



R-DC-95

DOCENCIA

PÁGINA 1
DE 94

Análisis de vibraciones en rodamientos empleando la
Descomposición de Modo Empírico (EMD).

VERSIÓN: 01



TÍTULO DEL TRABAJO DE GRADO
ANÁLISIS DE VIBRACIONES EN RODAMIENTOS EMPLEANDO LA
DESCOMPOSICIÓN DE MODO EMPÍRICO (EMD).

AUTORES

FARID VELAIDES LAGARES Cc. 1.096.201.904
DIEGO TORRADO ALFONSO Cc. 1.091.679.305
LUIS EDUARDO LAPORTE MONTOYA Cc. 1.095.921.413

UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍA
TECNOLOGÍA EN OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO ELECTROMECAÍNICO
BARRANCABERMEJA
(20/04/2020)



TÍTULO DEL TRABAJO DE GRADO
ANÁLISIS DE VIBRACIONES EN RODAMIENTOS EMPLEANDO LA
DESCOMPOSICIÓN DE MODO EMPÍRICO (EMD).

AUTORES

FARID VELAIDES LAGARES Cc. 1.096.201.904
DIEGO TORRADO ALFONSO Cc. 1.091.679.305
LUIS EDUARDO LAPORTE MONTOYA Cc. 1.095.921.413

Trabajo de Grado para optar al título de
TECNÓLOGO EN OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO ELECTROMECAÁNICO

DIRECTOR

LUIS OMAR SARMIENTO ÁLVAREZ, ING. MSC

GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍAS Y CIENCIAS NATURALES –
DIANOIA

UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍA
TECNOLOGÍA EN OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO ELECTROMECAÁNICO
BARRANCABERMEJA
(20/04/2020)



R-DC-95

DOCENCIA

Análisis de vibraciones en rodamientos empleando la
Descomposición de Modo Empírico (EMD).

PÁGINA 3
DE 94

VERSIÓN: 01

Nota de Aceptación

Trabajo de grado titulado: Análisis de vibraciones en rodamientos empleando la Descomposición de Modo Empírico (EMD).

Presentado por: LUIS EDUARDO LAPORTE MONTOYA, DIEGO TORRADO ALFONSO y FARID VELAIDES LAGARES. Para optar el título de TECNÓLOGO EN OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO ELECTROMECAÁNICO.

Firma del jurado

Firma del Jurado



R-DC-95

DOCENCIA

Análisis de vibraciones en rodamientos empleando la
Descomposición de Modo Empírico (EMD).

PÁGINA 4
DE 94

VERSIÓN: 01

DEDICATORIA

Este proyecto se hizo efectivo en primera instancia gracias a la ayuda de Dios quien fue mi mentor y guía durante el desarrollo del mismo, de igual forma hago un reconocimiento especial a las Unidades Tecnológicas de Santander por permitirme poner en práctica todos los saberes adquiridos durante el ciclo de aprendizaje, a los docentes y tutores que fueron participes de ese proceso, y a todos aquellos que contribuyeron a la culminación exitosa de esta etapa, que hoy termina para abrir paso a nuevas experiencias en cuanto a la generación de conocimientos.

LUIS EDUARDO LAPORTE MONTOYA



R-DC-95

DOCENCIA

Análisis de vibraciones en rodamientos empleando la
Descomposición de Modo Empírico (EMD).

PÁGINA 5
DE 94

VERSIÓN: 01

DEDICATORIA

Este trabajo está dirigido y puesto a disposición de la comunidad en general perteneciente a las Unidades Tecnológicas de Santander que puedan hacer buen uso de este, así como también el logro de este se le es atribuido a profesores, tutores, compañeros y familiares que participaron activamente en su desarrollo, a través de la motivación, el apoyo, la instrucción y la guía, a quienes de la mano de Dios inspiraron la efectiva culminación y termino de este proyecto.

DIEGO TORRADO ALFONSO



R-DC-95

DOCENCIA

Análisis de vibraciones en rodamientos empleando la
Descomposición de Modo Empírico (EMD).

PÁGINA 6
DE 94

VERSIÓN: 01

DEDICATORIA

La realización de esta investigación fue posible especialmente gracias a la ayuda de Dios, el cual permitió que este proceso fuera efectivo y lograra el impacto y los alcances deseados, agradezco de forma especial a todas aquellas personas que contribuyeron a la ejecución de este estudio, los cuales a través de sus conocimientos y experiencias hicieron un aporte valioso a este proyecto que hoy puede darse por terminado exitosamente conforme al esfuerzo, dedicación y la entrega empleadas en su elaboración.

FARID VELAIDES LAGARES

AGRADECIMIENTOS

Primeramente damos gracias a Dios por permitirnos vivir tan optima experiencia dentro de las Unidades Tecnológicas de Santander, gracias a esta universidad por darnos la posibilidad de alcanzar esta meta de llegar a ser profesionales en lo que tanto nos apasiona, gracias a cada maestro que hizo parte de este proceso integral de formación, que deja como producto terminado este grupo de graduados, y como recuerdo y prueba viviente en la historia: esta tesis, que perdurará dentro de los conocimientos y desarrollo de las demás generaciones que están por llegar.

Finalmente agradecemos a quien lee este apartado de nuestra tesis, por reconocer nuestras experiencias, investigaciones y conocimiento, dentro de su repertorio de información mental.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN EJECUTIVO	6
1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN	8
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	8
1.2. JUSTIFICACIÓN	11
1.3. OBJETIVOS	13
1.3.1. OBJETIVO GENERAL.....	13
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
1.4. ESTADO DEL ARTE / ANTECEDENTES.....	14
2. MARCOS REFERENCIALES	20
2.1. MARCO TEÓRICO	20
2.1 MARCO HISTÓRICO.....	36
2.2 MARCO CONCEPTUAL	38
2.3 MARCO LEGAL.....	49
2.4 MARCO AMBIENTAL	57
3 DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO	60
4 RESULTADOS	63
5 CONCLUSIONES	80
6 RECOMENDACIONES.....	82
7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	84
8 ANEXOS	87

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de Pareto	22
Figura 2. Componentes de un rodamiento	34
Figura 3. Frecuencia de fallo de rodamiento	35
Figura 4. Fallo en la Pista exterior.....	35
Figura 5. Fallo en la Pista exterior.....	35
Figura 6. Fallo en el elemento rodante	35
Figura 7. Fallo de jaula.....	35
Figura 8. Curva de a bañera.	48
Figura 9. IMF1 tiempo	66
Figura 10. Hilbert Spectrum	67
Figura 11. pspectrum	68
Figura 12. Envolvente envspectrum	69
Figura 13. Spectrogram de señales a 0HP 1797rpm.....	70
Figura 14. EMD tiempo	72
Figura 15. Hilbert Spectrum	73
Figura 16. Envolvente envspectrum.....	74
Figura 17. Spectrogram a 0HP 1797 rpm.....	75
Figura 18. Grafica en dominio del tiempo, Hp vs Kurtosis	77
Figura 19. Graficas de la BPFI, HP Vs Amplitud V_{rms}	78

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Resultado Bases de datos Normales	64
Tabla 2. BPFO, BPFI Y FTF	65
Tabla 3. BPFI en condiciones normales a 0HP y 1797 rpm	70
Tabla 4. Falla con diámetro de $7x10 - 3in$	71
Tabla 5. Falla con diámetro de $14x10 - 3in$	71
Tabla 6. Falla con diámetro de $21x10 - 3in$	72
Tabla 7. Falla con diámetro de $28x10 - 3in$	72
Tabla 8. Carga con diámetro de $7x10 - 3in$	75
Tabla 9. Carga con diámetro de $14x10 - 3in$	76
Tabla 10. Carga con diámetro de $21x10 - 3in$	76
Tabla 11. Carga con diámetro de $28x10 - 3in$	76



LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Transformada de Fourier	87
Anexo B. Fase de la transformada de Fourier	87
Anexo C. Transformada de Fourier de la señal sin falla	88
Anexo D. PSD-E señales sin falla	88
Anexo E. Cálculo de las variables en rodamiento con falla a 0.014"	89
Anexo F. Cálculo de las variables en rodamiento con falla a 0.021"	89

RESUMEN EJECUTIVO

El procesamiento de señales es una herramienta ampliamente utilizada en el campo del monitoreo y diagnóstico de fallas de rodamientos. Las señales de vibración de los rodamientos contienen información importante que se puede utilizar para la detección temprana y el diagnóstico de fallas. Estas señales suelen ser ruidosas y enmascaradas por otras fuentes y, por lo tanto, la información sobre la falla puede perderse. En este trabajo, se propone el del diagnóstico de fallas de los rodamientos basado en el método de eliminación de ruido de descomposición en modo empírico (EMD). Este método está hecho para extraer la señal de falla útil para usar los indicadores de detección como la curtosis y el espectro de envolvente.

En primer lugar, EMD se aplica a las señales de vibración para obtener una serie de funciones llamadas funciones de modo intrínseco (IMF). En segundo lugar, se presenta un enfoque basado en el contenido de energía de cada modo para determinar el punto de disparo que permite seleccionar los modos relevantes. Finalmente, se investigó el análisis de la curtosis y la envoltura espectral para la detección temprana y la localización de la posición de falla. Se utilizan diferentes datos experimentales para validar la efectividad del método propuesto.

En este documento, se propone un nuevo método utilizado para analizar las vibraciones de los rodamientos, que se basa en el método EMD. Aunque el método EMD ha ofrecido un método poderoso para el análisis de señales no lineales y no estacionarias, hay algunas áreas que requieren mayor atención, debido a que el procedimiento lleva mucho tiempo y los datos no se utilizan por completo. Sobre la base de estas áreas, se desarrolla un nuevo método para



obtener componentes IMF. Finalmente, la aplicación del método EMD mejorado en el análisis de vibración de los rodamientos se presenta, utilizando dos señales de vibración representativas de los rodamientos normales y los rodamientos defectuosos, medido en una instalación industrial.

1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En aplicaciones industriales, los rodamientos de bolas se consideran componentes mecánicos críticos y un defecto en dicho rodamiento causaría un mal funcionamiento e incluso podría provocar una falla catastrófica de la maquinaria. Por lo tanto, el monitoreo de la condición de los rodamientos es importante. Se han estudiado diferentes métodos en las últimas dos décadas, tales como mediciones de vibración, mediciones acústicas y mediciones de temperatura. Entre estos métodos, las mediciones y análisis de vibraciones se aplican ampliamente. En consecuencia, se ha

Algunos métodos se han aplicado con éxito, como el análisis de envolvente, el reconocimiento de patrones, las transformaciones wavelet, etc. sin embargo, el método tradicional no es adaptativo, no lineal y ortogonal. Huang desarrolló un nuevo método adaptativo de frecuencia de tiempo en 1998, que se denominó la transformación de Hilbert-Huang (HHT). El HHT introducido por Huang ha demostrado ser un método poderoso para procesar datos no estacionarios y no lineales. El método tiene dos pasos, descomposición en modo empírico (EMD) y análisis espectral de Hilbert (HSA) (Huang, Wu, & Long, 2003). El EMD, el primer paso, consiste en descomponer los datos en componentes de función de modo intrínseco (IMF), que representan diferentes modos oscilatorios y actúan como un preprocesador para HSA. Basado en los extremos locales, el método EMD proporciona un nuevo método adaptativo para la descomposición de la señal.

Desde que se introdujo el método, se han encontrado muchas aplicaciones de EMD, que incluyeron el análisis acústico, biológico, oceánico, sísmico, climático, vibración mecánica, etc.

Para las empresas es de vital importancia conocer el tipo de falla de un rodamiento, de este modo muchas empresas no cuentan con la información necesaria para identificar las diferentes vibraciones de los rodamientos.

Según Karima Amara Korba y Fayçal Arbaoui El defecto de rodadura es una de las principales causas de disfunciones en máquinas de inducción, resultando en una importante pérdida económica.

Actualmente, muchas empresas de Barrancabermeja no generan un diagnóstico por medio del análisis de vibraciones a los rodamientos, y se carece de una concientización de la importancia que tiene el realizar mantenimientos predictivos, como el análisis de vibraciones para los rodamientos. Debido a esto, se ocasionan paradas no planeadas de los equipos, baja eficiencia y confiabilidad, aumentando significativamente los gastos por repuestos, horas hombre y pérdida de producción, haciendo que las empresas de la ciudad sean menos competitivas y no puedan cumplir con el presupuesto estipulado en la licitación. Al no conocer el estado del rodamiento no es posible programar de una manera oportuna las diferentes actividades de mantenimientos preventivos y correctivos.

Además, en las Unidades Tecnológicas de Santander sede Barrancabermeja, hasta el momento no se ha realizado un proyecto de donde se evidencie metodologías para los análisis de fallas en los rodamientos, que beneficie al área de producción de cualquier empresa que requiera de esta maquinaria.



Por lo anterior surge el siguiente interrogante ¿cómo analizar las vibraciones de los rodamientos empleando la descomposición de modo empírico?

1.2. JUSTIFICACIÓN

La implementación del análisis de vibraciones en rodamientos empleando la Descomposición de Modo Empírico (EMD), pretende a largo plazo aplicar mediante periodos establecidos, actividades de mantenimiento que permitan generar la disminución de las fallas en los rodamientos por falta de mantenimientos, disminuir los tiempos de inactividad de los equipos por paradas de planta no programadas, garantizar el funcionamiento óptimo de las máquinas, de manera que se disminuyan los costos en el proceso de producción y en el área de mantenimiento, debido a que el daño repentino de un repuesto que no ha sido cambiado a tiempo, puede ocasionar daños en otros componentes y aumentar así el costo del mantenimiento.

La propuesta se desarrolla para crear un orden sistematizado de las actividades de los rodamientos, donde se observa el comportamiento de los equipos verificando el momento que por operatividad el equipo presenta una falla. Esto se realiza al definir, identificar y eliminar fallas conocidas o potenciales, problemas de errores y fallas de procesos de diseño.

El beneficio obtenido es una mayor confiabilidad en el funcionamiento de las máquinas prolongando la vida útil de la misma, una disminución de costos por paradas no programadas.

Las actividades del análisis se registran en una plantilla en Excel, y graficas obtenidas del software Matlab, esto permite conocer el periodo de intervención del rodamiento, los puntos críticos que presenta, brindando confiabilidad a la hora del proceso operativo. Por lo cual, dentro de este proyecto se va a realizar una

investigación para el análisis de las vibraciones en rodamientos identificando los diferentes tipos de fallas.

Para llevar a cabo este proyecto recolectaremos toda la información necesaria del tema de análisis de vibraciones en rodamientos empleando la descomposición de modo empírico, teniendo como referencia la base de datos Case Western Reserve University Bearing Data Center (CWRU) para realizar así el análisis en el software, ejemplos de aplicaciones, análisis comparativo y finalmente la redacción de un informe.

Con este proyecto se busca acercar al estudiante de operación y mantenimiento electromecánico, a interpretar y dar un diagnostico detallado en el funcionamiento de los equipos.

Además, esto permite a los estudiantes de las Unidades Tecnológicas De Santander sede Barrancabermeja, aplicar los conocimientos adquiridos durante la carrera y así poder optar por el título de Tecnólogos en operación y mantenimiento electromecánico.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar vibraciones para el diagnóstico de fallas en rodamientos mediante la Descomposición de Modo Empírico (EMD) utilizando la base de datos Case Western Reserve University Bearing Data Center (CWRU).

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Aplicar la Descomposición de Modo Empírico a la base de datos CWRU de fallas en la pista interior, para aplicarle a la primera IMF extraída parámetros tanto temporales como en el dominio de la frecuencia.
- Determinar cuál parámetro permite dar un diagnóstico más preciso en el análisis de fallas, comparando los resultados obtenidos en las señales con falla y en las señales de referencia.

1.4. ESTADO DEL ARTE / ANTECEDENTES

Las investigaciones que se exponen a continuación se toman como medio de referencia para enfocar al momento de ilustrar el desarrollo del trabajo investigativo. Cada enunciado permite visualizar la eficacia e importancia de los aspectos esenciales que determinan todas las actividades emprendidas. Los autores de los proyectos describen los fundamentos que son planteados, los cuales proponen una intervención al problema a través de los objetivos.

Santhana & Murali (2013) llevan a cabo un trabajo investigativo, en donde estudian el diagnóstico de falla de rodamientos basado en EMD y Morlet Wavelet UDWT Denoising, señalando que, la transformación discreta de wavelet no decidida (UDWT) con el método de eliminación de ruido basado en wavelet Morlet, se utiliza para modificar la señal. Los autores afirman que, la señal sin ruido se descompone por descomposición en modo empírico (EMD) en una serie de funciones de modo intrínseco (FMI). Los impulsos en la señal, correspondientes a la frecuencia de falla característica, se ven claramente en la FFT de los FMI. En la investigación también se realiza una Transformada rápida de Fourier (FFT), Transformada Wavelet (WT), Descomposición empírica en modo y Detección de envolvente con la señal adquirida y todos los resultados se comparan con el método propuesto.

Tal metodología es similar a la que se desea plasmar en la presente propuesta, en donde también se trabajará con la transformada de Fourier para el análisis espectral.

Los resultados obtenidos por Santhana & Murali (2013) muestran claramente la efectividad del método propuesto para detectar las fallas.

Los métodos anteriores de diagnóstico de fallas de rodamientos como FFT, Transformación Wavelet, EMD y método de detección de envolvente muestran que no son efectivos con los datos ruidosos seleccionados para el análisis. El mejor método de eliminación de ruido, la técnica de eliminación de ruido UDWT basada en wavelet de Morlet, se seleccionó para una eliminación de ruido eficiente. Usando la eliminación de ruido basada en la Transformación Wavelet discreta indecisa, la reconstrucción es mejor y evita la pérdida de datos de alias valiosos (Santhana & Murali, 2013).

Rodríguez (2009) desarrolla un método para la detección de defectos en rodamientos. Dicha investigación es útil para el direccionamiento de la propuesta que se presenta, debido a que involucra una metodología para detectar fallas en los rodamientos y también se trabajó con un código en Matlab en donde se usaron scripts programados en código C, obteniendo fórmulas de normalizado por el método *shock pulse*, el cual compensa la velocidad de giro.

Entre las conclusiones obtenidas por la investigación, Rodríguez (2009) señala que el método *shock pulse* no se debe aplicar después de ningún tipo de descomposición, se trata básicamente de una medida analógica puesta sobre la misma señal. Además, el método utilizado, que consiste en la combinación de técnicas espectrales con *shock pulse*, no permite determinar con los mismos niveles de certeza donde se encuentra la falencia. Al realizar un análisis paulatino a las señales se ha podido determinar sin problemas, pero cuando se desea automatizar el análisis los resultados obtenidos no tienen un alto porcentaje de acierto.

Ordoñez (2017) utilizó en su proyecto de grado, la descomposición modal empírica (EMD), la cual descompone señales de vibración en Funciones Modales

Intrínsecas (IMF's). En la investigación, el autor implementó la computación paralela y distribuida, para ejecutarla en el GPU, mejorando los tiempos de procesamiento.

Al igual que la propuesta que se presenta en este documento, Ordoñez (2017) también empleo la metodología EMD para diagnosticar las fallas en las maquinas rotativas. Entre sus conclusiones, se destaca el hecho de que fue necesario utilizar conjunto con la EMD, la transformada de Hilbert para mejorar os resultados en los engranajes, calculando la frecuencia instantánea.

A nivel internacional se encontró un proyecto de investigación titulado “DIAGNÓSTICO DE FALLA DE RODAMIENTO UTILIZANDO DESCOMPOSICIÓN MODAL EMPÍRICA Y DEEP LEARNING” de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile (Gerd Patricio Kimer Rozas & 2017) presenta el siguiente resumen: “En la industria, para evitar pérdidas monetarias, es importante conocer el estado de los rodamientos de las máquinas dado que representan el 40 % del total de las averías. Una manera de conocer si los rodamientos tienen fallas es a través de modelos matemáticos que analicen las vibraciones de la máquina en funcionamiento. Estos modelos se componen de dos etapas, la primera consiste en extraer características desde la vibración y la segunda consiste en utilizar un clasificador para identificar la falla. Esta investigación propone un diagnosticador de fallas que extrae características por medio de la descomposición modal empírica y clasifica la falla gracias al aprendizaje profundo. El modelo fue probado con datos del CWRU buscando diagnosticar 10 tipos de fallas de rodamiento bajo condiciones de operación variable”.

Este proyecto se conecta con el nuestro debido al uso de la descomposición modal empírica. (Patricio, Rozas, & Cabrera Guerrero, 2017)

A nivel nacional se encontró un proyecto de investigación titulado “Diagnostico automático de fallas en rodamientos de máquinas rotativas a partir del análisis de señales de vibración empleando modelos ocultos de Markov por capas” de la Universidad Tecnológica de Pereira, Risaralda (Jorge Luis Fernández Ramírez & 2017) presenta el siguiente resumen: “A la hora de determinar una falla y analizar un diagnóstico existen distintos métodos y técnicas como: vibración, temperatura, corriente, sonido, etc. Teniendo en cuenta que estos métodos se encuentran basados en el análisis de señales de vibración son los que se presentan con mayor frecuencia debido a que presentan mucho mejor resultado”. Este proyecto se conecta con el nuestro debido al diagnóstico de fallas en rodamientos.

A nivel nacional se encontró un proyecto de investigación titulado “Diseñar una metodología para determinar los niveles de degradación mediante señales de vibración en rodamientos, usando fusión de datos y conglomerados, con optimización de parámetros por algoritmos genéticos” de la universidad tecnológica de Pereira, Risaralda (Andrés Felipe Valencia & 2018) presenta el siguiente resumen: “Desde hace algún tiempo ataras en la industria el diagnostico de fallas está tomando peso, debido a la necesidad de reducir las pérdidas de producción. Teniendo en cuenta la complejidad y estructura de las máquinas rotativas, sus componentes pueden fallar. Por tanto, es de vital importancia la detección con exactitud la existencia y severidad de fallas en componentes, para lo cual se hace necesario realizar un diagnóstico y la extracción de características mediante observación de vibraciones”. Este proyecto se conecta al nuestro debido a la determinación de los niveles de degradación mediante señales de vibración en rodamientos.(Fallis, 2013)

A nivel nacional se encontró una tesis doctoral titulada “Pronóstico de fallas en máquinas rotativas con base en modelos matemáticos: Caso de estudio:

Rodamientos radiales de bolas” de la universidad tecnológica de Pereira, Risaralda (Juan Fernando López & 2017) presenta el siguiente resumen: “El presente trabajo trata de desarrollar una metodología que permita pronosticar fallas con base en modelos matemáticos aplicados a los rodamientos radiales de bolas. El fundamento principal de esta Tesis Doctoral consisten primero, en realizar estudios a la función de degradación que sufre el material de la pista interna y externa del rodamiento, es necesario agregar la ecuación de Paris-Erdogan con la inclusión de ruido gaussiano en su solución para describir la aleatoriedad del proceso”. Esta tesis se conecta al nuestro debido al pronóstico de fallas en máquinas rotativas, rodamientos radiales.(Fernando, López, Fabio, & Riaza, 2017)

A nivel nacional se encontró un proyecto de investigación titulado “Identificación automática de fallas en rodamientos de máquinas rotativas a partir de señales de vibraciones mecánicas empleando modelos ocultos de Markov con selección automática del número de estados” de la universidad tecnológica de Pereira, Risaralda (Daniel Mateo Herrera Obando & 2016) presenta el siguiente resumen: “El siguiente trabajo consiste en desarrollar, implementa y evaluar una metodología que permita identificar fallas en los rodamientos que se utilizan en las maquinas rotativas, mediante una selección automática del número de estados que muestra los parámetros reconstruidos de un modelo oculto de Markov o HMM. Un HMM la cual hace referencia a una herramientas estadística que se encarga de seleccionar los patrones, se utiliza con gran frecuencia en el reconocimiento de voz, aunque sus áreas de desempeño son la bioinformática, los patrones gráficos, entre otros”. Este proyecto se conecta al nuestro debido a fallas en rodamientos de máquinas rotativas a partir de señales de vibraciones.(Mateo & Obando, n.d.)

A nivel nacional se encontró un proyecto de investigación titulado “Pronóstico de vida útil restante en rodamientos, con base en datos de vibraciones y sistemas de inferencia estocástica con degradación no lineal” de la universidad tecnológica de Pereira, Risaralda (Diego Fernando Muñoz Torres & 2016) presenta el siguiente resumen: “Debido a la gran particularidad que presenta la industria al desear conocer con exactitud el tiempo de vida útil de sistema, que en cuestiones de la práctica la importancia se hace notoria en el hecho de conocer el estado actual de desgaste, o falla, que se encuentren en los dispositivos industriales, debido a que un óptimo funcionamiento de estos equipos garantiza un excelente desempeño, y permite mantener los estándares de producción requeridos”. Este proyecto se conecta al nuestro debido al pronóstico de vida útil restante en rodamientos, con base en datos de vibraciones.(Cossio et al., 2012)

A nivel nacional se encontró un proyecto de investigación titulado “desarrollo de una metodología para la detección de fallas a partir del análisis de vibraciones en rodamientos usando Características de tiempo y modelos ocultos de Markov (HMM)” de la universidad tecnológica de Pereira, Risaralda (Henry Alexander Blandon Hurtado, Yamir Fernando Martinez Mendoza & 2013) presenta el siguiente resumen: “Al mitigar los escenarios en los cuales se presentan fallas en una máquina es muy importante para garantizar la confiabilidad en una operación e instalación, Predecir y evitar potenciales situaciones subestándar en un equipo, de igual manera, hace minúsculo el riesgo de que un equipo quede fuera de servicio debido a una falla”. Este proyecto se conecta al nuestro debido al análisis de vibraciones en rodamientos.(I, 2013)

2. MARCOS REFERENCIALES

2.1. MARCO TEÓRICO

En el presente contexto se mostrará una serie de conceptos y definiciones, los cuales permitirán sentar las bases teóricas para el buen entendimiento del desarrollo del proyecto.

Teorías de fallas

Cuando se aplica una carga sobre la pieza de una máquina, de modo que el estado de esfuerzo sea uniaxial, este se puede comparar directamente con la resistencia a fin de determinar la seguridad, o bien para prevenir la falla (Palomares, 1992). El proceso de la falla se convierte en una complejidad cuando el estado de esfuerzo es biaxial o triaxial. En estos casos existen diversas clases de esfuerzo, pero sigue habiendo solo una resistencia significativa, de tal manera que el pronóstico de la falla se hará a través de las diferentes teorías de falla de un material de la máquina.

Teoría de la fricción interna de una maquina

Alberto Palomares (1992) declara que la resistencia a la compresión de una materia que falla en una compresión debido a una fractura astillante repentina tiene un valor específico. Sin embargo, si el material aludido no falla de esta manera, entonces la resistencia a la compresión debe definirse en alguna forma arbitraria correspondiente a una distorsión peritada especificada.

Aplicaciones de las teorías de fallas en la elaboración de los diagramas de fatiga de una maquina

En el caso de los diagramas de fatiga que se realizan únicamente para materiales dúctiles, se requiere de las siguientes propiedades mecánicas (S_y), (S_{ut}) y (S_e). Palomares (1992) ratifica. “En el caso del límite de resistencia a la fatiga se toma un valor que esta abajo del valor del límite de fatiga para la rotatoria y que en el caso de los aceros se calcula como $(S'e)=0.5 S_{ut}$, para valores de $S_{ut} < 1400$ Mpa” (p.53).

Principio de Pareto

Este método nos permite principalmente solucionar en un orden de importancia y magnitud, la causa de un problema al que se le debe realizar una investigar, hasta poder llegar a conclusiones que permitan erradicar estos problemas de raíz (Cadena, 2011). Wilfredo Pareto (1893), fue quien realizo trabajos para la determinación de este método, quien determino que un aproximadamente del 20% de las causas originan el 80% de las fallas que se presentan.

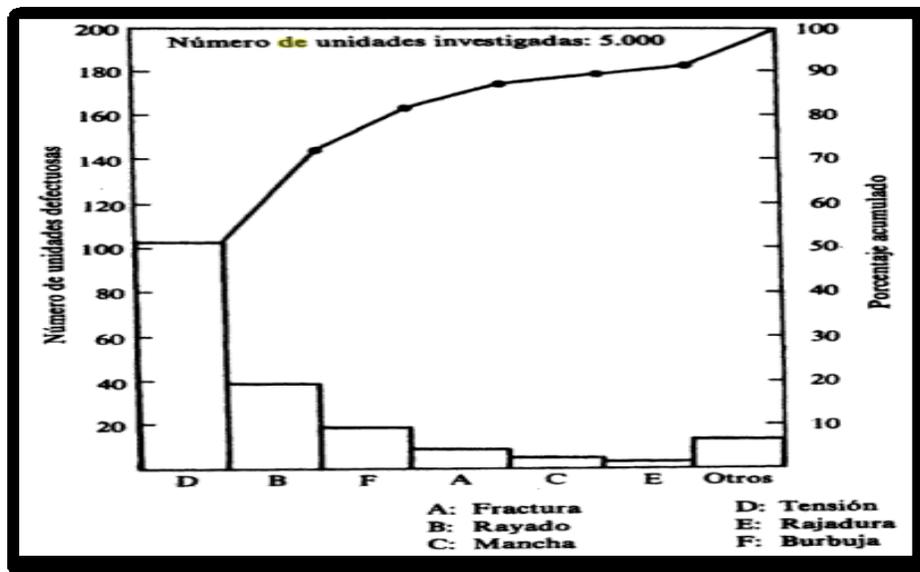
Los pasos que se mostraran a continuación se deben aplicar de forma detallada para poder ejecutar el principio

- Buscar el efecto se le desea realizar un análisis y el objeto por alcanzar.
- Implementar un check-lists de fallas, definiendo el número de veces en el cual ocurrió la falla y en el período de tiempo considerado en estudio.
- Organizar las fallas de manera de mayor a menor
- Elaborar un sistema de ejes coordenadas es decir, un plano cartesiano en donde el eje horizontal corresponda a las fallas ordenadas de mayor a

menor, en el eje vertical izquierdo, corresponde a la frecuencia con la que se dan las fallas y en el eje vertical derecho corresponda al porcentaje acumulado de fallas.

- Se elabora la curva de fallas con respecto a la frecuencia de falla. luego delinear de manera horizontal en el punto que corresponda al 80 % del porcentaje acumulado y trazar una línea vertical por el punto que toca la curva, de esa manera se indica que las fallas cuyas posiciones se encuentren a la izquierda del punto este causan el 80 % de las fallas. (Cadena, 2011, pág. 66)

Figura 1. Diagrama de Pareto



Fuente: KUME. Hitoshi. Herramientas estadísticas básicas para el mejoramiento de la calidad. Bogotá: Norma, 2002, p. 22.

Alberto Galgano (1995) afirma que al diagrama de Pareto se le pueden dar diferentes usos. Este diagrama representa uno de los principales pasos que deben darse para realizar mejoras. Efectivamente:

- Ayuda a definir las áreas a las cuales se le debe dar una oportuna intervención
- Atrae la atención de todos sobre las prioridades y facilita la creación del consenso.

Este diagrama cumple de manera idónea estas características, es muy útil en el aprendizaje para concentrar los esfuerzos en los aspectos de mayor importancia y rentables del problema que se esté analizando, es decir, en los aspectos que ocupan las partes más alta en el diagrama (Galgano, 1995). Dado que, en la vida real, contamos con un tiempo y unos recursos limitados para la consecución de los resultados, es necesario saber centrar los esfuerzos sobre los aspectos prioritarios, para lo que el análisis de Pareto resulta de fundamental importancia.

Defectos típicos de los rodamientos e identificación espectral

A continuación, se presentan los defectos de rodamiento más típicos y su identificación en el espectro de frecuencia:

Defectos de la carrera externa. El espectro se caracteriza por la presencia de picos armónicos de la frecuencia de falla de la carrera externa (entre 8 y 10 armónicos del BPFO).

Defectos de la carrera interna. El espectro muestra varios picos armónicos de la frecuencia de falla de la carrera interna (generalmente entre 8 y 10 armónicos BPFI) modulados por bandas laterales a 1x RPM.

Defectos de bola o rodillo. Se caracterizan por la presencia en el espectro de armónicos de la frecuencia de deterioro del elemento rodante (BSF). En la mayoría de los casos, el armónico de mayor amplitud generalmente indica el número de bolas o rodillos deteriorados. Suelen ir acompañadas de defectos en las carreras.

Defectos de la jaula. Se caracterizan por la presencia en el espectro de la frecuencia de falla de la jaula (FTF) y sus armónicos. Generalmente, un defecto en la jaula va acompañado de defectos en las carreras y el FTF generalmente modula una de estas frecuencias de falla de carrera que conduce a sumas y / o diferencias de frecuencias.

Defectos de múltiples componentes. Es bastante común encontrar rodamientos con múltiples componentes deteriorados, y en tal caso aparecerán múltiples frecuencias de falla y sus correspondientes armónicos.

Flojedad

Se pueden distinguir los siguientes tipos

Rodamiento interno excesivo del rodamiento. Por lo general, presenta una firma espectral caracterizada por la presencia de vibración sincrónica (armónicos de velocidad de rotación), vibración subsincrónica (0.5x RPM) y no sincrónica (1.5x RPM, 2.5xRPM, 3.5x RPM, etc.). Estas frecuencias a veces pueden ser moduladas por el FTF.

Aflojamiento entre el rodamiento y el eje. Aparecen varios armónicos de frecuencia de rotación y normalmente el dominante es el 3x RPM.

Aflojamiento entre rodamiento y carcasa. Presenta varios armónicos de la frecuencia de rotación, siendo los picos a 1x y 4x RPM los que tienen amplitudes más altas.

Desalineación del rodamiento. Como ya se mencionó en el capítulo sobre desalineación, las firmas espectrales se caracterizan por la presencia de vibración en varios armónicos de la frecuencia de rotación, siendo la amplitud la más significativa en $N B \times \text{RPM}$, donde $N B$ es el número de rodamiento elementos en el rodamiento.

Lubricación inadecuada. Los problemas de lubricación se caracterizan por la vibración de alta frecuencia (entre 1 kHz y 20 kHz), con bandas de picos separados entre sí, debido a la excitación de las frecuencias de resonancia de los rodamientos en estos rangos de frecuencia (power-mi, 2017)

Análisis de vibraciones en rodamientos

El análisis de vibraciones es una de las técnicas de monitoreo de condiciones más extendidas. A pesar de ser una técnica robusta confiable y bien estudiada, requiere que el motor bajo prueba tenga instalado un transductor de vibración. Las medidas deben tomarse en los cojinetes, la carcasa de soporte del cojinete u otras partes estructurales que respondan significativamente a las fuerzas dinámicas y caractericen la vibración general de la máquina. Por lo tanto, la principal desventaja de la monitorización de vibraciones es que requiere acceso a la máquina, y a veces se requiere una carcasa específica de acelerómetros sobre la máquina. Para mediciones precisas, los sensores deben montarse firmemente en la máquina, y se requiere experiencia en el montaje, condición que hace que su aplicación en línea sea costosa (Estévez & de Lázaro, 2019). A veces, se prefieren

o requieren otras técnicas sin este tipo de restricción. Los defectos de los cojinetes de un solo punto implican ciertas frecuencias de falla características que aparecerán en las vibraciones de la máquina. Las frecuencias son predecibles y dependen de qué superficie de los rodamientos contenga la falla.

Hay una frecuencia de falla característica asociada con cada una de las cuatro partes del rodamiento. Componentes de frecuencia de vibración relacionados con cada una de las cuatro frecuencias básicas de falla; (1) Frecuencia fundamental del tren, (2) Frecuencia de giro de la pelota, (3) Carrera externa del pase de pelota y (4) Carrera interna del pase de pelota, se puede calcular utilizando las siguientes expresiones (Bellini et al., 2008).

EMD

El concepto básico del método EMD es descomponer la señal original en algunos componentes diferentes del IMF, que se definen como cualquier función que satisfaga las siguientes condiciones:

- En todo el conjunto de datos, el número de extremos y el número de cruces por cero deben ser iguales o diferentes como máximo en uno.
- En cualquier punto, el valor medio de la envolvente definida por los máximos locales y la envolvente definida por los mínimos locales es cero.

Un IMF representa un modo oscilatorio simple como contrapartida de la función armónica simple del método de la serie de Fourier (Flandrin, Rilling, & Goncalves, 2004). Para obtener un IMF a partir de la señal original, Huang sugiere que se implemente el proceso de cambio, que se describe a continuación:

Identifique todos los máximos locales y luego conecte todos los máximos locales mediante una línea spline cúbica como el sobre superior $e_u(t)$. Repita el procedimiento para los mínimos locales para producir la envoltura inferior $e_l(t)$.

Calcule la media local $m_1(t)$ de la siguiente manera:

$$m_1(t) = \frac{e_u(t) + e_l(t)}{2}$$

Donde $e_u(t)$ es la envoltura superior de la señal y el $e_l(t)$ es la envoltura inferior de la señal.

Idealmente, el primer IMF de la señal se logra de la siguiente manera:

$$h_1(t) = x(t) - m_1(t)$$

Donde $x(t)$ es la señal original.

Si $h_1(t)$ no es un IMF, trate a $h_1(t)$ como la señal original y repita los pasos (1) y (2) hasta que $h_1(t)$ sea un IMF.

Después de obtener el primer componente, elimine el primer componente de la señal original y obtenga el $r_1(t)$ residual de la siguiente manera:

$$r_1(t) = x(t) - h_1(t)$$

Trate $r_1(t)$ como los datos originales y repita los procesos anteriores. El segundo componente podría obtenerse:

$$h_2(t) = r_1(t) - r_2(t)$$

Repita el proceso como se describe arriba n veces. Entonces se pueden obtener n-IMF de la señal, que están dados por

Espectro de Huang-Hilbert

La transformación de Hilbert-Huang (HHT) es un método de dos pasos para el análisis de señales no lineales y no estacionarias. El primer paso es la descomposición en modo empírico (EMD) que descompone la señal original en un número finito de funciones de modo intrínseco (FMI) (Ramírez & Montejó, 2011). Los FMI son funciones monocomponentes (frecuencia única) que varían en el tiempo. La señal se descompone en IMF de tal manera que el componente de frecuencia más alta de cada evento en la señal es capturado por el primer FMI. El segundo paso de HHT es la transformación de Hilbert que produce un par ortogonal para cada FMI que se desplaza en fase en 90 grados. Cada conjunto de IMF y su par ortogonal se pueden usar para estimar la variación instantánea en magnitud y frecuencia del FMI con respecto al tiempo.

Por lo tanto, HHT es muy útil para extraer información de datos de series temporales no lineales y no estacionarias, como señales de potencia con eventos PQ. Con los años, este HHT simple se ha modificado aún más para abordar mejor los desafíos planteados por las señales de potencia (Ramírez & Montejó, 2011). Por ejemplo, una transición o discontinuidad en la señal puede provocar un sobre impulso y una ambigüedad en la respuesta instantánea de amplitud y frecuencia debido a Gibbsfenómeno.

El proceso de mantenimiento

La ingeniería de confiabilidad es el estudio de la longevidad y la razón de fallas de los equipos. Lo cual representa una investigación acerca de las posibles causas por lo cual los equipos envejecen y fallan se aplican principios científicos y matemáticos (García, 2007). Dicha afirmación radica en que un mayor entendimiento de los fallos que presentan los dispositivos ayudara en la identificación de las mejoras que se pueden realizar en los diseños de los productos con el objetivo aumentar su vida o disminuir el impacto que se genera debido a una falla. Por tanto, se le da mucha importancia al proceso de diseño de los productos o a su rediseño, con antelación a la fabricación o la comercialización.

El mantenimiento, la disponibilidad, la seguridad y la economía

Para que un sistema logre recuperar la capacidad de ejecutar funciones es necesario implementar algunas tareas específicas, las cuales se denominan como tarea de mantenimiento. Las tareas de recuperación más frecuentes son limpieza, ajuste, lubricación, pintura, calibración sustitución, reparación, restauración, renovación, entre otros (García, 2007). Es importante contar con los datos necesarios y las características que definen la forma del perfil de funcionabilidad del sistema, teniendo en cuenta que la razón principal para la adquisición de cualquier sistema es el cumplimiento satisfactorio de la función que presta.

Estudio de criticidad de los equipos o sistemas

Cruz (2012) “El estudio de criticidad de los equipos o sistemas nos permite clasificar los mismos dependiendo del impacto que tengan en cuanto a seguridad,

ambiente, impacto en la producción, costos, frecuencia de fallas y tiempo para reparar” (pág. 31).

Se definen los tipos de criticidad:

- a. Criticidad A: la falla del equipo tiene repercusiones significativas sobre la seguridad, calidad o el proceso productivo.
- b. Criticidad B: la falla del equipo afecta parcialmente al proceso productivo, pudiendo comprometer la calidad o cantidad producida.
- c. Criticidad C: la falla del equipo no trae consecuencias relevantes para el proceso productivo.

Enfoque sistémico

Se Podría definir como una ciencia, debido que cumple con los requisitos establecidos por la Real Academia Española (RAE), la cual define que la agrupación de conocimientos obtenidos mediante la observación, el estudio, de la experiencia y del razonamiento, debidamente estructurados en forma sistémica (Paulino Arévalo, 2012). Y, de los cuales se pueden suponer principios, leyes generales, comportamientos y predicciones, etc., permiten construir una ciencia.

Gestión y mantenimiento

Para Mora, 2009 (como se citó en Paulino 2012), la palabra gestión se relaciona con administración o dirección de empresas (pudiendo ser también de áreas de producción, áreas de servicio, entre otras), cuya función básica es crear bienes o servicios que contribuyan a elevar el nivel de vida de la humanidad.

Además, señala que la expresión empresa se entiende como una organización conformada por personas, máquinas, tecnología, información, planeación y recursos financieros que busca alcanzar objetivos establecidos (eficiencia y eficacia) (Paulino Arévalo, 2012). Manejando adecuadamente los recursos disponibles (eficiencia), respetando el medio ambiente con la mayor efectividad.

Etapas de vida de un equipo

Para describir las etapas de vida de un equipo es necesario tener en cuenta su ciclo, el cual se estructura en tres secciones, la primera es la etapa infantil que es donde se reflejan las fallas de primer grado o fallas primarias, la siguiente etapa es la vida útil y esta hace referencia a las fallas aleatorias y por último la vida de desgaste la cual es donde se representan las fallas producidas por el desgaste (Rodríguez, 2014). Resulta de gran importancia la determinación de la etapa de un equipo, ya que con cada una de ellas se puede determinar e identificar el tipo de falla que tiene la máquina y como se debe realizar la intervención, tanto en el mantenimiento preventivo como en las acciones de mejora y automatización que nos permitan la optimización de los procesos de producción en la industria.

Monitoreo de rodamientos usando análisis de vibración

La técnica de monitorear rodamiento consiste principalmente en realizar una observación paulatina de la información consignada en amplitud y frecuencia de la señal de vibración. Aumentos en magnitud o excitación de algunos armónicos son factores producidos por la presencia de condiciones anormales en los rodamientos. Estos síntomas que presentan las señales de vibración, asociada a fallas en pista externa e interna en rodamientos, se les llama como la excitación del sistema constituido por el rodamiento, su carcasa y el eje de la máquina todos actuando

como una campana en resonancia. Cuando la pista externa o interna se encuentra sometida a una condición de desperfecto, el elemento rotativo produce un pequeño impulso de baja energía, provocando que el rodamiento presente vibraciones. Este impulso excita la frecuencia natural del conjunto que su valor se encuentra sujeto de las propiedades de los materiales y la geometría del sistema.

Componentes y frecuencias de fallo de un rodamiento

Un rodamiento se compone de varios componentes que están claramente diferenciados como: pista interior, bolas o rodillos, jaula y pista exterior.

La degradación de estos elementos generará una o varias frecuencias muy particulares en los espectros de frecuencia que nos permitirán una rápida y fácil identificación. Cada elemento del rodamiento tiene su propia frecuencia, las cuales se denominan como:

- **BPFO (Ball Pass Frequency Outer)** o frecuencia de deterioro de la pista exterior. Hace referencia al número de bolas o rodillos que pasen por un punto en la pista exterior cuando el eje o flecha realice una vuelta completa.

$$BPFO = \left(\frac{RPM}{60}\right) \left(\frac{N_B}{2}\right) \left(1 - \frac{B_D}{P_D} \cos(\beta)\right) \quad [Hz]$$

- **BPFI (BALL PASS FREQUENCY INNER)** o frecuencia de deterioro de la pista interior. Y esta consiste en determinar una frecuencia al contabilizar el número de bolas o rodillos que pasen por un punto en la pista exterior cuando el eje realice un giro completo.

$$BPMF = \left(\frac{RPM}{60}\right) \left(\frac{N_B}{2}\right) \left(1 + \frac{B_D}{P_D} \cos(\beta)\right) \quad [Hz]$$

- **BSF (Ball Spin Frequency)** o frecuencia de deterioro de los elementos rodantes. Se trata básicamente de la cantidad de giros que realiza una bola o rodillo del rodamiento cada vez que en el eje se realiza un giro completo.

$$BSF = \left(\frac{RPM}{60}\right) \left(\frac{P_D}{B_D}\right) \left(1 - \left(\frac{B_D}{P_D} \cos(\beta)\right)^2\right) \quad [Hz]$$

- **FTF (Fundamental Train Frequency)** o frecuencia de deterioro de la jaula. Esta frecuencia hace referencia al número de giros que realiza la jaula del rodamiento cada vez que el eje realiza una vuelta completa.

$$FTF = \left(\frac{RPM}{60}\right) \left(\frac{1}{2}\right) \left(1 - \frac{B_D}{P_D} \cos(\beta)\right) \quad [Hz]$$

Para los casos en los cuales se desconocen algunos parámetros físicos del rodamiento, se deben aplicar aproximaciones mediante una serie de fórmulas empíricas que nos ayuda a determinar las frecuencias de deterioro de las pistas y de la jaula de un rodamiento con respecto al número de elementos rodantes y la velocidad de giro:

$$FTF = 0.4 * \left(\frac{RPM}{60}\right) \quad [Hz]$$

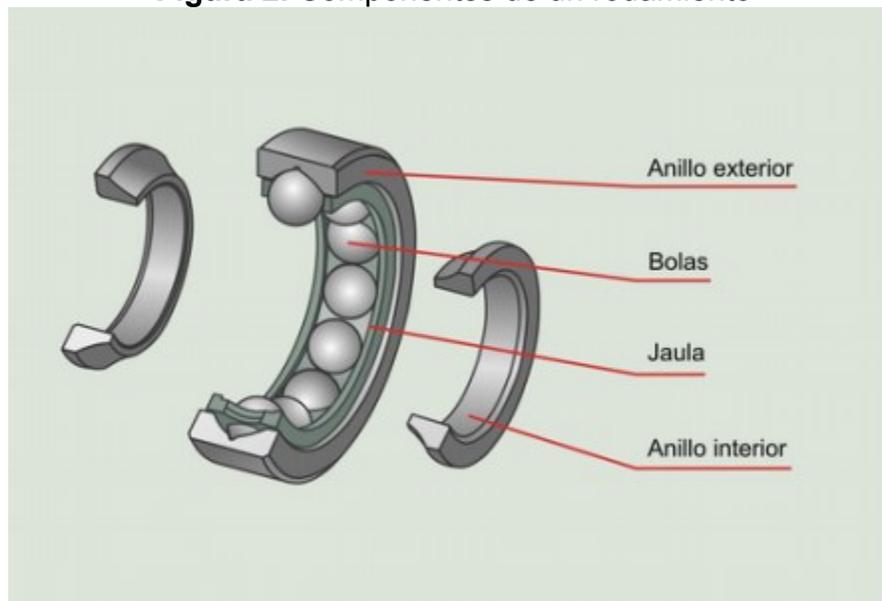
$$BPMFO = 0.4 * N_B * \left(\frac{RPM}{60}\right) \quad [Hz]$$

$$BPMI = 0.6 * N_B * \left(\frac{RPM}{60} \right) [Hz]$$

En la gran mayoría de rodamientos el número de rodillos se encuentra entre 8 y 12, Aunque en rodamientos de diámetros mayor como los utilizados en las máquinas de papel el número de rodillos puede ser mucho mayor (power-mi, 2017)

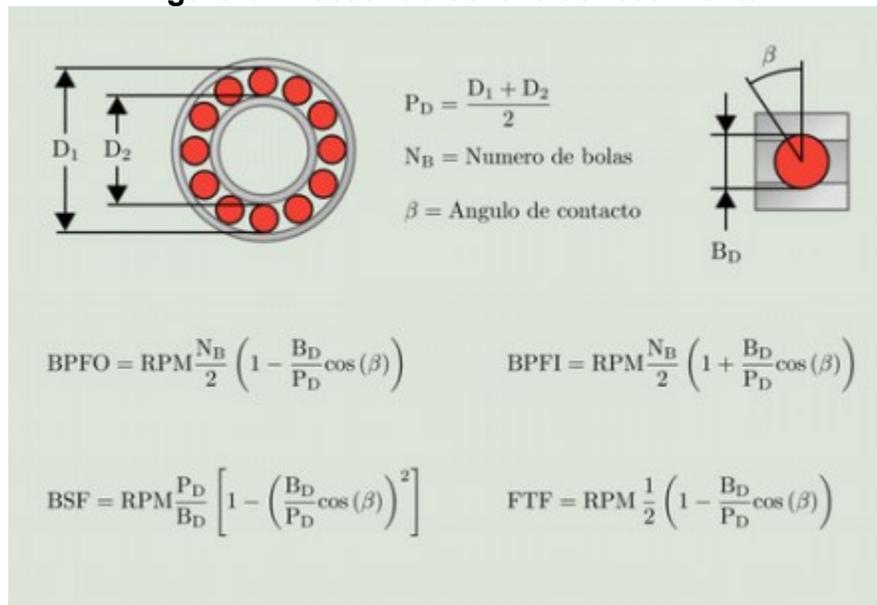
Elemento que la componente un elemento rodante:

Figura 2. Componentes de un rodamiento

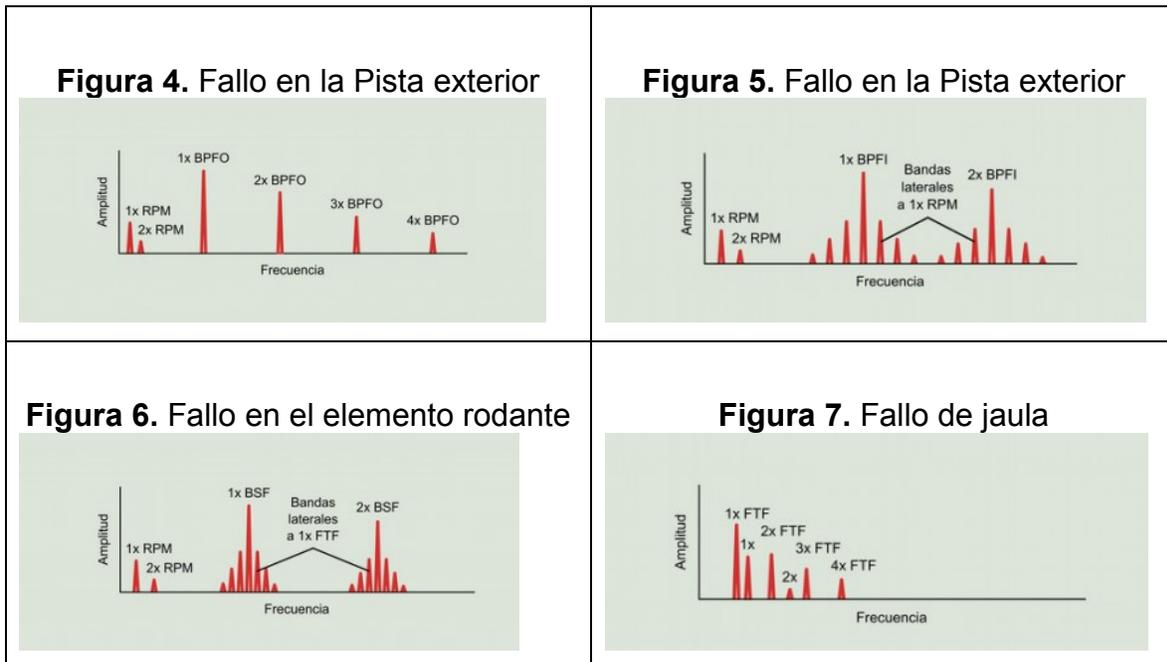


Fuente: Power_MI cloud condition monitoring. MANUAL ANÁLISIS DE VIBRACIONES, p. 69.

Figura 3. Frecuencia de fallo de rodamiento



Fuente: Power_MI cloud condition monitoring. MANUAL ANÁLISIS DE VIBRACIONES, p. 69.



Fuente: Power_MI cloud condition monitoring. MANUAL ANÁLISIS DE VIBRACIONES, p. 72.

Técnica de procesamiento y análisis de la señal

Uno de los métodos más eficientes para el preprocesamiento de las señales no estacionarias es la transformada de Hilbert-Huang; Las cuales consiste en aplicar dos técnicas (EMD y Hilbert Transformar). La EMD identifica el oscilatorio intrínseco, es decir, las funciones de modo intrínseco (IMF) de la señal entonces la Transformación de Hilbert se aplica a cada IMF para extraer Las frecuencias y amplitudes instantáneas. Como resultado, una representación tridimensional (amplitud, frecuencia, tiempo) de cada modo oscilatorio de la señal (researchgate, 2017)

2.1 MARCO HISTÓRICO

Carlos Gonzales, 2009 (como se citó en Ruiz 2012) en su libro Principios de Mantenimiento, Especialización en gerencia de mantenimiento, menciona que el nacimiento del mantenimiento inicia junto al nacimiento de la industria, con la creación de los procesos de producción y mecanizados para la fabricación de bienes a gran escala. (Ruiz Acevedo, 2012) Obligando así a que estas dependieran de un adecuado funcionamiento. Sin embargo, la técnica de mantenimiento se le consideraba como algo inapropiado en el que se debía incurrir en gastos.

Considerando los cambios evolutivos que se han presentado en el mantenimiento, resulta muy fácil hablar de las generaciones que han marcado el desarrollo y mejora desde sus inicios, aunque, en su gran mayoría los autores no concuerdan en las fechas de inicio y finalización (Ruiz Acevedo, 2012). Escrito apoyado en el libro de John Moubray, Reliability Centred Maintenance Industrial Press, NY 1997.

Que en español significa (Mantenimiento centrado en fiabilidad prensa industrial, NY 1997).

La industria después de pasar la guerra toma un resurgimiento en el mundo. Sin embargo, en 1973 otra vez recibe un gran golpe, debido a la crisis energética que presento pese a que los países árabes se negaban a la exportación de crudo a EE. UU y Europa Occidental (Ruiz Acevedo, 2012).

“Obligando así a los expertos a tener que reestructurar su forma de producir y mantener los equipos, para garantizar la optimización sus recursos y prolongar el periodo de funcionamiento” (Ruiz Acevedo, 2012, pág. 26).

Cuando se superó el impase, se hizo notorio la necesidad de estandarizar todas estas iniciativas con el objetivo de tener beneficios de integrales en el sector industrial, y que solo no fuera EE. UU, sino, en todo Europa Occidental (Ruiz Acevedo, 2012). Dando la así la iniciativa para la creación de normas que actualmente nos rigen.

“Hoy por hoy ya no se habla solo de la disponibilidad de los equipos, ha surgido un nuevo termino que se abre paso en la industria, lo es la confiabilidad, la cual nos lleva a realizar en las maquinas análisis estático mediante modelos especializados enfocados al mantenimiento” (Ruiz Acevedo, 2012, pág. 27).

Cada vez son más los estudios que generan cambios significativos en la gestión del mantenimiento. (Ruiz Acevedo, 2012). Teniendo en cuenta que en la década de los setenta se presentó un aporte muy notable como lo es el caso de Nowlan y Heap de ellos parten las nuevas acciones de mantenimiento, para predecir la forma en la que se debe atacar una condición anormal.

2.2 MARCO CONCEPTUAL

Intención de diseño

Trata básicamente de tener el conocimiento de un procesos o planta que en la cual se desea ejecutar una acción, con el objetivo de identificar su principio de funcionamiento, teniendo en cuenta las condiciones de diseño y sugerencia de operarios (Otero & Torres, 2010). La implementación de esta técnica claramente es recaudar conocimiento de la forma de operación del activo, siendo este el nivel de detalle requerido en la descripción. En lo que se define se debe agregar parámetros de integridad y operación, los equipos involucrados, rutas de proceso, parámetros de control, entre otros atributos.

Análisis funcional

Se aplica Análisis funcional con el objetivo de poder determinar los modos de falla, ya que es de vital importancia conocer cuáles son aquellas funciones que el operador pretende que su dispositivo ejecute (Otero & Torres, 2010). Es pertinente identificar su operación principal y las secundarias.

Fallas funcionales

Santiago Díaz (2008) considera que la única forma en la que un equipo o dispositivo no se pueda desempeñar de manera correcta en su labor es cuando en él incide una falla. Andes de la aplicación de cualquier herramienta debe primar la identificación oportuna de las fallas que se encuentren presentes. El proceso (RCM) se realiza en dos niveles:

- Lo primero es identificar las circunstancias que llevan a la falla.
- Posteriormente se debe analizar el evento o los eventos que pueden hacer que el activo falle.

En el RCM, los estados de falla son conocidos como fallas funcionales debido a que es cuando un activo no se puede desempeñar en la función para la cual fue diseñado. Por otro lado, a las que se le denomina fallas parciales son aquellas en las cuales el activo presenta falla pero aún puede desarrollar la función para la cual fue diseñado, pero con un nivel de desempeño inaceptable en el cual es incapaz de mantener sus niveles de calidad, es decir pierde eficiencia. Estas fallas solo se pueden determinar una vez se establezca cuáles son las guías de operación del activo. (Diaz, 2008, pág. 27)

Modos de falla

Una vez identificado la falla funcional lo que se debe hacer posteriormente es determinar las condiciones anormales que pudieron haber ocasionado estas fallas, a lo cual se le llama modos de falla (Diaz, 2008). Los modos de falla hacen un paralelo con todas las posibles fallas que se presentan en otros equipos similares, también incluyen fallas que ya están identificadas pero que se les está haciendo seguimiento con mantenimientos preventivo para mitigar el daño, así como fallas que aún no han ocurrido, pero que se les considera como riesgos potenciales.

En su gran mayoría la lista de falla consigan todas aquellas producidas por desgaste, deterioro y por el funcionamiento matutino de los activos, dichos modos generan un alto nivel de importancia es por ello que se hace necesario realizar un análisis paulatino de cada modo de falla.

“Sin embargo, para poder identificar todas las causas de condiciones anormales o fallas planteadas, en ella se deben incluir las fallas causadas por errores humanos por parte de los operarios y personal de mantenimiento” (Díaz, 2008, pág. 28).

Efectos de falla

Santiago Díaz (2008) indica que los efectos de fallas consisten en realizar un listado de las posibles fallas, en donde se encuentre consignado el comportamiento del activo cuando en él incide la falla. En esta descripción se debe incluir la información necesaria para poder apoyar la evaluación de las consecuencias que conlleva la falla, entre éstas tenemos:

- La existencia de evidencias de falla.
- De qué modo representa una amenaza para la seguridad o el medio ambiente.
- De qué manera afecta a la producción o a las operaciones.
- Los daños físicos causados por la falla.
- Que debe hacerse para reparar la falla.

Consecuencias de falla

Resulta innegable el hecho de que hayan aparecido nuevas fallas en los equipos de una organización y que se encuentren afectados de algún modo, ya sea afectando el correcto funcionamiento de las operaciones, el cumplimiento de estándares de calidad, el servicio al cliente, la seguridad o el medio ambiente generando gastos en recursos humanos y económicos para poder dar una solución (Díaz, 2008). Son estas consecuencias las que fuertemente influyen en el intento de prevenir cada falla. Dicho de otra manera, si una falla aumenta su

escala de fatalidad se debe hacer un gasto grande para lograr contenerla. Por otro lado, si las consecuencias son minúsculas o casi despreciables, nos permite omitir el mantenimiento de rutinario y solo es necesario una simple limpieza y lubricación básica.

Uno de los puntos fuertes del RCM tiene lugar en el reconocimiento de las fallas potenciales en lo que concierne a los aspectos técnicos. Díaz (2008) otorga. “El hecho reconoce que la única razón para realizar cualquier tipo de mantenimiento proactivo no es mitigar las fallas sino minimizar las causas y consecuencias que la producen. El proceso de RCM en lista dichas consecuencias en cuatro categorías” (p.29).

Consecuencias de fallas ocultas

No proporcionan un golpe directamente en los equipos, pero dejan expuesta la organización a que se presenten fallas múltiples con serias consecuencias y hasta catastróficas.

Fallas de equipos

Alberto García (2000) presenta que un dispositivo o equipo es denominado en falla siempre y cuando este dispositivo sea incapaz de ejecutar las funciones para las cuales se elaboró (García, 2000). En lo que concierne al mantenimiento respecto a la confiabilidad una falla es usualmente llamada falla funcional. Se identifican dos tipos de fallas funcionales:

- Inesperadas, son aquellas que se presentan sin antes dar un aviso.

- Graduales o Potenciales, son las que antes de presentarse la falla de alguna manera envían señales de advertencia.

Tanto las fallas inesperadas como las graduales dan como resultado una falla funcional, siendo esta última el estado donde el rendimiento diseñado o seleccionado (el más bajo de los dos valores) del equipo bajo consideración, ya no se puede realizar. La falla potencial es la señal temprana de una falla que podría volverse falla funcional.

Problemas potenciales en equipos

Los modos de fallas pueden deberse a:

- Diseño inadecuado (sobre por debajo de la capacidad de diseño, excesiva carga externa, controles inadecuado.)
- Daño o desgaste en servicio (Fallas de los rodamientos y sellos, erosión, corrosión, fatiga, cavitación.)
- Error operacional (bloqueo contra presión, operación sin fluido de trabajo, líquido en línea de vapor.)
- Mantenimiento inadecuado (ensamblaje inadecuado de los componentes, pérdida de lubricación, lubricante incorrecto, instalación de partes incorrectas).
(Garcia, 2000, pág. 31)

Análisis de criticidad

El Análisis de Criticidad es una metodología implementada por un equipo multidisciplinario para establecer niveles de criticidad a los equipos y sistemas (Garcia, 2000). Los niveles de criticidad permiten:

- Establecer los tipos de mantenimiento a ser realizados en los equipos e instalaciones y sus respectivas frecuencias de aplicación.
- Seleccionar y definir niveles de repuestos en almacén.
- Establecer prioridades en órdenes de trabajo en SAP.

“El equipo que realiza el análisis debe tomar en cuenta los siguientes parámetros y asignarle valores según corresponda (como se puede ver en el análisis de criticidad del compresor de gas húmedo)” (Garcia, 2000, pág. 34).

Flexibilidad operacional

Se analiza la función puede ser suplida por otro equipo o sistema y verificar si el mismo tiene repuestos compartidos o dedicados.

Consecuencia de la Falla

En este punto se analiza el equipo asumiendo que el mismo no tiene repuestos. Verificar el impacto del equipo en la operación de la Unidad y en la del Complejo de Mejoramiento (Garcia, 2000). Aquí también se consideran los costos operacionales referentes al incremento o utilización de químicos, pérdidas o consumo de subproductos, utilización o alquiler de equipos para suplir la función.

Consecuencias ambientales y para la seguridad

Las fallas pueden alterar la seguridad del proceso mientras que el nivel de gravedad llegue a lesiones e incluso en su extremo a causar la muerte a operadores o personal de mantenimiento. Díaz (2008) asegura que “posee

consecuencias ambientales siempre y cuando se irrumpa alguna normativa o reglamento ambiental tanto corporativo, regional y hasta internacional” (p.29).

Consecuencias Operacionales

Díaz (2008) Para que una falla tenga consecuencias en la operación se debe determinar si se está afectando la producción (cantidad, calidad del producto, atención al cliente o costos operacionales) además del costo directo de la reparación.

Consecuencias no operacionales

Las fallas que se encuentran de este tipo no representan una afectación directa a la producción, solo se ven reflejadas en la inversión económica de la reparación. Este análisis acaba con el paradigma que se tiene acerca de una falla lo cual manifiesta que cualquier falla que se presente altera la operación de la planta. (Díaz, 2008, pág. 30)

Herramientas del análisis de fallas

Para analizar las fallas es necesario la utilización de cinco herramientas básicas. La cuales se expondrán a continuación.

Lista de chequeo

Arturo Alvares (2013) fundamenta que una manera eficiente en la cual se puede registrar información y de esa manera realizar un análisis puede ser enlistando ciertas actividades y Tiene las siguientes finalidades:

- Proporcionar un medio para registrar de manera eficiente los datos que servirán de base para subsecuentes análisis.
- Proporcionar registros históricos, que ayudan a percibir los cambios en el tiempo.
- Facilitar el inicio del pensamiento estadístico.
- Ayudar traducir las opiniones en hechos y datos.
- Confirmar las normas establecidas.

Histograma

Se representa mediante una descripción de manera gráfica en la cual cada dato de manera individual se agrupa en paquetes conforme varíe la ocurrencia de la frecuencia relativa o frecuencia acumulada (Alvares, 2013). Estos histogramas muestran la forma en la cual se deben distribuir los valores individuales agrupados en rangos de datos o en conjunción con la información de la cual se tenga referencia respecto a su promedio y a la variación que presente. Para su ejecución se deben seguir los siguiente pasos.

- Desplegar la distribución de datos en barras, graficando el número de unidades de cada categoría.
- Adentrarse en la naturaleza de la variación del proceso (por ejemplo, determinar si sólo una variación está presente).

Diagrama de control

Con este diagrama podemos determinar si un proceso está funcionando de manera correcta, o se puede corroborar que el sistema no se encuentra en una condición estable. También proporciona un modelo estadístico con el cual se pueden determinar

si se presentan fallas especiales. El objetivo de estos gráficos es identificar en tiempo real los fallos que se cometen y así mismo actuar de manera oportuna. (Alvares, 2013, pág. 26)

Mantenimiento centrado en confiabilidad (MCC)

Alberto García (2000) explica en esta filosofía, que en su aplicación trata de determinar todos los requerimientos de mantenimiento de los activos o ISED (infraestructura, sistemas, equipos, dispositivos), en su contexto operativo. El MCC determina “que se debe realizar” para asegurar que cualquier ISED continúe realizando todo lo que el usuario exija en un contexto operativo actual.

Características del MCC

- Los ISED son analizados al detalle.
- Se gerencia el equipo.
- Las fallas las analiza desde el punto de vista causa-raíz (causa de fallas y sus frecuencias).
- Basa su aplicación en el mantenimiento preventivo, predictivo y correctivo.
- Alto grado de importancia a la protección integral de las personas, equipos y medio ambiente.
- Relevancia al contexto operativo de los equipos.
- Analiza detalladamente los elementos funcionales de los equipos. (García, 2000, pág. 29)

Albert García (2000) plantea que los beneficios del MCC son:

- Efectividad y eficiencia del mantenimiento.
- Altos niveles de confiabilidad y disponibilidad de los ISED.

- Optimizar los costos debidos al mantenimiento.
- Protección integral de los ISED y del ambiente.
- Identificación y eliminación de fallas crónicas
- Calidad del producto.
- Motivación individual, trabajo en equipo y huella auditable.

Confiabilidad en equipos

Arturo Alvares (2013) define que para que un equipo pueda trabajar por un tiempo determinado sin presentar fallas depende de que algunos parámetros se encuentren en óptimas condiciones, estos son:

- Condiciones de entorno.
- Temperatura.
- Humedad.
- Polución.

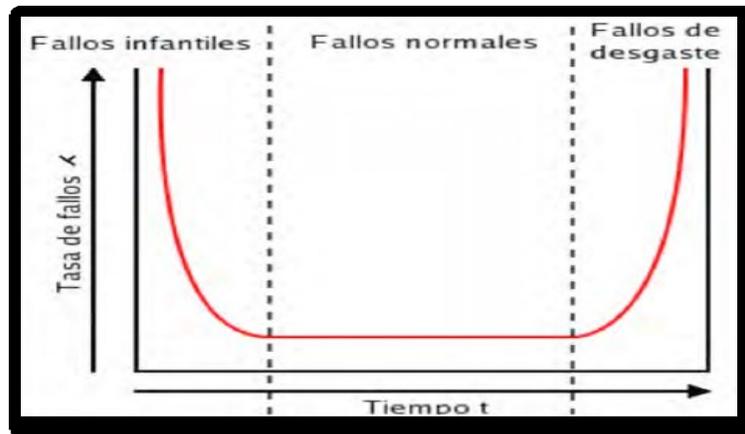
Al fijar estas características, los niveles de confiabilidad dependen del tiempo, y sus características se encuentran sujetas a una serie de leyes que rigen la probabilidad y lo que especifican es que las fallas se pueden presentar conforme pasa el tiempo (Alvares, 2013). Y la posibilidad de que un componente manifieste fallas en un instante dado se calcula con la integral o el área bajo la curva de la función densidad de probabilidad.

Herramientas de la confiabilidad

Curva de la bañera

Esta curva es ideal para idear la cantidad de fallas que se pueden presentar durante la vida útil de una maquina o sistema. Su nombre se debe pese a que su forma es similar al de una bañera con acotaciones transversales.

Figura 8. Curva de a bañera.



Fuente: ALVAREZ. Arturo. Análisis de fallas de una maquina extrusora de electrodos. Ingeniero industrial. Colombia. Universidad politécnica, 2013, p. 21.

Disponibilidad

Esta se ve reflejada en la posibilidad de utilización de una instalación desde el punto de vista técnico, exonerando así la paradas no programadas debido a fallas imprevistas (Alvares, 2013). La disponibilidad se define como el tiempo para el cual un sistema está en operación y el tiempo total, donde se debe incluir el tiempo precedente y el tiempo que se tardan las reparaciones.

2.3 MARCO LEGAL

Norma técnica colombiana, NTC-ISO 14224. Recopilación e intercambio de datos sobre fiabilidad y mantenimiento de los equipos.

En la industria del petróleo y gas natural, se está prestando gran atención a la seguridad, fiabilidad y mantenimiento del equipo (NTC-ISO 14224, 2016). Se utilizan varios análisis para estimar el riesgo de peligros, contaminación o daños al equipo. Para estos análisis, los datos de fiabilidad y mantenimiento (RM) son vitales.

NTC-ISO 14224 (2016) “Recientemente se ha hecho más hincapié en el diseño y el mantenimiento rentables de las nuevas instalaciones y de las instalaciones existentes. A este respecto, los datos sobre fallas, mecanismos de falla y mantenimiento han adquirido mayor importancia” (pág. 6).

La recopilación de datos es una inversión, mediante la normalización y la mejora de los sistemas de gestión de información de instalaciones que permiten la recogida y transferencia electrónica de datos, la calidad puede mejorarse (NTC-ISO 14224, 2016). Una manera rentable de maximizar la cantidad y tipo de datos es a través de la cooperación de la industria, para que sea posible recopilar, intercambiar y analizar datos basados en un terreno común, se requiere un estándar.

Esta Norma Internacional da recomendaciones a la industria del petróleo y gas natural sobre la especificación y ejecución de la recolección de datos de RM, tanto como un ejercicio separado y en el registro cotidiano de datos históricos en sistemas de gestión de mantenimiento (NTC-ISO 14224, 2016).

Industrias del petróleo y del gas natural - Recopilación e intercambio de datos sobre fiabilidad y mantenimiento de los equipos

Esta Norma Internacional entrega una base completa para la adquisición de datos de Fiabilidad y Mantenimiento (RM) mediante un formato estándar en las áreas de perforación, producción, refinación y transporte por tubería de petróleo y gas natural. Esta Norma Internacional presenta directrices para la especificación, recolección y aseguramiento de la calidad de los datos de RM, facilitando la recopilación de datos de RM. Los datos permitirán al usuario cuantificar la fiabilidad del equipo y comparar la fiabilidad del equipo con características similares. (NTC-ISO 14224, 2016, pág. 13).

Mediante el análisis de los datos, los parámetros de fiabilidad se pueden determinar para su uso en el diseño, operación y mantenimiento (NTC-ISO 14224, 2016). Sin embargo, esta Norma Internacional no es aplicable al método de análisis para los datos de RM.

Los principales objetivos de esta Norma son.

a. especificar los datos que se recogerán para el análisis de:

- Diseño y configuración del sistema.
- Seguridad, fiabilidad y disponibilidad de sistemas y plantas.
- Costo del ciclo de vida.
- Planificación, optimización y ejecución del mantenimiento.

b. especificar datos en un formato estandarizado para:

- Permitir el intercambio de datos de RM entre plantas, propietarios, fabricantes y contratistas.
- Garantizar que los datos de RM son de calidad suficiente para el análisis previsto.

Esta Norma Internacional es aplicable a los datos recogidos en la fase operacional (NTC-ISO 14224, 2016). Debido a la variedad de usos diferentes para los datos de RM, se enfatiza que, para cada programa de recolección de datos, se debe prestar atención al nivel apropiado de datos requerido.

NOTA: NTC-ISO 14224 (2016) Se reconoce que “Para fortalecer el objetivo de esta Norma Internacional, es apropiada una referencia normativa que detalle todos los códigos de taxonomía para cada una de estas clases de equipos” (pág. 17). Sin embargo, dado que en el momento de la publicación de esta Norma Internacional no existe una lista exhaustiva de taxonomías que abarque todas las clases de equipos.

Límite y jerarquía del equipo

Descripción del Límite

“Una clara descripción de los límites es imprescindible para recopilar, fusionar y analizar datos de RM de diferentes industrias, plantas o fuentes. De otro modo, la fusión y el análisis se basarán en datos incompatibles” (NTC-ISO 14224, 2016, pág. 23).

Orientación para definir una jerarquía de equipos

Se recomienda la preparación de una jerarquía para el equipo, el nivel más alto es la clase de equipo el número de niveles para la subdivisión dependerá de la complejidad de la unidad de equipo y el uso de los datos (NTC-ISO 14224, 2016). Los datos de confiabilidad deben estar relacionados con un cierto nivel dentro de la jerarquía del equipo para ser significativos y comparables. Por ejemplo, la clase de gravedad de datos de confiabilidad debe estar relacionada con la unidad de equipo, mientras que la causa de falla debe estar relacionada con el nivel más bajo en la jerarquía de equipos.

Un solo instrumento puede no necesitar más interrupción, mientras que varios niveles son necesarios para un compresor (NTC-ISO 14224, 2016). Para los datos utilizados en análisis de disponibilidad, la fiabilidad en el nivel de unidad de equipo puede ser el único dato deseable necesario, mientras que un análisis de RCM necesitará datos sobre el mecanismo de falla a nivel de elemento mantenible.

Estructura de la información

Categorías de datos

NTC-ISO 14224 (2016) “Los datos de RM se recogerán de forma organizada y estructurada. A continuación, se indican las principales categorías de datos para los datos de equipos, fallas y mantenimiento” (pág. 27).

a. Datos del equipo. La descripción del equipo se caracteriza por:

- 1.** Datos de identificación, ubicación del equipo, clasificación, datos de instalación, datos de la unidad del equipo.

2. Datos de diseño, datos del fabricante, características de diseño.
3. datos de aplicación, operación, medio ambiente.

NTC-ISO 14224 (2016) “Estas categorías de datos serán generales para todas las clases de equipos, tipo, y específico para cada unidad de equipo, número de etapas para un compresor” (pág. 28).

b. Datos de fallo. Estos datos se caracterizan por:

1. datos de identificación, registro de fallos y ubicación del equipo.
2. Datos de fallo para caracterizar un fallo, p. Fecha de falla, elementos de mantenimiento fallidos, clase de gravedad, modo de falla, causa de falla, método de observación.

c. Datos de mantenimiento. Estos datos se caracterizan por:

1. Datos de identificación, p.ej. Registro de mantenimiento, ubicación del equipo, registro de fallas.
2. Datos de mantenimiento, Parámetros que caracterizan un mantenimiento, Fecha de mantenimiento, categoría de mantenimiento, actividad de mantenimiento, artículos mantenidos, horas de manutención por disciplina, tiempo de mantenimiento activo, tiempo de inactividad.

Normalmente, el tipo de datos de falla y mantenimiento será común en todas las clases de equipos, con excepciones cuando sea necesario recoger tipos de datos específicos (NTC-ISO 14224, 2016). Los eventos de mantenimiento correctivo se registrarán para describir la acción correctiva después de un fallo, si se requieren registros de mantenimiento preventivo para conservar el historial de vida completo de una unidad de equipo.

Norma técnica colombiana, NTC-ISO 9001, Sistema de la gestión de la calidad. Objetivo y campo de aplicación

Generalidades.

“en esta norma se especifica los requisitos para un sistema de gestión de la calidad cuando la organización necesita” (NTC-ISO 9001, 2008, pág. 8).

- a. Demostrar su capacidad para manifestar de manera regular los productos que cumplan con las características exigidas por el cliente, de forma legal y que cumpla el reglamento.
- b. Tratar de aumentar la satisfacción del cliente por medio de una aplicación eficaz del sistema, incluyendo en ello los procesos para permanecer en constante mejora y el aseguramiento de la conformidad para los clientes siempre y cuando se cumpla con todos los estándares legales.

Aplicación

Los requisitos con los que cuenta esta norma se constituye dentro de lo legal y se pretende que se puedan aplicar a todas la compañías independientemente de sus razón social, tamaño y producto suministrado, es por ello que cuando uno de estos requisitos con cumple en algunas compañías o en tipi de producto determinado se lleva a la culminación de esta norma (NTC-ISO 9001, 2008). Cuando se realicen

las exclusiones, no se puede presentar una apelación que permita la conformidad de esta norma internacional a menos que dichas exclusiones queden consignadas en los requisitos expresados en el capítulo siete y que los cambios realizados no generen afectaciones a las organizaciones para proporcionar productos que cumplan con los estándares regulados de conformidad con el cliente y los reglamentarios aplicables.

Sistema de gestión de la calidad

Requisitos generales

NTC-ISO 9001 (2008) “la compañía tiene que establecer, documentar, implementar y mantener un sistema de gestión que permita estar en condiciones favorables además de su eficacia teniendo en cuenta los requisitos de esta norma internacional” (pág. 12).

La organización debe:

- a. Identificar los procesos de mayor importancia para el sistema de gestión de la calidad y su puesta en marcha mediante la organización.
- b. Determinación de la secuencia e interacción de estos procesos.
- c. Implementar los métodos de criterios y la secuencia necesarios para proporcionar que tanto la operación como el control de estos cumplan con lo establecido.
- d. Asegurar que el recurso siempre se encuentre presente al igual que la información necesaria teniendo en cuenta que se debe apoyar la operación y realizar el seguimiento de estos procesos.

- e. Ejecutar seguimiento, la medición cuando sea aplicable y analizar las etapas de estos procesos.
- f. Trabajar de manera armónica con el objetivo de conseguir los resultados planificados en estos procesos.

La compañía será la encargada de la gestión en cuanto a los acuerdos y requisitos que esta norma requiere. En los casos en que la organización opte por contratar externamente cualquier proceso que afecte la conformidad del producto con los requisitos y es la compañía quien se encarga del control de dichos procesos (NTC-ISO 9001, 2008). el control que se desea ejecutar mediante el caso mencionados con antelación, debe estar definido dentro del sistema de gestión de calidad.

Manual de la calidad

Todas las organizaciones deben tener un manual en el que se consigne todo la información acerca del control de calidad, incluyendo todos los detalles y la justificación en caso que se haya presentado una exclusión de los procedimientos documentados establecidos para el sistema de gestión de la calidad (NTC-ISO 9001, 2008). O realizar una referencia de los manuales que permitan contar con una descripción de la interacción por parte de los procesos del sistema de gestión de la calidad.

2.4 MARCO AMBIENTAL

Norma técnica colombiana. NTC-ISO 14001, sistemas de gestión ambiental. Requisitos con orientación para su uso.

Esta norma establece que debe existir un equilibrio entre economía, medio ambiente y sociedad con el objetivo de no causar alteraciones a las futuras generaciones y satisfacer las necesidades actuales (NTC-ISO 14001, 2015). Para lograr un desarrollo sostenible se hace necesario primar por el equilibrio que se mencionó con antelación y de esa manera obtener una sostenibilidad en los procesos.

Cada vez la sociedad exige más en cuanto al desarrollo sostenible teniendo en cuenta que se trata de preservar el medio ambiente y piden rendición de cuentas mediante un contexto legal. NTC-ISO 14001 (2015) “Conforme pasa el tiempo exigen y presionan con relación a la contaminación del medio ambiente, uso inapropiado de recursos, gestión ineficiente de residuos, alteraciones climáticas, degradación de los ecosistemas y pérdida de biodiversidad” (pág. 11).

“la presente conlleva a que las comunidades tengan que optar por un sistema de legislación en el cual se pretenda proteger los el medio ambiente y cuyo objetivo es contribuir al pilar ambiental de la sostenibilidad” (NTC-ISO 14001, 2015, pág. 11).

Objetivo de un sistema de gestión ambiental

Esta Norma Internacional trata de proporcionar a las organizaciones unas prestaciones legales en las cuales se pueda proteger el medio ambiente y

responder a la variación medio ambiental que se presenta constantemente, conservando las proporciones socioeconómicas (NTC-ISO 14001, 2015). Esta norma implanta requisitos que permiten que una organización consiga los resultados previstos que ha establecido para su sistema de gestión ambiental.

Presentar la visión del enfoque de gestión ambiental facilita la adquisición de información a la alta dirección para proporcionar éxito a largo plazo y crear opciones para contribuir al desarrollo sostenible mediante (NTC-ISO 14001, 2015).

1. El cuidado medioambiental, por medio de la prevención o mitigación de impactos ambientales de fatalidad.
2. Mitigar causas potenciales de las condiciones ambientales sobre la organización.
3. Acompañamiento a la compañía con en el cumplimiento de todos los requisitos legales.
4. La mejora del desempeño ambiental.
5. El control o la influencia de la forma en la que la compañía diseña, fabrica, distribuye, consume y ejecuta las acciones finales de productos o servicios, utilizando una ciclos en los cuales se logre prevenir que un impacto sea desviado a otro punto del ciclo
6. La consecución ayudas económicas y operacionales que permitan estar en el resultado de la creación de alternativas respetuosas con el medio ambiente y que refuercen la posición de la organización en el mercado.
7. La transmisión de información que trata de medidas ambientales representan interés de manera pertinente.

“esta norma al igual que otras normas se caracterizan por no estar prevista para incrementar ni alterar los requisitos legales de una organización” (NTC-ISO 14001, 2015, pág. 12).

Objeto y campo de aplicación

La presente norma consiste en enumerar la requisitos que se necesitan para un sistema de gestión ambiental que en una organización se puede usar para mejorar su desempeño ambiental (NTC-ISO 14001, 2015). La norma se puede utilizar por parte de las organizaciones que desean manejar la gestión de sus responsabilidades con el medio ambiente de tal manera que contribuya a la sostenibilidad.

Esta norma internacional le ofrece una garantía a las compañías en las ayudas que le sean posible para el cumplimiento de sus objetivos NTC-ISO 14001 (2015) “con lo cual se soporta el valor estimado al medio ambiente, y a la propia compañía como a sus partes interesadas, manteniendo así los principios de política ambiental de una compañía. Estos son los resultados de un sistema de gestión ambiental” (pág. 15).

1. las mejoras que se le realizan al desempeño ambiental.
2. el cumplimiento de todos los requisitos establecidos legalmente.
3. el logro de los objetivos ambientales que se plantearon.

3 DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO

Las fallas que presentan los rodamientos muy frecuentemente se observan en equipos rotativos. Con una aproximación de casi la mitad de dichas fallas se encuentran en motores eléctricos, quien corresponde a la gran parte de equipos rotativos y en sus más comunes se refieren a fallas en rodamientos. Dentro de este entorno, las que observan con mayor frecuencia son debidas a las fallas asociadas a las pistas, las cuales representan un porcentaje alto en las fallas,

La materialización de una falla del rodamiento de un equipo representa una pérdida económica de gran magnitud dependiendo de la disponibilidad del equipo y esto se debe a que ocasionaría paradas no programadas de los procesos. La metodología tradicional que se le aplica a los rodamientos consiste en su remplazo después de cierto tiempo de trabajo sin tener en cuenta perturbaciones externas

Cuando un rodamiento entra en su proceso de degradación, siempre genera vibraciones periódicas de acuerdo con su frecuencia de falla. En las señales de vibración adquiridas por el sensor de aceleración de piezoelectricidad, las fallas de los cojinetes se manifiestan como una señal de impulso periódico (PIS) a diferentes frecuencias de falla. Sin embargo, a excepción del PIS del rodamiento, hay muchas señales producidas por otros componentes, como ejes, engranajes, motores, etc. Por lo tanto, la tarea del diagnóstico de falla del rodamiento es detectar el PIS en la señal de vibración. Si podemos detectar la falla del rodamiento en su etapa inicial, habrá suficiente tiempo para que los encargados de mantenimiento la reemplacen. Sin embargo, solo en base a la información de falla, no sabemos cuánto tiempo continuará funcionando hasta su falla. Por lo

tanto, los mantenedores no saben cuándo reemplazarlo y no pueden planificar las acciones de mantenimiento de manera óptima.

Para la estructuración del proyecto investigativo se plantea por parte de los autores es analizar vibraciones para el diagnóstico de fallas en rodamientos mediante la Descomposición de Modo Empírico (EMD) utilizando la base de datos Case Western Reserve University Bearing Data Center (CWRU), razón por la cual:

1. Aplicar la Descomposición de Modo Empírico a la base de datos CWRU de fallas en la pista interior para aplicarle a la primera IMF extraída parámetros tanto temporales como en el dominio de la frecuencia.
2. Determinar cuál parámetro permite dar un diagnóstico más preciso en el análisis de fallas comparando los resultados obtenidos en las señales con falla y en las señales de referencia.

Seguidamente se realiza un análisis a las señales, aplicando la Descomposición de modo empírico, en el que se incluyen parámetros temporales y con el dominio de la frecuencia, concluyendo los riesgos existentes, fallas presentes en el sistema y el impacto que generan estas en las operaciones. Finalmente se determina el parámetro para brindar el diagnóstico más preciso en cuanto al análisis de fallas en los rodamientos, para lo cual se lleva a cabo la comparación de las señales con fallas y sin fallas.

En esta investigación se tuvo en cuenta datos de la pista interior de los rodamientos, donde se centró en analizar la frecuencia de deterioro de la pista interior. Se corresponde físicamente con el número de bolas o rodillos que pasan por un punto de la pista interior cada vez que el eje realiza un giro completo;

llamada en su sigla en inglés BPF1. Se utilizaron diferentes métodos de análisis, en el dominio del tiempo y en la frecuencia.

Inicialmente se plantea el análisis de señal para encontrar una falla, pudiendo determinar la gravedad de esta. Para esto, se propone aplicar la descomposición de modo empírico a las señales extraídas de la base de datos CWRU, de donde se escogen señales con fallas y otras sin fallas, de las cuales se tabulan en el dominio de la frecuencia y el tiempo.

Los parámetros estudiados son, EMD, transformada de Fourier y densidad espectral de potencia. A continuación, se presentan los análisis de dos señales, de las 20 que se estudiaron, a las cuales no se les elabora una descripción para no hacer extenso el documento, sin embargo, se agregan en la sección de anexos.

Las condiciones de operación estable permiten el alojamiento de cargas que se manifiestan debido a la fatiga del rodamiento. Dichas fallas se encuentran ubicadas por debajo de la superficie donde se localiza la pista y los elementos rodantes. Y cuando estas fallas avanzan sus consecuencias se pueden observar en las grietas que se generan en la pista exterior, pese a lo anterior el ruido presenta aumento al igual que las vibraciones. Una vez en la falla de la pista interior del rodamiento comienza a incrementar el diámetro de la falla de la pista interior, debido a eso la falla se propaga rápidamente generando así contaminación en el lubricante y ocasionando sobrecargas ubicadas en la superficie de las pistas. Generalmente, la falla crece muy rápidamente produciendo una superficie rugosa en las pistas y en los elementos rodantes.

4 RESULTADOS

La técnica envolvente ahora es aplicada a los registros disponibles, razón por la cual se tomaron de una base de datos CWRU de falla en la pista donde se recopiló la información. Esto corresponden a señales de vibraciones para un rodamiento de bolas 6205-2RS JEM SKF, que fue instalado en un banco de pruebas en el que mediante acelerómetros se instaló un ancho de banda de hasta 5000 Hz. Donde se realizaron toma de muestras de los datos a una frecuencia de 12 kHz. El banco fue realizado por CASE WESTERN RESERVE y posee un motor de 2 Hp, un transductor/encondor de torque, un dinamómetro y controles electrónicos. El acelerómetro es ubicado en la posición centrada del apoyo.

Case Western Reserve realizaron experimentos para el rodamiento en el caso normal, falla en la jaula interior, falla en la jaula exterior y falla en el elemento rodantes. Los datos que se muestran a continuación son diámetros en pulgadas de las fallas que presentó el rodamiento en las diferentes pistas, interior, exterior y elemento rodante.

Diámetro interior del defecto de la pista: 0.007 "y 0.021".

Diámetro exterior del defecto de la pista: 0.007 "y 0.021".

Defecto de bola diámetro 0.028".

El eje gira a 1772, 1792, 1750 y 1730 RPM y los grados de severidad en la pista externa e interna son: Un primer grado para una falla de profundidad de 0,007", 0,014", 0,021", y un último grado de falla de 0,028".

DATOS SIN FALLA

En cada una de las señales se le cálculo mediana, desviación estándar, moda y kurtosis; donde la kurtosis es el parámetro que da una mejor estimación a la falla al rodamiento, en las siguientes tablas se evidencia los datos de algunas señales:

La Tabla 1 se realizó cargando las señales en Matlab donde se hizo el procesamiento de las señales y se seleccionó la primera EMD, se le realizó el cálculo de la kurtosis, moda, desviación estándar y mediana a diferentes cargas y revolución en condiciones normales es decir, sin tener falla el rodamiento. En el caso particular se muestra los resultados de la base de datos con rodamientos en estado normal, la kurtosis promedio $kurtosis = 2.6785$ será la referencia de criterio en la cual se predice que el rodamiento se encuentra en condiciones normales, ya por encima de este valor mencionado con antelación el rodamiento presentará una falla.

Tabla 1. Resultado Bases de datos Normales

--

Fuente: Autor

La siguiente tabla ilustra los cálculos de la BPFO, BPFI y FTF, realizados mediante el concepto teórico **COMPONENTES Y FRECUENCIAS DE FALLO DE UN RODAMIENTO**, en el cual se detalla el paso a paso de la ejecución y obtención de dichas magnitudes. La tabla 2 muestra los datos de frecuencia de deterioro para las diferentes pistas y elementos rodantes. El análisis se llevó a cabo en el dominio de frecuencias, en el cual el parámetro más usual es la amplitud del espectro a ciertas condiciones específicas. En el caso del rodamiento se pueden mencionar: la frecuencia de deterioro de la pista exterior (BPFO), la frecuencia de deterioro de la pista interior (BPFI), la frecuencia de deterioro de la jaula (FTF) y la frecuencia de deterioro de los elementos rodantes (BSF). Para otros modos de falla se deben considerar valores múltiplos de la velocidad de rotación del sistema, con sus respectivas frecuencias de bandas laterales. En el desarrollo de la presente investigación tan solo se consideran frecuencias hasta 4X, donde 4X nos indica que se toman los cuatros primeros armónicos fundamental, llamase BPFO, BPFI y FTF ya que ahí se encuentra la mayor información del rodamiento.

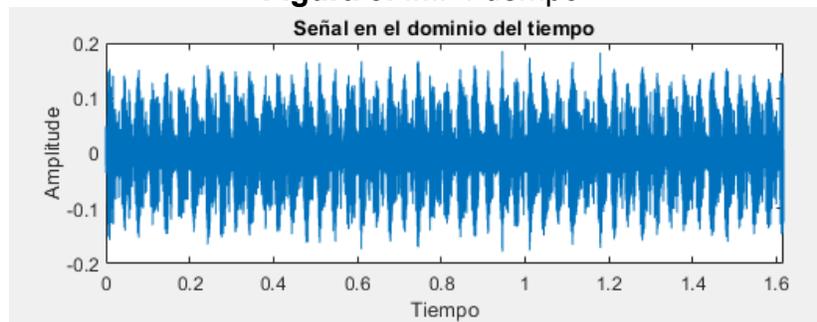
Tabla 2. BPFO, BPFI Y FTF

--

Fuente: Autor

En la simulación se realizó el análisis de las señales a las cuales se aplicó la EMD (descomposición de modo empírico), como se puede observar en las siguientes graficas en el dominio del tiempo. En la figura 9 se muestra en el dominio del tiempo la kurtosis, la moda, la desviación estándar y la mediana, nos da un indicio de que el rodamiento está presentando fallas, pero su espectro en el dominio del tiempo como se muestra en la figura anterior, no se hace visible el lugar donde se presenta la falla del rodamiento es decir, la frecuencia de fallo y la amplitud, por tanto, es necesario analizar la señal a partir del dominio de la frecuencia para ver las amplitud de los armónicos de la BPFO, BPF1 y FTF.

Figura 9. IMF1 tiempo

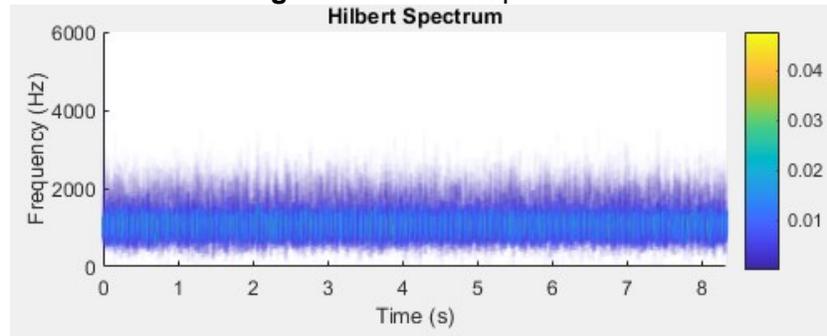


Fuente: Autor

En la figura 10 se analizó la señal con el espectro de Hilbert. La transformada de Hilbert-Huang, que se encarga de realizar una combinación de los análisis propuestos por Hilbert y la partición en Modos Empíricos (DME), ideada por Norden Huang, se diseñó con la intencionalidad de analizar datos no lineales y no estacionarios, consiste en expandir la serie temporal en modos de base derivados de los propios datos (Funciones de Modos Intrínsecos, IMF) por medio de un algoritmo de DME para posteriormente aplicar la transformada de Hilbert y de esta manera por dar una aproximación de la distribución Tiempo-Frecuencia-

Energía, denominada Espectro de Hilbert. La cual permite identificar el espectro normal del rodamiento que no presenta ninguna alteración.

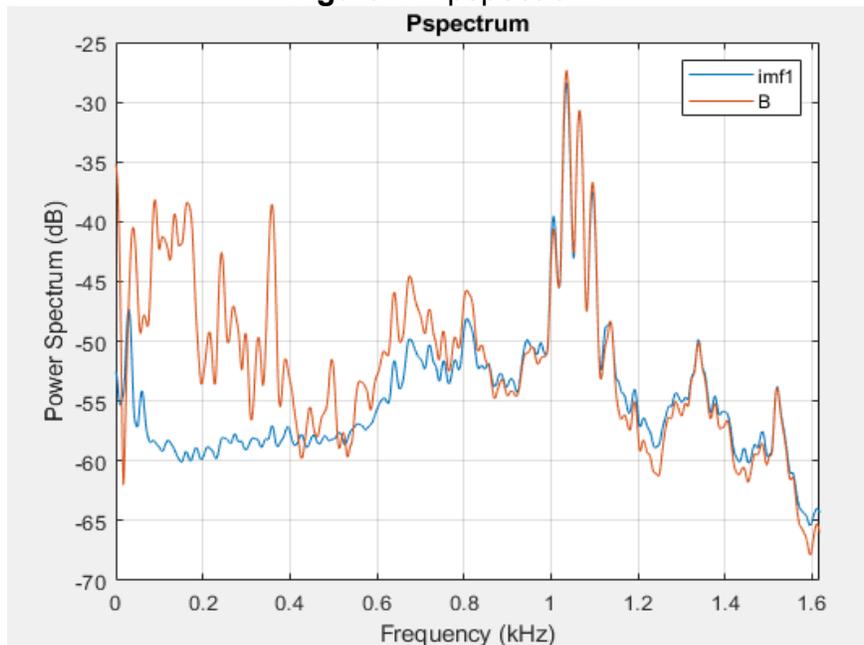
Figura 10. Hilbert Spectrum



Fuente: Autor

Luego de analizar todas las señales en el dominio del tiempo, se procedió a hacer un análisis con las señales en el dominio de la frecuencia, en donde a cada señal se le realizó el pspectrum. Durante este proceso a la imf1 de la EMD se le aplicó PSD para analizar la señal en el dominio de la frecuencia, dando como resultado la imagen que se muestra en la Figura 11, donde la señal naranjada denominada B es la obtenida de las bases de datos y es filtrada por una EMD que se encarga de quitar ruido y distorsión presentes en la señal, ya que en el medio donde se tomaron los datos hubo perturbación. Por otra parte, la imf1 es la señal ya procesada, sin perturbación. Posteriormente se le realizó el procesamiento en dominio temporal y dominio de la frecuencia.

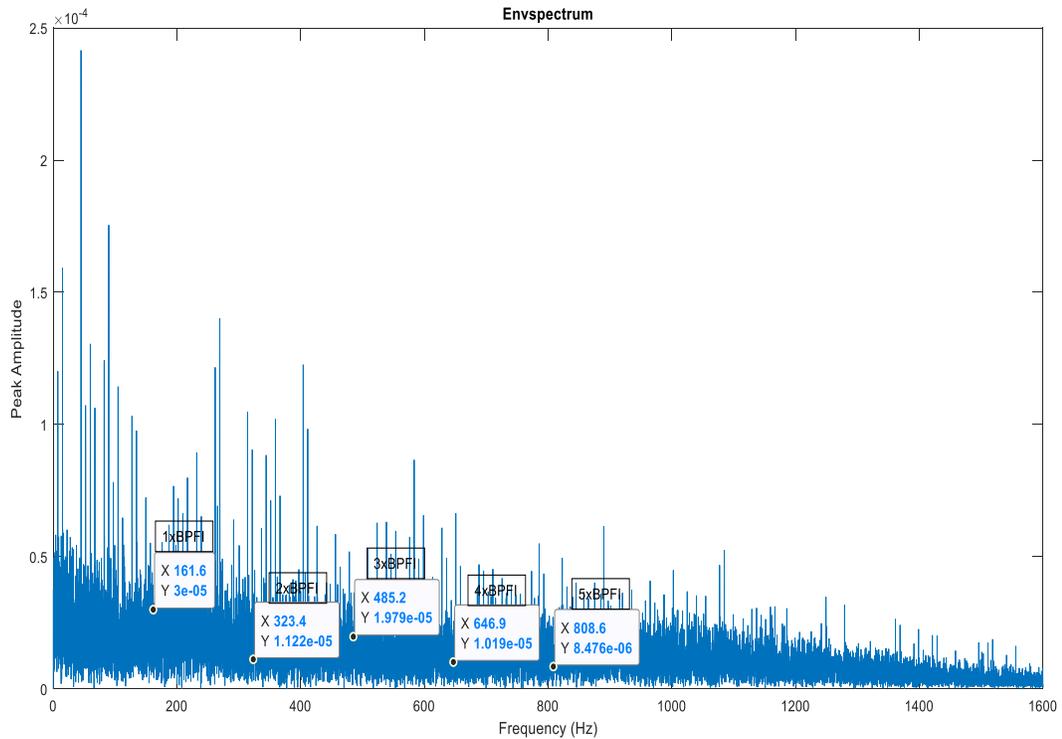
Figura 11. pspectrum



Fuente: Autor

En la Figura 12 se evidencia la envolvente de la imf1 señal 0hp a 1797 rpm sin falla. La amplitud de la señal es muy pequeña (alrededor de $3 * 10^{-5}$ volt rms) por tanto, a partir de este patrón se establece base para estimar el valor del rodamiento bueno. Por la cual se observó que la señal con los diferentes picos de armónicos, donde se detallan los diferentes cambios de la frecuencia.

Figura 12. Envoltente envspectrum



Fuente: Autor

En la Tabla 3 se enlistan los datos de los rodamientos normales, en donde la amplitud de promedio $P_{promedio} = 113,9 \times 10^{-6} V_{rms}$ será la referencia de criterio para el rodamiento que se encuentra en condiciones normales. Las amplitudes que se muestran en la Tabla 3 fueron medidas en tensión rms.

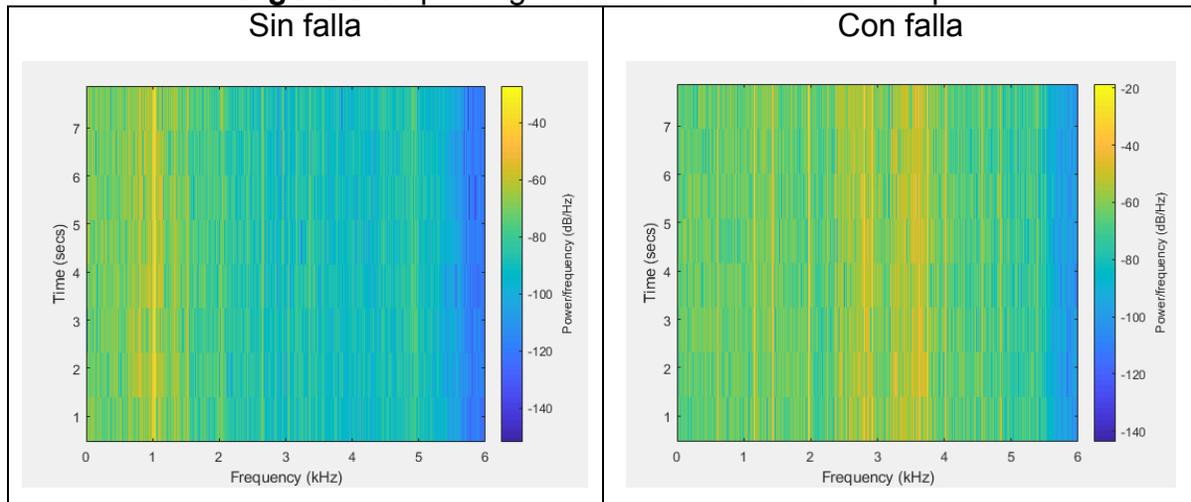
Tabla 3. BPFi en condiciones normales a 0HP y 1797 rpm

--

Fuente: Autor

En la Figura 13 se muestra el espectrograma de un rodamiento bueno, indicando su aspecto en condiciones normales, donde el color amarillo revela la cantidad de potencia que está concentrada y por tanto se transforma en calor. Esto se analiza en función del tiempo y la frecuencia en donde está concentrada la falla.

Figura 13. Spectrogram de señales a 0HP 1797rpm



Fuente: Autor

DATOS CON FALLA

En las Tablas 4, 5, 6 y 7 se muestra como la kurtosis promedio paso por encima de la $kurtosis = 2.6785$, esto nos indica que el rodamiento ya presenta una falla en la pista interior. También se observa cómo se incrementa la $kurtosis$ en diferente diámetro de falla en la pista interior, partiendo de esto se obtiene un criterio para la evaluación de rodamiento en condiciones normales y cuando presenta falla.

Tabla 4. Falla con diámetro de $7 \times 10^{-3} in$

--

Fuente: Autor

Tabla 5. Falla con diámetro de $14 \times 10^{-3} in$

--

Fuente: Autor

Tabla 6. Falla con diámetro de $21 \times 10^{-3} in$



Fuente: Autor

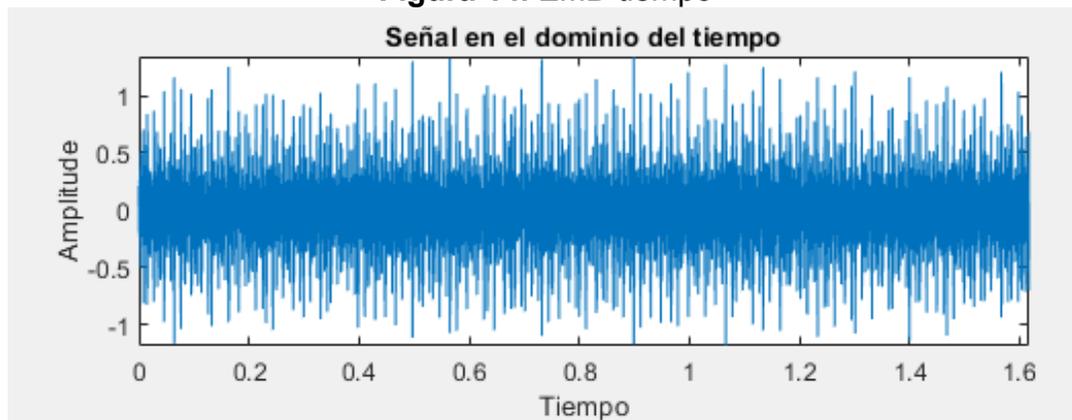
Tabla 7. Falla con diámetro de $28 \times 10^{-3} in$



Fuente: Autor

En la Figura 14 se analizó la señal con el espectro de Hilbert, la cual muestra el espectro de la señal que se encuentra con falla.

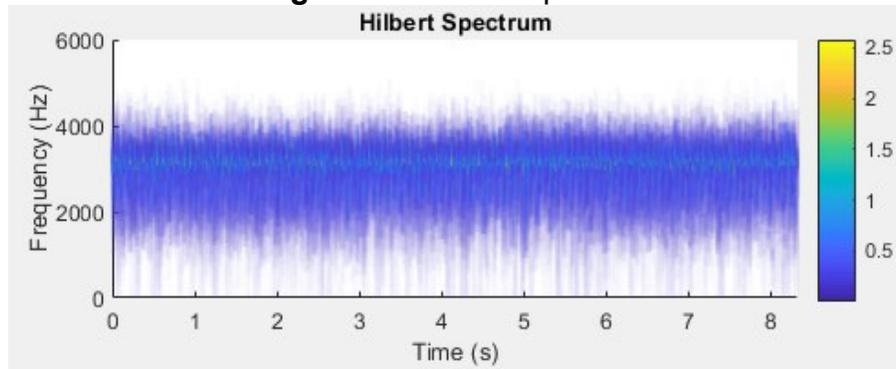
Figura 14. EMD tiempo



Fuente: Autor

Ya analizada todas las señales en el dominio del tiempo, se analizará las señales en el dominio de la frecuencia, donde cada señal se realizó pspectrum.

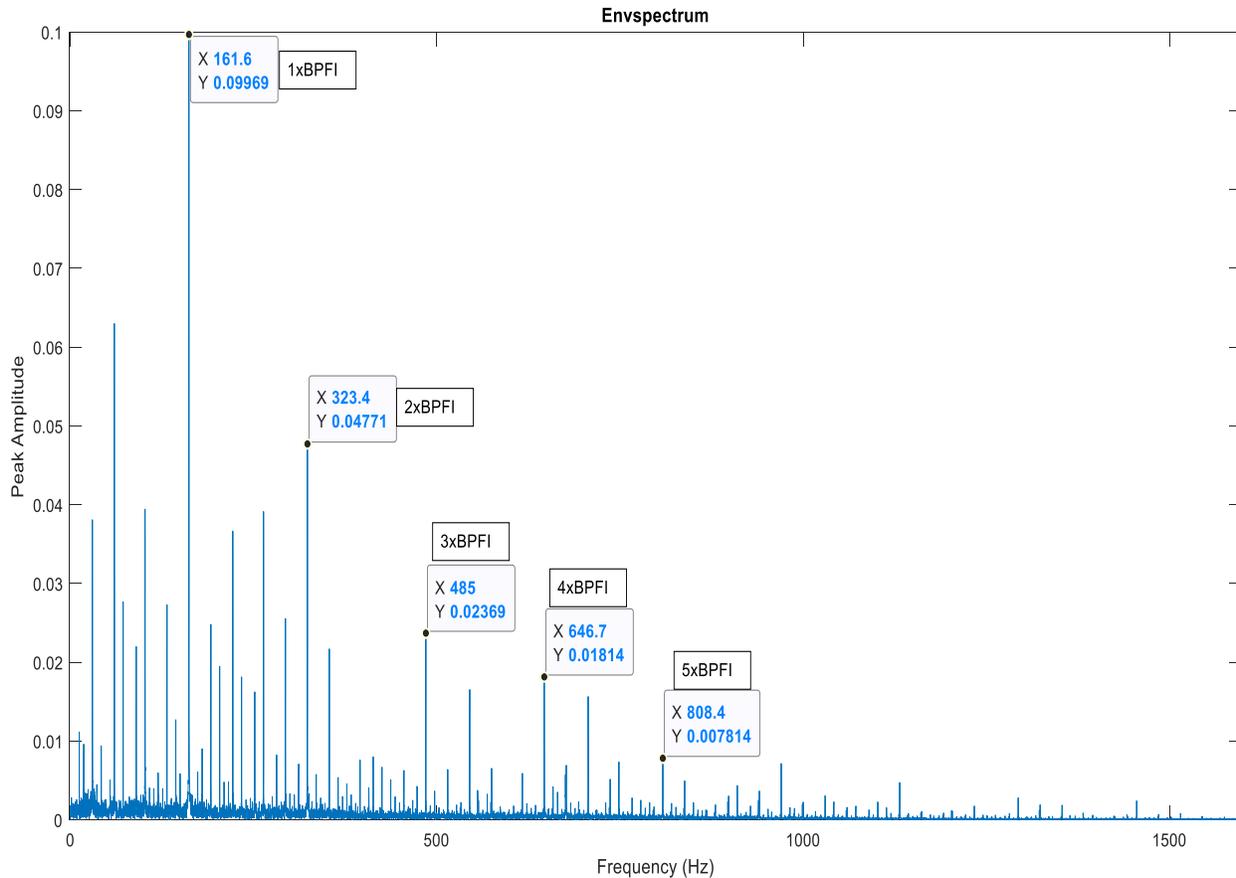
Figura 15. Hilbert Spectrum



Fuente: Autor

La envolvente de la imf1 señal 0hp a 1797 rpm con falla se muestra en la Figura 16, donde el pico de la amplitud de la señal esta alrededor de la frecuencia 161.6 Hz, razón por la cual comparando el pico de la amplitud de la señal sin falla (Figura 12) con la de falla (Figura 16) ha aumentado 1000 veces en comparación con los datos normales. Donde se puede notar que los valores que alcanzan es mucho mayores que las de los casos del sistema normal. Esto implica que el valor RMS se espera que sea mucho mayor en estos casos en rodamiento con falla, en comparación con el rodamiento normal, y por de igual modo, es esperable que sea un parámetro determinante de este tipo de falla en particular dada en la pista interior. Además, se evidencia también un peak predominante en 1X, o que es característico para este tipo de modalidad de falla. Esto sugiere la importancia de este valor a la hora de identificar este modo de falla en particular.

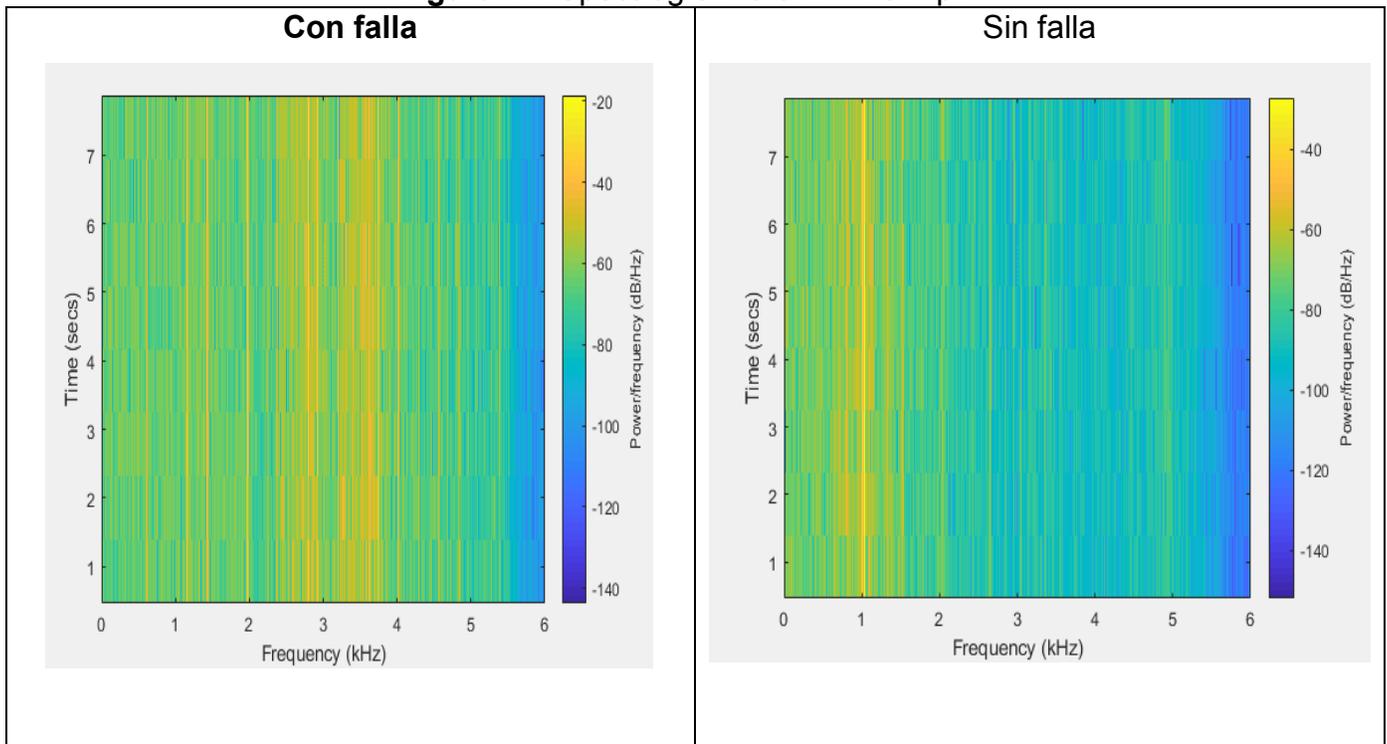
Figura 166. Envoltente envspectrum



Fuente: Autor

En la Figura 17 se detalla la comparación tiempo y frecuencia utilizando envspectrum. En el dominio temporal se visualiza el mismo espectro durante todo el transcurso del tiempo, mientras que en el dominio de la frecuencia se presenta los diferentes armónicos y la amplitud en cada una. En este análisis se presentaron más franjas amarillas alrededor de 2kHz y 4kHz, lo cual demuestra que el rodamiento presenta una falla, debido al aumento el calor en otra zona o debido a la falla que está presentando el rodamiento en la pista interior.

Figura 17. Spectrogram a 0HP 1797 rpm



Fuente: Autor

En las tablas 8, 9, 10 y 11 se muestran como la potencia promedio fue incrementando valor en comparación con los datos normales.

Tabla 8. Carga con diámetro de $7 \times 10^{-3} in$

--

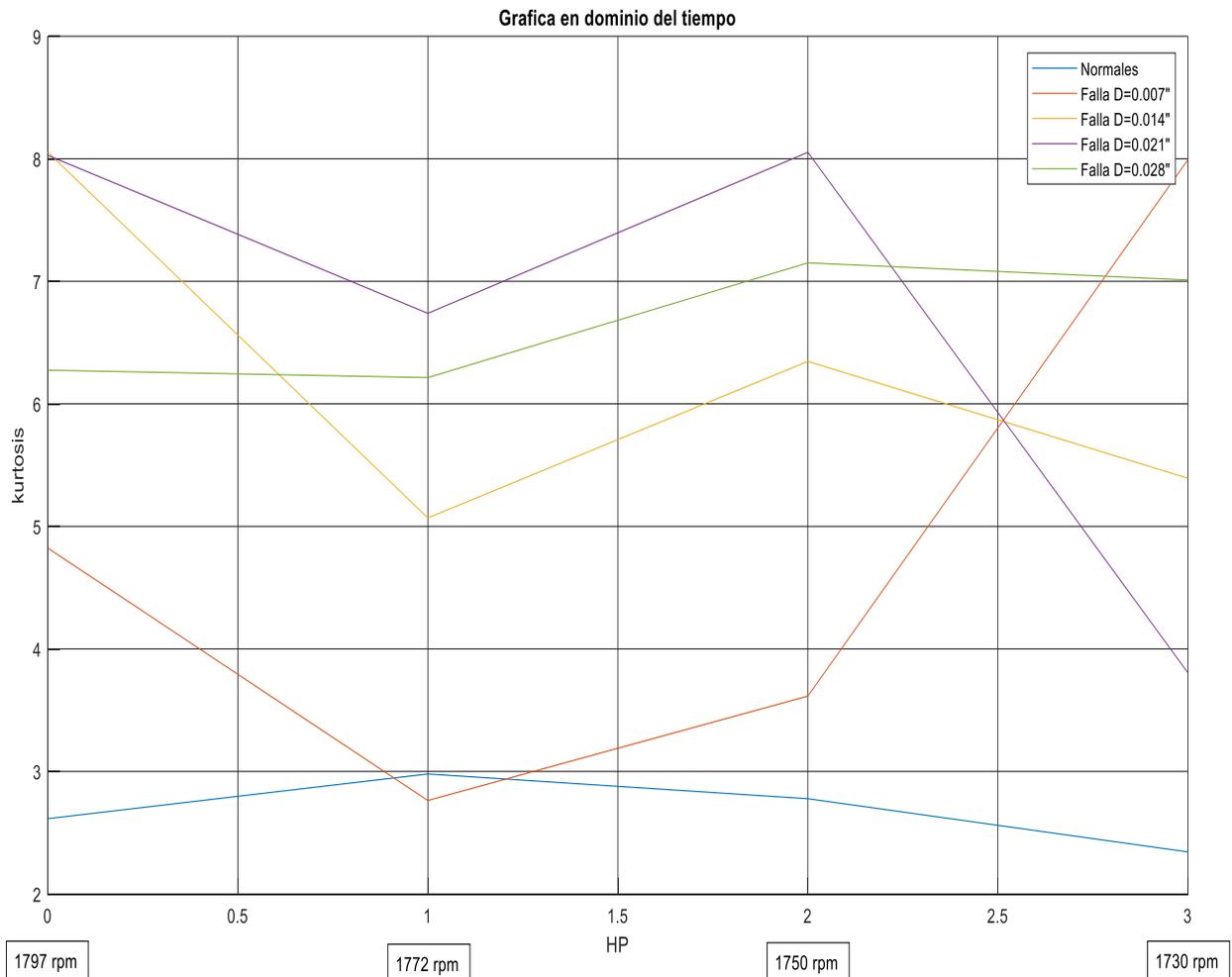
Fuente: Autor

Tabla 9. Carga con diámetro de $14 \times 10^{-3} in$ **Fuente:** Autor**Tabla 10.** Carga con diámetro de $21 \times 10^{-3} in$ **Fuente:** Autor**Tabla 11.** Carga con diámetro de $28 \times 10^{-3} in$ **Fuente:** Autor

En la Figura 18 se graficó la kurtosis a diferentes caballos de fuerza y cada revolución por minuto, los datos normales y los datos con los diferentes diámetros

de falla que son: $7 \times 10^{-3} in$, $14 \times 10^{-3} in$, $21 \times 10^{-3} in$ y $28 \times 10^{-3} in$. en donde la kurtosis fue aumentado a medida que la falla del rodamiento fuera más grande. Es decir que los datos normales que están de color azul el rodamiento esta bueno, el naranja es aceptable, el amarillo es tolerable, el morado es excesivo y verde es extremo, de modo que, a partir es esto se obtiene un criterio de evaluación de rodamiento en el dominio temporal, este criterio es válido entre 1797 a 1720 rpm.

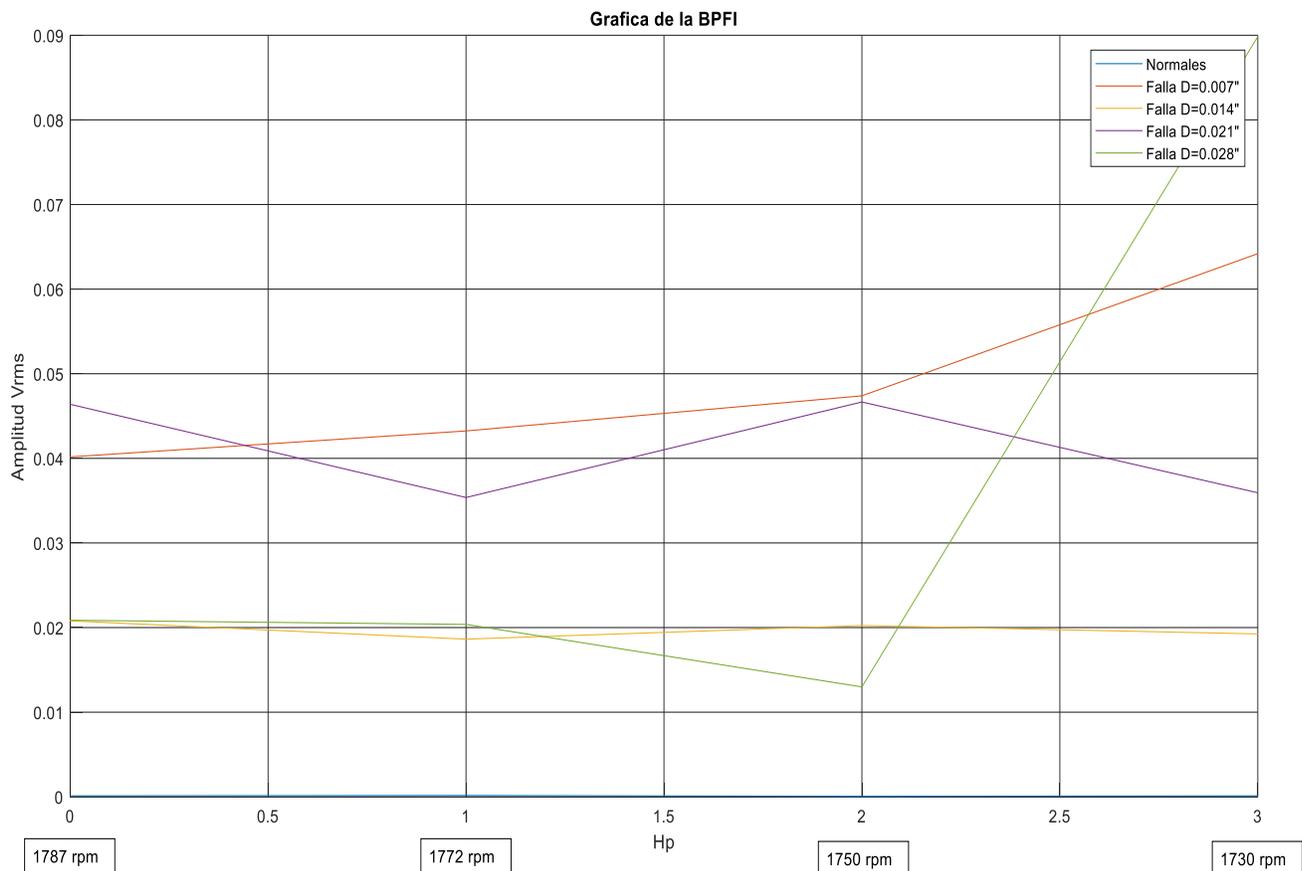
Figura 18. Grafica en dominio del tiempo, Hp vs Kurtosis



Fuente: Autor

En la Figura 19 se graficó la BPFi a diferente caballo de fuerza y cada revolución por minuto, esto datos se encuentra graficado la amplitud promedio de los datos normales y los datos con los diferentes diámetros de falla que son a 0.007', 0.014', 0.021' y 0.028' donde la BPFi fue incrementado a medida que diámetro de la falla fuese mayor. Es decir que los datos normales que están de color azul el rodamiento esta bueno, el naranja es aceptable, el amarillo es tolerable, el morado es excesivo y verde es extremo, por lo cual tenemos un criterio de evaluación de rodamiento en dominio de la frecuencia.

Figura 19. Graficas de la BPFi, HP Vs Amplitud V_{rms}



Fuente: Autor

Como resultado del proyecto de grado obtuvieron los parámetros y señales en el dominio del tiempo y de la frecuencia, con los cuales se pudo definir cuáles de ellos son útiles para determinar el estado del rodamiento, de modo que pueden servir como base para realizar el diagnóstico y obtener el grado de severidad de la falla.

Se aporta un plan sostenible sobre el análisis de fallas en los rodamientos mediante el método EMD, esto se realizó para brindar una sostenibilidad en los mantenimientos de los equipos que son sometidos esta clase de prueba.

Se entregó una metodología que permite proyecciones referentes al análisis de fallas en los rodamientos, detallando la causa raíz del problema presentado por el equipo intervenido en determinado tiempo, establecido por la persona encargada de realizar los tipos de mantenimiento. Se realizaron análisis específicos de todo el proceso de investigación, antes de iniciar con el proyecto. Con los integrantes del grupo de trabajo, se planteó la metodología que se utilizó en todo el desarrollo y se tomaron estrategias, como lluvias de ideas, para complementar toda la estructura, en base al tema que es, análisis de fallas para equipos rotativos.

Dentro de las señales analizadas, se encontraron fallas a diferentes diámetros, cada una con un promedio de potencia en Watts, en donde se identificaron los rangos establecidos para cada tipo de falla (en buen estado, falla leve, media y grave), a partir de la BPF1, la cual permitió conocer la frecuencia a la cual tiende a fallar el rodamiento, obteniendo de la misma un promedio para establecer dichos rangos.

Posteriormente, se llevó a cabo la medición de la potencia en el BPF1 para cada señal, además de los siguientes cuatro múltiplos de la BPF1 de cada señal, con el fin de hallar el promedio de estas. Descotando la relevancia de la PPW, la cual fue escogida como parámetro de diagnóstico para el análisis de vibraciones en rodamientos.

5 CONCLUSIONES

Se efectúa la estructuración de un proyecto investigativo en el que se indica un análisis de vibraciones en rodamientos, implementando la descomposición de modo empírico como una herramienta en la mejora en los niveles de confiabilidad, lo cual deriva con la adquisición de variables definidas con la presencia de fallas en los equipos por la falta de mantenimientos preventivos que ayuden a minimizar las paradas no programadas, caducidad de la vida útil de los equipos e inclusive riesgos en el operador.

EMD ha ofrecido un método poderoso para el análisis de datos no lineal y no estacionario. Especialmente, los componentes del IMF producidos por el método EMD son generalmente físicos. Sin embargo, la aritmética de la media local con el método envolvente lleva mucho tiempo.

En este documento, la media de envoltura convencional se sustituye por la media promedio y el método EMD mejorado se aplica en el análisis de vibración de los rodamientos de bolas. En comparación con el método tradicional, como el análisis discreto de wavelets, el método EMD mejorado es adaptativo, ortogonal y completo. Usando el método EMD mejorado, la vibración de cumplimiento y la vibración debida a las irregularidades de la superficie se separan con éxito. En particular, EMD ha proporcionado un nuevo método para el diagnóstico de defectos de los rodamientos.

En primer lugar, la señal de vibración se descompone en bandas de frecuencia diferenciadas con escala de tiempo. Y luego, aplicando la transformada de Hilbert a uno de los componentes, se obtiene el espectro envolvente, por el cual es



posible hacer un diagnóstico del defecto, sin embargo, en esta investigación se dedujo que la potencia promedio en Watts, es el parámetro más adecuado para su implementación.

6 RECOMENDACIONES

Como recomendación, se sugiere utilizar el análisis espectral de potencia e implementar un filtro para mejorar su resolución y limpiar los armónicos, en caso de hacer uso de la EMD.

No es recomendable hacer el análisis de estas señales en el dominio del tiempo, ya que no se conocerá con precisión las causas de la falla, los datos no podrán ser definidos para un diagnóstico, pero nos puede dar un pronóstico que el rodamiento esta bueno o está presentando falla, por medio de la kurtosis y la desviación estándar. Por lo cual en análisis de señales del espectro en dominio temporal presenta una uniformidad igual a diferencia en el dominio de la frecuencia que podemos ver los espectros de cada armónico que producen picos en la falla identificada; estos picos representan la falla indicada.

Finalmente, este estudio investigativo se deja como una guía metodológica para futuras investigaciones que estén orientadas en este campo del saber, que puedan encontrar en este un soporte al momento de realizar los procedimientos aquí sugeridos, se enfatiza a los estudiantes que hagan uso de esta información la importancia de realizar un buen manejo de la misma, de igual forma se resalta que el proceso solo podrá ser efectivo en la medida en que se apliquen rigurosamente el pasos a paso establecido en el desarrollo de este trabajo, realizando una correcta implementación de los métodos aquí plasmados, destacando la importancia del análisis objetivo de los datos, y de esta forma contribuir, a la generación de conocimiento a partir de la ejecución adecuada de los procedimientos aquí formulados.



Se recomienda el uso de la potencia promedio en Watts (PPW), ya que permite hacer más apreciable la señal de la frecuencia en Watts desde la escala lineal, ya que se evidencian los pulsos con mayor magnitud donde se presentan las fallas. Permitiendo la observación detallada del caso.

7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

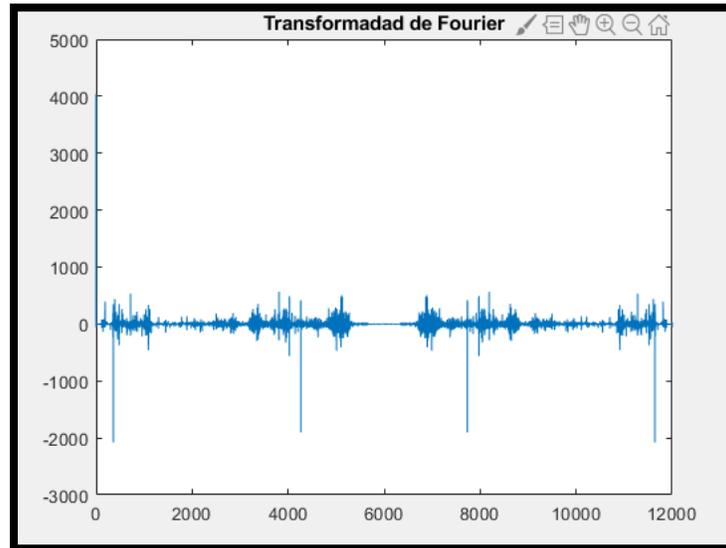
- Alvares, A. (2013). *Análisis de fallas de una máquina extrusora de electrodos*. Colombia.
- Cadena, H. (2011). *Descripción y análisis de fallas presentadas en sellos mecánicos de bombas centrifugas*. Mexico.
- Diaz, S. (2008). *Automatización del análisis de modos de fallas y efectos FMEA en la ingeniería de mantenimiento aplicado a la industria*. Colombia.
- Estévez, J., & de Lázaro, J. M. (2019). Análisis de los rodamientos usados en electro-ventiladores del sistema de refrigeración de motores Hyundai. *Ingeniería Mecánica*, 22(2), 85-91.
- Flandrin, P., Rilling, G., & Goncalves, P. (2004). Descomposición en modo empírico como banco de filtros. *Cartas de procesamiento de señal IEEE*, 11(2), 112-114.
- Galgano, A. (1995). *Los siete instrumentos de la calidad total*. Madrid: Dias de santos.
- García, A. (2000). *Análisis de fallas y desarrollo de planes específicos de mantenimiento para equipos del área de procesos del complejo*. Colombia.
- García, J. (2007). *Modelo de mantenimiento centrado en confiabilidad para las vibrocompactadoras de ánodos verdes*. Venezuela: Universidad Simón Bolívar, U.S.B.
- Huang, N. E., Wu, M.-L., & Long, S. (2003). Límite de confianza para la descomposición en modo empírico y el análisis espectral de Hilbert. *Proceedings of the Royal Society of London A* 459, 2317-2345.
- Marcano, C. (2012). *Implementación del sistema de gestión de mantenimiento en productos EFE, S.A. Planta Chacao*. Sartenajas: Universidad Simón Bolívar, U.S.B.

- Méndez Gamboa, M. A. (2008). *Análisis de confiabilidad utilizando modelos de componentes genéricos y matrices de propagación de fallas*. México: Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, C.N.I.D.T.
- NTC-14001. (2004). *Sistema de gestion ambiental*. Colombia.
- NTC-ISO 14001. (2015). *Sistema de gestión ambiental, requisitos con orientación parra su uso*. Colombia : Norma Tecnica Colombiana, N.T.C.
- NTC-ISO 14224. (2016). *Recopilación e intercambio de datos sobre fiabilidad y mantenimiento d elos equipos*. Colombia: Norma Técnica Colombiana, N.T.C.
- NTC-ISO 9001. (2008). *Sistema de la gestión de la claidad, Objetivo y campo de la aplicacion*. Colombia: Norma Técnica Colombiana, N.T.C.
- Ordoñez, C. E. (2017). *procesamiento de señales de vibración mediante Descomposición Modal Empírica (EMD) para la extracción de características con fines de diagnóstico de fallos en maquinaria rotativa*. Cuenca, Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana.
- Oshas-18001. (2007). *Sistema de gestion en seguridad y salud ocupacional*. Colombia.
- Otero, J., & Torres, R. (2010). *Analisis de modos de falas, efectos y criticidad (FMECA) para la planeacion del mantenimiento empleando criterios de riesgos y confiabilidad*. Mexico.
- Palomares, R. (1992). *Teorias de fallas y sus aplicaciones*. España.
- Paulino Arévalo, J. M. (2012). *El análisis de confiabilidad como heramienta para optimizar la gestión del mantenimiento preventivo de los equipos de la línea de flotación en un centro minero*. Perú: Universidad Nacional de Ingeniería, U.N.I.
- power-mi*. (8 de Junio de 2017). Obtenido de www.power-mi.com: <https://power-mi.com/es/content/componentes-y-frecuencias-de-fallo-de-un-rodamiento>

- power-mi*. (9 de Junio de 2017). Obtenido de www.power-mi.com: <https://power-mi.com/es/content/defectos-t%C3%ADpicos-en-rodamientos-y-su-identificaci%C3%B3n-espectral>
- Ramírez, C. R., & Montejo, L. A. (2011). Transformada de Hilbert, descomposición modal empírica y sus aplicaciones en el análisis de vibraciones libres. *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, 11(2).
- researchgate*. (Octubre de 2017). Obtenido de www.researchgate.net: https://www.researchgate.net/publication/320448562_Aplicacion_del_metodo_de_Hilbert-Huang_a_senales_biologicas_en_el_campo_de_la_neurologia_descripcion_y_aspectos_metodologicos
- Rodriguez, H. (2014). *Análisis de modos y efectos de falla para mejorar la disponibilidad operacional en la línea de producción de gaseosas*. Bogotá: Universidad Libre de Colombia, U.L.C.
- Rodríguez, J. G. (2009). *Aplicación del método shock pulse para detección de defectos en rodamientos*. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid.
- Ruiz Acevedo, A. (2012). *Modelo para la implementación de mantenimiento predictivo en las facilidades de producción de petróleo*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, U.I.S.
- Santhana, R. A., & Murali, N. (2013). Morlet Wavelet UDWT Denoising y diagnóstico de falla de rodamientos basado en EMD. *ELECTRONICS*, 17(1), 1-8.
- Tandon, N., & Choudhury, A. (1999). Una revisión de los métodos de medición de vibración y acústica para la detección de defectos en el rodamiento de elementos rodantes. *Tribology International*(32), 469-480.

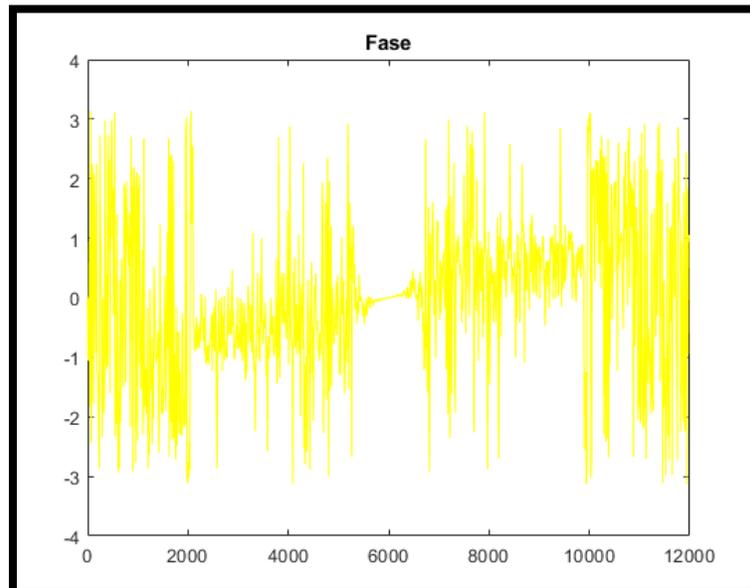
8 ANEXOS

Anexo A. Transformada de Fourier



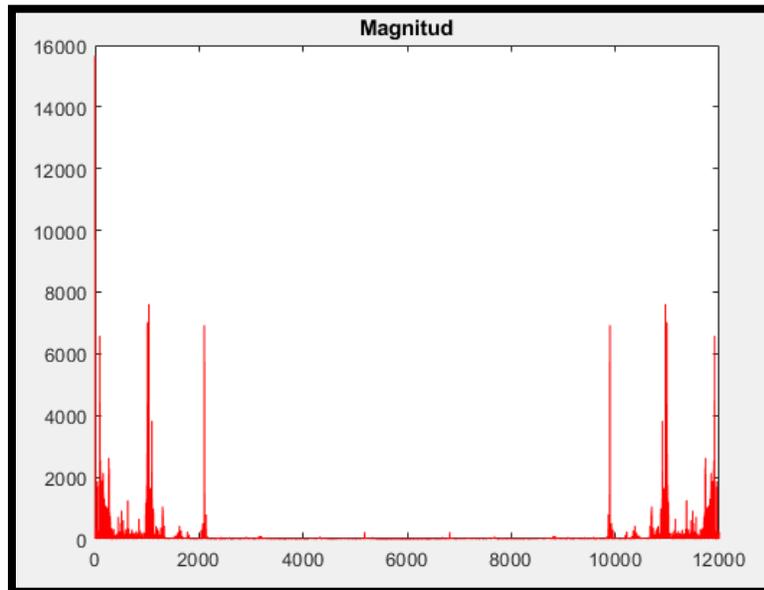
Fuente: Autor

Anexo B. Fase de la transformada de Fourier



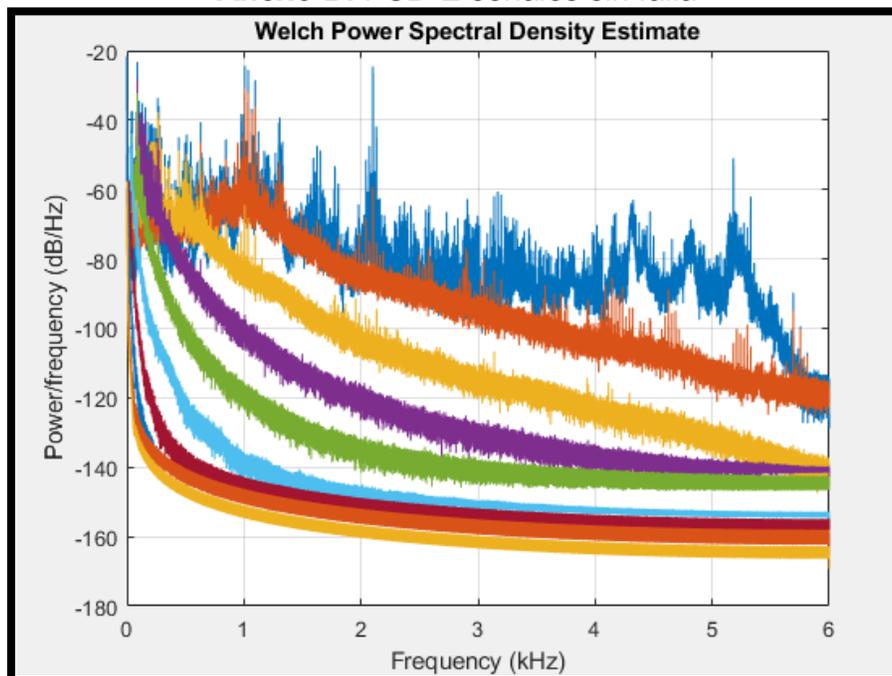
Fuente: Autor

Anexo C. Transformada de Fourier de la señal sin falla



Fuente: Autor

Anexo D. PSD-E señales sin falla



Fuente: Autor

Anexo E. Cálculo de las variables en rodamiento con falla a 0.014”

Bases de datos con falla con diferente rodamiento pista interior				
Diametro=0.014"				
	Kurtosis	Moda	Desviación estándar	Mediana
Carga=0hp 1797rpm	4,993	-0,0995	0,0638	0,005
Carga=1hp 1797rpm	3,4267	-0,0505	0,0325	-6,29E-05
Carga=2hp 1797rpm	7,044	-0,0793	0,0265	-0,0015
Carga=3hp 1797rpm	6,4935	-0,1392	0,0497	5,80E-04
Promedio	5,4893	-0,092125	0,043125	0,00100423

Fuente: Autor

Anexo F. Cálculo de las variables en rodamiento con falla a 0.021”

Bases de datos con falla con diferente rodamiento pista interior				
Diametro=0.021"				
	Kurtosis	Moda	Desviación estándar	Mediana
Carga=0hp 1797rpm	4,6329	-0,0033	0,0268	0,0085
Carga=1hp 1797rpm	3,4717	-0,0306	0,0133	-0,0029
Carga=2hp 1797rpm	3,5522	-0,0534	0,0192	-0,0066
Carga=3hp 1797rpm	6,0475	-0,1125	0,0338	-0,0128
Promedio	4,426075	-0,04995	0,023275	-0,00345

Fuente: Autor