



República Bolivariana de Venezuela
Universidad Nacional Experimental Politécnica
“Antonio José de Sucre”
Vice Rectorado Barquisimeto
Departamento de Ingeniería Electrónica



Herramienta computacional para el análisis de la vibración en motores eléctricos alimentada mediante datos de una simulación digital

Temática de Trabajo Especial, presentada para ser considerada por la
Coordinación de Trabajo Especial del Departamento de Ingeniería
Electrónica

Integrantes:

Gerardo Alfonzo Campos Fonseca
V. 27085179

José Andrés Cortez Teran
V. 26540824

Tutor: Dra. Luisa Escalona
Cotutor: MSc. Carlos Zambrano

Barquisimeto, Abril del 2021

Índice

Índice	II
Índice de figuras	IV
Índice de Tablas	V
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	5
1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	5
1.2. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	8
1.2.1. Objetivo general	8
1.2.2. Objetivos específicos	8
1.3. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA	9
1.4. LIMITACIONES Y ALCANCES	10
1.4.1. Limitaciones	10
1.4.2. Alcance	10
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	11
2.1. ANTECEDENTES	11
2.2. MARCO TEÓRICO	13
2.2.1. Motores eléctricos	13
2.2.2. Análisis de Vibración	14

<i>ÍNDICE</i>	III
2.2.3. Acelerómetros	16
2.2.4. Procesamiento de señales	18
2.2.5. Herramienta Computacional	19
2.2.6. Sistema Web	21
2.2.7. Modelo estadístico	22
3. MARCO METODOLÓGICO	24
3.1. NATURALEZA DE LA INVESTIGACIÓN	24
3.2. RECURSOS	27
3.3. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES	28

Índice de figuras

1.	Diagrama de los dominios temporal y frecuencial	20
2.	Cronograma de actividades.	29

Índice de Tablas

CAPÍTULO 1

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En la actualidad se vive un crecimiento exponencial a nivel industrial dadas las altas demandas de alimentos e insumos de toda clase, esto es posible, entre otras cosas, gracias al motor eléctrico, este es un artefacto que transforma la energía eléctrica en energía mecánica (movimiento), de manera que puede impulsar el funcionamiento de una máquina y son utilizados ampliamente en: Bombas para Agua, Bombas Industriales, Mezcladoras, Molinos, Correas Transportadoras, Zarandas, Cortadoras, Ventiladores, Grúas, y en todo proceso que involucre movimiento.

Adicional a su versatilidad, existen otros factores como las grandes pérdidas (horas, insumos, dinero, etc.) a tomarse en cuenta porque ocasionan una parada de emergencia en una planta, por lo cual se considera de vital importancia que los motores se encuentren completamente operativos y funcionales. Y para procurar su buen estado y funcionamiento, se deben realizar mantenimientos.

Existen diferentes tipos de mantenimiento, entre ellos están:

- Correctivo: se espera que ocurra una falla para reparar o cambiar un equipo. Esto puede degradar la vida útil del equipo y debido a que la falla puede ocurrir en cualquier momento, usualmente se produce un paro en la línea de producción, por lo tanto este tipo de mantenimiento suele y debe ser evitado.
- Preventivo: para evitar una falla mayor se detiene la maquinaria para hacer un mantenimiento preparado con anticipación, se inspecciona la maquinaria y se reemplazan las piezas propensas a dañarse. Este tipo de mantenimiento en algunas circunstancias es más que suficiente pero en el caso de los rodamientos puede ser contraproducente.

- Predictivo: se pronostica cuando una falla está a punto de ocurrir; a través de mediciones, y del estudio de las mismas, se prevé cuando un desperfecto está a punto de ocurrir y de esta forma se realiza una mejor planificación. Cabe resaltar que este tipo de mantenimiento puede dar información acerca del origen y la gravedad de las averías.

En el caso de los motores eléctricos, como dice Lacey (s.f.), el mantenimiento preventivo tiene muchas desventajas dado que existen problemas de índole mecánico así como administrativos y monetarios, un ejemplo de esto pueden ser los altos costos de reemplazo dado que las partes se reemplazan muy pronto, el riesgo de pérdida completa dado un error humano, instalación de una pieza defectuosa, además de la posibilidad de generar daño o una incorrecta instalación de la misma, y por último, el hecho de que las piezas reemplazadas pueden tener muchos años de vida útil.

De esta forma se ve que una observación constante ofrece más control sobre las variables mencionadas y aunque no evita las posibilidades de error humano, si permite reaccionar a este; adicionalmente, se deben considerar las altas pérdidas y retrasos, sumadas a las dificultades administrativas, que generan las paradas periódicas de la planta. Todas estas consideraciones son de suma importancia; y para poder ser ejecutadas se necesitan herramientas capaces de dar a conocer el estado actual de una maquina y permitir a los operadores, encargados o ingenieros tomar acciones cuando sean necesarias y de acuerdo a las políticas de la empresa.

Por las razones expuestas surge la necesidad de reconocer las fallas y de tener bajo continuo monitoreo los factores que las causan para, de esta forma, atenuarlos. Según los estudios realizados por Kammermann y col. (2017) la media de la probabilidad de fallas en máquinas de inducción permanece al nivel de los años 70 ($10^{-6}/hour$) y está altamente relacionada a la falla de los rodamientos, y que un 59 % de las fallas son causadas por los rodamientos, esto es debido a que son piezas sometidas a mucho estrés mecánico, permiten soporte y asimismo necesitan tener poca fricción. Por esta razón, su principal falla es el desgaste, de igual forma se presentan otras fallas estructurales que generan vibraciones. Cabe resaltar que todas las fallas mecánicas generan vibración sin importar su relación con los rodamientos y lo hacen a distinta frecuencia (f).

Por lo expuesto, es de suma importancia el estudio de la vibración, para la que se suele implementar un acelerómetro y con un estudio de la frecuencia se puede obtener la causa y la magnitud de la falla y de esta forma programar su reparación. Sin embargo, debido a que esta evaluación debe ser realizada en cada rodamiento y acople o extensión del motor y dadas las mediciones que se deben realizar por unidad (motor y acoples) y por la gran cantidad de unidades existentes a nivel industrial, es virtualmente imposible el estudio con un acelerómetro convencional (a pesar de que la medición no sea un proceso muy largo y los cálculos y evaluaciones sean realizados posteriormente). Sumado a esto, las industrias suelen poseer medidas y controles sanitarios, aumentados por la pandemia actual, que no permiten el constante monitoreo de la planta significando esto la imposibilidad de implementar este tipo de acciones de forma manual, por lo cual se debe recurrir a un sistema de automatización capaz de medir las vibraciones en todos estos equipos que, a su vez, permita el estudio de estos datos de forma remota.

1.2. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.2.1. Objetivo general

Desarrollar una herramienta computacional para el análisis de la vibración en motores eléctricos, mediante la simulación digital de un acelerómetro, con la finalidad de que un operador determine averías y sus causas.

1.2.2. Objetivos específicos

1. Justificar la escogencia de las herramientas y lenguajes a utilizar en las diferentes etapas que requiere la simulación. (José Cortez y Gerardo Campos)
2. Generar un modelo estadístico de la vibración en motores eléctricos con distinto grado de daño utilizando una base de datos de la salida de un acelerómetro digital. (José Cortez)
3. Elaborar una base de datos con información obtenida del modelo estadístico para alimentar los niveles de análisis de la herramienta. (José Cortez y Gerardo Campos)
4. Realizar análisis de fallas en frecuencia, a partir de la salida del modelo del acelerómetro. (Gerardo Campos)
5. Mostrar la información solicitada de acuerdo al nivel de análisis seleccionado. según sea: Vista Principal, Vista Específica o Vista Exhaustiva. (José Cortez y Gerardo Campos)
6. Elaboración de una página web para facilitar la utilización del sistema (José Cortez y Gerardo Campos)
7. Comprobar los resultados de la herramienta de análisis. (José Cortez y Gerardo Campos)

1.3. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

Para prevenir las fallas mecánicas que ocurren en los motores, por el deterioro y desgaste de los rodamientos, estos se deben tener bajo constante monitoreo para poder efectuar un mantenimiento puntual que elimine dichos peligros. De esta forma el mantenimiento predictivo es la clave para mejorar la vida útil, funcionamiento y planificación de todo proceso especialmente a niveles industriales, donde la cantidad de motores eléctricos es bastante elevada, y por lo cual la automatización del proceso es crucial.

Sin embargo, dado los altos costos que implican realizar una automatización y en especial a escalas industriales se suele hacer una simulación o una emulación para estudiar y obtener el modelo más preciso, gracias a la facilidad para manipular con mayor eficacia los diseños y conocer su comportamiento real sin necesidad de construirlo, antes de realizar la implementación y todo el proceso que esta conlleva.

Habiendo expuesto la importancia del mantenimiento como también la de realizar simulaciones, se justifica el hecho de realizar el desarrollo del trabajo aquí propuesto el cual permita emular el comportamiento y las salidas de un acelerómetro, como también otorgue las herramientas necesarias para poder realizar un mantenimiento predictivo, y de esta forma se pueda estudiar a profundidad su estado actual como también su evolución histórica. Todo esto sumado a las facilidades de portabilidad que ofrece un sistema Web, facilitando la revisión constante sin las dificultades de los protocolos de acceso y sanidad.

1.4. LIMITACIONES Y ALCANCES

En función de los objetivos planteados con anterioridad, se puede definir tanto las limitaciones como el alcance del proyecto.

1.4.1. Limitaciones

- Recursos económicos impiden la adquisición de dispositivos para pruebas en motores reales.
- Disponibilidad de muestras, aunque se cuenta con una base de datos lo suficiente grande para cubrir el comportamiento de la vibración en motores, incluso de distinta potencia, esta es discreta y con intervalos de tiempo considerables entre cada muestra.
- Las establecidas por el software de tercero utilizado en el diseño del proyecto.

1.4.2. Alcance

El principal alcance de este trabajo es el desarrollo de una herramienta computacional para el análisis de la vibración en motores eléctricos; en función de esto:

- La herramienta computacional permite una vista general del estado de todos los motores en un espacio previamente delimitado y seleccionado (planta o piso) que se encuentren en la base de datos.
- La herramienta computacional permite una vista detallada del estado de un motor seleccionado, previamente por el usuario, que se encuentren en la base de datos.
- El sistema cuenta con una Base de datos a partir de la cual se desarrollarán los resultados ofrecidos.
- no se contempla la construcción de hardware de ningún tipo.

CAPÍTULO 2

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. ANTECEDENTES

Pinto y col. (2016) realizan una simulación de redes de sensores inalámbricos, con el fin de mejorar la detección de fallas de los sensores. Esta simulación fue realizada con Castalia un simulador de redes de sensores inalámbricos y el sensor usado fue un detector de luminosidad. Algunas de las razones que menciona el artículo de por qué fue escogida una simulación es debido a que realizar el experimento con sensores requiere un costo elevado de hardware y un estudio analítico no es efectivo, ya que la complejidad del sistema es muy grande. Este trabajo es de utilidad debido a que sirve como orientación a la elaboración de la simulación del sensor que generara el modelo estadístico.

Ugwiri y col. (2020) Presentan un resumen de las técnicas más usadas actualmente en la detección de fallas en motores eléctricos mediante análisis de vibración, además de realizar un experimento donde se ponen a prueba algunos de estos conceptos. El propósito de este antecedente es el de apoyar la elaboración del modo de "vista exhaustiva".

Koene y col. (2020) Elaboran un sensor de vibración inalámbrico de código libre llamado Memsio. Este dispositivo es alimentado por baterías y permite la adquisición de datos a alta velocidad por medio del uso de un acelerómetro microelectromecánico. Los autores mencionan que en la industria los sensores de aceleración más usados son los piezoeléctricos, debido a tener una mayor precisión y tolerancia al ruido, sin embargo los avances de los dispositivos microelectromecánico y su bajo costo hacen cada vez más factibles su uso para el monitoreo. Este antecedente muestra la tendencia de la reducción de precios de los sensores inalámbricos lo cual apoya al propósito del trabajo al hacer factible las redes de sensores.

Soto-Ocampo y col. (2020) Elaboraron un sensor de vibración multicanal para vibraciones de alta frecuencia utilizando una Raspberry pi. El objetivo del proyecto era conseguir

una alternativa de bajo costo para poder monitorizar la salud de rodamientos en motores eléctricos pero sin sacrificar la calidad de la medición porque como explican los autores del artículo la mayoría de las fallas en los rodamientos ocurre a altas frecuencias y muchas de las alternativas de bajo costo no alcanzan la frecuencia necesaria. Este antecedente es de utilidad dada la cantidad de información, tanto teórica como datos de simulación, que provee.

Çağlar Ramazan y col. (2014) Describen un modelo estadístico sobre el deterioro de motores eléctricos de inducción. El artículo clasifica el deterioro del motor en 7 etapas de acuerdo al nivel de vibración de sus rodamientos. Este antecedente es de gran utilidad para realizar el modelo estadístico que alimentará la base de datos ya que proporciona bases teóricas y un ejemplo práctico.

2.2. MARCO TEÓRICO

Esta parte del capítulo expone el contenido teórico necesario para la realización de este proyecto. Esto incluye información sobre los motores eléctricos, análisis de la vibración, las herramientas computacionales, los sistemas, y el modelado estadístico.

2.2.1. Motores eléctricos

De acuerdo a Mora, 2003, un motor eléctrico es un dispositivo que transforma energía eléctrica en energía mecánica mediante la acción de campos magnéticos y están compuestos, principalmente, por un estator (parte fija) y un rotor (parte móvil). Existen dos familias principales de motores eléctricos las cuales, a su vez, se subdividen en **motores de corriente alterna** como lo son los motores de inducción, síncronas, entre otros y los **motores de corriente continua** como lo son los motores de escobillas, sin escobillas, de imán permanente, entre otros.

El motor mas usado en el sector industrial, es el motor de inducción, debido principalmente a su bajo costo y al poco mantenimiento que requiere para estar completamente operativo, esto en particular es debido a su sencillo diseño en comparación al de otros motores de igual potencia, ya que requiere menor número de componentes. Cabe resaltar que el segundo tipo de motor mas usado es el motor de corriente continua, debido a que su control, en términos de torque y potencia, es mucho mas sencillo para ciertos niveles de potencia.

También existen los motores síncronos, cuya construcción es similar a la de un motor de inducción pero a su vez requiere de una fuente de alimentación externa para el rotor, lo cual aumenta su costo, además de esto su velocidad es constante, por lo tanto este tipo de motor es utilizado en aplicaciones específicas. Como se mencionó anteriormente, existen otros tipos de motores, pero son usualmente de menor potencia por lo tanto su utilidad industrial es mucho mas limitada.

Rodamientos

Para que un motor pueda llevar a cabo la transformación de potencia debe rotar. Esta acción es llevada a cabo por el **rotor**, el cual esta formado por un eje que soporta un juego de bobinas envueltas sobre un núcleo magnético. Este se encuentra suspendido por **rodamientos**, de forma que el movimiento y las fuerzas producidas en la interacción entre las bobinas y el núcleo con los campos magnéticos, producidos por el estator, puedan ser utilizados. Además, los rodamientos, cuando se encuentran en buenas condiciones, permiten minimizar el roce entre el eje y soporte, maximizando la transferencia de potencia.

Estos también son conocidos como **rolineras**, las cuales según LTD, 2021, son un tipo de cojinete, un elemento mecánico diseñado para reducir la fricción entre un eje y los elementos conectados al mismo. Existen muchos tipos de rolineras, sin embargo su estructura se fundamenta en dos anillos concéntricos, algún elemento rotativo como pueden ser bolas o rodillos, una jaula que se encarga de mantener los elementos de rodadura separados además de guiados y un lubricante o un sistema de lubricación.

Dado que son un elemento mecánico el cual es continuamente usado, sufre mucho desgaste y es el elemento mas propenso a dañarse, según los estudios realizados por Kammermann y col. (2017) el 59 % de las fallas son causadas por los rodamientos y asimismo su principal falla es el desgaste, de igual forma se presentan otras fallas estructurales. Y por estas razones es fundamental tener bajo continuo monitoreo este elemento, esto se suele hacer a través de un análisis de vibración.

2.2.2. Análisis de Vibración

Como se explica en Sauer202 y col., 2021, la vibración, es el movimiento periódico de un cuerpo o medio elástico, alrededor de un punto de equilibrio. En general podemos decir que una vibración es un caso específico de una oscilación, cuando esta es de origen mecánico.

Asimismo, se conoce como análisis de vibración, al conjunto de técnicas que permiten obtener información de un equipo, a partir de sus vibraciones. Es una de las técnicas

más usadas en el mantenimiento predictivo de equipos mecánicos, debido a que es un proceso poco invasivo y de bajo costo. El análisis de vibración permite diagnosticar fallas de forma temprana, así como detectar señales prematuras de desgaste.

Según Girdhar Girdhar y col., 2004, el análisis de vibración nos permite detectar las siguientes fallas:

- Defectos en los engranajes
- Defectos en los rodamientos
- Desalineamientos
- Desbalances
- Ejes torcidos
- Excentricidad
- Fallas eléctricas
- Fuerzas hidráulicas o aerodinámicas
- Mala sujeción en las piezas
- Problemas en las correas de transmisión
- Problemas de lubricación
- Resonancia
- Rozamientos en el rotor

Adquisición de datos

Para realizar cualquier tipo de análisis, primero se deben adquirir datos y, por regla general, mientras mas datos se tengan y mas precisas sean las mediciones, mejores serán los estudios que se pueden realizar.

La adquisición de datos, según Smith, 2020, es el proceso de realizar mediciones de fenómenos físicos y registrarlos, en algún formato específico, para analizarlos posteriormente. Cabe resaltar que en algunos casos es necesario hacer un acondicionamiento de la señal, esto implica modificarla controladamente al reducir o aumentar su amplitud además de sumarle un nivel offset, voltaje continuo, para que cumpla requisitos mínimos y pueda ser procesada por los siguientes circuitos.

Al momento de la adquisición de datos, se toman medidas de una señal analógica la cual se convertirá al pasar por una serie de etapas y dispositivos en una señal digital y se guardará en un formato deseado y en una unidad de almacenamiento masivo (ROM, flash, etc). El primer paso en la toma de datos comienza con el sensor, que es un dispositivo el cual transforma la unidad física de interés, en una señal que pueda ser procesada con mayor facilidad, luego esta se adecuará mediante un circuito especializado a las características y requerimientos del sistema, luego será procesada por un convertidor Analógico-Digital, el cual se encarga de muestrear, retener y procesar la señal y, de esta forma, obtener una versión digital de la misma, la cual se procesará o guardará mediante un software desde una computadora.

En el caso de las vibraciones, los sensores mas usados son los acelerómetros. Esto se debe principalmente a que tienen mayor ancho de banda que los sensores de posición y los de velocidad, lo que les permite detectar vibraciones de mayor frecuencia. Adicionalmente, dado que las vibraciones en los rodamientos, por naturaleza, son de alta frecuencia y, como se mencionó anteriormente, estos son componentes críticos en los motores eléctricos. Estas características hacen al acelerómetro el sensor mas utilizado para las mediciones de vibración en motores eléctrico. Sin embargo, en casos mas especializados, como podría ser el análisis de vibración de maquinaria de larga envergadura, son también usados los otros tipos de sensores ya que sus características pueden facilitar el estudio.

2.2.3. Acelerómetros

Como se expone en Fraden, 2003, un acelerómetro es un dispositivo capaz de medir aceleración, no es necesariamente la misma que la aceleración de coordenadas (cambio de la velocidad de un elemento en el espacio), sino que es la correlación asociada con el fenómeno de peso experimentado por una masa de prueba que se encuentra en el marco de referencia del dispositivo. Funciona mediante la utilización de la segunda ley de Newton, **la fuerza resultante ejercida sobre un cuerpo es proporcional a su masa por su aceleración**. Los acelerómetros por lo general cuentan con una masa de prueba (también conocida como masa sísmica), alguna especie de resorte y un marco de soporte que, a su vez, puede funcionar como amortiguador. Debido a esto, los acelerómetros se

pueden modelar matemáticamente como un sistema lineal de segundo orden, por lo que su respuesta en frecuencia posee un pico de resonancia.

Tipos de acelerómetros

■ Acelerómetros Capacitivos:

Los acelerómetros capacitivos son uno de los modelos mas sencillos capaces de medir aceleración, además de ser fácilmente utilizables y reproducibles en masa. Funcionan mediante una masa sísmica, dado que, al experimentar una fuerza se desplaza con una aceleración proporcional a la fuerza aplicada. Si a la masa se le agregan unos resortes unidos a una carcasa, los resortes ejercerán una fuerza proporcional al desplazamiento de la masa generando un desplazamiento fácilmente medible.

Este fenómeno se produce ya que estos efectos en conjunto al amortiguamiento producen un sistema lineal de segundo orden, este sistema matemático genera una salida en desplazamiento al aplicarse como entrada una fuerza Finalmente, al conectarse un sensor de desplazamiento, se observa la aceleración a la que esta sometido el instrumento. El sensor de desplazamiento mas popular para este tipo de medidores es el capacitivo.

En su mayoría los acelerómetros capacitivos vienen como dispositivos microelectromecánicos, **mems** por sus siglas en inglés, que son dispositivos fabricados con técnicas similares a las de fabricación de circuitos integrados, a su vez poseen componentes mecánicos microscópicos. Son los acelerómetros mas populares en aplicaciones no industriales, sin embargo, en aplicaciones de bajo consumo, bajo coste o cuando las frecuencias con las que se trabajan no son tan altas, pueden ser usados a niveles industriales, ya que poseen múltiples ventajas como:

- No requieren adecuación de la señal.
- Pueden comunicarse directamente con un microcontrolador.
- Su precio es económico.
- Son compactos.

■ Acelerómetros piezoresistivos:

Son, después de los acelerómetros piezoeléctricos, los mas usados a nivel industrial. Su funcionamiento es similar al de los acelerómetros capacitivos, ante una aceleración de entrada se produce un desplazamiento de salida, mas en este caso, estos están constituidos por una o varias galgas extensiométricas, una masa de prueba y unos resortes de soporte. La galga sujeta a la masa sísmica y, al esta recibir una fuerza, produce un desplazamiento proporcional a la fuerza aplicada, lo que deforma a su vez la galga extensiométrica lo cual se traduce como un cambio de resistencia en el sensor. La ventaja de los acelerómetros piezoresistivos es que pueden medir valores de voltaje DC lo que los hace útil en el estudio de impactos, son también usados en el análisis de vibración en el rango de mediana frecuencia.

■ Acelerómetros piezoeléctricos:

Según Weber, 2012, son el acelerómetro mas usado en aplicaciones industriales ya que poseen características como:

- Alto rango dinámico.
- Bajos niveles de ruido.
- Alta linealidad.
- Alto ancho de banda.
- Poco desgaste, ya que no poseen partes móviles.

Su construcción es bastante sencilla, se tiene disco de un cristal piezoeléctrico unido por dos terminales circulares, de forma similar a la de un condensador, y justo encima tienen una masa de prueba. Al experimentar una fuerza el cristal se deforma lo que produce una diferencia de carga y un voltaje proporcional a la fuerza aplicada. Como la aceleración de la masa de prueba es también proporcional a la fuerza aplicada, la aceleración del acelerómetro será entonces directamente proporcional al voltaje y la carga producida en el cristal.

2.2.4. Procesamiento de señales

Después de ser almacenada la información, debe ser estudiada, procesada, para lo cual se utilizan una serie de herramientas, técnicas o software especializados a cada necesidad. Este estudio se puede categorizar en dos ramas principales:

- Dominio del tiempo, según Vynith y col., 2019b, es un término utilizado para describir el análisis de funciones matemáticas o señales con respecto al tiempo, la sucesión de estados que atraviesa la señal de forma natural. Los estudios mas comunes son en **tiempo continuo** y en **tiempo discreto**.
- Dominio de la frecuencia, según Vynith y col., 2019a, es un término utilizado para describir el análisis de funciones matemáticas, señales o movimientos periódicos respecto a su frecuencia, número de veces que sucede un evento en un periodo. Utilizan transformadas para llevar las funciones o señales del dominio del tiempo, base, al dominio de la frecuencia, deseado, la mas famosa es la **transformada de Fourier**.

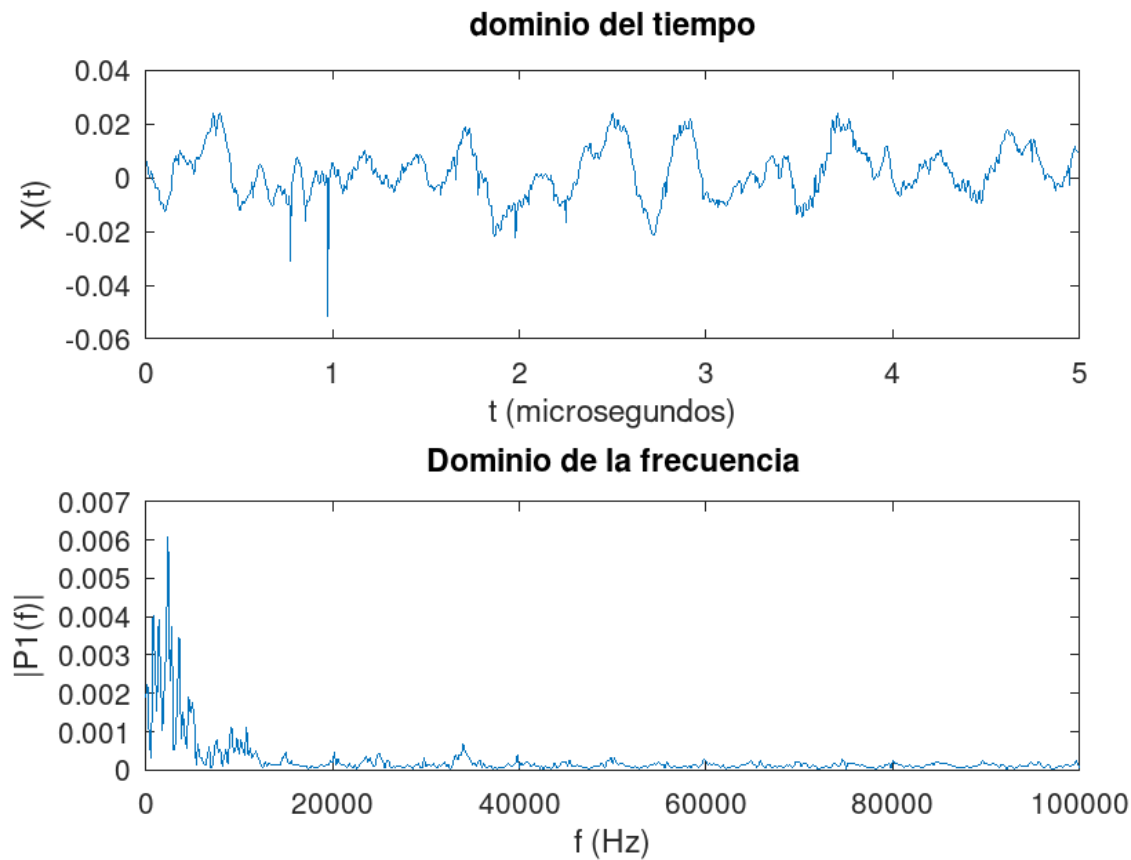
Gráficamente se suele entender el **dominio temporal** como la evolución de una señal con respecto al tiempo, es decir su evolución natural, por otro lado el **dominio frecuencial** muestra los componentes de la señal según la frecuencia en la que oscilan dentro de un rango determinado. En la figura 1 se observan ejemplos gráficos de señales en ambos dominios.

El análisis en frecuencia suele ser mas utilizado debido a que la mayoría de las fallas poseen frecuencias características y, dado que en el análisis de frecuencia se descompone en frecuencias la señal, se facilita la detección de fallas características, así mismo, la amplitud de la frecuencia es directamente proporcional al nivel de la falla. Por lo tanto se obtiene un espectro amplio del estado de la pieza. Cabe resaltar que cuando las frecuencias son bajas o muy cercanas entre si, se dificulta determinar e identificar alguna falla, suele suceder cuando se estudia una falla o evento con frecuencia muy baja o muy cercana a la frecuencia natural de la señal o elemento medido. En estos casos es mejor usar un análisis en el dominio del tiempo que facilita la detección de las fallas.

2.2.5. Herramienta Computacional

Según Wooley JC, 2005, una herramienta computacional puede ser definida como cualquier software, sistema de integración, análisis o almacenamiento que ayuda a los científicos o usuarios a solucionar un problema específico en una determinada rama. Pueden

Figura 1: Diagrama de los dominios temporal y frecuencial



Realizada con el Software Octave a partir de los datos de. Huang y col., 2018

variar desde sistemas complejos como compiladores, algoritmos e incluso sistemas operativos hasta herramientas como hojas de cálculos, sistemas de oficina o medios de comunicación. Funcionan mediante la implementación de técnicas y protocolos para solucionar problemas de forma iterativa o con una secuencia de pasos concreta.

Siguiendo este orden de ideas, una gran cantidad de estas herramientas son encontradas en la librería de información mas grande del mundo, el Internet. Todas comparten la peculiaridad de que son un **sistema** y, por ende, pueden ser accedidas con facilidad desde cualquier punto con un dispositivo capaz de tener conexión a Internet y un navegador. Esta facilidad se debe a que un **servidor** se encarga de hacer el procesamiento de la información y envía el resultado con un formato específico, típicamente son JSON, por "notación de objeto de JavaScrip" el cual es un formato de texto sencillo para el intercambio de datos, este se renderiza (proceso para generar una representación gráfica por medio de programas informáticos) en una pagina Web.

2.2.6. Sistema Web

Los sistemas Web, de acuerdo a Desconocido, 2015 y Themandrak y col., 2018, o también conocidos como aplicaciones Web son sistemas que utilizan la tecnología Web y el Internet o Intranet para transmitir la información y los servicios a usuarios o otros sistemas/aplicaciones. Estos sistemas utilizan los principios del hipertexto para renderizar la información en cualquier navegador o **pagina Web** y el poder de los **servidores** para almacenar y procesar la información. Por estas características son independientes de cualquier plataforma o sistema operativo, además de no requerir ningún proceso de instalación, facilitando de esta forma el acceso, la gestión y la rapidez de obtención de información.

Página Web

Una página Web, como se explica en contributors, 2021, es un documento accesible desde cualquier navegador con acceso a Internet que puede incluir audio, vídeo, texto y sus diferentes combinaciones. Funciona al usar el protocolo HTTP, conocido usualmente como la Web, y una estructura de hipertexto la cual permite redirigir, enlazar y estructurar el contenido y lo hace fácilmente accesible desde un navegador Web.

Funciona gracias al protocolo HTTP, "Hypertext Transfer Protocol", el cual es la base de cualquier intercambio de datos en la Web y un protocolo de estructura cliente-servidor, esto implica que una petición de datos es iniciada por el elemento que recibirá los datos (el cliente), normalmente un navegador Web, y es cubierta por el elemento que envía los datos (el servidor). Este protocolo comenzó siendo estático y dirigido usualmente a la transmisión de texto pero se fue convirtiendo en mas que eso y en la actualidad permite la transferencia de documentos de todo tipo, scripts, vídeos, entre otros; a tal punto que es fácilmente categorizado como el protocolo mas usado en todo el mundo, siendo incluso utilizado como sinónimo de Internet cuando es solo una parte de él.

Debido a la invención de tecnologías como javascrit y AJAX hoy en día es posible tener aplicaciones Web, que son programas junto a una interfaz gráfica, que permite comunicarse con servidores que realizan la mayor parte del trabajo. Es posible el desarrollo

de aplicaciones complejas que funcionen desde la comodidad de dispositivos móviles. La Web permite, por tanto, facilidad a la hora de transmitir información así como el poder acceder a cualquier contenido desde cualquier dispositivo en cualquier momento.

La Web suele ser el método de acceso de muchas tecnologías y, si bien en la actualidad el desarrollo Web usa el mismo estándar de tecnologías, el lado del servidor contempla una variedad mucho mas amplia, dado que cualquier aplicación que pueda correr en un ordenador puede ser conectada a una interfaz Web. Teniendo como limitante principal la latencia, tiempo que tarda la información en viajar, una interfaz Web es, para un usuario promedio, una solución cómoda y accesible la cual permite incluso mayor comodidad y facilidad de acceso.

Servidor

Un servidor Web, como lo define AG, 2021, es un ordenador de propósito específico que permite la transición de datos a uno o múltiples clientes Web. Para esto, el dispositivo debe de estar configurado para escuchar las solicitudes de los clientes en un entorno red. Esto se logra mediante una aplicación externa o el uso de un sistema operativo dedicado; almacena los archivos necesarios para el procesamiento de información y los datos necesarios para mostrarla, además, se encarga de distribuirla al usuario final.

Los servidores se suelen clasificar según su función y es común que cumplan mas de una función, o se encuentren mas de un tipo en una red. Algunos de estos son servidores de archivos, impresión, aplicaciones, DNS, **Web**, entre otros. Actualmente, los servidores Web son los mas abundantes en el mercado y se caracterizan por alojar la información y los datos de los usuarios a través de Internet o Intranet. Estos responden a las solicitudes de paginas Web u otros servidores basados en esta tecnología.

2.2.7. Modelo estadístico

Un modelo estadístico, de acuerdo a IBM, s.f., es una representación matemática que permite, mediante ecuaciones, codificar información extraída de los datos y, de esta forma, predecir el comportamiento de un sistema ante situaciones dadas. Funcionan mediante

variables aleatorias, una o mas variables de las cuales no se tiene completa certeza de su valor o provienen de algún evento aleatorio.

Un modelo estadístico permite inferir ciertas características de un evento, como qué tan probable es tal evento y cómo se distribuyen los valores de la variable. Además se suele usar como primer paso en generar un modelo mas preciso o para la obtención de información cuando no se tiene suficiente, es difícil su acceso o la naturaleza del sistema es extremadamente compleja y dicha tarea es simplemente imposible.

CAPÍTULO 3

MARCO METODOLÓGICO

Como fue explicado en el primer capítulo, se pretende hacer una herramienta computacional para el análisis de la vibración en motores eléctricos alimentada mediante datos de una simulación digital. Partiendo de esto, se comenzará con la definición de los siguientes aspectos.

3.1. NATURALEZA DE LA INVESTIGACIÓN

El presente trabajo es clasificado como Proyecto Especial, puesto que según Hernández (1998) lleva a:

Trabajos que lleven a creaciones tangibles, susceptibles de ser utilizadas como soluciones a problemas demostrados, o que respondan a necesidades e intereses de tipo cultural. Se incluyen en esta categoría los trabajos de elaboración de libros de texto y de materiales de apoyo educativo, el desarrollo de software, prototipos y de productos tecnológicos en general, así como también los de creación literaria y artística.

METODOLOGÍA DE DESARROLLO DEL SOFTWARE

Para la implementación de los distintos sistemas que componen la herramienta computacional propuesta, se necesitar seguir una metodología de diseño de software. Como la herramienta se clasifica como una aplicación WEB, las metodologías utilizadas en el desarrollo de este tipo aplicaciones son aplicables a este trabajo.

Las aplicaciones WEB cuentan con muchas similitudes a las de aplicaciones de computadores personales, sin embargo una de sus principales diferencias es que estas están en un estado de constante cambio por lo tanto se pierde la noción de versiones, los cambios

toman efectos de forma inmediata y de forma gradual. Esta diferencia es producto de que su función principal es la de transmitir información. Como está información cambia de forma constante los requisitos de la aplicación suelen también ser variables. Todo esto unido al hecho de que los cambios en la aplicación pueden realizarse con la menor fricción posible, los cambios se pueden observar al volver a cargar la página, hace que este tipo de aplicación exista en un estado de evolución continua. Según Pressman, 2002 la evolución constante de las aplicaciones WEB puede ser comparada con la jardinería, se hace un trabajo inicial el cual seria equivalente a sembrar un jardín y una vez se tenga el sitio implementado, se debe realizar el trabajo de mantenerlo que seria equivalente a regar y abonar las plantas.

Debido a lo presentado anteriormente, para la elaboración de los diferentes componentes de la herramienta se realizará un desarrollo de forma continua, en donde la aplicación tendrá la capacidad de evolucionar si algún día cambian los requisitos de la misma. Para esto se utilizara la ayuda de **Git** como sistema de control de versiones, lo cual permitiría integrar los diferentes cambios de forma mas eficaz y facilitar la cooperación a la hora del desarrollo de la aplicación. Para la elaboración de los diferentes componentes se usa también un proceso iterativo, cada vez que se implemente un componente se comprueba el funcionamiento del mismo y se corrige, de ser necesario.

Este modelo de implementación posee una estructura muy marcada, la cual se adapta a las metas, usuarios finales y a la filosofía de navegación que se elija. Según Pressman, 2002 esta se puede desglosar como:

- Diseño arquitectónico, el cual consiste en la definición de la estructura global, las plantillas y parte del patrón de diseño que se utilizará para estructurar la red. Específicamente, se trata de cimentar las bases para facilitar la creación del contenido y se estructura la forma de navegación por el sistema, además de los componentes que la integrarán.
- Diseño de navegación, en esta fase se eligen las rutas de navegación que permiten el acceso al contenido, además, se hacen las distinciones con respecto a los posibles usuarios que podrán acceder a la red y, por ende, las funcionalidades y/o permisos a los que tendrán acceso.

- Diseño de la interfaz, se refiere al diseño gráfico, estético y a las facilidades que se le dan a los usuarios, dado que esta es la primera impresión que se da, puede significar la diferencia entre el uso o no de la aplicación.
- Cabe destacar que, en la actualidad, se consideran mas fases que las mencionadas por Pressman, las dos mas resaltantes son la **Fase de programación** y la **Fase de Testeo**, aunque la última es nombrada como un proceso posterior al desarrollo. Estas dos fases son consideradas en la actualidad dados los constantes requerimientos de implementaciones adicionales o modificaciones a las ya existentes. Para permitir la integración de la mismas sin exponerse al colapso del sistema, se suelen utilizar **test** automatizados los cuales deben ser diseñados e implementados.

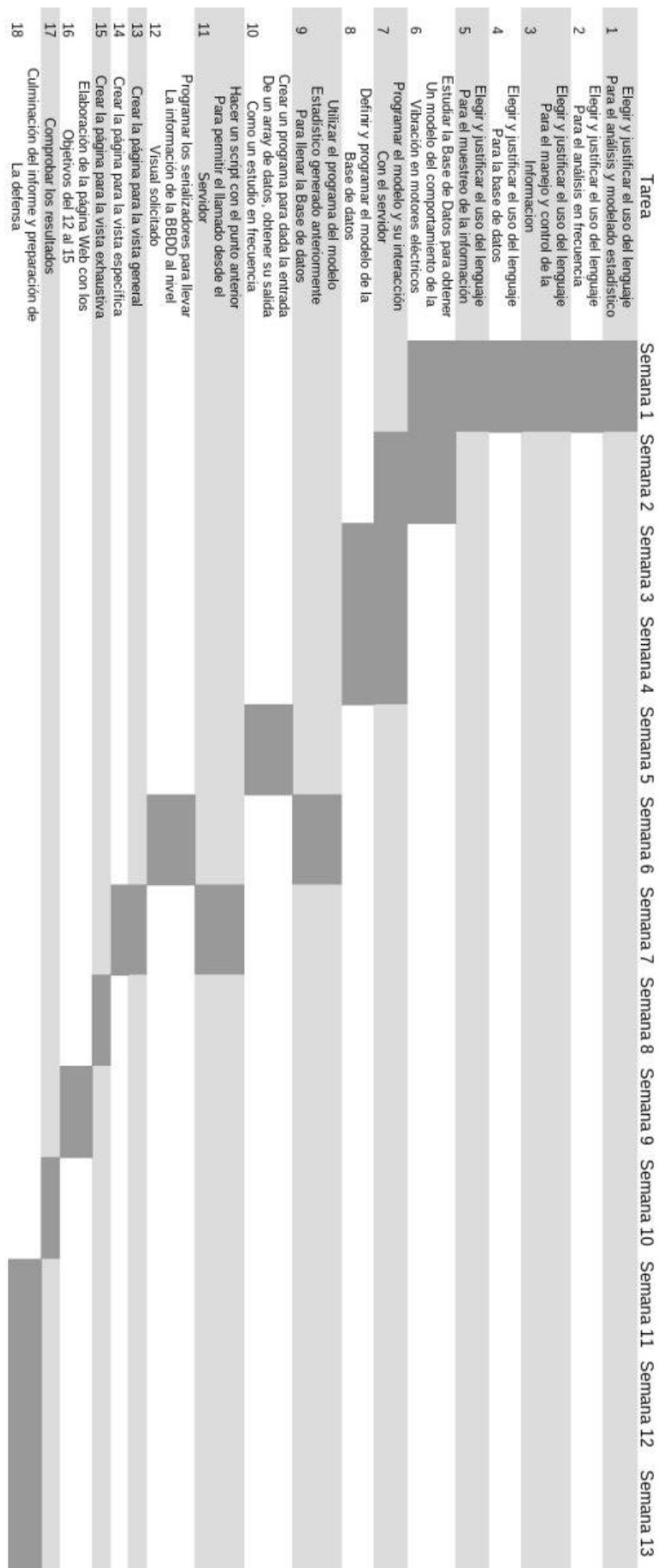
3.2. RECURSOS

- Computadoras portátiles.
- Documentación.
- Base de datos de la vibración en motores eléctricos.

3.3. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

Las actividades a realizar son las expuestas en la figura 2, y están pautadas para un lapso total de aproximadamente 13 semanas donde se planean 10 semanas de implementación:

Figura 2: Cronograma de actividades.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AG, P. (2021). *Cómo funciona un servidor* [Online; fecha de consulta: 1/8/2021]. <https://www.paessler.com/es/it-explained/server>
- Çağlar Ramazan, İ. S. & Serhat, Ş. (2014). Statistical Wiener process model for vibration signals in accelerated aging processes of electric motors. *Journal of Vibroengineering*, 16(12).
- contributors, M. (2021). *What is the difference between webpage, website, web server, and search engine?* [Online; fecha de consulta: 2/8/2021]. https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Learn/Common_questions/Pages_sites_servers_and_search_engines
- Desconocido. (2015). *¿Qué es un sistema web?* [Online; fecha de consulta: 31/7/2021]. <http://www.addappto.com/que-es-un-sistema-web/>
- Fraden, J. (2003). *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*. Springer.
- Girdhar, P. & Scheffer, C. (2004). 5 - Machinery fault diagnosis using vibration analysis. En P. Girdhar & C. Scheffer (Eds.), *Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance* (pp. 89-133). Newnes. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-075066275-8/50005-9>
- Hernández, M. T. (1998). Manual de Trabajos de Grado de Especialización y Maestría y Tesis Doctorales [fecha de consulta: 9/6/2021]. *Universidad Pedagógica Experimental Libertador*, 14-15. <http://files.innova-edu.webnode.com/200003215-6a4f06b3b1/NormasUPEL2006.pdf>
- Huang, H. & Baddour, N. (2018). Bearing vibration data collected under time-varying rotational speed conditions [fecha de consulta: 24/6/2021]. *Data in Brief*, 21, 1745-1749. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.dib.2018.11.019>
- IBM. (s.f.). *Modelos estadísticos* [Online; fecha de consulta: 1/8/2021]. <https://www.ibm.com/docs/es/spss-modeler/SaaS?topic=nodes-statistical-models>
- Kammermann, B. & Schwimbeck, H. (2017). Reliability of induction machines: Statistics, tendencies, and perspectives [fecha de consulta: 15/4/2021], 1843-1847. <https://doi.org/10.1109/ISIE.2017.8001529>

- Koene, I., Klar, V. & Viitala, R. (2020). IoT connected device for vibration analysis and measurement [fecha de consulta: 26/4/2021]. *HardwareX*, 7, e00109. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ohx.2020.e00109>
- Lacey, D. J. (s.f.). The Role of Vibration Monitoring in Predictive Maintenance [fecha de consulta: 14/4/2021]. https://www.schaeffler.com/remotemedien/media/_shared_media/08_media_library/01_publications/schaeffler_2/technicalpaper_1/download_1/the_role_of_vibration_monitoring.pdf
- LTD, N. E. (2021). *¿Qué es un Rodamiento?* [Online; fecha de consulta: 1/8/2021]. <https://www.nskeurope.es/es/bearings/products/what-s-a-bearing.html#>
- Mora, J. F. (2003). *Máquinas eléctricas*. McGraw-Hill.
- Pinto, R., Rossetti, R. & Gonçalves, G. (2016). Wireless Sensor Network Simulation for Fault Detection in Industrial Processes [fecha de consulta: 26/4/2021], 333-338. <https://doi.org/10.5220/0006011003330338>
- Pressman, R. (2002). *INGENIERIA DE SOFTWARE* [Online; fecha de consulta: 24/7/2021]. McGraw-Hill Interamericana de España S.A.
- Sauer202 & col. (2021). Vibration — Wikipedia, The Free Encyclopedia [Online; fecha de consulta: 20/6/2021]. <http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Vibration&oldid=1034850880>
- Smith, G. M. (2020). *Qué es Adquisición de Datos - DAQ o DAS?* [Online; fecha de consulta: 30/7/2021]. <https://dewesoft.com/es/daq/que-es-adquisicion-de-datos>
- Soto-Ocampo, C. R., Mera, J. M., Cano-Moreno, J. D. & Garcia-Bernardo, J. L. (2020). Low-Cost, High-Frequency, Data Acquisition System for Condition Monitoring of Rotating Machinery through Vibration Analysis-Case Study. *Sensors*, 20(12). <https://doi.org/10.3390/s20123493>
- Themandrak & col. (2018). Web information system [Online; fecha de consulta: 31/7/2021]. https://en.wikipedia.org/wiki/Web_information_system
- Ugwiri, M., Mpia, I. & Lay-Ekuakille, A. (2020). Vibrations for fault detection in electric machines [fecha de consulta: 26/4/2021]. *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*, 23, 66-72. <https://doi.org/10.1109/MIM.2020.8979527>
- Vynith & col. (2019a). Dominio de la frecuencia [Online; fecha de consulta: 26/6/2021]. https://es.wikipedia.org/wiki/Dominio_de_la_frecuencia

- Vynith & col. (2019b). Dominio del tiempo [Online; fecha de consulta: 26/6/2021]. https://es.wikipedia.org/wiki/Dominio_del_tiempo
- Weber, M. (2012). Piezoelectric Accelerometers Theory and Application.
- Wooley JC, e., Lin HS. (2005). *Catalyzing Inquiry at the Interface of Computing and Biology*. [Online; fecha de consulta: 30/7/2021]. National Academies Press (US).

BIBLIOGRAFÍA

- AG, P. (2021). *Cómo funciona un servidor* [Online; fecha de consulta: 1/8/2021]. <https://www.paessler.com/es/it-explained/server>
- Çağlar Ramazan, İ. S. & Serhat, Ş. (2014). Statistical Wiener process model for vibration signals in accelerated aging processes of electric motors. *Journal of Vibroengineering*, 16(12).
- contributors, M. (2021). *What is the difference between webpage, website, web server, and search engine?* [Online; fecha de consulta: 2/8/2021]. https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Learn/Common_questions/Pages_sites_servers_and_search_engines
- Desconocido. (2015). *¿Qué es un sistema web?* [Online; fecha de consulta: 31/7/2021]. <http://www.addappto.com/que-es-un-sistema-web/>
- Desconocido. (2021). Motor eléctrico [Online; fecha de consulta: 31/7/2021]. https://es.wikipedia.org/wiki/Motor_el%C3%A9ctrico#Caracter%C3%ADsticas
- Fraden, J. (2003). *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*. Springer.
- Francisjk2020 & col. (2021). Microelectromechanical systems — Wikipedia, The Free Encyclopedia [Online; fecha de consulta: 26/6/2021]. <http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Microelectromechanical%20systems&oldid=1035022366>
- Gelpgim22 & col. (2020). Rotor (máquina eléctrica) [Online; fecha de consulta: 31/7/2021]. [https://es.wikipedia.org/wiki/Rotor_\(m%C3%A1quina_el%C3%A9ctrica\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Rotor_(m%C3%A1quina_el%C3%A9ctrica))
- Girdhar, P. & Scheffer, C. (2004). 5 - Machinery fault diagnosis using vibration analysis. En P. Girdhar & C. Scheffer (Eds.), *Practical Machinery Vibration Analysis and*

- Predictive Maintenance* (pp. 89-133). Newnes. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-075066275-8/50005-9>
- Hanly, S. (2018). *What's the Difference Between Vibration Sensors?* [Online; fecha de consulta: 14/7/2021]. <https://www.machinedesign.com/mechanical-motion-systems/article/21837036/whats-the-difference-between-vibration-sensors>
- Hernández, M. T. (1998). Manual de Trabajos de Grado de Especialización y Maestría y Tesis Doctorales [fecha de consulta: 9/6/2021]. *Universidad Pedagógica Experimental Libertador*, 14-15. <http://files.innova-edu.webnode.com/200003215-6a4f06b3b1/NormasUPEL2006.pdf>
- Huang, H. & Baddour, N. (2018). Bearing vibration data collected under time-varying rotational speed conditions [fecha de consulta: 24/6/2021]. *Data in Brief*, 21, 1745-1749. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.dib.2018.11.019>
- IBM. (s.f.). *Modelos estadísticos* [Online; fecha de consulta: 1/8/2021]. <https://www.ibm.com/docs/es/spss-modeler/SaaS?topic=nodes-statistical-models>
- Kammermann, B. & Schwimmbeck, H. (2017). Reliability of induction machines: Statistics, tendencies, and perspectives [fecha de consulta: 15/4/2021], 1843-1847. <https://doi.org/10.1109/ISIE.2017.8001529>
- Koene, I., Klar, V. & Viitala, R. (2020). IoT connected device for vibration analysis and measurement [fecha de consulta: 26/4/2021]. *HardwareX*, 7, e00109. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ohx.2020.e00109>
- Lacey, D. J. (s.f.). The Role of Vibration Monitoring in Predictive Maintenance [fecha de consulta: 14/4/2021]. https://www.schaeffler.com/remotemedien/media/_shared_media/08_media_library/01_publications/schaeffler_2/technicalpaper_1/download_1/the_role_of_vibration_monitoring.pdf
- LTD, N. E. (2021). *¿Qué es un Rodamiento?* [Online; fecha de consulta: 1/8/2021]. <https://www.nskeurope.es/es/bearings/products/what-s-a-bearing.html#>
- Mora, J. F. (2003). *Máquinas eléctricas*. McGraw-Hill.
- Pinto, R., Rossetti, R. & Gonçalves, G. (2016). Wireless Sensor Network Simulation for Fault Detection in Industrial Processes [fecha de consulta: 26/4/2021], 333-338. <https://doi.org/10.5220/0006011003330338>
- Pressman, R. (2002). *INGENIERIA DE SOFTWARE* [Online; fecha de consulta: 24/7/2021]. McGraw-Hill Interamericana de España S.A.

- Prielipp, L. (2019). *What is a Vibration Sensor?* [Online; fecha de consulta: 28/7/2021]. <https://realpars.com/vibration-sensor/>
- Rdp060707 & col. (2020). Web page [Online; fecha de consulta: 2/8/2021]. https://en.wikipedia.org/wiki/Web_page
- Rdp060707 & col. (2021). Oscillation — Wikipedia, The Free Encyclopedia [Online; fecha de consulta: 20/6/2021]. <http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Oscillation&oldid=1035038613>
- RJJ4y7 & col. (2021). Sensor — Wikipedia, The Free Encyclopedia [Online; fecha de consulta: 26/6/2021]. <http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Sensor&oldid=1035968140>
- Sauer202 & col. (2021). Vibration — Wikipedia, The Free Encyclopedia [Online; fecha de consulta: 20/6/2021]. <http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Vibration&oldid=1034850880>
- Smith, G. M. (2020). *Qué es Adquisición de Datos - DAQ o DAS?* [Online; fecha de consulta: 30/7/2021]. <https://dewesoft.com/es/daq/que-es-adquisicion-de-datos>
- Soto-Ocampo, C. R., Mera, J. M., Cano-Moreno, J. D. & Garcia-Bernardo, J. L. (2020). Low-Cost, High-Frequency, Data Acquisition System for Condition Monitoring of Rotating Machinery through Vibration Analysis-Case Study. *Sensors*, 20(12). <https://doi.org/10.3390/s20123493>
- Themandrak & col. (2018). Web information system [Online; fecha de consulta: 31/7/2021]. https://en.wikipedia.org/wiki/Web_information_system
- Ugwiri, M., Mpia, I. & Lay-Ekuakille, A. (2020). Vibrations for fault detection in electric machines [fecha de consulta: 26/4/2021]. *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*, 23, 66-72. <https://doi.org/10.1109/MIM.2020.8979527>
- Vynith & col. (2019a). Dominio de la frecuencia [Online; fecha de consulta: 26/6/2021]. https://es.wikipedia.org/wiki/Dominio_de_la_frecuencia
- Vynith & col. (2019b). Dominio del tiempo [Online; fecha de consulta: 26/6/2021]. https://es.wikipedia.org/wiki/Dominio_del_tiempo
- Weber, M. (2012). Piezoelectric Accelerometers Theory and Application.
- WEG MEXICO, S. D. C. (2021). *Rodamientos en motores de uso general - Parte I* [Online; fecha de consulta: 2/8/2021]. <https://www.weg.net/institutional/DO/es/news/general/rodamientos-en-motores-de-uso-general-parte-i>

Wooley JC, e., Lin HS. (2005). *Catalyzing Inquiry at the Interface of Computing and Biology*. [Online; fecha de consulta: 30/7/2021]. National Academies Press (US).