

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**MAESTRÍA EN CIENCIAS MECATRÓNICA**

**“METODOLOGÍA PARA CORRELACIÓN DE VIBRACIONES CON LA CALIDAD DE LA ENERGÍA  
ENTREGADA EN SISTEMAS DE GENERACIÓN EÓLICA DE BAJA POTENCIA.”**

**OPCIÓN DE TITULACIÓN**

**TESIS**

**QUE COMO PARTE DE LOS REQUISITOS PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN CIENCIAS MECATRÓNICA**

**PRESENTA:**

**LE. GERSON PÍO RODRÍGUEZ**

**DIRIGIDO POR:**

**DR. DAVID ALEJANDRO ELVIRA ORTIZ**

**CAMPUS SAN JUAN DEL RÍO  
SAN JUAN DEL RÍO, QUERÉTARO.**

**JUNIO 2022**



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Maestría en Ciencias Mecatrónica

“Metodología para correlación de vibraciones con la calidad de la energía entregada en sistemas de generación eólica de baja potencia.”

Opción de titulación  
**Tesis**

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de  
Maestría en Ciencias Mecatrónica

**Presenta:**

LE. Gerson Pío Rodríguez

Dirigido por:

Dr. David Alejandro Elvira Ortiz

Dr. David Alejandro Elvira Ortiz  
Presidente

---

Firma

Dr. René de Jesús Romero Troncoso  
Secretario

---

Firma

Dr. Luis Morales Velázquez  
Vocal

---

Firma

Dr. Roque Alfredo Osornio Ríos  
Suplente

---

Firma

Dr. Daniel Moriñigo Sotelo  
Suplente

---

Firma

Campus San Juan del Río  
San Juan del Río, Querétaro.  
Junio 2022

## RESUMEN

El trabajo realizado en esta investigación consiste en una metodología capaz de determinar si las vibraciones en los sistemas de generación eólica afectan a la calidad de la energía que estos entregan, se trabajó sobre un banco de datos previamente adquiridos en el noroeste de España de 44 días muestreado a 8k Hz.

Se desarrollaron diversas estrategias las cuales permiten el análisis de las señales de voltaje y corriente, para obtener su distorsión armónica total y sus potencias aparente, activa y reactiva, análisis de las señales de vibración, que proporciona diversos indicadores estadísticos en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia, y correlación estadística, la cual proporciona el nivel de correlación que hay entre las señales de vibración y la calidad de la energía.

## **ABSTRACT**

The work performed in this research consists of a methodology that is able to determine if the vibrations in the wind energy generation systems affect the quality of the power that they deliver, the work was carried out on a data base previously acquired in the northwest of Spain that consists of 44 days of sampling at 8k Hz.

Several strategies were developed which allow the analysis of the voltage and current signals, to obtain their total harmonic distortion and their apparent, active, and reactive power, analysis of vibration signals, which provides various statistical features in the time domain and in the frequency domain, and a statistical correlation, which provides the level of correlation between vibration signals and power quality.

## **DEDICATORIA**

La presente investigación es dedicada a mis padres, hermana y mi novia, quienes han sido parte fundamental para culminar con la misma y han dado sido mi principal motivación para obtener este logro académico.

## **AGRADECIMIENTOS**

Primeramente, le doy gracias a Dios, por permitirme obtener este logro en mi vida.

A mis padres Simón y Oralia, por su sustento incondicional en el tiempo de mis estudios.

A mis abuelos, Anselmo y Oralia, Felipe y Angela, por sus consejos y palabras de aliento.

A mi hermana Jael, por su apoyo y motivaciones.

A mi novia María, por su paciencia y determinación.

A mis tías, por su hospitalidad, calidez y cariño, a lo largo de la maestría.

Al Dr. David, por su instrucción y dirección.

A mis maestros, por todo su conocimiento que depositaron en mí.

A la Universidad Autónoma de Querétaro, por abrirme las puertas de sus instituciones para poder estudiar la maestría.

A CONACYT, por el apoyo económico y su confianza puesta en mí.

## ÍNDICE

Resumen	i
Abstract	ii
Dedicatoria	iii
Agradecimientos	iv
Índice	v
Índice de figuras	vii
Índice de tablas	ix
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Descripción del problema	8
1.3. Justificación	9
1.4. Hipótesis y Objetivos	11
1.5. Planteamiento general y estrategia por pandemia	13
II. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	16
2.1. Transformada de Fourier	16
2.2. Transformada Wavelet	18
2.3. Vibraciones	19
2.4. Calidad de la energía	20
2.5. Correlación estadística	22
2.6. Parámetros estadísticos	23
2.7. Aerogeneradores	26
2.8. Técnicas de filtrado	27
2.9. VHDL	28
III. METODOLOGÍA	31
3.1. Implementaciones MATLAB	33

3.1.1. Análisis de señales de voltaje y corriente	33
3.1.2. Análisis estadístico de señales de vibración en el dominio del tiempo	36
3.1.3 .Análisis estadístico de señales de vibración en el dominio de la frecuencia	38
3.1.4. Correlación estadística	39
3.1.5. Regresión lineal	41
3.2. Detección de disturbios en la red	42
IV. Resultados y discusión	44
4.1. Vibraciones y potencia	44
4.2. Correlación entre distorsión armónica total e indicadores estadísticos en el dominio del tiempo y frecuencia	46
4.3. Regresión lineal entre distorsión armónica total y potencia reactiva	52
4.4. Microalgoritmo genético para la detección de disturbios transitorios	55
4.5. Conclusión	56
V. REFERENCIAS	58
VI. Anexos	62
6.1. Script análisis señal de voltaje y corriente	62
6.2. Script análisis estadístico de señales de vibración en el dominio del tiempo	64
6.3. Script análisis estadístico de señales de vibración en el dominio de la frecuencia	65
6.4. Script correlación estadística	67
6.5. Script regresión lineal	68

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 “Diagrama a bloques de la metodología original”.	13
Figura 2.1 “Ejecución de FFT de ocho puntos”.	17
Figura 2.2 “Respuesta de correlación estadística”.	23
Figura 2.3 “Diagramas de Bode de los filtros”.	28
Figura 2.4 “Módulos VHDL”.	30
Figura 3.1 “Diagrama a bloques de la metodología”.	31
Figura 3.2 “Diagrama de flujo $\mu$ AG”	43
Figura 4.1 “Potencias aparente, activa, reactiva y vibraciones del primer día de muestra”.	45
Figura 4.2 “Potencias aparente, activa, reactiva y vibraciones del segundo día de muestra”.	46
Figura 4.3 “Señales de voltaje, corriente y vibraciones de la primer muestra”.	47
Figura 4.4 “Señales de voltaje, corriente y vibraciones de la segunda muestra”.	48
Figura 4.5 “Señal de distorsión armónica total de la señal de voltaje primer muestra”.	49
Figura 4.6 “Señal de distorsión armónica total segunda muestra”.	50
Figura 4.7 “Señal de los indicadores estadísticos en el dominio del tiempo y de la frecuencia primer muestra”.	51
Figura 4.8 “Señal de los indicadores estadísticos en el dominio del tiempo y de la frecuencia segunda muestra”.	52

Figura 4.9 “Regresión lineal entre THD y Cuarto momento 1”.	53
Figura 4.10 “Regresión lineal entre Potencia reactiva y Media de vibraciones”.	54
Figura 4.11 “Señal real del parque eólico de España analizada por el $\mu$ AG”	56

## INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 “Comparativa de multiplicaciones DFT y FFT”.	18
Tabla 2.2 “Ecuaciones de voltaje, corriente y potencias”.	21
Tabla 2.3 “Nomenclatura ecuaciones de voltaje, corriente y potencias”.	21
Tabla 2.4 “Parámetros estadísticos y sus ecuaciones matemáticas en el dominio del tiempo”.	24
Tabla 2.5 “Parámetros estadísticos y sus ecuaciones matemáticas en el dominio de la frecuencia”.	25
Tabla 4.1 “Parámetros y valores de la regresión lineal entre THD y Cuarto momento 1”.	53
Tabla 4.2 “Parámetros y valores de la regresión lineal entre Potencia reactiva y Media”.	55

# I. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Antecedentes

Como es conocido, en la economía mexicana un sector de los más relevantes es el sector energético, ya que, proporciona los bienes de consumo esenciales para el uso doméstico, así como para todas las actividades de producción (Larios, 2014). En México, el mayor generador energético es el petróleo, en 2017 del 100% de energía consumida, el 62% fue por petróleo y el 9.5% por energías renovables, del cual el 5.2% es generado por biomasas, el 1.6% por hidroenergía y el 2.6% por energía eólica (Secretaría de Energía, 2018).

La producción de energía por medio de fuentes fósiles conlleva dos grandes problemas: el primero, por ser una energía no renovable en unos años se agotará y el segundo es la contaminación que se genera, teniendo como factor más importante los gases de efecto invernadero, lo cual contribuye en el cambio climático (Larios, 2014). Es por lo cual que cada vez más, se busca la producción de energía por medios renovables, y que a la par, se disminuya la contaminación. Ejemplo de ello puede ser: la producción de energía solar, hidroeléctrica, biomasas, geotérmica y eólica, siendo esta última la que se abordará en esta tesis.

Los aerogeneradores a nivel internacional en la actualidad son un tema relevante en la producción de energía eléctrica, ya que es un medio renovable y no contaminante al medio ambiente. A nivel mundial su aportación en 2018 fue del 4.8% (IEA, 2020) comparado con las demás fuentes de energía, donde, la producción de carbón, gas natural e hidráulica, tienen los primeros puestos con una aportación del 38%, 23% y 16.2% respectivamente. Por otro lado, los países de mayor producción en energía eólica son: China, España, Alemania, Estados Unidos e India, así mismo la producción total de energía de aerogeneradores instalados en costas en 2020 es de 29.1 GW (GWEC, 2020).

Los trabajos sobre el tema que demuestran la importancia de la utilización de los aerogeneradores como productores de energía a nivel internacional son los siguientes. Por un lado, están los que se enfocan en la detección de fallas mecánicas, como se ve con Cho & Powers (2009), quienes realizaron un análisis de tiempo-frecuencia, para inspeccionar las frecuencias de la corriente variable a través de una red de aerogeneradores de velocidad variable, por medio de experimentos de simulación, basados en un modelo dinámico PSCAD. En dicho trabajo, se investiga la frecuencia variable y se comparan las características de las corrientes con la velocidad del viento para localizar la respuesta de frecuencia en el tiempo, y proporcionar la información de la velocidad del viento; y así mismo, Cai et al. (2013) construyeron una instalación de pruebas basada en un aerogenerador de imanes permanentes de 500 W, donde simulaban fallas mecánicas en la pista exterior del rodamiento de bolas y el desequilibrio del rotor, y estos datos fueron analizados utilizando las transformadas de Fourier de tiempo corto, transformada de Wavelet continua y, el análisis de orden para lograr la detección de cada una de las fallas. Y, por el otro, están los que se sitúan en el estudio de compensar problemas de fluctuaciones asociadas a fenómenos ambientales como: Arciniegas (2018) refiere el diseño y caracterización de un concentrador eólico, para acrecentar la potencia eólica aprovechable en los aerogeneradores; por medio de análisis experimentales, modelado por medio de la ecuación de 5to. orden de Bell & Mehta, implementado en Matlab y expidiendo los datos a Solid Edge, y simulando mediante elementos finitos en ANSYS. Así mismo, León (2019) propuso una técnica de almacenamiento hidráulico de tipo vejiga de 5kW en un sistema eólico, como unidad de respaldo para compensar las anomalías acontecidas en el proceso de generación eléctrica a causa de la fluctuación del viento como fuente natural; este se lleva a cabo, aprovechando los aumentos de velocidad del viento, para acumular el agua en el sistema tipo vejiga y devueltos al circuito hidráulico para mantener los 1800 rpm. También, Wang et al. (2020) elaboraron una metodología de un modelo multicuerpo de simulación, basado en mediciones en el sitio de la velocidad del viento sobre aerogeneradores durante tifones de múltiples etapas. Con lo cual, logró

diseñar un modelo de análisis avanzado del aerogenerador de 5MW del Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL); para conocer su comportamiento durante las diferentes etapas de los tifones.

Una de las variables que más se ha utilizado para analizar fallos y comportamientos anómalos en aerogeneradores son las vibraciones, estas han sido utilizadas de la siguiente forma: Zhao et. al. (2020) desarrollaron un estudio donde se monitoreó las vibraciones, la velocidad de rotación de las aspas de aerogenerador de 1.5MW instalado en tierra y la velocidad del viento; hicieron uso de diagramas de campana de Bell comparando la velocidad de rotación de las aspas con las vibraciones, obtuvieron una relación entre los parámetros del primer orden y el segundo orden modal y las condiciones de operación del aerogenerador, con el fin de entender la respuesta del aerogenerador bajo diferentes condiciones de operación. Yang & He (2020) hicieron una simulación de un modelo de amortiguadores instalados en la plataforma y en la góndola de un aerogenerador instalados en costa, para suprimir las vibraciones estructurales provocadas por el viento. Estos trabajos son relevantes para la investigación, ya que permiten conocer el comportamiento de los aerogeneradores bajo diferentes condiciones ambientales; así como, qué tipo de reacciones tienen ante fallas mecánicas; y así también, otorgan herramientas para una generación estable de energía eléctrica. Sin embargo, se observa que los análisis realizados del efecto del viento en la energía entregada por los aerogeneradores, no se asocian a la producción de la energía con las vibraciones en los aerogeneradores. Siendo este punto, el que lleva a realizar la investigación para desarrollar una metodología que permita encontrar una correlación entre las vibraciones y la calidad de la energía.

La calidad de la energía es la encargada de la regularización del suministro eléctrico por medio de reglas que determinan los parámetros básicos, niveles, forma de onda, armónicos, interrupciones, niveles de distorsión armónica, etc. (IEEE, 2010). Por lo cual, se han realizado diversos trabajos respecto a ella en aerogeneradores, Korkua et al. (2012) estudiaron el sistema de control de un

generador de inducción doblemente alimentado, para optimizar la calidad de la energía y suprimir las vibraciones sobre la parte giratoria de la máquina, durante la condición de desequilibrio del rotor. Liu y Lan (2016) realizan mediciones de la calidad de la energía para una pequeña turbina eólica comercial, a través del análisis de las fluctuaciones de voltaje y corriente, parpadeo, armónicos, potencia activa y reactiva, ya que a menudo se descuidan estas mediciones, pensando que al ser capacidades pequeñas no impactan en el sistema eléctrico. Sayenko y Molchan (2019) propusieron un método, para modelar el flujo del viento, basado en ecuaciones de diferencias, obteniendo y analizando las dependencias de los parámetros de distorsión armónica total de voltaje. Como se ha observado, se han detectado dos problemas principales: por un lado, las investigaciones sobre aerogeneradores a nivel internacional han centrado su atención en la simulación de fallas mecánicas para analizar la respuesta de los aerogeneradores y lograr identificarlas, y por otro lado, el modelado del viento para obtener una corriente constante y una mejor calidad de la energía analizando las fluctuaciones de voltaje generada, e implementar técnicas de compensación de la falta de potencia para generadores eólicos, sin embargo, como se observó, se ha dejado de lado la importancia del análisis de las vibraciones sobre la calidad de la energía, pasando por alto el efecto que pueden tener estas al generarse la energía eléctrica.

Los principales problemas con las fuentes renovables son, la aparición de distorsión armónica y la pérdida de factor de potencia a causa del aumento de la potencia reactiva, como lo podemos observar en los estudios presentado por Jashfar & Esmaeili (2014), detectaron que los problemas con la potencia reactiva y la distorsión armónica, afectan a la calidad de la energía suministrada por el sistema fotovoltaico, por lo cual diseñaron un control con cargar no lineales para reducir la distorsión armónica, compensando la potencia armónica con las cargas añadidas a lo largo del día. Así mismo, Zhang et al. (2012), explica que una de las principales fuentes de pérdida energética de la red eléctrica es la potencia reactiva, por lo que diseñaron un control capaz de optimizar las pérdidas de potencia activa en las redes

locales, como en áreas interconectadas. Es por ello, que estos dos parámetros se tomarán en cuenta en la presente investigación, y a pesar de que no son suficientes para predecir el comportamiento de la calidad la energía, la estadística sugiere que existe una fuerte relación entre ellas.

A nivel nacional los aerogeneradores han sido tema de investigación abordado por varios autores, como ejemplo: Sánchez et al. (2019) desarrollaron un sistema que permite determinar en línea, distintas fallas estructurales en una turbina eólica, por medio de un análisis estadístico de frecuencia apoyado en Matlab y LabView. El sistema se validó utilizando mediciones en línea, conseguidas por sensores de vibración de 3 ejes en un aerogenerador casero. Una interfaz gráfica se desarrolló en LabView, para proporcionar la detección en línea y la separación de las fallas manifestadas por vibraciones mecánicas. Guerrón et al. (2014) mostraron y simularon una recopilación de los fenómenos y conceptos que afectan la calidad de energía, y cómo estos se forman en parques eólicos. Entre algunos fenómenos que analiza y que perturban la calidad de la energía son: fenómenos electromagnéticos (caídas de voltaje, elevación de voltaje, bajo voltaje, sobre voltaje y transitorios), ráfagas de viento, cortos circuitos en generadores, armónicos, flickers, ferresonancias, huecos de tensión y micro cortes. Para llevar a cabo mapas de estrategias de control, previniendo pérdidas económicas a niveles de transmisión y distribución, gracias a la actualización de estos sistemas. Si bien las investigaciones desarrolladas a nivel nacional han utilizado las vibraciones, estas han sido consideradas solamente como un elemento para la detección de fallos mecánicos. También se ha abordado el tema de la calidad de la energía y se ha buscado determinar cuáles son las principales causas de problemas de calidad de la energía en sistemas de generación eólica. Sin embargo, ambos problemas han sido abordados por separado, por lo que no se ha determinado si existe una relación directa entre ambos fenómenos: los niveles de vibración y la calidad de la energía.

La generación eólica ha sido un tema que también ha dado pauta para desarrollar varios trabajos de investigación dentro de la Universidad Autónoma de

Querétaro, ejemplo de ello son: Mendoza (2015) para el control de velocidad en aerogeneradores de pequeña escala desarrollo e implementó un sistema embebido, utilizando un OMAP cortex A8 embebido en una placa BeagleBone Black, para encontrar el punto máxima potencia, utilizando algoritmos heurísticos. Esto con el fin de evitar el sobrepaso de energía y así, evitar daños en los aerogeneradores por grandes ráfagas de viento o altas velocidades que excedan el umbral de frenado. Hernández (2018) propuso una metodología basada en la transformada wavelet packet para identificar fallas mecánicas en generadores eólicos de baja potencia. Se calculó un índice de energía para examinar nodos concretos del árbol de descomposición wavelet empleando la transformada wavelet packet a las señales de vibraciones, con la finalidad de obtener firmas características confederadas a cada falla provocada y de esta manera, ser detectadas. Así mismo, ejecutó un análisis estadístico con las amplitudes de energía obtenidas por medio de funciones de distribución Gaussiana, para determinar la capacidad de diferenciación entre los estados de falla y el estado sano del aerogenerador. Esto se llevó a cabo, con la intención de entender el comportamiento de las señales de vibraciones presentes en el aerogenerador bajo desbalance en un aspa, fisuras en un aspa y daño en rodamiento, para posteriormente cotejarlas con la condición en estado sano del mismo. Hernández U. (2018) desarrolló un sistema de emulación de modelos de velocidad de aspas en un aerogenerador de baja potencia, basándose en la creación de un túnel de viento, generando y reproduciendo perfiles de velocidad de viento similares al comportamiento ambiental, midiendo a través de un aerogenerador de baja potencia, el proceder de las aspas ante los diferentes perfiles de viento. Así mismo, a nivel local las investigaciones realizadas, se han centrado al igual que a nivel internacional y nacional, a implementar diversas técnicas de detección de fallas, simulación de diferentes características de viento y su efecto en los aerogeneradores y, dominar la velocidad de rotación de las aspas para una mejor eficiencia, dejando de lado la correlación de las vibraciones en los aerogeneradores y la calidad de energía generada. Si bien, los problemas han sido enfocados mayormente a la detección y prevención de fallos físicos en los

aerogeneradores, así como, el simular diferentes efectos del viento y compararlas con la respuesta de generadores eólicos, ninguno de ellos, se ha centrado en determinar si las vibraciones de los aerogeneradores afectan la energía suministrada por estos mismos. Por lo cual, en este trabajo de investigación se pretende demostrar, si existe tal afectación o no, y generar con ello nueva información que pueda ser útil a futuras investigaciones.

## **1.2. Descripción del problema**

Los combustibles fósiles están en decadencia, y la utilización de estos implican gran contaminación al medio ambiente, generando gases de efecto invernadero y dañando la capa de ozono, así como la contaminación en los mares por los desechos que estos generan, es por eso que cada vez se utilizan más las energías renovables como la eólica, en la cual, los aerogeneradores han tenido un gran crecimiento como fuentes de energía renovable, para la generación de energía eléctrica, esto es posible, a través de la energía cinética que el viento produce en sus aspas.

Al realizarse estos movimientos se originan vibraciones, que pueden ser derivadas por daños estructurales o algún fenómeno geológico, los cuales son inherentes en cualquier sistema mecánico que se utilice. Otro factor que influye en las vibraciones del aerogenerador es el viento, el cual varía en velocidad y dirección. Si estas vibraciones son elevadas, pueden traer consecuencias graves para el sistema, traducidos en daños estructurales y problemas en la calidad de la energía suministrada.

Las vibraciones en los aerogeneradores han sido una de las principales fuentes de estudio para la detección de problemas estructurales, sin embargo, no se ha tomado en cuenta, la afectación a la calidad de la energía que estas proporcionan, por lo que, en esta investigación se pretende abordar y aportar una metodología que ayude desarrollar, una correlación entre las vibraciones de un generador eólico de baja potencia y la calidad de la energía que entrega.

### **1.3. Justificación**

En la actualidad, las energías renovables han ganado gran popularidad a nivel internacional, puesto que los combustibles fósiles están representando serios problemas para el medio ambiente, tales como: el cambio climático, la contaminación y el calentamiento global, así como la avanzada explotación de este recurso, que poco a poco se va agotando. Y al ser la producción de energía eléctrica en el mundo una demanda constante, se ha visto la necesidad de utilizar otros medios de producción de esta que no afecte el medio ambiente y su explotación no sea limitada. Es ahí donde las energías renovables están ganando gran popularidad a nivel internacional, siendo estas: la hidráulica, solar, biomasa y eólica. Precisamente esta última, la eólica es una de las fuentes más utilizadas; su producción es por medio de aerogeneradores, los cuales dependen de la constancia y velocidad del viento, este mismo genera vibraciones en las estructuras de los aerogeneradores. Sin embargo, es necesario realizar investigaciones que permitan lograr, una explotación de este recurso de una manera más eficiente.

Como se ha detectado una de las principales dependencias para la generación de energía renovable son las condiciones ambientales, en el caso de la generación eólica es la dependencia al viento, el cual es variable en su velocidad y dirección. Si esta variabilidad es la causante de niveles de vibraciones en aerogeneradores, resulta necesario medir las condiciones del viento y determinar cómo influyen en los niveles de vibración que puedan aparecer.

Durante la exploración de la literatura, se determinó que muchas de las investigaciones al respecto, se enfocan únicamente al tema de modelar diferentes efectos del viento o, a los daños estructurales en aerogeneradores, y las que se refieren a vibraciones en aerogeneradores, son relacionándolas a daños estructurales de los mismos, y no se encontró, ninguna investigación que relacione las vibraciones con la calidad de la energía de este. Por lo cual, es necesario

desarrollar equipos y metodologías que permitan determinar, cuándo una variable como las vibraciones generan efectos perjudiciales en la calidad de la energía, esto con la finalidad de ofrecer un suministro eléctrico robusto y confiable, y en este sentido la metodología que se propone obtener en esta investigación puede ser de gran ayuda para lograr este fin.

Lo que se busca con este aporte, es que dicha metodología lleve a desarrollar a través de técnicas de filtrado, transformadas de espacio y análisis estadísticos una correlación entre las vibraciones de un generador eólico de baja potencia y la calidad de la energía que entrega. Ya que la tendencia actual es desarrollar redes inteligentes, donde los dispositivos que detectan condiciones anómalas dentro de la red son de vital importancia. Por lo tanto, esta metodología podría ser fácilmente adaptada a un sistema de este estilo.

#### **1.4. Hipótesis y objetivos**

Hipótesis:

Mediante el análisis y procesamiento avanzado de señales se demostrará y, en su caso, modelará la correlación existente entre las vibraciones presentes en un generador eólico de baja potencia y su calidad de la energía generada considerando, además, la velocidad del viento.

Objetivo general:

Desarrollar una metodología basada en técnicas de filtrado, transformadas de espacio y análisis estadístico para determinar si los niveles de vibración presentes en un generador eólico de baja potencia tienen un efecto perjudicial en la calidad de la energía entregada la cual será evaluada a la salida de un inversor monofásico.

Objetivos específicos:

1. Analizar un banco de datos de señales y mediante el uso de filtros e indicadores de potencia y energía, visualizar el comportamiento de las variables eléctricas y de vibración para diferentes días del año.
2. Realizar mediciones de los niveles de vibración, voltaje y corriente en generadores eólicos de baja potencia, utilizando sensores inerciales y sistemas de adquisición de datos de desarrollo propietario para generar un banco de datos que contenga estas variables.
3. Analizar, a través de técnicas de filtrado digital y transformadas de espacio, los niveles de vibración entregados por el acelerómetro, para observar cómo varían estos niveles ante diferentes condiciones de viento.

4. Proponer un modelo matemático haciendo uso de técnicas estadísticas para determinar la correlación existente entre las vibraciones y la calidad de la energía suministrada por un aerogenerador de baja potencia.

5. Proponer una metodología mediante el uso de transformadas de espacio y análisis estadístico para detectar si los niveles de vibración afectan de manera negativa a la energía entregada por el sistema de generación eólica.

6. Validar la metodología mediante el uso pruebas sintéticas y reales para demostrar su efectividad y correcto funcionamiento.

## 1.5. Planteamiento general y estrategia por pandemia

El planteamiento general original de la presente investigación, está representada en la figura 1.1, la que consta del análisis de señales sintéticas y base de datos propiamente creada de aerogeneradores de baja potencia, diseñando un sistema de adquisición de datos para la recaudación y almacenamiento de las señales de voltaje, corriente y vibraciones basado en un sistema FPGA; así como, la medición de la velocidad y dirección del viento correspondiente al mismo tiempo de muestreo de las demás señales, para posteriormente aplicarle un análisis de indicadores estadísticos a las señales de voltaje y corriente, filtrado y análisis del espectro para las señales de vibraciones, con la finalidad de generar una correlación entre la calidad de la energía y las vibraciones, y a la par, generar otra correlación entre las vibraciones y el comportamiento del tiempo.

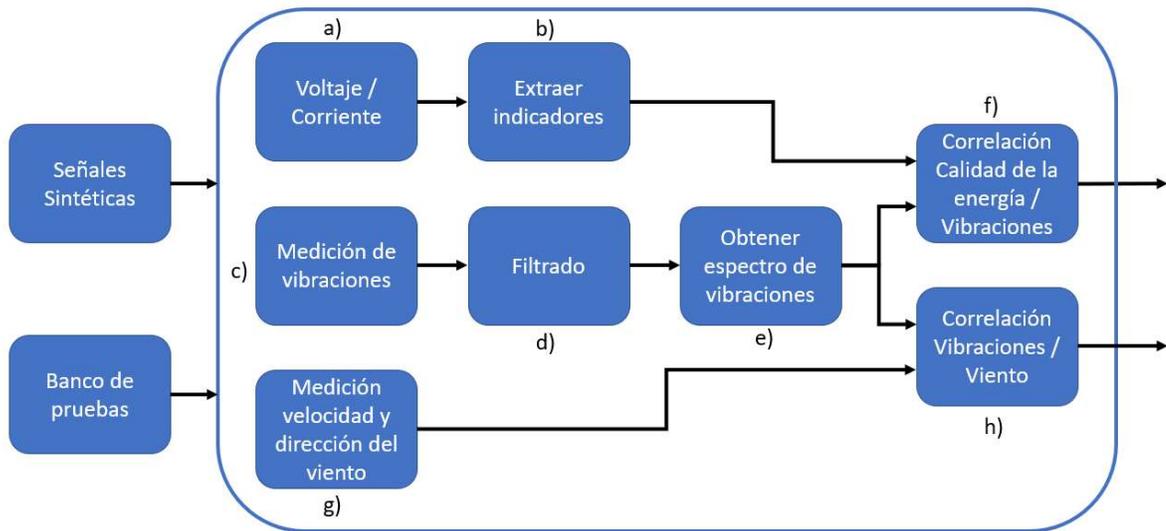


Figura 1.1 “Diagrama a bloques de la metodología original” (autoría propia).

A continuación, se explica el proceso que realizaría cada etapa de esta metodología:

- a) Se realizará un muestreo de señales de voltaje y de corriente adquiriéndolos con un sistema de matriz de puertas lógicas programable de campo (FPGA, "Field-Programmable Gate Array").
- b) Se obtendrán los indicadores de la calidad de la energía para las señales de voltaje y corriente del aerogenerador.
- c) Se adquirirán señales de vibraciones de aerogeneradores haciendo uso del sensor IIS3DWB, correspondiente al mismo tiempo de las muestras de voltaje y corriente, con el mismo sistema de adquisición.
- d) Se desarrollará un filtrado digital de respuesta infinita al impulso (IIR, "Infinite Impulse Response") para conseguir una mejora en la nitidez de las señales de vibración, atenuando las señales de ruido y permaneciendo con las señales necesarias para la investigación.
- e) Se hará uso de transformadas de espacio, por ejemplo: FFT, transformada Wavelet, entre otras. Con las cuales obtendremos el espectro de las señales de vibración, para analizar su comportamiento en el dominio de la frecuencia.
- f) Se desarrollará una correlación entre las señales de vibración y la calidad de la energía para determinar si los niveles de vibración afectan de manera negativa a la calidad de la energía.
- g) Se realiza medición de la velocidad y dirección del viento que influye en el aerogenerador, utilizando el mismo sistema de adquisición y correspondiendo al mismo periodo de tiempo de las señales de voltaje, corriente y vibraciones.
- h) Se generará una correlación entre la velocidad y dirección del viento y las vibraciones, para determinar la influencia del viento sobre las vibraciones del aerogenerador.

Derivado de la pandemia COVID-19 acontecida desde el año 2020 y hasta la actualidad (2022), fue necesario el replanteamiento de la metodología, dado que el ingreso a la institución fue restringido durante un año, lo que impidió llevar a cabo

las pruebas originalmente propuestas, a raíz de esto y buscando no comprometer la investigación, se decidió trabajar con señales previamente obtenidas de la central eólica de alta potencia de España, por lo que en la metodología actual se centra en el análisis de señales, dejando de lado la adquisición y acondicionamiento de las señales.

## II. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

En esta investigación se abordarán los siguientes temas: transformada de Fourier, transformada Wavelet, vibraciones, calidad de la energía, correlación estadística, aerogeneradores y técnicas de filtrado. Ya que cada uno de ellos son parte importante para el desarrollo de la metodología que se pretende realizar, y describen el objeto a estudiar por esta misma.

### 2.1. Transformada de Fourier

La Transformada de Fourier (TF) es uno de los recursos más utilizados para el análisis espectral, la forma más eficiente de implementar la Transformada Discreta de Fourier (DFT, “Discrete Fourier Transform”) es usando el algoritmo conocido como la Transformada Rápida de Fourier (FFT, “Fast Fourier Transform”), con la cual pasamos del dominio del tiempo (DT) al dominio de la frecuencia (DF), la ecuación (1) describe el comportamiento de la DFT.

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)W_N^{kn} \quad 0 \leq k \leq N - 1 \quad (1)$$

Donde  $x(n)$  es una señal periódica,  $N$  el número de operaciones a realizar y  $W_N$  son pesos constantes por los cuales la función es multiplicada y está definida por la ecuación (2).

$$W_N = e^{-j2\pi/N} \quad (1)$$

Así mismo, se cuenta con la función inversa de la TF, que se representa en la ecuación (3), la cual permite pasar una función del dominio en frecuencia al del tiempo.

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) W_N^{-nk} \quad 0 \leq n \leq N - 1 \quad (2)$$

A lo cual, para una computadora, el procesamiento de tantas multiplicaciones imaginarias es muy pesado, por lo cual se desempeña el uso de la FFT por medio de multiplicación por pesos específicos los cuales hacen más sencillo el algoritmo y reduce bastante el número de multiplicaciones imaginarias haciendo que el costo en computo sea menor.

Como se puede apreciar en la figura 2.1, el cálculo se reduce a una serie de multiplicaciones por -1 y diferentes pesos ( $W_N$ ) haciendo que este cálculo sea menos pesado para una computadora, en la tabla 2.1 se puede apreciar que tanto se disminuye el número de multiplicaciones necesarias para llevar a cabo la TF de la DFT y la FFT.

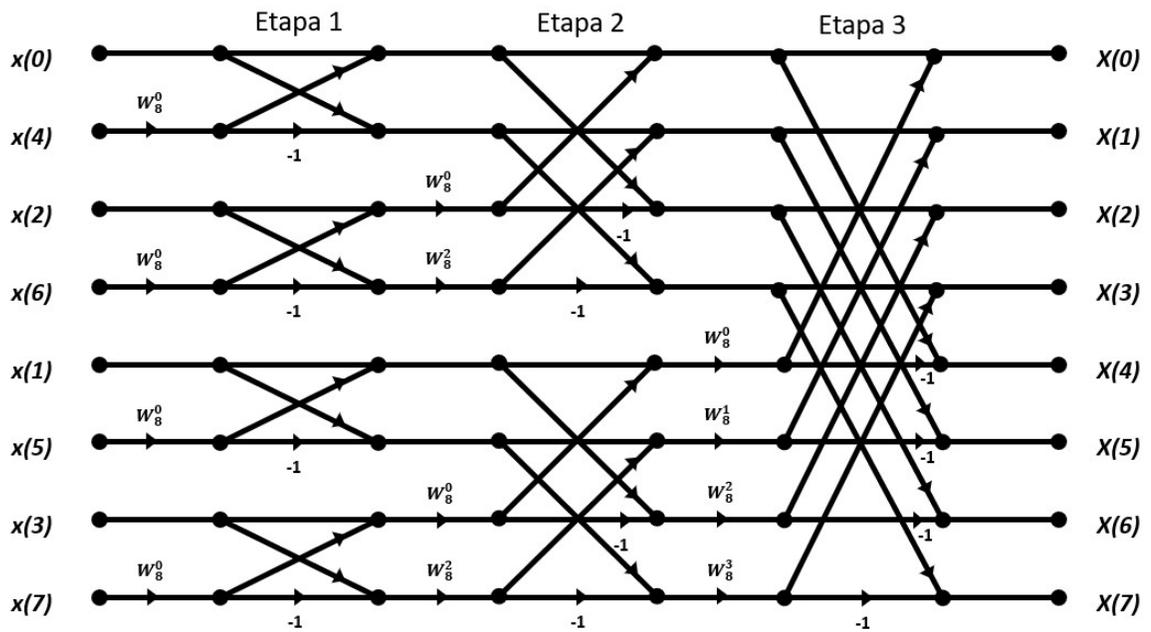


Figura 2.1 “Ejecución de FFT de ocho puntos” (autoría propia).

Tabla 2.1 “Comparativa de multiplicaciones DFT y FFT” (Pan & Yang, 2009).

<b>Número de Puntos</b>	<b>Multiplicaciones Complejas en computo directo</b>	<b>Multiplicaciones Complejas en algoritmo FFT</b>	<b>Factor de velocidad mejorada</b>
$N$	$N^2$	$(N/2)\log_2 N$	
4	16	4	4.0
8	64	12	5.3
16	256	32	8.0
32	1,024	80	12.8
62	4,096	192	21.3
128	16,384	448	36.6
256	64,536	1,024	64.0
512	262,144	2,304	113.8
1,024	1,048,576	5,120	204.8

Por lo tanto, para un análisis espectral a muchos puntos es más eficiente utilizar la FFT, y muchos sistemas digitales tienen acceso directo a esta herramienta.

## 2.2. Transformada Wavelet

La transformada Wavelet (TW) es uno de los mejores métodos procesamiento de señales para estudiar señales no estacionarias, ya que esta es local en tiempo, ortogonal, ortonormal, compacta y real. Esta ha sido utilizada para la localización de frecuencias naturales y fallas estructurales, ya que, este recurso permite descomponer a la señal en múltiples frecuencias, conocido como multi-resolución (Amézquita, 2012).

La TW, que se muestra en la ecuación (4), está definida como la convolución de  $x(t)$  con  $\Psi(t)$ , la cual se conoce como función Madre.

$$CWT_{\psi}(a,b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (3)$$

Donde  $x(t)$  es la señal que se desea analizar,  $a$  es el factor de escalamiento, también conocido como factor de dilatación, y  $b$  es el parámetro que muestra la ubicación en el tiempo, o factor de traslación. Las Wavelets son formadas a partir de la traslación y cambio de escalas de la misma función Madre, por lo que, si el factor de escalamiento es mayor a uno, cuando  $a > 1$  se considera función extendida, y cuando  $a < 1$ , la función se contrae. Todas las funciones Wavelets de la función madre tiene la misma forma a pesar de tener diferente escala y ubicación (Hernández, 2018).

### 2.3. Vibraciones

Todo movimiento que se repite periódicamente de una fracción de tiempo se le conoce como vibración u oscilación. La teoría de la vibración está relacionada con la investigación de los movimientos oscilatorios de los cuerpos y las fuerzas asociadas a ellos. Por lo general, un sistema vibratorio incluye un medio para almacenar energía potencial y otro para almacenar energía cinética, por el cual la energía se disipa gradualmente (Rao, 2012).

La vibración se puede clasificar de varias maneras, por ejemplo:

- Vibración libre: se le conoce al tipo de vibración de un sistema que se le permite que vibre por sí mismo posteriormente a una anomalía inicial.
- Vibración forzada: Es la vibración resultante cuando a un sistema se le ejerce una fuerza externa.

- Vibración no amortiguada: Si no se disipa o pierde energía por fricción u otra resistencia a lo largo de la oscilación, por el contrario, si se pierde la energía se conoce como vibración amortiguada.
- Vibración lineal: Si todos los componentes básicos de un sistema vibratorio se comportan linealmente, pero si cualquiera de los componentes procede de manera no lineal la vibración se denomina vibración no lineal.
- Vibración determinística: Cuando la magnitud de la excitación que ejerce en un sistema vibratorio es determinable en cualquier tiempo.
- Vibración aleatoria: Cuando la excitación no es determinística, no es posible pronosticar el valor de la excitación, algunos ejemplos de este tipo de excitaciones son, movimiento de la tierra durante sismos, la aspereza del camino y la velocidad del viento.

#### **2.4. Calidad de la energía**

La calidad de la energía (CE) es la normalización del suministro eléctrico mediante normas que fijan los niveles, niveles de distorsión armónica, parámetros básicos, armónicos, forma de onda, interrupciones, etc. De acuerdo con la norma IEEE 1459-2010 proporciona de las definiciones de la energía eléctrica para cuantificar el flujo de energía eléctrica en circuitos monofásicos (IEEE, 2010).

La tabla 2.2 contiene las ecuaciones para cuantificar el voltaje de una fuente sinusoidal, corriente sinusoidal, potencia instantánea, potencia aparente, potencia activa, potencia reactiva, factor de potencia y potencia compleja, y en la tabla 2.3 se muestra su nomenclatura.

Tabla 2.2 “Ecuaciones de voltaje, corriente y potencias” (IEEE, 2010).

Fuente de voltaje sinusoidal	$v = \sqrt{2}V \sin(\omega t)$
Corriente sinusoidal	$i = \sqrt{2}I \sin(\omega t - \theta)$
Potencia instantánea	$p = vi$
Potencia activa	$P = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} p dt$
Potencia reactiva	$Q = VI \sin \theta$
Potencia aparente	$S = VI$
Factor de potencia	$PF = \frac{P}{S}$
Potencia compleja	$S = P + jQ$

Tabla 2.3 “Nomenclatura ecuaciones de voltaje, corriente y potencias” (IEEE, 2010).

$V$	Valor RMS de voltaje.
$I$	Valor RMS de corriente.
$\omega$	Frecuencia angular $2\pi f$ (rad/s).
$f$	Frecuencia (Hz).
$\theta$	Fase angular entre corriente y voltaje (rad).
$t$	Tiempo (s).
$T$	Periodo $T=1/f$ .
$k$	Número entero positivo.
$\tau$	Momento cuando la medición empieza.

## 2.5. Correlación estadística

La correlación lineal es un método estadístico que determina la correspondencia lineal existente entre dos variables. Para definir la relación lineal existente entre dos variables continuas, es forzoso disponer de parámetros que admitan cuantificar la relación, uno de estos es la covarianza, la cual revela el nivel de variación conjunta de dos variables aleatorias, esta se muestra en la ecuación 5 (Diez, 2017).

$$Cov(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{N - 1} \quad (4)$$

Siendo  $\bar{x}$  e  $\bar{y}$  la media de cada variable, y  $x_i$  e  $y_i$  el valor de la variable en la interacción  $i$ .

El resultado de la correlación graficada proporciona una gráfica con valores que varían entre  $R = -1$  y  $1$ , como se muestra en la figura 2.2, estos valores serían:

- 0: asociación nula.
- 0.1: asociación pequeña.
- 0.3: asociación mediana.
- 0.5: asociación moderada
- 0.7: asociación alta.
- 0.9: asociación muy alta.

Dependiendo de su signo sería asociación positiva o negativa.

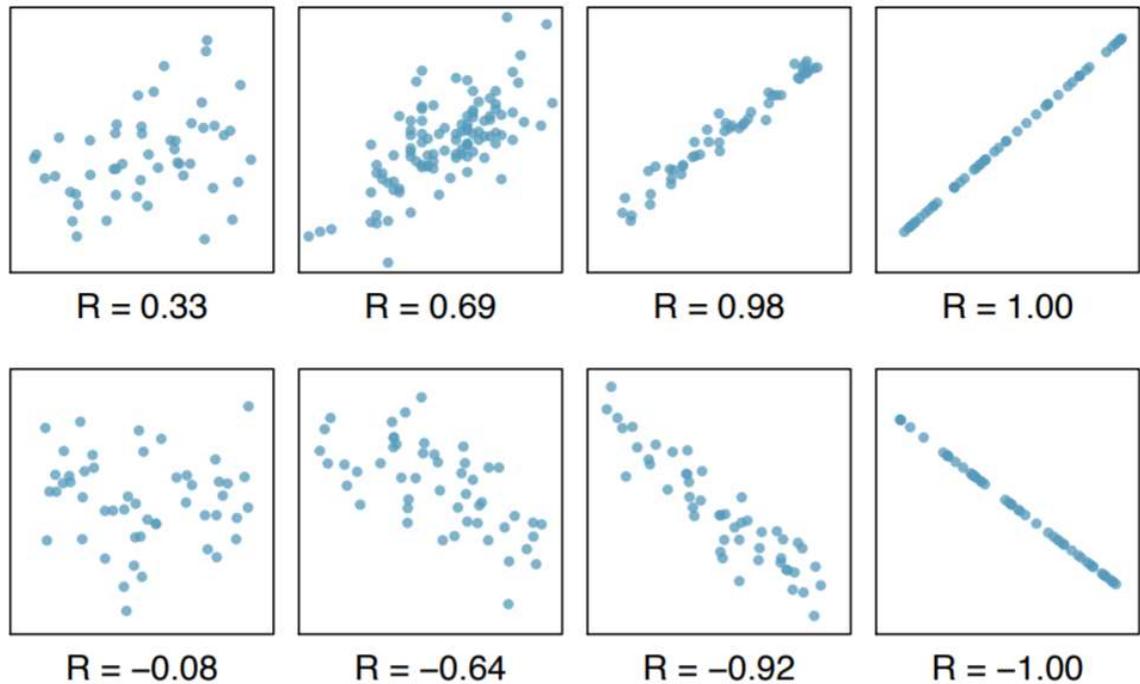


Figura 2.2 “Respuesta de correlación estadística” (Diez, 2017).

## 2.6. Parámetros estadísticos

Los parámetros estadísticos, son valores que buscan resumir en un solo número una determinada característica de una variable. Existen diversos parámetros que revelan distintas características de las muestras analizadas tanto en el DT y en el DF.

Para el DT, se muestran los siguientes parámetros estadísticos en la tabla 2.4 que pueden ser utilizados para analizar señales de vibraciones, voltaje, corriente, entre otros.

Tabla 2.4 “Parámetros estadísticos y sus ecuaciones matemáticas en el dominio del tiempo” (Saucedo, et al., 2021).

Parámetro estadístico	Ecuación matemática
1. Media ( $\bar{x}$ )	$T_1 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n  x_k $
2. Valor máximo ( $\hat{x}$ )	$T_2 = \max(x)$
3. Raíz cuadrática media ( <i>RMS</i> )	$T_3 = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n (x_k)}$
4. Media de raíz cuadrada ( <i>SRM</i> )	$T_4 = \left(\frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n \sqrt{ x_k }\right)^2$
5. Desviación estándar	$T_5 = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2}$
6. Varianza ( $\sigma$ )	$T_6 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2$
7. Factor de apariencia RMS	$T_7 = \frac{RMS}{\frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n  x_k }$
8. Factor de apariencia SRM	$T_8 = \frac{SRM}{\frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n  x_k }$
9. Factor de cresta	$T_9 = \frac{\hat{x}}{RMS}$
10. Factor de latitud	$T_{10} = \frac{\hat{x}}{SRM}$
11. Factor de impulso	$T_{11} = \frac{\hat{x}}{\frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n  x_k }$
12 Skewness	$T_{12} = \frac{\sum_{k=1}^n [(x_k - \bar{x})^3]}{\sigma^3}$
13. Kurtosis	$T_{13} = \frac{\sum_{k=1}^n [(x_k - \bar{x})^4]}{\sigma^4}$

14. Quinto momento	$T_{14} = \frac{\sum_{k=1}^n [(x_k - \bar{x})^5]}{\sigma^5}$
15. Sexto momento	$T_{15} = \frac{\sum_{k=1}^n [(x_k - \bar{x})^6]}{\sigma^6}$

Donde,  $n$  es el número de muestras,  $k$  el número de muestra actual,  $x_k$  es la muestra de la señal en el DT a analizar,  $\bar{x}$  es la media de la muestra,  $\hat{x}$  el valor máximo de la muestra,  $RMS$  es el valor de la raíz cuadrática media,  $SRM$  es el valor de la media de raíz cuadrada y  $\sigma$  es el valor de la varianza.

Así mismo, se tienen los parámetros estadísticos y sus ecuaciones matemáticas para el DF en la tabla 2.5, estas son utilizadas para analizar señales tales como TF, TW, entre otras.

Tabla 2.5 “Parámetros estadísticos y sus ecuaciones matemáticas en el dominio de la frecuencia” (Saucedo, et al., 2021).

Parámetro estadístico	Ecuación matemática
1. Media	$F_1 = \frac{1}{K} \cdot \sum_{k=1}^K s(k)$
2. Varianza	$F_2 = \frac{1}{K-1} \cdot \sum_{k=1}^K (s(k) - F_1)^2$
3. Tercer momento	$F_3 = \frac{1}{K(\sqrt{F_2})^3} \cdot \sum_{k=1}^K (s(k) - F_1)^3$
4. Cuarto momento	$F_4 = \frac{1}{K(\sqrt{F_2})^4} \cdot \sum_{k=1}^K (s(k) - F_1)^4$
5. Gran media	$F_5 = \frac{\sum_{k=1}^K f_k s(k)}{\sum_{k=1}^K s(k)}$
6. Desviación estándar 1	$F_6 = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^K (f_k - F_5)^2 s(k)}{K}}$

7. Factor C	$F_7 = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^K f_k^2 s(k)}{\sum_{k=1}^K s(k)}}$
8. Factor D	$F_8 = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^K f_k^4 s(k)}{\sum_{k=1}^K f_k^2 s(k)}}$
9. Factor E	$F_9 = \frac{\sum_{k=1}^K f_k^2 s(k)}{\sqrt{\sum_{k=1}^K s(k) \cdot \sum_{k=1}^K f_k^4 s(k)}}$
10. Factor G	$F_{10} = \frac{F_6}{F_5}$
11. Tercer momento 1	$F_{11} = \frac{\sum_{k=1}^K (f_k - F_5)^3 s(k)}{KF_6^3}$
12. Cuarto momento 1	$F_{12} = \frac{\sum_{k=1}^K (f_k - F_5)^4 s(k)}{KF_6^4}$
13. Factor H	$F_{13} = \frac{\sum_{k=1}^K (f_k - F_5)^{1/2} s(k)}{KF_6^{1/2}}$
14. Factor J	$F_{14} = \frac{(F_7 + F_8)}{F_1}$

De donde,  $K$  es el número de líneas,  $k$  el valor actual de la muestra,  $s(k)$  es la amplitud de la muestra actual y  $f_k$  es el valor de la frecuencia actual.

## 2.7. Aerogeneradores

Los aerogeneradores son generadores eléctricos que operan al convertir la energía cinética del viento en energía mecánica a través de las hélices y, por medio de un alternador, la convierte en energía eléctrica. Se han desarrollado diferentes modelos de ellos, los cuales principalmente se clasifican en aerogeneradores de eje vertical y de eje horizontal (Hernández, 2018).

Los generadores eólicos de eje vertical son llamados así ya que cuentan con el eje del rotor en dirección vertical, permitiendo el evitar orientarlos con la dirección del viento y favoreciendo su uso en zonas donde la dirección del viento es difícil de predecir; además, no requieren de un mecanismo de orientación, son silenciosos a comparación del eje horizontal y pueden situar el generador eléctrico en el suelo. Sus aspectos negativos son: que tienen una producción eléctrica baja y necesita de un motor para iniciar el movimiento de las aspas (Tummala et al., 2015).

Los generadores eólicos de eje horizontal son aquellos cuyo eje del rotor se encuentra en posición horizontal, son los que más se emplean globalmente en los parques eólicos. La generación de electricidad es provocada cuando el viento actúa sobre las aspas generando el movimiento rotacional y estas están unidas al rotor del aerogenerador. Se les puede encontrar con diferentes números de aspas, y cada uno es a raíz de la aplicación que se le guste dar. En el ámbito de la generación eléctrica se utilizan normalmente tres aspas (Arraña et al., 2012).

## **2.8. Técnicas de filtrado**

Consiste en la selección de frecuencias que son atenuadas en una señal. Existen diferentes variedades de filtros dependiendo de la necesidad que haya, por ejemplo: filtro pasa bajas, pasa altas, pasa banda, rechaza bandas (Hayt et al., 2007).

- a) Filtro pasa bajas: Permite pasar frecuencias por abajo de una frecuencia de corte, mientras las que están arriba de esta son amortiguadas.
- b) Filtro pasa altas: Amortigua frecuencias debajo de la frecuencia de corte y las que son superior a ella no son afectadas.
- c) Filtro pasa banda: Es la combinación de un filtro pasa bajas y uno pasa altas, permite solo el paso entre dos frecuencias y las que están fuera de ese rango las amortigua.

- d) Filtro rechaza bandas: Atenúa las frecuencias entre las dos frecuencias de corte y deja pasar las frecuencias fuera de ellas.

La descripción gráfica de cada uno de estos ejemplos de filtros se muestra en la figura 2.3.

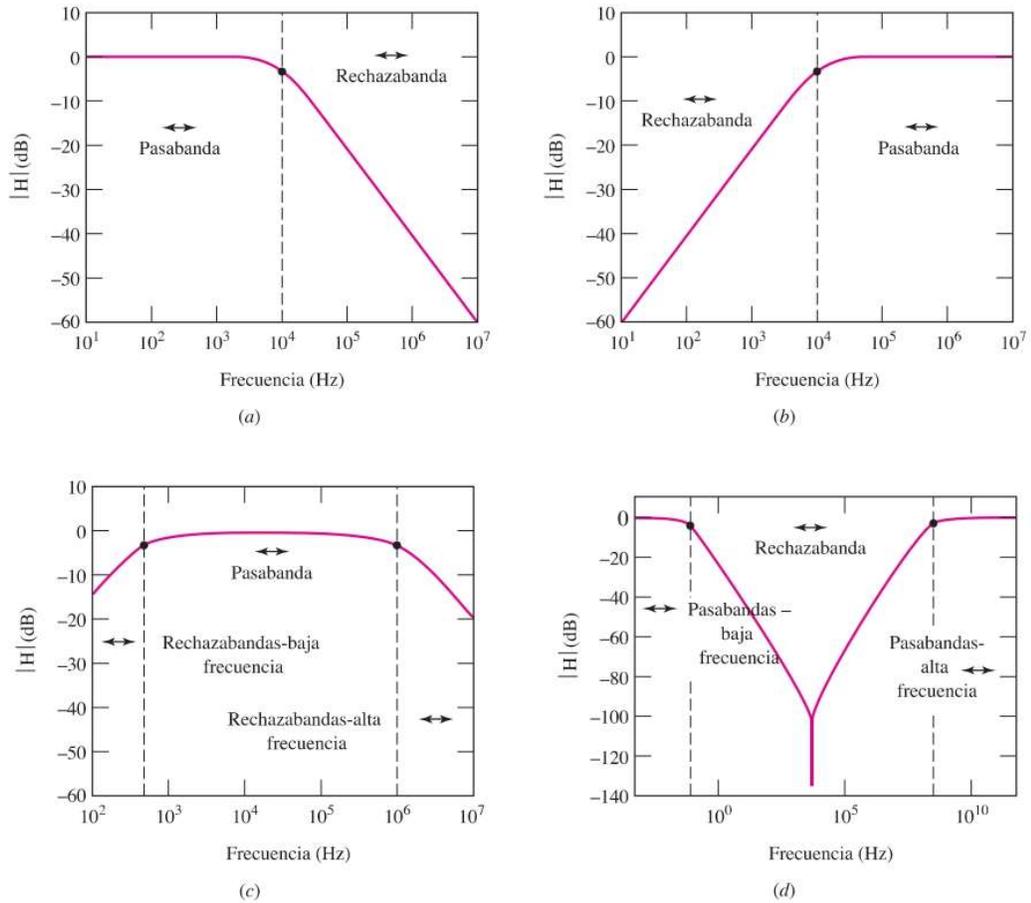


Figura 2.3 “Diagramas de Bode de los filtros” (Hayt et al., 2007). a) Filtro pasa altas. b) Filtro pasa bajas. c) Filtro pasa bandas. d) Filtro rechazo de banda.

## 2.9. VHDL

Es un lenguaje determinado por el IEEE empleado para representar circuitos digitales y para la automatización de diseño electrónico, a pesar de que puede ser

usado de forma general para representar cualquier circuito digital se usa para programar PLD, FPGA, ASIC y similares.

Fue desarrollado con base a los principios de la programación estructurada. El fin es definir la interfaz de un módulo de hardware dejando invisibles sus detalles internos. La entidad en VHDL es puramente la declaración de las entradas y salidas de un módulo, al mismo tiempo que la arquitectura es la descripción minuciosa de la estructura interna del módulo o de su comportamiento. La entidad de mayor nivel puede utilizar otras entidades para hacer diversos procesos. A diferencia de los otros lenguajes de programación, este al momento de ejecutarse se hace de forma paralela, es decir, puede hacer múltiples tareas al mismo tiempo mientras que las otras son de forma secuencial (Machado Sánchez & Borromeo López, 2010).

Entre los principales módulos de las implementaciones en VHDL se encuentran:

**Máquina de estados:** Controla los procesos dentro de la implementación pasando de un estado a otro por medio de señales de entrada dando valores a las señales de salida en cada estado.

**Multiplexor:** Intercambia la salida entre las diferentes entradas siendo controlado por una señal de operador.

**Demultiplexor:** Intercambia las salidas entre la única entrada siendo controlado por una señal de operador.

**Contador ADHB:** Es un contador que tiene las opciones de aumentar(A), disminuir(D), Mantener(H) y borrar(B). Se puede configurar que mande una señal de salida al llegar a una cuenta deseada.

**Base tiempo:** Es un contador que manda una señal al llegar a un número deseado y reiniciándose al llegar a él obteniendo señales cíclicas múltiplos del reloj del sistema.

Registro habilitado: Almacena el valor de la señal de entrada cuando se le habilita mostrándolo en la salida.

Registro paralelo serie: Convierte una señal paralela en serial intercambiando los bits cada que se le da una señal de cambio.

Registro serie paralelo: Convierte una señal de serie a paralelo, concatenando los valores recibidos en la salida y cambiando de posición con la señal de cambio.

Buffer de tres estados: Permite la transmisión de datos de entrada y salida por un mismo canal, intercambiando entre ellas con la señal de habilitar salida.

Las formas gráficas de cada uno de estos módulos se pueden visualizar en la figura 2.4.

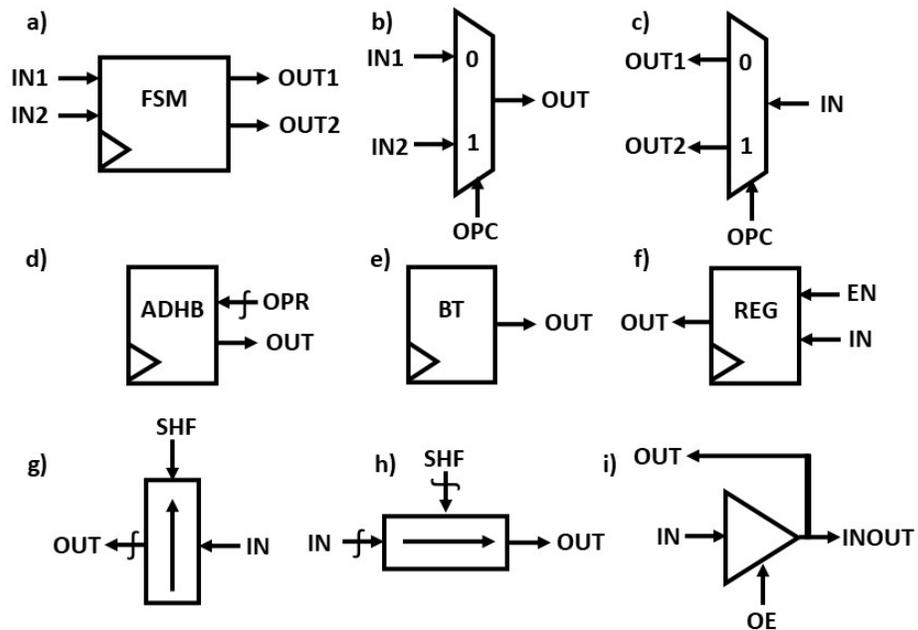


Figura 2.4 “Módulos VHDL” (autoría propia). a) Máquina de estados. b) Multiplexor. c) Demultiplexor. d) Contador ADHB. e) Base tiempo. f) Registro habilitado. g) Registro serie paralelo. h) Registro paralelo serie. i) Buffer de tres estados. (autoría propia).

### III. METODOLOGÍA

La metodología por desarrollar se ejemplifica en la figura 3.1, la cual consta de 9 fases.

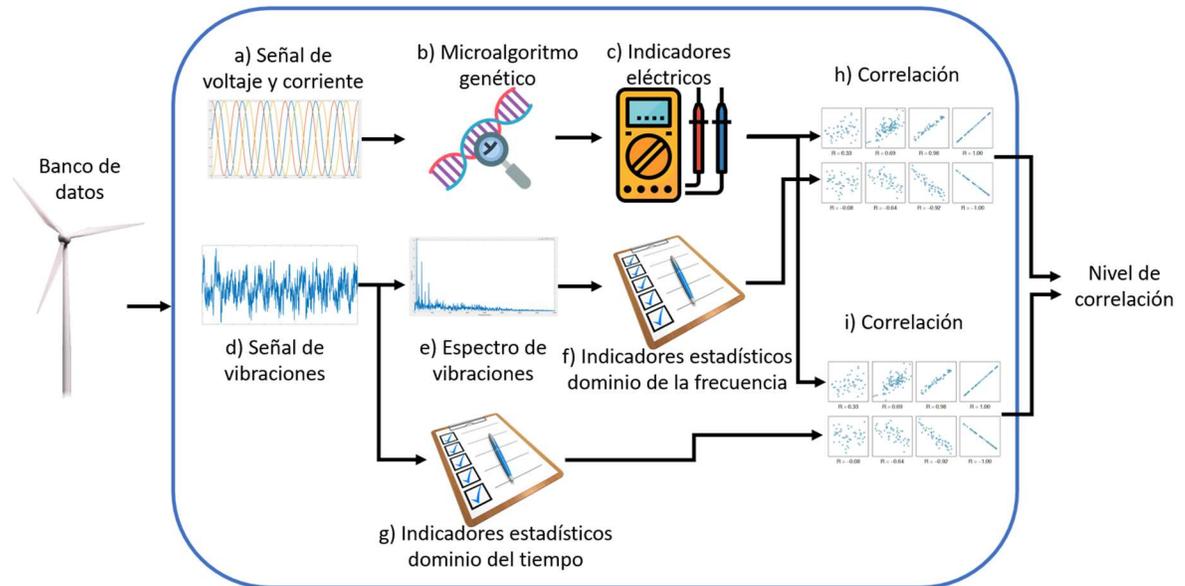


Figura 3.1 “Diagrama a bloques de la metodología” (autoría propia).

Esta se realizará, tanto para señales sintéticas y señales previamente adquiridas (Banco de datos). A continuación, se detallan sus etapas:

- a) Se analizarán las señales de voltaje y corriente generadas por los sistemas de generación eólica de baja potencia.
- b) Se hará uso de un microalgoritmo genético para analizar las señales de voltaje y corriente de los aerogeneradores para estimar su componente fundamental y obtener la señal residual y el desfase entre ambas señales.
- c) Se obtendrán los indicadores eléctricos, tales como: Potencia aparente, potencia activa, potencia reactiva y distorsión armónica total (por sus siglas en ingles “THD”).

- d) Se analizarán las señales de vibraciones procedentes de los sistemas de generación eólica de baja potencia.
- e) Se hará uso de transformadas de espacio, por ejemplo: FFT, TW, entre otras. Con las cuales obtendremos el espectro de las señales de vibración, para conocer sus características en el DF.
- f) Se obtendrán indicadores estadísticos en el DF en base a lo obtenido de la transformada de espacio, tales como: Media, varianza, tercer momento, cuarto momento, gran media, desviación estándar, factor C, factor D, factor G, tercer momento 1, cuarto momento 1, factor H y factor J.
- g) Se obtendrán indicadores estadísticos en el DT a las señales de vibración, tales como: Media, valor máximo, raíz media cuadrada (RMS), cuadrado de la media cuadrada (SRM), desviación estándar, varianza, factor de forma RMS, factor de forma SRM, factor de cresta, factor de latitud, factor de impulso, skewness, kurtosis, quinto momento y sexto momento.
- h) Se generará una correlación entre los indicadores eléctricos y los indicadores estadísticos en el DT, para determinar la influencia de las vibraciones sobre la calidad de la energía respecto al DT.
- i) Se generará una correlación entre los indicadores eléctricos y los indicadores estadísticos en el DF, para establecer la influencia de las vibraciones sobre la calidad de la energía respecto al DF.

### 3.1. Implementación MATLAB

Para el análisis de los datos de voltaje, corriente y vibraciones, se utilizó el software MATLAB, y se realizaron diversos scripts para el análisis de cada una de las señales y las correlaciones, entre ellas se encuentran: Análisis de señales de voltaje y corriente, análisis estadístico de señales de vibración en el DT, análisis estadístico de señales de vibración en el DF y correlación.

#### 3.1.1. Análisis de señales de voltaje y corriente

El script del análisis de voltaje y corriente se muestra en las siguientes líneas, donde primeramente se borran las variables, consola y cierran pestañas que estuvieran previamente cargadas. Y se declaran las constantes que se utilizarán a lo largo del análisis.

```
close all; clear all; clc;

D = 1;                               %Carpeta a analizar

Fs = 8000;                            %Frecuencia de muestreo
T = 0.2;                              %Periodo
t = 0:1/Fs:T-(1/Fs);                 %Vector de tiempo
Amin = 0.9;                           %Amplitud mínima
Amax = 1.1;                           %Amplitud máxima
Fmin = 49;                            %Frecuencia mínima
Fmax = 51;                            %Frecuencia máxima

L = 1600;                             %Longitud de muestra
f = Fs*(0:(L/2))/L;

p = 0;                                %Variable conteo de muestras
```

Posteriormente, se ejecuta la carga de los datos de voltaje y corriente que serán analizados, los cuales están separados por paquetes de 10 minutos a lo largo de 44 días.

```
%% Cargar datos
for dia = 0:10
```

```

for hora = 0:23
for minz = 0:5
q = 0;
dir = sprintf('G:\\Datos\\medida-2%d\\PQUAQ_07\\dia_%03d\\
hora_%03d\\minz_%03d\\', D, dia, hora, minz);

file = strcat(dir, 'Ia.mat');
Ia = double(load(file).Data);

file = strcat(dir, 'Va.mat');
Va = double(load(file).Data);

```

Estos paquetes, se escala sus valores entre  $\pm 1$  y se secciona en partes de 0.2 s, se les aplica un análisis con el microalgoritmo genético, al cual se le ingresan, la señal a analizar, el vector de tiempo y los valores máximos y mínimos anteriormente declarados; proporcionando así los valores de la amplitud, frecuencia y desfase de la señal estimada y la señal residual de la sustracción entre la señal original y la señal estimada.

```

%% Aplicar uAG
for i = 0:2999
S_I = Ia(1+L*i:L+L*i);
S_V = Va(1+L*i:L+L*i);
S_S = In(1+L*i:L+L*i);

M = max(abs(S_I));
uS_I = S_I/M;
M = max(abs(S_V));
uS_V = S_V/M;

[A_v, f_v, phi_v, rs_v] = MGA(uS_V, t, Amin, Amax, Fmin, Fmax);
[A_i, f_i, phi_i, rs_i] = MGA(uS_I, t, Amin, Amax, Fmin, Fmax);

```

Una vez obtenida la estimación y la señal residual, se calcula la THD de la señal residual de voltaje, empleando la TF y a partir de los valores obtenidos, se calcula la THD.

```

%% Calculo de Distorsión Armónica Total THD
Y = fft(rs_v);
P2 = abs(Y/L);
P1 = P2(1:L/2+1);
P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);

```

```

Arm(1) = A_v;
for j = 2:50
    Arm(j) = P1((j*10)+1)^2;
end
THD_V(i+1) = sqrt(sum(Arm(2:end)))/Arm(1)*100;

```

Enseguida, se realiza un conteo de muestras para calcular las potencias en secciones de 60 segundos, almacenando la diferencia de fases, y al completar el minuto, calcular la media de desfase entre las señales, y calcular la potencia aparente, activa y reactiva.

```

%% Calculo de potencias
p = p + 1;
phi(p) = phi_v - phi_i;
if p == 300 && q < 10
    phi_m = mean(phi);
    Pot(1,q+1) = rms(Va(1+(q*480000):480000+(q*480000)))
*59.785e-3*rms(Ia(1+(q*480000):480000+(q*480000))) *11.444e-3;
%Aparente
    Pot(2,q+1) = Pot(1,q+1)*cos(2*pi*phi_m);    %Activa
    Pot(3,q+1) = Pot(1,q+1)*sin(2*pi*phi_m);    %Reactiva
    q = q + 1;
    p = 0;
end
end

```

Por último, se guardan las variables de potencia y THD, para su futuro análisis, borrando las variables que no se usan, para ahorrar en recursos de cómputo para los análisis posteriores.

```

%% Guardar Datos

F = eval(sprintf('Pot'));
NewF = sprintf('Potencia_%03d_%03d_%03d', dia, hora, minz);
assignin('base', NewF, F);

F = eval(sprintf('THD_V'));
NewF2 = sprintf('THD_V_%03d_%03d_%03d', dia, hora, minz);
assignin('base', NewF2, F);

DATA = sprintf('THD_POT_%03d_%03d_%03d.mat', dia, hora, minz);

```

```

save (DATA,NewF2,NewF)

clearvars -except Fs T Amin Amax Fmin Fmax L f p q dia hora
minz i j p e ERROR D;

end
end
end

```

### 3.1.2. Análisis estadístico de señales de vibración en el dominio del tiempo

En el script del análisis estadístico de las señales de vibraciones en el DT, nos permite obtener los indicadores estadísticos, su descripción empieza con eliminar las ventanas y variables previamente cargadas y borrar la consola, para posteriormente definir las constantes con las que se trabajarán.

```

close all; clear all; clc;

D = 1; %Carpeta a analizar
L = 1600; %Longitud de muestra
f = Fs*(0:(L/2))/L; %Vector de frecuencias
n = 16 %Numero de bits

```

A continuación, se cargan los paquetes de señales de vibraciones a analizar, los cuales, al igual que las señales de voltaje y vibración, están separados por paquetes de 10 minutos a lo largo de 44 días.

```

%% Cargar datos
for dia = 0:10
    for hora = 0:23
        for minz = 0:5

            dir = sprintf('G:\\Datos\\medida-2%d\\PQUAQ_07\\dia_%03d
\\hora_%03d\\minz_%03d\\',D,dia,hora,minz);

            file = strcat(dir,'In.mat');
            In = double(load(file).Data);

```

Enseguida, se secciona en partes de 0.2 s la señal de vibraciones y se calculan los indicadores estadísticos en el DT.

```

%% Calculo de Parametros Estadísticos
for i = 0:2999

    S_S = ln(1+L*i:L+L*i) / (2^N-1);
    xk = S_S;

    n = length(xk);

    F(hora+1,minz+1,1,i+1) = sum(abs(xk))/n;
    F(hora+1,minz+1,2,i+1) = max(xk);
    F(hora+1,minz+1,3,i+1) = sqrt(sum(xk.^2)/n);
    F(hora+1,minz+1,4,i+1) = (sum(sqrt(abs(xk)))/n)^2;
    F(hora+1,minz+1,5,i+1) = sqrt(sum((xk-
F(hora+1,minz+1,1,i+1)).^2)/n);
    F(hora+1,minz+1,6,i+1) = sum((xk-
F(hora+1,minz+1,1,i+1)).^2)/n;
    F(hora+1,minz+1,7,i+1) =
F(hora+1,minz+1,3,i+1)/(sum(abs(xk))/n);
    F(hora+1,minz+1,8,i+1) =
F(hora+1,minz+1,4,i+1)/(sum(abs(xk))/n);
    F(hora+1,minz+1,9,i+1) =
F(hora+1,minz+1,2,i+1)/F(hora+1,minz+1,3,i+1);
    F(hora+1,minz+1,10,i+1)=
F(hora+1,minz+1,2,i+1)/F(hora+1,minz+1,4,i+1);
    F(hora+1,minz+1,11,i+1)=
F(hora+1,minz+1,2,i+1)/(sum(abs(xk))/n);
    F(hora+1,minz+1,12,i+1)= sum((xk-
F(hora+1,minz+1,1,i+1)).^3)/(F(hora+1,minz+1,5,i+1)^3);
    F(hora+1,minz+1,13,i+1)= sum((xk-
F(hora+1,minz+1,1,i+1)).^4)/(F(hora+1,minz+1,5,i+1)^4);
    F(hora+1,minz+1,14,i+1)= sum((xk-
F(hora+1,minz+1,1,i+1)).^5)/(F(hora+1,minz+1,5,i+1)^5);
    F(hora+1,minz+1,15,i+1)= sum((xk-
F(hora+1,minz+1,1,i+1)).^6)/(F(hora+1,minz+1,5,i+1)^6);
end
end
end

```

Por último, se guarda la variable que contiene los indicadores estadísticos para su futuro análisis y, se borran las variables para ahorrar recursos de cómputo.

```

DATA = sprintf('Ana_Est_TD_%03d.mat', dia);
save(DATA, 'F')

```

```

clearvars -except Fs T Amin Amax Fmin Fmax L f p e N dia
hora minz i D;
end

```

### 3.1.3. Análisis estadístico de señales de vibración en el dominio de la frecuencia

El análisis de las señales de vibración en el DF es muy parecido al análisis en el DT, este genera los indicadores estadísticos en el DF y se diferencia a partir de la sección de cálculos de parámetros estadísticos en el DT, tomando su lugar el cálculo de la TF, restando el offset de la señal de vibraciones para eliminar la amplitud de la frecuencia 0 del cálculo de la TF.

```

%% Calculo de la FFT
for i = 0:2999

    S_S = In(1+L*i:L+L*i)/(2^n-1);
    m_S = mean(S_S);
    S_S = S_S-m_S;

    Y = fft(S_S);
    P2 = abs(Y/L);
    P1 = P2(1:L/2+1);
    P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);
    sk = P1;
    fk = f;

```

A continuación, se calculan los indicadores estadísticos en el DF.

```

%% Calculo de Parametros Estadisticos
K = length(sk);

F(hora+1,minz+1,1,i+1) = sum(sk)/K; %Promedio
F(hora+1,minz+1,2,i+1) = sum((sk-
F(hora+1,minz+1,1,i+1)).^2)/(K-1); %Varianza
F(hora+1,minz+1,3,i+1) = sum((sk-
F(hora+1,minz+1,1,i+1)).^3)/(K*(sqrt(F(hora+1,minz+1,2,i+1)))
^3); %Tercer movimiento

```

```

    F(hora+1,minz+1,4,i+1) = sum((sk-
F(hora+1,minz+1,1,i+1)).^4)/(K*(sqrt(F(hora+1,minz+1,2,i+1)))
^2); %Cuarto movimiento
    F(hora+1,minz+1,5,i+1) = sum(fk.*sk)./sum(sk);
    F(hora+1,minz+1,6,i+1) = sqrt((sum((fk-
F(hora+1,minz+1,5,i+1)).^2.*sk))/K);
    F(hora+1,minz+1,7,i+1) = sqrt(sum(fk.^2.*sk)./sum(sk));
    F(hora+1,minz+1,8,i+1) =
sqrt(sum(fk.^4.*sk)./sum(fk.^2.*sk));
    F(hora+1,minz+1,9,i+1) =
sum(fk.^2.*sk)/sqrt(sum(sk)*sum(sum(fk.^4.*sk)));
    F(hora+1,minz+1,10,i+1)=
F(hora+1,minz+1,6,i+1)/F(hora+1,minz+1,5,i+1);
    F(hora+1,minz+1,11,i+1)= sum((fk-
F(hora+1,minz+1,5,i+1)).^3.*sk)/(K*F(hora+1,minz+1,6,i+1)^3);
    F(hora+1,minz+1,12,i+1)= sum((fk-
F(hora+1,minz+1,5,i+1)).^4.*sk)/(K*F(hora+1,minz+1,6,i+1)^4);
    F(hora+1,minz+1,13,i+1)= sum(sqrt(fk-
F(hora+1,minz+1,5,i+1)).*sk)/(K*sqrt(F(hora+1,minz+1,6,i+1)))
;
    F(hora+1,minz+1,14,i+1)=
(F(hora+1,minz+1,7,i+1)+F(hora+1,minz+1,8,i+1))/F(hora+1,minz
+1,1,i+1);
end
end
end

```

Y de igual forma, al final se guarda la variable  $F$ , para su futuro análisis.

### 3.1.4. Correlación estadística

Para calcular la correlación estadística se utilizó el siguiente script, el cual toma la distorsión armónica y los indicadores estadísticos del DT y DF, y las compara 1 a 1 con la distorsión armónica para obtener los paquetes en los cuales la correlación es mayor a 0.8 o menor a -0.8, igual que sus antecesores, comienza borrando las ventanas, variables y consola, así como declarando las constantes a utilizar.

```
close all; clear all; clc;
```

```

D = 1;           %Carpeta a analizar
a = 1;           %Contador de correlaciones

```

Enseguida, se cargan los archivos de los indicadores estadísticos, la THD y potencia previamente generados y, se guardan en otras variables para su mejor manejo.

```

for dia = 0:10

    dir = sprintf('D:\\Archivo\\Documentos\\POSGRADO\\TESIS\\
MATLAB\\Datos_2%d\\Ana_Est_%03d.mat',D,dia);
    load(dir);

    for hora = 0:23
        for minz = 0:5

            dir = sprintf('D:\\Archivo\\Documentos\\POSGRADO\\TESIS\\
MATLAB\\Datos_2%d\\THD_POT_%03d_%03d_%03d.mat',D,dia,hora,min
z);
            load(dir);
            THD = eval(sprintf('THD_v_%03d_%03d_%03d',dia,hora,minz));

```

A continuación, se reordena la matriz de los indicadores estadísticos para que coincida con la matriz de la THD y, se calcula la correlación de cada uno de los indicadores estadísticos respecto a la THD, para guardar solo aquellos cuyo nivel de correlación es mayor a 0.8 o menor a -0.8.

```

for n = 1:14
    for i = 1:3000
        FT(i) = F(hora+1,minz+1,n,i); %Reorganización de matriz
    end

    R = corrcoef(THD,FT); %Correlación

    if R(1,2) > 0.8 || R(1,2) < -0.8 %Almacenamiento

        Cor(a,:) = [dia hora minz R(1,2) n];
        a = a+1;
    end
end

```

Por último, se borran las variables para un mejor ahorro de recursos de cómputo, y si ocurrió algún caso donde la correlación fue aceptable, se guarda la variable para su posterior estudio.

```
clearvars -except a dia hora minz Cor F D;
end
end
end

if a > 1
    [~,idx] = sort(Cor(:,4), 'descend');
    ValCorr = Cor(idx,:);
    dir = sprintf('Correlacion_2%d.mat',D);
    save(dir, 'ValCorr');
end
```

### 3.1.5. Regresión lineal

La regresión lineal nos permite conocer el modelo matemático entre dos variables, y así saber que tan relacionadas están entre ellas. Análogamente como en las implementaciones anteriores, se empieza eliminando ventanas, variables antiguas y limpiando la ventana de comandos, además de cargar los datos de las variables a analizar.

```
close all; clear all; clc;

load('Potencia_005.mat')    %Carga de datos Potencia/THD
load('Ana_Est_005.mat')    %Carga de parámetro estadístico
```

Enseguida, se procede a reorganizar los valores de la matriz de parámetros estadísticos en un array donde solo se encuentre el valor estadístico deseado, así como organizarlo en forma de columna para guardarlos en las variables x, y.

```
P = 12;    %Selección de parámetro estadístico
j = 1;
for H = 1:24
```

```

for M = 1:6
    for i = 1:10
        FT(j) = F(H,M,P,i);
        j = j+1;
    end
end
end

x = Pot(3,:).';           %Datos de Potencia/THD
y = FT.';                 %Parametro estadístico

```

Una vez aislados los datos a analizar, se ingresan en la función *fitlm()* que genera el modelo matemático entre ambas variables ingresadas, obteniendo la gráfica de regresión lineal, para posteriormente introducirse en la ANOVA para obtener el grado de confiabilidad de la regresión lineal. Y por ultimo se genera la gráfica de la regresión lineal y se añaden sus etiquetas correspondientes.

```

mdl = fitlm(x,y)         %Regresion lineal
anova(mdl, 'summary')

figure
plot(mdl)
xlabel('Potencia Reactiva','FontSize',16)
ylabel('Media','FontSize',16)
title('Regresion Lineal Entre Potencia reactiva y
Media','FontSize',16)
legend('Datos','Pendiente','Intervalo de
confianza','Location','best','FontSize',16);

```

### 3.2. Detección de disturbios en la red

Para la detección de disturbios dentro de la red eléctrica se desarrolló un microalgoritmo genético, el cual estima la componente fundamental de la señal ingresada, de ese modo se elimina la mayor componente de energía dentro de la señal de la red eléctrica, permitiéndonos la detención de los disturbios de menor energía como lo son los disturbios transitorios y los estacionarios. (Pío et al., 2021).

El microalgoritmo fue implementado en MATLAB, este recibe la señal a analizar, el vector de tiempo de la señal, mínimo y máximo de amplitud y frecuencia de la señal, internamente el microalgoritmo se constituye de 8 individuos para la población, un porcentaje del 20% de probabilidad para la operación de mutación y se realiza por 500 iteraciones, los parámetros calculados son amplitud, frecuencia y fase que mejor describen a la componente fundamental de la señal de entrada en el vector de tiempo, y rangos de amplitud y frecuencia introducidos, además de devolver la señal de la resta entre la señal original con la componente fundamental de la misma, denominada señal residual.

Los procesos realizados por la este estudio se visualiza en la figura 3.2, la cual, cuenta con cuatro etapas, la primera es la introducción de la señal de entrada al microalgoritmo, la segunda es el análisis del microalgoritmo el cual estima los valores de la amplitud, frecuencia, fase y señal residual de la señal introducida, la tercer etapa es la obtención de las señales de salida, donde se aprecia la señal analizada contra la señal fundamental estimada por el microalgoritmo y la señal residual, y por último, se efectúa una caracterización de los resultados conseguidos.

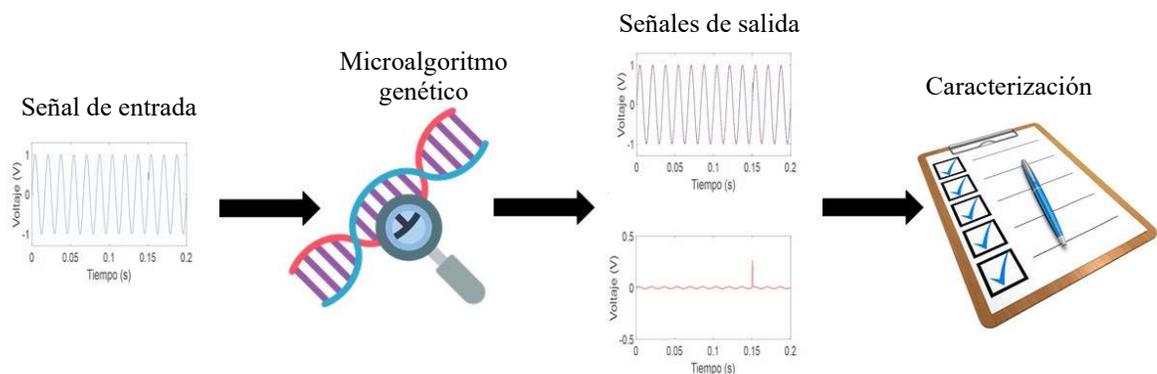


Figura 3.2 “Diagrama de flujo  $\mu$ AG” (Pío et al., 2021).

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El experimento para la adquisición de señales reales fue realizado en un parque eólico de 30-MW ubicado en el noroeste de España. Un sistema de adquisición de datos es utilizado para la recolección y almacenamiento de las señales eléctricas. Este sistema de adquisición de datos está basado en la tecnología Field Programmable Gate Array (FPGA) y es capaz de adquirir datos de 7 canales simultáneamente. Tres de estos canales están destinados a recolectar señales de voltaje, mientras las cuatro restantes reciben señales de corriente. El sistema de adquisición de datos fundamentado en FPGA opera a una tasa de muestreo de 8000 muestras por segundo y cuenta con una resolución de 16 bits. Finalmente, el Sistema de adquisición de datos tiene incorporados una memoria SD de 128 GB que permite el almacenamiento de datos ininterrumpidos por 11 días. Cuando la memoria es llena, es fácilmente remplazada para continuar con la adquisición de datos. El sistema de adquisición está montado en la subestación del parque eólico, lo que significa que la producción de todo el parque puede ser monitoreado. Las mediciones fueron tomadas del transformador de medición, por lo cual el sistema de adquisición de datos debe medir voltajes hasta de 110 V<sub>rms</sub>. La corriente comercial se basa en el SCT-013-010 del YHDC para realizar las mediciones de corriente en este lugar.

### 4.1. Vibraciones y potencia

Primeramente, se realiza un análisis de la relación que existe entre la potencia y las vibraciones presentes en los generadores eólicos, para ello, se calcularon la potencia aparente, activa y reactiva de la muestra de todo un día y se calculó la vibración promedio a lo largo del mismo día, estas vibraciones son en gran manera asociadas a la velocidad del viento, la cual, no es constante, esta relación se puede observar en las figuras 4.1 y 4.2 para dos días de análisis.

En la figura 4.1, se aprecia como a lo largo del día hubo gran actividad a causa del viento durante 17 horas, obteniendo como resultado un nivel de potencia eólica correspondiente al nivel de velocidad de viento, y cuando el viento cesó no hubo más potencia generada durante el día.

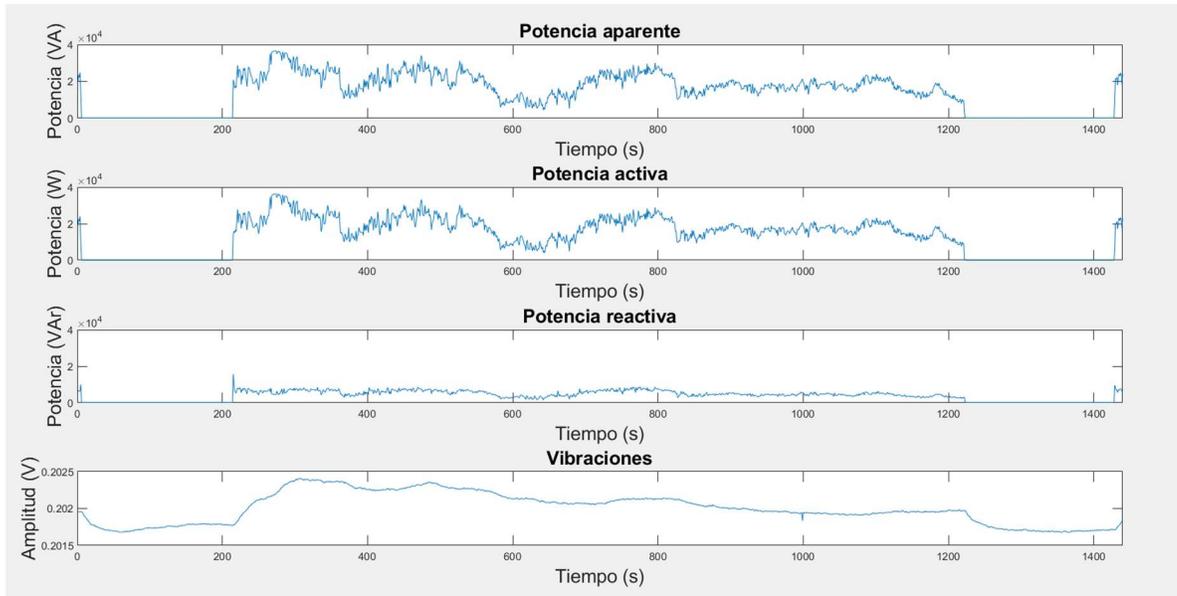


Figura 4.1 “Potencias aparente, activa, reactiva y vibraciones del primer día de muestra” (Autoría propia).

De manera similar, en el segundo día expuesto en la figura 4.2 se muestra la potencia generada a lo largo del día, siendo esta menor debido a que no hubo tanto viento que hiciera girar las aspas de los aerogeneradores, para la generación de la potencia, siendo generada en un lapso aproximado de 10 horas. Al igual que en el ejemplo anterior, la mayor parte de las vibraciones presentes son a causa de la velocidad del viento, sin embargo, también se encuentran vibraciones correspondientes a la maquina eólica, por lo cual se observan interrupciones de generación de potencia, a pesar de que no se muestra una baja en la media de vibraciones.

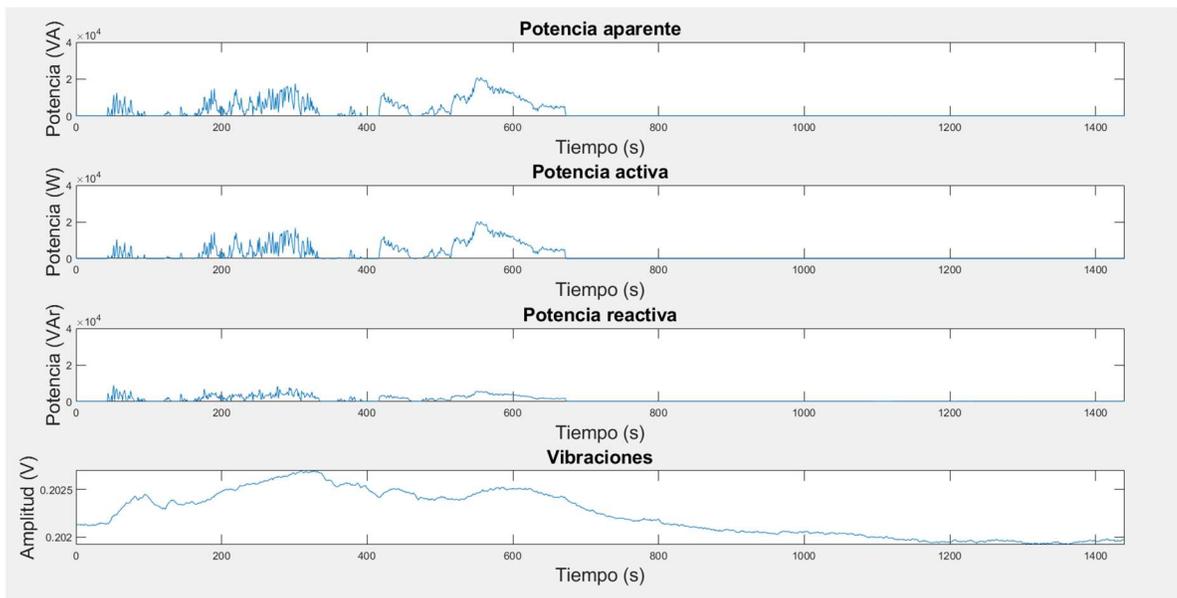


Figura 4.2 “Potencias aparente, activa, reactiva y vibraciones del segundo día de muestra” (Autoría propia).

Esta comparación, nos demuestra un comportamiento análogo entre la media de vibraciones y la potencia generada, lo cual nos indica, que las vibraciones están de alguna manera relacionadas con la generación del aerogenerador, este análisis nos motiva a pensar que la CE también podría estar afectada por las vibraciones, por lo cual, es necesario realizar un análisis de correlación entre la THD y las vibraciones.

#### 4.2. Correlación entre distorsión armónica total e indicadores estadísticos en el dominio del tiempo y frecuencia

Para conocer si las vibraciones influyen sobre la CE fue necesario realizar un análisis de correlación entre la distorsión armónica total de la señal de voltaje y los diversos indicadores estadísticos de la señal de vibraciones en el DT y en el DF. Este análisis se realizó a todo el banco de datos y se seleccionaron las dos mejores muestras tanto del DT y DF, cada una correspondientes a cada día mostrado con anterioridad (Figuras 4.1 y 4.2).

Estas muestras son lapsos de 10 minutos y sus señales de voltaje, corriente y vibraciones se presentan en las figuras 4.3 y 4.4, la primera tiene una generación de corriente los primeros minutos de la muestra, para después no generar corriente, en la señal de vibraciones se puede observar un aumento de amplitud en el tiempo de generar corriente, y cuando no, una línea más delgada.

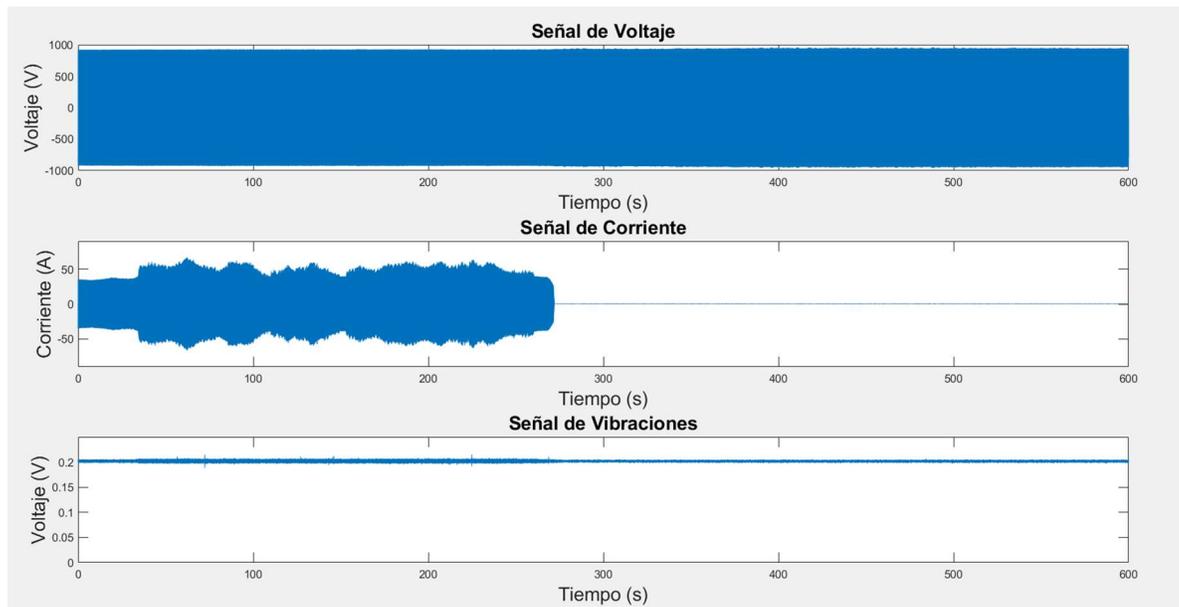


Figura 4.3 “Señales de voltaje, corriente y vibraciones de la primer muestra” (Autoría propia).

En la figura 4.4, se aprecia una generación de corriente más esporádica a lo largo de los 10 minutos, de la misma manera, se muestra la señal de voltaje, corriente y vibraciones de la segunda muestra seleccionada, correspondiente al segundo día (Figura 4.2) así también, la señal de vibraciones muestra un leve aumento de amplitud en los lapsos de generación de corriente.

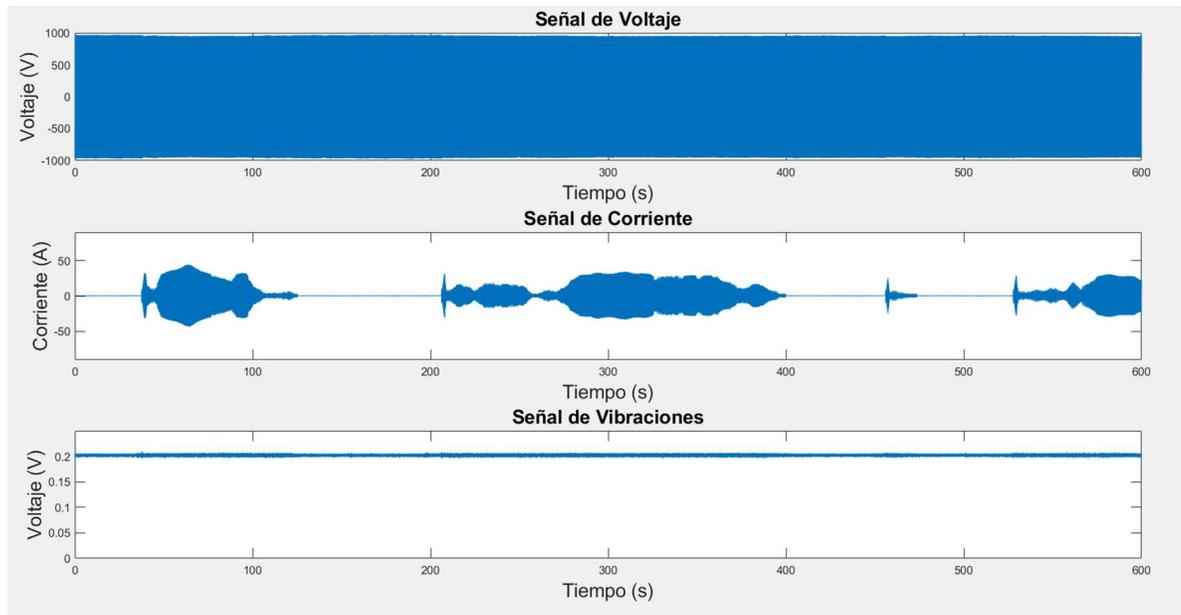


Figura 4.4 “Señales de voltaje, corriente y vibraciones de la segunda muestra” (Autoría propia).

A las señales de voltaje, se les calculó su THD las cuales se muestran en las figuras 4.5 y 4.6, los valores de THD son bajos debido al tipo de generador, el cual es una máquina asíncrona rotatoria que no genera contaminación armónica, y la poca contaminación generada es a causa de los elementos electrónicos que se colocaron para acondicionar la señal. Observando que ante mayor nivel de vibración se obtiene una disminución del THD.

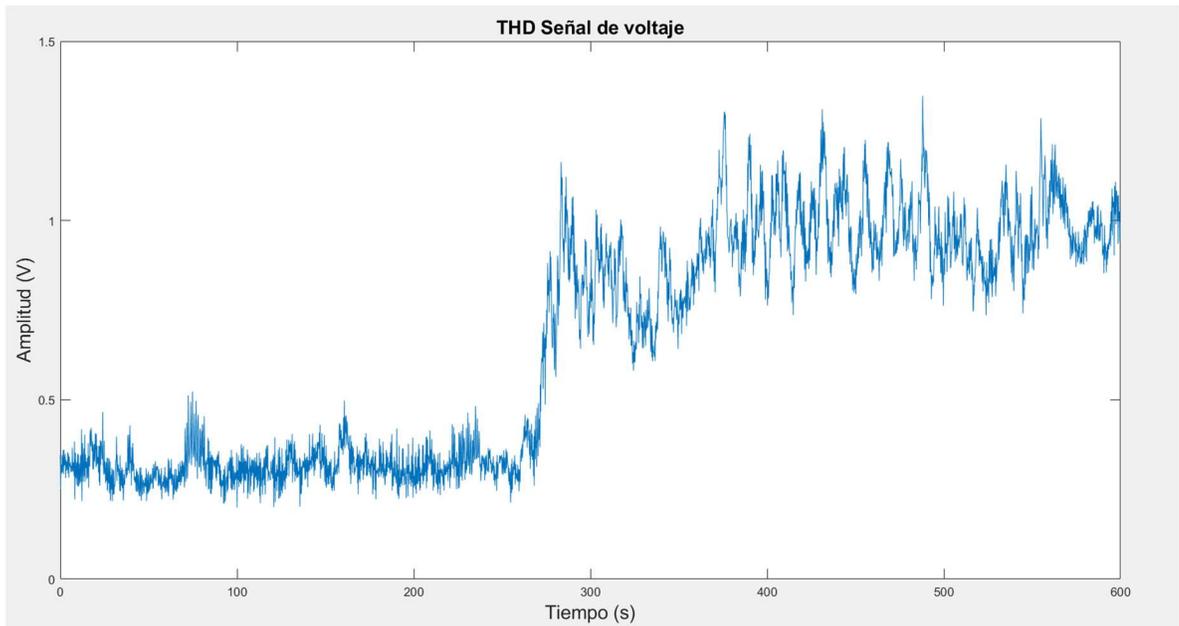


Figura 4.5 “Señal de distorsión armónica total de la señal de voltaje primer muestra” (Autoría propia).

En la THD de la primera muestra (Figura 4.5), se puede observar que, al momento de la generación eólica, que pertenece al inicio de la señal, la THD es menor, y cuando no se genera, esta aumenta, de igual forma, en el análisis de la segunda muestra (Figura 4.6), hay un comportamiento similar, al momento de la generación tiene disminución de THD, y cuando esta no genera, hay un aumento, mostrándose de manera intermitente.

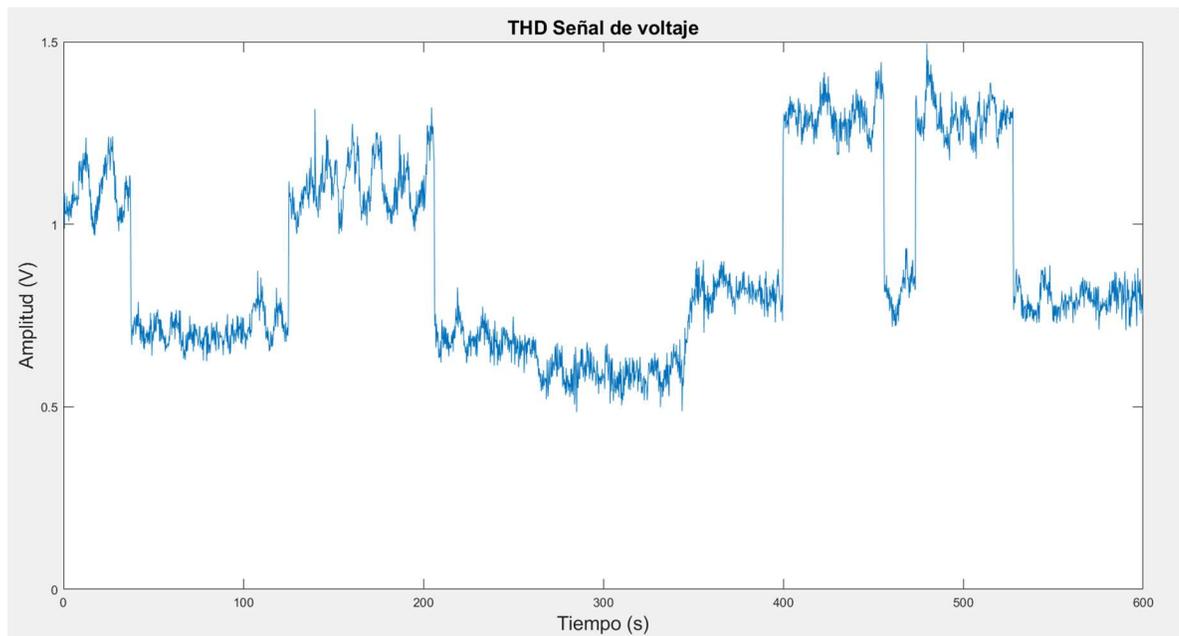


Figura 4.6 “Señal de distorsión armónica total segunda muestra” (Autoría propia).

A las señales de vibraciones, se les calcularon sus múltiples indicadores estadísticos del DT y DF, estos se correlacionaron uno a uno con la señal de THD y se seleccionaron los indicadores que obtuvieron un mayor nivel de correlación.

En la figura 4.7, se muestran los indicadores estadísticos seleccionados para la primera muestra, los cuales son factor de apariencia SRM para el DT y factor J para el DF, estos obtuvieron niveles de correlación de 0.821 y 0.928 respectivamente.

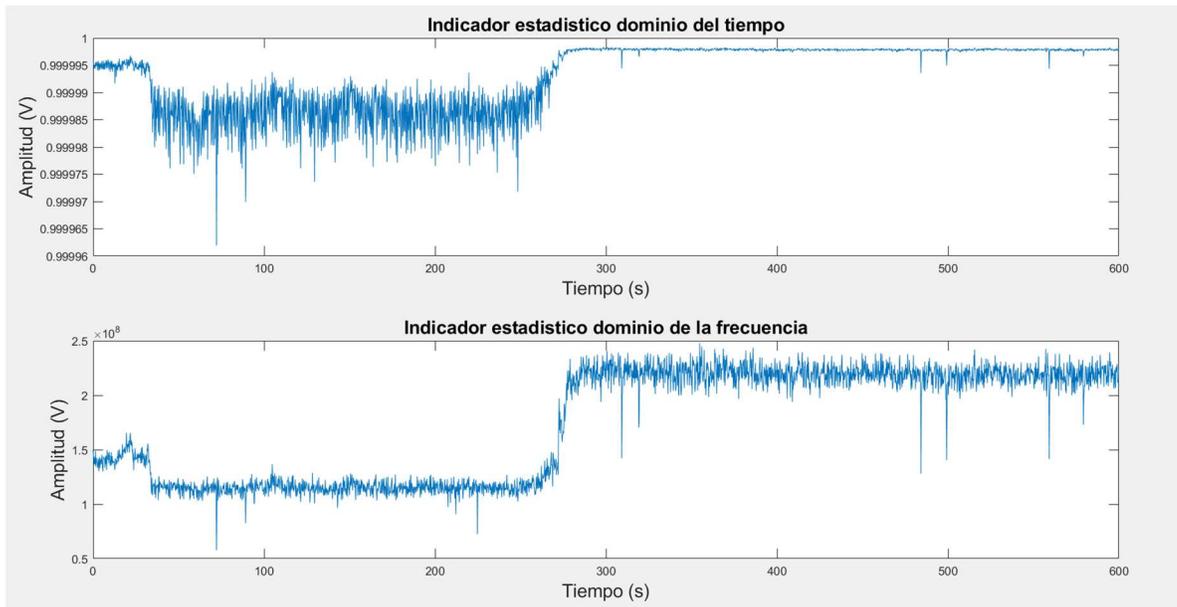


Figura 4.7 “Señal de los indicadores estadísticos en el dominio del tiempo y de la frecuencia primer muestra”, indicador en el dominio del tiempo: Factor de apariencia SRM, indicador en el dominio de la frecuencia: Factor J. (Autoría propia).

En la figura 4.8, se observa el indicador estadístico de desviación estándar para el DT y Factor J para el DF, obteniendo un nivel de correlación del -0.804 y 0.854 respectivamente.

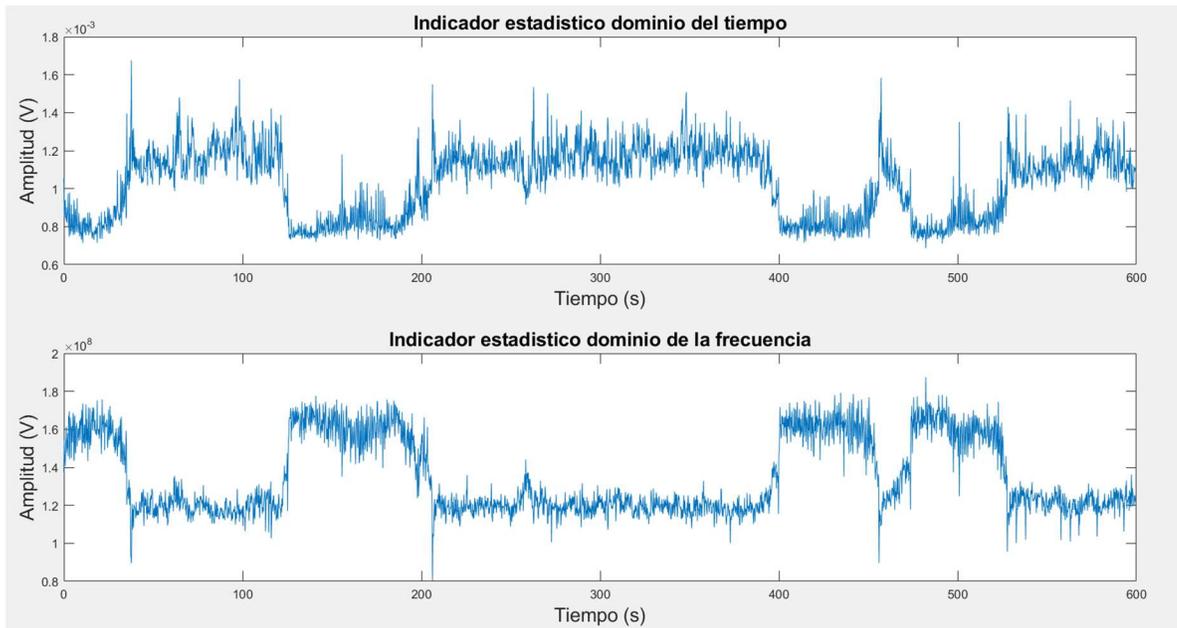


Figura 4.8 “Señal de los indicadores estadísticos en el dominio del tiempo y de la frecuencia segunda muestra”, indicador en el dominio del tiempo: desviación estándar, indicador en el dominio de la frecuencia: Factor J. (Autoría propia).

Por los valores obtenidos, de los indicadores estadísticos analizados se puede comprender que, las vibraciones están inversamente relacionadas, y observando las señales de potencia, podemos relacionar que las vibraciones presentes en el sistema fueron producto del viento al existir generación de corriente eléctrica, ocasionando pérdidas en la CE al aumentar la potencia reactiva, afectando a la CE suministrada.

### 4.3. Regresión lineal entre distorsión armónica total y potencia reactiva

Como se ha mencionado anteriormente, se analizó la THD y la potencia reactiva, pues son dos de los problemas más comunes asociados a las energías renovables, por lo cual se calcula su regresión lineal para obtener su modelo matemático y los valores obtenidos tras el análisis de la ANOVA. De donde, al analizar el parámetro estadístico de la THD contra el cuarto momento 1 de las vibraciones en el dominio de la frecuencia, obtenemos la siguiente regresión lineal que se puede observar en la figura 4.9.

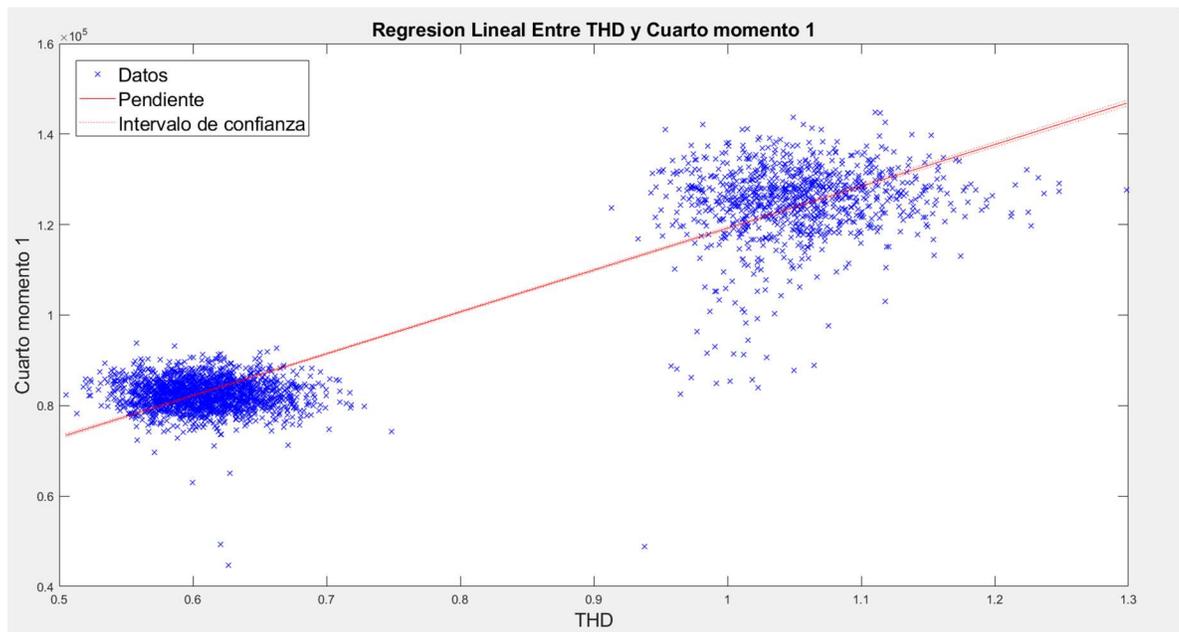


Figura 4.9 “Regresión lineal entre THD y Cuarto momento 1” (Autoría propia).

En esta figura se puede apreciar como si se tratase de dos grupos distintos, sin embargo, esto se debe a que la mayoría de los valores del cuarto momento 1, varían entre dos valores. En la tabla 4.1 se muestran los valores obtenidos por la regresión lineal y la ANOVA.

Tabla 4.1 “Parámetros y valores de la regresión lineal entre THD y Cuarto momento 1” (Autoría propia).

Parámetro	Valor
Modelo de regresión lineal	$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1$
$\beta_0$	26697.173
$\beta_1$	92503.309
Error RMS	6.63e3
$R^2$	0.898
Valor P	0
Nivel de correlación	0.947

En base a los datos obtenidos, y la forma de la gráfica de la regresión lineal, concluimos que a pesar de que los resultados tienen un nivel estadístico elevado de correlación, el modelo de regresión lineal no es muy acertado, debido a que no se pueden considerar las vibraciones como único factor que interviene en la generación de la THD, si no que hay otras variables involucradas que aquí no se consideran.

En la figura 4.10, se muestra el análisis de la regresión lineal entre la potencia residual y la media de las vibraciones, en esta se observa una mayor dispersión de los datos a lo largo de la gráfica, debido a la diversidad de valores que tiene la media de las vibraciones, y esta muestra cierta alinealidad sobre la pendiente estimada por la regresión lineal.

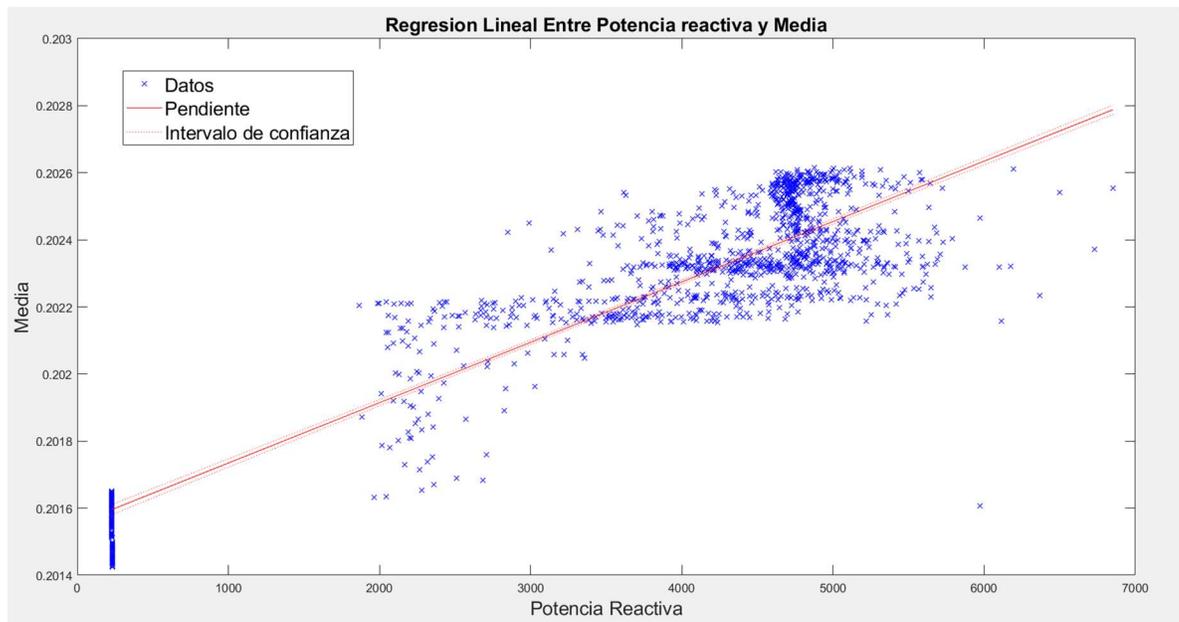


Figura 4.10 “Regresión lineal entre Potencia reactiva y Media de vibraciones” (Autoría propia).

También obtenemos los valores de los parámetros de la regresión lineal y la ANOVA para estas dos variables, que se pueden visualizar en la tabla 4.2.

Tabla 4.2 “Parámetros y valores de la regresión lineal entre Potencia reactiva y Media” (Autoría propia).

Parámetro	Valor
Modelo de regresión lineal	$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1$
$\beta_0$	0.201
$\beta_1$	1.8
Error RMS	128e-6
$R^2$	0.851
Valor P	0
Nivel de correlación	0.922

De manera similar, en este análisis de regresión lineal, el error es mucho mas pequeño, pero de igual forma no es muy acertada, a pesar de que el nivel de correlación es elevado y es debido a lo mismo, que las vibraciones no son la única variable que influye en la generación de la THD, por lo cual, si se consideraran más variables el modelo cambiaría y, probablemente se encontraría una mejor estimación.

#### 4.4. Microalgoritmo genético para la detección de disturbios transitorios

Para el análisis de disturbios transitorios se utilizó el microalgoritmo genético el cual permite el análisis de la red eléctrica estimando su componente fundamental para eliminar la componente de mayor energía de la señal, quedándose con las señales de menor energía, detectando y aislando los disturbios transitorios dentro de la señal (Pio et al., 2021) como se representa en la figura 4.11.

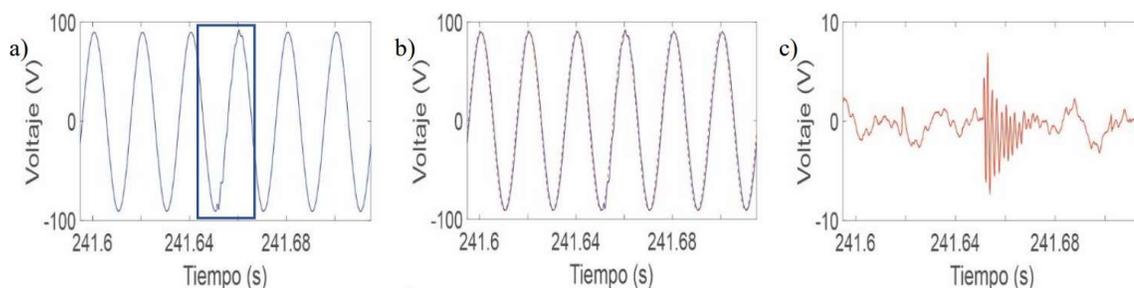


Figura 4.11 “Señal real del parque eólico de España analizada por el  $\mu$ AG” (Autoría propia). a) Señal de entrada real con transitorio. b) Comparación de fundamental con señal de entrada. c) Señal residual (Pío et al., 2021).

Para la metodología, el microalgoritmo genético se utilizó para obtener las propiedades de la señal fundamental de las señales de voltajes y corrientes, así como, su señal residual, de los cuales, la amplitud y la señal residual fueron utilizados para el cálculo de la distorsión armónica total, y las fases estimadas para el cálculo de las potencias activa y reactiva.

#### 4.5. Conclusión

Este proyecto de tesis permitió implementar los diversos conocimientos que se obtuvieron durante la Maestría en Ciencias Mecatrónica. El proyecto es una metodología, la cual permite una correlación entre la CE y vibraciones presentes en aerogeneradores de alta potencia.

Se llevaron a cabo los objetivos específicos descritos al inicio de la tesis, diseñando diferentes programas para desempeñar cada una de las tareas necesarias a lo largo de la investigación.

La investigación permitió conocer más a detalle la influencia de las señales de vibración sobre la CE, al analizar datos a lo largo del día con una frecuencia de muestreo de 8k Hz, y, a partir de estos se calcularon la THD, los indicadores estadísticos en el DT y en el DF, así como la potencia que generó el sistema de

generación eólica, para producir una correlación estadística entre la distorsión armónica total y cada uno de los indicadores estadísticos en ambos dominios.

A pesar de que los niveles de correlación entre los parámetros estadísticos, la THD y la potencia residual sugieren que la relación es significativa, al someterlos a la regresión línea, nos dimos cuenta de que el modelo matemático no se puede usar para predicción, debido a que existen más variables que se necesitan para describir por completo el fenómeno.

Por lo cual se concluye que, la investigación cumple con el objetivo principal, el cual se trata de una metodología capaz de determinar si las vibraciones en los aerogeneradores de alta potencia afectan de manera perjudicial a la CE entregada, y, en base a los datos obtenidos, se cumple con la hipótesis propuesta, dejando lista una metodología para futuros análisis de los aerogeneradores.

## V. REFERENCIAS

- Amézquita, J. P. 2012. Monitoreo de Vibraciones en Tiempo Real Para Detectar Daños en Estructuras. Universidad Autónoma de Querétaro. Querétaro.
- Arciniegas E., Flórez E. G., & Serrano, J. C. 2018. Diseño y simulación de un concentrador de flujo para aumentar la potencia eólica disponible en un aerogenerador de baja potencia. CIENCIA EN DESARROLLO, 9(2), 127-135. <https://doi.org/10.19053/01217488.v9.n2.2018.8754>
- Arraña, I., Marino, E., Bertinat, P., Salerno, J., Chemes, J., Barone, M., Saenz, J. 2012. Estado Del Arte En El Desarrollo De Pequeños Generadores Eólicos. Asades.
- Cai, H., Wood, D., & Sun, Q. (2013). Small wind turbine generator monitoring: A test facility and preliminary analysis. 2013 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (QR2MSE). doi:10.1109/qr2mse.2013.6625903
- Cai, H., Wood, D., & Sun, Q. (2013). Small wind turbine generator monitoring: A test facility and preliminary analysis. 2013 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (QR2MSE). doi:10.1109/qr2mse.2013.6625903
- Cho, W., Powers, E. J. 2009. Time-frequency analysis for the grid power quality of a variable speed wind turbine. 2009 IEEE Power Electronics and Machines in Wind Applications. doi:10.1109/pemwa.2009.5208368
- Dekorsy, A. 2000. Digital signal processing. IEEE Signal Processing Magazine.
- Diez D. M., Barr C. D. & Rundel M. 2017. OpenIntro Statistics. 3ra ed. OpentIntro.

- Guerrón G., García E., Montero A. Influencia de las ráfagas de viento en la calidad de la energía de los parques eólicos. 2014. Enfoque. <http://dx.doi.org/10.29019/enfoqueute.v5n3.42>
- GWEC. 2020. Global offshore wind report. Global wind energy council. Belgica.
- Hayt, W. H., Kemmerly, J. E., & Durbin, S. M. 2007. Análisis de circuitos en ingeniería. Mc Graw Hill.
- Hernández S. Z. 2018. Análisis de vibraciones para detección de fallas en aerogeneradores de baja potencia. Universidad Autónoma de Querétaro. Querétaro.
- Hernández U. 2018. Sistema de emulación de modelos de velocidad de aspas en aerogenerador de baja potencia. Universidad Autónoma de Querétaro. Querétaro.
- IEA. 2020. Electricity Information: Overview. IEA. Paris. <https://www.iea.org/reports/electricity-information-overview>
- IEEE. 2010. IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions. doi:10.1109/ieeestd.2010.5439063
- Jashfar S., Esmaili S., 2014. Volt/var/THD control in distribution networks considering reactive power capability of solar energy conversion. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 60(), 221–233. doi:10.1016/j.ijepes.2014.02.038
- Korkua, S. K., Wei L., & Hung C. 2012. Power quality monitoring and control for DFIG wind generation. 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting. doi:10.1109/pesgm.2012.6344988
- Larios A. 2014. La energía renovable en México: perspectivas desde el Balance Nacional de Energía 2012. Economía Informa 385. México.

- León M. F. 2019. Modelación y simulación matemática de un aerogenerador utilizando acumulación hidráulica tipo vejiga como respaldo para mitigar huecos de tensión. Universidad Autónoma de Bucaramanga. Bucaramanga, Colombia.
- Liu Y. J., & Lan, P. H. 2016. Power quality assessments of a commercial grid-connected small wind turbine product. 2016 IEEE 5th Global Conference on Consumer Electronics. doi:10.1109/gcce.2016.7800324
- Mendoza C. O. 2015. Sistema embebido para la búsqueda del punto máximo de potencia para aerogeneradores de pequeña escala basada en algoritmos heurísticos. Universidad Autónoma de Querétaro. Querétaro.
- Oppenheim A. V., Willsky A. S. & Nawab S. H. 1997. Señales y sistemas. Editorial Prentice-Hall.
- Pío G., Jaen A. Y., Romero R. J., Osornio R. A., Elvira D. A. 2021. Microalgoritmo genético para la detección de disturbios transitorios en redes eléctricas. Memorias del congreso internacional de investigación Academia Journals Morelia 2021.
- Rao S. S. 2012. Vibraciones mecánicas. 5ta Ed. Pearson. México.
- Sánchez J. R., Téllez A. C., Escobar R. F., Chávez G. M. & Gutiérrez J. A. 2019. Sistema de análisis de vibraciones aplicado a la detección de fallas en aerogeneradores. Ingeniería, Investigación y Tecnología. (Vol. 33 no.3), México.
- Saucedo J. J., Jaen A. Y., Delgado M., Romero R. J., Osornio R. A. 2021. Condition monitoring strategy based on an optimized selection of high-dimensional set of hybrid features to diagnose and detect multiple and combined faults in an induction motor. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109404>

- Sayenko Y. & Molchan A. 2019. Analysis of Wind Turbine Impacts on Power Quality Taking into Account the Variable Nature of Wind Flow. IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES). Kremenchuk, Ukraine. pp. 242-245, doi: 10.1109/MEES.2019.8896487
- Secretaria de Energía. 2018. Balance Nacional de Energía 2017. Ciudad de México. <https://www.gob.mx/sener/documentos/balance-nacional-de-energia>
- STMicroelectronics. 2020. IIS3DWB: ultra-wide bandwidth, low-noise, 3-axis digital vibration sensor. STMicroelectronics.
- Tummala, A., Kishore, R., Kumar, D., Indraja, V. 2015. A review on small scale wind turbines. Elsevier.
- Wang H., Ke S. T., Wang T. G. & Zhu S. Y. 2020. Typhoon-induced vibration response and the working mechanism of large wind turbine considering multi-stage effects. Renewable Energy. doi:10.1016/j.renene.2020.02.013
- Yang J. J., He E. M. 2020. Coupled modeling and structural vibration control for floating offshore wind turbine, Renewable Energy. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.05.075>.
- Zhang A., Li H., Liu F., Yang H. 2012. A coordinated voltage/reactive power control method for multi-TSO power systems. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 43(1), 20–28. doi:10.1016/j.ijepes.2012.04.046
- Zhao Y., Pan J., Huang Z., Miao Y., Jiang J., & Wang Z. 2020. Analysis of vibration monitoring data of an onshore wind turbine under different operational conditions. Engineering Structures, 205, 110071. doi:10.1016/j.engstruct.2019.110071

## VI. ANEXOS

### 6.1. Script analisis señal de voltaje y corriente

```
close all; clear all; clc;

D = 1; %Carpeta a analizar

Fs = 8000; %Frecuencia de muestreo
T = 0.2; %Periodo
t = 0:1/Fs:T-(1/Fs); %Vector de tiempo
Amin = 0.9; %Amplitud minima
Amax = 1.1; %Amplitud maxima
Fmin = 49; %Frecuencia minima
Fmax = 51; %Frecuencia maxima

L = 1600; %Longitud de muestra
f = Fs*(0:(L/2))/L;

p = 0; %Variable conteo de muestras

%% Cargar datos
for dia = 0:10
    for hora = 0:23
        for minz = 0:5
            q = 0;
            dir = sprintf('G:\\Datos\\medida-
2%d\\PQUAQ_07\\dia_%03d\\hora_%03d\\minz_%03d\\', D,dia,hora,m
inz)

            file = strcat(dir, 'Ia.mat');
            Ia = double(load(file).Data);

            file = strcat(dir, 'Va.mat');
            Va = double(load(file).Data);

%% Aplicar uAG
for i = 0:2999
    S_I = Ia(1+L*i:L+L*i);
    S_V = Va(1+L*i:L+L*i);
    S_S = In(1+L*i:L+L*i);

    M = max(abs(S_I));
```

```

uS_I = S_I/M;
M = max(abs(S_V));
uS_V = S_V/M;

[A_v,f_v,phi_v,rs_v] = MGA(uS_V,t,Amin,Amaz,Fmin,Fmax);
[A_i,f_i,phi_i,rs_i] = MGA(uS_I,t,Amin,Amaz,Fmin,Fmax);

%% Calculo de Distorsion Armonica Total DHT
Y = fft(uS_V);
P2 = abs(Y/L);
P1 = P2(1:L/2+1);
P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);

Arm(1) = P1(11);
for j = 2:50
    Arm(j) = P1((j*10)+1)^2;
end
DHT_V(i+1) = sqrt(sum(Arm(2:end)))/Arm(1)*100;

%% Calculo de potencias
p = p + 1;
phi(p) = phi_v - phi_i;
if p == 300 && q < 10
    phi_m = mean(phi);
    Pot(1,q+1) = rms(Va(1+(q*480000):480000+(q*480000)))
*59.785e-3*rms(Ia(1+(q*480000):480000+(q*480000)))*11.444e-3;
    Pot(2,q+1) = Pot(1,q+1)*cos(2*pi*phi_m);
    Pot(3,q+1) = Pot(1,q+1)*sin(2*pi*phi_m);
    q = q + 1;
    p = 0;
end
end

%% Guardar Datos

F = eval(sprintf('Pot'));
NewF = sprintf('Potencia_%03d_%03d_%03d',dia,hora,minz);
assignin('base',NewF,F);

F = eval(sprintf('DHT_V'));
NewF2 = sprintf('DHT_V_%03d_%03d_%03d',dia,hora,minz);
assignin('base',NewF2,F);

DATA = sprintf('DHT_POT_%03d_%03d_%03d.mat',
dia,hora,minz);

```

```

save (DATA,NewF2,NewF)
save (DATA,NewF2)

clearvars -except Fs T Amin Amax Fmin Fmax L f p q dia
hora minz i j p e ERROR D;

end
end
end

```

## 6.2. Script análisis estadístico de señales de vibración en el dominio del tiempo

```

close all; clear all; clc;

Fs = 8000;
D = 1; %Carpeta a analizar
L = 1600; %Longitud de muestra
f = Fs*(0:(L/2))/L; %Vector de frecuencias
N = 16 %Numero de bits

%% Cargar datos
for dia = 0:10
    for hora = 0:23
        for minz = 0:5

            dir = sprintf('G:\\Datos\\medida-2%d\\PQUAQ_07\\dia_%03d\\
hora_%03d\\minz_%03d\\',D,dia,hora,minz)

            file = strcat(dir,'In.mat');
            In = double(load(file).Data);

%% Calculo de Parametros Estadisticos
for i = 0:2999

    S_S = In(1+L*i:L+L*i)/(2^N-1);
    xk = S_S;

    n = length(xk);
    F(hora+1,minz+1,1,i+1) = sum(abs(xk))/n;
    F(hora+1,minz+1,2,i+1) = max(xk);
    F(hora+1,minz+1,3,i+1) = sqrt(sum(xk.^2)/n);
    F(hora+1,minz+1,4,i+1) = (sum(sqrt(abs(xk)))/n)^2;

```

```

    F(hora+1,minz+1,5,i+1) = sqrt(sum((xk-
F(hora+1,minz+1,1,i+1)).^2)/n);
    F(hora+1,minz+1,6,i+1) = sum((xk-
F(hora+1,minz+1,1,i+1)).^2)/n;
    F(hora+1,minz+1,7,i+1) =
F(hora+1,minz+1,3,i+1)/(sum(abs(xk))/n);
    F(hora+1,minz+1,8,i+1) =
F(hora+1,minz+1,4,i+1)/(sum(abs(xk))/n);
    F(hora+1,minz+1,9,i+1) =
F(hora+1,minz+1,2,i+1)/F(hora+1,minz+1,3,i+1);
    F(hora+1,minz+1,10,i+1)=
F(hora+1,minz+1,2,i+1)/F(hora+1,minz+1,4,i+1);
    F(hora+1,minz+1,11,i+1)=
F(hora+1,minz+1,2,i+1)/(sum(abs(xk))/n);
    F(hora+1,minz+1,12,i+1)= sum((xk-
F(hora+1,minz+1,1,i+1)).^3)/(F(hora+1,minz+1,5,i+1)^3);
    F(hora+1,minz+1,13,i+1)= sum((xk-
F(hora+1,minz+1,1,i+1)).^4)/(F(hora+1,minz+1,5,i+1)^4);
    F(hora+1,minz+1,14,i+1)= sum((xk-
F(hora+1,minz+1,1,i+1)).^5)/(F(hora+1,minz+1,5,i+1)^5);
    F(hora+1,minz+1,15,i+1)= sum((xk-
F(hora+1,minz+1,1,i+1)).^6)/(F(hora+1,minz+1,5,i+1)^6);
    end
    end
end

DATA = sprintf('Ana_Est_TD_%03d.mat',dia);
save(DATA,'F')
clearvars -except Fs T t Amin Amax Fmin Fmax L f p e N dia
hora minz i D;
end

```

### 6.3. Script análisis estadístico de señales de vibración en el dominio de la frecuencia

```

close all; clear all; clc;

D = 1; %Carpeta a analizar
L = 1600; %Longitud de muestra
f = Fs*(0:(L/2))/L; %Vector de frecuencias
n = 16 %Numero de bits

%% Cargar datos

```

```

for dia = 0:10
    for hora = 0:23
        for minz = 0:5

            dir = sprintf('G:\\Datos\\medida-2%d\\PQUAQ_07\\dia_%03d\\
hora_%03d\\minz_%03d\\',D,dia,hora,minz)

            file = strcat(dir,'In.mat');
            In = double(load(file).Data);

%% Calculo de FFT
for i = 0:2999

    S_S = In(1+L*i:L+L*i)/(2^n-1);
    m_S = mean(S_S);
    S_S = S_S-m_S;

    Y = fft(S_S);
    P2 = abs(Y/L);
    P1 = P2(1:L/2+1);
    P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);
    sk = P1;
    fk = f;

%% Calculo de Parametros Estadisticos
K = length(sk);
F(hora+1,minz+1,1,i+1) = sum(sk)/K;
F(hora+1,minz+1,2,i+1) = sum((sk-F(hora+1,minz+1,1,i+1))
.^2)/(K-1);
F(hora+1,minz+1,3,i+1) = sum((sk-F(hora+1,minz+1,1,i+1))
.^3)/(K*(sqrt(F(hora+1,minz+1,2,i+1)))^3);
F(hora+1,minz+1,4,i+1) = sum((sk-F(hora+1,minz+1,1,i+1))
.^4)/(K*(sqrt(F(hora+1,minz+1,2,i+1)))^2);
F(hora+1,minz+1,5,i+1) = sum(fk.*sk)./sum(sk);
F(hora+1,minz+1,6,i+1) = sqrt((sum((fk-
F(hora+1,minz+1,5,i+1)).^2.*sk))/K);
F(hora+1,minz+1,7,i+1) = sqrt(sum(fk.^2.*sk)./sum(sk));
F(hora+1,minz+1,8,i+1) = sqrt(sum(fk.^4.*sk)./
sum(fk.^2.*sk));
F(hora+1,minz+1,9,i+1) =
sum(fk.^2.*sk)/sqrt(sum(sk)*sum(sum(fk.^4.*sk)));
F(hora+1,minz+1,10,i+1) = F(hora+1,minz+1,6,i+1)
/F(hora+1,minz+1,5,i+1);
F(hora+1,minz+1,11,i+1) = sum((fk-F(hora+1,minz+1,5,i+1))
.^3.*sk)/(K*F(hora+1,minz+1,6,i+1)^3);

```

```

    F(hora+1,minz+1,12,i+1)= sum((fk-F(hora+1,minz+1,5,i+1))
.^4.*sk)/(K*F(hora+1,minz+1,6,i+1)^4);
    F(hora+1,minz+1,13,i+1)= sum(sqrt(fk-F(hora+1,minz+1,5,
i+1)).*sk)/(K*sqrt(F(hora+1,minz+1,6,i+1)));
    F(hora+1,minz+1,14,i+1)= (F(hora+1,minz+1,7,i+1)
+F(hora+1,minz+1,8,i+1))/F(hora+1,minz+1,1,i+1);
end
end
end

DATA = sprintf('Ana_Est_%03d.mat',dia);
save(DATA, 'F')
clearvars -except Fs T Amin Amax Fmin Fmax L f p e n dia
hora minz i D;
end

```

#### 6.4. Script correlación estadística

```

close all; clear all; clc;

D = 1;          %Carpeta a analizar
a = 1;          %Contador de correlaciones

for dia = 0:10

    dir = sprintf('D:\\Archivo\\Documentos\\POSGRADO\\TESIS\\
MATLAB\\Datos_2%d\\Ana_Est_%03d.mat',D,dia);
    load(dir)

    for hora = 0:23
        for minz = 0:5

            dir = sprintf('D:\\Archivo\\Documentos\\POSGRADO\\TESIS\\
MATLAB\\Datos_2%d\\DHT_POT_%03d_%03d_%03d.mat',D,dia,hora,min
z)
            load(dir)
            DHT = eval(sprintf('DHT_V_%03d_%03d_%03d',dia,hora,minz));

            for n = 1:14
                for i = 1:3000
                    FT(i) = F(hora+1,minz+1,n,i);
                end

                R = corrcoef(DHT,FT);          %Almacenamiento
            end
        end
    end
end

```

```

    if R(1,2) > 0.8 || R(1,2) < -0.8
        Cor(a,:) = [dia hora minz R(1,2) n];
        a = a+1;
    end

    end

    clearvars -except a dia hora minz Cor F D;
end
end
end

if a > 1
    [~,idx] = sort(Cor(:,4), 'descend');
    ValCorr = Cor(idx,:);
    dir = sprintf('Correlacion_2%d.mat',D);
    save(dir, 'ValCorr');
end

```

## 6.5. Script regresión lineal

```

close all; clear all; clc;

load('Potencia_005.mat')      %Carga de datos Potencia/THD
load('Ana_Est_005.mat')      %Carga de parámetro estadístico

P = 12;      %Selección de parámetro estadístico
j = 1;
for H = 1:24
    for M = 1:6
        for i = 1:10
            FT(j) = F(H,M,P,i);
            j = j+1;
        end
    end
end

x = Pot(3,:).';      %Datos de Potencia/THD
y = FT. ';          %Parámetro estadístico

mdl = fitlm(x,y)      %Regresión lineal
anova(mdl, 'summary')

```

```
figure
plot mdl
xlabel('Potencia Reactiva','FontSize',16)
ylabel('Media','FontSize',16)
title('Regresion Lineal Entre Potencia reactiva y
Media','FontSize',16)
legend('Datos','Pendiente','Intervalo de
confianza','Location','best','FontSize',16);
```