



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE DIAGNÓSTICO DE RODAMIENTOS MEDIANTE ANÁLISIS DE RUIDO

TRABAJO FINAL DEL:

Máster en Ingeniería del Mantenimiento

REALIZADO POR:

Luis Graciá Soto

DIRIGIDO POR:

Dr. Héctor Climent Puchades

FECHA: Valencia, abril de 2021

RESUMEN

En el presente Trabajo Final de Máster (TFM) se pretende desarrollar un sistema de diagnóstico de rodamientos mediante el análisis del ruido que producen en condiciones de funcionamiento estacionarias.

Para ello, se hará una revisión sobre el estado actual del mantenimiento predictivo en rodamientos. Seguidamente, se desarrollará el código del sistema de diagnóstico en lenguaje de programación Python junto con su aplicación a ciertos casos concretos.

Una vez desarrollado y aplicado el sistema de diagnóstico de rodamientos mediante el análisis del ruido se realizará un estudio de la repetitividad del sistema. Finalmente, se deberán proponer una serie de trabajos futuros que puedan surgir de la base del presente TFM.

AGRADECIMIENTOS

Después de estos últimos meses tan intensos y dedicados a este proyecto, me propongo a escribir mis últimas frases en este Trabajo Final de Máster y con ellas empieza este apartado, los agradecimientos.

Primero me gustaría comenzar agradeciendo el esfuerzo realizado por parte de mi tutor de la Universitat Politècnica de València, Héctor Climent Puchades. Héctor me ha transmitido su pasión hacia el mundo del ruido y como a través de él se puede llegar a detectar los fallos de una máquina. Además de ser mi guía, me has apoyado todas mis decisiones a lo largo del proyecto y gracias a todo ello, hemos podido ir dándole una correcta forma a este trabajo.

Además, tengo que destacar las horas que te hecho pasar con reuniones casi todas las semanas revisando el proyecto y pensando nuevas ideas, eso sí, debido a la situación actual tuvieron que ser a través de Microsoft Teams.

Por último y no menos importante, agradecerle a mi familia y pareja los consejos que me han ido aportando. Gracias por vuestro apoyo constante y sobre todo por vuestra comprensión a lo largo de estos meses.

Os quiero muchísimo.

¡Muchísimas gracias a todos!

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN AL TFM	9
1.1. MOTIVACIÓN.....	9
1.2. OBJETIVOS	10
1.3. JUSTIFICACIÓN	10
1.3.1. JUSTIFICACIÓN TÉCNICA	10
1.3.2. JUSTIFICACIÓN ACADÉMICA	11
1.4. DESARROLLO DEL TFM	11
2. RODAMIENTOS	13
2.1. DESCRIPCIÓN.....	13
2.2. TIPOS DE RODAMIENTOS	14
2.2.1. RODAMIENTOS RADIALES.....	15
2.2.2. RODAMIENTOS AXIALES	18
2.3. CAUSA DE LOS FALLOS EN RODAMIENTOS.....	20
2.4. TIPOS DE FALLOS EN RODAMIENTOS	21
3. MANTENIMIENTO PREDICTIVO EN RODAMIENTOS	22
3.1. TÉCNICAS DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO APLICADAS A LOS RODAMIENTOS ..	22
3.2. DETECCIÓN DE FALLOS EN RODAMIENTOS	23
3.2.1. DISCONTINUIDADES EN SUPERFICIES.....	24
3.2.2. JUEGO INTERNO EN RODAMIENTOS	25
3.2.3. APLICACIÓN A UN CASO CONCRETO	26
4. HERRAMIENTA DE SOFTWARE UTILIZADA.....	29
5. METODOLOGÍA	30
5.1. DESARROLLO DEL SISTEMA DE DIAGNÓSTICO DE RODAMIENTOS MEDIANTE ANÁLISIS DE RUIDO	30
5.1.1. DATOS DEL RODAMIENTO	30

5.1.2.	FRECUENCIAS CARACTERÍSTICAS DE FALLOS EN RODAMIENTOS	31
5.1.3.	IMPORTAR AUDIO	33
5.1.4.	TRANSFORMADA DE FOURIER Y ESPECTRO DE LA SEÑAL.....	34
5.1.5.	VALORES CARACTERÍSTICOS DE LA SEÑAL.....	35
5.1.6.	SISTEMA DE DIAGNÓSTICO.....	36
5.2.	CÓDIGO COMPLETO DEL SISTEMA DE DIAGNÓSTICO DE RODAMIENTOS MEDIANTE ANÁLISIS DE RUIDO	40
5.3.	MÉTODO DE UTILIZACIÓN DEL SISTEMA DE DIAGNÓSTICO.....	43
6.	APLICACIÓN DEL SISTEMA DE DIAGNÓSTICO DE RODAMIENTOS MEDIANTE ANÁLISIS DE RUIDO	44
6.1.	EQUIPAMIENTO UTILIZADO	44
6.1.1.	BANCO DE PRUEBAS DE RODAMIENTOS	44
6.1.2.	EQUIPO DE GRABACIÓN DE AUDIO	47
6.2.	RODAMIENTO SKF 6201-2Z	48
6.2.1.	APLICACIÓN: 880,00 r.p.m.....	49
6.2.2.	APLICACIÓN: 1.560,00 r.p.m.....	53
6.3.	RODAMIENTO NTN 6201-Z.....	57
6.3.1.	APLICACIÓN: 880,00 r.p.m.....	58
6.3.2.	APLICACIÓN: 1.560,00 r.p.m.....	62
6.4.	RODAMIENTO 6201 NSG.....	66
6.4.1.	APLICACIÓN: 880,00 r.p.m.....	67
6.4.2.	APLICACIÓN: 1.560,00 r.p.m.....	71
7.	ESTUDIO DE LA REPETITIVIDAD DEL SISTEMA DE DIAGNÓSTICO	75
7.1.	ANÁLISIS DE REPETITIVIDAD	75
7.1.1.	CÁLCULO DE LA REPETITIVIDAD: SKF 6201-2Z.....	75
7.1.2.	CÁLCULO DE LA REPETITIVIDAD: MTN 6201-Z.....	77
7.1.3.	CÁLCULO DE LA REPETITIVIDAD: 6201 NSG.....	79

7.1.4.	CÁLCULO DE LA REPETITIVIDAD TOTAL DEL SISTEMA DE DIAGNÓSTICO.....	82
7.2.	FACTORES QUE AFECTAN A LA FIABILIDAD	83
8.	TRABAJOS FUTUROS.....	84
9.	CONCLUSIONES.....	86
10.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88

1. INTRODUCCIÓN AL TFM

En este primer apartado se va a realizar una introducción al presente Trabajo Final de Máster. Se va a comenzar por la razón por la cual el estudiante se ha visto motivado a realizarlo sobre el diagnóstico de máquinas mediante el análisis de ruido, seguido de ello se definirá cuáles son los objetivos del trabajo.

Seguido de ello, se procede a explicar la justificación técnica y académica que posee el desarrollo del presente proyecto. Finalmente, se explicará cómo se va a llevar a cabo el desarrollo del documento.

1.1. MOTIVACIÓN

Este Trabajo Final de Máster (TFG) ha estado motivado por la idea de demostrar que es posible diagnosticar fallos en rodamientos mediante el análisis del ruido que producen en condiciones de funcionamiento.

La idea de realizar este trabajo se desarrolla durante la asignatura Diagnóstico Mediante Análisis de Ruido del segundo semestre del máster de Ingeniería del Mantenimiento.

Durante la asignatura se realizó un trabajo a pequeña escala sobre el análisis del ruido que produce una máquina, en concreto, Luis Graciá Soto realizó un trabajo que consistía en la creación de un indicador de estado de un ventilador. Dicho trabajo consistía en un indicador que a través del ruido que produce un ventilador indicaba en qué estado de desequilibrio se encontraba.

A partir del trabajo de la asignatura el alumno se puso en contacto con el profesor, Héctor Climent Puchades, con el fin de llegar más allá y poder basar su Trabajo Final de Máster en el diagnóstico mediante el análisis de ruido.

Finalmente, acordaron en desarrollar un sistema de diagnóstico de rodamientos mediante análisis de ruido.

1.2. OBJETIVOS

El objetivo de este Trabajo Final de Máster se basa en el desarrollo de un sistema de diagnóstico de rodamientos mediante el análisis del ruido que producen en condiciones de funcionamiento estacionarias, con el fin de demostrar el posible potencial de esta técnica en el diagnóstico de rodamientos en situaciones controladas.

Los subobjetivos que se han tenido en cuenta durante la realización del presente Trabajo Final de Máster son:

- Revisar la situación actual del mantenimiento predictivo en rodamientos.
- Crear el código en formato Python del sistema de diagnóstico de rodamientos mediante análisis de ruido.
- Aplicar el sistema de diagnóstico en diversos casos concretos.
- Proponer posibles trabajos futuros utilizando de base el presente trabajo.

1.3. JUSTIFICACIÓN

A continuación, se muestra tanto la justificación técnica como académica del presente Trabajo Final de Máster.

1.3.1. JUSTIFICACIÓN TÉCNICA

Actualmente, existen numerosas técnicas de mantenimiento predictivo que se aplican a los rodamientos por lo que para diagnosticar rodamientos no únicamente existe una únicamente opción.

A lo largo del tiempo se ha podido observar que una de las técnicas más utilizadas en mantenimiento predictivo de rodamientos es el análisis de vibraciones el cual se basa en el análisis de las frecuencias que produce un rodamiento.

Por el contrario, los diagnósticos mediante análisis de ruido, para el mantenimiento predictivo, no son muy utilizados por lo que se puede decir que todavía es una técnica que se encuentra en desarrollo.

Por tanto, se puede decir que el estado en que se encuentran los análisis de ruido nos he propicio a basar el presente Trabajo Final de Máster en desarrollar dicha técnica, en concreto a aplicarla los rodamientos.

1.3.2. JUSTIFICACIÓN ACADÉMICA

El presente Trabajo Final de Máster (TFM) se realiza como requisito para la obtención del título del Máster en Ingeniería del Mantenimiento. Es importante destacar que este trabajo ha sido desarrollado bajo la tutoría del Dr. Héctor Climent Puchades, actualmente ejerciendo como profesor en la Universitat Politècnica de València.

Además de ello, este trabajo guarda relación con numerosas asignaturas del Máster de Ingeniería del Mantenimiento entre las que destacan: Diagnóstico Mediante Análisis de Ruido, Mantenimiento de Sistemas Mecánicos y Fundamentos de Ingeniería del Mantenimiento.

1.4. DESARROLLO DEL TFM

La memoria del Trabajo Final de Máster se puede dividir en los siguientes apartados:

- Rodamientos.
- Mantenimiento predictivo en rodamientos.
- Herramienta de software utilizada.
- Metodología.
- Aplicación del sistema de diagnóstico de rodamientos mediante análisis de ruido.
- Estudio de repetitividad.
- Trabajos futuros.
- Conclusiones.
- Referencias bibliográficas.

En el apartado de Rodamientos se va a realizar una introducción a los rodamientos para entrar en contexto, explicando qué tipos de rodamientos existen y cuáles son los principales fallos que existen y sus causas.

El mantenimiento predictivo de rodamientos se divide en dos partes, primero se explica cuáles son las técnicas más utilizadas y a continuación, se define la técnica de detección de fallos mediante análisis de vibraciones y de ruido. Seguido de ello, se explicará en que consiste el software Jupyter Notebook y porque lo vamos a utilizar.

En el apartado de Metodología se desarrolla el código en formato Python del sistema de diagnóstico de rodamientos mediante análisis de ruido junto a su método de utilización.

A continuación, se aplicará el código a ciertos casos concretos, pero antes se especificará los equipos utilizados tanto para grabar el ruido de los rodamientos como para realizar la simulación de las condiciones de funcionamiento en las que se aplica el sistema.

Seguido de ello se realizará un estudio de la repetitividad en el que se evaluará la homogeneidad del sistema de diagnóstico y se explicarán cuáles pueden ser los factores que pueden afectar a la fiabilidad.

Terminando, se indicarán unas propuestas de posibles trabajos futuros que parten de la base del presente trabajo. Seguido del apartado de Conclusiones donde se presentan las conclusiones obtenidas a lo largo del desarrollo del proyecto.

Por último, en el apartado de Referencias bibliográficas se muestran las referencias que se han utilizado durante la realización del trabajo.

2. RODAMIENTOS

Este Trabajo Final de Máster se va a centrar en el mantenimiento de los rodamientos y en los tipos de fallos que presentan. Debido a ello existe la importancia de realizar el siguiente apartado de introducción a los rodamientos, con el fin de situarse en contexto.

2.1. DESCRIPCIÓN

Los rodamientos son una herramienta que se utiliza como apoyos entre ejes, con el objetivo de reducir la fricción en los ejes que se encuentran girando.

Dicha reducción de fricción se consigue a través de que el deslizamiento que habría si no hubiese rodamientos es mucho mayor que el rozamiento de rodadura que se consigue con la utilización de rodamientos.

Como introducción a los rodamientos es importante destacar las partes por las que se encuentran formados. Como se explicará en el siguiente apartado existen numerosos tipos de rodamientos, pero debido a que este proyecto se va a centrar en los rodamientos rígidos de bolas se procede a explicar las partes de dicho tipo de rodamientos.

- Las pistas de los rodamientos son las que permiten, por ejemplo, que una máquina que se encuentra sobre un eje se pueda apoyar en él sin problemas de fricción. Lo más común es encontrar la pista interna girando junto al eje y a la máquina apoyada sobre la pista interna, pero se puede dar con casos en que no se cumple estas condiciones.
- Los elementos rodantes o también llamados como bolas en este caso son los que permiten que tanto la pista interna como la externa giren independientemente una de la otra, reduciendo la fricción entre ellas.
- La jaula es una parte importante de los rodamientos ya que su trabajo es mantener a las bolas equidistantes, es decir, mantenerlas en su sitio evitando que se junten y puedan provocar un desgaste anormal.
- La obturación o carcasa se encuentra en la parte lateral del rodamiento entre la pista interna y externa procurando de que no entre nada dentro del rodamiento que pueda provocar un fallo en este.

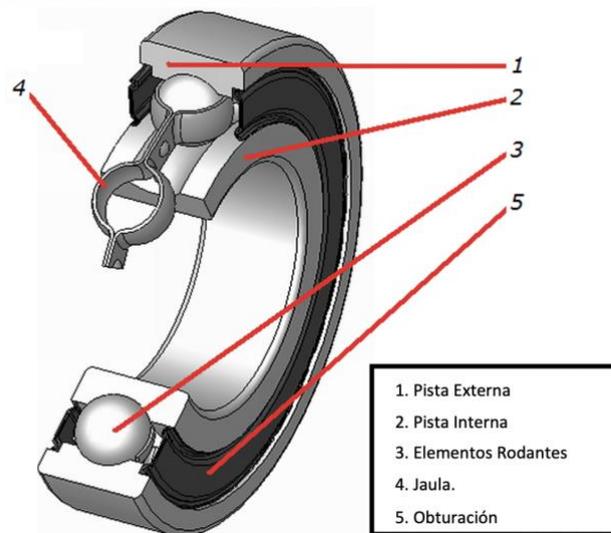


Figura 1: Partes de un rodamiento rígido de bolas

2.2. TIPOS DE RODAMIENTOS

Los rodamientos se pueden clasificar en función del elemento rodante empleado en rodamientos de bolas o de rodillos o de la dirección de la carga aplicada en rodamientos axiales o radiales, ciertos rodamientos permiten soportar cargas axiales y radiales conjuntamente.

A continuación, se procede a nombrar los tipos de rodamientos en función de la dirección de la carga aplicada.

2.2.1. RODAMIENTOS RADIALES

- Los rodamientos radiales rígidos de bolas son los más utilizados, pueden transmitir carga radial o axial en cualquier dirección, ya que las pistas de rodadura de tanto la pista interna como externa envuelven a las bolas evitando que estas se salgan. Además, son en los que nos vamos a centrar a lo largo del presente TFM.

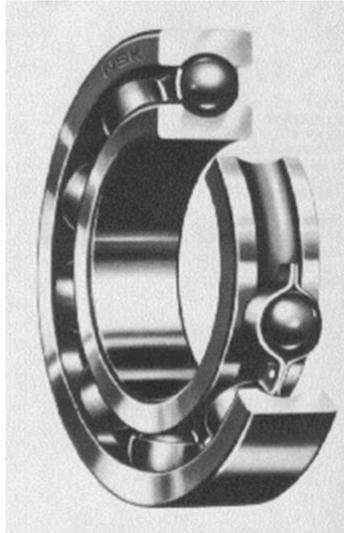


Figura 2: Rodamiento radial rígido de bolas

- Los rodamientos radiales de contacto angular pueden transmitir carga radial o axial en tan solo una dirección. La capacidad para soportar la carga de empuje depende del ángulo de contacto con el que han sido fabricados.



Figura 3: Rodamiento radial de contacto angular

- Los rodamientos radiales de autoalineación son capaces de corregir la desalineación angular en un eje y por tanto no son capaces de tratar con cargas axiales.

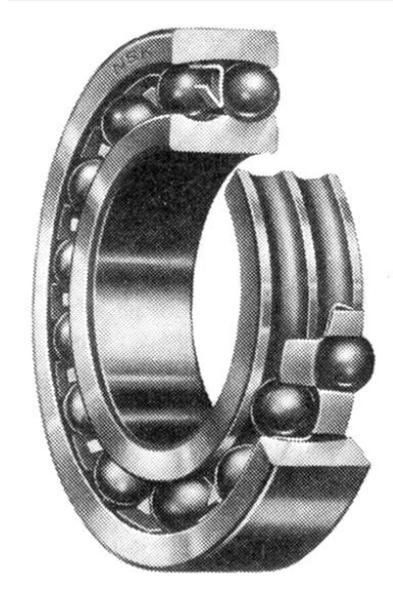


Figura 4: Rodamiento radial de autoalineación

- Los rodamientos radiales de rodillos cilíndricos poseen cilindros en lugar de bolas como elementos rodantes, lo que provoca que la capacidad de carga radial sea muy alta, pero en cambio que la axial sufra limitaciones.

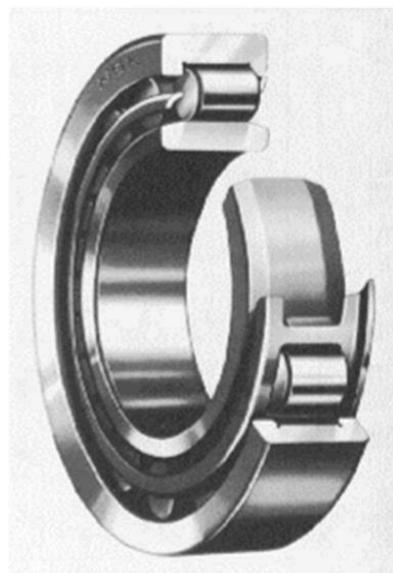


Figura 5: Rodamiento radial de rodillos cilíndricos

- Los rodamientos radiales de rodillos cónicos poseen conos como elementos rodantes, por tanto, poseen una buena carga radial. Como valor añadido a los rodamientos de rodillos cilíndricos estos sí que permiten la carga axial, pero en tan solo un sentido.



Figura 6: Rodamiento radial de rodillos cónicos

- Los rodamientos radiales de rodillos esféricos poseen una buena carga radial. Como valor añadido a los rodamientos de rodillos cónicos estos sí que permiten la carga axial, pero en tan solo un sentido.



Figura 7: Rodamiento radial de rodillos esféricos

- Los rodamientos radiales de agujas no poseen capacidad de carga axial, se utilizan cuando el ancho del rodamiento debe ser muy reducido ya que estos ocupan realmente poco.



Figura 8: Rodamiento radial de agujas

2.2.2. RODAMIENTOS AXIALES

- Los rodamientos axiales de bolas están formados por anillos de rodadura y por tanto solo soportan cargas axiales.



Figura 9: Rodamiento axial de bolas

- Los rodamientos axiales de rodillos cilíndricos soportan cargas axiales y no radiales, pero hay que destacar que este tipo de rodamientos poseen una capacidad de carga muy alta en el sentido axial.



Figura 10: Rodamiento axial de rodillos cilíndricos

- Los rodamientos axiales de rodillos esféricos son de autoalineación, estos sí que son capaces de soportar pequeñas cargas radiales además de las cargas axiales.



Figura 11: Rodamiento axial de rodillos esféricos

2.3. CAUSA DE LOS FALLOS EN RODAMIENTOS

Se dice que en rodamientos aproximadamente el 80% de los fallos son causados debido a una incorrecta lubricación. Dentro de dicho porcentaje podemos segmentar en función de 4 problemas dentro de la lubricación.

- Lubricante contaminado por agentes externos, 25%.
- Fallo en la selección del lubricante en función del uso, 20%.
- Retraso en el cambio de lubricante, 20%.
- Falta de lubricante, 15%.

Como bien sabemos, la función principal del lubricante es reducir la fricción junto con el desgaste, creando un espacio entre las superficies mediante el lubricante. Además de ello, la lubricación tiene la función de cumplir con los siguientes factores.

- Aumentar de vida a fatiga de los elementos a los que lubrica.
- Refrigerar, el lubricante colabora a disipar el calor con el flujo de lubricante.
- Reducir tanto la corrosión como la oxidación mediante la capa de lubricante.
- Arrastrar los restos materiales desprendidos por el desgaste con el fin de eliminarlos y que no causen un fallo.

Por tanto, se puede afirmar que realizando una buena lubricación de los rodamientos se podrá reducir un gran número de fallos en rodamientos.

2.4. TIPOS DE FALLOS EN RODAMIENTOS

En rodamientos existen numerosos tipos de fallo, pero los fallos que es más probable que se desarrollen en rodamientos son los siguientes.

- Fallo por desgaste: se trata de un desgaste de las superficies del rodamiento, dicho desgaste ocurre a causa de la fricción por deslizamiento que podemos encontrar dentro del rodamiento.
- Fallo por adherencia: ocurre cuando se transfiere material de una superficie del rodamiento a otra. Usualmente se da el caso en que se transfiere material de los elementos rodantes a la pista de rodadura y viceversa.
- Fallo por oxidación y corrosión: debido a un fallo en el lubricante se puede dar que aparezcan marcas de oxidación o corrosión.
- Fallo por fatiga: debido a la fatiga de rodadura que se crea dentro de los rodamientos, en ocasiones partículas de la superficie del rodamiento se despegan de él. En función de la forma y profundidad del tipo de superficie separada se puede hablar de laminado, picado o desconchado.
- Daño por corriente eléctrica: ocurre cuando se da la existencia de corriente eléctrica por el rodamiento.
- Fallos por indentación: las indentaciones aparecen tanto en la pista de rodadura como en los elementos rodantes. Ocurren debido entran en la zona de rodadura partículas metálicas externas.
- Fallo por rotura frágil por impactos: debido a un mal montaje o pequeños impactos durante el uso se producen pequeñas roturas en los rodamientos.

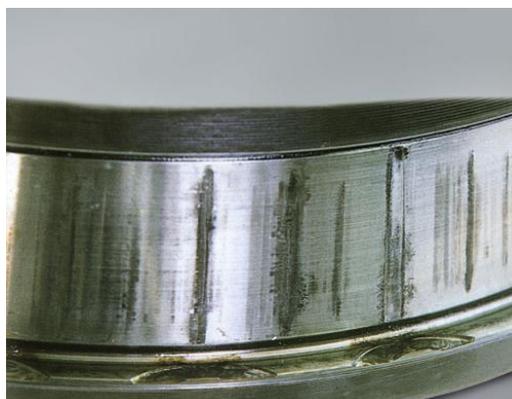


Figura 12: Desgaste debido a un deslizamiento con carga excesiva sin movimiento

3. MANTENIMIENTO PREDICTIVO EN RODAMIENTOS

Aproximadamente el 20% de los fallos que tiene una máquina rotativa ocurren en los rodamientos. Con otras palabras, de cada cinco fallos que hay en una máquina rotativa uno se da en los rodamientos por lo que es necesario hacer hincapié en las técnicas de mantenimiento predictivos que se utilizan en ellos, ya que como se puede observar con el mantenimiento preventivo no es suficiente.

3.1. TÉCNICAS DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO APLICADAS A LOS RODAMIENTOS

Las técnicas de mantenimiento predictivo aplicadas a rodamientos nos permiten decidir, en base a unos parámetros y a las condiciones de funcionamiento de este, cuándo hay que realizar el cambio de estos.

Actualmente, existen numerosas técnicas de mantenimiento predictivo que se aplican a analizar el estado de los rodamientos. Entre ellas destacan:

- Análisis de vibraciones.
- Análisis de temperaturas.
- Análisis por ultrasonidos.
- Análisis por firma eléctrica.

De entre ellas, las técnicas más utilizadas son los análisis de vibraciones y por ultrasonidos ya que son las más precisas. Los análisis de temperatura estudian el parámetro de la temperatura con el fin de evaluar si el sistema funciona de una manera adecuada. Por el contrario, los análisis por firma eléctrica analizan la corriente y el voltaje demandado por la máquina por lo que no se centran exclusivamente en rodamientos.

Se dice que los análisis por ultrasonidos es el método más fiable para detectar fallos en los rodamientos, ya que los avisos por ultrasonidos aparecen antes de que se exciten frecuencias o aumente la temperatura. Mediante esta técnica se es capaz de detectar fallos a fatiga, desgaste en superficies y problemas con el lubricante.

Los análisis de vibraciones es la técnica más utilizada y más consolidada en análisis de rodamientos ya que tiene un coste más reducido que los análisis por ultrasonidos. Este

método se basa en que cuando se produce algún fallo en rodamientos se excitan frecuencias características de dichos fallos lo que altera el nivel de vibración normal de la máquina. Mediante esta técnica es posible detectar juego en rodamientos e irregularidades en las superficies.

Una técnica muy poco utilizada en rodamientos y que se encuentra en expansión son los análisis de ruido. Se trata de una técnica poco intrusiva ya que tan solo es necesario analizar el ruido que produce una máquina, sencilla de aplicar y con un coste muy reducido.

Este proyecto que va a basar en crear un sistema de diagnóstico de rodamientos mediante análisis de ruido, basado en las frecuencias vibroacústicas que se excitan en los fallos de los rodamientos. Debido a ello, va a ser posible detectar, al igual que en vibraciones, juego en rodamientos e irregularidades en las superficies.

3.2. DETECCIÓN DE FALLOS EN RODAMIENTOS

Tanto los análisis de vibraciones como los análisis de ruido se basan en las frecuencias que se excitan con determinados fallos producidos en los rodamientos, pero en el caso de los análisis de ruido en las frecuencias vibroacústicas. El objetivo de estas técnicas es diagnosticar los fallos antes de que se agote su vida útil, para así planificar el mantenimiento y ahorrar costes evitando paradas no planificadas.

Cuando los fallos detectables con estas técnicas, es decir, los juegos internos o las discontinuidades en superficies presentan un alto nivel es cuando se excitan dichas frecuencias características de fallo.

Con el fin de cuantificar el estado de los fallos en rodamientos existen dos vertientes. La primera vertiente consiste en tener en cuenta el valor de la amplitud de dichas frecuencias excitadas, mientras que la segunda vertiente se basa en el número de armónicos excitados. Debido a que algunos expertos consideran que es mejor, en este trabajo se va a cuantificar el estado de los rodamientos basándose en el número de armónicos excitados. Ya que las amplitudes de las frecuencias excitadas dependen de diversos factores: el tipo de máquina, la velocidad, etc.

Hay que tener en cuenta que para el cálculo de las frecuencias características de fallos en rodamientos hay que considerar siempre una velocidad y carga constantes.

3.2.1. DISCONTINUIDADES EN SUPERFICIES

El desgaste del rodamiento provoca que aparezcan discontinuidades en las superficies del rodamiento. A continuación, se muestran las frecuencias excitadas debidas a las discontinuidades en superficies en unidades de “Hz”. Hay que destacar que dichas frecuencias dependen de la pista que se encuentre fija en el rodamiento.

	Pista exterior fija / Pista interior giratoria	Pista exterior giratoria / Pista interior fija
Defecto en la pista fija	$f = \frac{1}{120} * (1 - \gamma) * Z * n$	$f = \frac{1}{120} * (1 + \gamma) * Z * n$
Defecto en la pista giratoria	$f = \frac{1}{120} * (1 + \gamma) * Z * n$	$f = \frac{1}{120} * (1 - \gamma) * Z * n$
Juego radial en el aro giratorio	$f = \frac{n}{60}$	
Defecto radial en un elemento rodante	$f = \frac{1}{60} * \frac{d_m}{d_e} * (1 - \gamma^2) * n$	
Deterioro de la jaula	$f = \frac{1}{120} * (1 - \gamma) * n$	$f = \frac{1}{120} * (1 + \gamma) * n$

Tabla 1: Frecuencias características causadas por discontinuidades en superficies

Siendo:

- $\gamma = \frac{d_e}{d_m} * \cos \alpha$
- d_e = Diámetro del elemento rodante.
- d_m = Diámetro medio del rodamiento.
- α = Ángulo de contacto.
- Z = Número de elementos rodantes.
- n = Velocidad de giro [r.p.m.].

3.2.2. JUEGO INTERNO EN RODAMIENTOS

En el caso en que en un rodamiento la pista interior se vea desplazada respecto a la pista exterior aparecerá juego en el rodamiento. A continuación, se muestra la frecuencia excitada debida al juego en rodamientos.

Juego Interno	$f = \frac{1}{120} * (1 - \gamma) * Z * n \text{ [Hz]}$
---------------	---

Tabla 2: Frecuencia característica causada por juego interno en rodamientos

Siendo:

- $\gamma = \frac{d_e}{d_m} * \cos \alpha$
- d_e = Diámetro del elemento rodante.
- d_m = Diámetro medio del rodamiento.
- α = Ángulo de contacto.
- Z = Número de elementos rodantes.
- n = Velocidad de giro[r.p.m.].

3.2.3. APLICACIÓN A UN CASO CONCRETO

En forma de ejemplo, se van a calcular las frecuencias características de los fallos del rodamiento radial de bolas SKF 6201-2Z, fabricado por la empresa SKF. Este rodamiento coincide con uno con los que posteriormente se utilizará para comprobar el funcionamiento del sistema de diagnóstico de rodamientos mediante análisis de ruido.

Dicho rodamiento posee los siguientes datos y condiciones de funcionamiento.

Diámetro del elemento rodante	$d_e = 4,50 \text{ mm}$
Diámetro exterior del rodamiento	$D = 32,00 \text{ mm}$
Diámetro interior del rodamiento	$d = 12,00 \text{ mm}$
Número de elementos rodantes	$Z = 7 \text{ bolas}$

Tabla 3: Datos del rodamiento SKF 6201-2Z

Ángulo de contacto	$\alpha = 0^\circ$
Velocidad de giro[r.p.m.]	$n = 1.560,00 \text{ r. p. m.}$
Posición de funcionamiento	Pista exterior fija / Pista exterior giratoria

Tabla 4: Condiciones de funcionamiento del rodamiento SKF 6201-2Z

Para poder calcular los valores de las frecuencias características de los fallos en rodamientos, tanto por juego interno como por discontinuidades en superficies, primero es necesario realizar una serie de cálculos previos.

- Diámetro medio del rodamiento:

$$d_m = \frac{d + D}{2} = \frac{12 + 32}{2} = 22,00 \text{ mm}$$

- Coeficiente gamma:

$$\gamma = \frac{d_e}{d_m} * \cos \alpha = \frac{4.50}{22.00} * \cos 0 = 0,20$$

Una vez calculados el valor del diámetro medio y del coeficiente gamma es hora de calcular las frecuencias características de los fallos en rodamientos. Teniendo en cuenta que como se ha indicado anteriormente, se va a suponer que la pista exterior del rodamiento se encuentra fija mientras que la interior es la giratoria.

Por tanto, se procede a calcular las frecuencias que se ven excitadas tanto por irregularidades en superficies como por el juego interno en rodamientos.

	Pista exterior fija / Pista interior giratoria
Defecto en la pista fija	$f = \frac{1}{120} * (1 - \gamma) * Z * n = \frac{1}{120} * (1 - 0,20) * 7 * 1.560 =$ $= 72,39 \text{ Hz}$
Defecto en la pista giratoria	$f = \frac{1}{120} * (1 + \gamma) * Z * n = \frac{1}{120} * (1 + 0,20) * 7 * 1.560 =$ $= 109,61 \text{ Hz}$
Juego radial en el aro giratorio	$f = \frac{n}{60} = \frac{1.560}{60} = 26,00 \text{ Hz}$
Defecto radial en un elemento rodante	$f = \frac{1}{60} * \frac{d_m}{d_e} * (1 - \gamma^2) * n =$ $= \frac{1}{60} * \frac{22,00}{4,50} * (1 - 0,20^2) * 1.560 = 121,79 \text{ Hz}$
Deterioro de la jaula	$f = \frac{1}{120} * (1 - \gamma) * n = \frac{1}{120} * (1 - 0,20) * 1.560$ $= 10,34 \text{ Hz}$

Tabla 5: Frecuencias características causadas por discontinuidades en superficies en el rodamiento SKF 6201-2Z

Juego Interno	$f = \frac{1}{120} * (1 - \gamma) * Z * n = \frac{1}{120} * (1 - 0,20) * 7 * 1.560 =$ $= 72,39 \text{ Hz}$
---------------	--

Tabla 6: Frecuencia característica causada por juego interno en el rodamiento SKF 6201-2Z

En caso en que se realice el espectro de las frecuencias de un sistema donde se encuentre dicho rodamiento y se vea excitada alguna de las frecuencias calculadas anteriormente, se deberá a que el rodamiento poseerá el correspondiente fallo.

Hay que destacar, que en el caso en que la pista exterior del rodamiento se encuentra fija mientras que la interior es la giratoria, coincide la frecuencia característica por juego interno con la frecuencia característica por defecto en la pista fija.

Por el contrario, en el caso en que la pista exterior del rodamiento se encuentra girando mientras que la interior es fija, coincide la frecuencia característica por juego interno con la frecuencia característica por defecto en la pista giratoria.

Dicha situación se debe a que la frecuencia característica por juego interno coincide con el paso de cada uno de los elementos rodantes por un punto de la pista fija.

4. HERRAMIENTA DE SOFTWARE UTILIZADA

La herramienta de software que se va a utilizar para el desarrollo de sistema de diagnóstico de rodamientos mediante análisis de ruido en este Trabajo Final de Máster es Jupyter Notebook.

Jupyter Notebook es una aplicación creada a través de la organización Proyecto Jupyter. Se trata de un software de código abierto que mediante un entorno interactivo nos da pie a programar código en lenguaje Python.

Dicha aplicación nos permite crear documentos en los cuales se pueden introducir celdas de entrada y salida. Dichas celdas de entrada y salida pueden contener diversos formatos: código, texto, vídeos, etc.

Para poder utilizar Jupyter Notebook mediante el sistema operativo Windows es hay que descargarse e instalar el servidor de la aplicación, el cuál es de uso gratuito. Mediante el servidor se ejecuta el navegador predeterminado del ordenador con el que se abrirá Jupyter Notebook y se podrá empezar a utilizar.

En el caso de que utilice el sistema operativo MAC OS es necesario descargarse el programa Anaconda Navigator. Anaconda Navigator posee siete aplicaciones de programación entre las que destaca Jupyter Notebook. Desde el programa se puede ejecutar Jupyter Notebook en el navegador predeterminado del ordenador.

Jupyter Notebook posee cincuenta motores de ejecución con el fin de poder trabajar en cincuenta distintos lenguajes de programación, a cada motor de ejecución se le denomina núcleo. El núcleo por defecto de Jupyter Notebook es IPython con el que se permite trabajar en el lenguaje Python nombrado anteriormente.

Hay que destacar que los documentos de Jupyter Notebook son muy sencillos de exportar, lo que permite que tanto su distribución como su conversión a otros formatos sea muy sencilla.

Además, es importante recalcar que en caso de introducir un archivo de audio en un documento de Jupyter Notebook, este deberá ser un archivo tipo WAV ya que tan solo admite dicho formato.

5. METODOLOGÍA

En este apartado se va a comenzar con el desarrollo del sistema de diagnóstico de rodamientos mediante análisis de ruido a través de la aplicación Jupyter Notebook en un lenguaje Python.

Para ello, primero se desarrollarán todas las partes de las que consta el sistema y posteriormente se redactarán una serie de indicaciones sobre el método de uso.

5.1. DESARROLLO DEL SISTEMA DE DIAGNÓSTICO DE RODAMIENTOS MEDIANTE ANÁLISIS DE RUIDO

En este apartado se va a desarrollar el sistema de diagnóstico. Por ello, se va a dividir el código del software del sistema de diagnóstico en las partes oportunas con el objetivo de facilitar la interpretación y su correcto entendimiento.

5.1.1. DATOS DEL RODAMIENTO

El primer paso para que pueda funcionar correctamente el sistema de diagnóstico es introducir los principales datos del rodamiento a diagnosticar con los que posteriormente calcular las frecuencias características de los fallos en rodamientos.

Las abreviaciones que se han realizado a lo largo del desarrollo del sistema de diagnóstico sobre los datos del rodamiento y que por tanto hay que conocer son las siguientes:

- d_e = Diámetro del elemento rodante [mm].
- d = Diámetro interior [mm].
- D = Diámetro exterior [mm].
- a = Ángulo de contacto [°].
- Z = Número de elementos rodantes.
- n = Velocidad de giro [r.p.m.].

La posición funcionamiento 1 se seleccionará en caso de que la pista exterior trabaje como pista fija, en caso contrario, si la pista interior trabaja como pista fija, se marcará la posición de funcionamiento 2.

A continuación, se muestra el código para la introducción de datos del rodamiento SKF 6201-2Z.

```
# DATOS
de=4.5 # mm
d=12.00 # mm
D=32.00 # mm
Z=7 # bolas
n=1560.00 # r.p.m.
a=0 # °
PistaFija=1 # Poner: 1 si es la P. Exterior o 2 si es la P. Interior
```

5.1.2. FRECUENCIAS CARACTERÍSTICAS DE FALLOS EN RODAMIENTOS

El código de esta celda consiste en calcular las frecuencias características de los fallos en rodamientos, destacar que dichos valores de frecuencias de fallo se obtendrán en unidades de hercios “Hz”. Estos cálculos tienen una dependencia directa de la celda anterior ya que dependen de los datos de los rodamientos.

El sistema de diagnóstico primero calcula el diámetro medio del rodamiento, el coeficiente gamma y convierte el ángulo de contacto a unidades de radianes. Mediante dichos cálculos junto con la posición de funcionamiento el sistema calcula las frecuencias características de los fallos en rodamientos.

Se recuerda que los fallos detectables con análisis de ruido en rodamientos son los siguientes.

- Juego Interno Rodamientos.
- Defecto en la pista fija.
- Defecto en la pista giratoria.
- Juego radial en el aro giratorio.
- Defecto radial en un elemento rodante.
- Deterioro de la jaula.

Finalmente, el sistema nos devuelve los valores de las frecuencias características de los distintos fallos en rodamientos, con el fin de visualizar los valores y poder comprobar que se han realizado correctamente los cálculos.

El código para el cálculo y visualización de los valores de las frecuencias características de los fallos en rodamientos es el siguiente.

```
# CÁLCULOS

dm=(d+D)/2
a=a*2*np.pi/360
y=de*np.math.cos(a)/dm

if PistaFija==1:
    fdpf=(1-y)*Z*n/120 # Defecto en la pista fija o Juego
    fdpg=(1+y)*Z*n/120 # Defecto en la pista giratoria
    fjrag=n/60 # Juego radial en el aro giratorio
    fdrer=dm*(1-y**2)*n/(60*de) # Defecto radial en un elemento rod.
    fdj=(1-y)*n/120 # Deterioro de la jaula

    # POSIBLES FALLOS
    F1="Defecto en la pista fija o Juego Interno"
    F2="Defecto en la pista giratoria"
    F3="Juego radial en el aro giratorio"
    F4="Defecto radial en un elemento rod."
    F5="Deterioro de la jaula"

if PistaFija==2:
    fdpf=(1+y)*Z*n/120 # Defecto en la pista fija
    fdpg=(1-y)*Z*n/120 # Defecto en la pista giratoria o Juego
    fjrag=n/60 # Juego radial en el aro giratorio
    fdrer=dm*(1-y**2)*n/(60*de) # Defecto radial en un elemento rod.
    fdj=(1+y)*n/120 # Deterioro de la jaula

    # POSIBLES FALLOS
    F1="Defecto en la pista fija"
    F2="Defecto en la pista giratoria o Juego Interno"
    F3="Juego radial en el aro giratorio"
    F4="Defecto radial en un elemento rod."
    F5="Deterioro de la jaula"

print("La Frecuencia debida a un",F1, 'es {0:.2f} Hz'.format(fdpf))
print("La Frecuencia debida a un",F2, 'es {0:.2f} Hz'.format(fdpg))
print("La Frecuencia debida a un",F3, 'es {0:.2f} Hz'.format(fjrag))
print("La Frecuencia debida a un",F4, 'es {0:.2f} Hz'.format(fdrer))
print("La Frecuencia debida a un",F5, 'es {0:.2f} Hz'.format(fdj))

print('El dm es {0:.2f} mm'.format(dm))
print('El coeficiente y es {0:.2f} '.format(y))
```

Debido a que se trata de un software con celdas de entrada y salida, en caso de ejecutar la celda del cálculo de las frecuencias características de los fallos en rodamientos con los datos introducidos del rodamiento SKF 6201-2Z el sistema devolverá la siguiente respuesta.

La Frecuencia debida a un Defecto en la pista fija o Juego Interno es 72.39 Hz
 La Frecuencia debida a un Defecto en la pista giratoria es 109.61 Hz
 La Frecuencia debida a un Juego radial en el aro giratorio es 26.00 Hz
 La Frecuencia debida a un Defecto radial en un elemento rod. es 121.79 Hz
 La Frecuencia debida a un Deterioro de la jaula es 10.34 Hz
 El dm es 22.00 mm
 El coeficiente y es 0.20

Figura 13: Frecuencias características de fallo del rodamiento SKF 6201-2Z

En caso en que en el ruido del rodamiento predomine alguna de dichas frecuencias calculadas se podrá decir posee dicho fallo asociado. Como se puede observar, los valores calculados coinciden con los calculados en el apartado anterior de *Detección de fallos en rodamientos* por lo que se puede comprobar el correcto funcionamiento de la celda de cálculos de las frecuencias características de fallos en rodamientos.

5.1.3. IMPORTAR AUDIO

El objetivo de esta celda es importar la grabación del ruido que produce el rodamiento a diagnosticar para su posterior análisis, hay que destacar una vez más que dicho audio deberá encontrarse en formato WAV. Las tareas que realiza el sistema en esta celda son:

1. Leer el fichero WAV del ordenador.
2. Crear grabación en estéreo, en un solo canal.
3. Recortar primeros segundos de la señal hasta que se estabiliza el micrófono.
4. Recortar la señal para que no sea superior al tiempo máximo establecido.
5. Crear un vector de tiempos de la señal.

Se muestra el código para importar el audio "Prueba" en el sistema de diagnóstico.

```
# IMPORTAR AUDIO

fs, senyal = read("Prueba.wav")
if len(np.shape(senyal)) > 1:
    senyal = senyal[:, 0]
senyal = senyal[fs:]
N = len(senyal)
tmax = N / fs
tdeseado = 6
fmax = 16000
if tmax > tdeseado:
    N = int(N * tdeseado/tmax)
    tmax = N / fs
    senyal = senyal[0:N]

t = np.linspace(0, tmax, N)
```

5.1.4. TRANSFORMADA DE FOURIER Y ESPECTRO DE LA SEÑAL

El objetivo de esta celda es calcular la transformada de Fourier del audio importado, para así poder obtener el espectro en frecuencias de la señal. Para poder representar el espectro en frecuencias del ruido producido por el rodamiento a diagnosticar primero hay que calcular el vector de frecuencias de la señal.

Se muestra el código utilizado para calcular la transformada de Fourier y representar el espectro del ruido producido por el rodamiento.

```
# CALCULAR LA TRANSFORMADA DE FOURIER

tf_senyal = np.fft.fft(senyal)/N*2
Nmitad = N//2 if N%2==0 else N//2+1

frec = np.fft.fftfreq(N, 1/fs)

fig = plt.figure(figsize=(18, 6))
ax1 = fig.add_subplot(1, 1, 1)
ax1.plot(frec[0:Nmitad], np.abs(tf_senyal[0:Nmitad]))
ax1.set_xlim([0, 2000])
ax1.set_xlabel('frecuencia [Hz]')
ax1.set_ylabel('amplitud')
ax1.set_title('Prueba', fontsize=14)
```

Como ejemplo se muestra la salida de la celda de cálculo de la transformada de Fourier mostrando el espectrograma de la señal “Prueba”.

Si se aplica la celda del calculo de la transformada de Fourier al audio “Prueba”, que se ha importado anteriormente, la respuesta del sistema en la siguiente.

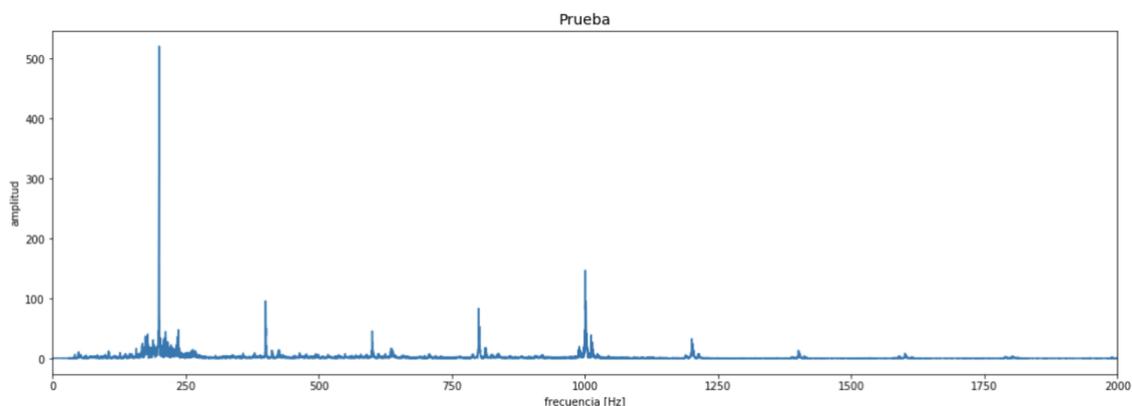


Figura 14: Espectro de la señal Prueba

Se observa que se trata de una señal con altos contenido en frecuencia a 200 Hz y en sus armónicos, a su vez se puede observar que existe contenido a bajas frecuencias.

5.1.5. VALORES CARACTERÍSTICOS DE LA SEÑAL

La función de esta celda es calcular los valores característicos de la señal: el valor de la amplitud máxima del espectro de la señal y el 10 % de dicha amplitud máxima.

Este cálculo se debe a que este sistema de diagnóstico se va a basar en observar el espectro en frecuencias de la señal e indicar si alguna de las frecuencias de la señal con una amplitud mayor que el 10 % de la amplitud máxima coincide con una frecuencia característica de fallo en rodamientos y por tanto indicar que se puede deber debido a la existencia de dicho fallo en el rodamiento a diagnosticar.

A su vez, se va a representar el valor del 10 % de la amplitud máxima como una línea horizontal azul a lo largo del espectro, con el objetivo de obtener una mejor interpretación de dicho valor.

El código para calcular los valores característicos de la señal es el siguiente.

```
# CALCULAR VALORES CARACTERÍSTICOS DE LA SEÑAL

ValorMax=np.amax(np.abs(tf_senyal[0:Nmitad]))
print('Valor Máximo = {0:.2f} '.format(ValorMax))

Porcentaje=10 # %
Valor10PorMax=np.amax(np.abs(tf_senyal[0:Nmitad]))*Porcentaje/100
print("Valor",Porcentaje, '% del Máximo = {0:.2f}'.format(Valor10PorMax))

plt.axhline(y=Valor10PorMax)
```

La respuesta de la celda del cálculo de los valores característicos para la señal del apartado anterior en la siguiente.

```
Valor Máximo = 520.15
Valor 10 % del Máximo = 52.01
```

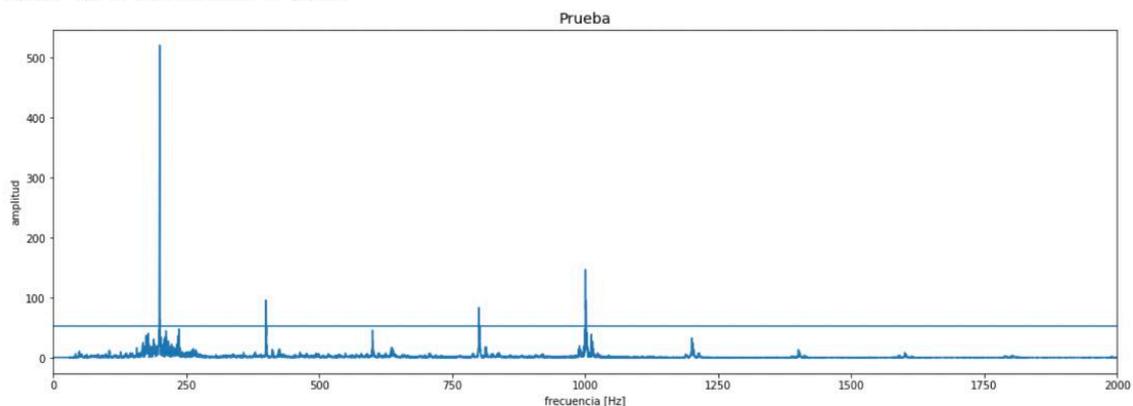


Figura 15: Valores característicos de la señal Prueba

5.1.6. SISTEMA DE DIAGNÓSTICO

En este apartado se va a desarrollar el código del sistema de diagnóstico de rodamientos mediante análisis de ruido.

Hay que destacar que el sistema cuantifica el grado en el que se encuentran los distintos fallos diagnosticados en los rodamientos en función del número de armónicos que aparecen de las frecuencias características de fallos en rodamientos, es decir, el grado de fallo será coincidente con el número del último armónico detectado de dichas frecuencias de fallo.

El primer paso es definir el error máximo permitido con el que se desea trabajar, es decir, la precisión a la hora de identificar frecuencias con la que se quiere que el sistema trabaje. En este trabajo se ha optado por un error del 5 % ya que después de realizar una serie de pruebas se ha estimado oportuno dicho valor.

El sistema comienza evaluando la frecuencia característica de un fallo y continua con el resto de los fallos una vez ha terminado con el anterior. El orden de fallos con los que el sistema trabaja es el siguiente.

1. Defecto en la pista fija “fdpf”.
2. Defecto en la pista giratoria “fdpg”.
3. Juego radial en el aro giratorio “fjrag”.
4. Defecto radial en un elemento rodante “fdrer”.
5. Defecto en la jaula “fdj”.

El sistema comienza definiendo que el rodamiento posee un Grado 0 en cada fallo y calcula un intervalo de precisión, siendo el valor máximo de dicho intervalo un 5 % más que el valor de la frecuencia de fallo por defecto en la pista fija y el valor mínimo un 5 % menos.

Seguido de ello, el sistema representa el intervalo definido para el primer y segundo armónico de cada fallo en el espectro de la señal siendo cada fallo representado de un color distinto.

Los intervalos de los primeros armónicos se representarán con una intensidad alpha de 0,5 puntos mientras que los intervalos de los segundos armónicos se representarán con

una intensidad alpha de 0,2 puntos, es decir, la intensidad de los primeros armónicos será mayor que la de los segundos armónicos.

Los colores asociados a los distintos tipos de fallos detectables con el presente sistema de diagnóstico en rodamientos son los siguientes.

- Rojo: Defecto en la pista fija.
- Amarillo: Defecto en la pista giratoria.
- Verde: Juego radial en el aro giratorio.
- Magenta: Defecto radial en un elemento rodante.
- Azul: Deterioro de la jaula.

Una vez definido y representado el intervalo de precisión del fallo, se comprueba si alguna de las frecuencias de la señal posee un valor mayor que el 10 % de la amplitud máxima y se encuentra dentro del intervalo de fallo. En caso de que sí, el sistema identificará el fallo y por tanto le otorgará a la señal un Grado 1 en dicho fallo, debido a que la señal contiene contenido en frecuencia en el primer armónico de la frecuencia característica de fallo y como se ha dicho anteriormente se van a cuantificar los fallos en función del número de armónicos.

En caso de que el sistema de diagnóstico detecte que el fallo posee un Grado 1, por tanto, se ha detectado contenido en frecuencia en el primer armónico de la frecuencia de fallo, el sistema se dispondrá a contar el número de armónicos seguidos que se manifiestan de dicho fallo.

En caso de que no se detecte un armónico de las frecuencias de fallo en la señal el sistema dejará de contar e indicará que el grado del fallo es el del último armónico contado, esto se debe a que solo evalúa un armónico si ha detectado el anterior. Este método se trata de una herramienta de protección, con el objetivo de que el sistema no indique que un rodamiento tiene un alto grado de un fallo solo porque coincida un armónico del fallo con una frecuencia aleatoria de la señal.

En caso de que se haya detectado un fallo, es decir, que el grado de un fallo sea distinto de cero, el sistema indicará el nombre del fallo detectado junto con el grado en el que se manifiesta en la señal.

A continuación, se muestra el código de la aplicación del sistema de diagnóstico para el audio “Prueba” es el siguiente.

```
# APLICAR SISTEMA DE MONITORIZADO

Error=5 # %

for i in [fdpf, fdpg, fjrag, fdrer, fdj]:
    Grado=0
    fMax=i*(1+Error/100)
    fMin=i*(1-Error/100)

    if i== fdpf:
        plt.axvspan(fMin, fMax, facecolor='r', alpha=0.5)
        plt.axvspan(2*fMin, 2*fMax, facecolor='r', alpha=0.2)
    if i== fdpg:
        plt.axvspan(fMin, fMax, facecolor='y', alpha=0.5)
        plt.axvspan(2*fMin, 2*fMax, facecolor='y', alpha=0.2)
    if i== fjrag:
        plt.axvspan(fMin, fMax, facecolor='g', alpha=0.5)
        plt.axvspan(2*fMin, 2*fMax, facecolor='g', alpha=0.2)
    if i== fdrer:
        plt.axvspan(fMin, fMax, facecolor='m', alpha=0.5)
        plt.axvspan(2*fMin, 2*fMax, facecolor='m', alpha=0.2)
    if i== fdj:
        plt.axvspan(fMin, fMax, facecolor='b', alpha=0.5)
        plt.axvspan(2*fMin, 2*fMax, facecolor='b', alpha=0.2)

    for k in range(Nmitad):
        if np.abs(tf_senyal[k]) > Valor10PorMax:
            if fMax > frec[k] > fMin:
                Grado=1

    if Grado==1:
        for x in range(2,10):
            if Grado==x-1:
                f=i*x
                fMax=f*(1+Error/100)
                fMin=f*(1-Error/100)

                for k in range(Nmitad):
                    if np.abs(tf_senyal[k]) > Valor10PorMax:
                        if fMax > frec[k] > fMin:
                            Grado=x

    if i== fdpf and Grado!=0:
        print(F1, ": Grado ", Grado)
    if i== fdpg and Grado!=0:
        print(F2, ": Grado", Grado)
    if i== fjrag and Grado!=0:
        print(F3, ": Grado ", Grado)
    if i== fdrer and Grado!=0:
        print(F4, ": Grado ", Grado)
    if i== fdj and Grado!=0:
        print(F5, ": Grado ", Grado);
```

Para el caso que se viene poniendo de ejemplo, el audio “Prueba”, el sistema no ha detectado ningún fallo ya que ninguna de las frecuencias destacables de la señal coincide con las frecuencias características de fallo.

La explicación de ello es que la grabación del audio prueba se realizó al rodamiento SKF 6201-2Z cuando se encontraba en un estado con un nivel muy bajo de uso, prácticamente se encontraba nuevo.

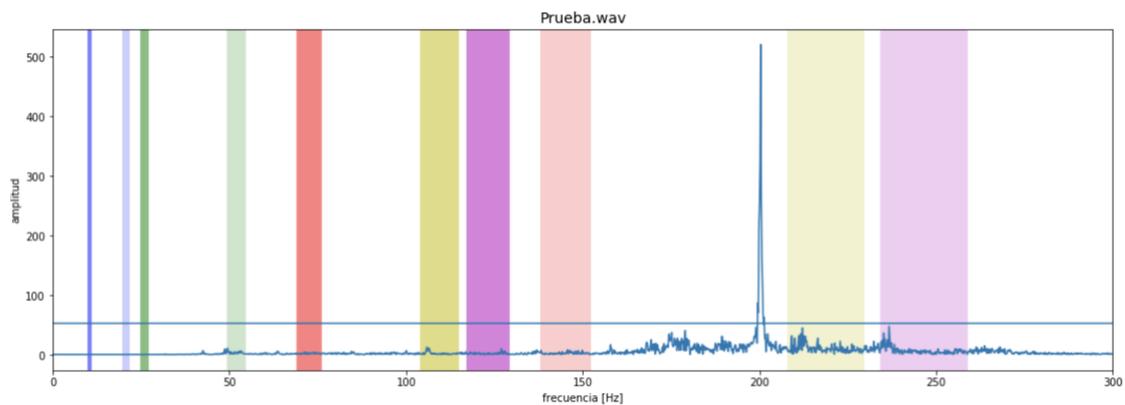


Figura 16: Aplicación del sistema de diagnóstico a la señal Prueba

5.2. CÓDIGO COMPLETO DEL SISTEMA DE DIAGNÓSTICO DE RODAMIENTOS MEDIANTE ANÁLISIS DE RUIDO

En este apartado se muestra el código completo del sistema de diagnóstico de rodamientos mediante análisis de ruido preparado para la posterior aplicación.

Es importante recalcar que el código completo del sistema de diagnóstico corresponde al conjunto de las celdas desarrolladas en el apartado anterior en un mismo bloque, con el fin de facilitar la ejecución de este.

```
# DATOS

de= # mm
d= # mm
D= # mm
Z= # bolas
n= # r.p.m.
a= # °
PistaFija= # Poner: 1 si es la P. Exterior o 2 si es la P. Interior

NombreAudio=".wav"

Error=5 # %
Porcentaje=10 # %

# CÁLCULOS

dm=(d+D)/2
a=a*2*np.pi/360
y=de*np.math.cos(a)/dm

if PistaFija==1:
    fdpf=(1-y)*Z*n/120 # Defecto en la pista fija o Juego
    fdpg=(1+y)*Z*n/120 # Defecto en la pista giratoria
    fjrag=n/60 # Juego radial en el aro giratorio
    fdrer=dm*(1-y**2)*n/(60*de) # Defecto radial en un elemento rod.
    fdj=(1-y)*n/120 # Deterioro de la jaula

    # POSIBLES FALLOS
    F1="Defecto en la pista fija o Juego Interno"
    F2="Defecto en la pista giratoria"
    F3="Juego radial en el aro giratorio"
    F4="Defecto radial en un elemento rod."
    F5="Deterioro de la jaula"

if PistaFija==2:
    fdpf=(1+y)*Z*n/120 # Defecto en la pista fija
    fdpg=(1-y)*Z*n/120 # Defecto en la pista giratoria o Juego
    fjrag=n/60 # Juego radial en el aro giratorio
    fdrer=dm*(1-y**2)*n/(60*de) # Defecto radial en un elemento rod.
    fdj=(1+y)*n/120 # Deterioro de la jaula

    # POSIBLES FALLOS
    F1="Defecto en la pista fija"
    F2="Defecto en la pista giratoria o Juego Interno"
    F3="Juego radial en el aro giratorio"
    F4="Defecto radial en un elemento rod."
    F5="Deterioro de la jaula"
```

```

print("La Frecuencia debida a un",F1, '(Rojo) es {0:.2f} Hz'.format(fdpf))
print("La Frecuencia debida a un",F2, '(Amarillo) es {0:.2f} Hz'.format(fdpg))
print("La Frecuencia debida a un",F3, '(Verde) es {0:.2f} Hz'.format(fjrag))
print("La Frecuencia debida a un",F4, '(Magenta) es {0:.2f} Hz'.format(fdrer))
print("La Frecuencia debida a un",F5, '(Azul) es {0:.2f} Hz'.format(fdj))

print('El dm es {0:.2f} mm'.format(dm))
print('El coeficiente y es {0:.2f} '.format(y))

# IMPORTAR AUDIO

fs, senyal = read(NombreAudio)
if len(np.shape(senyal)) > 1:
    senyal = senyal[:, 0]

senyal = senyal[fs:]
N = len(senyal)
tmax = N / fs
tdeseado = 6
fmax = 16000
if tmax > tdeseado:
    N = int(N * tdeseado/tmax)
    tmax = N / fs
    senyal = senyal[0:N]

t = np.linspace(0, tmax, N)
# CALCULAR LA TRANSFORMADA DE FOURIER

tf_senyal = np.fft.fft(senyal)/N*2
Nmitad = N//2 if N%2==0 else N//2+1
frec = np.fft.fftfreq(N, 1/fs)

fig = plt.figure(figsize=(18, 6))
ax1 = fig.add_subplot(1, 1, 1)
ax1.plot(frec[0:Nmitad], np.abs(tf_senyal[0:Nmitad]))
ax1.set_xlim([0, 300])

ax1.set_xlabel('frecuencia [Hz]')
ax1.set_ylabel('amplitud')
ax1.set_title(NombreAudio, fontsize=14)

# CALCULAR VALORES CARACTERÍSTICOS DE LA SEÑAL

ValorMax=np.amax(np.abs(tf_senyal[0:Nmitad]))
print('Valor Máximo = {0:.2f} '.format(ValorMax))

Valor10PorMax=np.amax(np.abs(tf_senyal[0:Nmitad]))*Porcentaje/100
print("Valor",Porcentaje, '% del Máximo = {0:.2f}'.format(Valor10PorMax))

plt.axhline(y=Valor10PorMax)
# APLICAR SISTEMA DE MONITORIZADO

for i in [fdpf, fdpg, fjrag, fdrer, fdj]:
    Grado=0
    fMax=i*(1+Error/100)
    fMin=i*(1-Error/100)

    if i== fdpf:
        plt.axvspan(fMin, fMax, facecolor='r', alpha=0.5)
        plt.axvspan(2*fMin, 2*fMax, facecolor='r', alpha=0.2)
    if i== fdpg:
        plt.axvspan(fMin, fMax, facecolor='y', alpha=0.5)
        plt.axvspan(2*fMin, 2*fMax, facecolor='y', alpha=0.2)
    if i== fjrag:
        plt.axvspan(fMin, fMax, facecolor='g', alpha=0.5)
        plt.axvspan(2*fMin, 2*fMax, facecolor='g', alpha=0.2)

```

```
if i== fdrer:
    plt.axvspan(fMin, fMax, facecolor='m', alpha=0.5)
    plt.axvspan(2*fMin, 2*fMax, facecolor='m', alpha=0.2)
if i== fdj:
    plt.axvspan(fMin, fMax, facecolor='b', alpha=0.5)
    plt.axvspan(2*fMin, 2*fMax, facecolor='b', alpha=0.2)

for k in range(Nmitad):
    if np.abs(tf_senyal[k]) > Valor10PorMax:
        if fMax > frec[k] > fMin:
            Grado=1

if Grado==1:
    for x in range(2,10):
        if Grado==x-1:
            f=i*x
            fMax=f*(1+Error/100)
            fMin=f*(1-Error/100)

            for k in range(Nmitad):
                if np.abs(tf_senyal[k]) > Valor10PorMax:
                    if fMax > frec[k] > fMin:
                        Grado=x

if i== fdpf and Grado!=0:
    print(F1, ": Grado ", Grado)
if i== fdpg and Grado!=0:
    print(F2, ": Grado ", Grado)
if i== fjrag and Grado!=0:
    print(F3, ": Grado ", Grado)
if i== fdrer and Grado!=0:
    print(F4, ": Grado ", Grado)
if i== fdj and Grado!=0:
    print(F5, ": Grado ", Grado);
```

5.3. MÉTODO DE UTILIZACIÓN DEL SISTEMA DE DIAGNÓSTICO

Como se ha comentado anteriormente, este código se ha desarrollado en un lenguaje de programación tipo Python a través de la aplicación Jupyter Notebook por lo que se recomienda el uso de dicha aplicación para la aplicación del código.

Además de Jupyter Notebook se pueden utilizar otros motores de ejecución con los que ejecutar el código del sistema de diagnóstico, pero para ello primero habría que exportar el código al formato adecuado, por ejemplo, a formato HTML o de texto.

Para la utilización del fichero del sistema de diagnóstico de rodamientos mediante análisis de ruido con el uso de la aplicación Jupyter Notebook hay que seguir los siguientes pasos.

1. Descargar y ejecutar la aplicación de Jupyter Notebook en un ordenador.
2. Crear una carpeta e introducir en ella el audio del rodamiento a diagnosticar y el fichero tipo Python con el código del sistema de diagnóstico de rodamientos mediante análisis de ruido.
3. Abrir el fichero mediante la aplicación de Jupyter Notebook.
4. Ejecutar la celda de módulos para importar los módulos: librerías o paquetes necesarios para el funcionamiento del sistema de diagnóstico.
5. Rellenar los siguientes datos del rodamiento a diagnosticar junto con el nombre de la grabación del ruido que produce en condiciones de funcionamiento:
 - a. d_e = Diámetro del elemento rodante [mm].
 - b. d = Diámetro interior [mm].
 - c. D = Diámetro exterior [mm].
 - d. Z = Número de elementos rodantes.
 - e. n = Velocidad de giro [r.p.m.].
 - f. α = Ángulo de contacto [°].
 - g. Posición de funcionamiento.
 - h. Nombre del audio en formato WAV.
6. Ejecutar la celda con el código del sistema de diagnóstico y todos los datos rellenados.

6. APLICACIÓN DEL SISTEMA DE DIAGNÓSTICO DE RODAMIENTOS MEDIANTE ANÁLISIS DE RUIDO

En este apartado se va a aplicar el sistema de diagnóstico mediante análisis de ruido a tres rodamientos. Pero primero se especificará cuál es el equipamiento que ha sido utilizado para la posterior correcta aplicación del sistema de diagnóstico.

Como se ha explicado en el apartado anterior el sistema de diagnóstico se aplicará a un rodamiento SKF 6201-2Z, con un estado nuevo, un rodamiento NTN 6201-Z, que presenta un nivel alto uso, y a un rodamiento 6201 NSG con un nivel medio de utilización. Hay que destacar que se han elegido dichos rodamientos debido a que poseen las mismas dimensiones y por tanto será más comprensible la interpretación de los resultados.

6.1. EQUIPAMIENTO UTILIZADO

En este apartado se procede a explicar cuál ha sido el equipamiento utilizado para la correcta aplicación del sistema de diagnóstico. Para ello, se comenzará detallando cual es el equipo que se ha utilizado para simular las condiciones de funcionamiento del rodamiento, seguido del equipo con el se han obtenido las grabaciones del ruido que producen los rodamientos en funcionamiento.

6.1.1. BANCO DE PRUEBAS DE RODAMIENTOS

El equipamiento que se ha utilizado para simular las condiciones de funcionamiento de los rodamientos es un banco de pruebas de rodamientos, en él se han ensayado los rodamientos y registrado su ruido para su posterior aplicación.

El banco de pruebas de rodamientos utilizado está formado por un motor eléctrico y un variador de la tensión donde se puede modificar la tensión que se aplica al motor eléctrico.

El banco de pruebas se encuentra disponible en las instalaciones de la Universitat Politècnica de València y ha sido facilitada por el tutor, Héctor Climent Puchades, al alumno, Luis Graciá Soto, para la realización del presente Trabajo Final de Máster.

El motor eléctrico posee un eje de un diámetro de 10,00 mm donde se sitúan los rodamientos. Los rodamientos deben tener un diámetro interior comprendido entre 10,00 mm y 12,00 mm, en caso de que sean más pequeños no se podrán introducir en el eje y en caso de ser más grandes se producirá juego entre el eje y el rodamiento.

A su vez, el motor eléctrico posee una tuerca que se sitúa por la parte exterior del eje con el objetivo de sujetar el rodamiento ensayado por la parte interior pretendiendo que no tenga juego.

Por tanto, se puede observar que en el banco de pruebas de rodamientos debido a la estructura del motor eléctrico siempre se van a dar condiciones de pista interna giratoria.

Para poder fijar la pista externa y, por tanto, simular unas condiciones de funcionamiento de pista exterior fija y pista exterior giratoria, se cuenta con dos tornillos exteriores que se deben de apretar ligeramente, cuando el eje está a la velocidad de giro deseada, hasta llegar a fijar la pista externa.



Figura 17: Plano frontal del eje del motor eléctrico

Conectado al motor se sitúa el variador de tensión, la función del variador es poder regular la tensión aplicada al motor en un rango situado entre 0,00 V y 12,00 V mediante la rueda de ajuste del voltaje. El variador de tensión posee una aguja que nos indica la tensión aplicada en cada instante al motor.

Para realizar las aplicaciones del sistema de diagnóstico a los rodamientos se han realizado mediciones tanto a 5,00 V como a 10,00 V. Hay que destacar que con el variador de tensión en la posición de 5,00 V el eje del motor eléctrico gira a una velocidad de 880,00 r.p.m., en cambio, con el variador de tensión en la posición de 10,00 V el eje del motor eléctrico gira a una velocidad de 1.560,00 r.p.m.,



Figura 18: Variador de la tensión ajustado en 10 V

Una vez explicado cual es el equipamiento que se ha utilizado como banco de pruebas de rodamientos, se puede decir que las condiciones de funcionamiento en las que se va a aplicar el sistema de diagnóstico a los rodamientos son las siguientes.

Ángulo de contacto	$\alpha = 0^\circ$
Velocidad de giro[r.p.m.]	$n = 880,00 / 1.560,00 \text{ r. p. m.}$
Posición de funcionamiento	Pista exterior fija / Pista exterior giratoria

Tabla 7: Condiciones de funcionamiento simuladas con el banco de pruebas

6.1.2. EQUIPO DE GRABACIÓN DE AUDIO

Para poder aplicar el sistema de diagnóstico a los rodamientos es necesario obtener grabaciones del ruido que producen los rodamientos en el banco de ensayo mientras operan en las condiciones de funcionamiento simuladas.

El equipo que se ha utilizado para realizar las grabaciones del ruido de los rodamientos ha sido un teléfono móvil, en concreto un iPhone 11 PRO. Se ha optado por este equipo ya que el alumno no ha tenido acceso a otro tipo de equipo de medida como puede ser un micrófono calibrado.



Figura 19: Equipo de grabación de ruido, iPhone 11 PRO

Dato que la aplicación de grabadora del propio teléfono graba los audios en un formato MPEG-4 SLS y como se ha comentado anteriormente Jupyter Notebook trabaja con formatos de audio tipo WAV, es necesario grabar los audios en dicho formato o convertir los grabados en otros formatos a formato WAV.

Por tanto, se ha optado por utilizar la aplicación Smart Recorder. Se trata de una aplicación gratuita descargable del App Store con la que se puede grabar audios en formato WAV y que además nos permite compartirlos mediante correo electrónico, facilitando la distribución de los audios del teléfono móvil al ordenador.

6.2. RODAMIENTO SKF 6201-2Z

En este apartado se procede a aplicar el sistema de diagnóstico al rodamiento radial de bolas SKF 6201-2Z del fabricante SKF en un estado nuevo. Este rodamiento coincide con el que anteriormente se utilizó para la aplicación a un caso concreto en el apartado de *Detección de Fallos en Rodamientos*.

A continuación, se muestran los datos del rodamiento SKF 6201-2Z.

Diámetro del elemento rodante	$d_e = 4,50 \text{ mm}$
Diámetro exterior del rodamiento	$D = 32,00 \text{ mm}$
Diámetro interior del rodamiento	$d = 12,00 \text{ mm}$
Número de elementos rodantes	$Z = 7 \text{ bolas}$

Tabla 8: Datos del rodamiento SKF 6201-2Z

Es importante destacar que el sistema de diagnóstico se va a aplicar al rodamiento SKF 6201-2Z dos veces, es decir, funcionando a dos regímenes de giro distintos, a 880,00 r.p.m. y a 1.560,00 r.p.m.



Figura 20: Rodamiento SKF 6201-2Z

6.2.1. APLICACIÓN: 880,00 r.p.m.

Se procede a aplicar el sistema de diagnóstico de rodamientos mediante análisis de ruido a una grabación del audio del rodamiento SKF 6201-2Z, en la que en el rodamiento se encontraba girando la pista interna a 880,00 r.p.m. y su pista externa estaba fija.

```
# DATOS

de=4.50 # mm
d=12.00 # mm
D=32.00 # mm
Z=7 # bolas
n=880.00 # r.p.m.
a=0 # °
PistaFija=1 # Poner: 1 si es la P. Exterior o 2 si es la P. Interior

NombreAudio="SKF 6201-2Z 880rpm.wav"

Error=5 # %
Porcentaje=10 # %

# CÁLCULOS

dm=(d+D)/2
a=a*2*np.pi/360
y=de*np.math.cos(a)/dm

if PistaFija==1:
    fdpf=(1-y)*Z*n/120 # Defecto en la pista fija o Juego
    fdpg=(1+y)*Z*n/120 # Defecto en la pista giratoria
    fjrag=n/60 # Juego radial en el aro giratorio
    fdrer=dm*(1-y**2)*n/(60*de) # Defecto radial en un elemento rod.
    fdj=(1-y)*n/120 # Deterioro de la jaula

    # POSIBLES FALLOS
    F1="Defecto en la pista fija o Juego Interno"
    F2="Defecto en la pista giratoria"
    F3="Juego radial en el aro giratorio"
    F4="Defecto radial en un elemento rod."
    F5="Deterioro de la jaula"

if PistaFija==2:
    fdpf=(1+y)*Z*n/120 # Defecto en la pista fija
    fdpg=(1-y)*Z*n/120 # Defecto en la pista giratoria o Juego
    fjrag=n/60 # Juego radial en el aro giratorio
    fdrer=dm*(1-y**2)*n/(60*de) # Defecto radial en un elemento rod.
    fdj=(1+y)*n/120 # Deterioro de la jaula

    # POSIBLES FALLOS
    F1="Defecto en la pista fija"
    F2="Defecto en la pista giratoria o Juego Interno"
    F3="Juego radial en el aro giratorio"
    F4="Defecto radial en un elemento rod."
    F5="Deterioro de la jaula"

print("La Frecuencia debida a un",F1, '(Rojo) es {0:.2f} Hz'.format(fdpf))
print("La Frecuencia debida a un",F2, '(Amarillo) es {0:.2f} Hz'.format(fdpg))
print("La Frecuencia debida a un",F3, '(Verde) es {0:.2f} Hz'.format(fjrag))
print("La Frecuencia debida a un",F4, '(Magenta) es {0:.2f} Hz'.format(fdrer))
print("La Frecuencia debida a un",F5, '(Azul) es {0:.2f} Hz'.format(fdj))

print('El dm es {0:.2f} mm'.format(dm))
print('El coeficiente y es {0:.2f} '.format(y))
```

```

# IMPORTAR AUDIO

fs, senyal = read(NombreAudio)
if len(np.shape(senyal)) > 1:
    senyal = senyal[:, 0]

senyal = senyal[fs:]
N = len(senyal)
tmax = N / fs
tdeseado = 6
fmax = 16000
if tmax > tdeseado:
    N = int(N * tdeseado/tmax)
    tmax = N / fs
    senyal = senyal[0:N]

t = np.linspace(0, tmax, N)

# CALCULAR LA TRANSFORMADA DE FOURIER

tf_senyal = np.fft.fft(senyal)/N*2
Nmitad = N//2 if N%2==0 else N//2+1
frec = np.fft.fftfreq(N, 1/fs)

fig = plt.figure(figsize=(18, 6))
ax1 = fig.add_subplot(1, 1, 1)
ax1.plot(frec[0:Nmitad], np.abs(tf_senyal[0:Nmitad]))
ax1.set_xlim([0, 160])

ax1.set_xlabel('frecuencia [Hz]')
ax1.set_ylabel('amplitud')
ax1.set_title(NombreAudio, fontsize=14)

# CALCULAR VALORES CARACTERÍSTICOS DE LA SEÑAL

ValorMax=np.amax(np.abs(tf_senyal[0:Nmitad]))
print('Valor Máximo = {0:.2f} '.format(ValorMax))

Valor10PorMax=np.amax(np.abs(tf_senyal[0:Nmitad]))*Porcentaje/100
print("Valor",Porcentaje, '% del Máximo = {0:.2f}'.format(Valor10PorMax))

plt.axhline(y=Valor10PorMax)

# APLICAR SISTEMA DE MONITORIZADO

for i in [fdpf, fdpg, fjrag, fdrer, fdj]:
    Grado=0
    fMax=i*(1+Error/100)
    fMin=i*(1-Error/100)

    if i== fdpf:
        plt.axvspan(fMin, fMax, facecolor='r', alpha=0.5)
        plt.axvspan(2*fMin, 2*fMax, facecolor='r', alpha=0.2)
    if i== fdpg:
        plt.axvspan(fMin, fMax, facecolor='y', alpha=0.5)
        plt.axvspan(2*fMin, 2*fMax, facecolor='y', alpha=0.2)
    if i== fjrag:
        plt.axvspan(fMin, fMax, facecolor='g', alpha=0.5)
        plt.axvspan(2*fMin, 2*fMax, facecolor='g', alpha=0.2)
    if i== fdrer:
        plt.axvspan(fMin, fMax, facecolor='m', alpha=0.5)
        plt.axvspan(2*fMin, 2*fMax, facecolor='m', alpha=0.2)
    if i== fdj:
        plt.axvspan(fMin, fMax, facecolor='b', alpha=0.5)
        plt.axvspan(2*fMin, 2*fMax, facecolor='b', alpha=0.2)

```

```

for k in range(Nmitad):
    if np.abs(tf_senyal[k]) > Valor10PorMax:
        if fMax > frec[k] > fMin:
            Grado=1

if Grado==1:
    for x in range(2,10):
        if Grado==x-1:
            f=i*x
            fMax=f*(1+Error/100)
            fMin=f*(1-Error/100)

            for k in range(Nmitad):
                if np.abs(tf_senyal[k]) > Valor10PorMax:
                    if fMax > frec[k] > fMin:
                        Grado=x

if i== fdpf and Grado!=0:
    print(F1, ": Grado ", Grado)
if i== fdpg and Grado!=0:
    print(F2, ": Grado", Grado)
if i== fjrag and Grado!=0:
    print(F3, ": Grado ", Grado)
if i== fdrer and Grado!=0:
    print(F4, ": Grado ", Grado)
if i== fdj and Grado!=0:
    print(F5, ": Grado ", Grado);

```

Al ejecutar la celda anterior, la celda con los datos del rodamiento y el código del sistema de diagnóstico, la respuesta del sistema con el diagnóstico del rodamiento SKF 6201-2Z, girando su pista interna a 880,00 r.p.m. será la siguiente.

La Frecuencia debida a un Defecto en la pista fija o Juego Interno (Rojo) es 40.83 Hz
 La Frecuencia debida a un Defecto en la pista giratoria (Amarillo) es 61.83 Hz
 La Frecuencia debida a un Juego radial en el aro giratorio (Verde) es 14.67 Hz
 La Frecuencia debida a un Defecto radial en un elemento rod. (Magenta) es 68.70 Hz
 La Frecuencia debida a un Deterioro de la jaula (Azul) es 5.83 Hz
 El dm es 22.00 mm
 El coeficiente y es 0.20
 Valor Máximo = 548.04
 Valor 10 % del Máximo = 54.80

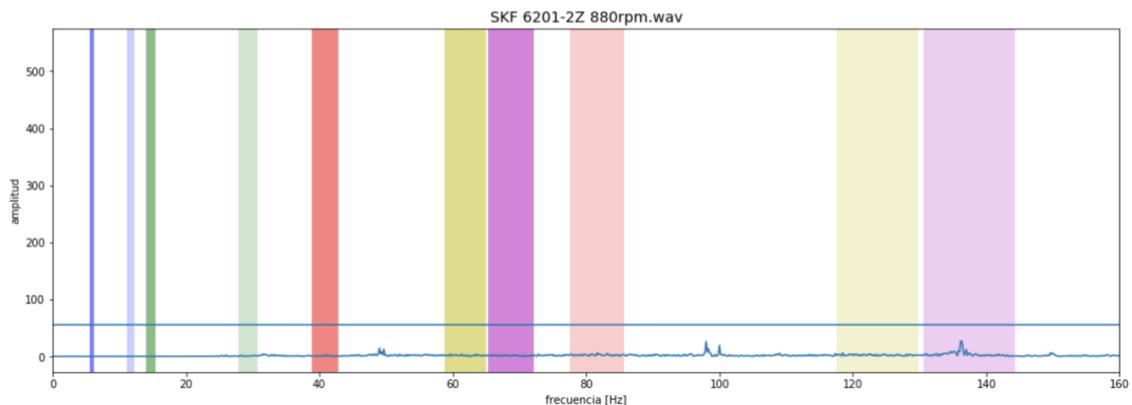


Figura 21: Diagnóstico rodamiento SKF 6201-2Z a 880,00 r.p.m.

El sistema de diagnóstico no ha detectado en el rodamiento SKF 6201-2Z girando a 880,00 r.p.m. ningún fallo. Como se puede observar en los intervalos de las frecuencias características de los fallos no aparece contenido en frecuencia en la señal.

Esta situación se debe a que el rodamiento se encontraba en un estado nuevo, es decir, no se había visto sometido a cargas por lo que no se ha desgastado y se puede comprobar que no posee defectos de fabricación.

Para corroborar el resultado se procede a diagnosticarlo a una mayor velocidad donde se espera que los fallos en caso de que existan se manifiesten con un mayor nivel, o por el contrario en caso de no existir se confirme el diagnóstico.

6.2.2. APLICACIÓN: 1.560,00 r.p.m.

Se procede a aplicar el sistema de diagnóstico de rodamientos mediante análisis de ruido a una grabación del audio del rodamiento SKF 6201-2Z, en la que en el rodamiento se encontraba girando la pista interna a 1.560,00 r.p.m. y su pista externa estaba fija.

```
# DATOS

de=4.50 # mm
d=12.00 # mm
D=32.00 # mm
Z=7 # bolas
n=1560.00 # r.p.m.
a=0 # °
PistaFija=1 # Poner: 1 si es la P. Exterior o 2 si es la P. Interior

NombreAudio="SKF 6201-2Z 1560rpm.wav"

Error=5 # %
Porcentaje=10 # %

# CÁLCULOS

dm=(d+D)/2
a=a*2*np.pi/360
y=de*np.math.cos(a)/dm

if PistaFija==1:
    fdpf=(1-y)*Z*n/120 # Defecto en la pista fija o Juego
    fdpg=(1+y)*Z*n/120 # Defecto en la pista giratoria
    fjrag=n/60 # Juego radial en el aro giratorio
    fdrer=dm*(1-y**2)*n/(60*de) # Defecto radial en un elemento rod.
    fdj=(1-y)*n/120 # Deterioro de la jaula

    # POSIBLES FALLOS
    F1="Defecto en la pista fija o Juego Interno"
    F2="Defecto en la pista giratoria"
    F3="Juego radial en el aro giratorio"
    F4="Defecto radial en un elemento rod."
    F5="Deterioro de la jaula"

if PistaFija==2:
    fdpf=(1+y)*Z*n/120 # Defecto en la pista fija
    fdpg=(1-y)*Z*n/120 # Defecto en la pista giratoria o Juego
    fjrag=n/60 # Juego radial en el aro giratorio
    fdrer=dm*(1-y**2)*n/(60*de) # Defecto radial en un elemento rod.
    fdj=(1+y)*n/120 # Deterioro de la jaula

    # POSIBLES FALLOS
    F1="Defecto en la pista fija"
    F2="Defecto en la pista giratoria o Juego Interno"
    F3="Juego radial en el aro giratorio"
    F4="Defecto radial en un elemento rod."
    F5="Deterioro de la jaula"

print("La Frecuencia debida a un",F1, '(Rojo) es {0:.2f} Hz'.format(fdpf))
print("La Frecuencia debida a un",F2, '(Amarillo) es {0:.2f} Hz'.format(fdpg))
print("La Frecuencia debida a un",F3, '(Verde) es {0:.2f} Hz'.format(fjrag))
print("La Frecuencia debida a un",F4, '(Magenta) es {0:.2f} Hz'.format(fdrer))
print("La Frecuencia debida a un",F5, '(Azul) es {0:.2f} Hz'.format(fdj))

print('El dm es {0:.2f} mm'.format(dm))
print('El coeficiente y es {0:.2f} '.format(y))
```

```

# IMPORTAR AUDIO

fs, senyal = read(NombreAudio)
if len(np.shape(senyal)) > 1:
    senyal = senyal[:, 0]

senyal = senyal[fs:]
N = len(senyal)
tmax = N / fs
tdeseado = 6
fmax = 16000
if tmax > tdeseado:
    N = int(N * tdeseado/tmax)
    tmax = N / fs
    senyal = senyal[0:N]

t = np.linspace(0, tmax, N)

# CALCULAR LA TRANSFORMADA DE FOURIER

tf_senyal = np.fft.fft(senyal)/N*2
Nmitad = N//2 if N%2==0 else N//2+1
frec = np.fft.fftfreq(N, 1/fs)

fig = plt.figure(figsize=(18, 6))
ax1 = fig.add_subplot(1, 1, 1)
ax1.plot(frec[0:Nmitad], np.abs(tf_senyal[0:Nmitad]))
ax1.set_xlim([0, 300])

ax1.set_xlabel('frecuencia [Hz]')
ax1.set_ylabel('amplitud')
ax1.set_title(NombreAudio, fontsize=14)

# CALCULAR VALORES CARACTERÍSTICOS DE LA SEÑAL

ValorMax=np.amax(np.abs(tf_senyal[0:Nmitad]))
print('Valor Máximo = {0:.2f}'.format(ValorMax))

Valor10PorMax=np.amax(np.abs(tf_senyal[0:Nmitad]))*Porcentaje/100
print("Valor",Porcentaje, '% del Máximo = {0:.2f}'.format(Valor10PorMax))

plt.axhline(y=Valor10PorMax)

# APLICAR SISTEMA DE MONITORIZADO

for i in [fdpf, fdpg, fjrag, fdrer, fdj]:
    Grado=0
    fMax=i*(1+Error/100)
    fMin=i*(1-Error/100)

    if i== fdpf:
        plt.axvspan(fMin, fMax, facecolor='r', alpha=0.5)
        plt.axvspan(2*fMin, 2*fMax, facecolor='r', alpha=0.2)
    if i== fdpg:
        plt.axvspan(fMin, fMax, facecolor='y', alpha=0.5)
        plt.axvspan(2*fMin, 2*fMax, facecolor='y', alpha=0.2)
    if i== fjrag:
        plt.axvspan(fMin, fMax, facecolor='g', alpha=0.5)
        plt.axvspan(2*fMin, 2*fMax, facecolor='g', alpha=0.2)
    if i== fdrer:
        plt.axvspan(fMin, fMax, facecolor='m', alpha=0.5)
        plt.axvspan(2*fMin, 2*fMax, facecolor='m', alpha=0.2)
    if i== fdj:
        plt.axvspan(fMin, fMax, facecolor='b', alpha=0.5)
        plt.axvspan(2*fMin, 2*fMax, facecolor='b', alpha=0.2)

```

```

for k in range(Nmitad):
    if np.abs(tf_senyal[k]) > Valor10PorMax:
        if fMax > frec[k] > fMin:
            Grado=1

if Grado==1:
    for x in range(2,10):
        if Grado==x-1:
            f=i*x
            fMax=f*(1+Error/100)
            fMin=f*(1-Error/100)

            for k in range(Nmitad):
                if np.abs(tf_senyal[k]) > Valor10PorMax:
                    if fMax > frec[k] > fMin:
                        Grado=x

if i== fdpf and Grado!=0:
    print(F1, ": Grado ", Grado)
if i== fdpg and Grado!=0:
    print(F2, ": Grado", Grado)
if i== fjrag and Grado!=0:
    print(F3, ": Grado ", Grado)
if i== fdrer and Grado!=0:
    print(F4, ": Grado ", Grado)
if i== fdj and Grado!=0:
    print(F5, ": Grado ", Grado);

```

Al ejecutar la celda anterior, la celda con los datos del rodamiento y el código del sistema de diagnóstico, la respuesta del sistema con el diagnóstico del rodamiento SKF 6201-2Z, girando su pista interna a 1.560,00 r.p.m. será la siguiente.

La Frecuencia debida a un Defecto en la pista fija o Juego Interno (Rojo) es 72.39 Hz
 La Frecuencia debida a un Defecto en la pista giratoria (Amarillo) es 109.61 Hz
 La Frecuencia debida a un Juego radial en el aro giratorio (Verde) es 26.00 Hz
 La Frecuencia debida a un Defecto radial en un elemento rod. (Magenta) es 121.79 Hz
 La Frecuencia debida a un Deterioro de la jaula (Azul) es 10.34 Hz
 El dm es 22.00 mm
 El coeficiente y es 0.20
 Valor Máximo = 546.28
 Valor 10 % del Máximo = 54.63

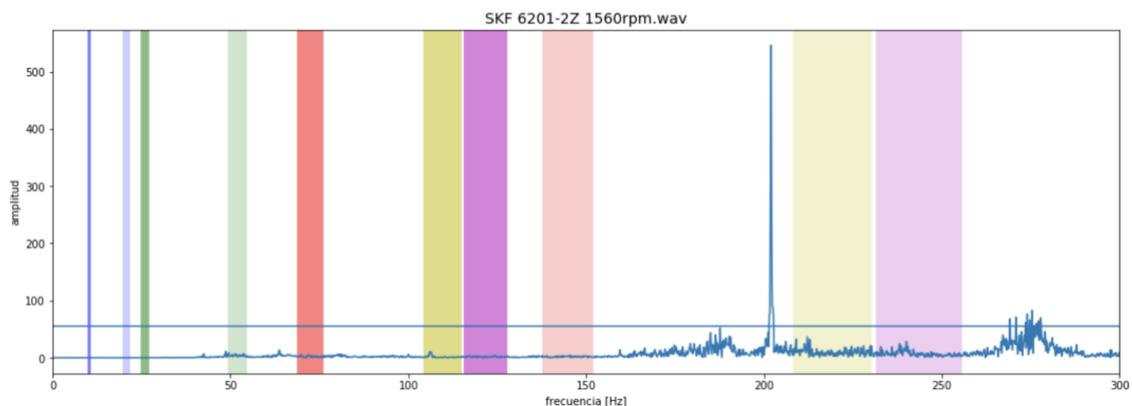


Figura 22: Diagnóstico rodamiento SKF 6201-2Z a 1.560,00 r.p.m.

El sistema de diagnóstico no ha detectado en el rodamiento SKF 6201-2Z girando a 1.560,00 r.p.m. ningún fallo al igual que ocurre en el caso anterior. Como se puede observar en los intervalos de las frecuencias características de los fallos no aparece contenido en frecuencia en la señal.

Esta situación se debe a que el rodamiento se encontraba en un estado nuevo, es decir, no se había visto sometido a cargas por lo que no se ha desgastado y se puede comprobar que no posee defectos de fabricación.

Por tanto, mediante el presente diagnóstico y el anterior se confirma el diagnóstico del rodamiento y por tanto su correcto estado.

6.3. RODAMIENTO NTN 6201-Z

En este apartado se procede a aplicar el sistema de diagnóstico al rodamiento radial de bolas SKF 6201-2Z del fabricante SKF Bearing que presenta un alto nivel de uso.

A continuación, se muestran los datos del rodamiento NTN 6201-Z.

Diámetro del elemento rodante	$d_e = 4,50 \text{ mm}$
Diámetro exterior del rodamiento	$D = 32,00 \text{ mm}$
Diámetro interior del rodamiento	$d = 12,00 \text{ mm}$
Número de elementos rodantes	$Z = 7 \text{ bolas}$

Tabla 9: Datos del rodamiento NTN 6201-Z

Es importante destacar que al igual que con el rodamiento SKF 6201-2Z el sistema de diagnóstico se va a aplicar al rodamiento NTN 6201-Z dos veces, es decir, funcionando a dos regímenes de giro distintos, a 880,00 r.p.m. y a 1.560,00 r.p.m.



Figura 23: Rodamiento NTN 6201-Z

6.3.1. APLICACIÓN: 880,00 r.p.m.

Se procede a aplicar el sistema de diagnóstico de rodamientos mediante análisis de ruido a una grabación del audio del rodamiento NKN 6201-Z, en la que en el rodamiento se encontraba girando la pista interna a 880,00 r.p.m. y su pista externa estaba fija.

```
# DATOS

de=4.50 # mm
d=12.00 # mm
D=32.00 # mm
Z=7 # bolas
n=880.00 # r.p.m.
a=0 # °
PistaFija=1 # Poner: 1 si es la P. Exterior o 2 si es la P. Interior

NombreAudio="NKN 6201-Z 880rpm.wav"

Error=5 # %
Porcentaje=10 # %

# CÁLCULOS

dm=(d+D)/2
a=a*2*np.pi/360
y=de*np.math.cos(a)/dm

if PistaFija==1:
    fdpf=(1-y)*Z*n/120 # Defecto en la pista fija o Juego
    fdpg=(1+y)*Z*n/120 # Defecto en la pista giratoria
    fjrag=n/60 # Juego radial en el aro giratorio
    fdrer=dm*(1-y**2)*n/(60*de) # Defecto radial en un elemento rod.
    fdj=(1-y)*n/120 # Deterioro de la jaula

    # POSIBLES FALLOS
    F1="Defecto en la pista fija o Juego Interno"
    F2="Defecto en la pista giratoria"
    F3="Juego radial en el aro giratorio"
    F4="Defecto radial en un elemento rod."
    F5="Deterioro de la jaula"

if PistaFija==2:
    fdpf=(1+y)*Z*n/120 # Defecto en la pista fija
    fdpg=(1-y)*Z*n/120 # Defecto en la pista giratoria o Juego
    fjrag=n/60 # Juego radial en el aro giratorio
    fdrer=dm*(1-y**2)*n/(60*de) # Defecto radial en un elemento rod.
    fdj=(1+y)*n/120 # Deterioro de la jaula

    # POSIBLES FALLOS
    F1="Defecto en la pista fija"
    F2="Defecto en la pista giratoria o Juego Interno"
    F3="Juego radial en el aro giratorio"
    F4="Defecto radial en un elemento rod."
    F5="Deterioro de la jaula"

print("La Frecuencia debida a un",F1, '(Rojo) es {0:.2f} Hz'.format(fdpf))
print("La Frecuencia debida a un",F2, '(Amarillo) es {0:.2f} Hz'.format(fdpg))
print("La Frecuencia debida a un",F3, '(Verde) es {0:.2f} Hz'.format(fjrag))
print("La Frecuencia debida a un",F4, '(Magenta) es {0:.2f} Hz'.format(fdrer))
print("La Frecuencia debida a un",F5, '(Azul) es {0:.2f} Hz'.format(fdj))

print('El dm es {0:.2f} mm'.format(dm))
print('El coeficiente y es {0:.2f} '.format(y))
```

```

# IMPORTAR AUDIO

fs, senyal = read(NombreAudio)
if len(np.shape(senyal)) > 1:
    senyal = senyal[:, 0]

senyal = senyal[fs:]
N = len(senyal)
tmax = N / fs
tdeseado = 6
fmax = 16000
if tmax > tdeseado:
    N = int(N * tdeseado/tmax)
    tmax = N / fs
    senyal = senyal[0:N]

t = np.linspace(0, tmax, N)

# CALCULAR LA TRANSFORMADA DE FOURIER

tf_senyal = np.fft.fft(senyal)/N*2
Nmitad = N//2 if N%2==0 else N//2+1
frec = np.fft.fftfreq(N, 1/fs)

fig = plt.figure(figsize=(18, 6))
ax1 = fig.add_subplot(1, 1, 1)
ax1.plot(frec[0:Nmitad], np.abs(tf_senyal[0:Nmitad]))
ax1.set_xlim([0, 160])

ax1.set_xlabel('frecuencia [Hz]')
ax1.set_ylabel('amplitud')
ax1.set_title(NombreAudio, fontsize=14)
# CALCULAR VALORES CARACTERÍSTICOS DE LA SEÑAL

ValorMax=np.amax(np.abs(tf_senyal[0:Nmitad]))
print('Valor Máximo = {0:.2f} '.format(ValorMax))

Valor10PorMax=np.amax(np.abs(tf_senyal[0:Nmitad]))*Porcentaje/100
print("Valor",Porcentaje, '% del Máximo = {0:.2f}'.format(Valor10PorMax))

plt.axhline(y=Valor10PorMax)

# APLICAR SISTEMA DE MONITORIZADO

for i in [fdpf, fdpg, fjrag, fdrer, fdj]:
    Grado=0
    fMax=i*(1+Error/100)
    fMin=i*(1-Error/100)

    if i== fdpf:
        plt.axvspan(fMin, fMax, facecolor='r', alpha=0.5)
        plt.axvspan(2*fMin, 2*fMax, facecolor='r', alpha=0.2)
    if i== fdpg:
        plt.axvspan(fMin, fMax, facecolor='y', alpha=0.5)
        plt.axvspan(2*fMin, 2*fMax, facecolor='y', alpha=0.2)
    if i== fjrag:
        plt.axvspan(fMin, fMax, facecolor='g', alpha=0.5)
        plt.axvspan(2*fMin, 2*fMax, facecolor='g', alpha=0.2)
    if i== fdrer:
        plt.axvspan(fMin, fMax, facecolor='m', alpha=0.5)
        plt.axvspan(2*fMin, 2*fMax, facecolor='m', alpha=0.2)
    if i== fdj:
        plt.axvspan(fMin, fMax, facecolor='b', alpha=0.5)
        plt.axvspan(2*fMin, 2*fMax, facecolor='b', alpha=0.2)
    
```

```

for k in range(Nmitad):
    if np.abs(tf_senyal[k]) > Valor10PorMax:
        if fMax > frec[k] > fMin:
            Grado=1

if Grado==1:
    for x in range(2,10):
        if Grado==x-1:
            f=i*x
            fMax=f*(1+Error/100)
            fMin=f*(1-Error/100)

            for k in range(Nmitad):
                if np.abs(tf_senyal[k]) > Valor10PorMax:
                    if fMax > frec[k] > fMin:
                        Grado=x

if i== fdpf and Grado!=0:
    print(F1, ": Grado ", Grado)
if i== fdpg and Grado!=0:
    print(F2, ": Grado", Grado)
if i== fjrag and Grado!=0:
    print(F3, ": Grado ", Grado)
if i== fdrer and Grado!=0:
    print(F4, ": Grado ", Grado)
if i== fdj and Grado!=0:
    print(F5, ": Grado ", Grado);

```

Al ejecutar la celda anterior, la celda con los datos del rodamiento y el código del sistema de diagnóstico, la respuesta del sistema con el diagnóstico del rodamiento NKN 6201-Z, girando su pista interna a 880,00 r.p.m. será la siguiente.

La Frecuencia debida a un Defecto en la pista fija o Juego Interno (Rojo) es 40.83 Hz
 La Frecuencia debida a un Defecto en la pista giratoria (Amarillo) es 61.83 Hz
 La Frecuencia debida a un Juego radial en el aro giratorio (Verde) es 14.67 Hz
 La Frecuencia debida a un Defecto radial en un elemento rod. (Magenta) es 68.70 Hz
 La Frecuencia debida a un Deterioro de la jaula (Azul) es 5.83 Hz
 El dm es 22.00 mm
 El coeficiente y es 0.20
 Valor Máximo = 250.45
 Valor 10 % del Máximo = 25.05
 Defecto radial en un elemento rod. : Grado 1

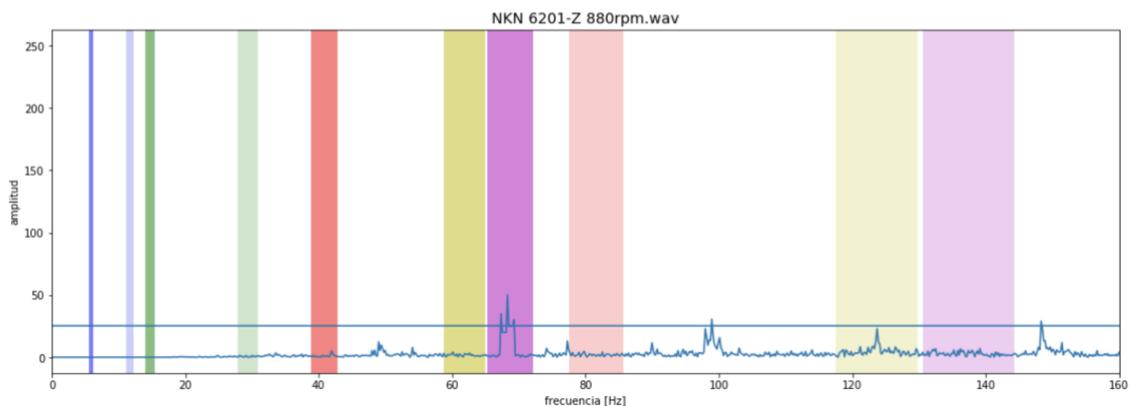


Figura 24: Diagnóstico rodamiento NKN 6201-Z a 880,00 r.p.m.

El sistema de diagnóstico ha detectado en el rodamiento NKN 6201-Z girando a 880,00 r.p.m. un defecto radial en un elemento rodante de grado 1.

Como se puede observar en la figura, aparece contenido en frecuencia en el primer armónico de la frecuencia característica de defecto radial en un elemento rodante, pero no en el segundo armónico, por tanto, se puede confirmar de que se trata de un defecto en grado 1.

Esta situación se debe a que el rodamiento se encontraba con un alto nivel de uso y por tanto es coherente encontrar fallos en dicho rodamiento.

Para corroborar el resultado se procede a diagnosticarlo a una mayor velocidad donde se espera que los fallos en caso de que existan se manifiesten con un mayor nivel.

6.3.2. APLICACIÓN: 1.560,00 r.p.m.

Se procede a aplicar el sistema de diagnóstico de rodamientos mediante análisis de ruido a una grabación del audio del rodamiento NKN 6201-Z, en la que en el rodamiento se encontraba girando la pista interna a 1.560,00 r.p.m. y su pista externa estaba fija.

```
# DATOS

de=4.50 # mm
d=12.00 # mm
D=32.00 # mm
Z=7 # bolas
n=1560.00 # r.p.m.
a=0 # °
PistaFija=1 # Poner: 1 si es la P. Exterior o 2 si es la P. Interior

NombreAudio="NKN 6201-Z 1560rpm.wav"

Error=5 # %
Porcentaje=10 # %

# CÁLCULOS

dm=(d+D)/2
a=a*2*np.pi/360
y=de*np.math.cos(a)/dm

if PistaFija==1:
    fdpf=(1-y)*Z*n/120 # Defecto en la pista fija o Juego
    fdpg=(1+y)*Z*n/120 # Defecto en la pista giratoria
    fjrag=n/60 # Juego radial en el aro giratorio
    fdrer=dm*(1-y**2)*n/(60*de) # Defecto radial en un elemento rod.
    fdj=(1-y)*n/120 # Deterioro de la jaula

    # POSIBLES FALLOS
    F1="Defecto en la pista fija o Juego Interno"
    F2="Defecto en la pista giratoria"
    F3="Juego radial en el aro giratorio"
    F4="Defecto radial en un elemento rod."
    F5="Deterioro de la jaula"

if PistaFija==2:
    fdpf=(1+y)*Z*n/120 # Defecto en la pista fija
    fdpg=(1-y)*Z*n/120 # Defecto en la pista giratoria o Juego
    fjrag=n/60 # Juego radial en el aro giratorio
    fdrer=dm*(1-y**2)*n/(60*de) # Defecto radial en un elemento rod.
    fdj=(1+y)*n/120 # Deterioro de la jaula

    # POSIBLES FALLOS
    F1="Defecto en la pista fija"
    F2="Defecto en la pista giratoria o Juego Interno"
    F3="Juego radial en el aro giratorio"
    F4="Defecto radial en un elemento rod."
    F5="Deterioro de la jaula"

print("La Frecuencia debida a un",F1, '(Rojo) es {0:.2f} Hz'.format(fdpf))
print("La Frecuencia debida a un",F2, '(Amarillo) es {0:.2f} Hz'.format(fdpg))
print("La Frecuencia debida a un",F3, '(Verde) es {0:.2f} Hz'.format(fjrag))
print("La Frecuencia debida a un",F4, '(Magenta) es {0:.2f} Hz'.format(fdrer))
print("La Frecuencia debida a un",F5, '(Azul) es {0:.2f} Hz'.format(fdj))

print('El dm es {0:.2f} mm'.format(dm))
print('El coeficiente y es {0:.2f} '.format(y))
```

```

# IMPORTAR AUDIO

fs, senyal = read(NombreAudio)
if len(np.shape(senyal)) > 1:
    senyal = senyal[:, 0]

senyal = senyal[fs:]
N = len(senyal)
tmax = N / fs
tdeseado = 6
fmax = 16000
if tmax > tdeseado:
    N = int(N * tdeseado/tmax)
    tmax = N / fs
    senyal = senyal[0:N]

t = np.linspace(0, tmax, N)

# CALCULAR LA TRANSFORMADA DE FOURIER

tf_senyal = np.fft.fft(senyal)/N*2
Nmitad = N//2 if N%2==0 else N//2+1
frec = np.fft.fftfreq(N, 1/fs)

fig = plt.figure(figsize=(18, 6))
ax1 = fig.add_subplot(1, 1, 1)
ax1.plot(frec[0:Nmitad], np.abs(tf_senyal[0:Nmitad]))
ax1.set_xlim([0, 300])

ax1.set_xlabel('frecuencia [Hz]')
ax1.set_ylabel('amplitud')
ax1.set_title(NombreAudio, fontsize=14)

# CALCULAR VALORES CARACTERÍSTICOS DE LA SEÑAL

ValorMax=np.amax(np.abs(tf_senyal[0:Nmitad]))
print('Valor Máximo = {0:.2f}'.format(ValorMax))

Valor10PorMax=np.amax(np.abs(tf_senyal[0:Nmitad]))*Porcentaje/100
print("Valor",Porcentaje, '% del Máximo = {0:.2f}'.format(Valor10PorMax))

plt.axhline(y=Valor10PorMax)

# APLICAR SISTEMA DE MONITORIZADO

for i in [fdpf, fdpg, fjrag, fdrer, fdj]:
    Grado=0
    fMax=i*(1+Error/100)
    fMin=i*(1-Error/100)

    if i== fdpf:
        plt.axvspan(fMin, fMax, facecolor='r', alpha=0.5)
        plt.axvspan(2*fMin, 2*fMax, facecolor='r', alpha=0.2)
    if i== fdpg:
        plt.axvspan(fMin, fMax, facecolor='y', alpha=0.5)
        plt.axvspan(2*fMin, 2*fMax, facecolor='y', alpha=0.2)
    if i== fjrag:
        plt.axvspan(fMin, fMax, facecolor='g', alpha=0.5)
        plt.axvspan(2*fMin, 2*fMax, facecolor='g', alpha=0.2)
    if i== fdrer:
        plt.axvspan(fMin, fMax, facecolor='m', alpha=0.5)
        plt.axvspan(2*fMin, 2*fMax, facecolor='m', alpha=0.2)
    if i== fdj:
        plt.axvspan(fMin, fMax, facecolor='b', alpha=0.5)
        plt.axvspan(2*fMin, 2*fMax, facecolor='b', alpha=0.2)

```

```

for k in range(Nmitad):
    if np.abs(tf_senyal[k]) > Valor10PorMax:
        if fMax > frec[k] > fMin:
            Grado=1

if Grado==1:
    for x in range(2,10):
        if Grado==x-1:
            f=i*x
            fMax=f*(1+Error/100)
            fMin=f*(1-Error/100)

            for k in range(Nmitad):
                if np.abs(tf_senyal[k]) > Valor10PorMax:
                    if fMax > frec[k] > fMin:
                        Grado=x

if i== fdpf and Grado!=0:
    print(F1, ": Grado ", Grado)
if i== fdpg and Grado!=0:
    print(F2, ": Grado", Grado)
if i== fjrag and Grado!=0:
    print(F3, ": Grado ", Grado)
if i== fdrer and Grado!=0:
    print(F4, ": Grado ", Grado)
if i== fdj and Grado!=0:
    print(F5, ": Grado ", Grado);
    
```

Al ejecutar la celda anterior, la celda con los datos del rodamiento y el código del sistema de diagnóstico, la respuesta del sistema con el diagnóstico del rodamiento NKN 6201-Z, girando su pista interna a 1.560,00 r.p.m. será la siguiente.

La Frecuencia debida a un Defecto en la pista fija o Juego Interno (Rojo) es 72.39 Hz
 La Frecuencia debida a un Defecto en la pista giratoria (Amarillo) es 109.61 Hz
 La Frecuencia debida a un Juego radial en el aro giratorio (Verde) es 26.00 Hz
 La Frecuencia debida a un Defecto radial en un elemento rod. (Magenta) es 121.79 Hz
 La Frecuencia debida a un Deterioro de la jaula (Azul) es 10.34 Hz
 El dm es 22.00 mm
 El coeficiente y es 0.20
 Valor Máximo = 277.33
 Valor 10 % del Máximo = 27.73
 Defecto en la pista fija o Juego Interno : Grado 2
 Defecto radial en un elemento rod. : Grado 5

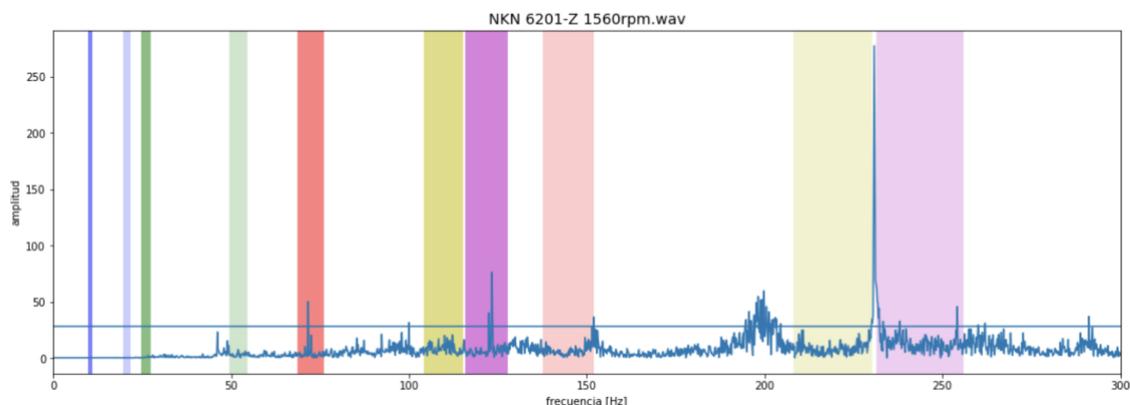


Figura 25: Diagnóstico rodamiento NKN 6201-Z a 1.560,00 r.p.m.

El sistema de diagnóstico ha detectado en el rodamiento NKN 6201-Z girando a 880,00 r.p.m. un defecto radial en un elemento rodante de grado 5 y un defecto en la pista fija o juego interno de grado 2.

Como se puede observar en la figura, aparece contenido en frecuencia en los dos primeros armónicos de las frecuencias características de defecto radial en un elemento rodante y de defecto en la pista fija o juego interno, además en el defecto radial en el elemento rodante el sistema cuenta hasta el quinto armónico.

Esta situación se debe a que el rodamiento se encontraba con un alto nivel de uso y por tanto es coherente encontrar fallos en dicho rodamiento.

Se puede corroborar el resultado ya que en el diagnóstico anterior se detectó defecto radial en un elemento rodante, pero en menor grado. Esta situación es ocasionada ya que los fallos en rodamientos se manifiestan con un mayor nivel a altas velocidades, por lo que se puede decir que para realizar diagnósticos en rodamientos es recomendable no realizarlos a bajas velocidades.

6.4. RODAMIENTO 6201 NSG

En este apartado se procede a describir los principales datos del rodamiento radial de bolas 6201 NSG del fabricante NACHI que presenta un nivel medio de uso.

A continuación, se muestran los datos del rodamiento 6201 NSG.

Diámetro del elemento rodante	$d_e = 4,50 \text{ mm}$
Diámetro exterior del rodamiento	$D = 32,00 \text{ mm}$
Diámetro interior del rodamiento	$d = 12,00 \text{ mm}$
Número de elementos rodantes	$Z = 7 \text{ bolas}$

Tabla 10: Datos del rodamiento 6201 NSG

Es importante destacar que el sistema de diagnóstico se va a aplicar al rodamiento 6201 NSG dos veces, es decir, funcionando a dos regímenes de giro distintos, a 880,00 r.p.m. y a 1.560,00 r.p.m.



Figura 26: Rodamiento 6201 NSG

6.4.1. APLICACIÓN: 880,00 r.p.m.

Se procede a aplicar el sistema de diagnóstico de rodamientos mediante análisis de ruido a una grabación del audio del rodamiento 6201 NSG, en la que en el rodamiento se encontraba girando la pista interna a 880,00 r.p.m. y su pista externa estaba fija.

```
# DATOS

de=4.50 # mm
d=12.00 # mm
D=32.00 # mm
Z=7 # bolas
n=880.00 # r.p.m.
a=0 # °
PistaFija=1 # Poner: 1 si es la P. Exterior o 2 si es la P. Interior

NombreAudio="6201 NSG 880rpm.wav"

Error=5 # %
Porcentaje=10 # %

# CÁLCULOS

dm=(d+D)/2
a=a*2*np.pi/360
y=de*np.math.cos(a)/dm

if PistaFija==1:
    fdpf=(1-y)*Z*n/120 # Defecto en la pista fija o Juego
    fdpg=(1+y)*Z*n/120 # Defecto en la pista giratoria
    fjrag=n/60 # Juego radial en el aro giratorio
    fdrer=dm*(1-y**2)*n/(60*de) # Defecto radial en un elemento rod.
    fdj=(1-y)*n/120 # Deterioro de la jaula

    # POSIBLES FALLOS
    F1="Defecto en la pista fija o Juego Interno"
    F2="Defecto en la pista giratoria"
    F3="Juego radial en el aro giratorio"
    F4="Defecto radial en un elemento rod."
    F5="Deterioro de la jaula"

if PistaFija==2:
    fdpf=(1+y)*Z*n/120 # Defecto en la pista fija
    fdpg=(1-y)*Z*n/120 # Defecto en la pista giratoria o Juego
    fjrag=n/60 # Juego radial en el aro giratorio
    fdrer=dm*(1-y**2)*n/(60*de) # Defecto radial en un elemento rod.
    fdj=(1+y)*n/120 # Deterioro de la jaula

    # POSIBLES FALLOS
    F1="Defecto en la pista fija"
    F2="Defecto en la pista giratoria o Juego Interno"
    F3="Juego radial en el aro giratorio"
    F4="Defecto radial en un elemento rod."
    F5="Deterioro de la jaula"

print("La Frecuencia debida a un",F1, '(Rojo) es {0:.2f} Hz'.format(fdpf))
print("La Frecuencia debida a un",F2, '(Amarillo) es {0:.2f} Hz'.format(fdpg))
print("La Frecuencia debida a un",F3, '(Verde) es {0:.2f} Hz'.format(fjrag))
print("La Frecuencia debida a un",F4, '(Magenta) es {0:.2f} Hz'.format(fdrer))
print("La Frecuencia debida a un",F5, '(Azul) es {0:.2f} Hz'.format(fdj))

print('El dm es {0:.2f} mm'.format(dm))
print('El coeficiente y es {0:.2f} '.format(y))
```

```

# IMPORTAR AUDIO

fs, senyal = read(NombreAudio)
if len(np.shape(senyal)) > 1:
    senyal = senyal[:, 0]

senyal = senyal[fs:]
N = len(senyal)
tmax = N / fs
tdeseado = 6
fmax = 16000
if tmax > tdeseado:
    N = int(N * tdeseado/tmax)
    tmax = N / fs
    senyal = senyal[0:N]

t = np.linspace(0, tmax, N)

# CALCULAR LA TRANSFORMADA DE FOURIER

tf_senyal = np.fft.fft(senyal)/N*2
Nmitad = N//2 if N%2==0 else N//2+1
frec = np.fft.fftfreq(N, 1/fs)

fig = plt.figure(figsize=(18, 6))
ax1 = fig.add_subplot(1, 1, 1)
ax1.plot(frec[0:Nmitad], np.abs(tf_senyal[0:Nmitad]))
ax1.set_xlim([0, 160])

ax1.set_xlabel('frecuencia [Hz]')
ax1.set_ylabel('amplitud')
ax1.set_title(NombreAudio, fontsize=14)
# CALCULAR VALORES CARACTERÍSTICOS DE LA SEÑAL

ValorMax=np.amax(np.abs(tf_senyal[0:Nmitad]))
print('Valor Máximo = {0:.2f} '.format(ValorMax))

Valor10PorMax=np.amax(np.abs(tf_senyal[0:Nmitad]))*Porcentaje/100
print("Valor",Porcentaje, '% del Máximo = {0:.2f}'.format(Valor10PorMax))

plt.axhline(y=Valor10PorMax)

# APLICAR SISTEMA DE MONITORIZADO

for i in [fdpf, fdpg, fjrag, fdrer, fdj]:
    Grado=0
    fMax=i*(1+Error/100)
    fMin=i*(1-Error/100)

    if i== fdpf:
        plt.axvspan(fMin, fMax, facecolor='r', alpha=0.5)
        plt.axvspan(2*fMin, 2*fMax, facecolor='r', alpha=0.2)
    if i== fdpg:
        plt.axvspan(fMin, fMax, facecolor='y', alpha=0.5)
        plt.axvspan(2*fMin, 2*fMax, facecolor='y', alpha=0.2)
    if i== fjrag:
        plt.axvspan(fMin, fMax, facecolor='g', alpha=0.5)
        plt.axvspan(2*fMin, 2*fMax, facecolor='g', alpha=0.2)
    if i== fdrer:
        plt.axvspan(fMin, fMax, facecolor='m', alpha=0.5)
        plt.axvspan(2*fMin, 2*fMax, facecolor='m', alpha=0.2)
    if i== fdj:
        plt.axvspan(fMin, fMax, facecolor='b', alpha=0.5)
        plt.axvspan(2*fMin, 2*fMax, facecolor='b', alpha=0.2)
    
```

```

for k in range(Nmitad):
    if np.abs(tf_senyal[k]) > Valor10PorMax:
        if fMax > frec[k] > fMin:
            Grado=1

if Grado==1:
    for x in range(2,10):
        if Grado==x-1:
            f=i*x
            fMax=f*(1+Error/100)
            fMin=f*(1-Error/100)

            for k in range(Nmitad):
                if np.abs(tf_senyal[k]) > Valor10PorMax:
                    if fMax > frec[k] > fMin:
                        Grado=x

if i== fdpf and Grado!=0:
    print(F1, ": Grado ", Grado)
if i== fdpg and Grado!=0:
    print(F2, ": Grado", Grado)
if i== fjrag and Grado!=0:
    print(F3, ": Grado ", Grado)
if i== fdrer and Grado!=0:
    print(F4, ": Grado ", Grado)
if i== fdj and Grado!=0:
    print(F5, ": Grado ", Grado);
    
```

Al ejecutar la celda anterior, la celda con los datos del rodamiento y el código del sistema de diagnóstico, la respuesta del sistema con el diagnóstico del rodamiento 6201 NSG, girando su pista interna a 880,00 r.p.m. será la siguiente.

La Frecuencia debida a un Defecto en la pista fija o Juego Interno (Rojo) es 40.83 Hz
 La Frecuencia debida a un Defecto en la pista giratoria (Amarillo) es 61.83 Hz
 La Frecuencia debida a un Juego radial en el aro giratorio (Verde) es 14.67 Hz
 La Frecuencia debida a un Defecto radial en un elemento rod. (Magenta) es 68.70 Hz
 La Frecuencia debida a un Deterioro de la jaula (Azul) es 5.83 Hz
 El dm es 22.00 mm
 El coeficiente y es 0.20
 Valor Máximo = 212.71
 Valor 10 % del Máximo = 21.27
 Defecto en la pista giratoria : Grado 2

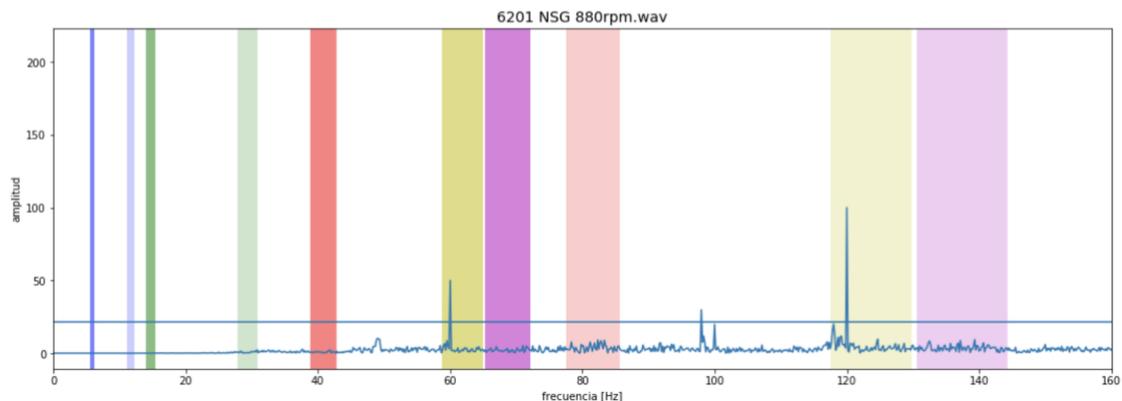


Figura 27: Diagnóstico rodamiento 6201 NSG a 880,00 r.p.m.

El sistema de diagnóstico ha detectado en el rodamiento 6201 NSG girando a 880,00 r.p.m. un defecto en la pista giratoria de grado 2.

Como se puede observar en la figura, aparece contenido en frecuencia en los dos primeros armónicos de las frecuencias características de defecto en la pista giratoria por tanto como se ha comentado de trata de un grado 2.

Esta situación se debe a que el rodamiento se encontraba con un medio nivel de uso y por tanto es coherente encontrar algún fallo en dicho rodamiento.

Para corroborar el resultado se procede a diagnosticarlo a una mayor velocidad donde se espera que los fallos en caso de que existan se manifiesten con un mayor nivel al igual que se ha podido observar con el anterior rodamiento.

6.4.2. APLICACIÓN: 1.560,00 r.p.m.

Se procede a aplicar el sistema de diagnóstico de rodamientos mediante análisis de ruido a una grabación del audio del rodamiento 6201 NSG, en la que en el rodamiento se encontraba girando la pista interna a 1.560,00 r.p.m. y su pista externa estaba fija.

```
# DATOS

de=4.50 # mm
d=12.00 # mm
D=32.00 # mm
Z=7 # bolas
n=1560.00 # r.p.m.
a=0 # °
PistaFija=1 # Poner: 1 si es la P. Exterior o 2 si es la P. Interior

NombreAudio="6201 NSG 1560rpm.wav"

Error=5 # %
Porcentaje=10 # %

# CÁLCULOS

dm=(d+D)/2
a=a*2*np.pi/360
y=de*np.math.cos(a)/dm

if PistaFija==1:
    fdpf=(1-y)*Z*n/120 # Defecto en la pista fija o Juego
    fdpg=(1+y)*Z*n/120 # Defecto en la pista giratoria
    fjrag=n/60 # Juego radial en el aro giratorio
    fdrer=dm*(1-y**2)*n/(60*de) # Defecto radial en un elemento rod.
    fdj=(1-y)*n/120 # Deterioro de la jaula

    # POSIBLES FALLOS
    F1="Defecto en la pista fija o Juego Interno"
    F2="Defecto en la pista giratoria"
    F3="Juego radial en el aro giratorio"
    F4="Defecto radial en un elemento rod."
    F5="Deterioro de la jaula"

if PistaFija==2:
    fdpf=(1+y)*Z*n/120 # Defecto en la pista fija
    fdpg=(1-y)*Z*n/120 # Defecto en la pista giratoria o Juego
    fjrag=n/60 # Juego radial en el aro giratorio
    fdrer=dm*(1-y**2)*n/(60*de) # Defecto radial en un elemento rod.
    fdj=(1+y)*n/120 # Deterioro de la jaula

    # POSIBLES FALLOS
    F1="Defecto en la pista fija"
    F2="Defecto en la pista giratoria o Juego Interno"
    F3="Juego radial en el aro giratorio"
    F4="Defecto radial en un elemento rod."
    F5="Deterioro de la jaula"

print("La Frecuencia debida a un",F1, '(Rojo) es {0:.2f} Hz'.format(fdpf))
print("La Frecuencia debida a un",F2, '(Amarillo) es {0:.2f} Hz'.format(fdpg))
print("La Frecuencia debida a un",F3, '(Verde) es {0:.2f} Hz'.format(fjrag))
print("La Frecuencia debida a un",F4, '(Magenta) es {0:.2f} Hz'.format(fdrer))
print("La Frecuencia debida a un",F5, '(Azul) es {0:.2f} Hz'.format(fdj))

print('El dm es {0:.2f} mm'.format(dm))
print('El coeficiente y es {0:.2f} '.format(y))
```

```

# IMPORTAR AUDIO

fs, senyal = read(NombreAudio)
if len(np.shape(senyal)) > 1:
    senyal = senyal[:, 0]

senyal = senyal[fs:]
N = len(senyal)
tmax = N / fs
tdeseado = 6
fmax = 16000
if tmax > tdeseado:
    N = int(N * tdeseado/tmax)
    tmax = N / fs
    senyal = senyal[0:N]

t = np.linspace(0, tmax, N)

# CALCULAR LA TRANSFORMADA DE FOURIER

tf_senyal = np.fft.fft(senyal)/N*2
Nmitad = N//2 if N%2==0 else N//2+1
frec = np.fft.fftfreq(N, 1/fs)

fig = plt.figure(figsize=(18, 6))
ax1 = fig.add_subplot(1, 1, 1)
ax1.plot(frec[0:Nmitad], np.abs(tf_senyal[0:Nmitad]))
ax1.set_xlim([0, 300])

ax1.set_xlabel('frecuencia [Hz]')
ax1.set_ylabel('amplitud')
ax1.set_title(NombreAudio, fontsize=14)

# CALCULAR VALORES CARACTERÍSTICOS DE LA SEÑAL

ValorMax=np.amax(np.abs(tf_senyal[0:Nmitad]))
print('Valor Máximo = {0:.2f}'.format(ValorMax))

Valor10PorMax=np.amax(np.abs(tf_senyal[0:Nmitad]))*Porcentaje/100
print("Valor",Porcentaje, '% del Máximo = {0:.2f}'.format(Valor10PorMax))

plt.axhline(y=Valor10PorMax)

# APLICAR SISTEMA DE MONITORIZADO

for i in [fdpf, fdpg, fjrag, fdrer, fdj]:
    Grado=0
    fMax=i*(1+Error/100)
    fMin=i*(1-Error/100)

    if i== fdpf:
        plt.axvspan(fMin, fMax, facecolor='r', alpha=0.5)
        plt.axvspan(2*fMin, 2*fMax, facecolor='r', alpha=0.2)
    if i== fdpg:
        plt.axvspan(fMin, fMax, facecolor='y', alpha=0.5)
        plt.axvspan(2*fMin, 2*fMax, facecolor='y', alpha=0.2)
    if i== fjrag:
        plt.axvspan(fMin, fMax, facecolor='g', alpha=0.5)
        plt.axvspan(2*fMin, 2*fMax, facecolor='g', alpha=0.2)
    if i== fdrer:
        plt.axvspan(fMin, fMax, facecolor='m', alpha=0.5)
        plt.axvspan(2*fMin, 2*fMax, facecolor='m', alpha=0.2)
    if i== fdj:
        plt.axvspan(fMin, fMax, facecolor='b', alpha=0.5)
        plt.axvspan(2*fMin, 2*fMax, facecolor='b', alpha=0.2)

```

```

for k in range(Nmitad):
    if np.abs(tf_senyal[k]) > Valor10PorMax:
        if fMax > frec[k] > fMin:
            Grado=1

if Grado==1:
    for x in range(2,10):
        if Grado==x-1:
            f=i*x
            fMax=f*(1+Error/100)
            fMin=f*(1-Error/100)

            for k in range(Nmitad):
                if np.abs(tf_senyal[k]) > Valor10PorMax:
                    if fMax > frec[k] > fMin:
                        Grado=x

if i== fdpf and Grado!=0:
    print(F1, ": Grado ", Grado)
if i== fdpg and Grado!=0:
    print(F2, ": Grado", Grado)
if i== fjrag and Grado!=0:
    print(F3, ": Grado ", Grado)
if i== fdrer and Grado!=0:
    print(F4, ": Grado ", Grado)
if i== fdj and Grado!=0:
    print(F5, ": Grado ", Grado);

```

Al ejecutar la celda anterior, la celda con los datos del rodamiento y el código del sistema de diagnóstico, la respuesta del sistema con el diagnóstico del rodamiento 6201 NSG, girando su pista interna a 1.560,00 r.p.m. será la siguiente.

La Frecuencia debida a un Defecto en la pista fija o Juego Interno (Rojo) es 72.39 Hz
 La Frecuencia debida a un Defecto en la pista giratoria (Amarillo) es 109.61 Hz
 La Frecuencia debida a un Juego radial en el aro giratorio (Verde) es 26.00 Hz
 La Frecuencia debida a un Defecto radial en un elemento rod. (Magenta) es 121.79 Hz
 La Frecuencia debida a un Deterioro de la jaula (Azul) es 10.34 Hz
 El dm es 22.00 mm
 El coeficiente y es 0.20
 Valor Máximo = 271.68
 Valor 10 % del Máximo = 27.17
 Defecto en la pista giratoria : Grado 2
 Juego radial en el aro giratorio : Grado 2

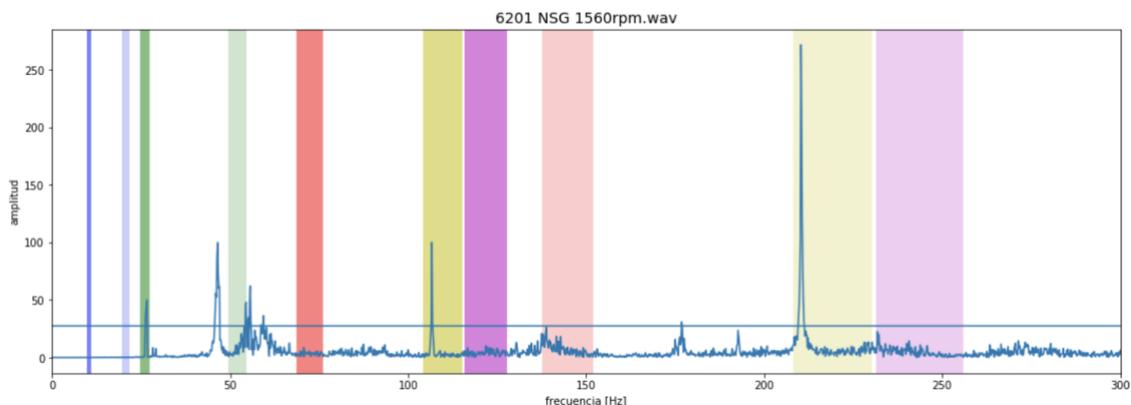


Figura 28: Diagnóstico rodamiento 6201 NSG a 1.560,00 r.p.m.

El sistema de diagnóstico ha detectado en el rodamiento 6201 NSG girando a 1.560,00 r.p.m. un defecto en la pista giratoria de grado 2 y juego radial en el aro giratorio de grado 2.

Como se puede observar en la figura, aparece contenido en frecuencia en los dos primeros armónicos de las frecuencias características de defecto en la pista giratoria y de juego radial en el aro giratorio.

Esta situación se debe a que el rodamiento se encontraba con un nivel medio de uso y por tanto es coherente encontrar algún fallo en dicho rodamiento.

Se puede corroborar el resultado ya que en el diagnóstico anterior se detectó el defecto en la pista giratoria pero no el juego radial en el aro giratorio. Esta situación se debe a que los fallos en rodamientos se manifiestan con un mayor nivel a altas velocidades, al igual que ocurría en el rodamiento anterior.

7. ESTUDIO DE LA REPETITIVIDAD DEL SISTEMA DE DIAGNÓSTICO

En este apartado se va a realizar el cálculo de la repetitividad que posee el sistema de diagnóstico desarrollado, dicho con otras palabras, se va a definir el porcentaje de homogeneidad que poseen los diagnósticos del sistema de diagnóstico.

Finalmente, se explicarán los factores que afectan a la fiabilidad de los diagnósticos manifestando casos de falsos positivos o negativos, además, se indicarán cuáles son las causas por las que pueden aparecer durante la aplicación del sistema de diagnóstico desarrollado.

7.1. ANÁLISIS DE REPETITIVIDAD

Para realizar el análisis de la repetitividad se va a realizar el cálculo sobre 20 diagnósticos de los rodamientos SKF 6201-2Z, NTN 6201-Z, y 6201 NSG girando su pista interna a 1.560,00 r.p.m. Hay que destacar que las grabaciones de audio no se han realizado en el mismo instante, sino que se han realizado a lo largo de diferentes días.

7.1.1. CÁLCULO DE LA REPETITIVIDAD: SKF 6201-2Z

En este apartado se va a calcular la repetitividad que posee el sistema de diagnóstico aplicado en el rodamiento SKF 6201-2Z girando a 1.560,00 r.p.m.

Como se ha indicado en el anterior apartado se trata de un rodamiento en un estado nuevo por lo que no se espera que se encuentre ningún fallo.

A continuación, se muestra una tabla con los diagnósticos del rodamiento SKF 6201-2Z para el posterior cálculo de la repetitividad.

Diagnóstico	Grado de los fallos en rodamientos				
	Defecto en la pista fija o Juego Interno	Defecto en la pista giratoria	Juego radial en el aro giratorio	Defecto radial en un elemento rodante	Deterioro de la jaula
1	0	0	0	0	0

ESTUDIO DE LA REPETITIVIDAD DEL SISTEMA DE DIAGNÓSTICO

2	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0
4	0	1	0	0	0
5	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0
13	0	1	0	0	0
14	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0
20	0	1	0	0	0

Tabla 11: Diagnósticos del rodamiento SKF 6201-2Z a 1.560,00 r.p.m.

Por tanto, se procede a calcular el valor de la repetitividad del sistema de diagnóstico aplicado al rodamiento SKF 6201-2Z como la media de las repetitividades de los distintos fallos en rodamientos

El cálculo de la repetitividad de los distintos fallos se va a realizar como el máximo número de grados iguales partido por el número total de diagnósticos.

- Repetitividad 1: Defecto en la pista fija o Juego Interno.

$$\text{Repetitividad 1} = \frac{\text{Máx. N}^\circ \text{ Grados iguales}}{\text{N}^\circ \text{ Diagnósticos}} = \frac{20}{20} = 1,00 = 100,00 \%$$

- Repetitividad 2: Defecto en la pista giratoria.

$$\text{Repetitividad } 2 = \frac{\text{Máx. N}^\circ \text{ Grados iguales}}{\text{N}^\circ \text{ Diagnósticos}} = \frac{17}{20} = 0,85 = 85,00 \%$$

- Repetitividad 3: Juego radial en el aro giratorio.

$$\text{Repetitividad } 3 = \frac{\text{Máx. N}^\circ \text{ Grados iguales}}{\text{N}^\circ \text{ Diagnósticos}} = \frac{20}{20} = 1,00 = 100,00 \%$$

- Repetitividad 4: Defecto radial en un elemento rodante.

$$\text{Repetitividad } 4 = \frac{\text{Máx. N}^\circ \text{ Grados iguales}}{\text{N}^\circ \text{ Diagnósticos}} = \frac{20}{20} = 1 = 100,00 \%$$

- Repetitividad 5: Deterioro de la jaula.

$$\text{Repetitividad } 5 = \frac{\text{Máx. N}^\circ \text{ Grados iguales}}{\text{N}^\circ \text{ Diagnósticos}} = \frac{20}{20} = 1,00 = 100,00 \%$$

Se procede a calcular la repetitividad del sistema de diagnóstico aplicado al rodamiento SKF 6201-2Z.

Repetitividad SKF 6201 – 2Z =

$$\begin{aligned} &= \frac{\text{Repetitividad } 1 + \text{Repetitividad } 2 + \text{Repetitividad } 3 + \text{Repetitividad } 4 + \text{Repetitividad } 5}{\text{N}^\circ \text{ Fallos}} \\ &= \frac{1,00 + 0,85 + 1,00 + 1,00 + 1,00}{5} = 0,97 = 97,00 \% \end{aligned}$$

7.1.2. CÁLCULO DE LA REPETITIVIDAD: MTN 6201-Z

En este apartado se va a calcular la repetitividad que posee el sistema de diagnóstico aplicado en el rodamiento MTN 6201-Z girando a 1.560,00 r.p.m.

Como se ha indicado en el anterior apartado se trata de un rodamiento con un alto nivel de uso que manifiesta fallos en los elementos rodantes y en la pista fija o juego interno en el rodamiento.

A continuación, se muestra una tabla con los diagnósticos del rodamiento MTN 6201-Z para el posterior cálculo de la repetitividad.

ESTUDIO DE LA REPETITIVIDAD DEL SISTEMA DE DIAGNÓSTICO

Diagnóstico	Grado de los fallos en rodamientos				
	Defecto en la pista fija o Juego Interno	Defecto en la pista giratoria	Juego radial en el aro giratorio	Defecto radial en un elemento rodante	Deterioro de la jaula
1	2	0	0	5	0
2	2	0	0	5	0
3	2	2	0	5	0
4	1	1	0	5	0
5	2	0	0	4	0
6	2	0	0	5	0
7	2	1	0	5	0
8	1	0	0	4	0
9	2	0	0	5	0
10	2	0	0	5	0
11	2	1	0	5	0
12	2	1	0	5	0
13	2	0	0	5	0
14	2	0	0	5	0
15	2	0	0	5	0
16	1	1	0	2	0
17	2	0	0	5	0
18	1	0	0	5	0
19	2	0	0	5	0
20	2	0	0	5	0

Tabla 12: Diagnósticos del rodamiento MTN 6201-Z a 1.560,00 r.p.m.

Por tanto, se procede a calcular el valor de la repetitividad del sistema de diagnóstico aplicado al rodamiento MTN 6201-Z como la media de las repetitividades de los distintos fallos en rodamientos

ESTUDIO DE LA REPETITIVIDAD DEL SISTEMA DE DIAGNÓSTICO

El cálculo de la repetitividad de los distintos fallos se va a realizar como el máximo número de grados iguales partido por el número total de diagnósticos.

- Repetitividad 1: Defecto en la pista fija o Juego Interno.

$$\text{Repetitividad } 1 = \frac{\text{Máx. N}^\circ \text{ Grados iguales}}{\text{N}^\circ \text{ Diagnósticos}} = \frac{16}{20} = 0,80 = 80,00 \%$$

- Repetitividad 2: Defecto en la pista giratoria.

$$\text{Repetitividad } 2 = \frac{\text{Máx. N}^\circ \text{ Grados iguales}}{\text{N}^\circ \text{ Diagnósticos}} = \frac{14}{20} = 0,70 = 70,00 \%$$

- Repetitividad 3: Juego radial en el aro giratorio.

$$\text{Repetitividad } 3 = \frac{\text{Máx. N}^\circ \text{ Grados iguales}}{\text{N}^\circ \text{ Diagnósticos}} = \frac{20}{20} = 1,00 = 100,00 \%$$

- Repetitividad 4: Defecto radial en un elemento rodante.

$$\text{Repetitividad } 4 = \frac{\text{Máx. N}^\circ \text{ Grados iguales}}{\text{N}^\circ \text{ Diagnósticos}} = \frac{17}{20} = 0,85 = 85,00 \%$$

- Repetitividad 5: Deterioro de la jaula.

$$\text{Repetitividad } 5 = \frac{\text{Máx. N}^\circ \text{ Grados iguales}}{\text{N}^\circ \text{ Diagnósticos}} = \frac{20}{20} = 1,00 = 100,00 \%$$

Se procede a calcular la repetitividad del sistema de diagnóstico aplicado al rodamiento MTN 6201-Z.

Repetitividad MTN 6201 – Z =

$$\begin{aligned} &= \frac{\text{Repetitividad } 1 + \text{Repetitividad } 2 + \text{Repetitividad } 3 + \text{Repetitividad } 4 + \text{Repetitividad } 5}{\text{N}^\circ \text{ Fallos}} \\ &= \frac{0,80 + 0,70 + 1,00 + 0,85 + 1,00}{5} = 0,87 = 87,00 \% \end{aligned}$$

7.1.3. CÁLCULO DE LA REPETITIVIDAD: 6201 NSG

En este apartado se va a calcular la repetitividad que posee el sistema de diagnóstico aplicado en el rodamiento 6201 NSG girando a 1.560,00 r.p.m.

Como se ha indicado en el anterior apartado se trata de un rodamiento con un nivel medio de uso que manifiesta fallos en la pista giratoria y en el aro giratorio.

ESTUDIO DE LA REPETITIVIDAD DEL SISTEMA DE DIAGNÓSTICO

A continuación, se muestra una tabla con los diagnósticos del rodamiento 6201 NSG para el posterior cálculo de la repetitividad.

Diagnóstico	Grado de los fallos en rodamientos				
	Defecto en la pista fija o Juego Interno	Defecto en la pista giratoria	Juego radial en el aro giratorio	Defecto radial en un elemento rodante	Deterioro de la jaula
1	0	2	2	0	0
2	0	2	2	0	0
3	0	2	2	0	0
4	1	3	1	0	0
5	0	2	2	0	0
6	0	2	2	0	0
7	0	2	2	0	0
8	0	2	2	0	0
9	1	2	2	0	0
10	0	2	2	0	0
11	0	2	2	0	0
12	1	3	2	0	0
13	0	2	2	0	0
14	0	2	2	0	0
15	0	2	2	1	0
16	0	1	1	0	0
17	0	2	2	0	0
18	0	2	2	0	0
19	0	2	2	0	0
20	0	3	2	0	0

Tabla 13: Diagnósticos del rodamiento 6201 NSG a 1.560,00 r.p.m.

Por tanto, se procede a calcular el valor de la repetitividad del sistema de diagnóstico aplicado al rodamiento 6201 NSG como la media de las repetitividades de los distintos fallos en rodamientos

El cálculo de la repetitividad de los distintos fallos se va a realizar como el máximo número de grados iguales partido por el número total de diagnósticos.

- Repetitividad 1: Defecto en la pista fija o Juego Interno.

$$\text{Repetitividad } 1 = \frac{\text{Máx. N}^\circ \text{ Grados iguales}}{\text{N}^\circ \text{ Diagnósticos}} = \frac{17}{20} = 0,85 = 85,00 \%$$

- Repetitividad 2: Defecto en la pista giratoria.

$$\text{Repetitividad } 2 = \frac{\text{Máx. N}^\circ \text{ Grados iguales}}{\text{N}^\circ \text{ Diagnósticos}} = \frac{16}{20} = 0,80 = 80,00 \%$$

- Repetitividad 3: Juego radial en el aro giratorio.

$$\text{Repetitividad } 3 = \frac{\text{Máx. N}^\circ \text{ Grados iguales}}{\text{N}^\circ \text{ Diagnósticos}} = \frac{18}{20} = 0,90 = 90,00 \%$$

- Repetitividad 4: Defecto radial en un elemento rodante.

$$\text{Repetitividad } 4 = \frac{\text{Máx. N}^\circ \text{ Grados iguales}}{\text{N}^\circ \text{ Diagnósticos}} = \frac{19}{20} = 0,95 = 95,00 \%$$

- Repetitividad 5: Deterioro de la jaula.

$$\text{Repetitividad } 5 = \frac{\text{Máx. N}^\circ \text{ Grados iguales}}{\text{N}^\circ \text{ Diagnósticos}} = \frac{20}{20} = 1,00 = 100,00 \%$$

Se procede a calcular la repetitividad del sistema de diagnóstico aplicado al rodamiento 6201 NSG.

Repetitividad 6201 NSG =

$$\begin{aligned} &= \frac{\text{Repetitividad } 1 + \text{Repetitividad } 2 + \text{Repetitividad } 3 + \text{Repetitividad } 4 + \text{Repetitividad } 5}{\text{N}^\circ \text{ Fallos}} \\ &= \frac{0,85 + 0,80 + 0,90 + 0,95 + 1,00}{5} = 0,90 = 90,00 \% \end{aligned}$$

7.1.4. CÁLCULO DE LA REPETITIVIDAD TOTAL DEL SISTEMA DE DIAGNÓSTICO

Para realizar el cálculo de la repetitividad total del sistema de diagnóstico se rodamientos mediante análisis de ruido se va a calcular como la media de los tres valores de repetitividad que se han calculado para los distintos rodamientos.

Sabiendo que los valores de repetitividad calculados anteriormente son los siguientes se procederá a calcular el valor de la repetitividad total del sistema.

- Repetitividad en el diagnóstico del rodamiento SKF 6201-2Z=97,00 %.
- Repetitividad en el diagnóstico del rodamiento NTN 6201-Z=87,00 %.
- Repetitividad en el diagnóstico del rodamiento 6201 NSG=90,00 %.

Por tanto, la repetitividad total se calcula de la siguiente forma.

Repetitividad Total =

$$= \frac{\text{Repetitividad SKF 6201 - 2Z} + \text{Repetitividad NTN 6201 - Z} + \text{Repetitividad 6201 NSG}}{\text{Nº Rodamientos Diagnosticados}}$$
$$= \frac{0,97 + 0,87 + 0,90}{3} = 0,91 = 91,33 \%$$

Finalmente, se puede afirmar que la repetitividad del sistema de diagnóstico de rodamientos mediante análisis del ruido es de un 91,33 %, lo que se considera un valor de repetitividad adecuado para el tipo de aplicación.

7.2. FACTORES QUE AFECTAN A LA FIABILIDAD

A lo largo del proyecto se han detectado situaciones en las que se puede dar que el sistema de diagnóstico de rodamientos mediante análisis de ruido presente fallos, por lo que se da el caso de falsos positivos o falsos negativos.

Un falso positivo es cuando el sistema de diagnóstico detecta un fallo en una máquina, que en realidad la máquina se encuentra sana. Por el contrario, un falso negativo consiste en diagnosticar que la máquina presenta un fallo, pero el sistema de diagnóstico no lo detecta.

Ambas situaciones son perjudiciales para la situación económica de la empresa, los falsos positivos provocarán tareas de mantenimiento innecesarias, costes de paradas de maquinaria y costes adicionales, lo que supondrá la pérdida de eficacia del sistema de mantenimiento.

Los falsos negativos provocan tareas de mantenimiento no planificadas, problemas de seguridad y por consiguiente una pérdida de la eficacia del sistema de mantenimiento, al igual que los falsos positivos.

En el caso de los falsos negativos se puede dar debido a que la frecuencia con la amplitud máxima de la señal sea muy alta y por tanto las frecuencias de fallo sean menores que el 10 % de la amplitud máxima. También se podría dar el caso en el ruido de la máquina enmascare las frecuencias de fallo del rodamiento y por tanto no se detecten. O como se ha visto en las distintas aplicaciones, si los rodamientos trabajan a bajas velocidades puede darse el caso que tan solo se manifiesten los fallos que se encuentren en un alto grado de desarrollo, este problema es debido a que a bajas velocidades los fallos en rodamientos apenas producen ruido por lo que no son detectados por el sistema.

La causa de que se produzcan falsos positivos en el sistema de diagnóstico creado en este trabajo puede ser debida al error en la precisión a la hora de identificar las frecuencias que se identifican como frecuencias de fallos. A su vez, si dicho error se minimizase se producirían casos de falsos negativos debido a la precisión de los aparatos de medida.

8. TRABAJOS FUTUROS

Este apartado surge a partir de las ideas que se han ido obteniendo a lo largo del desarrollo del presente Trabajo Final de Máster y con el objetivo de que este proyecto no solo no se quede aquí, sino que sea el principio de muchos otros.

Debido a la extensión del presente trabajo y a las limitaciones a nivel de conocimientos no se ha podido ir más allá del desarrollo del sistema de diagnóstico de rodamientos mediante análisis de ruido tal y como se ha procedido.

Como continuación a este proyecto se propone llevar más allá el método de aplicación del sistema de diagnóstico. Actualmente, el método de utilización se debe de realizar a través de la aplicación de Jupyter Notebook mediante el uso de un ordenador por lo que se propone mejorar dicho proceso para que sea más rápido y cómodo.

Para mejorar el método de utilización se propone crear una aplicación móvil que tenga integrado el código creado del sistema de diagnóstico junto con una grabadora de audio.

La idea es que en la aplicación móvil se pueda introducir directamente los datos requeridos para el funcionamiento del código, que a través de ella se pueda grabar el ruido producido por el rodamiento y ejecutar el código para obtener el diagnóstico directamente en el teléfono móvil.

Mediante el uso de dicha aplicación se obtendrá un diagnóstico inmediato del rodamiento a evaluar. Además, el uso será mucho más sencillo y cualquier persona podrá utilizarlo sin necesidad de tener que importar el audio a un ordenador y tener que aprender a utilizar Jupyter Notebook.

Otro trabajo que podría derivar de este pero que tendría una mayor dificultad podría ser el siguiente, mejorar el código del sistema de diagnóstico mediante análisis de ruido a un código que posea inteligencia artificial. Lo cual, requeriría un uso experto de programación informática por lo que sería un trabajo de un nivel muy alto.

A nivel industrial se podría realizar una reconducción del código para que se convierta en un sistema de monitorizado continuo de rodamientos, la idea sería reescribir el código para que realizase intervenciones de mantenimiento predictivo automáticamente cada intervalo definido.

Para poder llevar a cabo esta idea sería necesario además de reconducir el código, utilizar un equipamiento que permita obtener los diagnósticos de los rodamientos directamente en el sistema de gestión del mantenimiento por ordenador de la empresa automáticamente.

9. CONCLUSIONES

En este Trabajo Final de Máster se ha desarrollado un sistema de diagnóstico de rodamientos mediante el análisis del ruido.

Para el desarrollo del sistema de diagnóstico se ha tenido que realizar una revisión de la situación actual del mantenimiento predictivo en rodamientos mostrando interés por las técnicas de análisis de vibraciones y análisis del ruido.

El presente sistema de diagnóstico desarrollado se basa en detectar las frecuencias características de los fallos en rodamientos en el ruido que produce los rodamientos. Hay que destacar que el código de dicho sistema se ha realizado a través de un lenguaje de programación tipo Python a través de la aplicación Jupyter Notebook.

Seguido de ello, hay que destacar que se ha probado el funcionamiento del sistema de diagnóstico a distintos rodamientos funcionando a diferentes regímenes de giro obteniéndose unos correctos resultados. Por lo que se puede confirmar el correcto funcionamiento del sistema de diagnóstico.

Se puede hablar de que el sistema de diagnóstico creado se trata de un método simple, rápido y con un sencillo método de aplicación. Además, hay que recalcar que para el correcto uso del sistema tan solo es necesario introducir la grabación del ruido del rodamiento, sus datos y la velocidad de giro.

Es importante recalcar que se ha realizado un estudio sobre la repetitividad del sistema de diagnóstico obteniendo un valor de repetitividad de los diagnósticos del 91,33 %, por lo que se puede considerar un método con una alta consistencia.

El inconveniente es que tal y como se ha podido definir posee la problemática, al igual que otros muchos métodos, de la existencia de factores que pueden afectar a la fiabilidad y con ello causar falsos positivos o negativos.

Finalmente, se han propuesto tres posibles trabajos futuros en base al presente: implementación del sistema de diagnóstico en un sistema de monitorizado continuo para la industria, mejorar la utilización del sistema creado desarrollando una aplicación

móvil en base al sistema creado y por último la implementación de inteligencia artificial para el diagnóstico del estado de los rodamientos mediante análisis de ruido.

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

NSK EUROPE. Troubles hooting. Disponible en:

<https://www.nskeurope.es/es/services/troubleshooting.html>

NSK LITERATURE. New bearing doctor maintenance. Disponible en: <http://www.nsk-literature.com/en/new-bearing-doctor-maintenance/#>

IMECINGLES. Partes de un rodamiento. Disponible en:

<http://imecingles.blogspot.com/2010/10/partes-de-un-rodamiento-bearing-parts.html>

RELIABILITY WEB. Detectando fallos en rodamientos. Disponible en:

https://reliabilityweb.com/assets/uploads/docs/DETECTANTO_FALLAS_EN_RODAMIENTOS_UTILIZANDO_METODOS_ELECTRICO_Y_MECANICOS_DE_VIBRACION.pdf

APPS APPLE. Smart recorder. Disponible en: <https://apps.apple.com/us/app/smart-recorder-and-transcriber/id700878921>

CBM CONNECT. Mantenimiento predictivo ultrasónico. Disponible en:

<https://esp.cbmconnect.com/mantenimiento-predictivo-ultrasonico-monitoreo-del-desgaste-de-los-rodamientos/>

REVISTATING. Técnicas de mantenimiento predictivo. Disponible en:

<https://www.revistaimg.com/tecnicas-de-mantenimiento-predictivo-utilizadas-en-la-industria/>

SKF. Producto 6201-2Z. Disponible en: <https://www.skf.com/co/products/rolling-bearings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/productid-6201-2Z>

POWER MI. Rolling element bearing components and failing frequencies Disponible en:

<https://power-mi.com/content/rolling-element-bearing-components-and-failing-frequencies>

NTN SHOP. Rodamiento 6201Z. Disponible en: <https://eshop.ntn-snr.com/en/6201Z-13021577.html>

IONOS. Jupyter Notebook. Disponible en: <https://www.ionos.es/digitalguide/paginas-web/desarrollo-web/jupyter-notebook/>

ADICTOS AL TRABAJO. Primeros pasos en Jupyter Notebook. Disponible en: <https://www.adictosaltrabajo.com/2018/01/18/primeros-pasos-con-jupyter-notebook/>

WIKIPEDIA. Proyecto Jupyter. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Proyecto_Jupyter

PEACOCKELITE. Rodamiento 22781. Disponible en: http://peacockelite.com/newest-bearing/33781_NACHI-6314NSE-Bearing.html

KTUIN. iPhone 11 Pro. Disponible en: <https://www.k-tuin.com/iphone-11-pro-512gb-verde-noche>

