energía picos generados por el rodamiento, determinan que son el eje vertical y la posición 4 donde son más incidentes, con un valor máximo de 10,056 RMS (mm/s), 10 veces más elevado que el segundo, que es la posición 3 horizontal. Todo esto se puede ver en la tabla 71.

VARIABLE	FTF Pos4V	BSF Pos4V	BPOR Pos4H	BPIR Pos4V	2BSF Pos3H
SUMA TOTAL	217,471	44,126	42,74	22,819	64,616
MEDIA	0,355	0,072	0,07	0,037	0,105
VALOR PICO	10,056	1,392	0,42	0,388	0,659

Tabla 71. Resumen de frecuencias del rodamiento FAGNU322 en términos de RMS.

- Los valores de energía picos y máximos generados por los distintos componentes del rodamiento determinan que es la jaula del rodamiento, referenciada como FTF, la que más perturbación vibracional provoca. Ésta es casi 10 veces más elevada que la siguiente generada por las bolas. La tercera frecuencia es la del segundo armónico. Todo ello se puede ver en la figura 107.

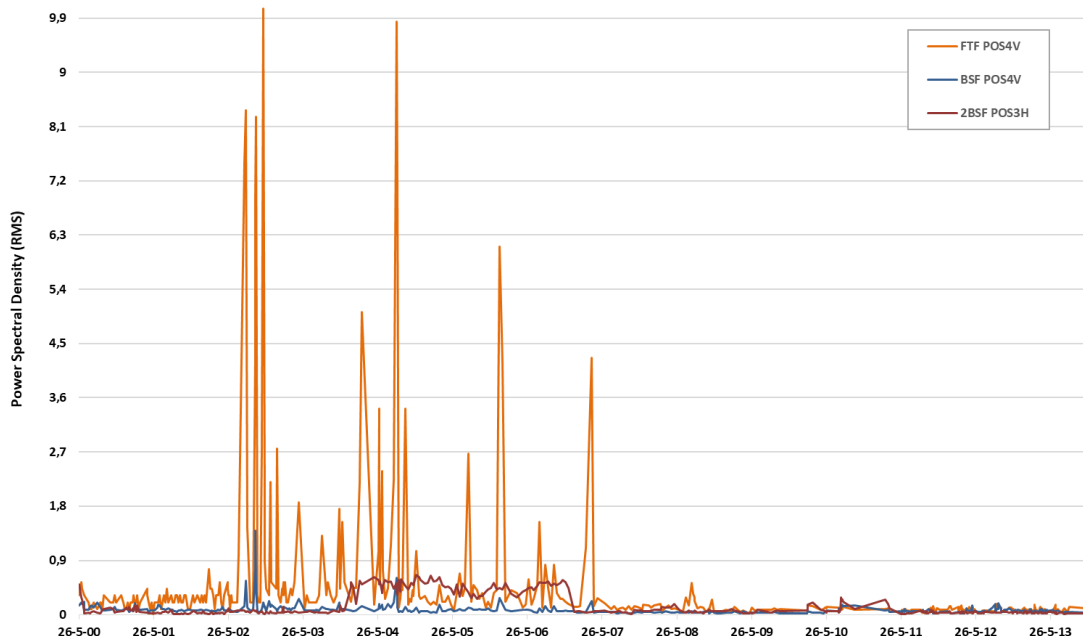


Figura 107. Gráfico comparativo de las frecuencias más importantes del rodamiento FAGNU322.

- El valor máximo generado por FTF del rodamiento FAGNU322, en comparación con las frecuencias SPEED y Alabes, para los valores máximo acumulados y pico, concluye que la frecuencia generada por el propio giro del equipo provoca un valor acumulado energético muy superior a las frecuencias anteriormente descritas, con 1606 RMS (mm/s), frente a los 217 RMS (mm/s) o los 245 RMS (mm/s) del FTF y Álabes.
- El análisis de valores picos obtiene el mismo resultado, dando como conclusión que es la frecuencia SPEED la que más energía genera de todo el equipo, en términos de densidad de potencia espectral. En la siguiente gráfica se puede ver la comparativa de las tres frecuencias.

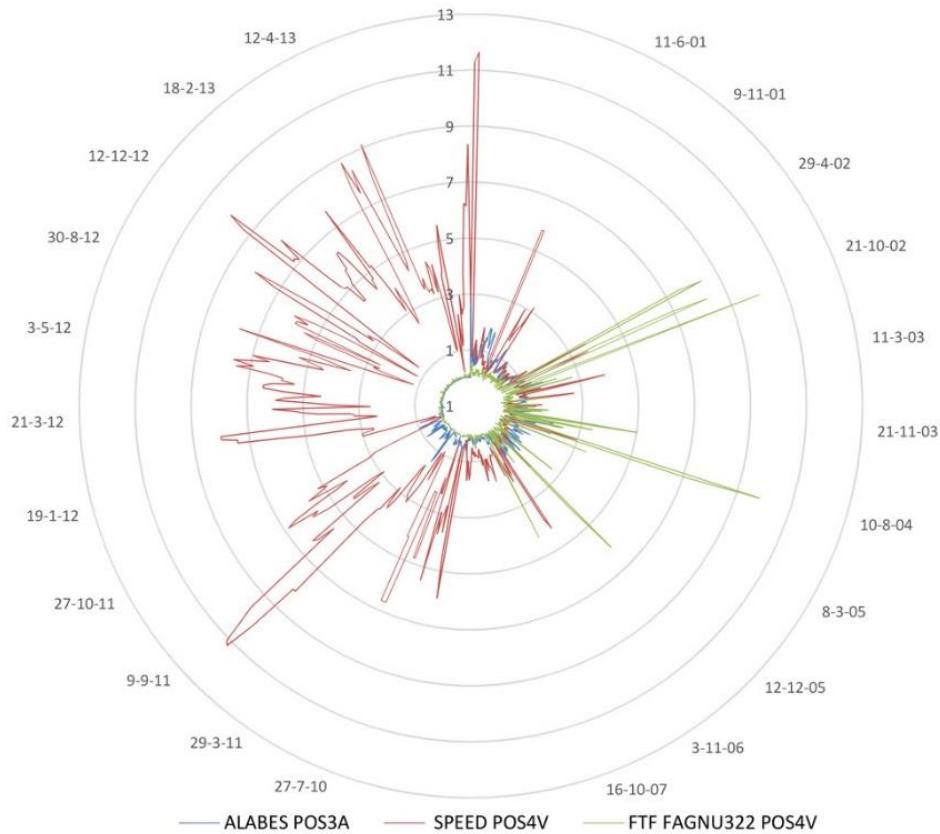


Figura 108. Comparativa de las frecuencias SPEED, ÁLABES y FTF FAGNU322 en términos de RMS (mm/s).

6.8.2. Conclusiones del análisis del rodamiento SKFNU322

Se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Las conclusiones que se derivan de la caracterización del análisis del rodamiento SKFNU322 son que la posición 4 y 3 son las que antes perciben los efectos energéticos en términos de densidad de potencia espectral, RMS (mm/s).
2. Los valores máximos acumulados determinan que ambas tienen una incidencia vibracional alta, con 119,70 y 97,48 RMS (mm/s) para las posiciones 3 y 4, respectivamente. El valor pico da como conclusión que es la posición 4 la más influyente, como se puede ver en la tabla número 72.

VARIABLE	FTF Pos4V	BSF Pos4V	BPOR Pos4A	BPIR Pos3A	2BSF Pos3V
SUMA TOTAL	97,480	56,812	28,448	52,048	119,701
MEDIA	0,159	0,093	0,053	0,085	0,195
VALOR PICO	7,747	0,727	0,411	0,593	1,573

Tabla 72. Resumen de frecuencias del rodamiento en términos de RMS.

3. En relación al eje, se puede afirmar que son los ejes verticales los más sensibles a la energía vibracional, provocada por los elementos rotativos del rodamiento SKFNU322, y en concreto, el eje vertical de la posición 4.
4. El análisis y comparativa de los valores acumulados máximos de las frecuencias de los elementos del rodamiento, concluye que es la frecuencia generada por el segundo armónico la que alcanza valores acumulados mayores. Esta afirmación está condicionada por el valor pico, determinando que en el computo energético es más determinante la variable generada por la jaula del rodamiento FTF, con un valor pico de 7,747 RMS (mm/s), frente a los 1,57 RMS (mm/s) de la frecuencia 2BSF.
5. Los valores de energía picos y máximos generados por los distintos componentes del rodamiento, determinan que es la jaula del rodamiento, referenciada como FTF, la que más perturbación vibracional provoca. Todo ello se puede ver en la figura 109.

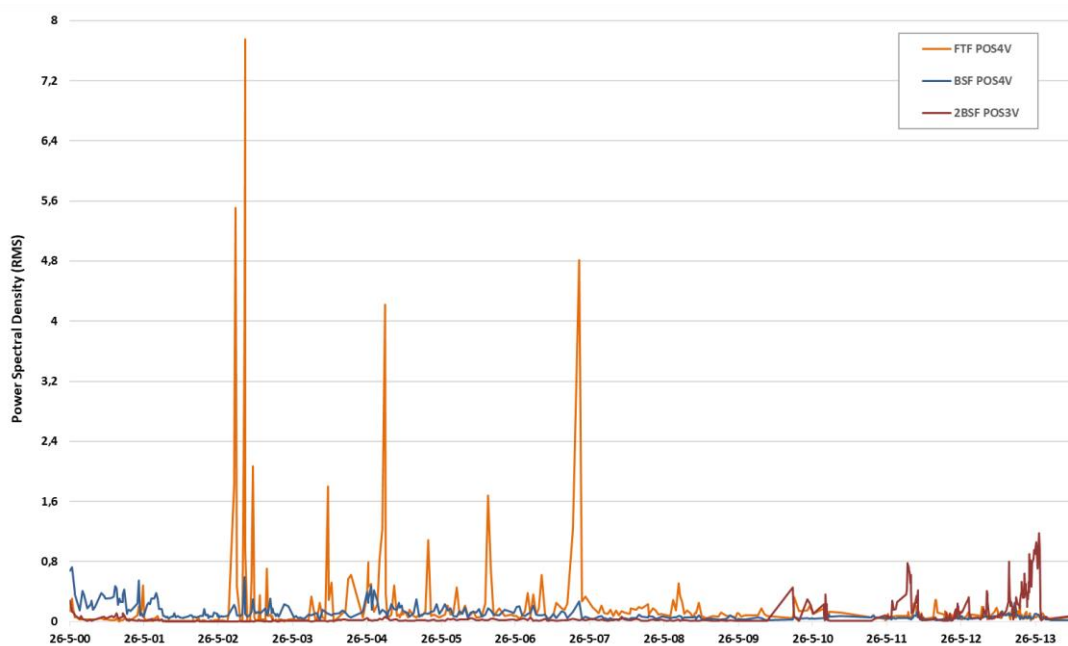


Figura 109. Gráfico comparativo de las frecuencias más importantes del rodamiento SKFNU322.

6. La frecuencia más determinante del rodamiento SKFNU322, en comparación con las frecuencias SPEED y Alabes, para los valores máximo acumulados y pico, concluye que la frecuencia generada por el propio giro del equipo provoca un valor acumulado energético muy superior a las frecuencias anteriormente descritas, con 1606 RMS (mm/s) de SPEED, frente a los 217 RMS (mm/s) de Alabes, o los 97,48 RMS (mm/s) del FTF. En la siguiente gráfica se puede ver la comparativa de las tres frecuencias.

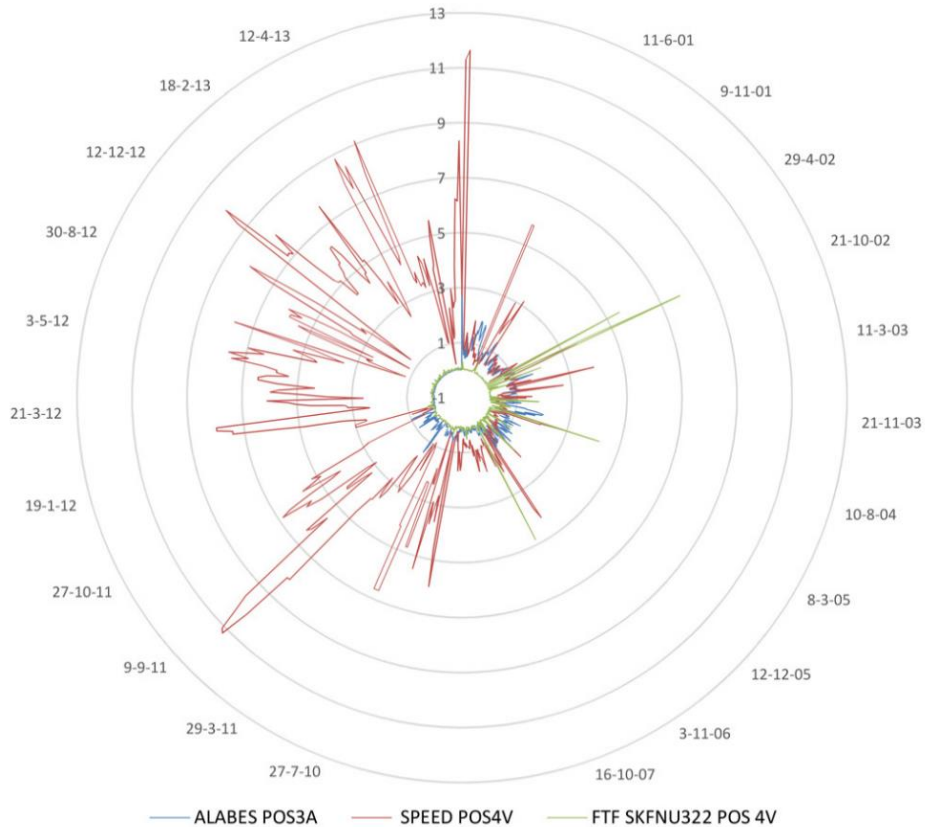


Figura 110. Comparación de las frecuencias SPEED, ÁLABES y FTF en términos de RMS (mm/s).

6.8.3. Conclusiones del análisis del rodamiento SKF6322

Se obtienen las siguientes conclusiones:

1. El estudio determina que la posición 4 es la más sensible a los efectos energéticos vibracionales, generados por las frecuencias de los elementos del rodamiento. Se obtiene un valor acumulado en toda la serie diez veces mayor que el obtenido en la posición 3. La posición 4 es la que antes podrá determinar el fallo del rodamiento.
2. En relación al eje, se puede afirmar que son los ejes verticales los más sensibles a la energía en densidad de potencia espectral, provocada por los elementos rotativos del rodamiento.
3. El análisis de los valores acumulados máximos de las frecuencias de los elementos del rodamiento, concluye que es la generada por la FTF de éste la que alcanza un valor energético más elevado, con 218,63 RMS (mm/s) en términos energéticos acumulados, muy por encima de la segunda variable, que es la frecuencia generada por las bolas, con 62,10 RMS (mm/s).

- Los valores de energía picos generados por el rodamiento, determinan que son el eje vertical y la posición 4 donde son más incidentes, con un valor máximo de 9,463 RMS (mm/s), 32 veces más elevado que el segundo, que es la posición 3 axial. Todo esto se puede ver en la tabla 73.

VARIABLE	FTF Pos4V	BSF Pos4V	BPOR Pos4A	BPIR Pos3A	2BSF Pos3V
SUMA TOTAL	218,639	62,103	26,207	15,466	20,260
MEDIA	0,357	0,101	0,043	0,025	0,033
VALOR PICO	9,463	2,067	0,209	0,291	0,270

Tabla 73. Resumen de frecuencias del rodamiento en términos de RMS.

- Los valores de energía picos y máximos generados por los distintos componentes del rodamiento, determinan que es la jaula del rodamiento, referenciada como FTF, la que más perturbación vibracional provoca, siendo ésta veinte veces más elevada que la siguiente, generada por las bolas. La tercera frecuencia es la del segundo armónico de éstas. Todo ello se puede ver en la figura 111.

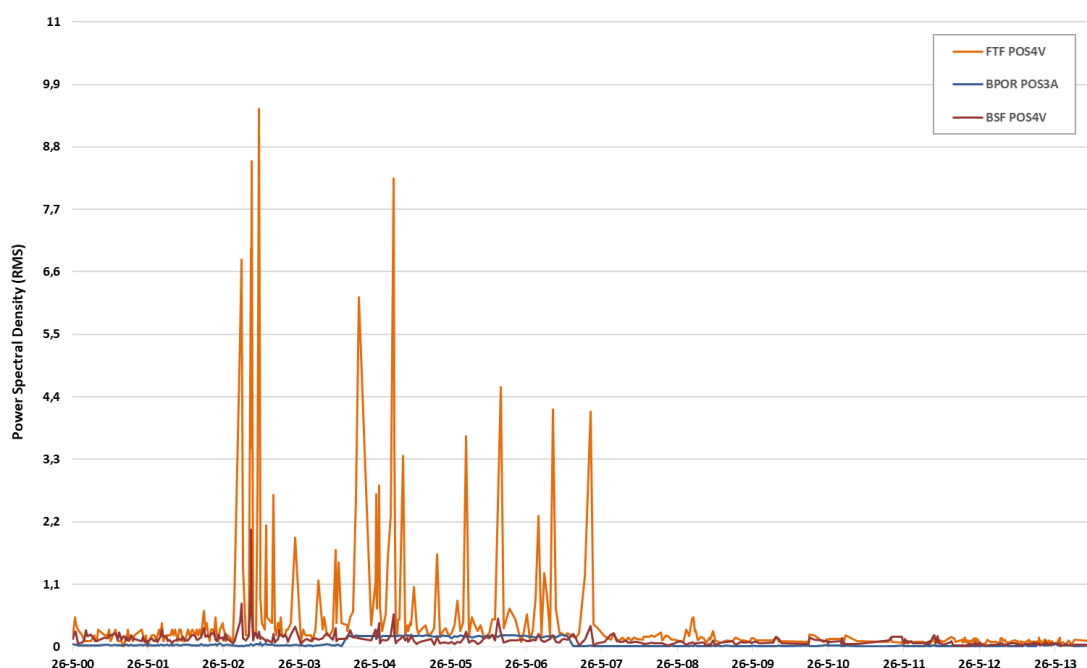


Figura 111. Gráfico comparativo de las frecuencias más importantes del rodamiento SKF6322.

- El valor máximo generado por FTF del rodamiento SKF6322, en comparación con las frecuencias SPEED y Alabes, para los valores máximo acumulados y pico, concluye que SPEED provoca un valor acumulado energético muy superior a las frecuencias anteriormente descritas, con 1606 RMS (mm/s), frente a los 217 RMS (mm/s), o los 218

RMS (mm/s) del FTF y Álabes.

7. En el análisis de valores picos se obtiene el mismo resultado, dando como conclusión que es la frecuencia SPEED la que más energía genera de todo el equipo, en términos de densidad de potencia espectral. En la siguiente gráfica se puede ver la comparativa de las tres frecuencias.

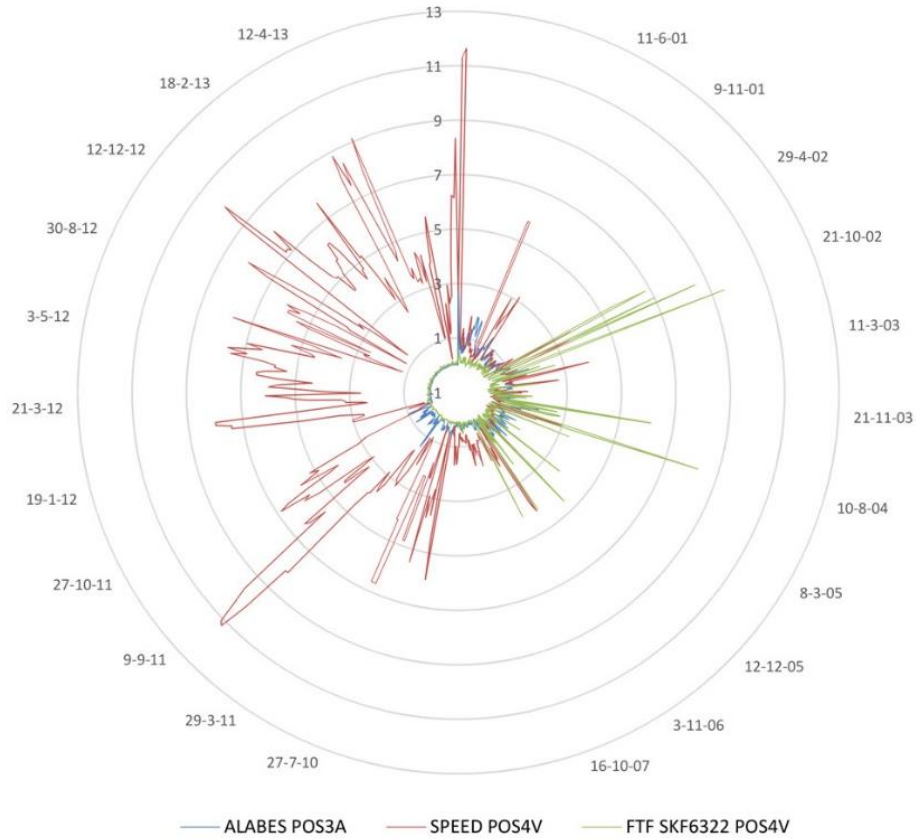


Figura 112. Comparativa de las frecuencias SPEED, ÁLABES y FTF SKF6322 en términos de RMS (mm/s).

CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

Como se indicó en el Capítulo I, el objetivo general de esta Tesis es validar el uso del método de propagación de Levenberg-Marquardt en un equipo soplante en condiciones reales de funcionamiento, definir qué punto de control de la máquina es el más sensible a las perturbaciones vibratorias y qué elemento rotativo es el que más sufre estos efectos energéticos.

El equipo estudiado es la parte impulsada o soplante, perteneciente a la empresa Atlantic Copper, ubicada en la Avda. Francisco Montenegro en Huelva. El conjunto consta de dos partes diferenciadas, el sistema de impulsión o motor y el impulsado o soplante. El conjunto de impulsión consta de un motor, marca Framesize, modelo 400 de 3.190 kg., con unas dimensiones de 1.900 x 910 mm., fijado a una bancada de acero de 2.100 x 3.900 x 300 mm. Ésta, a su vez, sirve de soporte y unión al sistema, formado por el equipo impulsor y por una soplante de 2.075 mm de diámetro de álabes. Todo ello se encuentra unido por un eje de 95 mm de diámetro y 3.900 mm de longitud.

Teniendo en cuenta este objetivo principal, en este último capítulo se presentan las conclusiones más importantes obtenidas tras la realización de la presente Tesis Doctoral. Así mismo, se exponen aquellas líneas de investigación que han surgido de este estudio, y que podrían abordarse a corto-medio plazo, como consecuencia de los nuevos problemas que se han generado en el desarrollo de la misma.

Por ello, y para la obtención del objetivo principal de esta Tesis, se procede a la caracterización de la vibración en términos de densidad de potencia espectral (RMS mm/s), generada por las partes móviles del conjunto impulsado.

A diferencia de otros estudios, se analiza las frecuencias principales del equipo y las generadas por las partes móviles de los tres rodamientos, encargados de soportar el eje de transmisión mecánica en condiciones reales de funcionamiento durante un periodo de 15 años, siguiendo las directrices de la norma ISO-10816, procesando un total de 66.312 medidas.

El conjunto de datos se procesa mediante dos metodologías diferentes:

- 1) A través del análisis estocástico. El análisis se realiza mediante el método Levenberg-Marquardt, y se procesa las aproximaciones tomando muestras de gran y pequeño tamaño, se repite toda la secuencia eliminando la variable de mayor peso porcentual en relación a la amplitud máxima, para evitar el enmascaramiento o ruido, dentro de la red

neuronal. Destacar también, que para la obtención de los pesos porcentuales, se desarrolla un algoritmo propio válido para los resultados aportados por el Software Statistic.

- 2) La segunda línea de análisis sigue la caracterización de las energías vibratoriales o densidad de potencia espectral, en términos de RMS (mm/s) de los valores máximos acumulados y picos, de toda la muestra de datos. Cada una de estas caracterizaciones se realiza en función de las posiciones de medida, sus ejes de control, el tipo de frecuencia y su interacción con cada frecuencia de los elementos constituyentes de cada rodamiento así como la amplitud máxima, SPEED y álabes.

7.1. Conclusiones

Las conclusiones principales de esta Tesis son:

- 1) Se ha validado el método de Levenberg-Marquardt para determinar el punto de mayor sensibilidad energética. De éste, se desprende que este tipo de aproximaciones son válidas tanto para grandes muestras de datos (todos los valores de los quince años), como más pequeñas (años pares e impares).
- 2) Queda igualmente demostrado el concepto de monitorización y análisis de las distintas frecuencias generadoras de energía vibracional de los diferentes elementos en movimiento, frente al control únicamente de amplitud máxima, usado actualmente por la norma ISO 10816, de reconocido prestigio a nivel internacional.
- 3) La frecuencia más determinante no llega a generar suficiente ruido o enmascaramiento en la aproximación matemática de la red neuronal, quedando validando el método desarrollado para la mejora de los protocolos y procedimientos de mantenimiento predictivo de los complejos industriales en uso real.
- 4) Se comprueba la linealidad de ambas metodologías, el método de análisis espectral por densidad de potencia y la aproximación estocástica por Levenberg-Marquardt, obteniendo, en ambos casos, linealidad del 90% en los resultados.
- 5) También se valida el algoritmo propio generado en esta Tesis para la obtención de pesos porcentuales en aproximaciones neuronales, mediante el método de Levenberg-Marquardt en el software Statistic, que se suma a otros de reconocido prestigio como el de Garsón, de uso en Matlab.
- 6) Este análisis busca, no sólo la obtención de las variables más determinantes, sino también, la validación del efecto de las posiciones de muestreo en campo y su relación

con el resto de las frecuencias características, obteniendo como conclusión que es la posición 4 la más sensible al efecto vibracional, tanto por la metodología de RNA como por la de densidad de potencia espectral.

- 7) Dentro de la determinación del eje de mayor afección, ambas metodologías muestran que son los ejes verticales los más sensibles al efecto vibracional generado, siendo el de la posición 4 el más influyente al efecto generado por las vibraciones de los distintos componentes de la máquina.
- 8) Ambos análisis arrojan como conclusión que es la variable SPEED, con un 97%, la variable más influyente a la amplitud máxima. En relación a los rodamientos, se puede afirmar que es el rodamiento SKF6322 el más determinante de todos y su incidencia se acentúa en la posición 4. En relación al eje de medida, al igual que el caso anterior, es el eje vertical el más sensible.
- 9) También hay unanimidad en ambas metodologías en relación a la frecuencia de giro de los álabes, donde los valores más importantes se dan en la posición 3 axial, siendo la única variable que genera empuje en este sentido, debido a la acción de los álabes y el fluido sobre el propio eje.
- 10) En el análisis de las variables: Amplitud Máxima, SPEED, Álabes y las más representativas de los rodamientos FANUG322, SKFMU322 y SKF6322, a través del método estocástico de inteligencia artificial o RNA y aproximación por valores energéticos en RMS (mm/s), se puede concluir que sí existe una pequeña discrepancia entre ambos métodos, en lo que se refiere a la frecuencia característica más importante de los rodamientos.

En el análisis de RNA, se obtiene como frecuencia más destacable la acción de las bolas del rodamiento SKF6322, con un peso de 88,96% y en segunda y tercera posición se encuentran las frecuencias BSF de los rodamientos SKFNU322 y FAGNU322, con un valor de 88,96% y de 73,2% respectivamente, mientras que en el estudio de energía por RMS, la frecuencia más relevante es la generada por FTF SKF6322, seguida de la BSF SKFNU322.

Por todo lo expuesto en esta Tesis, se concluye que de las 108 variables de estudio, hay cuatro más limitantes para el correcto funcionamiento del equipo, y de las seis posiciones de control de mantenimiento, en una de ellas se percibe con antelación los efectos vibracionales.

La comparación de los resultados de este estudio con otros es casi imposible, primero, por la tipología del equipo en estudio, siendo éste de grandes dimensiones, con diámetros de álabes superiores a los 2 metros y potencia superior a los 500KW, catalogado en el mayor nivel de la norma ISO 10816. Segundo, por la calidad y el tamaño de las muestras en campo, que se realiza por personal e instrumental acreditado según dicha norma. Y tercero, y más importante, por la aplicación de un nuevo modelo de análisis, mediante la comparación de todas las frecuencias generadoras de energía vibracional en relación a los puntos de control y medida.

La metodología que se usa es totalmente aplicable a cualquier equipo rotativo de estas características, o cualquier otro con sistema de impulsión mecánica mediante el uso de ejes sustentado por rodamientos, incluyendo equipos con régimen de funcionamiento variable.

Esta Tesis da un avance en otra línea totalmente diferente, con una nueva metodología de análisis, mediante el método de Levenberg, validado para su uso en condiciones reales de funcionamiento en instalaciones industriales, permitiendo así la reducción, como mínimo, de los costes generados por el mantenimiento predictivo.

Es difícil cuantificar el coste generado por un mantenimiento correctivo, provocado por la falta de recursos materiales o personales, que origine la parada de una planta como la estudiada, con una facturación anual de 1.959 millones de euros.

Esta Tesis concluye que mediante la aplicación de esta nueva metodología de monitorización predictiva en equipos rotativos, se puede reducir en 5/6 partes los puntos de control, que pueden ser usados para aumentar el seguimiento semanal del equipo, el análisis de otros equipos o reducir el coste derivados del personal y equipos necesarios para su control.

7.2. Líneas futuras de investigación

Los futuros desarrollos o posibles líneas de investigación que se abren con esta Tesis Doctoral son:

- Realizar un análisis comparativo en términos de densidad de potencia espectral y RNA de los resultados de la soplante, con su equipo impulsor, comprobando si existe linealidad con los obtenidos en este trabajo. Este análisis debería abordar el efecto y relación de los distintos elementos portantes del eje de transmisión mecánica, que une la parte impulsadora o motor de la impulsada o soplante.
- Aplicar este estudio a otras máquinas rotativas similares para validar si el método de densidad de potencia en RMS (mm/s) es adecuado a todos los equipos con régimen de

funcionamiento constante a grandes y bajas velocidades de giro del elemento de transmisión.

- Validar los resultados de redes neuronales con otro tipo de métodos estocásticos para el proceso de diagnóstico. Estos métodos podrían ser algoritmos genéticos, lógica borrosa, soporte vectorial, machine learning, etc.
- Ampliar la metodología desarrollada en esta tesis a otros equipos con régimen de funcionamiento no constante, donde la componente de giro varía en función del tiempo y las necesidades productivas del complejo industrial. Un caso muy común sería el estudio de equipos generados de energía eléctrica como son las turbinas, cuyo régimen de giro se ve afectado por las necesidades productivas del mercado.
- Implementar este estudio al análisis de defectos específicos generados por la falta de mantenimiento (lubricación, fisuras, poros, etc.)
- Estudiar el efecto de la carga de trabajo del sistema, con otros fluidos o con otras densidades y de las relaciones que estas variables generan en los efectos de los elementos generadores de energía vibracional y su afección entre ellos.



Referencias

- [1] Louhichi R, Sallak M, and Pelletan J. (2020) A Maintenance Cost Optimization Approach: Application on a Mechanical Bearing System. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*; 9 (5): 658-664, <https://doi.org/10.18178/ijmerr.9.5.658-664>
- [2] Artzer A, Moats M, Bender J. (2018) Removal of Antimony and Bismuth from Copper Electrorefining Electrolyte: Part I—A Review. *JOM*, <https://doi.org/10.1007/s11837-018-3075-x>
- [3] Orhan S., Aktürk N., Çelik V. (2006) Vibration monitoring for defect diagnosis of rolling element bearings as a predictive maintenance tool: Comprehensive case studies. *NDT & E International* Volume 39, Issue 4, Pages 293-298, <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2005.08.008>
- [4] Polimac V., Polimac J. (2001). Assessment of present maintenance practices and future trends. *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. Developing New Perspectives* (Cat. No.01CH37294). <https://ieeexplore.ieee.org/document/971357>
- [5] Powers, E. J., Shin, Y. J., Mack Grady, W., Böhme, J. F., Carstens-Behrens, S., Papandreou-Suppappola, A., Onchis, D. M. (2015). Time-frequency diagnosis, condition monitoring, and fault detection. In *Time-Frequency Signal Analysis and Processing: A Comprehensive Reference* (pp. 857-913). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-398499-9.00015-7>
- [6] Nandi, S., Toliyat, H. A., & Li, X. (2015). Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors. A Review. *IEEE Transactions on Energy Conversion*; 20(4), 719–729. <https://ieeexplore.ieee.org/document/1546063>
- [7] Li, Y., Billington, S., Zhang, C., Kurfess, T., Danyluk, S., & Liang, S. (1999). Adaptive prognostics for rolling element bearing condition. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 13(1), 103–113. <https://doi.org/10.1006/mssp.1998.0183>
- [8] Medina, S., Olver, A. V., & Dini, D. (2012). The Influence of Surface Topography on Energy Dissipation and Compliance in Tangentially Loaded Elastic Contacts. *Journal of Tribology*, 134(1), 011401. <https://doi.org/10.1115/1.4005641>
- [9] Chaudhry, V., & Kailas, S. V. (2013). Elastic-Plastic Contact Conditions for Frictionally Constrained Bodies Under Cyclic Tangential Loading. *Journal of Tribology*, 136(1), 011401. <https://doi.org/10.1115/1.4025600>

-
- [10] Houpert, Luc. (2013). An Enhanced Study of the Load–Displacement Relationships for Rolling Element Bearings. *Journal of Tribology*. 136. 011105. <https://doi.org/10.1115/1.4025602>
- [11] Ise, T., Osaki, M., Matsubara, M., & Kawamura, S. (2018). Vibration Reduction of Large Unbalanced Rotor supported by Externally Pressurized Gas Journal Bearings with Asymmetrically Arranged Gas Supply Holes (Verification of the Effectiveness of a Supply Gas Pressure Control System). *Journal of Tribology*. <https://doi.org/10.1115/1.4041460>
- [12] Zheng D., Chen W. (2017). Thermal performances on angular contact ball bearing of high-speed spindle considering structural constraints under oil-air lubrication. *Tribology International*, 109; 593–601. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X17300464?via%3Dihub>
- [13] Chudzik A, Warda B. (2019). Effect of radial internal clearance on the fatigue life of the radial cylindrical roller bearing. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*; 21 (2): 211–219, <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2019.2.4>
- [14] Leturiondo U., Salgado O., Galar D. (2016). Multi-body modelling of rolling element bearings and performance evaluation with localised damage. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*; 18 (4): 638–648, <http://www.ein.org.pl/sites/default/files/2016-04-20.pdf>
- [15] Muller A., M. Suhner, Iung B. (2007). Maintenance alternative integration to prognosis process engineering, *J. Qual. Maint. Eng.* 13 (2) 198–211. <https://doi.org/10.1108/13552510710753096>
- [16] Medrano Hurtado Z. Y., Perez Tello C., Gomez Sarduy J., Vera Perez M., (2016). Novel Methodology of Fault Diagnosis on Bearings in a Synchronous Machine by Processing Vibro-Acoustic Signals Using Power Spectral Density, *Ingeniería Investigación y Tecnología*, volumen XVII (número 1), enero-marzo 2016: 73-85. <https://doi.org/10.1016/j.riit.2016.01.007>
- [17] Zuber N, Bajric R. (2016). Application of artificial neural networks and principal component analysis on vibration signals for automated fault classification of roller element bearings. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*; 18 (2): 299–306, <http://ein.org.pl/sites/default/files/2016-02-19.pdf>
- [18] Tobon-Meja D, Medjaher M., Zerhouni. (2010) The ISO 13381-1 Standard's failure prognosis process through an example. *HAL* Id: hal-00459269. <https://hal.archivesouvertes.fr/hal-00459269>

-
- [19] Medrano-Hurtado Z.Y., Perez-Trello J., Gómez Sarduy J., Vera-PérezNovel M. (2016). Methodology of Fault Diagnosis on Bearings in a Synchronous Machine by Processing Vibro-Acoustic Signals Using Power Spectral Density. *Ingeniería, Investigación y Tecnología* Volume 17, Issue 1, January–March 2016, Pages 73-85. <https://doi.org/10.1016/j.riit.2016.01.007>
- [20] Schnabel S., Marklund P., Larsson R., Golling S. (2017). The Detection of Plastic Deformation in Rolling Element Bearings by Acoustic Emission. *Tribology International*, June pp. 209-215. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.02.021>
- [21] Ericsson S., Grip N., Johansson E., Persson L., Sjöberg R. and Strömberg J. (2005). Towards Automatic Detection of Local Bearing Defects in Rotating Machines Part 1. *Department of mathematics Lula University of technology*, Sept. 11. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2003.12.004>
- [22] White G., (2010). Introducción al análisis de Vibraciones. Ed. Azima DL. 300 Trade Center, Suite 4610, Woburn, MA 01801 U.S.A p. 781-938-0707, f: 781-935-0179 <https://termogram.com/images/pdf/analisis-vibraciones/introduccion-al-analisis-de-vibraciones-azima-dli.pdf>
- [23] Nagi G., Alaa E., Jing P. (2009). Residual Life prediction sin the absence of prior degradation know ledge. *IEEE Trans. Reliab.* 58, pp. 106–116. <https://doi.org/10.1109/TR.2008.2011659>
- [24] Kauschinger B., Schroeder S. (2016). Uncertainties in Heat Loss Models of Rolling Bearings of Machine Tools, *Procedia CIRP* 46, pp. 107 – 110. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.168>
- [25] Liu, J. & Shao J. (2018). Overview of dynamic modelling and analysis of rolling element bearings with localized and distributed faults. *Nonlinear Dyn* 93: 1765-1798 <https://doi.org/10.1007/s11071-018-4314-y>
- [26] Chow, M. (1997). Methodologies of using neural networks and fuzzy logic technologies for motor incipient fault detection. *World Scientific*. Singapore.1997. [ISBN 9810232659](https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2009.06.004)
- [27] Castejón C., LaraO. and García-Prada J.C. (2010). Automated diagnosis of rolling bearings using MRA and neural networks. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 24, Issue 1, January, Pages 289-299, <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2009.06.004>
- [28] Madoliat R., and Ghanati M. F. (2013). Theoretical and Experimental Study of Spindle Ball Bearing Nonlinear Stiffness. *Journal of Mechanics* Volume 29 pp 633-642 <https://doi.org/10.1017/jmech201348>

-
- [29] McCulloch W. y Pitts W. (1990) A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *Bulletin of Mathematical Biology*, Vol. 52, n° 1/2, pp. 99-115. <https://www.cs.cmu.edu/~./epxing/Class/10715/reading/McCulloch.and.Pitts.pdf>
- [30] Laghrabli S., El Khelifi M., Nabhani M. and Bou-Saïd B. (2017). Ferrofluid lubrication of finite journal bearings using Jenkins model. *Lubrication Science*, Vol 29, Issue 7 PP. 441-454. <https://doi.org/10.1002/ls.1379>
- [31] Dindarloo S. (2015). Reliability Forecasting of a Load-Haul-Dump Machine: A Comparative Study of ARIMA and Neural Networks. *Quality and Reliability Engineering International*. Vol 32, Issue 4, pp. 1545-1552. <https://doi.org/10.1002/qre.1844>
- [32] Isasi P., Galván I. (2004). Redes de Neuronas Artificiales. Un enfoque práctico. *Pearson Prentice Hall*. Madrid, España. ISBN: 84-205-4025-0
- [33] Godoy M., Meireles M., Almeida P. (2003). A comprehensive review for industrial applicability of artificial neural networks. *IEEE transactions on industrial electronics*. Vol. 50, pp. 585-601. <https://doi.org/10.1109/TIE.2003.812470>
- [34] Li B., Chow M. Y., Tipsuwan Y., Hung J.C. (2000). Neural-network based motor rolling bearing fault diagnosis. *IEEE transactions on industrial electronics*. Vol. 47, Issue 5, pp. 1060-1069. <https://doi.org/10.1109/41.873214>
- [35] Wang X., Ong S.K., A.Y.C. (2015). Nee, Real-virtual interaction in AR assembly simulation based on component contact handling strategy, *Assem. Autom.* 35 (4) 376–394, <http://dx.doi.org/10.1108/AA-02-2015-012>
- [36] Bhattacharya, B. y Winer, EH (2019). Realidad aumentada a través de autoría de demostración experta (AREDA). *Computers in Industry*, 105, 61–79. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compind.2018.04.021>
- [37] D. Markouzis, G. Fessakis, (2015). Interactive storytelling and Mobile augmented reality applications for learning and entertainment - a rapid prototyping perspective, *2015 International Conference on Interactive Mobile Communication Technologies and Learning (IMCL)*, <http://dx.doi.org/10.1109/IMCTL.2015.7359544>
- [38] Garikapati, D., Pacharu, R., Munukurthi, R.S, (2017). Diagnóstico de desalineación en rotor sobresaliente utilizando la estadística KS y la prueba A2. *Revista de la institución de ingenieros (India)*: Serie C, 99 (1), 79–86. <http://dx.doi.org/10.1007 / s40032-017-0347-0>
- [39] Sun, B., Li, M.-M., Liao, B.-P., Yang, X., Cao, Y.-T., Cui, B.-F. , Yang, D.-Z. (2019) Time-

variant reliability modeling based on hybrid non-probability method. Arch Appl Mech. <http://dx.doi.org/10.1007/s00419-019-01605-1>

[40] Goyal, D., Choudhary, A., Pabla, B.S. et al. (2020). Support vector machines based non-contact fault diagnosis system for bearings. J Intell Manuf 31, 1275–1289. <https://doi.org/10.1007/s10845-019-01511-x>

[41] Ahmed, H. O. A., Wong, M. L. D., & Nandi, A. K. (2018). Intelligent condition monitoring method for bearing faults from highly compressed measurements using sparse over-complete features. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 99, 459–477. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.06.027>

[42] Acharyya, R., Dey, (2019). A. Evaluación de la capacidad de carga para zapatas ubicadas cerca de una superficie inclinada considerando el modelo ANN. *Neural Comput & Applic* 31, 8087–8100. <https://doi.org/10.1007/s00521-018-3661-4>

[43] Godoy, M., Meireles, M., Almeida, P. (2012). Application of Neural Network for Forecasting Gas Price in America. *JMCS*, Volume 4, Issue 2, pp 216-226, February 29. <http://dx.doi.org/10.22436/jmcs.04.02.11>

[44] McFadden P.D., Smith J.D., (1984). Vibration monitoring of rolling element bearings by the high-frequency resonance technique. *Tribol. Int.* 17 (1) 3–10. [https://doi.org/10.1016/0301-679X\(84\)90076-8](https://doi.org/10.1016/0301-679X(84)90076-8)

[45] McFadden, P. D., Smith, J. D., (1984). Model for the vibration produced by a single point defect in a rolling element bearing. *Journal of Sound and Vibration*, 96(1), 69–82. [https://doi.org/10.1016/0022-460x\(84\)90595-9](https://doi.org/10.1016/0022-460x(84)90595-9)

[46] Houpert L., (1997) A uniform analytical approach for ball and roller bearings calculations. *J. Tribol.* 119 (4) 851–858. <https://doi.org/10.1115/1.2833896>

[47] Hernot X., et al, (2000). Calculation of the stiffness matrix of angular contact ball bearings by using the analytical approach. *J. Mech. Des.* 122 (1) 83–90. <https://doi.org/10.1115/1.533548>

[48] Chudzik A, Warda B. (2019). Effect of radial internal clearance on the fatigue life of the radial cylindrical roller bearing. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*; 21 (2): 211–219. <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2019.2.4>

[49] Pawlik P., (2019). Single-number statistical parameters in the assessment of the technical condition of machines operating under variable load. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 201; 21 (1): 164-169, <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2019.1.19>

-
- [50] Yeong-Maw, H., Dyi-Cheng, C., Gow-Yi, T., (1999) Study on Asymmetrical Sheet Rolling by the Finite Element Method, *Journal of Mechanics*, Volume 15 Issue 4 <https://doi.org/10.1017/S1727719100000435>
- [51] Mercorelli, P., (2013) A the noising procedure using wavelet packets for instantaneous detection of pantograph oscillations, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 35(1-2):137–149 <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2012.09.001>
- [52] Cong F., Chen J., Dong G., Pecht M., (2013). Vibration model of rolling element bearings in a rotor-bearing system for fault diagnosis. *Journal of Sound and Vibration* 332(8):2081–2097 · April. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2012.11.029>
- [53] Ding, X., He, Q., & Luo, N. (2015). A fusion feature and its improvement based on locality preserving projections for rolling element bearing fault classification. *Journal of Sound and Vibration*, 335, 367–383. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2014.09.026>
- [54] Harsha, S. P., Nataraj, C., Kankar K. P. (2006) The Effect of Ball Waviness on Nonlinear Vibration Associated with Rolling Element Bearings, *International Journal of Acoustics and Vibration*, Vol. 11, No. 2, <https://doi.org/10.20855/ijav.2006.11.2191>
- [55] Castejón C., García-Prada J.C., Gómez M.J., and Meneses J., (2014) Automatic detection of cracked rotors combining multiresolution analysis and artificial neural networks. *Journal of Vibration and Control*, Volume: 21 issue: 15, page(s): 3047-3060. <https://doi.org/10.1177%2F1077546313518816>
- [56] Patil, M. S., Mathew, J., Rajendrakumar, P. K., & Desai, S. (2010). A theoretical model to predict the effect of localized defect on vibrations associated with ball bearing. *International Journal of Mechanical Sciences*, 52(9), 1193–1201. <https://doi.org/10.1016/j.ijmeosci.2010.05.005>
- [57] Al-Raheem K. and Abdul-Karem W., (2010). Rolling element bearing fault detection based on the complex Morlet wavelet transform and performance evaluation using artificial neural network and support vector machine. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 2:278–290. <https://www.researchgate.net/deref/http%3A%2F%2Fdx.doi.org%2F10.1177%2F0957456519883280>
- [58] Tandon N., Choudhury A., (1997). An analytical model for the prediction of the vibration response of rolling element bearings due to a localized defect. *J. Sound Vib*, 205 (3) 275–292. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1997.1031>
- [59] 32Qiu, H., Lee, J., Lin, J., & Yu, G. (2006). Wavelet filter-based weak signature detection

method and its application on rolling element bearing prognostics. *Journal of Sound and Vibration*, 289(4-5), 1066–1090. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2005.03.007>

[60] Li H., Fu L., and Zheng H., (2011). Bearing fault diagnosis based on amplitude and phase map of Hermitian wavelet transform. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 25(11):2731– 2740. <https://doi.org/10.1007/s12206-011-0717-0>

[61] Smith, W. A., & Randall, R. B. (2015). Rolling element bearing diagnostics using the Case Western Reserve University data: A benchmark study. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 64-65, 100–131. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2015.04.021>

[62] Gligorijevic, J., Gajic, D., Brkovic, A., Savic-Gajic, I., Georgieva, O., & Di Gennaro, S. (2016). Online Condition Monitoring of Bearings to Support Total Productive Maintenance in the Packaging Materials Industry. *Sensors*, 16(3), 316. <https://doi.org/10.3390/s16030316>

[63] S. Braun. (2008). Discovering signal processing: an interactive guide for engineers. *John Wiley & Sons*. [ISBN: 978-0470-51970-7](https://doi.org/10.1002/9780470519707)

[64] Malla C. & Panigrahi I., (2019). Review of Condition Monitoring of Rolling Element Bearing Using Vibration Analysis and Other Techniques, *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, volume 7, pages 407–414. <https://www.researchgate.net/deref/http%3A%2F%2Fdx.doi.org%2F10.1007%2Fs42417-019-00119-y>

[65] Srinivasan, R., Tucker, D. M., & Murias, M. (1998). Estimating the spatial Nyquist of the human EEG. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 30(1), 8–19. <https://doi.org/10.3758/bf03209412>

[66] Schonewille, M., Klaedtke, A., & Vigner, A. (2009). Anti-alias anti-leakage Fourier transform. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*. <https://doi.org/10.1190/1.3255533>

[67] Kui Fu Chen, & Shu Li Mei. (2010). Composite Interpolated Fast Fourier Transform With the Hanning Window. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 59(6), 1571–1579. <https://doi.org/10.1109/tim.2009.2027772>

[68] A. M. Despain, (1994). Fourier Transform Computers Using CORDIC Iterations, in *IEEE Transactions on Computers*, vol. C-23, no. 10, pp. 993-1001, <https://doi.org/10.1109/TC.1974.223800>

[69] McGrath, B. P., Holmes, D. G., & Galloway Galloway, J. J. H. (2005). Power Converter Line Synchronization Using a Discrete Fourier Transform (DFT) Based on a Variable Sample Rate. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 20(4), 877–884.

<https://doi.org/10.1109/tpe1.2005.850944>

[70] Shih-sheng Paul Lai, (1982). Statistical characterization of strong ground motions using power spectral density function. *Bulletin of the Seismological Society of America*; 72 (1): 259–274.

[71] Gowid S, Dixon R, Ghandi S. (2016). Characterisation of Major Fault Detection Features and Techniques for the Condition-Based Monitoring of High-speed Centrifugal Blowers. *International Journal of Acoustics and Vibration*; 21 (2), <http://dx.doi.org/10.20855/ijav.2016.21.2410>

[72] L 35 Nikias C.L., Raghuvver M.R. Bispectrum estimation: a digital signalprocessing framework. *Proceedings of the IEEE*, volumen 75 (número 7), 1987: 869-891. <https://doi.org/10.1109/PROC.1987.13824>

[73] Nikias C.L., Raghuvver M.R., (1997). Bispectrum estimation: a digital signal processing framework. *Proceedings of the IEEE*, volumen 75 (número 7), 869-891. <https://doi.org/10.1109/PROC.1987.13824>

[74] Toledo E., Pinhas I., Aravot D., Akselrod S., (2001). Bispectrum and bicoherence for the investigation of very high frequency peaks in heart rate variability, *Proceedings of the IEEE, Computers in Cardiology*; Núm. 28., pp. 667-670. <https://doi.org/10.1109/CIC.2001.977744>

[75] Rai, V. K., & Mohanty, A. R. (2007). Bearing fault diagnosis using FFT of intrinsic mode functions in Hilbert–Huang transform. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 21(6), 2607–2615. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2006.12.004>

[76] Tse, P., Peng, Y., Yam R., (2001). “Wavelet analysis and envelope detectionfor rolling element bearing fault diagnosis”. *Journal of vibration and acoustic*; p.303-310. <https://doi.org/10.1115/1.1379745>

[77] Wang1 N.F, Jiang1 D X, Yang W. G. (2019). Dual-Tree Complex Wavelet Transform and SVD-Based Acceleration Signals Denoising and its Application in Fault Features Enhancement for Wind Turbine. *Journal of Vibration Engineering & Technologies* 7:311–320 <https://doi.org/10.1007/s42417-019-00126-Z>

[78] Yujie G., Jinguy L., Jie L., Zhanhui L., and Wentao L., (2013). A method for improving envelopespectrum symptom of fault rolling bearing based on the auto-correlation acceleration signal. *Applied Mechanics and Materials*; 275:856–864. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.275-277.856>

-
- [79] Zuber N, Bajric R., Šostakov R. Gearbox faults identification using vibration signal analysis and artificial intelligence methods. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2014; 16 (1): 61–65
- [80] Huang L, Huang H, Liu Y. (2019). A Fault Diagnosis Approach for Rolling Bearing Based on Wavelet Packet Decomposition and GMM-HMM. *International Journal of Acoustics and Vibration*; 24 (2), 199-209, <https://doi.org/10.20855/ijav.2019.24.21120>
- [81] Mercorelli P., (2013). A denoising procedure using wavelet packets for instantaneous detection of pantograph oscillations. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 35(1-2):137–149, 2013 <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2012.09.001>
- [82] Mallat S. (1989). A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation. In *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, volume 11(7), pages 674–693. <https://doi.org/10.1109/34.192463>
- [83] Omoregbee H O, Heyns P S. (2019) Fault Classification of Low-Speed Bearings Based on Support Vector Machine for Regression and Genetic Algorithms Using Acoustic Emission. *J. Vib. Eng. Technol*; 7: 455–464, <https://doi.org/10.1007/s42417-019-00143-y>
- [84] Andreus, U., Casini, P. (2016). Identification of multiple open and fatigue cracks in beam-like structures using wavelets on deflection signals. *Continuum Mech. Thermodyn.* **28**, 361–378 <https://doi.org/10.1007/s00161-015-0435-4>
- [85] Skrinar, M., & Plibersek, T. (2004). New linear spring stiffness definition for displacement analysis of cracked beam elements. *PAMM*, 4(1), 654–655. <https://doi.org/10.1002/pamm.200410308>
- [86] Basu, P. K., Jorge, A. B., Badri, S., & Lin, J. (2003). Higher-order modeling of continua by finite-element, boundary-element, meshless, and wavelet methods. *Computers & Mathematics with Applications*, 46(1), 15–33. [https://doi.org/10.1016/s0898-1221\(03\)90078-2](https://doi.org/10.1016/s0898-1221(03)90078-2)
- [87] Torrèsani, B. (1991). Wavelets associated with representations of the affine Weyl–Heisenberg group. *Journal of Mathematical Physics*, 32(5), 1273–1279. <https://doi.org/10.1063/1.529325>
- [88] Nikolaou, N. G., & Antoniadis, I. A. (2002). Rolling element bearing fault diagnosis using wavelet packets. *NDT & E International*, 35(3), 197–205. [https://doi.org/10.1016/s0963-8695\(01\)00044-5](https://doi.org/10.1016/s0963-8695(01)00044-5)

-
- [89] D. Gu, J. Kim, T. Kelimu, S. Huh, and B. Choi., (2012). Evaluation of the use of envelope analysis and DWT on AE signals generated from degrading shafts. *Materials Science and Engineering*, 177:1683–1690. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2012.03.001>
- [90] Goyal D, Choudhary A, Pabla B.S. (2019). Support vector machines based non-contact fault diagnosis system for bearings. *Journal of Intelligent Manufacturing*; 1572-8145, <https://doi.org/10.1007/s10845-019-01511-x>
- [91] Houper L. (1997). A uniform analytical approach for ball and roller bearings calculations. *J. Tribol.* 119 (4) 851–858. <https://doi.org/10.1115/1.2833896>
- [92] Kankar P.K., Sharma S.C., Harsha S.P., (2011). Fault diagnosis of ball bearings using machine learning methods. *Expert Systems with Applications* 38 1876 – 1886. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.07.119>
- [93] Samanta B. and Al-Balushi K. R., (2003). Artificial neural network-based fault diagnostics of rolling element bearings singtime-domain features. *Mechanical Systems and Signal Processing* 17(2), 317–328 <https://doi.org/10.1006/mssp.2001.1462>
- [94] Adewusi S. A., (2001). Wavelet analysis of vibration signals of an overhang rotor with a propagating transverse crack. *Journal of Sound and Vibration*, 5:777–793. <https://doi.org/10.1006/jsvi.2000.3611>
- [95] Prabhakar S., Sekhar A. S., and Mohanty A. R., (2001). Detection and monitoring of cracks in arotor-bearing system using wavelet transforms. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 15:447–450. <https://doi.org/10.1121/1.1412447>
- [96] Sekhar A. S., (2003). Crack detection through wavelet transform for a run-up rotor. *Journal of Sound and Vibration*, 259:461–472. <https://doi.org/10.1006/jsvi.2002.5337>
- [97] Liu B., (2005). Selection of wavelet packet basis for rotating fault diagnosis. *Journal of Sound and Vibration*, 248:567–582. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2004.06.047>
- [98] Nagaraju C., Narayana K., and Mallikarjuna K., (2009). Application of 3d wavelet transforms for crack detection in rotor systems. *Sadhana*, 34:407–419. <https://doi.org/10.1007/s12046-009-0024-Y>
- [99] Gu D., Kim J., Kelimu T., Huh S., and Choi B., (2012). Evaluation of the use of envelope analysis and DWT on AE signals generated from degrading shafts. *Materials Science and Engineering*, 177:1683–1690. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2012.03.001>
- [100] Sanz J., Perera R., and Huerta C., (2007) Fault diagnosis of rotating machinery based on auto associative neural networks and wavelet transforms. *Journal of Sound and Vibration*,

[101] Bin G.F., Gao J.J., Li X.J., and Dhillon B.S., (2012) Early fault diagnosis of rotating machinery based on wavelet packets-empirical mode decomposition feature extraction and neural network. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 27:696–711. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2011.08.002>

[102] Hu Q., He Z., Zhang Z., and Zi Y., (2007) Fault diagnosis of rotating machinery based on improved wavelet package transform and SVMs ensemble. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 21: 668–705. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2006.01.007>

[103] Wang, W., & Vrbanek, J. (2008). An Evolving Fuzzy Predictor for Industrial Applications. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 16(6), 1439–1449. <https://doi.org/10.1109/tfuzz.2008.925918>

[104] Hung, J. Y. (1993). Magnetic bearing control using fuzzy logic. *Conference Record of the 1993 IEEE Industry Applications Conference Twenty-Eighth IAS Annual Meeting*. <https://doi.org/10.1109/ias.1993.299176>

[105] Liu, T. I., Singonahalli, J. H., & Iyer, N. R. (1996). Detection of roller bearing defects using expert system and fuzzy logic. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 10(5), 595–614. <https://doi.org/10.1006/mssp.1996.0041>

[106] Samanta, B., Al-Balushi, K. R., & Al-Araimi, S. A. (2003). Artificial neural networks and support vector machines with genetic algorithm for bearing fault detection. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 16(7-8), 657–665. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2003.09.006>

[107] Samanta, B., Al-Balushi, K. & Al-Araimi, S. (2006). Artificial neural networks and genetic algorithm for bearing fault detection. *Soft Comput* **10**, 264–271. <https://doi.org/10.1007/s00500-005-0481-0>

[108] Hirani, H., & Suh, N. P. (2005). Journal bearing design using multiobjective genetic algorithm and axiomatic design approaches. *Tribology International*, 38(5), 481–491. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2004.10.008>

[109] Konar, P., & Chattopadhyay, P. (2011). Bearing fault detection of induction motor using wavelet and Support Vector Machines (SVMs). *Applied Soft Computing*, 11(6), 4203–4211. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2011.03.014>

[110] Seshadrinath, J., Singh, B., & Panigrahi, B. K. (2014). Investigation of Vibration Signatures for Multiple Fault Diagnosis in Variable Frequency Drives Using Complex Wavelets.

[111] Gryllias, K. C., & Antoniadis, I. A. (2012). A Support Vector Machine approach based on physical model training for rolling element bearing fault detection in industrial environments. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 25(2), 326–344. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2011.09.010>

[112] Zhang, X., & Zhou, J. (2013). Multi-fault diagnosis for rolling element bearings based on ensemble empirical mode decomposition and optimized support vector machines. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 41(1-2), 127–140. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2013.07.006>

[113] Liu, Z., Cao, H., Chen, X., He, Z., & Shen, Z. (2013). Multi-fault classification based on wavelet SVM with PSO algorithm to analyze vibration signals from rolling element bearings. *Neurocomputing*, 99, 399–410. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2012.07.019>

[114] Abdelwahab, H., & Abdel-Aty, M. (2001). Development of Artificial Neural Network Models to Predict Driver Injury Severity in Traffic Accidents at Signalized Intersections. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1746, 6–13. <https://doi.org/10.3141/1746-02>

[115] Zorzetto, L. F. M., Filho, R. M., & Wolf-Maciel, M. R. (2000). Processing modelling development through artificial neural networks and hybrid models. *Computers & Chemical Engineering*, 24(2-7), 1355–1360. [https://doi.org/10.1016/s0098-1354\(00\)00419-1](https://doi.org/10.1016/s0098-1354(00)00419-1)

[116] Cheh, JJ, Weinberg, RS y Yook, KC (1999). Una aplicación de un sistema de inversión en redes neuronales artificiales para predecir objetivos de adquisición. *Revista de Investigación Comercial Aplicada (JABR)*, 15 (4), 33-46. <https://doi.org/10.19030/jabr.v15i4.8151>

[117] Bourquin, J., Schmidli, H., van Hoogevest, P., & Leuenberger, H. (1998). Advantages of Artificial Neural Networks (ANNs) as alternative modelling technique for data sets showing non-linear relationships using data from a galenic study on a solid dosage form. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, 7(1), 5–16. [https://doi.org/10.1016/s0928-0987\(97\)10028-8](https://doi.org/10.1016/s0928-0987(97)10028-8)

[118] Penman, J. (1994). Feasibility of using unsupervised learning, artificial neural networks for the condition monitoring of electrical machines. *IEE Proceedings - Electric Power Applications*, 141(6), 317. <https://doi.org/10.1049/ip-epa:19941263>

[119] Yang, D.-M., Stronach, A. F., Macconnell, P., & Penman, J. (2002). Third-order spectral techniques for the diagnosis of motor bearing condition using artificial neural networks. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 16(2-3), 391–

411. <https://doi.org/10.1006/mssp.2001.1469>

[120] Reddick, W. E., Glass, J. O., Cook, E. N., Elkin, T. D., & Deaton, R. J. (1997). Automated segmentation and classification of multispectral magnetic resonance images of brain using artificial neural networks. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 16(6), 911–918. <https://doi.org/10.1109/42.650887>

[121] Low, L. K., & Cheng, H.-J. (2006). Axon pruning: an essential step underlying the developmental plasticity of neuronal connections. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 361(1473), 1531–1544. <https://doi.org/10.1098/rstb.2006.1883>

[122] Schwamborn, J., Püschel, (2004). A. La actividad secuencial de las GTPasas Rap1B y Cdc42 determina la polaridad neuronal. *Nat Neurosci* 7, 923–929 <https://doi.org/10.1038/nn1295>

[123] Lippmann, R. (1987). An introduction to computing with neural nets. *IEEE ASSP Magazine*, 4(2), 4–22. <https://doi.org/10.1109/massp.1987.1165576>

[124] Hopfield, J. J. (1988). Artificial neural networks. *IEEE Circuits and Devices Magazine*, 4(5), 3–10. <https://doi.org/10.1109/101.8118>

[125] Braendgaard, H., Evans, S. M., Howard, C. V., & Gundersen, H. J. G. (1990). The total number of neurons in the human neocortex unbiasedly estimated using optical disectors. *Journal of Microscopy*, 157(3), 285–304. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2818.1990.tb02967.x>

[126] Tovée, M. J. (1994). Neuronal Processing: How fast is the speed of thought?. *Current Biology*, 4(12), 1125–1127. [https://doi.org/10.1016/s0960-9822\(00\)00253-0](https://doi.org/10.1016/s0960-9822(00)00253-0)

[127] McCulloch, W. S., & Pitts, W. (1943). A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *The Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5(4), 115–133. <https://doi.org/10.1007/bf02478259>

[128] Dewsbury, D. A. (1993). Contributions to the History of Psychology. XCIV. The Boys of Summer at the End of Summer: The Watson-Lashley Correspondence of the 1950s. *Psychological Reports*, 72(1), 263–269. <https://doi.org/10.2466/pr0.1993.72.1.263>

[129] Rosenblatt, F. (1958). The perceptron: A probabilistic model for information storage and organization in the brain. *Psychological Review*, 65(6), 386–408. <https://doi.org/10.1037/h0042519>

[130] Grossberg, S. (1970). Some Networks that can Learn, Remember, and Reproduce any Number of Complicated Space-time. *Studies in Applied Mathematics*, 49(2), 135–

166. <https://doi.org/10.1002/sapm1970492135>

[131] Hopfield, J. J. (1982). Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 79(8), 2554–2558. <https://doi.org/10.1073/pnas.79.8.2554>

[132] Olazaran, M. (1996). A Sociological Study of the Official History of the Perceptrons Controversy. *Social Studies of Science*, 26(3), 611–659. <https://doi.org/10.1177/030631296026003005>

[133] Werbos, P. J. (1990). Backpropagation through time: what it does and how to do it. *Proceedings of the IEEE*, 78(10), 1550–1560. <https://doi.org/10.1109/5.58337>

[134] Han, J., & Moraga, C. (1995). The influence of the sigmoid function parameters on the speed of backpropagation learning. *From Natural to Artificial Neural Computation*, 195–201. https://doi.org/10.1007/3-540-59497-3_175

[135] Harrington, P. de B. (1993). Sigmoid transfer functions in backpropagation neural networks. *Analytical Chemistry*, 65(15), 2167–2168. <https://doi.org/10.1021/ac00063a042>

[136] Holt, J. L., & Baker, T. E. (n.d.). (1991). Back propagation simulations using limited precision calculations. *IJCNN-91-Seattle International Joint Conference on Neural Networks*. <https://doi.org/10.1109/ijcnn.1991.155324>

[137] LeCun, Y., Boser, B., Denker, J. S., Henderson, D., Howard, R. E., Hubbard, W., & Jackel, L. D. (1989). Backpropagation Applied to Handwritten Zip Code Recognition. *Neural Computation*, 1(4), 541–551. <https://doi.org/10.1162/neco.1989.1.4.541>

[138] Kim, J., Kim, J., Thu, H. L. T., & Kim, H. (2016). Long Short Term Memory Recurrent Neural Network Classifier for Intrusion Detection. *2016 International Conference on Platform Technology and Service (PlatCon)*. <https://doi.org/10.1109/platcon.2016.7456805>

[139] Xiao-Lei Zhang, & Ji Wu. (2013). Deep Belief Networks Based Voice Activity Detection. *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 21(4), 697–710. <https://doi.org/10.1109/tasl.2012.2229986>

[140] Wang, X., & Gupta, A. (2016). Generative Image Modeling Using Style and Structure Adversarial Networks. *Lecture Notes in Computer Science*, 318–335. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46493-0_20

[141] Martínez L., Goddard CJ. (2001). Definition of neuronal net for classification away from evolutive program. *Rev Mex Ing Biomed*;22(1):4-11.

[142] Anoulova, S. (1994). Neural Networks for Iterative Computation of Inverse Functions.

- [143] Paul, A., Bhattacharya, P., & Maity, S. P. (2014). Comparative Study of Radial Basis Function Neural Network with Estimation of Eigenvalue in Image Using MATLAB. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 141–146. https://doi.org/10.1007/978-81-322-1856-2_16
- [144] Raol, J. R., & Mankame, S. S. (1996). Artificial neural networks. *Resonance*, 1(2), 47–54. <https://doi.org/10.1007/bf02835699>
- [145] LEE, K., BOOTH, D., & ALAM, P. (2005). A comparison of supervised and unsupervised neural networks in predicting bankruptcy of Korean firms. *Expert Systems with Applications*, 29(1), 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2005.01.004>
- [146] Coles, C. H., Shen, Y., Tenney, A. P., Siebold, C., Sutton, G. C., Lu, W., Aricescu, A. R. (2011). Proteoglycan-Specific Molecular Switch for RPTP Clustering and Neuronal Extension. *Science*, 332(6028), 484–488. <https://doi.org/10.1126/science.1200840>
- [147] Shen, Y., Tenney, A. P., Busch, S. A., Horn, K. P., Cuascut, F. X., Liu, K., ... Flanagan, J. G. (2009). PTP Is a Receptor for Chondroitin Sulfate Proteoglycan, an Inhibitor of Neural Regeneration. *Science*, 326(5952), 592–596. <https://doi.org/10.1126/science.1178310>
- [148] Zhongwen Luo, Hongzhi Liu, & Xincan Wu. (n.d.). (2005). Artificial neural network computation on graphic process unit. Proceedings. *2005 IEEE International Joint Conference on Neural Networks*. <https://doi.org/10.1109/ijcnn.2005.1555903>
- [149] Constante, P., Gordon, A., Chang, O., Pruna, E., Acuna, F., & Escobar, I. (2016). Artificial Vision Techniques to Optimize Strawberry's Industrial Classification. *IEEE Latin America Transactions*, 14(6), 2576–2581. <https://doi.org/10.1109/tla.2016.7555221>
- [150] Basheer, I. ., & Hajmeer, M. (2000). Artificial neural networks: fundamentals, computing, design, and application. *Journal of Microbiological Methods*, 43(1), 3–31. [https://doi.org/10.1016/s0167-7012\(00\)00201-3](https://doi.org/10.1016/s0167-7012(00)00201-3)
- [151] Rodríguez Rodríguez, J. (2008). Redes neuronales artificiales para la clasificación de imágenes satelitales. *Avances: Investigación En Ingeniería*, 1(9), 20-31. <https://revistas.unilibre.edu.co/index.php/avances/article/view/2645>
- [152] San Juan, E., Jamett, M., Kaschel, H., & Sánchez, L. (2016). Sistema de reconocimiento de voz mediante wavelets, predicción lineal y redes backpropagation. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 24(1), 8–17. <https://doi.org/10.4067/s0718-33052016000100002>

-
- [153] Abdel-Hamid, O., Mohamed, A., Jiang, H., Deng, L., Penn, G., & Yu, D. (2014). Convolutional Neural Networks for Speech Recognition. *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 22(10), 1533–1545. <https://doi.org/10.1109/taslp.2014.2339736>
- [154] Amato, F., López, A., Peña-Méndez, E. M., Vañhara, P., Hampl, A., & Havel, J. (2013). Artificial neural networks in medical diagnosis. *Journal of Applied Biomedicine*, 11(2), 47–58. <https://doi.org/10.2478/v10136-012-0031-x>
- [155] Fast, M., & Palmé, T. (2010). Application of artificial neural networks to the condition monitoring and diagnosis of a combined heat and power plant. *Energy*, 35(2), 1114–1120. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.06.005>
- [156] Fukuda, T., & Shibata, T. (1992). Theory and applications of neural networks for industrial control systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 39(6), 472–489. <https://doi.org/10.1109/41.170966>
- [157] Steinbuch, K., & Piske, U. A. W. (1963). Learning matrices and their applications. *IEEE Transactions on Electronic Computers*, EC-12(6), 846–862. <https://doi.org/10.1109/pgec.1963.263588>
- [158] David E. R., Geoffrey E. H. & Ronald J. W., (1986). Learning representations by back-propagating errors, *Nature* 323, 533-566. https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/1986Natur.323..533R/doi:10.1038/323533a0
- [159] John G. H., Gordon M. S., (1997). Mechanisms of olfactory discrimination: Converging Evidence for Common Principles Across Phyla, *Annual Review of Neuroscience*, 20:1, 595-631. <https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.20.1.595>
- [160] Vandenbulcke L., Bachert C., Cauwenberge P., Claeys S., (2006). The Innate Immune System and Its Role in Allergic Disorders, *Int Arch Allergy Immunol*, 139:159–165, <https://doi.org/10.1159/000090393>
- [161] Anctil F., Asce M., and Rat A., (2005) Evaluation of Neural Network Streamflow Forecasting on 47 Watersheds. *Journal of Hydrologic Engineering* *Journal of Hydrologic Engineering*. Volume 10 issue, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2005\)10:1\(85\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2005)10:1(85))
- [162] Zhang, N., & Behera, P. K. (2012). Solar radiation prediction based on recurrent neural networks trained by Levenberg-Marquardt backpropagation learning algorithm. *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*. <https://doi.org/10.1109/isgt.2012.6175757>
- [163] Singh, V., Gupta, I., & Gupta, H. O. (2007). ANN-based estimator for distillation using Levenberg–Marquardt approach. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 20(2),

249–259. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2006.06.017>

[164] Amin, J. S., Bahadori, M., Lee, M., Kashiwao, T., Bahadori, A., Rafiee, S., & Nia, B. H. (2016). Prediction of carbon dioxide separation from gas mixtures in petroleum industries using the Levenberg–Marquardt algorithm. *Petroleum Science and Technology*, 34(8), 703–711. <https://doi.org/10.1080/10916466.2016.1157605>

[165] Chidrawar, S. K., Bhaskarwar, S., & Patre, B. M. (2009). Implementation of Neural Network for Generalized Predictive Control: A Comparison between a Newton Raphson and Levenberg Marquardt Implementation. *2009 WRI World Congress on Computer Science and Information Engineering*. <https://doi.org/10.1109/csie.2009.849>

[166] Ventura J., (1997) Growth and Interdependence. *The Quarterly Journal of Economics*, Volume 112, Issue 1, 1 February 1997, Pages 57–84, <https://doi.org/10.1162/003355397555127>

[167] Gutierrez-Estrada J.C., Pedro-Sanz E., Lopez-Luque R., Pulido-Calvo I., Comparison between traditional methods and artificial neural networks for ammonia concentration forecasting in an eel (*Anguilla L.*) intensive rearing system, *Aquacultural Engineering*, Volume 31, Issues 3–4, October 2004, Pages 183-203. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2004.03.001>

[168] Moradkhani H., Hsu K., Gupta H. V., Sorooshian S., (2004). Improved streamflow forecasting using self-organizing radial basis function artificial neural networks, *Journal of Hydrology*, volume 295, Issues 1–4, 10 August 2004, Pages 246-262 <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.03.027>

[169] Mi Y., Ishii M., Tsoukalas L.H., (1998). Vertical two-phase flow identification using advanced instrumentation and neural networks, *Nuclear Engineering and Design*, volume 184, Issues 2–3, August 1998, Pages 409-420. [https://doi.org/10.1016/S0029-5493\(98\)00212-X](https://doi.org/10.1016/S0029-5493(98)00212-X)

[170] Arcot J., Shrestha A., (2005). Folate: methods of analysis, *Trends in Food Science & Technology*, volume 16, Issues 6–7, June–July 2005, Pages 253-266. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2005.03.013>

[171] Pulido-Calvo I., Manuela Portela M., (2007). Application of neural approaches to one-step daily flow forecasting in Portuguese watersheds, *Journal of Hydrology*, Volume 332, Issues 1–2, Pages 1-15, ISSN 0022-1694. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.06.015>

[172] Ochoa-Rivera J. C., Andreu J., and García-Bartual R., (2007) Influence of Inflows Modeling on Management Simulation of Water Resources System, *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 133, Issue 2. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2007\)133:2\(106\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2007)133:2(106))

-
- [173] Yáñez E., Plaza F., Gutiérrez-Estrada J. C., Rodríguez N., Barbieri M.A., Pulido-Calvo I., Bórquez C., (2010). Anchovy (*Engraulisringens*) and sardine (*Sardinopsagax*) abundance forecast off northern Chile: A multivariate ecosystemic neural network approach, *Progress in Oceanography*, volume 87, Issues 1–4, Pages 242-250. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2010.09.015>
- [174] Mahesh S. Iyer and R. Russell Rhinehart, A Method to Determine the Required Number of Neural-Network Training Repetitions, *IEEE Transactions on neural networks*, vol. 10, NO. 2, MARCH 1999, <https://doi.org/10.1109/72.750573>
- [175] Nash J.E., Sutcliffe J.V., (1970). River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles, *Journal of Hydrology*, volume 10, Issue 3, April 1970, Pages 282-290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- [176] Kitanidis P. K, Bras R. L., (1980). Real-time forecasting with a conceptual hydrologic model: 2. Applications and results, *Water Resources Research banner*, Volume16, Issue 6 December 1980 Pages 1034-1044. <https://doi.org/10.1029/WR016i006p01034>
- [177] Legates D. R., McCabe Jr G. J., (1999). Evaluating the use of “goodness-of-fit” Measures in hydrologic and hydroclimatic model validation, *Water Resources Research*, January 1999, <http://dx.doi.org/10.1029/1998WR900018>
- [178] Jain A.K., Ross A., Prabhakar S., (2004). An Introduction to Biometric Recognition, *IEEE transactions on circuits and systems for video technology*, vol. 14, n°. 1, january 2004, <https://doi.org/10.1109/TCSVT.2003.818349>
- [179] Makkeasorn A., Chang N.B., Zhou X., (2008). Short-term streamflow forecasting with global climate change implications – A comparative study between genetic programming and neural network, *Journal of Hydrology*, 352, 336– 354. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.01.023>
- [180] Zhou, W., Habetler, T. G., & Harley, R. G., (2007). Bearing Condition Monitoring Methods for Electric Machines: A General Review. *IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives*. 6-8 Sept. <https://doi.org/10.1109/demped.2007.4393062>
- [181] Srikant D., (2017). Condition Monitoring of Drilling Rigs, *Journal of Petroleum Engineering & Technology*, 2017; 7(3):7–11p. [ISSN: 2321-5178](https://doi.org/10.1109/72.750573)
- [182] Xu, Y., Zhou, J., & Jin, C. (2019). Identification of dynamic stiffness and damping in active magnetic bearings using transfer functions of electrical control system. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 33(2), 571–577. <https://doi.org/10.1007/s12206-019->

- [183] Shensa, M. (1978). Estimación pasiva de la demora: la eliminación del sesgo y las ambigüedades 2π . *The Journal of the Acoustical Society of America*, 63 (1), 91. <https://doi.org/10.1121/1.381700>
- [184] Setyawan, H. P., & Suryadi, D. (2018). Analisis Karakteristik Vibrasi pada Paper Dryer Machine untuk Deteksi Dini Kerusakan Spherical Roller Bearing. *ROTASI*, 20(2), 110. <https://doi.org/10.14710/rotasi.20.2.110-117>
- [185] Klausen, A., Van Khang, H., & Robbersmyr, K. G. (2018). Novel Threshold Calculations for Remaining Useful Lifetime Estimation of Rolling Element Bearings. *2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*. <https://doi.org/10.1109/icelmach.2018.8507056>
- [186] Tailony, R. (2019). Predicting Premature Bearing Failure in the Driveline and the Variable Frequency Drive of Cold Test Stands. *Journal of Failure Analysis and Prevention*. <https://doi.org/10.1007/s11668-019-00648-4>
- [187] J. Yu, (2012) Proyección de preservación local y no local para la clasificación de defectos de rodamientos y la evaluación del rendimiento", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 5, pp. 2363-2376, <https://doi.org/10.1109/TIE.2011.2167893>
- [188] Chai T. and Draxler R. R., (2014). Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE) Arguments against avoiding RMSE in the literatura, *Geosci. Model Dev.*, 7, 1247–1250. <https://doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014>
- [189] Sheldon Ross. (2005). *Introductory Statistics*. EEUU: *Academic Press*. [ISBN: 978-0-1804317-2](#)
- [190] Seryasat, O. R., Aliyari shoorehdeli, M., Honarvar, F., & Rahmani, A. (2010). *Multi-fault diagnosis of ball bearing using FFT, wavelet energy entropy mean and root mean square (RMS)*. 2010 *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*. <https://doi.org/10.1109/icsmc.2010.5642389>
- [191] J.C. García-Prada and J.I. Pedrero. (1993). Cálculo, construcción y ensayo de máquinas I. Vibraciones en máquinas. *UNED*. [ISBN \(13\): 9788436262698](#)
- [192] Lavrentieva, Olena O., Arkhypov, Ihor O., Kuchma, Olexander and Uchitel, A.D. (2020) Use of simulators together with virtual and augmented reality in the system of welders' vocational training: past, present, and future Augmented Reality in Education : Proceedings of the 2nd International Workshop (AREdu 2019), Kryvyi Rih, Ukraine, March 22, 2019 (2547). pp. 201-216. [ISSN 1613-0073](#)

-
- [193] Garrido-Jurado, S., Muñoz-Salinas, R., Madrid-Cuevas, FJ, y Marín-Jiménez, MJ (2014). Generación y detección automática de marcadores fiduciales altamente confiables bajo oclusión. *Reconocimiento de patrones*, 47 (6), 2280–2292. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2014.01.005>
- [194] Garrido-Jurado, S., Muñoz-Salinas, R., Madrid-Cuevas, F. J., & Medina-Carnicer, R. (2016). Generation of fiducial marker dictionaries using Mixed Integer Linear Programming. *Pattern Recognition*, 51, 481–491. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2015.09.023>
- [195] Wang J, Liang Y, Zheng Y, Gao, Zhang F. (2020) An integrated fault diagnosis and prognosis approach for predictive maintenance of wind turbine bearing with limited samples. *Renewable Energy*; 145: 642-650, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.103>
- [196] Nickson R.T., McArthur J.M., Shrestha B., Kyaw-Myint T.O., Lowry D., (2005). Arsenic and other drinking water quality issues, Muzaffargarh District, Pakistan, *Applied Geochemistry*, volume 20, Issue 1, January 2005, Pages 55-68. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2004.06.004>
- [197] López Noguero F., (2002). El análisis de contenido como método de investigación, XXI, *Revista de Educación*, 4 (2002): 167-179. Universidad de Huelva. <http://hdl.handle.net/10272/1912>
- [198] Olden, JD y Jackson, DA (2000). Torturar datos en aras de la generalidad: ¿cuán válidos son nuestros modelos de regresión? *Écoscience*, 7 (4), 501–510. <https://doi.org/10.1080/11956860.2000.11682622>
- [199] Elgaali E., Garcia L. A., Ojima D. S., (2007). High resolution modeling of the regional impacts of climate change on irrigation water demand, *Climatic Change*, August 2007. <https://doi.org/10.1007/s10584-007-9278-8>
- [200] Olden, J. D., Joy, M. K., & Death, R. G. (2004). An accurate comparison of methods for quantifying variable importance in artificial neural networks using simulated data. *Ecological Modelling*, 178(3-4), 389–397. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2004.03.013>
- [201] Maozhun, S. y Ji, L. (2017). Improved Garson algorithm based on neural network model. *Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*. <https://doi.org/10.1109/ccdc.2017.7979255>
- [202] Yoav Freund and Llew Mason. (1999). The alternating decision tree learning algorithm. *Proceeding Sixth. Int. Conf. Mach. Learn.* <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>

Abreviaturas

<i>SVM</i>	Support Vector Machines, máquinas de soporte vectorial
<i>SKF6322</i>	Deep groove ball bearings SKF6322
<i>FAGNU322</i>	Deep groove ball bearings FAGNU322
<i>SKFNU322</i>	Deep groove ball bearings SKFNU322
<i>BSF</i>	The frequency at which the balls or rollers are spinning is caused by the rotating movement of the balls or rollers around their own axis
<i>2BSF</i>	The frequency of the ball defect is twice the frequency of rotation of the balls or rollers
<i>FTF</i>	The defect frequency of body rotation or ball support
<i>BPIR</i>	The defect frequency produced in the inner race or ball passage
<i>BPOR</i>	The defect frequency produced in the outer race or ball passage
<i>n</i>	Angular speed of the axis in revolutions per second
<i>RPM</i>	Revolutions per second
<i>CPM</i>	Ciclos por segundo
<i>Fpa</i>	Frequency generated by the blade passage and is determined by the number of blades and the rotational speed of the equipment
<i>C</i>	Basic dynamic load
<i>CO</i>	Basic static load
<i>Pu</i>	Fatigue limit load
<i>kr</i>	Calculation factor

<i>FFT</i>	Fast Fourier Transform
<i>PSD</i>	Power Spectral Density, densidad de potencia espectral
<i>HT</i>	Hilbert Transform, transformada Hilbert
<i>WT</i>	Wavelet Transform, transformada Wavelet
<i>RMS</i>	Root Mean Square, raíz cuadrática media
<i>MSE</i>	Mean Squared Error, error cuadrático medio
<i>SPEED</i>	Frequency of machine speed
<i>Pos3H</i>	3 horizontal position
<i>Pos3V</i>	3 vertical position
<i>Pos3A</i>	3 axial position
<i>Pos4H</i>	4 horizontal position
<i>Pos4V</i>	4 vertical position
<i>Pos4A</i>	4 axial position

Publicaciones

Publicación 1

Lect. Javier Castilla, PhD Juan C Fortes, PhD J M Dávila, PhD Sergio Melgar, PhD Aguasanta Sarmiento, PREDECTIVE MAINTENANCE OF MINING MACHINERY BASED ON VIBRATIONAL ANALYSIS, University of Huelva-Technical Top School-Department of Mining Engineering, Spain. ISBN 978-619-7408-37-9, DOI: 10.5593/sgem2018/13.

Publicación 2

Castilla-Gutiérrez J, Fortes JC, Pulido-Calvo I. Analysis, evaluation and monitoring of the characteristic frequencies of pneumatic drive unit and its bearing through their corresponding frequency spectra and spectral density. *Eksplatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2019; 21 (4): 585–591, <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2019.4.7>.

Publicación 3

Castilla-Gutiérrez J, Fortes JC, Davila JM. Control and prediction protocol for bearing failure through spectral power density. *Eksplatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2020; 22 (4): 651–657, <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2020.4.8>.