



IDENTIFICACIÓN DE LOS DESCRIPTORES APROPIADOS PARA EL ANÁLISIS DE VIBRACIÓN EN LA DETECCIÓN DE FALLAS EN MAQUINARIA ROTATIVA.

Fabio Alfonso Pineda Floréz

Jolvis Ernache Criado

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Programa de Ingeniería Electromecánica

Bucaramanga, Colombia

2020

IDENTIFICACIÓN DE LOS DESCRIPTORES APROPIADOS PARA EL ANÁLISIS DE VIBRACIÓN EN LA DETECCIÓN DE FALLAS EN MAQUINARIA ROTATIVA

Fabio Alfonso Pineda Floréz

Jolvis Ernache Criado

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniero Electromecánico

Director:

MSc. Camilo Leonardo Sandoval

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Programa de Ingeniería Electromecánica

Bucaramanga, Colombia

2020

A Dios por la oportunidad de formación. A mis padres Luis Alfonso y Beatriz por su apoyo incondicional, por su amor, y sus palabras de aliento, porque siempre estuvieron presentes en mi educación. A mi esposa Cindy a mis hijos Sebastián y Gabriel por su compañía y aliento porque creyeron en mi para seguir y lograr esta meta. A mis hermanos y demás familiares porque estuvieron pendiente de verme crecer y así ser ejemplo en ellos.

Fabio Alfonso Pineda Floréz

Quiero expresar un sincero agradecimiento, en primer lugar, a Dios por brindarme vida, salud, fortaleza y capacidad; para luchar por cada objetivo. A mi padre Víctor Manuel (Q.E.P.D), de él herede la pasión por el trabajo y estudio, así como la actitud para hacer las cosas de la mejor manera, a mi madre Blanca Oliva y mis hermanos, por ser motivación desde las etapas tempranas de mi vida. A mi esposa Noriela, a mis hijos Nicoll y Juan David, por comprenderme, apoyarme y acompañarme en la realización de este bonito sueño.

Jolvis Ernache Criado

Agradecimientos

Los autores expresan sus agradecimientos a:

El Ingeniero Mecánico Camilo Leonardo Sandoval, por su apoyo y continua motivación, nos proporcionó más confianza en nuestro trabajo y en nuestras habilidades, para completar este proyecto de investigación con éxito.

Los docentes de la facultad de ingeniería electromecánica de la Universidad Antonio Nariño sede Bucaramanga por compartir de forma desinteresada sus conocimientos y enseñanzas, contribuyendo al crecimiento de nuestra vida académica y personal.

A la Ingeniera Indira Cassaleth Garrido por su apoyo, acompañamiento y gran cariño, siempre presente en cada etapa de nuestro proceso de pregrado.

***Fabio Alfonso
Jolvis***

Resumen

Es la detección y diagnóstico de fallas, una condición importante para prevenir el deterioro de los equipos rotativos evitando de esta manera que se afecte la salud de los mismos y su operatividad. El presente proyecto de grado está enfocado en la identificación de los descriptores apropiados para el análisis de vibración en la detección de fallas en máquinas rotativas, realizando una revisión bibliográfica de tres proyectos de pregrado de la universidad Antonio Nariño sede Bucaramanga, que cumplieron con los requerimientos para la obtención de datos que fueron analizados, caracterizados y comparados para extraer los descriptores significativos.

Varias tecnologías se han empleado para la caracterización de señales de vibración para diagnosticar anomalías como desbalanceo y desalineación, no obstante, es posible analizar su comportamiento a través de la transformada de Wavelet y la familia coiflet, symlet y daubechies, logrando graficar caracterizar y diferenciar visiblemente cada frecuencia, utilizando una herramienta matemática como MATLAB, asimismo, los registros en el software LabVIEW arrojaron los datos requeridos, los cuales han sido investigados y plasmados por los autores de los proyectos propuestos.

Después de evaluar, caracterizar y validar los datos en estudio, finalmente se concluyó que los descriptores RMS, PICO y ENERGIA son los más relevantes en los estudios realizados. siendo RMS-ENERGIA los descriptores más significativos con un porcentaje de 78,9% en sus combinaciones, obteniendo valores elevados en la familia de las Wavelets SYMLET de cuarto orden, dando cumplimiento a los objetivos propuestos en esta investigación.

Palabras claves: Transformada Wavelet, MATLAB, LabVIEW, desbalanceo, desalineación, descriptores, maquinas rotativas.

Abstract.

It is the detection and diagnosis of failures, an important condition to prevent the deterioration of rotating equipment, thus preventing its health and its operation from being affected. The present degree project is focused on the identification of the appropriate descriptors for the analysis of vibration in the detection of faults in rotating machines, carrying out a bibliographic review of three undergraduate projects of the Antonio Nariño University based in Bucaramanga, which met the requirements to obtain data that were analyzed, characterized and compared to extract significant descriptors.

Various technologies have been used to characterize vibration signals to diagnose abnormalities such as imbalance and misalignment, however, it is possible to analyze their behavior through the Wavelet transform and the coiflet, symlet and daubechies family, managing to graph characterize and Visibly differentiate each frequency, using a mathematical tool such as MATLAB, also, the records in the LabView software yielded the required data, which have been investigated and captured by the authors of the proposed projects.

After evaluating, characterizing and validating the data under study, it was finally concluded that the RMS, PICO and ENERGY descriptors are the most relevant in the studies carried out. RMS-ENERGIA being the most significant descriptors with a percentage of 78.9% in their combinations, obtaining high values in the. Family of fourth order SYMLET Wavelets, fulfilling the objectives proposed in this research.

Keywords: Wavelet transforms, MATLAB, LabView, unbalance, misalignment, descriptors, and rotary machines.

Contenido

	Pág.
Resumen.....	IX
Abstract.....	X
Contenido.....	XI
Lista de figuras.....	XIII
Lista de tablas.....	XIV
Lista de graficas.....	XV
Introducción.....	1
1. Planteamiento del problema.....	3
2. Objetivos.....	5
2.1 Objetivo general.....	5
2.2 Objetivos específicos.....	5
3. Marco teórico.....	7
3.1 Vibraciones.....	7
3.1.1 Tipos de vibraciones.....	8
3.2 Análisis de vibraciones.....	14
3.2.1 Tipos de análisis de vibraciones.....	15
3.2.2 Métodos de análisis.....	16
3.3 Daños encontrados en un análisis vibracional.....	20

3.3.1	Desbalanceo.....	21
3.3.2	Desalineación.....	24
3.3.3	Procedimiento para categorizar fallas.....	26
3.4	Maquinas rotativas.....	27
3.4.1	Control de máquinas rotativas	28
3.5	Software LabVIEW.....	28
3.6	Software Matlab	30
3.7	Transformada de Fourier.....	31
3.8	Transformada de Wavelet.....	32
4.	Metodología	35
4.1	Selección de datos	35
4.2	Caracterización y análisis.....	38
4.3	Presentación de resultados	38
5.	Análisis y caracterización de los resultados.....	39
5.1	Resultado y Análisis.	39
5.1.1	Proyecto 1.....	39
5.1.2	Proyecto 2.....	42
5.1.3	Proyecto 3.....	44
5.3	Análisis de resultados.....	55
6.	Conclusiones y recomendaciones	57
6.1.	Recomendaciones	58
A.	Anexo: Resultados de las pruebas proyecto 1	59
B.	Anexo: Resultado de pruebas proyecto 2.....	81
	Bibliografía	91

Lista de figuras

	Pág.
Figura 3-1. Vibración simple.....	8
Figura 3-2. Señal sinusoidal.....	9
Figura 3-3. Señal compuesta de vibración.....	9
Figura 3-4. Valor secuencial e la señal.....	10
Figura 3-5. Golpeteo intermitente.....	11
Figura 3-6. Señal de modulación de onda.....	12
Figura 3-7. Señal de vibración simple	13
Figura 3-8. Valores de amplitud	13
Figura 3-9. Grafica de la fase.....	14
Figura 3-10. Dominio del tiempo y dominio de la frecuencia.....	18
Figura 3-11. Dominio del tiempo y dominio de la frecuencia.....	18
Figura 3-12. Fenómeno de desbalanceo	22
Figura 3-13. Desbalanceo estático	22
Figura 3-14. Desbalanceo dinámico	23
Figura 3-15. Desalineación	24
Figura 3-16. Desalineación paralela	25
Figura 3-17. Desalineación angular	25
Figura 3-18. Pasos para categorizar fallas	26
Figura 3-19. Software LabVIEW.....	29
Figura 3-20. Diagrama de bloques Labview.....	29
Figura 3-21. Análisis de señal Matlab	30
Figura 3-22. Transformada de Fourier.....	31

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 3-1. Causas de falla y frecuencia vibracional	20
Tabla 5-1. Datos de mayor asertividad y selección familia Wavelet.....	40
Tabla 5-2. Valores combinados PICO; RMS y ENERGIA	43
Tabla 5-3. Diseño factorial.....	47
Tabla 5-4. Diseño factorial para el desbalanceo	48
Tabla 5-5. Diseño factorial para el desalineamiento.....	51
Tabla 5-6. Análisis para desbalanceo con método MEDA	54
Tabla 5-7. Análisis para desalineamiento con método MEDA.....	54

Lista de graficas

Gráfica 5-1. Cuadro de descriptores	41
Gráfica 5-2. Respuesta en porcentaje de los mejores aciertos de las tres familias de wavelets.....	43
Gráfica 5-3. Agrupación de Desalineamiento, Desbalanceo y Nominal a 20, 40 y 60Hz symlet 4 Nivel 4	46
Gráfica 5-4. Agrupación de Desalineamiento, Desbalanceo y Nominal a 20, 40 y 60Hz symlet 4 Nivel 4, removiendo los promedios.	46
Gráfica 5-5. Influencia para el factor 20-40 Hz de desbalanceo	49
Gráfica 5-6. Influencia para el factor 40-60 Hz de desbalanceo	49
Gráfica 5-7. Influencia para el factor 20-60 Hz de desbalanceo	50
Gráfica 5-8. Influencia para el factor 20-40 Hz de desalineamiento	51
Gráfica 5-9. Influencia para el factor 40-60 Hz de desbalanceo	52
Gráfica 5-10. Influencia para el factor 20-60 Hz de desbalanceo	52

Introducción

El análisis de vibraciones es una herramienta utilizada para identificar fallos en máquinas rotativas, siendo de gran ayuda en la industria generando beneficios económicos diagnosticando de forma oportuna los posibles deterioros en los equipos. Las fallas como el desbalanceo o desalineación del eje, traen consigo complicaciones importantes que causan el desgaste en los elementos que conforman el sistema. Teniendo en cuenta lo anterior es necesario evaluar el funcionamiento y diagnosticar posibles daños ocasionados y así evitar problemas que involucren la parada de la máquina.

Se suele pensar, que una máquina que trabaja de forma incorrecta, es la que su funcionamiento no cumple con los estándares requeridos a la hora de ejecutar una tarea. Así mismo, una anomalía puede ser la consecuencia de un largo ciclo de daños no solucionados. En resultado, algunos equipos pueden trabajar y realizar tareas teniendo fallas activas o en progreso. En efecto, las máquinas y productos defectuosos acarren un elevado costo lo que en su defecto sería mejor hacer mantenimiento adecuado evitando el inadecuado funcionamiento de los equipos. Por esta razón, la realización de una revisión preventiva en una maquina es necesario para detectar y diagnosticar fallas con el fin de realizar los cambios y ajustes de elementos involucrados en el proceso, siendo indispensable preveer la interrupción no planificada y la disminución en la elaboración de los productos.

El análisis de ordenes es el método más utilizado estudiar la frecuencia en las vibraciones y el sonido de las maquinas rotativas, esta basado en un rastreo de los niveles RMS de las modulaciones sinusoidales irregulares en el tiempo, provenientes de los impulsos repetitivos ejercidos sobre el equipo.

Este proyecto de investigación, realizó una revisión bibliográfica de proyectos de pregrado que hacen referencia al tema aquí propuesto realizados en la Universidad Antonio Nariño sede Bucaramanga, seguidamente se desarrolló una metodología practica que permitiera identificar a tiempo los fallos mecánicos en máquinas rotatorias asociados al desbalanceo y la alineación.

Por otra parte, los resultados y conclusiones servirán para futuras investigaciones científicas reforzando los conocimientos teóricos y prácticos en el análisis de señales causadas por desbalanceo o desalineamiento; así mismo refuerza la línea de investigación para desarrollar alternativas que concluyan en la adquisición de datos significativos

1. Planteamiento del problema

El diagnóstico de fallas es un requisito imprescindible en las empresas industriales a nivel mundial, lo cual ha tenido un avance en los últimos tiempos debido a las nuevas tecnologías que involucran procesos complejos y traen consigo una variedad de elementos capaces de detectar daños que deben ser regulados. Es así, que la variedad de métodos existentes para la caracterización de las señales de vibración, son empleadas para diagnosticar rodamientos en mal estado, daños en caja de reducción así como el desbalanceo y desalineación del eje que son equivalentes a daños que ocasionan deterioro en los elementos que conforman el sistema. Siendo lo anterior fundamental para la pronta detección de fallas ayudando a que se prolongue la vida útil de los sistemas de la máquina.

Como se expresa en el párrafo anterior hay varias fallas, así como múltiples técnicas para la detección de las mismas. por esta razón este proyecto de investigación propone realizar una revisión bibliográfica y análisis estadístico para identificar los descriptores más importantes de fallas vibratorias, con el fin de que la recolección y comparación de los datos sirva para investigaciones futuras.

Teniendo en cuenta que en la actualidad el mundo empresarial se ha desarrollado a un ritmo acelerado, influenciado por la competitividad se hace necesario proteger equipos y maquinas con el objetivo de aumentar su tiempo de servicio y alargar su vida útil. motivo por el cual surge la siguiente pregunta de investigación ¿es posible identificar y caracterizar los descriptores apropiados para el análisis vibracional en la detección de fallas en máquinas rotatorias basados en comparación de estudios anteriores?

El propósito de este proyecto es entregar un aporte de carácter investigativo basado en el análisis de vibración en detección de fallas en máquina rotatoria afectada por desbalanceo comparando estudios realizados con anterioridad, aportando a estudiantes y docentes interesados en el tema nuevos datos y experiencias que permitan llevar conocimientos teóricos adquiridos en clase a la práctica.

El proyecto se realizó en el laboratorio de materiales de la Universidad Antonio Nariño sede Bucaramanga y para su ejecución se utilizaron las herramientas existentes para realizar las pruebas propuestas en esta investigación.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Identificar los descriptores significativos que permitan diagnosticar fallas mediante el análisis de las mediciones de vibraciones en máquinas rotativas, utilizando los dispositivos existentes en el laboratorio de materiales de la Universidad Antonio Nariño sede Bucaramanga.

2.2 Objetivos específicos

- Evaluar los resultados obtenidos en estudios realizados en fallas vibracionales que sean importantes para el desarrollo de esta propuesta.
- Caracterizar medidas de vibración en la maquina rotativa y confrontar estadísticamente los datos para hallar relaciones significativas que podrán ser utilizadas a futuro.
- Validar los datos obtenidos de los descriptores que mejor se desempeñan en la detección de fallas en máquinas rotativas.

3. Marco teórico

3.1 Vibraciones

El estudio de las vibraciones en múltiples aplicaciones ha ocupado un lugar importante a nivel de investigación científica. En el caso de las vibraciones en las máquinas rotativas ha servido como referente o indicador del comportamiento mecánico y eléctrico de ellas, para establecer cuando se sobreviene algún tipo de falla o condición que pueda poner en riesgo su integridad. En Arango (2007), hace referencia a la vibración como la expansión de ondas elásticas provocando deformaciones y tensiones sistema constante es decir que las maquinas tienen una señal de vibración que origina las características relevantes con el movimiento. Es así como Yadav, et al (2011), expresa que las ondas vibracionales, son calculadas por su amplitud contra tiempo o frecuencia, llamados registro temporal y espectral, teniendo en cuenta que son áreas de representación que forman la construcción de la señal por una variable espacial concluyente como es tiempo - frecuencia.

Sin embargo, al realizar el monitoreo en línea, es importante reducir la información contenida en una señal de onda a un pequeño número de descripciones que muestren las características frecuentes en la vibración. El proceso para la obtención de las propiedades generales, se define mediante aspectos y comportamientos de la onda en donde se presenten de manera apropiada un trazo de puntos el cual simplifica los datos de alta dimensionalidad que no aporten información significativa al proceso reduciendo la velocidad de la correlación. (Cardona, 2011)

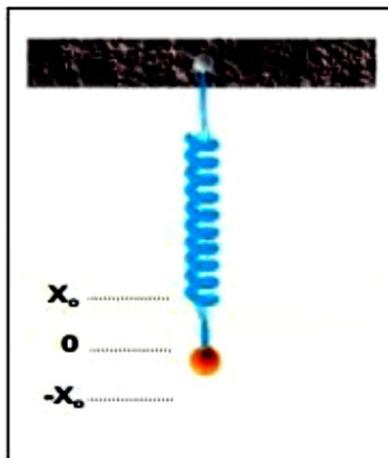
El concepto de máquina rotativa en Cardona (2011), está dado por un conjunto de mecanismos basados en diseños que cumplen con una función específica que va desde el grupo motor-biela que generan movimiento, otro elemento es el eje, siendo este el

encargado de distribuir energía a las partes que lo conforman; coordinando el funcionamiento de la máquina y su velocidad de giro. Así mismo es el encargado de transmitir las señales vibratorias a los rodamientos, ruedas dentadas, acoples y soportes, siendo la base principal para determinar el dominio del tiempo en las ondas sinusoidales. Las ondas de vibración de una maquina se representan mediante la suma vectorial de las oscilaciones de cada elemento, con distintas amplitudes y frecuencias que permitan conocer de forma real las condiciones en las que se encuentra el equipo al analizar medidas de amplitud con la resistencia de la vibración y el movimiento oscilante de la frecuencia. El valor de la vibración se da en aceleración (g), la velocidad (mm/s) o el desplazamiento (μm), teniendo en cuenta que estas medidas logran determinar la amplitud de la señal de vibración. Para diferenciar los valores pico y altas frecuencias es importante determinar la variable de aceleración aplicada en la vibración. Es así como los valores pico de bajas y medias frecuencias se determinan en la variable de velocidad y se utiliza la distancia del desplazamiento para diferenciar patrones a muy bajas frecuencias. (Arango, 2007).

3.1.1 Tipos de vibraciones

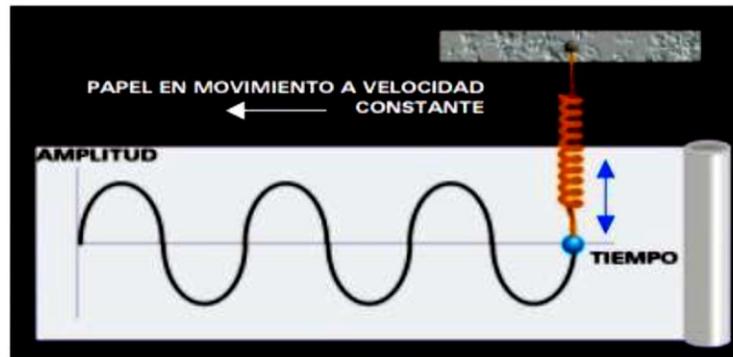
Vibración simple. Es una caracterización de las oscilaciones puras y se representa físicamente como el ejemplo de la figura 3-1.

Figura 3-1. Vibración simple



Una masa suspendida de un resorte, con movimientos repetitivos puede ser considerada una propagación de ondas donde la oscilación produce tracciones y distorsiones en un escenario constante o estando en un estado de equilibrio. En Hernández, (2007) se encuentra que la duración del recorrido que ejecuta la acción y volver a la posición inicial llamada X_0 siempre será la misma. Ver figura 3-2

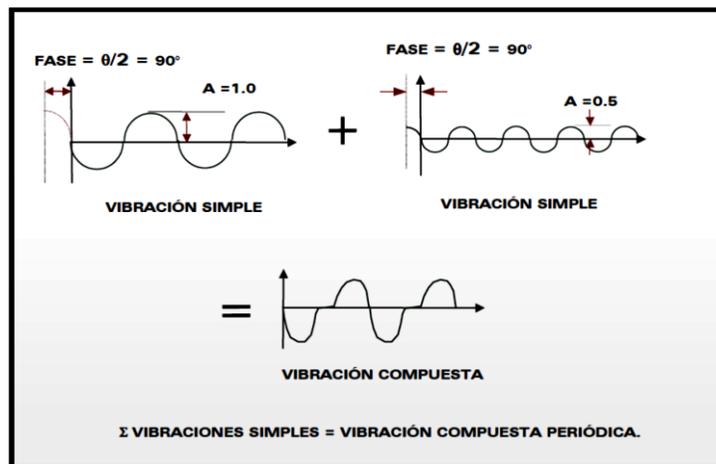
Figura 3-2. Señal sinusoidal



A-MAQ, (2005)

La señal de vibración compuesta es el conjunto de ondas sinusoidales que se perciben en los elementos de una maquina mas todos los movimientos ocasionados por oscilaciones vibratoriales. (Hernández, 2007) Ver figura 3-3

Figura 3-3. Señal compuesta de vibración



A-MAQ, (2005)

En las vibraciones aleatorias la ondulación no es repetitiva en cuanto a sus características en torno al lugar de referencia, sino que se produce de manera irregular y de forma aleatoria donde no puede determinarse el inicio y final de un periodo. Estas ondulaciones se presentan en la fricción de las partes, rodamientos y bombas. (A-MAQ, 2005)

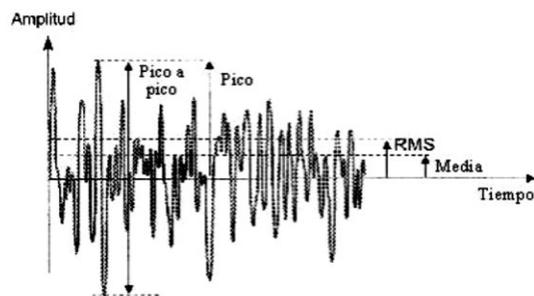
el pico a pico es el valor que muestra un máximo y un mínimo logrados por la señal, siendo una medida significativa para las aplicaciones graficas en las cuales el espacio vibracional de un eje se encuentra defectuoso y no se observa las altas tracciones o fricciones.

Se denomina valor pico a la máxima elevación de la ondulación, en este caso no se debe tomar como referencia las otras curvaturas, ya que esta altura indicaría un margen de golpeteos breves.

El valor medio de la señal es un componente estático que se caracteriza por la amplitud de los valores inmediatos de una onda aleatoria en función de su varianza.

El RMS o raíz media cuadrática, es el valor más importante de la vibración ya que al mantener una señal más amplia durante mucho tiempo experimenta movimientos fuertes que pueden generar daños a la maquina afectando su funcionamiento. (Rodríguez, 2005). Como se observa en la figura 3-4

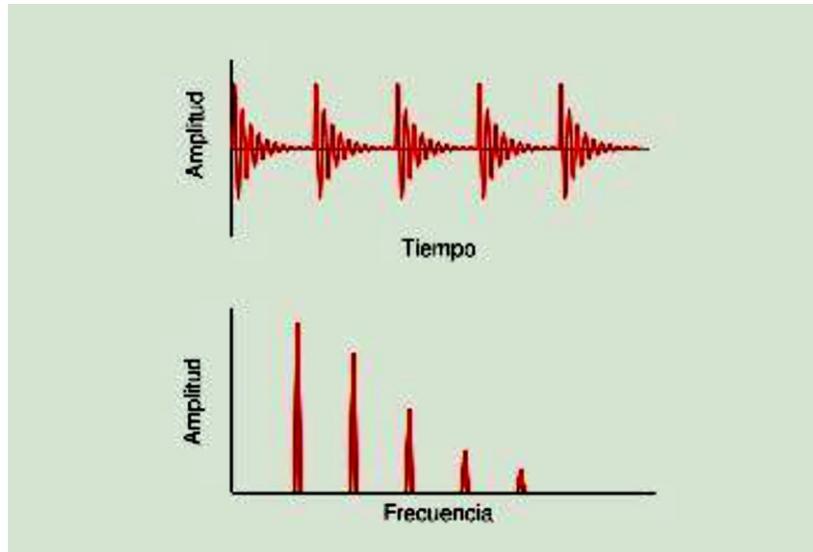
Figura 3-4. Valor histórico de la señal



Análisis modal operacional: teoría y práctica, (2019)

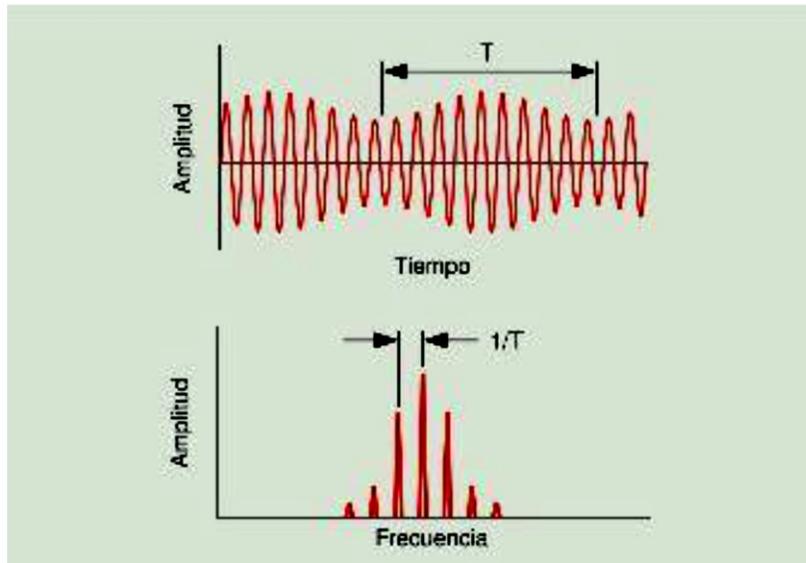
Los golpeteos intermitentes se relacionan a señales continuas de fricciones constantes de las partes que componen la maquina y pueden ser originadas por un golpeteo en los rodamientos, ventilador engranes etc., una característica importante de esta señal es que puede disminuirse debido al amortiguamiento. (Fernández, 2017) (Ver figura 3-5)

Figura 3-5. Golpeteo intermitente



Fernández, (2017)

La amplitud modulada (AM), se da por la diferencia de onda influenciada por el dominio de una nueva señal que relativamente es menor; la frecuencia moduladora es por lo general mucho más baja que la modulada, generando nuevas unidades que se denominan bandas laterales que regulan la onda de vibración, usualmente ocurre en los engranes modulados por los RPM de los elementos como el piñón o la corona de la máquina. (Fernández, 2017) (Ver figura 3-6)

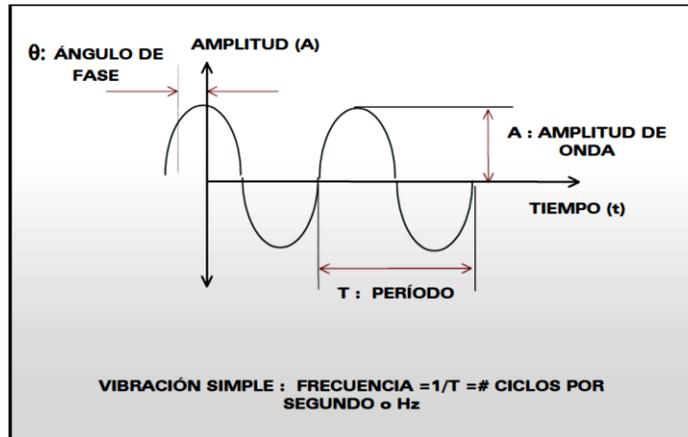
Figura 3-6. Señal de modulación de onda.

Fernández, (2017)

En una señal de vibración se transporta cantidad de información significativa que caracteriza una máquina. Las ondas capturadas identifican las diferentes fallas que tiene cada elemento o su estado inmediato. (White, 2010)

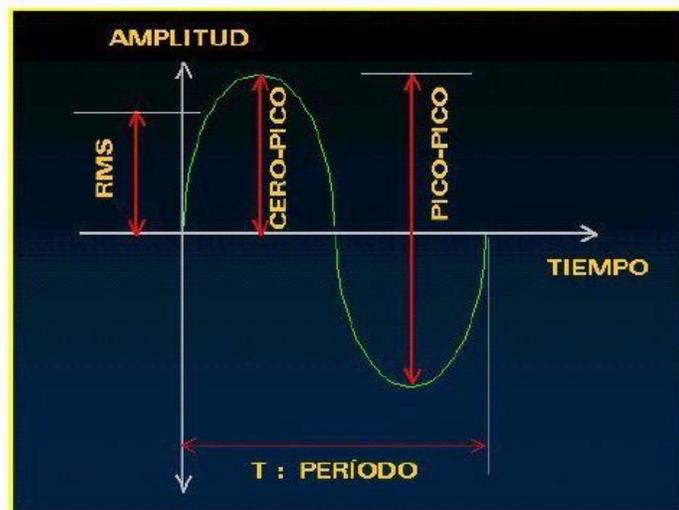
En el periodo de oscilación el tiempo está dado en segundos o milisegundos, indicando que la señal termino un periodo, esto depende de la velocidad de la onda. Para medir un ciclo de frecuencia que es equivalente a $F = 1/p$, la oscilación debe ir y venir en una misma orientación. (White, 2010)

Teniendo en cuenta que la frecuencia es el número de periodos o momentos que ejecuta una acción enmarcada en un segundo de tiempo. En White, (2010) se encuentra que la representación está dada por la f teniendo en cuenta que la fórmula es el Hz, siendo este medido por segundos. (Ver figura 3-7)

Figura 3-7. Señal de vibración simple

A-MAQ, (2005)

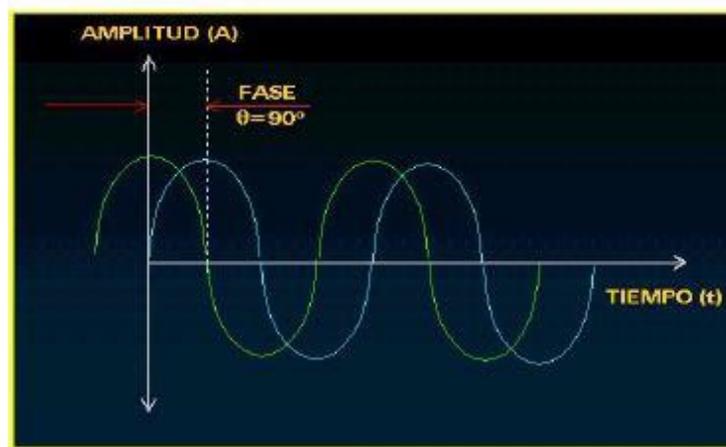
Se denomina amplitud de vibración es el indicador de severidad de la onda que se relaciona con el tamaño la velocidad y la fuerza del movimiento, dando información relevante de la condición en la que se encuentra la máquina. Su velocidad puede ser expresada en valor pico y es la máxima rapidez que alcanza en un periodo de tiempo. Así mismo los valores pico-pico, pico y RMS son equivalentes a desplazamiento, velocidad y aceleración teniendo en cuenta que a mayor energía de vibración aumenta la velocidad de la amplitud de raíz (White, 2010) como se observa en la figura 3-8

Figura 3-8. Valores de amplitud

White, (2010)

Por fase se entiende que es la longitud o diferencia de tiempo entre dos ondas sinusoidales, las cuales son medidas en grados y este desplazamiento de señal puede ser negativo o positivo, como se observa en la figura 3-9, el desplazamiento entre las curvas está a 90° lo que indica que hay un atraso de $\frac{1}{4}$ del tiempo en el espacio de la onda. (White, 2010)

Figura 3-9. Grafica de la fase.



White, (2010)

3.2 Análisis de vibraciones.

En la actualidad la industria requiere de máquinas complejas que garanticen la productividad de forma segura es por esta razón que se hace imprescindible realizar mantenimientos periódicos con el fin de evitar daños futuros que paralicen el funcionamiento de estas. La técnica más utilizada para detectar y daños es el monitoreo de vibraciones ya que con este método se realiza un diagnóstico de los problemas presentados ya sea por falta de engrase, desalineamiento o un mal ensamble. (Manual de rodamientos, 1996).

Los acelerómetros han adquirido importancia dentro de las diferentes formas que existen para realizar monitoreos a las máquinas rotativas, ya que posee unos sensores capaces de transmitir la información del daño por medio de una señal gama de frecuencia muy amplia que puede darse en bajas y muy altas y se dividen en tres clases que se enuncian a continuación. (Manual de rodamientos, 1996).

Baja frecuencia (0 a 2kHz),

Alta frecuencia (2 a 50kHz)

Muy alta frecuencia (más de 50 kHz.)

Para Tranter, (1998), las vibraciones se transforman en ondas eléctricas por sensores que serán capturadas en tarjetas de datos que pueden ser ingresados a un ordenador. Cuando una señal es capturada, posee información que no garantiza confiabilidad para el análisis, ya que se demanda el uso de un sistema acondicionador de señal que origine una secuencia que contenga la información de datos importantes que proporcione las características de la señal. Las maquinas rotativas presentan vibraciones que no ascienden a los 4kHz, y por lo general se usan filtros digitales para reducir frecuencias elevadas.

La gran cantidad de información contenida en las señales vibracionales, puede ser utilizada para el monitoreo de posibles fallas, sin interrumpir el funcionamiento del equipo. Es así como un daño específico en el área de rodamiento fricciona con otra superficie, produciendo ondas de choque. La observación de estas condiciones se realiza a través de modificaciones en la firma de la vibración por la aparición de estos movimientos.

3.2.1 Tipos de análisis de vibraciones

En líneas generales el diagnóstico de fallas tiene un enfoque tradicional e investigativo, teniendo en cuenta los requerimientos para cada uno de ellos, así como las diferencias significativas a la hora de ser evaluados. Así mismo los equipos y tecnologías utilizadas juegan un papel importante en la obtención de datos, en consecuencia, como sistemas de monitoreo complejo existentes en el mercado que tiene la capacidad de realizar un diagnóstico automático con un alto grado de eficacia comparado con sistemas simples que tienen limitada su capacidad de análisis arrojando una representación gráfica básica que puede ser observada por un técnico para deducir el estado de salud de la máquina.

Análisis tradicional. Se fundamenta en la habilidad de observación que tenga el técnico que realiza el mantenimiento de la máquina para interpretar, identificar y diagnosticar las

posibles fallas basado en la señal de vibración que emite en el dominio del tiempo y la frecuencia, asociadas a un sonido, temperatura o vibración del equipo. (Cardona, 2011)

Teniendo en cuenta que las limitaciones de este análisis dependen de las condiciones de operación de la maquina como velocidad de giro y carga constante, entre otros, se corre el riesgo de realizar una interpretación incorrecta por parte de la empresa del diagnóstico entregado por el técnico lo que llevaría a no hacer los correctivos necesarios a tiempo haciendo de este un método menos eficaz.

Análisis Investigativo. Este proceso se basa en el registro y categorización de patrones en las ondas vibracionales agrupadas en varias etapas representación y clasificación teniendo en cuenta fases como la evaluación de características, extracción de las mismas y reducción de dimensionalidad. Es importante mencionar que la estimación de aciertos en los resultados esta dado en el diagnostico automático por la influencia sincronizada en el dominio de estas etapas. (Cardona, 2011).

3.2.2 Métodos de análisis

En Saavedra, 2011 se encuentra que los datos obtenidos al analizar los daños en la maquina utilizando variados métodos es importante para hallar los mejores descriptores que caractericen las fallas de forma eficiente, con el fin de evaluar el buen funcionamiento de estas dado que las fuerzas dinamicas fundamentadas en problemas mecánicos y eléctricos generan el mal desempeño alterando su movimiento.

En el dominio del tiempo. Al observar la forma de la onda vibracional, esta suministra información complementaria que puede ser usada en el diagnóstico de fallas tales como impactos, variaciones en amplitud y frecuencias y golpes intermitentes ya que crean una señal repetitiva.

Es así como las fallas en los rodamientos se logran identificar en la forma de la onda con la técnica del dominio del tiempo, permitiendo determinar la aceleración vibracional de los

impactos producidos por los elementos rodantes cuando pasan por daño mecánico. Por medio de cada ciclo relacionando la frecuencia de falla se logra identificar si el defecto es en la pista interna, externa o elementos rodantes. (Estupiñán, et al, 2006).

Espectral FFT. O transformada continua de Fourier hace referencia a la decomposición de la onda vibracional en el dominio del tiempo y a sus funciones espectrales y así ser analizados de forma individual y encontrar correlaciones existentes de los movimientos dinámicos que producen ondas y los elementos discretos que componen el espectro. Los gráficos muestran la amplitud de la onda cuando los componentes estén en el dominio correspondiente a los múltiples frecuenciales del giro ejecutado por la máquina al momento de encontrar el daño y realizar el procesamiento de datos por ejemplo a_1, a_2, a_3, a_4 (Estupiñán, et al, 2006).

Etapas de vibraciones. En esta etapa las revoluciones en la que gira la máquina se definen por la vibración horizontal y vertical o en su defecto por las oscilaciones axiales de las distintas partes realizadas por el motor-máquina, estableciendo los movimientos relativos entre estos y así identificar los problemas relacionados con el desbalanceo, desalineación, ejes doblados, resonancia o poleas desalineadas.

promedios sincrónicos en el tiempo. En esta fase la señal en el dominio del tiempo se agrupa, seguidamente se suma y promedia con ayuda de un movimiento de repetición continua. Los dispositivos se coordinan con la oscilación, teniendo en cuenta su promedio y en las no sincronizadas se refleja como su valor disminuye.

De órbitas. Usualmente identifica cuando la máquina está en descanso el movimiento del eje mezclando dos señales obtenidas por sensores ubicados a 90° aproximadamente.

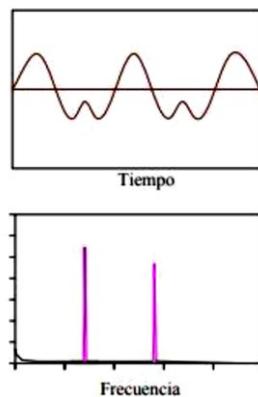
De modulaciones. Consiste en diagnosticar fácilmente fallas presentadas en rodamientos deteriorados, engranes con dientes quebrados, deterioros de álabes en turbinas, y daños eléctricos en las máquinas. Se realiza analizando la envolvente de la señal temporal de una onda modulada.

Vibraciones en arranque y paradas de una máquina. El objetivo de esta etapa es evidenciar los daños importantes generados por las vibraciones en las que las frecuencias trabajadas con la rapidez de la máquina. Teniendo en cuenta el tiempo intermedio el arranque y la parada, donde la velocidad disminuye de forma simultánea y se puede coincidir con señales naturales y ser amplificadas.

Transformada tiempo-frecuencia posibilita la localización y análisis conjunta de eventos significativos, siendo de gran ayuda en el manejo real del análisis de señales no estacionarias que pueden ser por dado por los valores de carga y velocidad o en su defecto transitorios por daños en sus elementos. puede realizar un análisis tridimensional de amplitud-tiempo-frecuencia.

Del espectro. En consecuencia, es llamada grafica de onda al denominado dominio del tiempo y a la frecuencia se le designa el nombre de espectro, es asi como al analizar este convierte los datos de la señal de tiempo en frecuencia. (Ver figura 3-10)

Figura 3-10. Dominio del tiempo y dominio de la frecuencia.

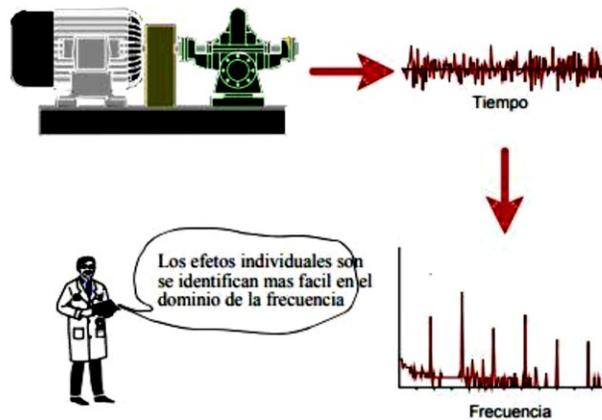


White, (2010)

Como se observa en la figura3-11 el dominio de frecuencia está mucho más compacto; mientras en el dominio del tiempo se superponen creando confusión ya que sus elementos se encuentran alejados en el espacio de la frecuencia, donde los datos arrojados por la

señal son poco confiables. Los valores bajos pueden ser indicadores de daños, por lo tanto, hay que tener en cuenta la gráfica para realizar el análisis de la onda porque puede reflejar pequeñas fallas y se debe realizar en cuanto sea necesario el mantenimiento predictivo para evitar que la maquina deje de funcionar correctamente. (White, 2010)

Figura 3-11. Dominio del tiempo y dominio de la frecuencia.



White, (2010)

Según Fernández (2017), el análisis de vibraciones ofrece datos importantes en la detección de fallas en una maquina rotativa, y depende de la adecuada valoración que realice el experto en el tema al realizar la interpretación de las graficas las cuales indicaran el estado de esta.

Para realizar el análisis de vibraciones se deben tener en cuenta los siguientes pasos:

Identificación. Al realizar el análisis se deben tener en cuenta los indicadores en los graficos con el fin de realizar la identificación de los picos correspondientes a cada función, ya que existen maquinas con varios ejes y cada uno tendrá una rotación que lo caracteriza. (Fernández, 2017)

Diagnostico. Al realizar la valoración se tendrán en cuenta los valores de amplitud representados por los picos de vibración en las gráficas los cuales indicarán las fallas presentadas (Fernández, 2017)

Recomendaciones. Se darán de acuerdo a los daños encontrados en la maquina valorados de acuerdo a la gravedad de los mismos. (Fernández, 2017)

3.3 Daños encontrados en un análisis de vibracional

Las fallas están establecidas por el nivel de severidad del daño, que busca con el análisis de vibraciones vincular las frecuencias emitidas por la maquina a los daños teniendo en cuenta la amplitud de la señal. (Ver tabla 3-1)

Tabla 3-1. Causas de falla y frecuencia vibracional

Frecuencia	Causas Probables de Falla
1xRPM	Desbalanceo, engranajes o poleas descentradas, desalineamiento o eje flexionado, resonancia, problemas eléctricos, fuerzas alternas.
2xRPM	Huelgos o juegos mecánicos, desalineamiento, fuerzas alternativas, resonancia.
3xRPM	Desalineamiento, combinación de huelgos mecánicos axiales excesivos con desalineamiento.
< a 1xRPM	Remolino de aceite (oil whirl) en cojinetes o rotores.
Frecuencia de línea	Problemas eléctricos.
Armónicas de RPM	Engranajes dañados, fuerzas hidráulicas, huelgos o juegos mecánicos, fuerzas alternativas.
Alta Frecuencia (no armónicas)	Cojinetes antifricción en mal estado.

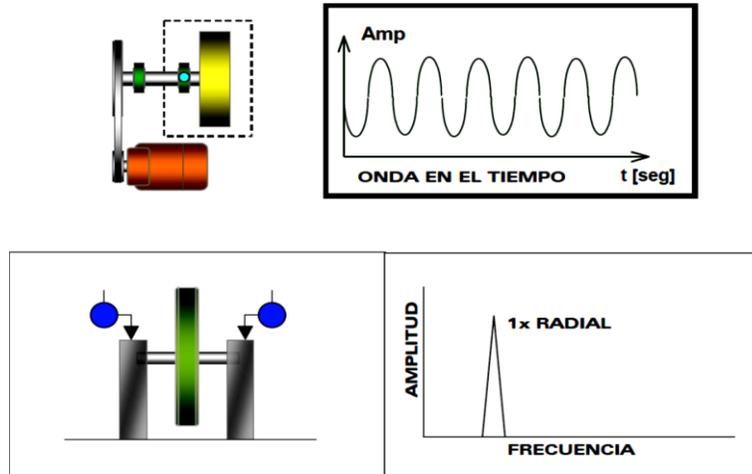
En consecuencia, las condiciones de la velocidad (mm/s), están proporcionados por la elevación de la señal, teniendo en cuenta que posee características que pueden facilitar la observación del nivel de severidad vibracional, así mismo, otro factor influyente es la cantidad de energía transmitida a la maquina siendo esta convertida en vibraciones y ruido.

En general existen fallas importantes asociados a daños mecánicos y eléctricos vinculados a las vibraciones que casi siempre son causales de desbalanceo, desalineación, aflojamiento mecánico, desgaste de rodamientos, entre otros, en la máquina. Así mismo cabe la posibilidad de asociar los niveles de vibración a los daños encontrados también la amplitud de la señal dará el indicador de severidad del problema. De igual forma es importante mencionar que en el presente trabajo de grado se abordara el estudio del análisis de vibraciones orientado exclusivamente a fallas originados por causas como desbalanceo, desalineación, de una manera muy general.

3.3.1 Desbalanceo

En una maquina se encuentran diferentes tipos de desajustes en la medida que ocurre una vibración, ya sea por la fuerza ejercida por una pieza, lo que causaría que el centro de gravedad de su cuerpo giratorio no coincide con su centro de rotación que pueden estar originadas por distorsión mecánica o térmica, errores de montaje, componentes rotos o en mal estado, defectos ocasionados en la fundición, corrosión y desgaste no simétrico del material. Esto puede estar relacionado al efecto producido ya sea por errores en la fabricación o en el mecanizado de las partes rotativas que generan fuerza que ocasionan fuentes de perturbación con lo cual aumentan las amplitudes de vibración donde acorta la expectativa de vida útil de la máquina, la integridad estructural y la vida de los rodamientos, así mismo disminuye tiempo entre fallas calidad de producción y afecta el ambiente laboral, una razón importante para balancear la maquina es que reduce el consumo de energía disminuyendo los niveles de vibración incrementando el uso de los rodamientos. En otras palabras, es así como el desbalanceo depende esencialmente de la velocidad de las proporciones geométricas, de la distribución de masa del rotor de la rigidez dinámica del eje del tipo de rodamientos y de la fundición de sus elementos.

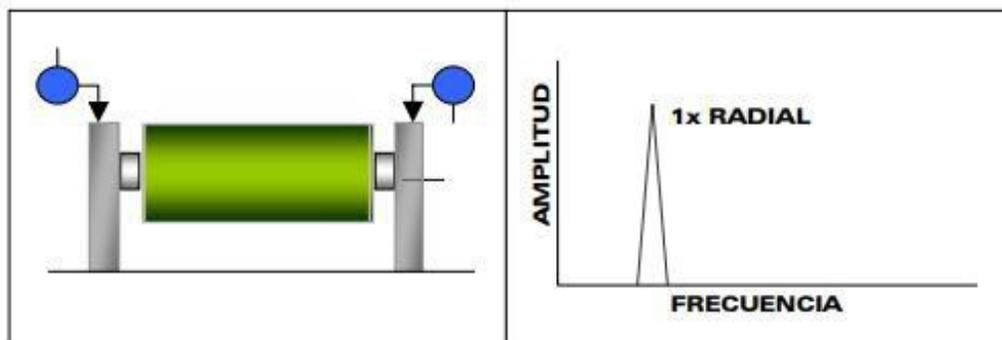
Figura 3-12. Fenómeno de desbalanceo



A-MAQ, (2005)

Según Arango 2007, el desbalanceo se presenta de modo estático, dual y dinámico. Siendo el estático definido como el desbalanceo de fuerzas donde el eje longitudinal principal está desplazada paralelamente en relación al eje de rotación y puede ser evidenciado calculando amplitud y fase. En Quiroga et al (2018), se encuentra que puede ser dado por deterioro radial en la superficie de los mecanismos o rotores desiguales donde su longitud no es consecuente con el diámetro. El espectro muestra amplitud significativa de frecuencia de giro del 1x por las RPS del rotor. Al realizar los arreglos adecuados a la máquina se debe tener en cuenta que el rotor esté en posición correcta así mismo debe tener el ángulo calculado en un equipo de balanceo. (Ver figura 3-13)

Figura 3-13. Desbalanceo estático

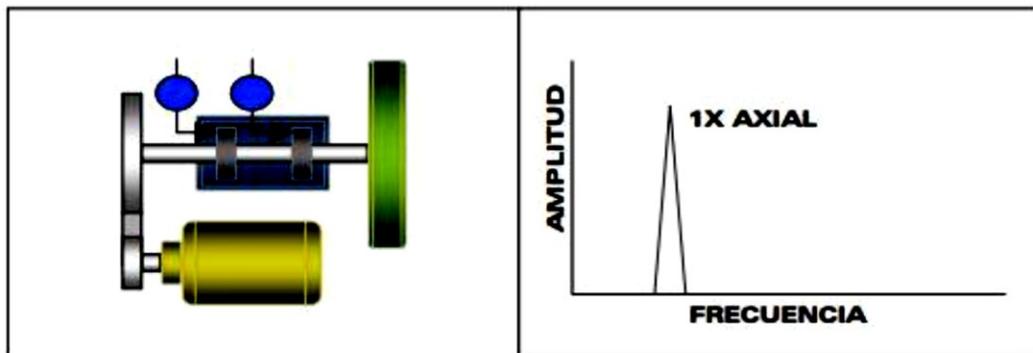


A-MAQ, (2005)

En el desbalanceo dual se reconoce la señal sinusoidal pura, la cual no varía en los soportes del eje y estará en la misma fase y esto determinará la condición del daño, de la misma manera se origina una máxima vibración axial y radial que puede tener 180° de amplitud entre los ejes. (Arango, 2007). Para Quiroga et al (2018), el desbalance se da por el deterioro superficial del rotor y la curvatura del eje, para corregir esta falla se deben realizar mediciones de vibración y velocidad para obtener los datos de fase teniendo en cuenta que las revoluciones de giro 1x RPS del rotor es importante en la trayectoria radial y axial. Para arreglar el daño se debe inspeccionar el rotor para verificar que el eje no esté curvado, y se realice el balanceo.

El desbalanceo dinámico se debe a deterioros radiales y axiales, dados por la unión del estático y dual, causados en el rotor. Para determinar el daño hay que realizar mediciones vibratorias cuando está en movimiento el rotor, los datos se relacionan en dos planos, cuya afectación estará entre 45° o 135° dependiendo de las características de la máquina. (Arango,2007). Este fenómeno ocurre en rotores medianos y largos, en los cuales se muestra movimiento absoluto y oscilación sincrónica en una frecuencia de 1x RPS en el rotor, en este caso se debe balancear en los dos planos el rotor utilizando las masas y datos para el cálculo angular de acuerdo a la calibración con el equipo adecuado. (Quiroga, et al, 2018) (Ver figura 3-14)

Figura 3-14. Desbalanceo dinámico



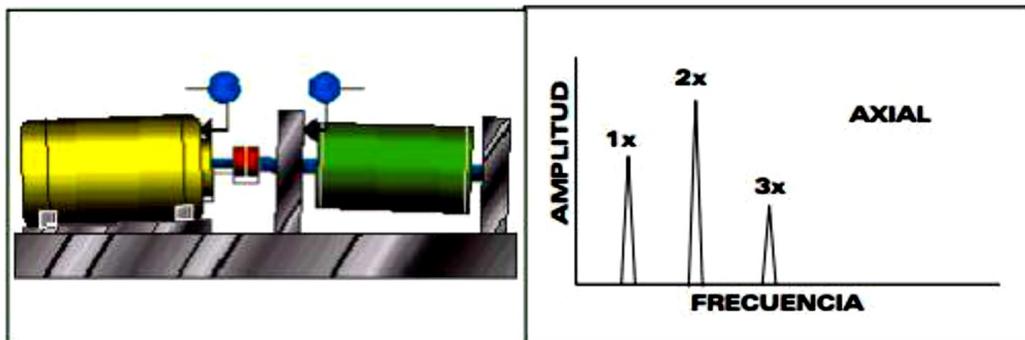
A-MAQ, (2005)

3.3.2 Desalineación

A continuación, se define el concepto como la desviación de un eje físico con relación a un eje colineal de rotación medido entre los puntos de transmisión de potencia cuando el equipo está trabajando en condiciones normales esta puede ser descrita en términos de desalineación paralela y angular. Las consecuencias negativas suelen aparecer cuando dos ejes están sometidos a un nivel moderado de desalineamiento las conexiones de acoplamiento de ambos se afectan para aceptar la condición existente. Debido al giro de los ejes, los componentes internos del acoplamiento generan momentos flectores y esfuerzos de tracción y compresión que al aumentar el desalineamiento a una velocidad de giro superior al 75% puede ocurrir una falla donde el movimiento de sus partes internas interfiere en otras que no están en movimiento, la flexión empeora y la distorsión quiebra el material, la temperatura del acople empieza a aumentar y los rodamientos se ven seriamente dañados. (López, 2004) (ver figura 3-15)

Algunas consecuencias negativas son fallas prematuras en sellos ejes o acoplamientos, aumento del consumo energético del motor, excesivas vibraciones radiales y axiales, fugas de aceite, ruptura de elementos, agrietamiento del eje, alta temperatura, entre otros. Esta situación de la maquina es considerada un defecto importante en la industria mundial. (López, 2004)

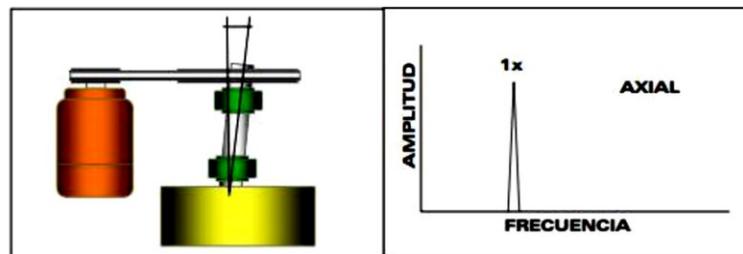
Figura 3-15. Desalineación



A-MAQ, (2005)

Desalineación paralelo. Se define como la posición paralela entre dos ejes que no se encuentran en un mismo plano y generan una vibración radial. Cuando el desalineamiento presenta un elevado grado de interferencia que puede ser una vibración de amplitud de 180° , entre las partes internas de sus elementos mecánicos, la flexión empeora y la distorsión destroza el material de construcción de las piezas, en este caso la temperatura aumenta y los rodamientos se verán comprometidos y dañados. (Alonso, 2001) (Ver figura 3-16)

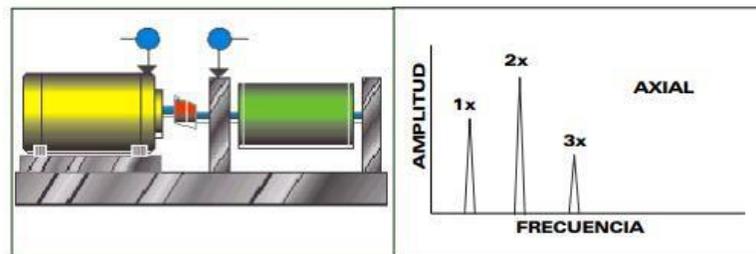
Figura 3-16. Desalineación paralela



A-MAQ, (2005)

Desalineación angular. se determina por la magnitud y posición angular del desbalance entre el rotor y el cojinete, en la actualidad existe el método de identificación algebraica basado en el cálculo operacional para determinar la diferencia que puede ser de 180° , y que generalmente está dada por el movimiento axial continuo. (Alonso, 2001) (Ver Figura 3-17)

Figura 3-17. Desalineación angular

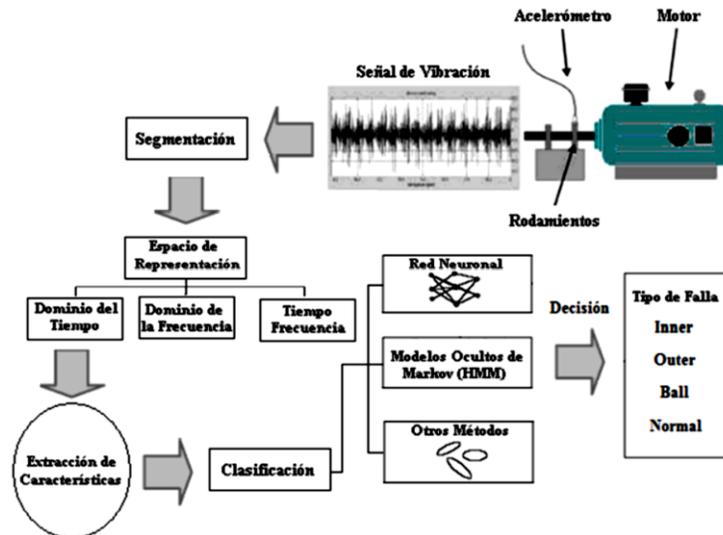


A-MAQ, 2005

3.3.3 Procedimiento para categorizar fallas

Para realizar una clasificación de fallas en rodamientos se emplean diversas etapas, aplicando el análisis de vibraciones, como se explica a continuación en la Figura 3-18.

Figura 3-18. Pasos para detección de fallas



Arango, (2007)

En todo proceso se presenta una etapa inicial que involucra la obtención de señales de vibracionales, donde se tomaran las mediciones de acuerdo a puntos específicos de ubicación de los rodamientos. La amplitud de la onda es medida de acuerdo a la aceleración y es usada para encontrar daños iniciales. Siguiendo el proceso estas ondas vibracionales son segmentadas en grupos pequeños con el objetivo de extraer las características significativas y descartar datos menos relevantes.

En consecuencia, el conjunto de elementos es relevante para la adquisición de datos facilitando la extracción de características significativas, como se propone en este proyecto de grado donde se realizó una revisión bibliográfica a investigaciones en este campo. Es así como estos registros facilitarían de forma eficaz la productividad del clasificador, identificando características de las posibles fallas en las máquinas rotativas. Es así como Lei, et al (2006), proponen complementar la fase de extracción de características con un

análisis de relevancia que permita optimizar el proceso eliminando los datos menos relevantes con la ayuda de un programa estadístico.

La extracción y clasificación de señales propone una solución reflejada en tiempo para la detección de daños en equipos facilitando el rendimiento y la vida útil de los elementos y ofreciendo efectividad al realizar el análisis. Finalmente, la clasificación de las ondas permite extraer las características y de esta forma se logra identificar la falla en la señal. La detección y diagnóstico de problemas son necesarios para evitar el mal funcionamiento, siendo este un requerimiento de vital importancia para garantizar una operación confiable y segura, la industria a nivel mundial requiere que este proceso sea indispensable para minimizar el riesgo, asegurar su competitividad, adaptándose a las nuevas tecnologías que posean habilidades de identificar daños, ejecutar un análisis y realizar una interpretación asertiva. (Lei, et al 2006).

3.4 Maquinas rotativas

Las máquinas eléctricas incluidos los transformadores están compuestos en sus sistemas por circuitos eléctricos los cuales se ajustan magnéticamente, utilizando materiales ferromagnéticos los cuales cumplen funciones de resistencia al campo magnético y ofreciendo soporte físico estructural que generan o que los alimenta y pueden ser máquinas de corriente directa o máquinas resto de componentes, (Feito, 2002). Los dispositivos rotatorios de conversión de energía electromecánica son conocidos como máquinas rotatorias. Están clasificados por el tipo de corriente de corriente alterna (Gourishankar, 1990).

Máquinas de corriente continua. Son generadores que convierten energía mecánica en energía eléctrica de CD y motores que convierten energía de DC. (Feito, 2002).

Máquinas de corriente alterna. Están constituidas por segmentos fijos o estator y móviles o rotor, aisladas por un mínimo espacio de aire que se denomina entrehierro y aplica para maquinas eléctricas, asincrónicas o de inducción. (Feito, 2002).

En 1980 Fitzgerald, manifiesta que una de las características de gran ventaja en los motores de inducción es su construcción ya que cuenta con un rotor robusto teniendo en cuenta, por ejemplo, que los rotores bobinado y jaula de ardilla el devanado se conforma por varillas conductoras ubicadas en ranuras las ranuras del mismo, y cortocircuitadas en los extremos y a lado y lado del rotor por dos platos conductores.

3.4.1 Control de máquinas rotativas

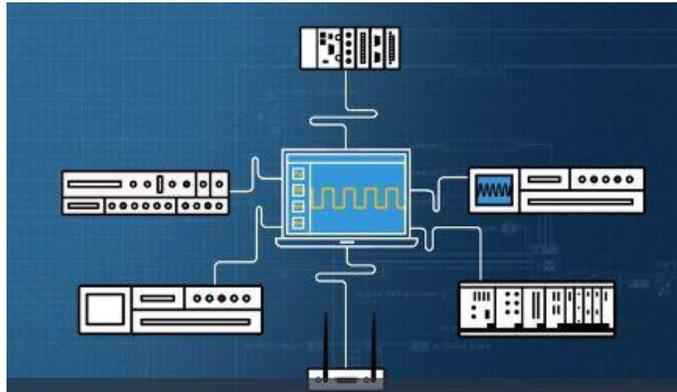
Para controlar y mantener la exactitud en la operación de los motores de DC se utilizan sistemas de control de retroalimentación. En estos sistemas se hacen arreglos para comparar un valor establecido y el valor real, para lo cual se puede utilizar un variador de frecuencia alimentado por la retroalimentación (Gourishankar, 1990).

Uno de los principales problemas y por lo que en las aplicaciones que estudiamos es que la velocidad entregada por los motores asíncronos es constante o casi constante. Esto cambio con la irrupción en el mercado de los variadores de velocidad a frecuencia variable. Para variar la velocidad de un motor asíncrono se debe modificar alguna de tres variables que son, el número de polos, el deslizamiento o la frecuencia de alimentación, solo las últimas dos permiten una variación continua de la velocidad (Feito, 2002).

3.5 Software LabVIEW

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrumnt Engineering Workbench) ofrece un enfoque de programación software gráfica que le ayuda a visualizar cada aspecto de su aplicación, incluyendo configuración de hardware, datos de medidas y depuración. Esta visualización hace que sea más fácil integrar hardware de medidas de cualquier proveedor, representar una lógica compleja en el diagrama, desarrollar algoritmos de análisis de datos y diseñar interfaces de usuario personalizadas. (National Instruments, 2019) como se observa en la figura 3-19.

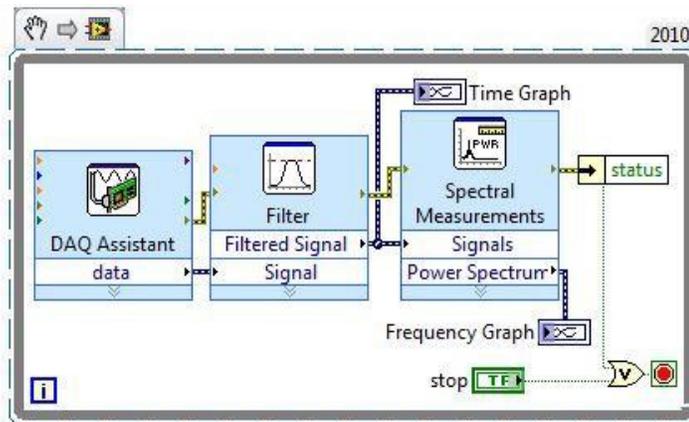
Figura 3-19. Software LabVIEW



National Instruments, 2019

El análisis en el dominio del tiempo es benéfico cuando se observan datos como la temperatura. Sin embargo, algunas aplicaciones requieren analizar los componentes de frecuencia de las señales. Esto le permite ver cuáles frecuencias constituyen una señal de sonido, similar a un ecualizador de audio o las frecuencias de vibración de un motor mientras se ejecuta. Se puede usar el módulo para identificar y filtrar frecuencias en el software NI LabVIEW. (National Instrument, 2019) (Ver figura 3-20).

Figura 3-20. Diagrama de bloques Labview

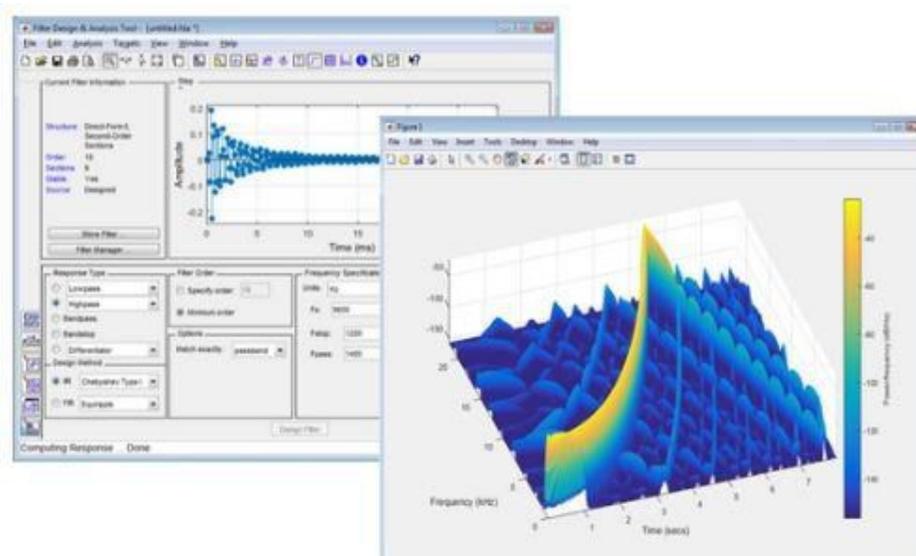


National Instruments, (2019)

3.6 Software Matlab

El programa de MATLAB es una herramienta optima cuando se busca solucionar dificultades científicas y de ingeniería. El sistema tecnológico apoyado en matrices, demuestra la facilidad de formular las matemáticas computacionales. Las gráficas integradas permiten una mejor visualización de los resultados y la adquisición de nueva información. Posee una extensa biblioteca de herramientas llamada Toolboxes con la cual se accede a trabajar algoritmos importantes donde se puede experimentar, explorar y descubrir una variedad de funciones que ofrece MATLAB. Las diferentes aplicaciones están planteadas de forma que se puede trabajar en conjunto ayudando a obtener resultados significativos, asi como diseñar ideas importantes, obteniendo y analizando datos en gran volumen que puede expandirse a clústeres y espacios en la web. Esta plataforma esta integrada por códigos y lenguajes compatibles que son capaces de implementar algoritmos y funciones en los programas empresariales o de fabricación (Mathworks, 2019) como se observa en la figura 3-21.

Figura 3-21. Análisis de señal Matlab



3.7 Transformada de Fourier

Es una herramienta matemática que ha sido considerablemente estudiada en el procesamiento de señales, tanto continuas como discretas, ya que nos permite separar una señal periódica en una suma de senos y cosenos, permitiendo así identificar las frecuencias a las que trabaja y la afectación que produce a un sistema. (Sánchez, 2017)

Esta transformada surge del trabajo realizado por el matemático y físico Josep Baptiste Fourier, cuando estaba realizando estudios acerca de la transmisión de calor, pensando en que sería más sencillo analizar el problema si se pudiera expresar en términos de senos y cosenos. Por tal razón esta transformada lleva su nombre. (Sánchez, 2017)

Debido a las dificultades presentadas para proporcionar datos consecutivos de la señal así como las soluciones poco eficaces que ofrecen las herramientas de transformación fundamentadas en el análisis de Fourier, proponen nuevas alternativas capaces de caracterizar tiempo-frecuencia suministrando información paralela de la onda vibracional en sus dos dimensiones estableciendo de esta manera márgenes de tiempo que revelan valores complejos como son la Transformada wavelet (TW) y las distribuciones Wigner Ville (WVD) y Choi Williams (CWD). (Castro, et al, 2002). (Ver figura 3-22).

Figura 3-22. Transformada de Fourier.



Sánchez, (2017)

3.8 Transformada de Wavelet

Se representa por medio de una señal que son generadas en función de traslación y dilatación de una onda básica denominada ondula madre. (Grim, et al, 2010)

Es Wavelet un programa importante para realizar análisis gráficos en tiempo -frecuencia en diversas funciones en la industria, filtrando valores asertivos en cuanto a la respuesta finita al impulso. Siendo continuas o discretas reconocen al principio de incertidumbre de Hilbert, también señalado por los físicos como incertidumbre de Heisenberg, afirma que los valores dados en el espacio directo así como en las frecuencias no debe ser menor a la constante geométrica de un objeto. La función L^2 en las Wavelets discretas es interpretado como un conjunto de proyecciones de los coeficientes que son medidos de acuerdo a la escala. (Grim, et al, 2010)

En consecuencia, las wavelet continuas y discretas proporcionan información similar equivalente al análisis de señales utilizado por Fourier ya que esta solo ofrece una grafica frecuencial y la Transformada Wavelet aporta información en tiempo y frecuencia en momentos real. A partir del principio de incertidumbre de Heisenberg las condiciones limitadas en la consecución tiempo-frecuencia es posible hacer un análisis utilizando Wavelet ya que las distintas frecuencias y diferentes resoluciones hacen posible que la señal sea estudiada. (Grim, et al, 2010)

Dentro de las diferentes funciones, la clasificación de señales se realiza a través de la wavelet discreta y para el análisis la continua. Teniendo en cuenta sus aplicaciones la versión discreta es utilizada ampliamente en ingeniería e informática y la continua en la física por sus aportes en la consecución de datos confiables y un análisis asertivo en el dominio de tiempo-frecuencia que son importantes y aplicables en las diferentes especialidades que tiene la industria.

Asimismo, la Transformada Wavelet no es solamente local en tiempo, sino también en frecuencia. Se pueden mencionar algunas de las formas de utilización que tiene esta

herramienta como son el análisis de señales no estacionarias, así como sísmicas y electrocardiográficas, también en sonidos de radar y muchas otras aplicaciones utilizadas en la industria ya que posee asertividad y comprensión en los datos y graficos a la hora de evaluar patrones, esquemas o modelos (Grim, et al, 2010)

Características de la función wavelet. Las funciones que ofrece hacen que sea de soporte compacto en la estabilidad asertiva finita, en la cual se encuentra información relevante en el dominio del tiempo, así mismo, tiene un espectro pasa-banda con ancho de banda efectivo finito, lo cual es apropiado para localizar la información en el dominio de la frecuencia, el área bajo la curva es cero, es decir es oscilatoria. Fue diseñada originalmente para estudiar señales no estacionarias y como presenta covariancia ante retrasos, parece ser la mejor herramienta para estudiar señales con espectro de ley de potencias, tratándose de un análisis de tiempo-frecuencia, es capaz de revelar aspectos de los datos como tendencias, puntos de quiebre, discontinuidades en las derivadas, y autosimilaridad; el análisis de wavelets puede muchas veces comprimir o eliminar ruido sin degradación apreciable. (Grim, et al, 2010)

4. Metodología

El presente proyecto documenta la identificación de los descriptores apropiados que permiten detectar fallas en máquinas rotativas caracterizando los más significativos, basado en la revisión bibliográfica para evidenciar la investigación, donde se seleccionaron 3 proyectos de pregrado de la universidad Antonio Nariño sede Bucaramanga que cumplieron con los requerimientos de esta propuesta. Así mismo se caracterizaron y analizaron los resultados basados en los datos que arrojaron las pruebas en las investigaciones anteriores, y así dar cumplimiento a los objetivos planteados en este proyecto como herramienta para la obtención de resultados y conclusiones que permita la comparación entre estudios similares.

4.1 Selección de datos

Esta fase permitió evaluar y definir los proyectos apropiados para la identificación de datos significativos, definiendo que los descriptores RMS, PICO y ENERGIA como los mas relevantes en los estudios realizados.

Los principales problemas que se presentan al clasificar características de desbalanceo y desalineación en análisis de vibraciones son los relacionados con la obtención de descriptores adecuados que permitan una alta diferenciación entre cada uno de esos patrones, para el analisis de comportamiento por medio de la transformada de fourier se utiliza la familia Wavelet cuya función es graficar, caracterizar y diferenciar claramente cada curva a cada frecuencia específica, asimismo se registran en el programa del software LABVIEW para obtener los datos requeridos.

A continuación, se describen los proyectos de pregrado de la Universidad Antonio Nariño sede Bucaramanga, seleccionados para dar cumplimiento a los objetivos propuestos en esta investigación.

Proyecto 1. Algoritmo en matlab para la detección de desbalanceo en equipos rotativos, usando transformada de wavelet.

Este proyecto de investigación es realizado por Camilo Gonzales y Walther Pedraza en el año 2013 se muestra la implementación de un algoritmo que pueda ser trabajado con una metodología que permita el diagnóstico de condiciones de fallas en máquinas rotativas afectadas por desbalanceo, utilizando la transformada wavelet.

Es importante destacar, que, aunque el objetivo del presente estudio no fue describir el fenómeno del desbalanceo en función de la transformada wavelet, si se ha presentado un aporte significativo en esta área al encontrar una familia wavelet que permite discriminar patrones de vibración asociados al desbalanceo. Ya la descripción en términos de los coeficientes de la wavelet seleccionada se deja como trabajo futuro.

Proyecto 2. Clasificación automática de patrones de desbalanceo y desalineamiento en una máquina rotativa usando transformada wavelet.

En el presente trabajo se ha dispuesto la realización de un algoritmo que se orienta a clasificar de manera automática los patrones de vibraciones mecánicas asociadas al desbalanceo y al desalineamiento angular, basado en la transformada de wavelet siendo capaz de decidir si la maquina en estudio presenta o no estas anomalías.

En este sentido, se reportan tanto el algoritmo de clasificación aplicando la técnica de razonamiento basado casos, como el cálculo de las características (Valor RMS, Valor Pico y energía de la respuesta en frecuencia del sistema) que describen el comportamiento del espectro de frecuencias en estudio.

La creación de un algoritmo en Matlab para la detección del desbalanceo en equipos rotativos usando la transformada de wavelet, permitiría la descomposición de señales de manera similar a como se hace cuando se utiliza la Transformada de Fourier.

Por tal motivo, Carlos Vásquez y William Ruiz en el año 2014, presentaron un proyecto en el que proponen implementar la técnica de descomposición wavelet para el análisis de la señal, con el fin de clasificar automáticamente los patrones de desalineamiento y desbalanceo de las maquinas rotativas y mejorar los porcentajes de acierto que mostraron los trabajos previos

Proyecto 3. Extracción de características representativas respecto al fenómeno de desbalanceo y desalineamiento angular utilizando la transformada Wavelet

En el trabajo realizado por Nelson Higuera, Jairo Rueda y Oswaldo Silva en el año 2014, se busca la extracción de características representativas respecto al fenómeno de desbalanceo y desalineamiento angular utilizando la transformada de Wavelet además del software para el procesamiento de la señal de vibración LabVIEW, en donde se diseñó un Instrumento Virtual (VI), para mostrar descompuesta la vibración compleja en un plano espectral, que facilita observar el comportamiento de la frecuencia fundamental o más conocida como frecuencia de giro del eje.

En este sentido el principal problema que se presentó al clasificar características de desbalanceo y desalineación en análisis de vibraciones fue el relacionado con la obtención de los descriptores y los tratamientos adecuados que permitieran una alta diferenciación entre cada uno de los patrones. El modelo de diseño experimental para este trabajo se desarrolló para un sistema factorial de dos factores con dos niveles. Este sistema permite la interacción de los datos de manera sencilla, y en la cual se puede observar la influencia de cada factor ya sea individual o en conjunto, de acuerdo a esto este sistema es muy importante para los análisis y posteriormente los resultados

4.2 Caracterización y análisis

Considerando la extensa diversidad de registros en la base de datos obtenidos de las pruebas realizadas a las detecciones de fallas como desbalanceo y desalineación en máquinas rotativas en los proyectos 1,2, y 3 aquí descritos se realizó un análisis de los descriptores apropiados con los resultados

4.3 Presentación de resultados

Para la debida ejecución y desarrollo del proyecto se toma como referencia el conjunto de datos de los proyectos 1,2, y 3 aquí descritos, para realizar una comparación de tal forma que se logren identificar los descriptores apropiados para el análisis de vibración en la detección de fallas en maquinarias rotativas, dando cumplimiento a los objetivos planteados.

5. Análisis y caracterización de los resultados

A continuación, se describe el proceso de análisis de los resultados mediante la caracterización de los datos obtenidos de los proyectos 1,2 y 3 objeto de este estudio y la posible relación al compararlos para lograr identificar los datos más relevantes.

5.1 Resultado y Análisis.

Teniendo en cuenta lo anterior, el análisis de los resultados recopilados en este proyecto se determina, después de realizar la revisión bibliográfica de los proyectos 1,2, y 3, donde se analizan los datos después de realizar las pruebas requeridas por cada propuesta y de esta manera lograr la identificación de los descriptores apropiados para el análisis de vibración en la detección de fallas en maquinaria rotativa.

5.1.1 Proyecto 1.

A continuación, se procede a realizar el análisis de los resultados obtenidos después de ejecutar las pruebas para la detección de desbalanceo por medio de la transformada de Fourier y comparando los métodos que se pueden aplicar con las familias de la transformada de Wavelet, se asigna los siguientes descriptores: RMS, PICO y ENERGIA, así como la diversa combinación de estos tres descriptores, (RMS-PICO; RMS-ENERGIA; PICO-ENERGIA; RMS-PICO-ENERGIA). Para poder obtener de una forma asertiva un alto porcentaje de precisión en la distinción de variaciones generadas teniendo en cuenta patrones existentes. Esta prueba consiste en obtener señales de desbalanceo a diferentes valores de frecuencia en Hz (10,20,30,40,50,60), cabe apuntar que estos valores

inferen directamente los rpm del motor, se registran en el programa del software LABVIEW para su respectivo análisis y estudio.

Como método de caracterización se tuvo en cuenta cada uno de los valores en promedio de porcentaje obtenido en las mediciones realizadas con la aplicación de las diferentes familias de la transformada wavelet como coiflet, symlet y daubechies, y fueron usadas con los diferentes descriptores y sus posibles combinaciones con el fin de obtener la mayor cantidad de aciertos y de esta forma graficarlos, para este caso fueron analizados 20 aciertos. (ver anexo A)

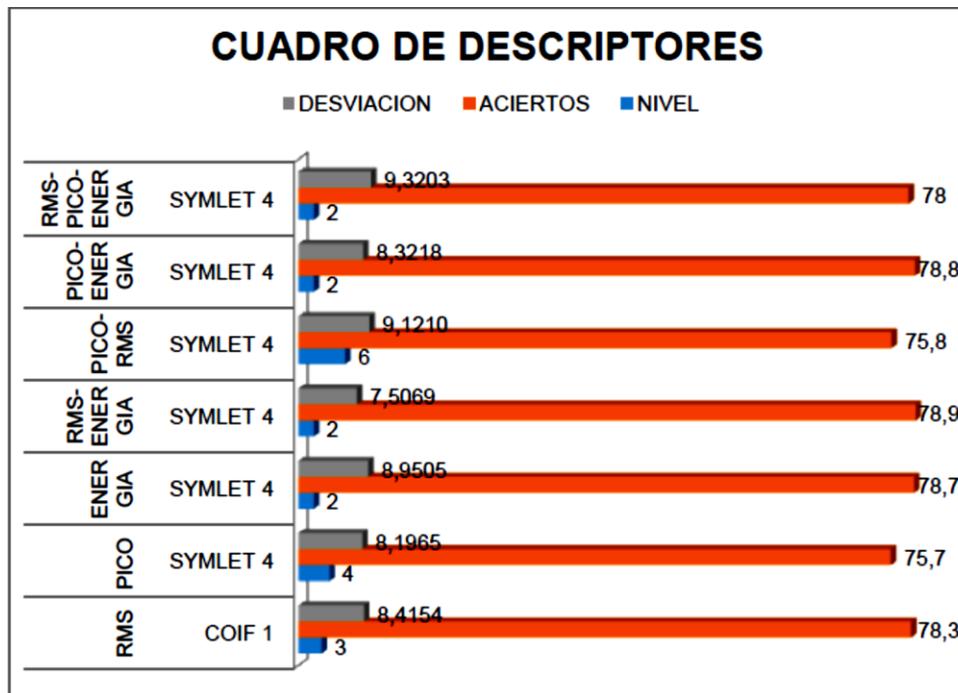
De acuerdo a los resultados agrupados se obtiene los datos con mayor valor de asertividad y selección de la mejor familia de wavelet aplicado a desbalanceo en máquinas rotativas. (Ver tabla 5-1)

Tabla 5-1. Datos de mayor asertividad y selección familia Wavelet

VARIABLE	ORDEN	NIVEL	ACIERTOS	DESVIACION
RMS	COIF 1	3	78,3	8,4154
PICO	SYMLET 4	4	75,7	8,1965
ENERGIA	SYMLET 4	2	78,7	8,9505
RMS-ENERGIA	SYMLET 4	2	78,9	7,5069
PICO-RMS	SYMLET 4	6	75,8	9,1210
PICO-ENERGIA	SYMLET 4	2	78,8	8,3218
RMS-PICO-ENERGIA	SYMLET 4	2	78	9,3203

En la gráfica 5-1. Se consolidan los datos con los mejores aciertos para los descriptores PICO, RMS Y ENERGIA y sus posibles combinaciones, encontrando que la mayor cantidad de aciertos para el patrón de falla seleccionado (desbalanceo), es la SYMLET de orden 4 y en un nivel de descomposición de la señal de 2. (Gonzales et al, 2013)

Gráfica 5-1. Cuadro de descriptores



(Gonzales et al, 2013)

En la tabla 5-1 se observa la respuesta en porcentaje de los mejores aciertos de las tres familias de wavelets usadas (coiflet, Symlet y daubechies), usadas para los diferentes descriptores y sus posibles combinaciones. (Gonzales et al, 2013)

En este sentido, se observa en la tabla 5-1 y grafica 5-1, que el mayor porcentaje de aciertos se logra en la combinación de los descriptores RMS Y ENERGIA con un valor de porcentaje del 78,9%, por lo cual queda demostrada su superioridad para estos efectos comparado con el resto de descriptores que fueron analizados. así mismo se obtuvo un valor en porcentaje de acierto del 78,7% para el descriptor de ENERGIA, y un valor de porcentaje del 78% para la combinación de los descriptores RMS-PICO-ENERGIA.

Resaltando el descriptor de ENERGIA como un descriptor base para la obtención de los mejores resultados. Otro de los valores que se resaltan en porcentaje de acierto es el del descriptor RMS con un 78,3%, el cual es un valor cercano a los relacionados con el del descriptor ENERGIA. De igual forma, un factor fundamental para la obtención de los mejores valores en porcentaje de acierto se relaciona con el uso de la familia de las wavelets SYMLET de cuarto orden. Adicionalmente se pudo observar que en la medida que se avanza en la descomposición de la señal el valor de porcentaje de aciertos disminuye.

5.1.2 Proyecto 2.

En la actualidad se tiene una extensa variedad de métodos o algoritmos de categorización o identificación de patrones que permiten detectar a tiempo los fallos mecánicos en equipo rotativo asociados al desbalanceo y la desalineación angular. Por esta razón se desarrolló un algoritmo que se orienta a clasificar de manera automática los patrones de vibraciones mecánicas asociadas al desbalanceo y al desalineamiento angular, basado en la transformada de wavelet siendo capaz de decidir si la máquina presenta o no fallas.

Se define la adquisición de datos en el banco de pruebas existente en la Universidad Antonio Nariño para el análisis de vibraciones, teniendo en cuenta la posición de los sensores en el eje del banco de pruebas (lado acople o lado cojinete). Al grupo de datos obtenidos se le asignan nombres con fines de funcionalidad dentro del algoritmo, teniendo en cuenta la condición de trabajo de la máquina (con carga o sin carga).

Siguiendo con el análisis en el segundo proyecto se tendrá en cuenta los descriptores: RMS, PICO y ENERGIA, así como la diversa combinación de estos tres descriptores, (RMS-PICO; RMS-ENERGIA; PICO-ENERGIA; RMS-PICO-ENERGIA). por medio de la transformada de Fourier y comparando los métodos que se pueden aplicar con las familias de la transformada de Wavelet, seguidamente se caracterizaron los datos con los valores obtenidos. (Ver anexo B)

A continuación, se muestran los resultados de los porcentajes más altos aplicados a valores combinados PICO, RMS y ENERGÍA y sus diferentes combinaciones. usando Coiflet, Symlet y Daubechies. (Ver tabla 5-2)

Tabla 5-2. Valores combinados PICO; RMS y ENERGIA

VARIABLE	ORDEN	NIVEL	ACIERTOS	DESVIACIÓN
RMS	COIF1	3	78,3	8,4
PICO	SYMLET4	4	75,7	8,2
ENERGÍA	SYMLET4	2	78,7	8,9
RMS-PICO	SYMLET4	6	75,8	9,1
RMS-ENERGÍA	SYMLET4	2	78,9	7,5
PICO-ENERGÍA	SYMLET4	2	78,8	8,3
RMS-PICO-ENERGÍA	SYMLET4	2	78	9,3

(Ruiz, et al, 2014)

Respuesta en porcentaje de los mejores aciertos de las tres familias de wavelets usadas (coiflet. Symlet y daubechies), para los diferentes descriptores y sus posibles combinaciones (Ruiz, et al, 2014). (Ver grafica 5-2)

Gráfica 5-2. Respuesta en porcentaje de los mejores aciertos de las tres familias de wavelets



Ruiz, et al, (2014)

Para obtener el Desarrollo de un algoritmo en la detección de desbalanceo y desalineamiento angular, con los anteriores datos, se realizó el cálculo de los descriptores (RMS, PICO, ENERGÍA), usando la transformada de Wavelet, teniendo en cuenta las familias de wavelets aplicadas a estos descriptores donde se puede determinar que este método sirve efectivamente para realizar un análisis de clasificación automática sencilla o múltiple en fallas, mediante la implementación de un algoritmo en MATLAB.

Las pruebas se practicaron con el objetivo de seleccionar las características que no tenían un aporte significativo relevante y de hecho lograron minimizar el buen desempeño de los algoritmos, donde se pudo concluir que el mayor porcentaje de aciertos se logra en la combinación de los descriptores RMS Y ENERGIA con un valor de porcentaje del 78,9%. Así mismo se obtuvo un valor en porcentaje de acierto del 78,7% para el descriptor de ENERGIA, y un valor de porcentaje del 78% para la combinación de los descriptores RMS-PICO-ENERGIA. Por último, se resalta el porcentaje de acierto en el descriptor RMS con un 78,3%, el cual es un valor cercano a los relacionados con el del descriptor ENERGIA. De igual forma, el uso de la familia de las wavelets SYMLET de cuarto orden, es significativa para la obtención de valores elevados en porcentaje de aciertos. Adicionalmente se pudo evidenciar en el análisis de los datos que la señal tiene esquemas de comportamiento de descomposición y a medida que avanza disminuye el valor de lo aciertos.

5.1.3 Proyecto 3

La etapa de obtención de datos es uno de los primeros y más importantes pasos para realizar un mejor análisis de vibraciones. Dependiendo del rigor y la precisión que influirán en la fidelidad del diagnóstico se obtendrán datos confiables para realizar una acertada interpretación de los mismos. Las prueba tomadas a la maquina rotativa, consistió en obtener señales de desbalanceo el cual será generado por los diferentes pesos que se le coloquen al eje y a diferentes frecuencias del motor, inicialmente se realizara prueba en vacío y después se generara el desbalanceo con los diferentes pesos, se registran en el programa del software LABVIEW para obtener los datos requeridos, seguidamente se

realizan las pruebas de desalineamiento generando un ángulo de 1.07° en el lado del motor para generar falla en el eje del sistema para visualizar el comportamiento de las vibraciones, obtener datos realizando pruebas con diferentes frecuencias del motor.

Se dispuso la construcción de un algoritmo para el análisis de vibraciones mecánicas en máquinas rotativas afectadas por desbalanceo y desalineamiento, para extraer descriptores (características de cada clase) que determinen el comportamiento de las características RMS, PICO Y ENERGÍA en los fenómenos de desbalanceo y desalineamiento La metodología consistió en inducir desbalanceo con una y dos masas en la rueda número 1 y un desalineamiento lado motor de 1.7° , posteriormente se realizó la medición de las vibraciones a través de la interfaz gráfica, la cual permite la visualización de los espectros de frecuencia.

Seguidamente se define la adquisición de los diferentes datos teniendo en cuenta las variantes propuestas, es decir con una carga en la rueda 1, con dos cargas en la rueda 1, con desalineamiento lado motor de 1.7° y datos sin carga en estado nominal. Para cada una de las variantes se tomaron registros a 20 Hz, 40 Hz y 60 Hz, arrojando un total de 12 registros. con los datos obtenidos se realizó la construcción de las respectivas matrices para cada fenómeno de vibración para un total de 3 matrices MATDESAL, MATDESB Y MATNOM, cada una con un total de 1000 valores. (Ver anexo C)

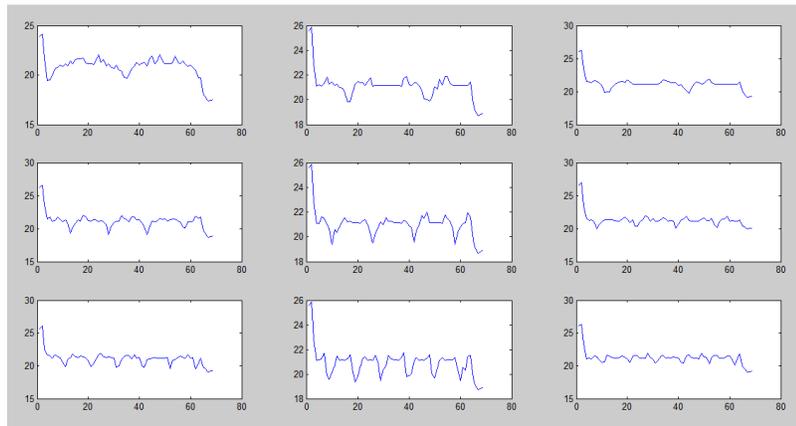
Para el cálculo de los descriptores se realizó en primera instancia la obtención de los patrones wavelet a los datos obtenidos aplicándoles un mecanismo de inferencia. Posteriormente se calcularon los valores RMS del espectro, así como la energía y el valor pico.

Para la caracterización de las señales de desalineamiento, desbalanceo y en estado nominal sin peso a diferentes valores de frecuencia en Hz (20; 40; 60). Es importante resaltar que estos valores infieren directamente los rpm del motor, que se registran en el programa del software LABVIEW para su respectivo análisis y estudio. El resultado de las caracterizaciones se obtiene del análisis de los siguientes descriptores: RMS, PICO,

ENERGIA Y PROMEDIO la elección del mejor descriptor para estas pruebas, se realizaron pruebas usando familias de las wavelets (coiflet, symlet), con el fin de obtener la mejor caracterización y graficación.

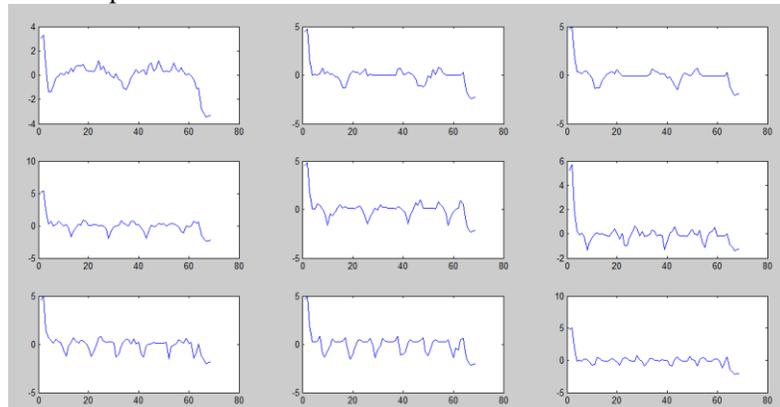
A continuación, se muestran los resultados en las gráficas 5-3 y 5-4, de las pruebas realizadas usando Familia de funciones wavelet symlet 4, nivel 4 para el análisis de desalineamiento, desbalanceo y nominal a 20, 40 y 60 Hz, y Agrupación de Desalineamiento, Desbalanceo y Nominal a 20, 40 y 60Hz symlet 4 Nivel 4, removiendo los promedios.

Gráfica 5-3. Agrupación de Desalineamiento, Desbalanceo y Nominal a 20, 40 y 60Hz symlet 4 Nivel 4



Higuera, et al, (2014)

Gráfica 5-4. Agrupación de Desalineamiento, Desbalanceo y Nominal a 20, 40 y 60Hz symlet 4 Nivel 4, removiendo los promedios.



Higuera, et al, (2014)

Al analizar los resultados obtenidos se puede apreciar que la característica para cada fenómeno es compleja. dada la respuesta de la función wavelet symlet 4, nivel 4 para el mismo análisis de vibraciones con las características agrupadas de desalineamiento, desbalanceo y nominal.

En la función Wavelet se evidencian unos aspectos y comportamientos característicos específicos de cada fenómeno de vibraciones que se mantienen constantes en las diferentes frecuencias de 20, 40 y 60 Hz, así mismo se resalta que el principal problema para identificar características de desbalanceo y desalineación de vibraciones están relacionados con la obtención de descriptores adecuados que permitan una significativa deferencia entre cada uno de los patrones.

En la gráfica 5-4, se avanza en la búsqueda de un descriptor donde se removieron los promedios para evidenciar los cruces por cero, las curvas son exactamente iguales, donde se observa que la cantidad de cruces por cero puede ser un descriptor adecuado que permitan una diferenciación entre cada uno de los patrones de vibración

Dentro del diseño factorial se selecciona el de dos factores con dos niveles teniendo como referencia el banco de vibraciones de la universidad Antonio Nariño sede Bucaramanga, se determinan dos tiempos en el primero se analiza las vibraciones por desbalanceo y en el segundo el desalineamiento angular, se trabaja con los datos obtenidos en el banco utilizando la transformada Wavelet, desarrollando los valores RMS para cada una de las muestras. Ver Tabla 5-3

Tabla 5-3. Diseño factorial

	20 Hz	40 Hz	60 Hz
Nominal	21,2276328	21,3308366	21,2636197
Desbalanceo	21,1531967	21,0628199	20,9204163

	20 Hz	40 Hz	60 Hz
Nominal	21,2276328	21,3308366	21,2636197
Desbalanceo	20,8669639	21,1654379	21,1157897

Higuera, et al, (2014)

Con base en los registros de los datos recolectados y procesados se realizan las siguientes combinaciones para evaluar los resultados de los efectos sobre la respuesta según el diseño factorial

Desbalanceo

Tabla 5-4. Diseño factorial para el desbalanceo

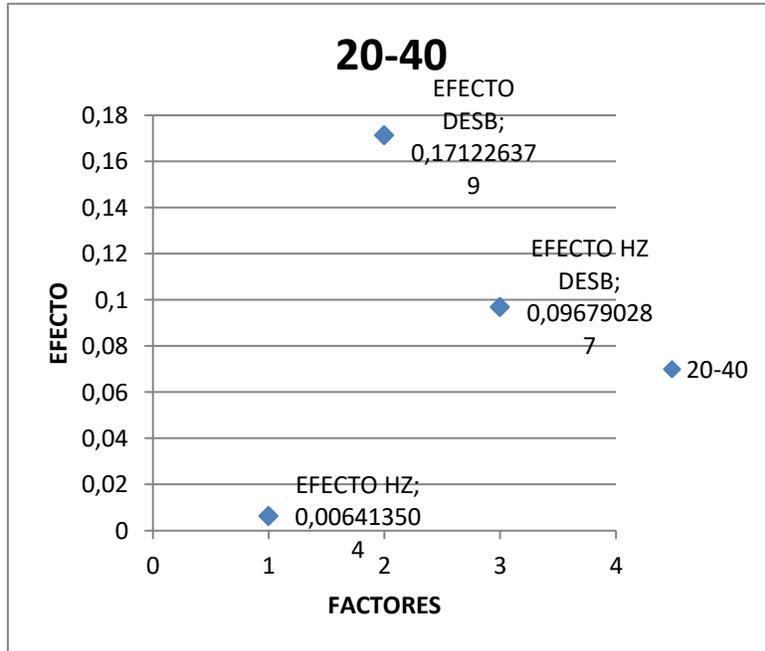
Desbalanceo			
	20 Hz	40 Hz	60 Hz
Efecto HZ	0,0064135	-0,10481029	-0,09839678
Efecto DESB	0,17122638	0,30561	-0,20881971
Efecto HZ DESB	0,09679029	0,03759333	0,13438362

	Análisis	Factor influyente
Desbalanceo	20-40	Hz
	40-60	M
	20-60	Hz-M

Higuera, et al, (2014)

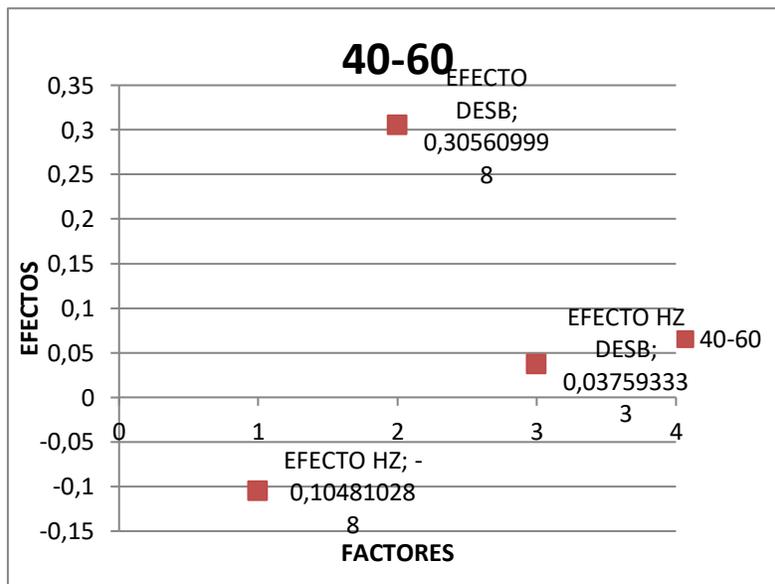
A continuación, las gráficas determinan la influencia o no de cada factor.

Gráfica 5-5. Influencia para el factor 20-40 Hz de desbalanceo

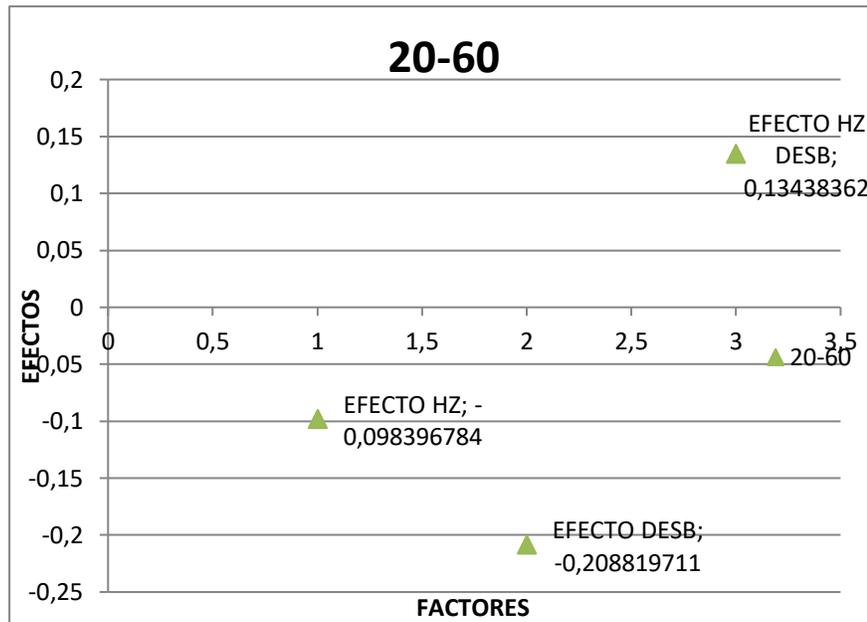


Higuera, et al, (2014)

Gráfica 5-6. Influencia para el factor 40-60 Hz de desbalanceo



Higuera, et al, (2014)

Gráfica 5-7. Influencia para el factor 20-60 Hz de desbalanceo

Higuera, et al, (2014)

En el análisis de los resultado de las gráficas de diseño factorial de los dos factores y dos niveles del método Half Normal Plot, se observa en la gráfica 5-5, que para el desbalanceo a 20-40 Hz, el factor influyente la frecuencia y en la gráfica 5-6, el desbalanceo a 40-60 Hz, evidencia que el valor influyente es la masa, finalmente en la gráfica 5-7, el desbalanceo a 20-60 Hz, evidencia que la interacción de los dos factores (frecuencia-masa) es influyente, asimismo los valores son muy cercanos y la dispersión de los datos son bastante próximos logrando identificar un rango de escala menor.

Desalineamiento

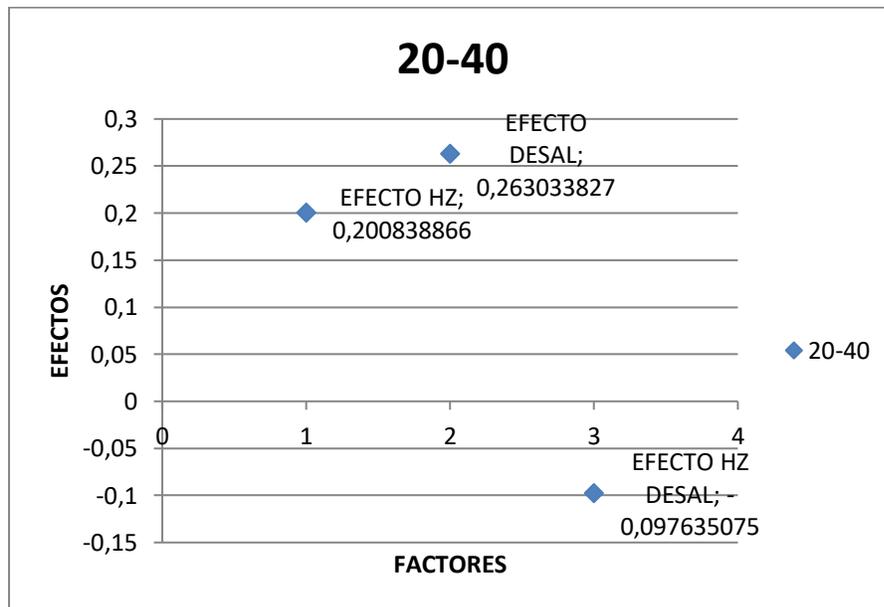
Tabla 5-5. Diseño factorial para el desalineamiento

	Desalineamiento		
	20-40	40-60	20-60
Efecto HZ	0,20083887	-0,05843254	0,14240633
Efecto DESAL	0,26303383	0,15661433	-0,25424941
Efecto HZ DESAL	-0,09763507	-0,00878442	-0,10641949

	Análisis	Factor influyente
Desbalanceo	20-40	Hz-Angulo
	40-60	Angulo
	20-60	Hz

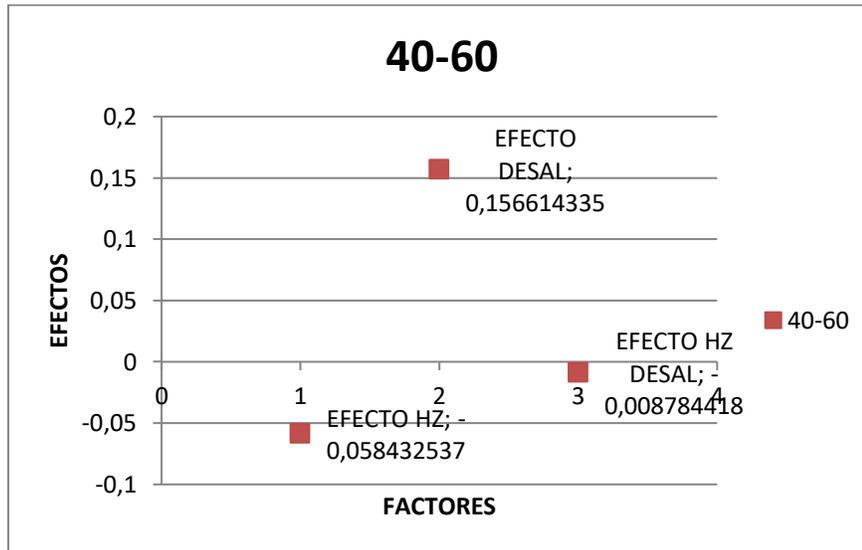
Higuera, et al, (2014)

Gráfica 5-8. Influencia para el factor 20-40 Hz de desalineamiento



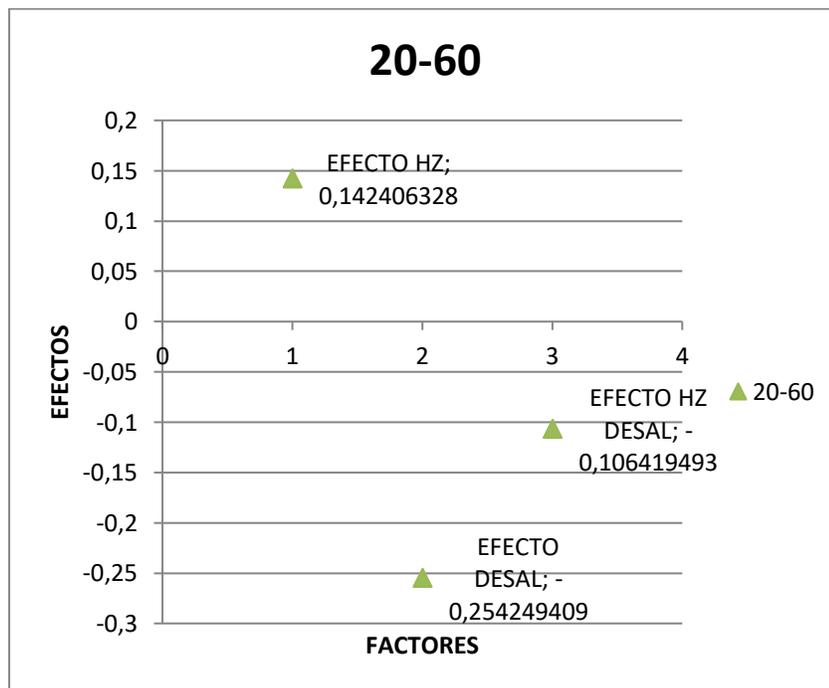
Higuera, et al, (2014)

Gráfica 5-9. Influencia para el factor 40-60 Hz de desbalanceo



Higuera, et al, (2014)

Gráfica 5-10. Influencia para el factor 20-60 Hz de desbalanceo



Higuera, et al, (2014)

El método de análisis de Half Normal Plot para el desalineamiento es importante para visualizar el comportamiento de los efectos 20-40 Hz, donde la gráfica 5-8 indica que la interacción entre los factores frecuencia y ángulo de desalineamiento son influyentes, al evaluar la gráfica 5-9, el comportamiento de los efectos 40-60Hz el ángulo de desalineamiento es influyente, seguidamente el comportamiento de factores de 20-60 Hz, la frecuencia influye en los resultados en la gráfica 5-10.

MEDA

Este método analítico, es una herramienta significativa al momento de evaluar los datos tomados desde el diseño factorial, donde la extracción de la mediana de los factores, así como el seleccionar el valor absoluto garantizan el desarrollo de la mediana de los datos resultantes que, al ser divididos por valores de la constante de 0,675, se concluye que si el factor es dos veces mayor o igual que el resultado de esta división este factor será influye.

En consecuencia y teniendo en cuenta lo anterior el conjunto de datos obtenido de los descriptores analizados en el método MEDA, para el desbalanceo no se encontró ningún efecto influyente como se observa en las tablas 5-6 y 5-7, no obstante para desalineación se puede evidenciar que en la prueba 20-40 Hz los factores influyentes son la frecuencia y el ángulo de inclinación así mismo para la prueba de 40-60 Hz, se encontró que el factor influyente es el ángulo de inclinación, indicando la eficacia del método utilizado.

Tabla 5-6. Análisis para desbalanceo con método MEDA

METODO MEDA	DESBALANCEO		
	20-40	40-60	20-60
EFFECTO HZ	0,0064135	-0,10481029	-0,09839678
EFFECTO DESB	0,17122638	0,30561	-0,20881971
EFFECTO HZ DESB	0,09679029	0,03759333	0,13438362
MEDIANA EFECTOS	0,09679029	0,03759333	-0,09839678
ABS=(VLR-MEDIANA)	0,09037678	0,14240362	0
	0,07443609	0,26801667	0,11042293
	0	0	0,2327804
MEDA=MEDIANA ABS	0,07443609	0,14240362	0,11042293
S= MEDA/0,675	0,11027569	0,21096833	0,16358952
EFFECTO >= 2S	0,22055138	0,42193665	0,32717904

Higuera, et al, 2014

Tabla 5-7. Análisis para desalineamiento con método MEDA

METODO MEDA	DESALINEAMIENTO		
	20-40	40-60	20-60
EFFECTO HZ	0,20083887	-0,05843254	0,14240633
EFFECTO DESAL	0,26303383	0,15661433	-0,25424941
EFFECTO HZ DESAL	-0,09763507	-0,00878442	-0,10641949
MEDIANA EFECTOS	0,20083887	-0,00878442	-0,10641949
ABS=(VLR-MEDIANA)	0	0,04964812	0,24882582
	0,06219496	0,16539875	0,14782992
	0,29847394	0	0
MEDA=MEDIANA ABS	0,06219496	0,04964812	0,14782992
S= MEDA/0,675	0,09214068	0,07355277	0,21900728
EFFECTO >=2S	0,18428137	0,14710554	0,43801457

Higuera, et al, 2014

Al analizar el conjunto de pruebas del proyecto 3, se encuentra que al caracterizar las variables de desbalanceo y desalineamiento a través de los valores RMS- PICO y ENERGIA, aplicando la transformada Wavelet y la herramienta matemática MATLAB, en un banco de pruebas de la Universidad Antonio Nariño sede Bucaramanga, se desarrollaron dos sistemas de dos patrones con dos variables permitiendo la interacción de los datos de forma sencilla y la influencia de cada factor individual y en conjunto obteniendo diferentes matrices, descriptores y gráficas.

El principal problema a la hora de clasificar características de desbalanceo y desalineación en análisis de vibraciones se relaciona con la obtención de descriptores y tratamientos adecuados que permitan evidenciar una diferencia significativa en cada uno de los patrones. Al comparar las ondas resultantes hay una diferencia entre nominal, desbalanceo y desalineación, porque los descriptores son más influyentes a bajas frecuencias ya que la precisión de discriminación es baja.

5.3 Análisis de resultados

Después de analizar los resultados obtenidos en los proyectos 1,2 y 3 tomados como referencia para la realización de este proyecto se logró identificar los descriptores apropiados para el análisis de vibraciones en la detección de fallas en máquinas rotativas. Se utilizaron los descriptores RMS, PICO y ENERGIA, y sus combinaciones sometidas a obtener señales de desbalanceo y desalineación a diferentes valores de frecuencia en Hz (10; 20; 30; 40; 50; 60), con un mayor porcentaje de aciertos y aplicando la transformada Wavelet y la herramienta matemática MATLAB se logra identificar que en la combinación de descriptores RMS-ENERGIA con un valor de porcentaje del 78,9%. son los más significativos por lo cual queda demostrada su superioridad para estos efectos. De igual forma se resalta el descriptor de ENERGIA como un descriptor base para la obtención de los mejores resultados con un valor de 78,7%. un factor fundamental para la obtención de los mejores valores en porcentaje de acierto se relaciona con el uso de la familia de las wavelets SYMLET de cuarto orden. Adicionalmente se pudo observar que en la medida

que se avanza en la descomposición de la señal el valor de porcentaje de aciertos disminuye.

Teniendo en cuenta lo anterior, se puede decir que las técnicas usadas tienen características importantes y apropiadas para la identificación de descriptores y el análisis de vibraciones en la detección de fallas de una máquina rotativa, donde los resultados mejoran utilizando una metodología asertiva y precisa.

6. Conclusiones y recomendaciones

Este trabajo se enfocó en la revisión de resultados previos y antecedentes con el fin de encontrar argumentos que permitieran destacar los tratamientos que pueden ser posibles y aplicables a la detección de anomalías funcionales en las maquinas rotativas. En este sentido, el análisis consistió en comparar desde el punto de vista estadístico, los resultados tomando como criterios, la formulación de la experimentación (diseño experimental) las técnicas de procesamiento de señal, los descriptores obtenidos y el desempeño en la identificación del tipo de anomalía.

De este modo, se logran evaluar, caracterizar y validar los descriptores significativos para la detección de fallas en máquinas rotativas, con la finalidad de ofrecer datos confiables y dar una interpretación más amplia que permita enriquecer el conocimiento. Los resultados de este proyecto de grado se logran sintetizar de forma general a continuación.

Se caracterizaron variables importantes en el análisis de vibraciones como desbalanceo y desalineación evaluadas a través de los descriptores RMS, PICO y ENERGIA, y sus combinaciones sometidas a valores de frecuencia en Hz (10, 20, 30, 40, 50, 60), en consecuencia, al compararlos los resultados se concluye que el mayor porcentaje de aciertos se logra en la combinación de los descriptores RMS y ENERGIA con un valor de porcentaje del 78,9%, identificándolos como descriptores apropiados, por lo cual queda demostrada su superioridad para estos efectos comparado con el resto de descriptores que fueron analizados.

La transformada Wavelet y la herramienta matemática MATLAB y el uso de las familias coiflet, symlet y daubechies, permitieron discriminar patrones de vibración asociados al desbalanceo y desalineación, siendo un factor fundamental para la obtención de los mejores valores en porcentaje de acierto, encontrando que la familia SYMLET de las wavelets de cuarto orden, es la más significativa.

Se tuvieron en cuenta los valores en porcentaje de acierto para ENERGÍA 78.7%, para la combinación RMS-PICO-ENERGIA del 78% y el descriptor RMS con un 78,3%, donde se resalta el porcentaje de acierto el cual es un valor cercano a los relacionados con el del descriptor ENERGIA, siendo este un descriptor base para la obtención de los mejores resultados, que sirvieron para comparar y validar e identificar los descriptores significativos.

6.1. Recomendaciones

Los autores del proyecto se permiten hacer las siguientes recomendaciones:

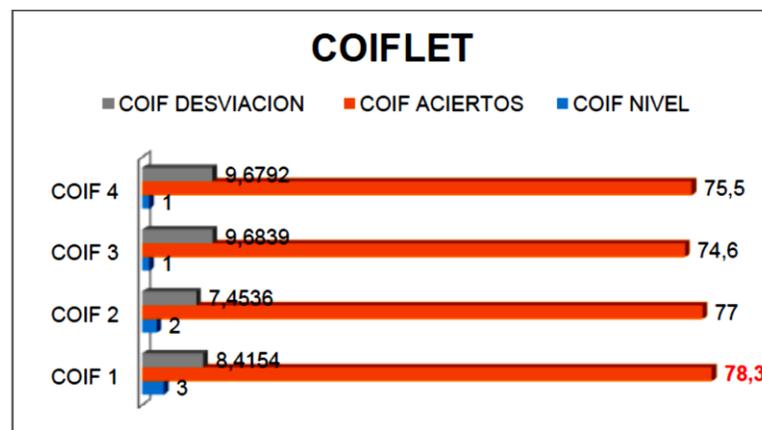
Tener en cuenta las investigaciones realizadas por el ingeniero Camilo Sandoval y la Universidad Antonio Nariño en el tema de detección de fallas en máquinas rotativas tomando como referencias estudios realizados por los estudiantes de pregrado del programa de ingeniera electromecánica y de esta forma aumentar los conocimientos académicos al realizar pruebas que involucren la adquisición de nuevos datos que sirvan para mejorar los resultados y dar solución a las fallas encontradas. Adicionalmente existe otro tipo de comportamientos dinámicos de las máquinas que pueden ser estudiados con otro tipo de transformaciones. En este sentido, se propone aprovechar la base de registros colectados en trabajos previos para que se permita su posterior análisis aplicando distintas técnicas.

A. Anexo: Resultados de las pruebas proyecto 1

Familia de funciones wavelet Coiflet para para el análisis de los valores RMS

Resultados de los porcentajes más altos de las coiflet

COIF			
ORDEN	NIVEL	ACIERTOS	DESVIACION
COIF 1	3	78,3	8,4154
COIF 2	2	77	7,4536
COIF 3	1	74,6	9,6839
COIF 4	1	75,5	9,6792

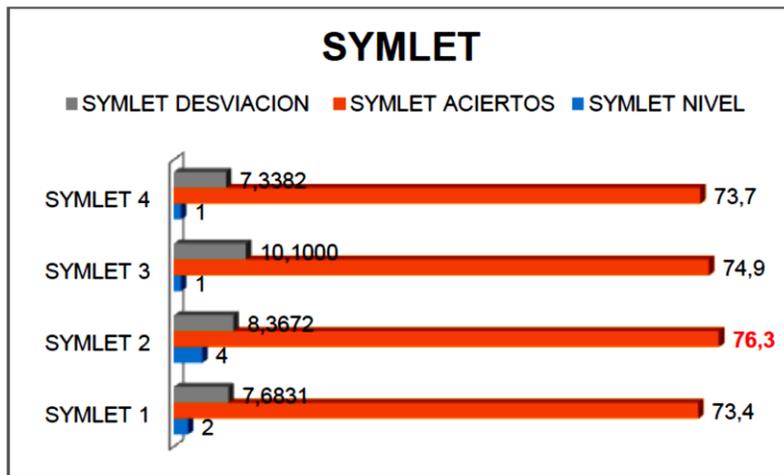


Respuesta en porcentaje de aciertos de la familia coiflet. (RMS)

Familia de funciones wavelet Symlet para RMS

Resultados de los porcentajes más altos de las symlet

SYMLET			
ORDEN	NIVEL	ACIERTOS	DESVIACION
SYMLET 1	2	73,4	7,6831
SYMLET 2	4	76,3	8,3672
SYMLET 3	1	74,9	10,1000
SYMLET 4	1	73,7	7,3382

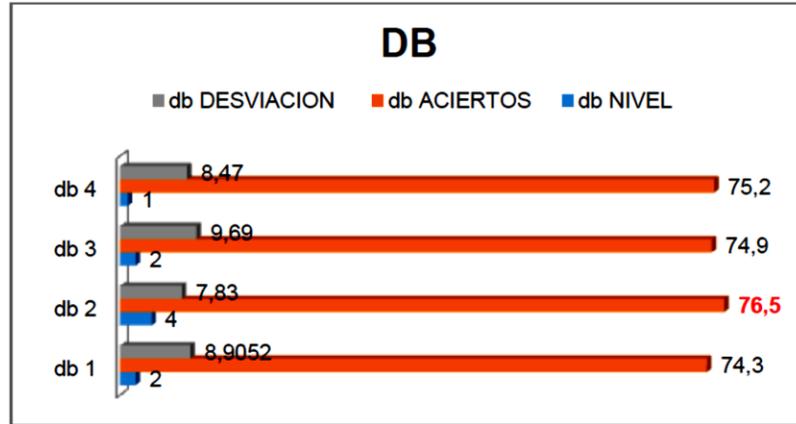


Respuesta en porcentaje de aciertos de la familia symlet. (RMS)

Familia de funciones wavelet Daubechies para RMS

Resultados de los porcentajes más altos de las daubechies

Db			
ORDEN	NIVEL	ACIERTOS	DESVIACION
db 1	2	74,3	8,9052
db 2	4	76,5	7,83
db 3	2	74,9	9,69
db 4	1	75,2	8,47

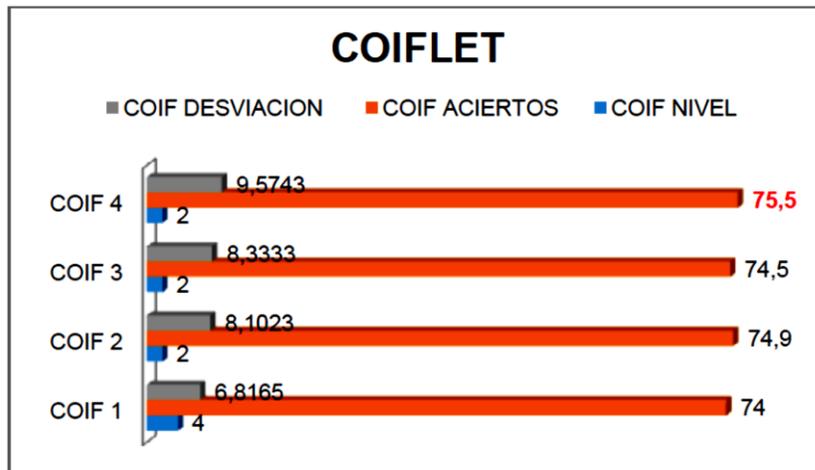


Respuesta en porcentaje de aciertos de la familia daubechies. (RMS)

Familia de funciones wavelet Coiflet para PICO

Resultados de los porcentajes más altos de las coiflet

COIF			
ORDEN	NIVEL	ACIERTOS	DESVIACION
COIF 1	4	74	6,8165
COIF 2	2	74,9	8,1023
COIF 3	2	74,5	8,3333
COIF 4	2	75,5	9,5743

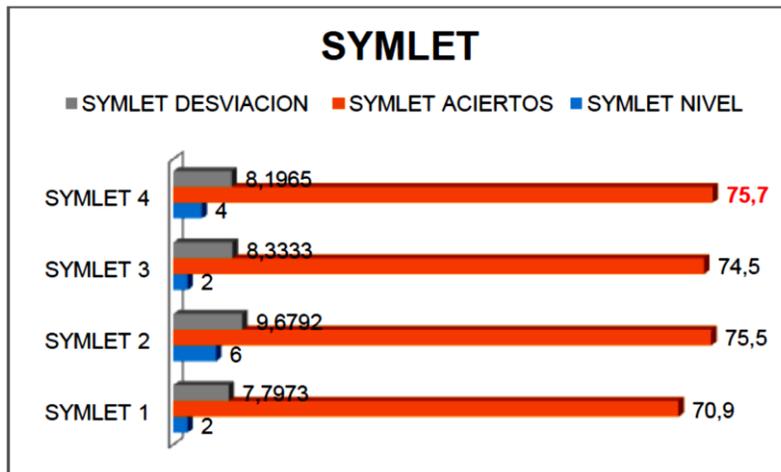


Respuesta en porcentaje de aciertos de la familia daubechies. (PICO)

Familia de funciones wavelet Symlet para PICO

Resultados de los porcentajes más altos de las Symlet

SYMLET			
ORDEN	NIVEL	ACIERTOS	DESVIACION
SYMLET 1	2	70,9	7,7973
SYMLET 2	6	75,5	9,6792
SYMLET 3	2	74,5	8,3333
SYMLET 4	4	75,7	8,1965

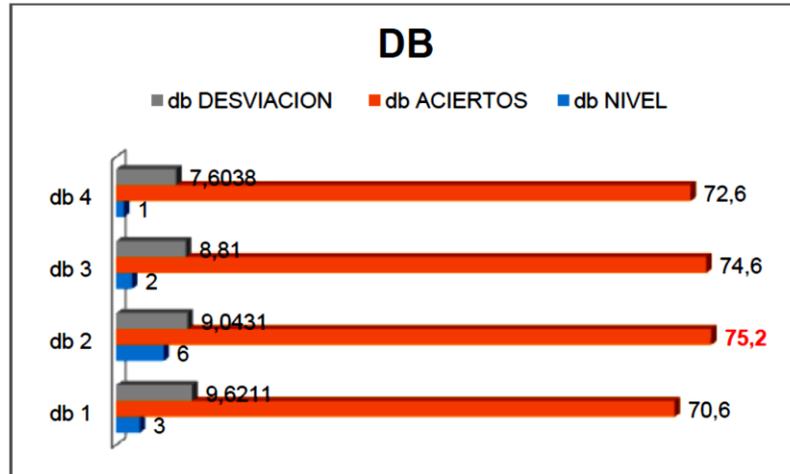


Respuesta en porcentaje de aciertos de la familia symlet. (PICO)

Familia de funciones wavelet Daubechies para PICO

Resultados de los porcentajes más altos de las Daubechies

db			
ORDEN	NIVEL	ACIERTOS	DESVIACION
db 1	3	70,6	9,6211
db 2	6	75,2	9,0431
db 3	2	74,6	8,81
db 4	1	72,6	7,6038

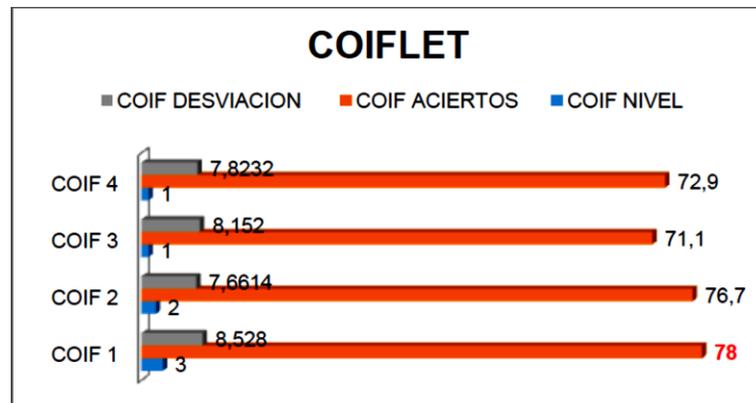


Respuesta en porcentaje de aciertos de la familia Daubechies. (PICO)

Familia de funciones wavelet Coiflet para ENERGÍA

Resultados de los porcentajes más altos de las Coiflet

COIF			
ORDEN	NIVEL	ACIERTOS	DESVIACION
COIF 1	3	78	8,528
COIF 2	2	76,7	7,6614
COIF 3	1	71,1	8,152
COIF 4	1	72,9	7,8232

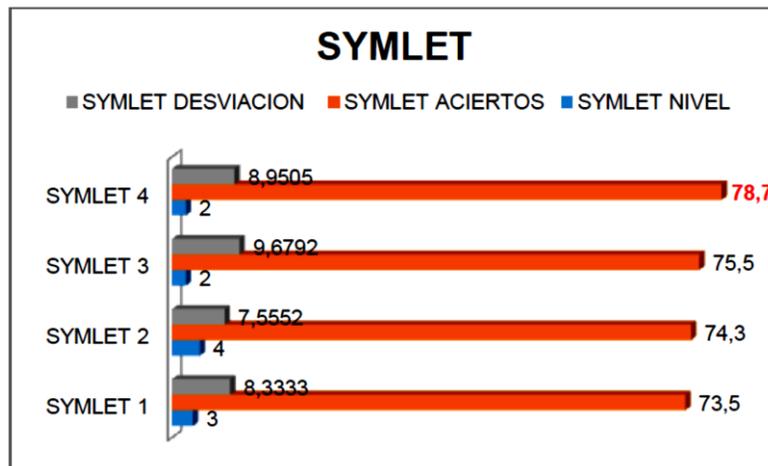


Respuesta en porcentaje de aciertos de la familia Coiflet. (ENERGIA)

Familia de funciones wavelet Symlet para ENERGIA

Resultados de los porcentajes más altos de las Symlet

SYMLET			
ORDEN	NIVEL	ACIERTOS	DESVIACION
SYMLET 1	3	73,5	8,3333
SYMLET 2	4	74,3	7,5552
SYMLET 3	2	75,5	9,6792
SYMLET 4	2	78,7	8,9505

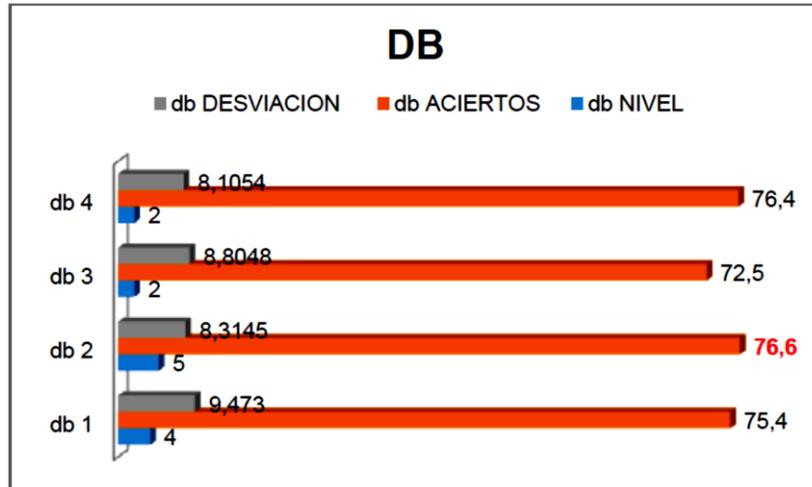


Respuesta en porcentaje de aciertos de la familia Symlet. (ENERGIA)

Familia de funciones wavelet Daubechies para ENERGIA

Resultados de los porcentajes más altos de las Daubechies

db			
ORDEN	NIVEL	ACIERTOS	DESVIACION
db 1	4	75,4	9,473
db 2	5	76,6	8,3145
db 3	2	72,5	8,8048
db 4	2	76,4	8,1054

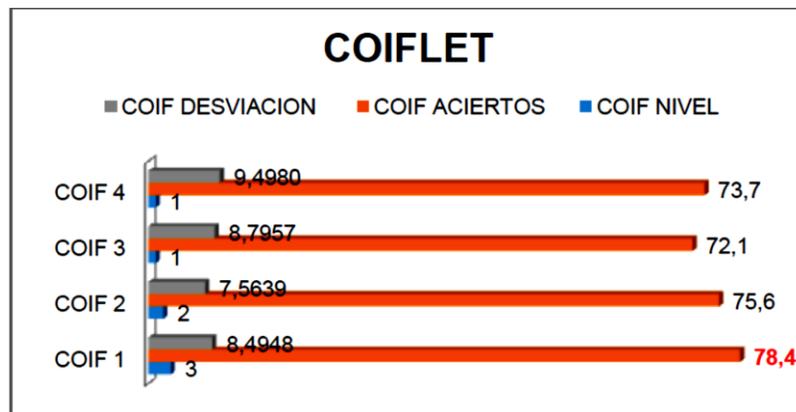


Respuesta en porcentaje de aciertos de la familia Daubechies. (ENERGIA)

Familia de funciones wavelet Coiflet para la combinación entre valores RMS Y ENERGIA

Resultados de los porcentajes más altos de las Coiflet

COIF			
ORDEN	NIVEL	ACIERTOS	DESVIACION
COIF 1	3	78,4	8,4948
COIF 2	2	75,6	7,5639
COIF 3	1	72,1	8,7957
COIF 4	1	73,7	9,4980

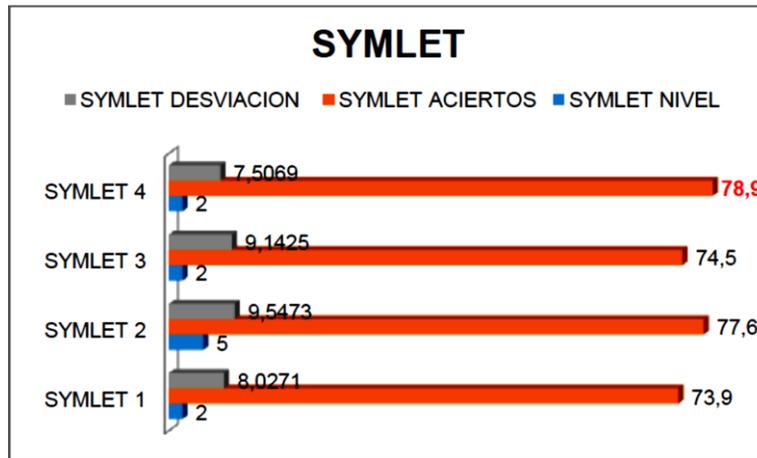


Respuesta en porcentaje de aciertos de la familia Coiflet. (RMS - ENERGIA)

Familia de funciones wavelet Symlet para la combinación entre valores RMS Y ENERGIA

Resultados de los porcentajes más altos de las Symlet

SYMLET			
ORDEN	NIVEL	ACIERTOS	DESVIACION
SYMLET 1	2	73,9	8,0271
SYMLET 2	5	77,6	9,5473
SYMLET 3	2	74,5	9,1425
SYMLET 4	2	78,9	7,5069

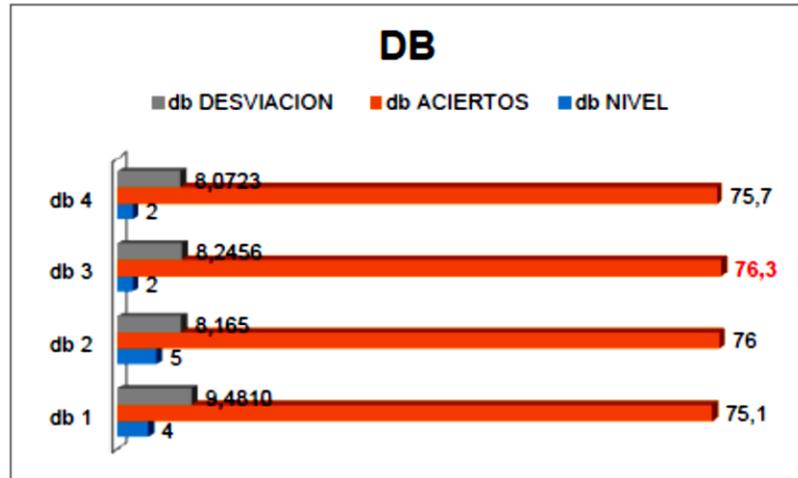


Respuesta en porcentaje de aciertos de la familia Symlet. (RMS - ENERGIA)

Familia de funciones wavelet Daubechies para la combinación entre valores RMS Y ENERGIA

Resultados de los porcentajes más altos de las Daubechies

Db			
ORDEN	NIVEL	ACIERTOS	DESVIACION
db 1	4	75,1	9,4810
db 2	5	76	8,165
db 3	2	76,3	8,2456
db 4	2	75,7	8,0723

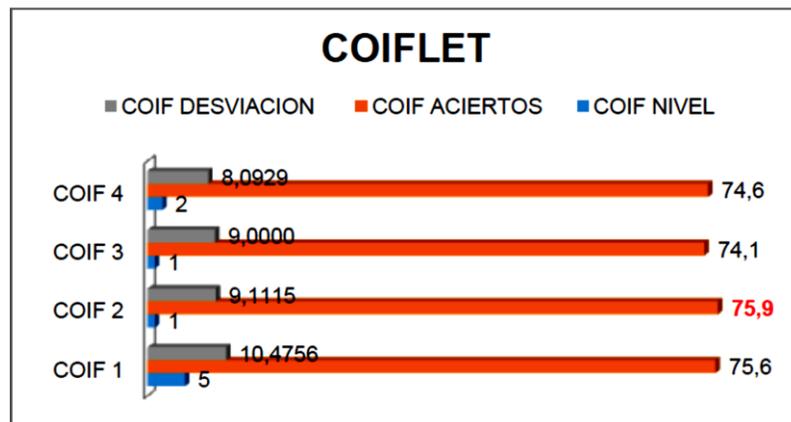


Respuesta en porcentaje de aciertos de la familia Daubechies. (RMS - ENERGIA)

Familia de funciones wavelet Coiflet para la combinación entre valores RMS Y PICO

Resultados de los porcentajes más altos de las Coiflet

COIF			
ORDEN	NIVEL	ACIERTOS	DESVIACION
COIF 1	5	75,6	10,4756
COIF 2	1	75,9	9,1115
COIF 3	1	74,1	9,0000
COIF 4	2	74,6	8,0929

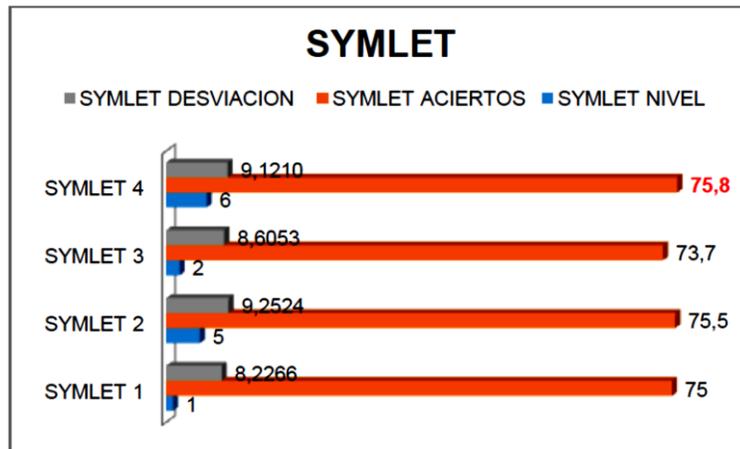


Respuesta en porcentaje de aciertos de la familia Coiflet. (RMS - PICO)

Familia de funciones wavelet Symlet para la combinación entre valores RMS Y PICO

Resultados de los porcentajes más altos de las Symlet

SYMLET			
ORDEN	NIVEL	ACIERTOS	DESVIACION
SYMLET 1	1	75	8,2266
SYMLET 2	5	75,5	9,2524
SYMLET 3	2	73,7	8,6053
SYMLET 4	6	75,8	9,1210

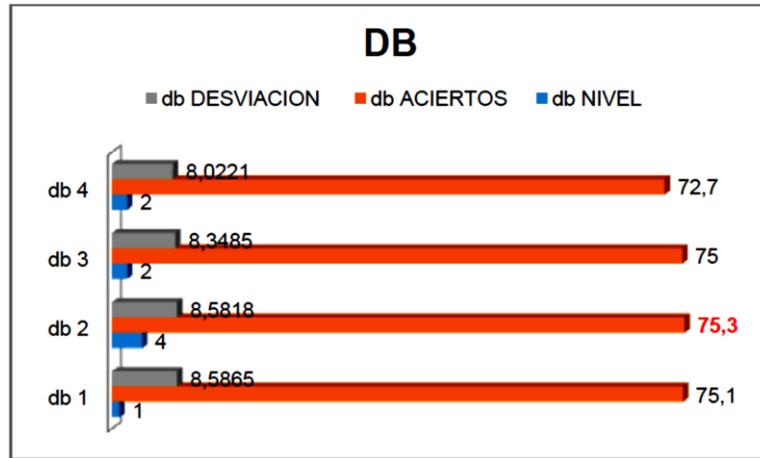


Respuesta en porcentaje de aciertos de la familia Symlet. (RMS - PICO)

Familia de funciones wavelet Daubechies para la combinación entre valores RMS Y PICO

Resultados de los porcentajes más altos de las Daubechies

db			
ORDEN	NIVEL	ACIERTOS	DESVIACION
db 1	1	75,1	8,5865
db 2	4	75,3	8,5818
db 3	2	75	8,3485
db 4	2	72,7	8,0221

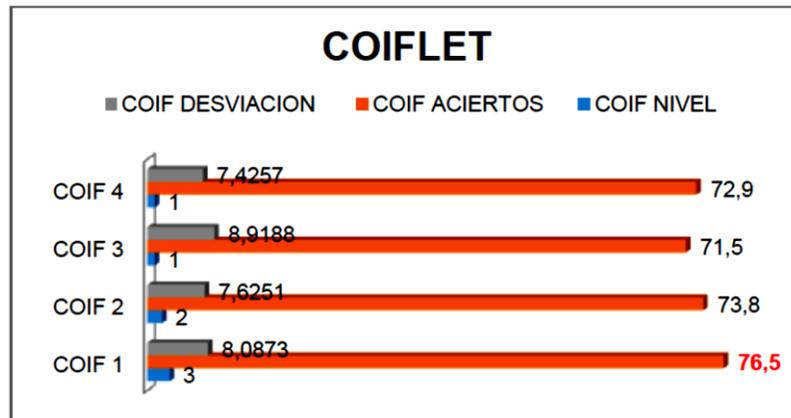


Respuesta en porcentaje de aciertos de la familia Daubechies. (RMS - PICO)

Familia de funciones wavelet Coiflet para la combinación entre valores PICO Y ENERGIA

. Resultados de los porcentajes más altos de las Coiflet

COIF			
ORDEN	NIVEL	ACIERTOS	DESVIACION
COIF 1	3	76,5	8,0873
COIF 2	2	73,8	7,6251
COIF 3	1	71,5	8,9188
COIF 4	1	72,9	7,4257

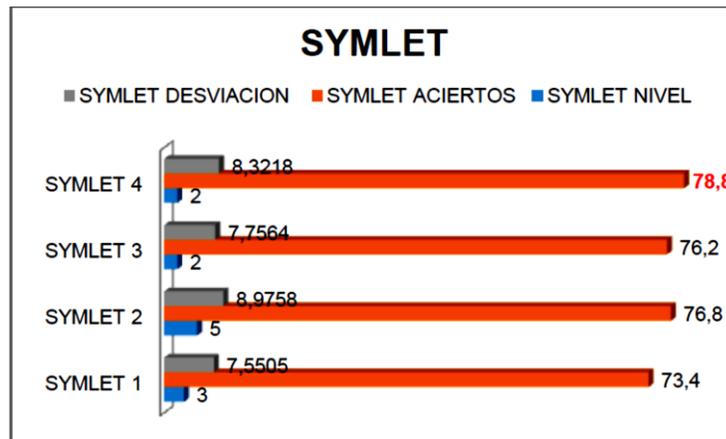


Respuesta en porcentaje de aciertos de la familia Coiflet. (PICO - ENERGIA)

Familia de funciones wavelet Symlet para la combinación entre valores PICO Y ENERGIA

Resultados de los porcentajes más altos de las Symlet

SYMLET			
ORDEN	NIVEL	ACIERTOS	DESVIACION
SYMLET 1	3	73,4	7,5505
SYMLET 2	5	76,8	8,9758
SYMLET 3	2	76,2	7,7564
SYMLET 4	2	78,8	8,3218

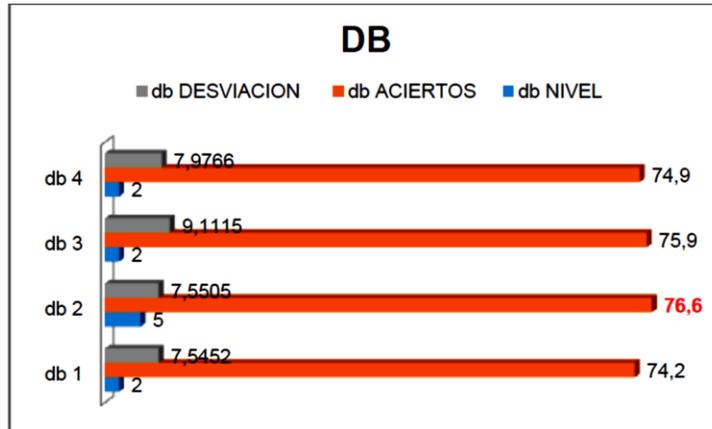


Respuesta en porcentaje de aciertos de la familia Symlet. (PICO - ENERGIA)

Familia de funciones wavelet Daubechies para la combinación entre valores PICO Y ENERGIA

Resultados de los porcentajes más altos de las Daubechies

Db			
ORDEN	NIVEL	ACIERTOS	DESVIACION
db 1	2	74,2	7,5452
db 2	5	76,6	7,5505
db 3	2	75,9	9,1115
db 4	2	74,9	7,9766

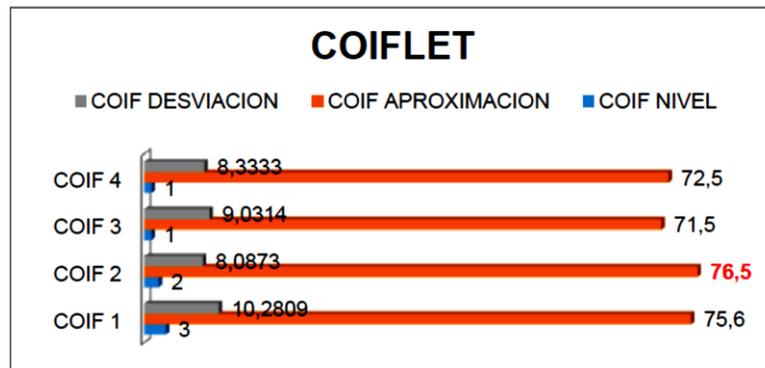


Respuesta en porcentaje de aciertos de la familia Daubechies. (PICO - ENERGIA)

Familia de funciones wavelet Coiflet para la combinación entre valores RMS, PICO Y ENERGIA

Resultados de los porcentajes más altos de las Coiflet

COIF			
ORDEN	NIVEL	ACIERTOS	DESVIACION
COIF 1	3	75,6	10,2809
COIF 2	2	76,5	8,0873
COIF 3	1	71,5	9,0314
COIF 4	1	72,5	8,3333

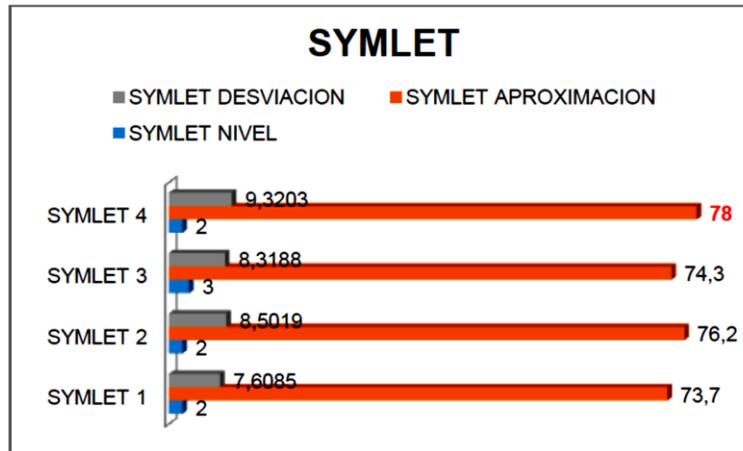


Respuesta en porcentaje de aciertos de la familia Coiflet (RMS, PICO - ENERGIA)

Familia de funciones wavelet Symlet para la combinación entre valores RMS, PICO Y ENERGIA

Resultados de los porcentajes más altos de las Symlet

SYMLET			
ORDEN	NIVEL	ACIERTOS	DESVIACION
SYMLET 1	2	73,7	7,6085
SYMLET 2	2	76,2	8,5019
SYMLET 3	3	74,3	8,3188
SYMLET 4	2	78	9,3203

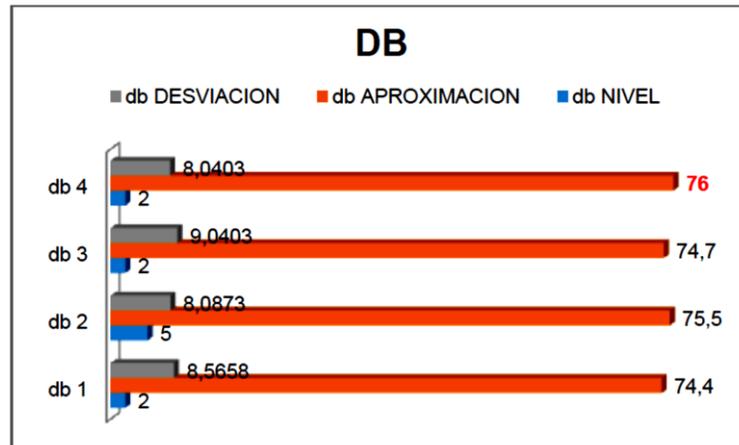


Respuesta en porcentaje de aciertos de la familia Symlet. (RMS, PICO - ENERGIA)

Familia de funciones wavelet Daubechies para la combinación entre valores RMS, PICO Y ENERGIA

Resultados de los porcentajes más altos de las Daubechies

Db			
ORDEN	NIVEL	ACIERTOS	DESVIACION
db 1	2	74,4	8,5658
db 2	5	75,5	8,0873
db 3	2	74,7	9,0403
db 4	2	76	8,0403



Respuesta en porcentaje de aciertos de la familia Daubechies, (RMS, PICO – ENERGIA

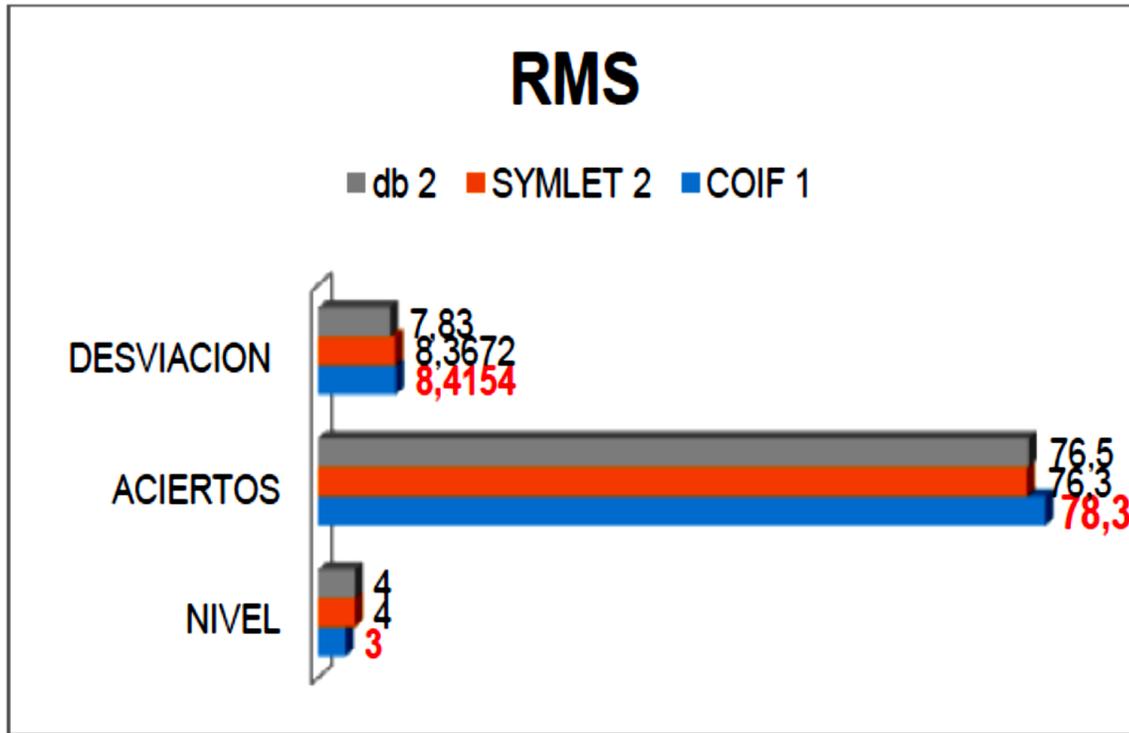
CONSOLIDACION DE DATOS CON MAYOR ACERTABILIDAD

VALORES RMS

Para el análisis de los valores obtenidos se tiene con un mayor asertividad la coiflet de orden 1 en un nivel de 3 aplicado a RMS

Resultados de los porcentajes más altos aplicados a RMS. Entre Coiflet, Symlet y Daubechies

RMS			
ORDEN	NIVEL	ACIERTOS	DESVIACION
COIF 1	3	78,3	8,4154
SYMLET 2	4	76,3	8,3672
db 2	4	76,5	7,83



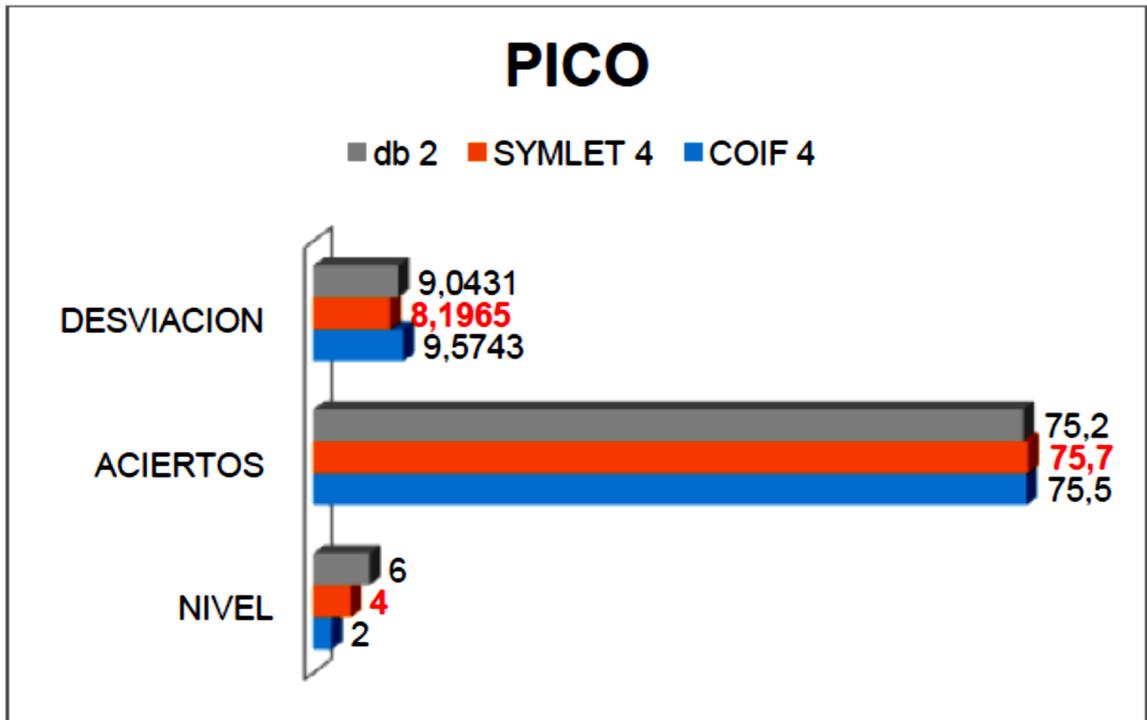
Respuesta en porcentaje de aciertos de las tres familias de wavelets usadas (coiflet, Symlet y daubechies) Para el análisis de los valores RMS

VALORES PICO

Para el análisis de los valores obtenidos se tiene con un mayor asertividad la familia de wavelet symlet de orden 4 en un nivel de 4 aplicado a los valores PICO

Resultados de los porcentajes más altos aplicados a valores PICO Entre Coiflet, Symlet y Daubechies

PICO			
ORDEN	NIVEL	ACIERTOS	DESVIACION
COIF 4	2	75,5	9,5743
SYMLET 4	4	75,7	8,1965
db 2	6	75,2	9,0431

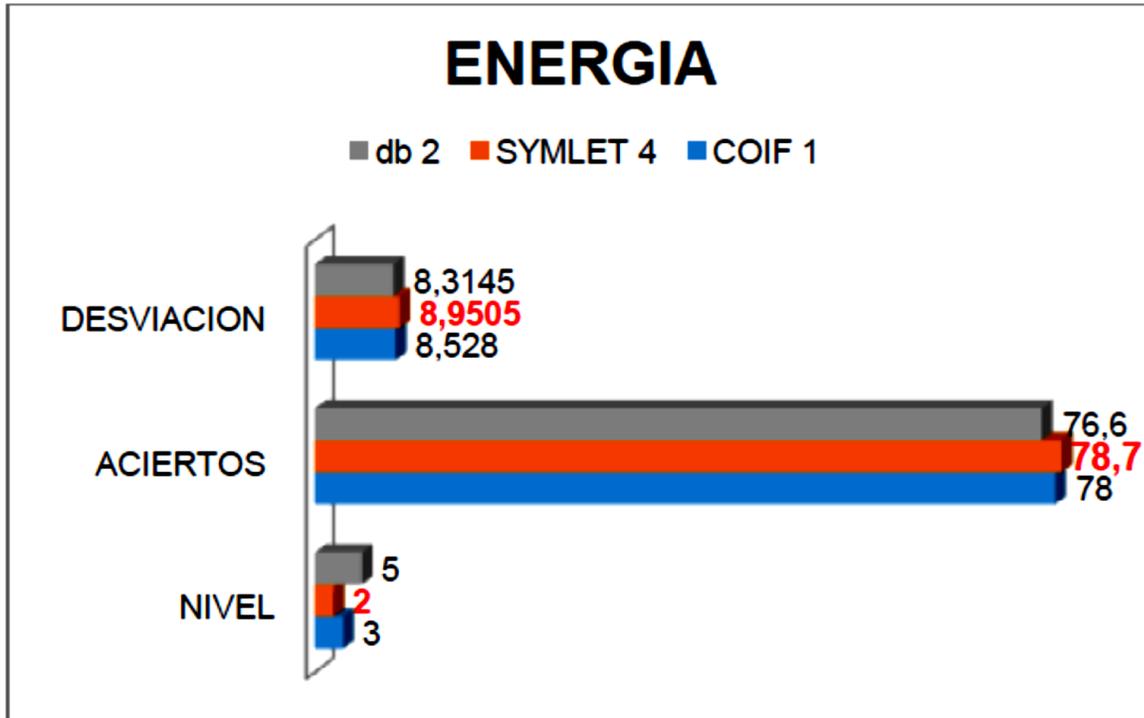


Respuesta en porcentaje de aciertos de las tres familias de wavelets usadas (coiflet, Symlet y daubechies) Para el análisis de los valores PICO

VALORES PARA ENERGIA

Resultados de los porcentajes más altos aplicados a valores de ENERGIA Entre Coiflet, Symlet y Daubechies

ENRGIA			
ORDEN	NIVEL	ACIERTOS	DESVIACION
COIF 1	3	78	8,528
SYMLET 4	2	78,7	8,9505
db 2	5	76,6	8,3145

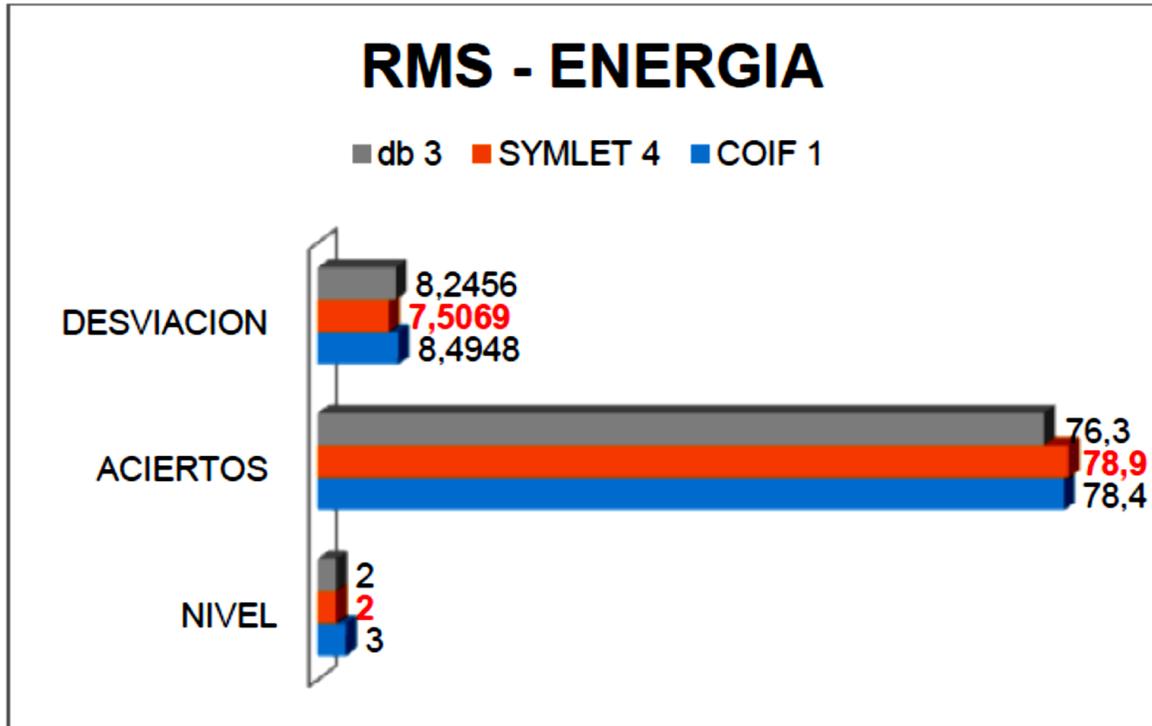


Respuesta en porcentaje de aciertos de las tres familias de wavelets usadas (coiflet. Symlet y daubechies) Para el análisis de los valores de ENERGIA

VALORES COMBINADOS RMS Y ENERGIA

Resultados de los porcentajes más altos aplicados a valores combinados RMS Y ENERGIA Entre Coiflet, Symlet y Daubechies

COMBINADA RMS - ENRGIA			
ORDEN	NIVEL	ACIERTOS	DESVIACION
COIF 1	3	78,4	8,4948
SYMLET 4	2	78,9	7,5069
db 3	2	76,3	8,2456

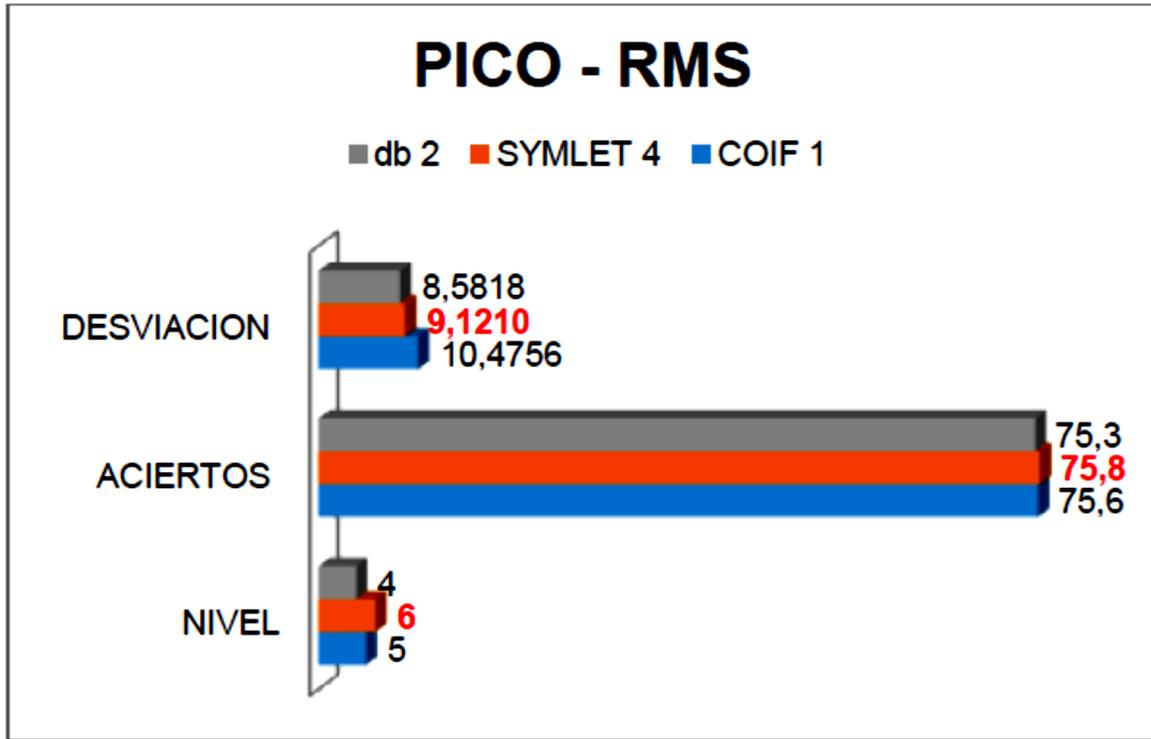


Respuesta en porcentaje de aciertos de las tres familias de wavelets usadas (coiflet, Symlet y daubechies) Para el análisis de los valores combinados RMS Y ENERGIA

VALORES COMBINADOS PICO Y RMS

Resultados de los porcentajes más altos aplicados a valores combinados PICO Y RMS Entre Coiflet, Symlet y Daubechies

COMBINADA PICO - RMS			
ORDEN	NIVEL	ACIERTOS	DESVIACION
COIF 1	5	75,6	10,4756
SYMLET 4	6	75,8	9,1210
db 2	4	75,3	8,5818

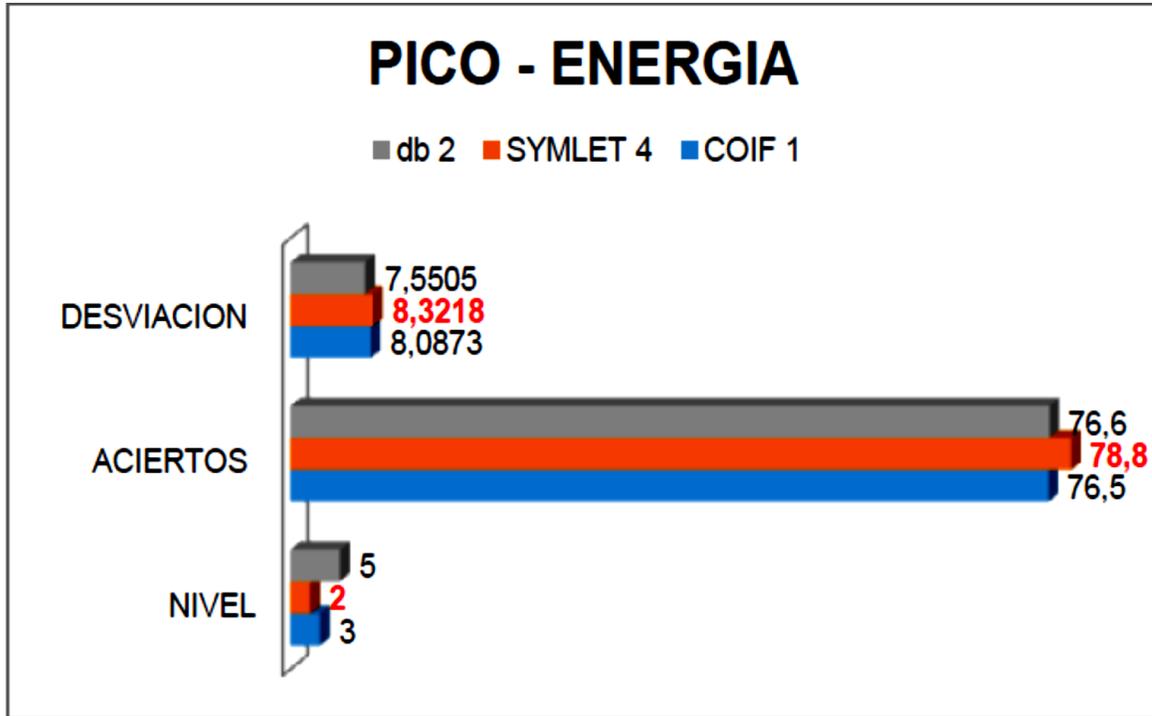


Respuesta en porcentaje de aciertos de las tres familias de wavelets usadas (coiflet. Symlet y daubechies) Para el análisis de los valores combinados PICO Y RMS

VALORES COMBINADOS PICO Y ENERGIA

Resultados de los porcentajes más altos aplicados a valores combinados PICO Y ENERGIA Entre Coiflet, Symlet y Daubechies

COMBINADA PICO - ENERGIA			
ORDEN	NIVEL	ACIERTOS	DESVIACION
COIF 1	3	76,5	8,0873
SYMLET 4	2	78,8	8,3218
db 2	5	76,6	7,5505

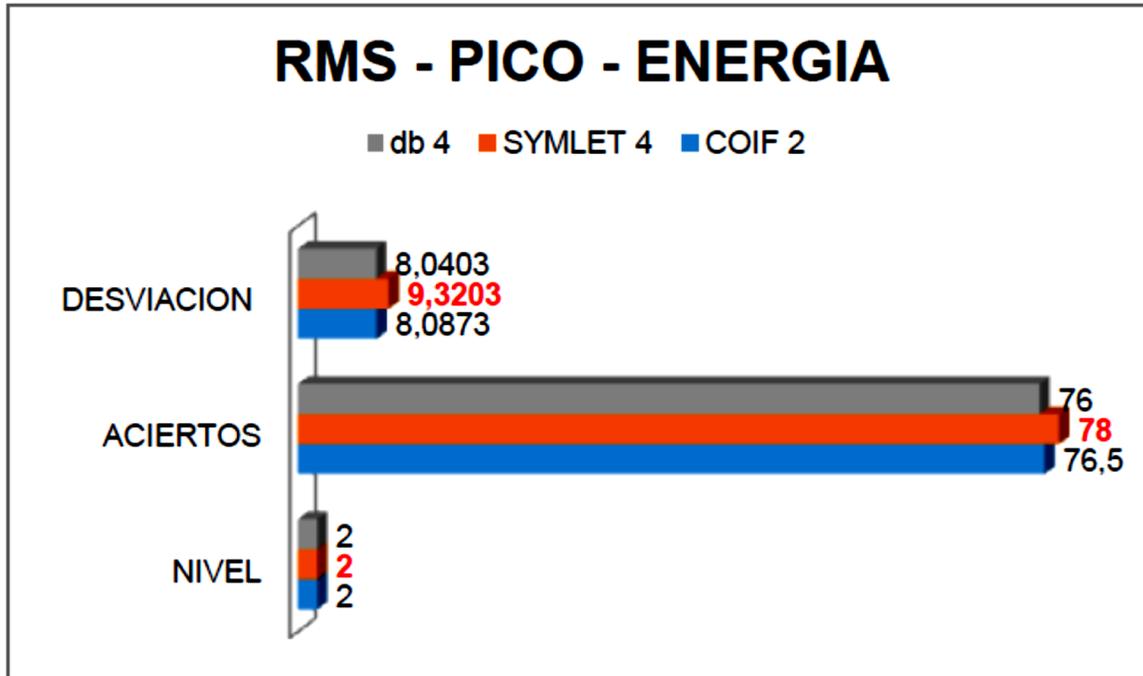


Respuesta en porcentaje de aciertos de las tres familias de wavelets usadas (coiflet, Symlet y daubechies) Para el análisis de los valores combinados PICO Y ENERGIA

VALORES COMBINADOS RMS, PICO Y ENERGIA

Resultados de los porcentajes más altos aplicados a valores combinados PICO, RMS Y ENERGIA Entre Coiflet, Symlet y Daubechies

COMBINADA RMS - PICO – ENERGIA			
ORDEN	NIVEL	ACIERTOS	DESVIACION
COIF 2	2	76,5	8,0873
SYMLET 4	2	78	9,3203
db 4	2	76	8,0403

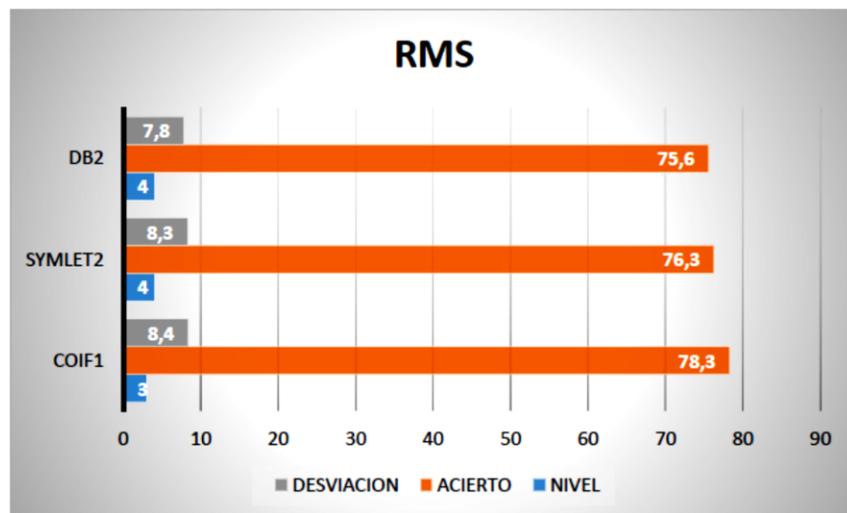


Respuesta en porcentaje de aciertos de las tres familias de wavelets usadas (coiflet. Symlet y daubechies) Para el análisis de los valores combinados RMS, PICO Y ENERGIA

B. Anexo: Resultado de pruebas proyecto 2

Mejores porcentajes de aciertos de las tres familias de wavelets usadas (coiflet, Symlet y daubechies), para el descriptor RMS

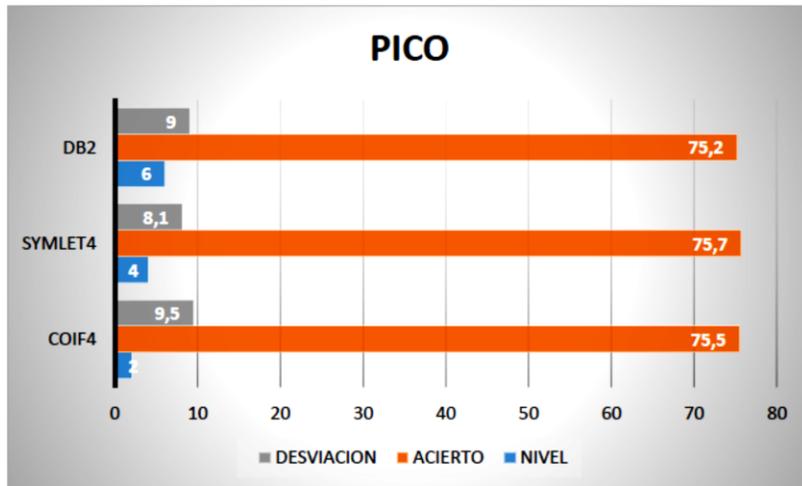
RMS			
ORDEN	NIVEL	ACIERTO	DESVIACIÓN
COIF1	3	78,3	8,4
SYMLET2	4	76,3	8,3
db2	4	75,6	7,8



Respuesta en porcentaje de aciertos de las tres familias de wavelets usadas (coiflet, symlet y daubechies) Para el análisis de los valores RMS

Mejores aciertos de las tres familias de wavelets usadas (coiflet, Symlet y daubechies), para el descriptor PICO.

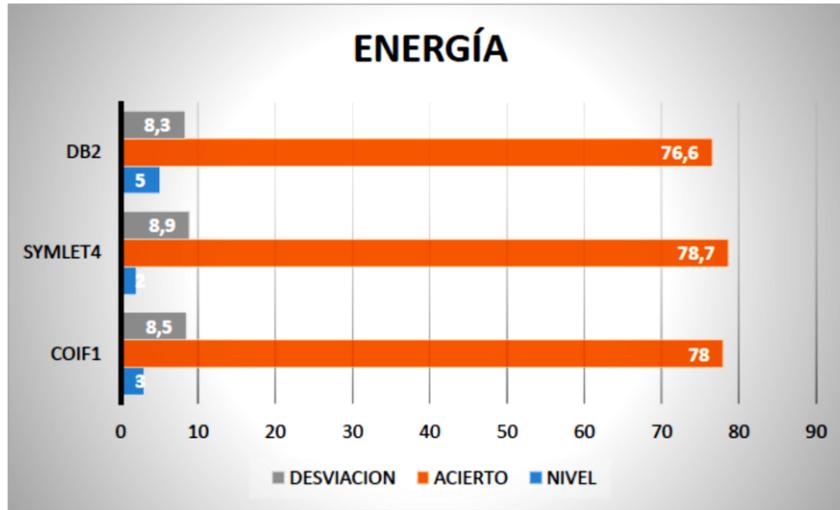
PICO			
ORDEN	NIVEL	ACIERTO	DESVIACIÓN
COIF4	2	75,5	9,5
SYMLET4	4	75,7	8,1
db2	6	75,2	9



Respuesta en porcentaje de aciertos de las tres familias de wavelets usadas (coiflet, symlet y daubechies) Para el análisis de los valores PICO

Mejores aciertos de las tres familias de wavelets usadas (coiflet, Symlet y daubechies), para el descriptor ENERGÍA.

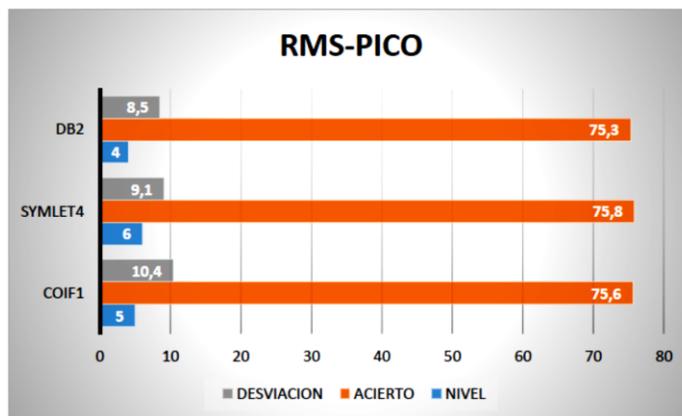
ENERGÍA			
ORDEN	NIVEL	ACIERTO	DESVIACIÓN
COIF1	3	78	8,5
SYMLET4	2	78,7	8,9
db2	5	76,6	8,3



Respuesta en porcentaje de aciertos de las tres familias de wavelets usadas (coiflet, symlet y daubechies) Para el análisis de los valores ENERGÍA

Mejores aciertos de las tres familias de wavelets usadas (coiflet. Symlet y daubechies), para el descriptor RMS-PICO.

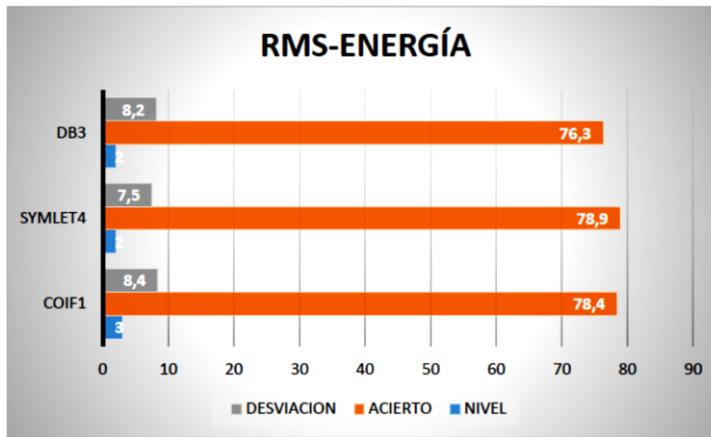
COMBINACIÓN RMS-PICO			
ORDEN	NIVEL	ACIERTO	DESVIACIÓN
COIF1	5	75,6	10,4
SYMLET4	6	75,8	9,1
db2	4	75,3	8,5



Respuesta en porcentaje de aciertos de las tres familias de wavelets usadas (coiflet, symlet y daubechies) Para el análisis de los valores RMS-PICO

Mejores aciertos de las tres familias de wavelets usadas (coiflet, Symlet y daubechies), para el descriptor RMS-ENERGÍA.

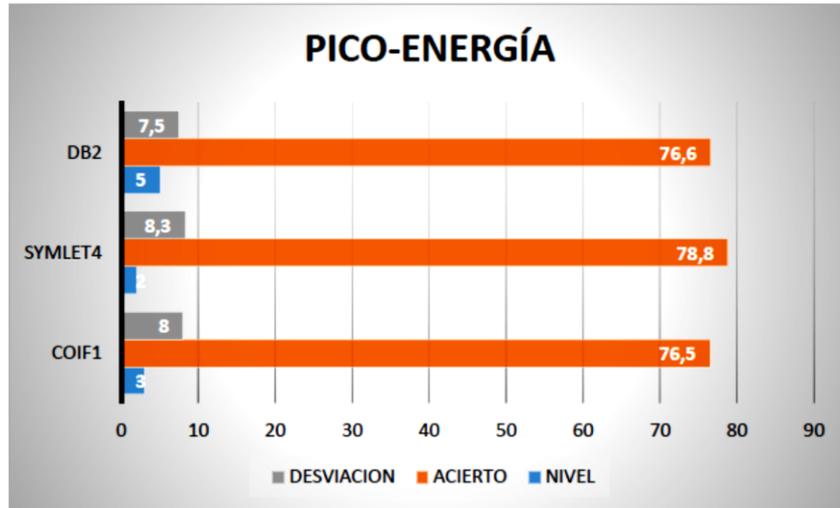
COMBINACIÓN RMS-ENERGIA			
ORDEN	NIVEL	ACIERTO	DESVIACIÓN
COIF1	3	78,4	8,4
SYMLET4	2	78,9	7,5
db3	2	76,3	8,2



Respuesta en porcentaje de aciertos de las tres familias de wavelets usadas (coiflet, symlet y daubechies) Para el análisis de los valores RMS-ENERGÍA

Mejores aciertos de las tres familias de wavelets usadas (coiflet, Symlet y daubechies), para el descriptor RMS-PICO-ENERGÍA.

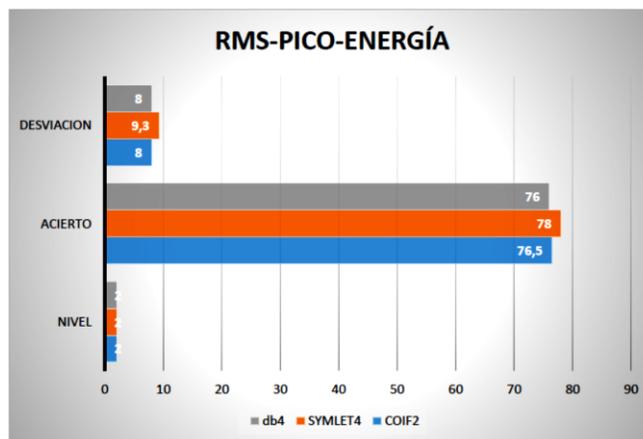
COMBINACIÓN PICO-ENERGÍA			
ORDEN	NIVEL	ACIERTO	DESVIACIÓN
COIF1	3	76,5	8
SYMLET4	2	78,8	8,3
db2	5	76,6	7,5



Respuesta en porcentaje de aciertos de las tres familias de wavelets usadas (coiflet, symlet y daubechies) Para el análisis de los valores PICO-ENERGÍA

Mejores aciertos de las tres familias de wavelets usadas (coiflet. Symlet y daubechies), para el descriptor RMS-PICO-ENERGÍA.

COMBINACIÓN RMS-PICO-ENERGÍA			
ORDEN	NIVEL	ACIERTO	DESVIACIÓN
COIF2	2	76,5	8
SYMLET4	2	78	9,3
db4	2	76	8



Respuesta en porcentaje de aciertos de las tres familias de wavelets usadas (coiflet, symlet y daubechies) Para el análisis de los valores RMS-PICO-ENERGÍA

Resultados de los porcentajes más altos aplicados a valores combinados PICO, RMS Y ENERGÍA y sus diferentes combinaciones. Usando Coiflet, Symlet y Daubechies

VARIABLE	ORDEN	NIVEL	ACIERTOS	DESVIACIÓN
RMS	COIF1	3	78,3	8,4
PICO	SYMLET4	4	75,7	8,2
ENERGÍA	SYMLET4	2	78,7	8,9
RMS-PICO	SYMLET4	6	75,8	9,1
RMS-ENERGÍA	SYMLET4	2	78,9	7,5
PICO-ENERGÍA	SYMLET4	2	78,8	8,3
RMS-PICO-ENERGÍA	SYMLET4	2	78	9,3

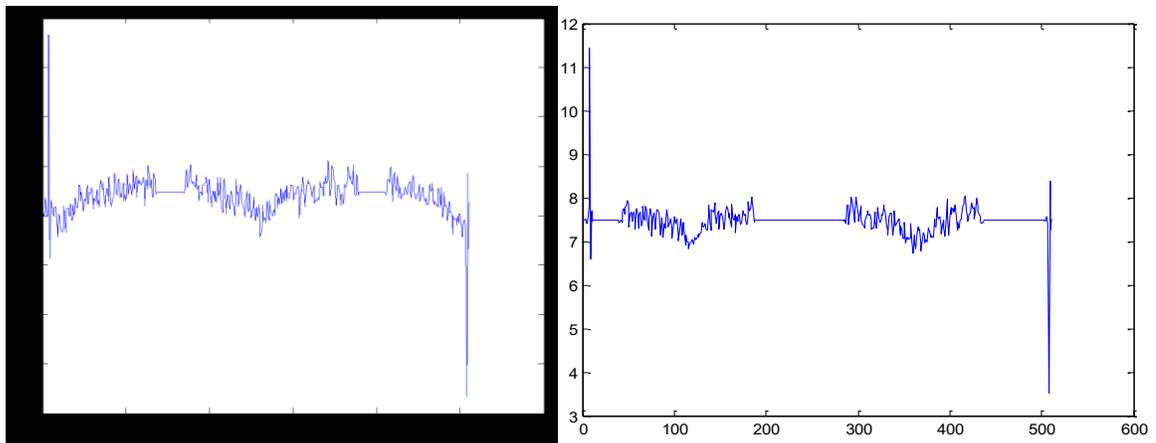


Respuesta en porcentaje de los mejores aciertos de las tres familias de wavelets usadas (coiflet. Symlet y daubechies), para los diferentes descriptores y sus posibles combinaciones

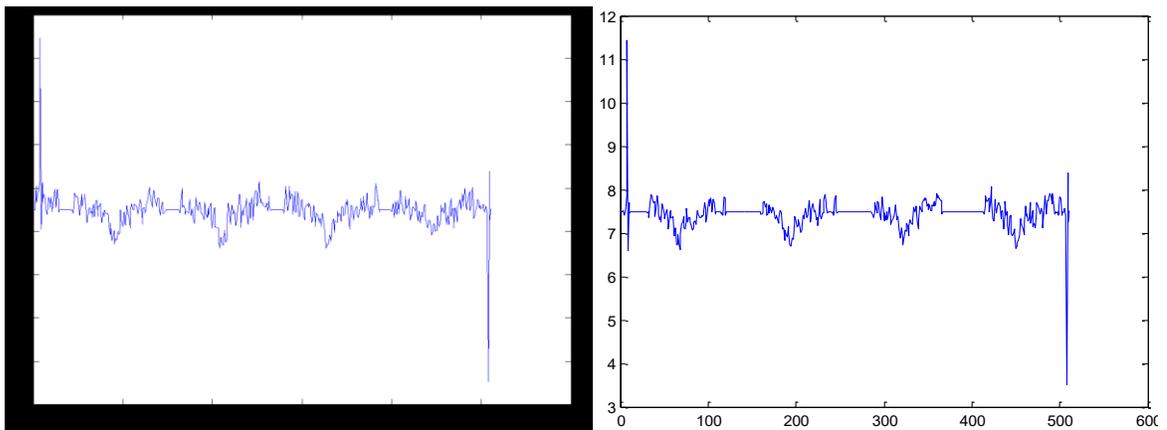
C. Anexo: Resultado de las pruebas proyecto 3

Familia de funciones wavelet coiflet 1, nivel 2 para para el análisis de desalineamiento a 20, 40 y 60 Hz.

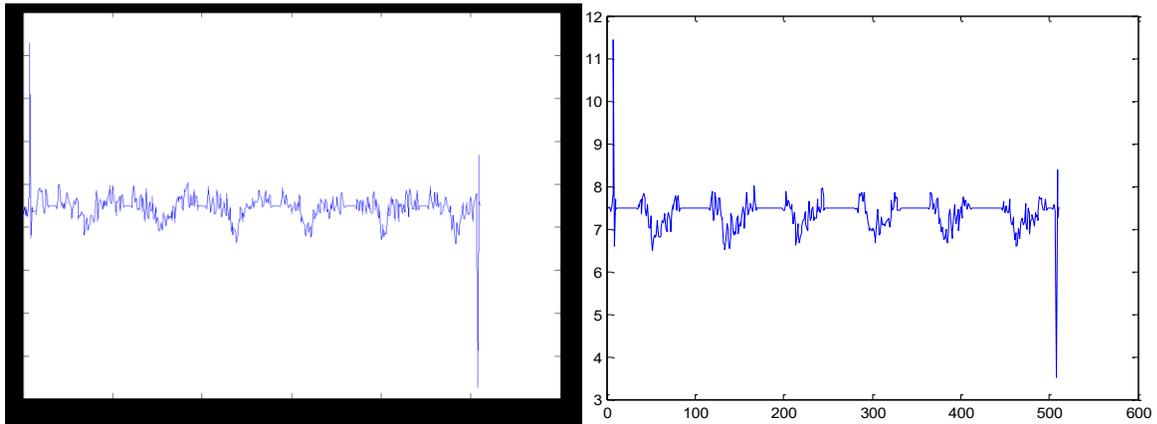
Desalineamiento y desbalanceo a 20 Hz



Desalineamiento y desbalanceo a 40 Hz

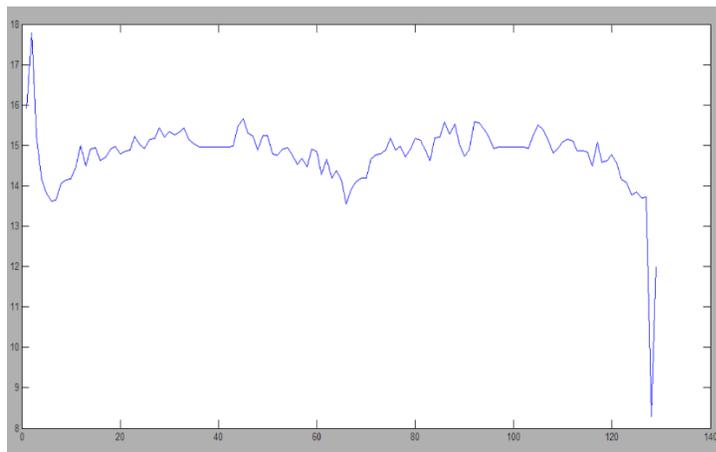


Desalineamiento y desbalanceo a 60 Hz

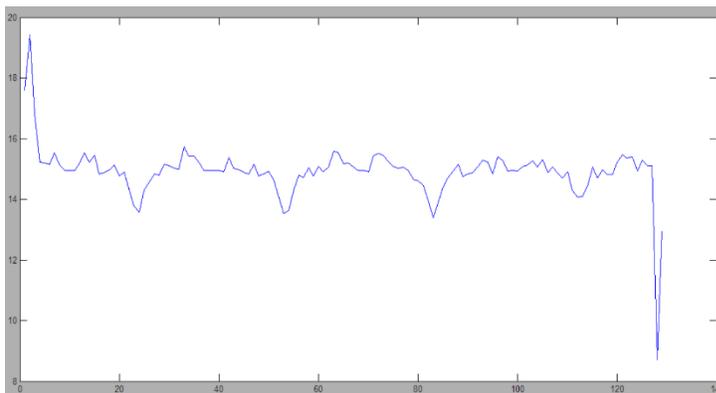


Familia de funciones wavelet coiflet 1, nivel 3 para para el análisis de desalineamiento a 20, 40 y 60 Hz.

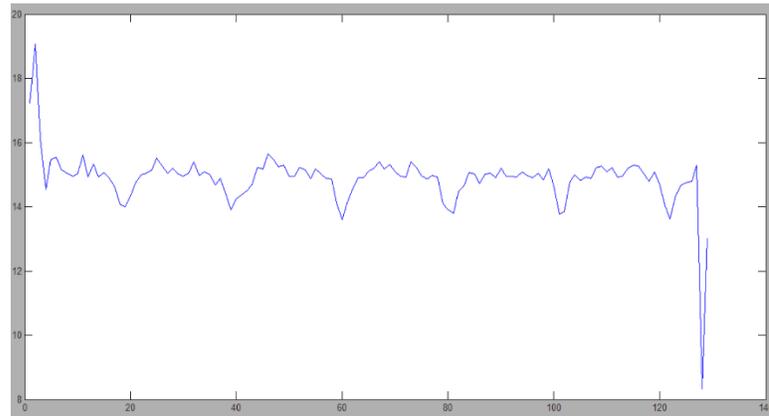
Desalineamiento 20Hz coiflet 1 Nivel 3



Desalineamiento 40Hz coiflet 1 Nivel 3



Desalineamiento 60Hz coiflet 1 Nivel 3



Bibliografía

- Alonso, J. (2001). Mantenimiento industrial, Interpretación de Espectros. Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Gijón. Gijón- España
- A-MAQ. (enero de 2005). tutorial de vibraciones para mantenimiento mecánico. Recuperado de [http://www. Mantenimientoplanificado.com](http://www.Mantenimientoplanificado.com)
- Arango, G. (2007). Clasificación de Fallas en Motores Eléctricos utilizando Señales de Vibración. Tesis presentada con el fin de optar al título de Magister en Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira, Colombia
- Cardona, O. (2011). Análisis tiempo-frecuencia de señales de vibraciones mecánicas para la detección de fallos en máquinas rotativas. (tesis de posgrado) Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.
- Castro R., Martínez J. (2002). “*Análisis de la Teoría de Ondículas orientadas a las aplicaciones de ingeniería eléctrica*”. E T S I, Industriales Departamento de Ingeniería Eléctrica, Madrid. Madrid-España
- Estupiñán, E. y Saavedra, P. (2006) “*Análisis de vibraciones aplicado a las máquinas rotatorias de baja velocidad*”. Universidad de Concepción. Concepción- Chile
- Feito, J. S. (2002). Máquinas Eléctricas. Madrid: Prentice Hall. Madrid, España
- Fernández, A. (12 de enero de 2017). Power-MI. Obtenido de Vibración en maquinaria industrial: [https://power-mi.com/es/content/vibraci%C3%B3n-en maquinaria industrial](https://power-mi.com/es/content/vibraci%C3%B3n-en-maquinaria-industrial)
- Fitzgerald, A. E., Kingsley, Ch. J., y Kusko, A. (1980). Máquinas Eléctricas. Barcelona, España: Hispano Europea.
- Gourishankar, V. (1990). Conversión de Energía Electromecánica. México: Alfaomega, S.A. de C.V. México, México D.F.

- Gonzales, C. y Pedraza, W. (2013). Algoritmo en matlab para la detección de desbalanceo en equipos rotativos, usando transformada de wavelet. (tesis de pregrado). Universidad Antonio Nariño. Bucaramanga, Colombia.
- Grim, G., y Mitchell, B. (2010). Entendiendo las bases del balanceo y técnicas de medición, USA: Precision Measurement and Testing, Wavelet. USA.EE.UU
- Hernández, G. D. (2007). Apuntes del Curso Vibraciones mecánicas. Concepción. Chile.
- Higuera, N, Rueda, J, Silva, O. (2014). Extracción de características representativas respecto al fenómeno de desbalanceo y des-alineamiento angular utilizando la transformada Wavelet. (tesis de pregrado). Universidad Antonio Nariño. Bucaramanga, Colombia.
- Quiroga, O., & Jorquera, R. (7 de 06 de 2018). Vibraciones (2019). Obtenido de <http://www.rinconeducativo.org/es/recursos-educativos/que-es-un-generadorelectrico>
- Lei, Y., He, Z. & Zi, Y. (2006). *A New approach to intelligent fault diagnosis of rotating machinery. En: Expert Systems with Applications 35, Nr. 4, p. 1593 – 1600.*
- López, G. (2004) *Análisis de vibraciones para el mantenimiento predictivo.* <http://www.tecnicaindustrial.es/tiadmin/numeros/14/35/a35.pdf>
- Mathworks. (2019). *Mathworks- Matlab.* Obtenido de Mathworks: https://la.mathworks.com/help/matlab/learn_matlab/product-description.html
- NATIONAL INSTRUMENTS. (2019). NATIONAL INSTRUMENTS- LABVIEW. Obtenido de NATIONAL INSTRUMENTS: <https://www.ni.com/es-co/shop/labview.html>
- Rodríguez, M. (2005). ANÁLISIS MODAL OPERACIONAL: TEORÍA Y PRÁCTICA. (tesis de pregrado). Escuela Superior de Ingenieros. Sevilla -España.
- Ruiz, W. y Vásquez, J. (2014). Clasificación automática de patrones de desbalanceo y desalineamiento en una máquina rotativa usando transformada wavelet. (tesis de pregrado). Universidad Antonio Nariño. Bucaramanga, Colombia.
- Saavedra, P. (2011) *La medición y análisis de las vibraciones como técnica de inspección de equipos y componentes, aplicaciones, normativas y certificación.* Facultad de Ingeniería - Universidad de Concepción, Casilla 160 – Concepción – Chile.
- SKF (1996). Manual SKF de mantenimiento de rodamientos. Dinamarca.
- Tranter, J. (1998). *Information and power in your hands: data collectors meet mobile computers –*, Application note Predict-DLI.

White, G. (2010). Introducción al Análisis de Vibraciones. USA

Yadav, M, y Wadhvani, S. (2011) Vibrations analysis of bearing for fault detection using time domain features and neural network. Department of Electrical Engineering, Madhav Institute of Technology and Science Gwalior, India. 24 2