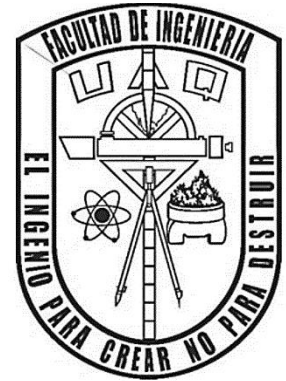


Universidad Autónoma de Querétaro

Ingeniería Electromecánica

Línea terminal en Mecatrónica



Facultad de Ingeniería

Análisis de la eficiencia de un generador eólico de baja potencia bajo diferentes niveles de vibración

Alumno:

Israel Cinta Ramírez

Expediente:

235075

Dirigido por:

Dr. Arturo Yosimar Jaen Cuellar

Codirigido por:

Dr. David Alejandro Elvira Ortiz



Dirección General de Bibliotecas y Servicios Digitales de
Información



Análisis de la eficiencia de un generador eólico de baja
potencia bajo diferentes niveles de vibración

por

Israel Cinta Ramírez

se distribuye bajo una [Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional](#).

Clave RI: IGLIC-235075-0323-1222

Índice

1 Datos generales.....	4
2 Introducción.....	6
3 Antecedentes.....	6
3.1 Internacionales	7
3.2 Locales	10
4 Justificación.....	10
5 Descripción del problema.....	11
6 Revisión de literatura.....	12
6.1 Energía eólica	12
6.2 Generador eólico.....	14
6.3 Energía cinética.....	16
6.4 Ley de Betz	17
6.5 Potencia de un aerogenerador	18
6.6 Densidad del aire	20
6.7 Túnel de viento	20
6.8 Potencia eléctrica	21
6.9 Eficiencia	21
6.10 Eficiencia del generador eólico.....	21
6.11 Vibraciones	22
6.12 Sistemas de adquisición de datos.....	23
6.13 Tarjetas de procesamiento digital	24
7.1 Objetivo General.....	25
7.2 Objetivos particulares	26
8 Metodología.....	26
i.- Cálculo de la potencia de entrada.....	27
ii.- Medición de velocidades de viento	28
iii.- Estructura de soporte de aerogenerador	29
iv.- Montaje del aerogenerador en el túnel de viento	29
v.- Selección e integración de los sensores a utilizar.....	30

vi.- Definición de banco de cargas.....	30
vii.- Medición de las señales y cálculo de potencia de salida.....	31
viii.- Estimación de eficiencia del aerogenerador y relación con vibraciones.....	31
9 Experimentación y resultados.....	31
10 Conclusiones.....	50
11 Referencias	52

Índice de figuras

Figura 1.- Uso del viento para moler granos	12
Figura 2.- Uso del viento para bombeo de agua.....	13
Figura 3.- Uso del viento para producción de papel.....	13
Figura 4.- Aerogenerador de eje horizontal de 3 palas.....	15
Figura 5.- Partes mecánicas y eléctricas de un aerogenerador.	15
Figura 6.- Formula y representación gráfica de la extraíble de un aerogenerador.	17
Figura 7.- Gráfica ley de Betz.	18
Figura 8.- Relación velocidad del viento - Potencia eléctrica de un aerogenerador.	19
Figura 9.- Ejemplo de túnel de viento. Fuente: Fernandes. L, 2019, scielo.cl.	20
Figura 10.- Diagrama de las eficiencias que afectan a un aerogenerador.	22
Figura 11.- Diagrama de un DAQ.	24
Figura 12.- Tarjeta Arduino nano.	25
Figura 13. Diagrama de bloques de la metodología.	27
Figura 14.- Representación esquemática del túnel de viento y la ubicación del anemómetro digital.	28
Figura 15.- Diseño de la base del aerogenerador.....	29
Figura 16.- Diagrama a bloques del montaje del sistema.....	30
Figura 17.- Anemómetro colocado.....	31
Figura 18.- Sujeción de la base del anemómetro al túnel de viento.....	32
Figura 19.- Turbina del túnel de viento.....	32
Figura 20.- Variador de frecuencia utilizado.....	33
Figura 21.- Grafica de la velocidad del túnel de viento.....	34
Figura 22.- Corte y eliminación de rebaba de las piezas.....	35
Figura 23.- Posicionamiento de las piezas de la base.....	36
Figura 24.- Piezas soldadas	37
Figura 25.- Piezas a barrenar	37
Figura 26.- Piezas barrenándose.....	38
Figura 27.- Base terminada a).....	39
Figura 28.- Base terminada b)	39
Figura 29.- Aerogenerador y base colocados en el túnel de viento.....	40
Figura 30.- Código de Arduino a)	41

Figura 31.- Código en Arduino b)	42
Figura 32.- Código de Python a)	43
Figura 33.- Código de Python b)	44
Figura 34.- Código de Python c)	44
Figura 35.- Código de Matlab para el análisis de Fourier	45
Figura 36.- Vibraciones en el dominio del tiempo	46
Figura 37.- Vibraciones en el dominio de la frecuencia.....	46
Ilustración 38 Gráfico eficiencia-afloje a 2.2690 m/s	47
Ilustración 39 Gráfico eficiencia-afloje a 2.5145 m/s	48
Ilustración 40 Gráfico eficiencia-afloje a 2.7600 m/s	48
Ilustración 41 Gráfico eficiencia-afloje a 3.0055 m/s	49

Índice de tablas

Tabla 1.- Promedios de velocidades del túnel de viento.....	33
Tabla 2.- Velocidades utilizadas.....	34
Tabla 3.- Potencias de entrada calculadas.....	35
Tabla 4.- Datos obtenidos de sensores.....	44
Tabla 5.- Resultados de los experimentos.....	46
Tabla 6.- Frecuencias destacables.....	49

1 Datos generales

- Título del proyecto de Tesis: Análisis de la eficiencia de un generador eólico de baja potencia bajo diferentes niveles de vibración
- Nombre del alumno: Israel Cinta Ramírez
- Número de expediente: 235075
- Programa de Estudios a realizar: Ingeniería Electromecánica
- Director de tesis: Dr. Arturo Yosimar Jaen Cuellar
- Codirector: Dr. David Alejandro Elvira Ortiz
- Lugar en donde se realizará la investigación: Túnel de viento, Laboratorio de la Facultad de Ingeniería, Campus San Juan del Río.
- Línea de investigación: Mecatrónica
- Tipo de investigación: Aplicada
- Horario de trabajo: 8:00am - 2:30pm

2 Introducción

El ser humano siempre ha necesitado usar energía para su día a día, pero desde que empezó a usar maquinaria más potente se vio en la necesidad de usar otras fuentes de energía más allá de su propia fuerza, algo que se ha incrementado exponencialmente desde la revolución industrial hasta nuestros días. Fue entonces cuando se empezaron a utilizar fuentes de energía como el carbón y el petróleo, con los cuales la industria prosperó, pero estas fuentes de energía, con el tiempo, mostraron tener varios inconvenientes tales como: la contaminación la cual derivaba en el deterioro de la salud de los habitantes de la zona, el cambio climático y la destrucción de la capa de ozono, además de que estas fuentes de combustibles son limitadas por lo que pueden acabarse en algún momento. Por estas razones se han buscado fuentes de energía más limpias, entre las cuales están la energía eólica, la energía solar, la energía mareomotriz, etc., a estas energías se le llaman energías renovables. Estas fuentes de energía utilizan como combustible elementos que no requieren ser extraídos, no se agotan y son prácticamente gratis. De entre las energías renovables la más limpia y eficiente es la energía eólica, la cual transforma la energía del viento en energía eléctrica, ya que para la construcción de un generador eólico solo se necesitan extraer metales y materiales relativamente comunes para la fabricación de la estructura, pero estas estructuras tienen el problema de que se encuentran a la intemperie, por lo que están sujetas a vibraciones externas, a tener problemas en la base de la estructura por la constante acción del clima, la flora y la fauna, y por tales cuestiones la generación de energía se puede tener problemas con la generación de energía eléctrica. Estos problemas pueden y deben ser atacados para poder mejorar la eficiencia de las tecnologías de extracción de energía eólica, pero para ello es necesario que se realicen los estudios correspondientes.

3 Antecedentes

Desde su creación los sistemas de generación eólica han sido ampliamente estudiados buscando mejorar de manera continua su desempeño y así incrementar su capacidad de generación de energía incrementando al máximo su aprovechamiento del viento. Por lo tanto, diversos estudios han sido desarrollados por técnicos, ingenieros y científicos a fin de superar las limitaciones mecánicas, electrónicas y de diseño de estos sistemas, pero aún existen oportunidades de mejora. En estos trabajos se han tomado en cuenta los perfiles alares, la disminución de fricción en las partes mecánicas o la disminución de consumo de energía en la electrónica de potencia. Este trabajo se enfoca en el análisis de las vibraciones que se presentan de forma inherente al sistema y como afectan a la eficiencia energética del aerogenerador.

En el siguiente apartado se muestran ciertos trabajos relacionados con vibraciones y generación eólica, los cuales tocan puntos en común que se buscan integrar en el presente trabajo como referencia.

3.1 Internacionales

Referente al tema de las vibraciones y los daños que éstas pueden causar en los sistemas mecánicos y eléctricos se encontraron los siguientes trabajos. Para encontrar ruidos parásitos en sillas de automóviles Perdomo & Ceron (2008) realizaron unas bases mecánicas y una serie de pruebas bajo distintas condiciones de operación, de manera que pudieran obtener fácilmente las lecturas de las vibraciones requeridas para el análisis de ruidos. Por otro lado, en el trabajo de Tomas et al. (2018) mencionan como las turbinas eólicas marinas están sometidas a vibraciones por los vientos, las corrientes y el oleaje. En este estudio se hace un análisis de vibraciones colocando una turbina eólica flotante sobre una plataforma simplificada, de manera que las cargas aerodinámicas e hidrodinámicas son despreciables. Con esto se logra una simplificación del sistema y se puede trabajar únicamente con la variable que se va a estudiar, en este caso las vibraciones. Continuando con los problemas que pueden causar las vibraciones se tiene el trabajo de Vargas (2004) en el que se realiza un análisis sobre los sistemas de cajas multiplicadoras y generadores eólicos con el fin de tener un banco de información y desarrollar técnicas predictivas ante la presencia de fallos mecánicos o eléctricos. El trabajo tiene como objetivo contar con un banco de experimentos y contar con datos suficientes para el desarrollo de esquemas que permitan definir mantenimientos adecuados. Por otra parte, en su estudio Sánchez (2019) trabajó con un aerogenerador de baja potencia midiendo las vibraciones presentes en el generador para diagnosticar las posibles fallas mecánicas y estructurales generadas. El diagnóstico lo lleva a cabo a través de un análisis estadístico sobre datos de frecuencia utilizando el entorno virtual de LabVIEW y MATLAB. De manera muy similar, en el trabajo presentado por López (2018) se lleva a cabo un análisis de vibraciones para el desarrollo de un modelo computacional en la plataforma MATLAB-Simulink para detectar fallas que se pueden presentar en los rodamientos de un generador de baja potencia. Otro ejemplo de metodologías en las que se detectan problemas causados por las vibraciones en la parte mecánica de aerogeneradores es el que presenta Isaza (2020), donde desarrolla un sistema que utiliza el análisis de vibraciones para ejecutar el monitoreo y diagnóstico del equipo, pero recalando que este monitoreo no es preventivo, sino que, una vez que se ha detectado el problema, el generador ya sufrió algún tipo de daño. Así mismo, el trabajo desarrollado por Gutiérrez (2017) hace un monitoreo de vibraciones para determinar la vida útil que va acumulando un aerogenerador y desarrolla un sistema que indica el momento en el que se debe llevar a cabo un mantenimiento correctivo, o mantenimiento basado en las condiciones del sistema. Aunque este tipo de análisis de vibraciones es útil para detectar fallas y mejorar la operación de un generador, no se analiza directamente la energía, sino más bien los sistemas del equipo. Otro ejemplo es el trabajo de Alvarez y Mirasso (2013) donde se centran en el daño estructural por vibraciones de las torres de los generadores eólicos por lo que presentan el diseño y el análisis de un sistema de control activo en conjunto con un amortiguador de masa sintonizado para la estructura de la torre. Como se observó de los trabajos antes mencionados, existen diversas investigaciones en las que se aborda el estudio de las vibraciones como elemento que afecta a los sistemas de generación de energía eléctrica basados en energía eólica, a su estructura como tal. Estos trabajos

consideran aspectos de detección de fallos y mantenimientos, sin embargo, no consideran si las vibraciones además de afectar a los sistemas mecánicos reducen la eficiencia en el proceso de conversión de energía del aerogenerador.

Una consecuencia no deseada debida a las afectaciones causadas por las vibraciones en sistemas de generación de energía eólica es la necesidad de hacer modificaciones al diseño de la estructura de sujeción del aerogenerador, o realizar modificaciones de sus componentes internos. Por esta razón, se desarrollan estudios como el de García (2015), en el que se utilizan modelos y análisis de elementos finitos de las vibraciones torsionales de una turbina eólica de eje vertical y con ello proponer criterios de diseño para reducir las fatigas, desgastes y fallas causadas por dichas vibraciones. Por su parte, con éste mismo propósito, enfocado en la estructura de la base del aerogenerador el trabajo presentado por Cueva (2015) hace una recopilación y mención de las medidas que se deben tener en cuenta para disminuir, al mínimo posible, las vibraciones en el aerogenerador, tales como empaques de caucho y buena sujeción de la base. Existen estudios, como el de Menghini et al. (2010), en los que se menciona como el movimiento de las palas en los generadores eólicos debidos a turbulencias del viento ocasionan un aumento de las vibraciones y una modificación de la frecuencia natural de la estructura. Esto repercute directamente de manera negativa en el sistema de generación, y por ello es necesario determinar la frecuencia natural de la estructura bajo diferentes condiciones de turbulencia. Para ello es necesario recurrir al uso de software especializado para llevar a cabo un análisis de elementos finitos. Siguiendo con la modificación de un sistema para mejorar su comportamiento bajo un adecuado análisis, en el estudio de Rivera (2010) se diseña y construye un sistema que convierte el movimiento rotacional de un motor eléctrico en vibraciones verticales y replicables para aplicarlas sobre una pasarela peatonal a la cual se le ha instalado un disipador de vibraciones. En la discusión de estos trabajos se observa claramente que el enfoque que presentan en el mejoramiento de la estructura de los aerogeneradores, de sujeción y la propia construcción del generador. Concluyen que la manera de mejorar la operación del sistema es reduciendo las vibraciones presentes en él pero no desde el punto de vista de la energía que generan, sino desde los elementos que integran al sistema.

En cuestiones de generación de energía las vibraciones no solo se analizan desde el punto de vista impacto negativo, también es posible estudiarlas de manera que sean aprovechadas para la generación de energía. Por ejemplo, tal como se ve en el proyecto de Vera & Andre (2016) donde se utilizan materiales piezoeléctricos para poder obtener energía de las vibraciones producidas por las bicicletas de un gimnasio y así iluminar la zona donde estas se encuentran. En este mismo sentido, pero con una aplicación completamente diferente, se tiene el trabajo de Valezca (2021) que describe cómo utilizar las vibraciones que se producen de manera natural en un puente y convertirlas en energía utilizando materiales piezoeléctricos. Con la energía generada se busca alimentar un

sistema de monitoreo en el puente y que no requiera ningún tipo de alimentación externa. La relación entre la energía eléctrica y las vibraciones en un sistema se aborda en el proyecto de Ortiz y Parejo (2002), en este trabajo se toman las vibraciones, principalmente las que causan una resonancia en la estructura de un sistema rotatorio de generación de energía para implementar un método que reutilice estas vibraciones y así el aprovechamiento de la energía sea el máximo posible. De manera similar Camacho y Rincon (2016) buscaban convertir la energía de las vibraciones producidas por un sistema masa-resorte a energía eléctrica, utilizando campos magnéticos, para alimentar sistemas de baja potencia. En el estudio presente también se toman en cuenta la relación entre las vibraciones y los generadores rotatorios, pero en vez de tomar provecho de las vibraciones para la producción de energía, estas se analizan como efectos negativos en la estructura del sistema reduciendo su rendimiento. También hay que tener en cuenta de que en los trabajos presentados se busca aprovechar la mayor cantidad de energía posible, mientras que en este proyecto de tesis se comprueba que las vibraciones tienen una relación con la eficiencia del aerogenerador. Los trabajos que se acaban de discutir abordan el análisis de las vibraciones y como se puede obtener provecho de ellas, como elementos usables para la generación de energía. Este tema es interesante, sin embargo, como se verá en el presente estudio de tesis existe una relación que se puede determinar entre las vibraciones y la eficiencia propia del sistema. Por lo cual, aunque las vibraciones sean aprovechadas para la generación de energía tiene que ser de forma ajena al sistema de generación eólica, es decir, usar las vibraciones para generar energía de un sistema que no sea propiamente un aerogenerador.

Un tema que es necesario mencionar cuando se emplean sistemas de generación de energía eólica es la relación entre la potencia generada y las vibraciones presentes en el sistema. Ya que es posible definir cómo estas últimas tienen un impacto directo sobre la potencia, generalmente para reducir su valor. Por ejemplo, en el trabajo de Soto (2014) se estudia como el aumento de la turbulencia en el viento que percibe un sistema de conversión de energía eólica induce vibraciones que aumentan la producción de energía debido a la naturaleza y estructura del sistema. Mientras tanto, un trabajo bastante similar es el descrito por Graciano (2020) donde se trabaja con un conjunto de generadores eólicos por efecto de vorticidad. En dicho trabajo se habla sobre la relación que tiene la velocidad del viento con las vibraciones para determinar la velocidad a la que el sistema llega a su frecuencia natural. Además, un trabajo en el que se aborda como las vibraciones crean variaciones de velocidad y aceleración de motores es el que presenta Isaías (2014), en este trabajo se tiene en cuenta que la operación de un sistema es fuertemente influenciada mediante las vibraciones mecánicas generadas en el sistema, tanto por factores externos como por la misma operación del sistema. Así entonces, los estudios que abordan las relaciones entre las vibraciones y las capacidades o parámetros de un sistema de generación de energía eólica son lo que compete al presente tema de tesis. Pero, a diferencia de los trabajos descritos en este párrafo, en esta tesis se considera solamente la relación existente entre las vibraciones presentes en un aerogenerador, en su estructura de sujeción y como afectan en su eficiencia del proceso de conversión de energía.

Finalmente, es interesante que hasta el momento los estudios de vibraciones consideren principalmente las afectaciones en la construcción y montaje del aerogenerador, en su potencia generada, en el aprovechamiento de las vibraciones. Por lo que se pretende abordar el estudio de vibraciones con el siguiente enfoque. Un sistema de generación eólica de baja potencia, que estará sometido a condiciones de vibración en diferentes grados para definir el nivel de impacto que estas tienen sobre la eficiencia de conversión de energía.

3.2 Locales

Una parte bastante importante respecto a las mediciones de vibraciones se tomó del trabajo de Rangel (2020) donde se realizaron análisis de vibraciones en los que se utilizó un acelerómetro de la marca KISTLER, el cual, al no poder ser colocado sobre una superficie plana siguió las recomendaciones presentadas en el trabajo de Hernández (2018), utilizando una base pequeña plana en la parte superior cerca de las aspas, la cual no afecta en la obtención de los datos. Para el análisis de datos y despliegue de estadísticos el autor utilizó el software de MATLAB. Aunque su trabajo está más enfocado en un problema mecánico que consiste en el desbalance, se retoma su propuesta de ubicación del sensor de vibraciones para no afectar el proceso de generación eléctrica y, por tanto, en el presente estudio la posición de la base del acelerómetro es similar para realizar las mediciones de vibraciones y el uso de MATLAB para realizar el procesamiento de las señales de vibraciones.

4 Justificación

A continuación, se muestran las oportunidades y avances que aporta el proyecto las cuales justifican su elaboración.

- Socialmente, es importante continuar estudiando y optimizando las tecnologías de generación de energía alterna para que los beneficios de su uso y aprovechamiento se incrementen en comparación de su contraparte, las fuentes de energía convencionales basadas en hidrocarburos, de esta forma se tendrán mayores expectativas sobre las energías limpias a la hora de elegir entre ambas.
- Aún existen áreas de oportunidad en los estudios e investigaciones enfocadas en la eficiencia de las tecnologías de aprovechamiento del viento y que son importantes, como la relación existente entre factores externos que perturban a los aerogeneradores como las vibraciones y la afectación que tienen sobre la eficiencia de los mismos.

- Al analizar un fenómeno que afecta la eficiencia de la energía eólica, se podrían desarrollar estrategias para obtener el máximo aprovechamiento de potencia que otorga un generador eólico que es del 60%.
- Los estudios enfocados en el análisis de la eficiencia de las tecnologías de generación eólica afectados por vibraciones son útiles ya que permiten determinar estrategias que eviten los problemas que estas provocan, y por lo tanto, es posible incrementar las ganancias económicas que estas tecnologías aportan como beneficio.
- Este estudio aborda una variable que no había sido tomada en cuenta para determinar la eficiencia de las tecnologías basadas en energía eólica (aerogeneradores), las vibraciones, las cuales se toman para analizar su relación con dicha eficiencia cuando estas varían en magnitud.

5 Descripción del problema

- Socialmente, las tecnologías para la generación de energía alterna, como el caso de los aerogeneradores, son usadas en menor porcentaje que las tecnologías de generación de energía basadas en fuentes convencionales como los hidrocarburos, esto debido a que las ventajas obtenidas en su relación costo-beneficio aún no están completamente equilibradas y su eficiencia es dependiente de condiciones externas y ajenas.
- En los estudios realizados sobre las tecnologías de generación de energía basadas en fuentes renovables como la eólica aún no han sido completamente explorados todos los parámetros que afectan su eficiencia, y que son externos a la tecnología como las condiciones ambientales o las vibraciones.
- La máxima energía que una turbina puede obtener teóricamente del viento que lo empuja es de solo el 60%. En la realidad el aprovechamiento del viento es aún menor debido a otros factores que se deben analizar para alcanzar este límite.
- Uno de los principales problemas en las tecnologías de aerogeneradores es aumentar la producción de energía, ya que no solo aspectos de construcción mecánica son las principales causas sino también hay otros factores, y así mejorar las ganancias que producen estas energías.

- Las vibraciones en los aerogeneradores solo se toman en cuenta como forma de detectar problemas en las partes mecánicas del aerogenerador cuando también podrían ser un problema para la producción de energía afectando su eficiencia.

6 Revisión de literatura

A continuación, se presentarán los temas más relevantes para el desarrollo del presente proyecto de tesis. Los temas van enfocados desde lo general a lo particular, comenzando con aspectos de energía eólica, hasta los temas particulares que serán utilizados para obtener la eficiencia de conversión del aerogenerador.

6.1 Energía eólica

Es la energía cinética generada por efecto de las corrientes de aire, y que es transmutada en otras formas útiles de energía para su aprovechamiento en las diversas actividades humanas. Ejemplos comunes de esta conversión de energía es a mecánica para impulsar el movimiento en turbinas, poleas, molinos, etc., o a eléctrica para alimentación de equipos. Algunos ejemplos de uso que se le ha dado al viento es, como se ve en la figura 1, para moler granos y extraer aceites el cual fue el primer uso del molino de viento, el cual aún se aprovecha en nuestros días; también para el bombeo de agua, como se ve en la figura 2, donde se utiliza el movimiento rotatorio de un molino en conjunto con un pistón; y para producción de papel, usando el mismo mecanismo para extraer aceite modificado un poco, mostrado en la figura 3.



Figura 1.- Uso del viento para moler granos



Figura 2.- Uso del viento para bombeo de agua



Figura 3.- Uso del viento para producción de papel

La energía eólica se utiliza para mover las aspas de un aerogenerador y convertir este movimiento en energía eléctrica. Y esta energía es aprovechada en zonas donde la presencia de corrientes de viento es muy frecuente y constante, esta energía es utilizada para obtener energía eléctrica donde debido a las dificultades técnicas que implica su traslado es difícil de llevar.

Entre sus mayores ventajas están:

- Al ser una energía inagotable, el viento es abundante, además de que se puede utilizar en muchas partes del mundo.
- Ocupa poco espacio, en comparación de otras energías, como la solar, un parque eólico no ocupa una gran área de terreno y, por lo tanto, da espacio a que se realicen otras actividades en la misma área como la ganadería.
- Tienen bajo costo, el costo de las turbinas eólicas y de su mantenimiento es relativamente bajo. El coste de producción por KW es bastante bajo en lugares

ventosos, en algunos casos se equipará al coste de producción de energía usando carbón.

Entre sus mayores desventajas están:

- El viento es impredecible, en muchos casos el viento puede no ser el suficiente y no se cumplen con las previsiones de producción, y en otros casos el viento excesivo puede dañar la estructura de los aerogeneradores.
- Se debe consumir en el momento, por la naturaleza variante del viento, la producción de esta energía no puede adecuarse a los cambios del consumo eléctrico.
- Son un problema para las aves, de las cuales, las que se ven mayormente afectadas son las aves nocturnas que al no poder ver las aspas que giran a una velocidad de hasta 70 km/h mueren por el impacto. (*Conoce la energía eólica: sus ventajas, qué es y cómo funciona.* (s/f). Endesa, de <https://www.endesa.com/es/la-cara-e/energias-renovables/energia-eolica>).

6.2 Generador eólico

Para aprovechar la energía del viento se usa un generador eólico el cual es un dispositivo que convierte la energía cinética del viento en energía eléctrica tomando la energía del viento al reducir su velocidad, y así, convirtiéndola en energía mecánica.

Los aerogeneradores, también son conocidos como turbinas eléctricas y tienen una duración en su tiempo de vida útil de más de 25 años de manera aproximada.

Los dos principales modelos de aerogeneradores del mercado son:

- Aerogeneradores de eje vertical: Se destacan porque no necesitan de un mecanismo de orientación que requiera girar la turbina en dirección contraria al viento. Los aerogeneradores de eje vertical van sujetos al pavimento y producen menor energía, ya que al realizar su trabajo presentan ciertas resistencias en las turbinas.
- Aerogeneradores de eje horizontal: estos permiten separar cada parte del aerogenerador según las necesidades de la persona u organización que los instala, de esta forma se pueden hacer cálculos más eficientes y planear la construcción de parques eólicos. (Vargas, C. (2020, septiembre 11). Aprende todo sobre la Energía Eólica. *Aprende Institute*. <https://aprende.com/blog/oficios/energia-eolica/energia-eolica-todo-lo-que-deberias-aprender-en-un-curso-de-instalacion/>).

Los aerogeneradores más comunes son de eje horizontal de 3 palas como el que se muestra en la Figura 4. Este tipo de aerogeneradores se usan desde unidades pequeñas, en aplicaciones residenciales, hasta los grandes aerogeneradores de los parques eólicos que llegan a medir 12 m o más, en aplicaciones industriales. No obstante, para ambos casos se

tienen casi las mismas partes que integran al sistema, a excepción de unas cuantas pequeñas modificaciones dependiendo de su tamaño, las cuales se ilustran en la Figura 5.



Figura 4.- Aerogenerador de eje horizontal de 3 palas.
Fuentes: aerogenerador.net

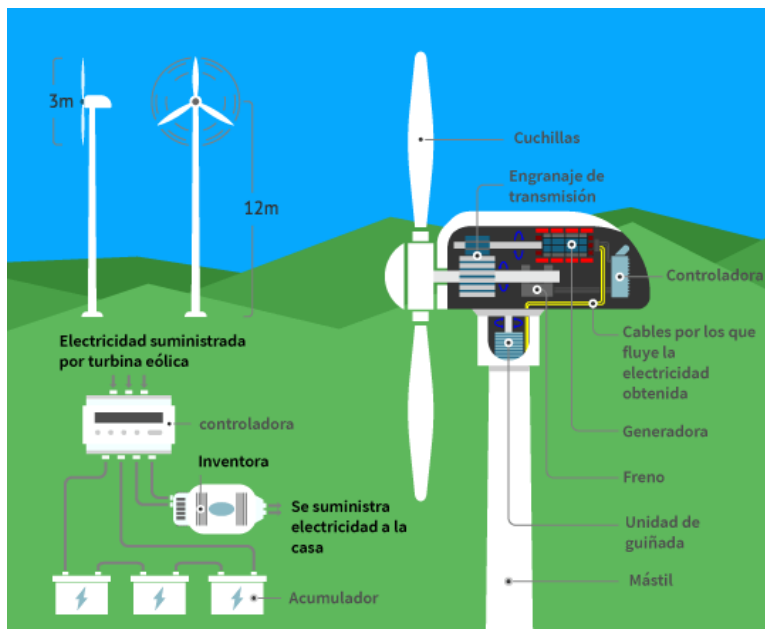


Figura 5.- Partes mecánicas y eléctricas de un aerogenerador.
Fuente: Medina. J. aprende.com.

De la Figura 5 podemos observar los siguientes elementos principales: las cuchillas o paletas que son las captadoras del viento, reduciendo su velocidad para el proceso de conversión de energía; los engranajes de transmisión, o caja multiplicadora, encargada de obtener las revoluciones por minuto requeridas por el generador; el generador, que está

encargado de llevar a cabo la conversión de energía mecánica a energía eléctrica; una unidad de frenado dinámico, encargada de evitar daños al sistema por exceso de velocidad del viento; una tarjeta controladora encargada de que la energía de salida sea la adecuada; el cableado de salida del sistema; el mástil del aerogenerador cuyo propósito es tener el sistema a una altura adecuada de captación del viento.

6.3 Energía cinética

Para entender cómo es y cómo se obtiene la energía que se aprovecha del aire tenemos que saber que es la energía cinética. Esta es la energía que posee un cuerpo a causa de su movimiento. Se trata de la capacidad o trabajo que permite que un objeto pase de estar en reposo a moverse a una determinada velocidad. Como podemos observar en la ecuación 1 se expresa el cálculo de la energía cinética, E_c .

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

Donde, m es la masa del objeto que posee la energía cinética y v es la velocidad a la que dicho objeto se desplaza.

La unidad que se utiliza al hablar de energía son los Joules, J , y podemos ver en la ecuación 2 de que unidades básicas depende.

$$J = kg * \frac{m^2}{s^2} \quad (2)$$

La energía cinética se encuentra, entre otras formas, en el viento y se puede aprovechar por medio de un dispositivo denominado aerogenerador, que de manera general se encarga de llevar a cabo un proceso de conversión cinética-mecánica-eléctrica, tal como se observa en la Figura 6. En este dispositivo una parte de la energía cinética de entrada del viento moverá las aspas del rotor disminuyendo la velocidad del viento que sale de este, esta energía será la que podemos convertir en energía eléctrica. (*J277: Representación de potencia y energía extraíble de viento en turbinas eólicas...* (2011, julio 2). Matlab/Simulink and Renewable Energy [Jorge Mírez]. <https://jmirez.wordpress.com/2011/07/02/j277-representacion-de-potencia-y-energia-extraible-de-viento-en-turbinas-eolicas/>).

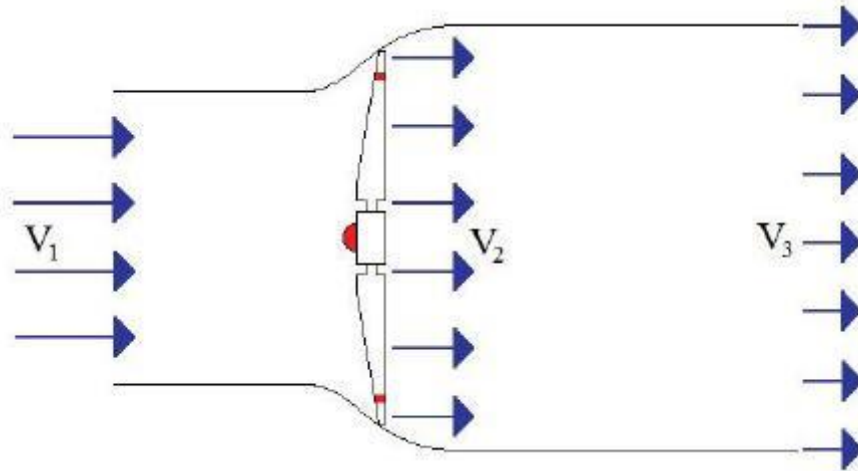


Figura 6.- Fórmula y representación gráfica de la energía extraíble de un aerogenerador.

Fuente: Mirez. J.L. 2011, jmirez.wordpress.com.

De la figura 6, podemos observar que el viento de entrada tiene velocidad inicial V_1 , este viento pasa por el generador moviendo las aspas y como consecuencia parte de la energía original se transforma reduciendo la velocidad a la salida inmediata del generador teniendo un valor de velocidad V_2 . Finalmente, la salida del viento lleva una energía mínima descrita por una reducción de su velocidad de salida como V_3 . Como se observa, la energía extraíble del viento, $E_{extraíble}$, se da por medio de la siguiente expresión (3).

$$E_{extraíble} = \frac{1}{2} m (V_1^2 - V_3^2) \quad (3)$$

Donde, m es la masa del viento, V_1 es la velocidad del viento a la entrada del aerogenerador y V_3 es la velocidad del viento a la salida del aerogenerador.

6.4 Ley de Betz

A pesar de que la energía pasa por procesos de conversión de una forma a otra, por ejemplo, de mecánica a eléctrica y viceversa, un aspecto a considerar es que no siempre es posible convertir el 100% de una forma de energía a otra de naturaleza distinta. Lo anterior significa que, aunque el viento tiene energía cinética asociada, no es posible convertir el 100% de la energía del viento a su equivalente 100% de energía eléctrica, ya que si a la salida del aerogenerador la velocidad del viento fuera de 0 m/s, entonces las aspas no girarían. Por lo tanto, una manera de determinar la cantidad de energía cinética que podemos extraer del aire es a través de la ley de Betz, la cual dice que sólo puede convertirse menos de la 16/27 parte (aproximadamente el 59.2592%) de la energía cinética

en energía mecánica usando un aerogenerador. Por ello, los aerogeneradores trabajan por debajo de ese valor de eficiencia y, como se ve en la Figura 7, la curvatura del comportamiento del aerogenerador de 3 palas es el que más se acerca a dicho valor, acercándose a un nivel aproximado de $C_p=0.5$, seguido por el aerogenerador de 2 palas con un valor de $C_p=0.45$.

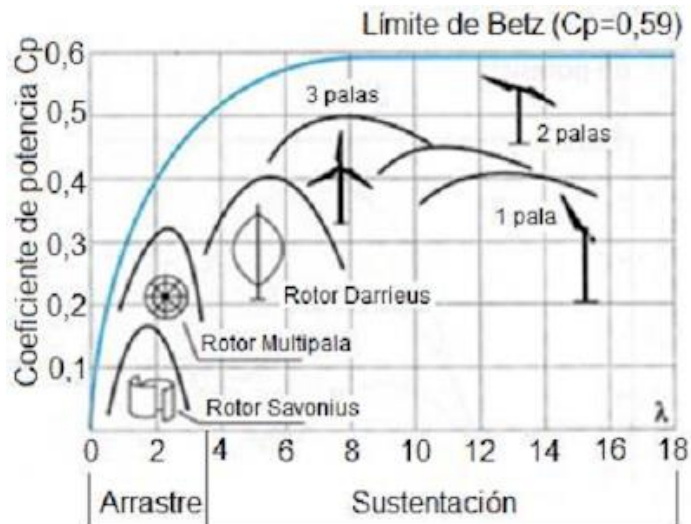


Figura 7.- Gráfica ley de Betz.
Fuente: Hidrolate, 2016, hidrolate.wordpress.com

Si se intenta extraer toda la energía del viento, el aire saldría con una velocidad nula, es decir, el aire no podría abandonar la turbina. En ese caso no se extraería ninguna energía en absoluto, ya que obviamente también se impediría la entrada de aire al rotor del aerogenerador. (*Demostración de la ley de Betz.* (s/f). de <http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/stat/betzpro.htm>).

6.5 Potencia de un aerogenerador

Los aerogeneradores convierten la energía cinética del viento mediante sus aspas en energía mecánica y esa energía mecánica mediante un generador eléctrico se convierte en energía eléctrica. Para obtener la potencia que está dando el viento al aerogenerador, P , se utiliza la ecuación (4) medida en watts.

$$P = \frac{1}{2} \rho * A * V^3 \tag{4}$$

Donde, ρ representa el valor de la densidad del aire; A es el valor del área de la columna de aire que entra al aerogenerador; y V es el valor de la velocidad del aire. Así mismo, la unidad de la potencia está dada en Watts de acuerdo con la expresión en 5.

La Figura 8 es un claro ejemplo de la relación existente entre el viento que llega a cierta velocidad a un aerogenerador y la potencia generada por este. Como se puede observar, en este ejemplo, la densidad del aire es de $1,225 \text{ kg/m}^3$ y el diámetro supuesto de las palas es de 62m. De la línea que representa la potencia real se nota que a partir de cierta velocidad del viento (unos 13 m/s aproximadamente) se llega a la potencia nominal del sistema. Probablemente esto se deba a las limitaciones físicas del hardware del aerogenerador.

$$\frac{J}{s} = W \text{ (watts)} \quad (5)$$

Donde J es el valor de la energía en Joules y s es el tiempo en segundo.



Figura 8.- Relación velocidad del viento - Potencia eléctrica de un aerogenerador.
 Fuente: Munguia. I, 2009, www.xatakaciencia.com.

La velocidad del viento será el dato que se usará para calcular la potencia de entrada, y por medio de sensores de corriente y de voltaje se determinará la potencia de salida del

aerogenerador. Estos datos serán importantes ya que permitirán identificar una relación cuando el sistema mecánico de sujeción de un aerogenerador presente vibraciones.

6.6 Densidad del aire

Para poder calcular la potencia que se puede obtener de un aerogenerador hay que tomar en cuenta la densidad del aire, la cual, como la presión del aire, disminuye al aumentar la altitud. También cambia con la variación de la presión atmosférica, la temperatura y la humedad, es decir, la densidad del aire depende de la ubicación geográfica.

De esta manera, para el estudio de la presente tesis se tomará como marco geográfico de referencia la ubicación donde el proyecto se llevará a cabo siendo San Juan del Río, en Querétaro, México. Por lo tanto, este lugar se encuentra a una altura promedio de 1800 m sobre el nivel del mar, por lo cual, tiene una presión de 80687 Pascales, característica que afecta la densidad del aire en esta zona. Teniendo en cuenta que la temperatura máxima promedio del mes más caluroso del año, que es mayo, desde el año 1980 al 2016, fue de 28 °C con una humedad relativa del 15% obtenemos que la densidad del aire fue de 0.931 kg/m³, para ese mismo rango de tiempo. (*Clima San Juan del Rio: Temperatura, Climograma y Tabla climática para San Juan del Rio - Climate-data.org.* (s/f). Climate-data.org. de <https://es.climate-data.org/americadelnorte/mexico/queretaro/san-juan-del-rio-28385/>).

6.7 Túnel de viento

Un túnel de viento es una herramienta de investigación utilizada para analizar el comportamiento del movimiento del aire alrededor de los objetos sólidos, como el ejemplo mostrado en la Figura 9. El túnel de viento consiste en una turbina que mueve el aire para que pase a través de una cámara de ensayos de manera controlada. La sección de prueba para utilizar un túnel de viento puede ser dentro de la misma cámara de ensayos o a la salida de esta.

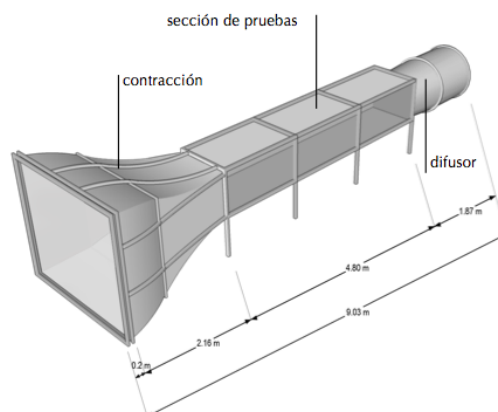


Figura 9.- Ejemplo de túnel de viento. Fuente: Fernandes. L, 2019, scielo.cl.

6.8 Potencia eléctrica

Para entender que es la potencia eléctrica hay que entender lo que es la energía, en el caso de la energía eléctrica nos referimos al desplazamiento de una carga (Q) entre dos puntos sometidos a una diferencia de potencial (V), entonces la energía eléctrica o trabajo eléctrico W sería:

$$W = Q * V \quad (6)$$

Como $Q = I * t$, siendo I la intensidad de corriente de un circuito y t el tiempo, tenemos que:

$$W = I * V * t \quad (7)$$

Sabiendo que la potencia es el trabajo desarrollado por unidad de tiempo, entonces la potencia P sería:

$$P = I * V \quad (8)$$

(Potencia eléctrica. (s/f). Ecured.cu. de https://www.ecured.cu/Potencia_el%C3%A9ctrica).

6.9 Eficiencia

En cualquier dispositivo que convierte energía hay una parte de la potencia que se pierde, es decir, que se convierte en otro tipo de energía, generalmente calor. Una maquina es eficiente cuando hay menos potencia perdida a la hora de convertir la energía, por lo que la relación de potencia de entrada y la potencia de salida da el valor de la eficiencia, η , del dispositivo.

$$\eta = \frac{P_{salida}}{P_{entrada}} * 100\% \quad (9)$$

6.10 Eficiencia del generador eólico

La potencia con la que un generador eólico convierte la energía del viento en energía eléctrica depende de la eficiencia aerodinámica del diseño de sus alabes, la eficiencia de las partes mecánicas que integran al mecanismo y la eficiencia que tiene el generador con sus elementos de electrónica de potencia. Esto quiere decir que, cada una de sus partes definen la eficiencia global del equipo, y esta decrece en tanto lo hace cada uno de sus elementos. Estas eficiencias se pueden ver representadas en la Figura 10, junto con la sección a la que se adjudica.

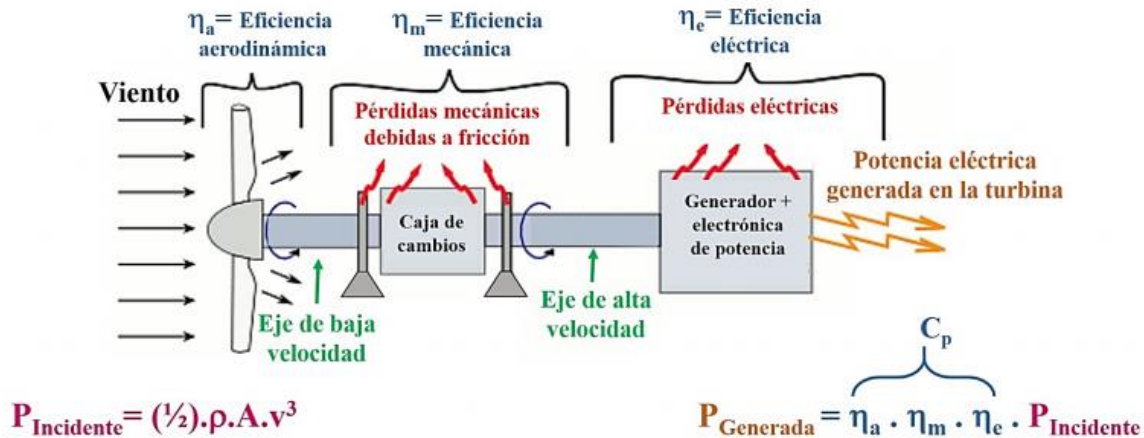


Figura 10.- Diagrama de las eficiencias que afectan a un aerogenerador.

Fuente: Martil. I, 2018, blogs.publico.es.

La eficiencia aerodinámica está completamente especificada por la ley de Betz que nos dice que solo la 16/27 parte, aproximadamente, de la energía del viento se convierte en energía eléctrica, pero en la práctica también afectan otras cuestiones como los perfiles alares. Esta eficiencia, vista desde un punto de vista más práctico, está alrededor del 45%. Y como podemos observar de la figura involucra la primera etapa del proceso de conversión de energía, de cinética del viento a mecánica del generador, por medio de la transmisión de la fuerza del viento al eje de baja velocidad.

La eficiencia mecánica depende principalmente de la fricción de los ejes y de los engranajes de la caja de cambios, esta eficiencia es de alrededor del 95% en los mejores casos, normalmente es más baja. Básicamente, esta parte del proceso de conversión de energía es la relación de la caja multiplicadora, encargada de convertir un movimiento de baja velocidad con alto torque (entrada del viento a las palas) en un movimiento rotativo más rápido, pero con menor torque.

La eficiencia eléctrica está dada por la conversión de energía mecánica y por la electrónica de potencia, esta eficiencia se encuentra alrededor del 95% también en el mejor de los casos, y por lo regular es más baja. Esta es la última parte del proceso de conversión de energía y la salida es el tipo de energía útil que puede ser usada por otros dispositivos eléctricos.

6.11 Vibraciones

Un fenómeno que se puede presentar en todos los sistemas mecánicos, debido al movimiento y fricción entre las partes, son las vibraciones, las cuales se definen de la siguiente manera:

“Movimiento oscilatorio de un cuerpo provocado por la oscilación de las partículas que lo forman, respecto a una posición de equilibrio.” (*Vibraciones: Introducción a las vibraciones. Clasificación.* (s/f). Uco.es. de <http://www.uco.es/RiesgosLaborales/fisicoyquimico/vibraciones/tutorials/view/4-Introduccion-a-las-vibraciones-Clasificacion>)

Las vibraciones pueden ser representadas en el dominio del tiempo, pero para su mejor entendimiento se representan en el dominio de la frecuencia donde se pueden apreciar sus componentes espectrales y determinar ciertos fenómenos asociados a la frecuencia a la cual se presentan.

Las vibraciones pueden tener distintas características dependiendo de su origen:

- Periódicas: las cuales tienen un patrón repetitivo, por ejemplo, pueden ser causadas por un sistema de engranajes.
- No periódicas: las cuales no tienen un patrón determinado y tienden a ser erráticas, por ejemplo, pueden ser causadas por el ruido de una multitud.
- Transitorias: cuya amplitud baja periódicamente, por ejemplo, pueden ser causadas por un golpe.

Debido a sus características, las vibraciones pueden ser medidas y, estas a su vez, pueden brindar información del sistema en el que se presentan. Debido a lo anterior, las vibraciones son parámetros que se tomarán en cuenta en la presente tesis, ya que el sistema que se analizará es un aerogenerador montado en una base. Como el generador estará sujeto al viento incidente se van a presentar vibraciones de forma natural e inherentes al sistema, por ello se pretende encontrar una relación entre dichas vibraciones y la capacidad de conversión del aerogenerador y así determinar si impactan en su eficiencia más allá de las eficiencias analizadas anteriormente.

6.12 Sistemas de adquisición de datos

Una manera que existe para obtener los valores de alguna variable física y convertirla en información útil de manera digital son los sistemas de adquisición de datos. Los sistemas de adquisición de datos, abreviados comúnmente por las siglas del idioma inglés “DAS” (Data Acquisition System) o “DAQ” (Data Acquisition), normalmente convierten las formas de onda analógicas en valores digitales para su posterior procesamiento. Entre los componentes principales de los sistemas de adquisición de datos destacan:

- 1) Sensores, para convertir los parámetros físicos en señales eléctricas;
- 2) Circuitos de acondicionamiento de señal, para convertir las señales del sensor en una forma capaz de convertirse en valores digitales;
- 3) Convertidores analógicos-digitales, encargados de convertir las señales de los sensores acondicionados en valores digitales.

Por ejemplo, se puede observar en la Figura 11 un diagrama a bloques de un DAS típico. El procedimiento es el siguiente: a partir del proceso físico se considera la magnitud a medir, esto es tomar una señal física; esta magnitud es detectada por el elemento sensor, quien se encarga de tomar la energía del medio donde está inmerso para convertirla en una señal proporcional al fenómeno que se detecta; en ocasiones la señal que el sensor proporciona está contaminada con ruido u otras componentes y se requiere de un filtrado de la señal; una vez que esté más limpia esta señal es cuantificada y codificada a digital por medio de un convertidor analógico-digital (ADC); finalmente, esta señal es procesada dentro de la computadora.

Asimismo, hay paquetes de software de código abierto que proporcionan todas las herramientas necesarias para adquirir datos desde diferentes equipos de hardware. Estas herramientas provienen de las comunidades científicas donde las experimentaciones complejas requieren del respaldo de un software rápido, flexible y adaptable. Dichos paquetes suelen ser de ajuste personalizado y se usan en varios experimentos de física de todo el mundo.

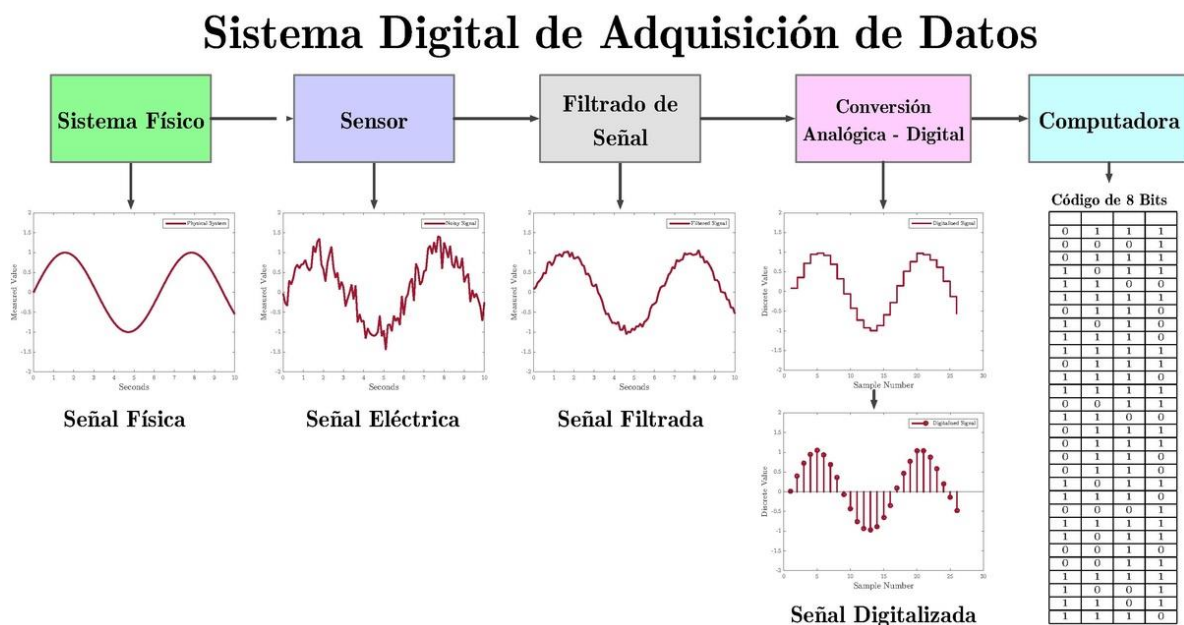


Figura 11.- Diagrama de un DAQ.
Fuente: Enrique Z.L., 2016, commons.wikimedia.org.

6.13 Tarjetas de procesamiento digital

Los dispositivos que se suelen utilizar para obtener las señales analógicas y convertirlas en señales digitales, ya que tienen un ADC integrado, son las tarjetas de adquisición de datos DAQ (hardware). Dichas tarjetas, actúan como la interfaz entre una computadora y las señales físicas, es decir, la información recaudada por el sensor en el entorno analógico pasa por el DAQ y se envía al dispositivo digital (microcontrolador, computadora, controlador, etc.). Por su parte, el sistema digital se encarga de transformar la señal

cuantificada y codificada del mundo real a los códigos digitales, como si se tratara de un intérprete que traduce de un lenguaje a otro, con el fin de que el sistema digital (es decir, cualquier computadora o dispositivo electrónico) sea capaz de comprender los signos del analógico.

Las tarjetas de adquisición de datos consisten en tres partes principales: por un lado, está el circuito de acondicionamiento de señales, después está el convertidor analógico-digital y, finalmente, el bus del ordenador.

En el presente trabajo de tesis se planea usar una tarjeta de la plataforma comercial Arduino que consiste en la tarjeta de desarrollo “Arduino Nano”, tal como se ve en la Figura 12, debido a que usa un software libre, incorpora el convertidor analógico-digital, tiene sensores hechos específicamente para trabajar con dicha tarjeta, y es de fácil uso.

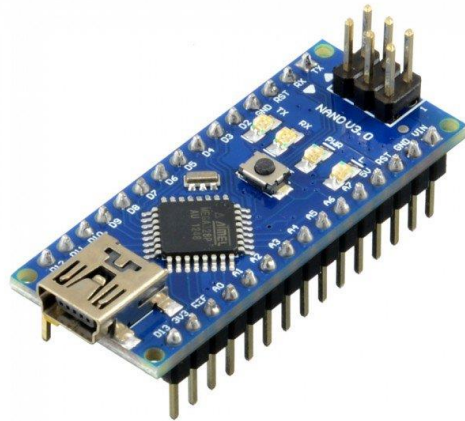


Figura 12.- Tarjeta Arduino nano.
Fuente: www.iberobotics.com.

La tarjeta Arduino Nano que opera a 16 MHz, se alimenta con un voltaje de operación de 5 volts, una memoria flash de 32 KB, una memoria SRAM de 2 KB, 22 pines para señales digitales y 8 pines para señales analógicas. Adicionalmente, debido a su tamaño compacto se vuelve idónea para ser conectada junto con el sensor de vibraciones sobre el aerogenerador y la información obtenida se transmite usando un cable directamente hacia la PC.

7.1 Objetivo General

Determinar la eficiencia de un generador eólico de baja potencia mediante la medición de la potencia de entrada y la potencia de salida ante diferentes niveles de vibración, para establecer si dichas vibraciones afectan el desempeño del generador.

7.2 Objetivos particulares

- 1 Construir una base que permita variar la rigidez de la sujeción entre el suelo y un aerogenerador de baja potencia para inducir vibraciones en el sistema.
- 2 Instalar un sistema de medición de variables ambientales con veleta y anemómetro para determinar las condiciones de viento bajo las cuales se llevan a cabo las pruebas.
- 3 Generar un banco experimental de cargas que serán conectadas al generador para analizar su funcionamiento ante diferentes niveles de generación.
- 4 Definir una matriz de experimentos considerando diferentes niveles de vibración, los cuales serán medidos con un acelerómetro colocado en el aerogenerador, y diferentes niveles de carga del generador para ser utilizadas en la etapa de experimentación.
- 5 Medir las variables de voltaje y corriente desempeñados por el aerogenerador en las diferentes configuraciones definidas en la matriz de experimentos para analizar su comportamiento.
- 6 Obtener la eficiencia desempeñada por el aerogenerador bajo los diferentes escenarios establecidos en la matriz de experimentos haciendo uso de las señales de voltaje y corriente, así como de las variables ambientales a fin de determinar el desempeño del proceso de generación.
- 7 Llevar a cabo una comparativa de las eficiencias calculadas y los diferentes niveles de vibraciones mediante el procesamiento de las señales para establecer cómo afecta el nivel de vibración en el proceso de generación de energía.

8 Metodología

En la Figura 13 se presenta el diagrama general a bloques de la metodología propuesta para llevar a cabo el análisis de la eficiencia de un generador eólico de baja potencia bajo diferentes niveles de vibración. Como se observa del diagrama son ocho etapas principales las que definen el método propuesto, que son: i) definición de metodología para cálculo de potencia; ii) medición de velocidades del túnel de viento; iii) desarrollo de estructura de soporte de aerogenerador; iv) montaje del aerogenerador; v) selección e integración de sensores de vibración; vi) definición del banco de cargas; vii) medición de señales; y viii) estimación de la eficiencia del aerogenerador.

Para el desarrollo de la experimentación se utilizó el túnel de viento de la Facultad de Ingeniería del Campus San Juan del Río, desarrollado previamente en proyectos que

abordan estudios de las tecnologías de aerogeneradores y que se encuentra en las instalaciones del Taller de Electromecánica del Campus, por lo que se tomó en cuenta para la realización de la base de sujeción del aerogenerador que se usó para la experimentación y adquisición de datos.

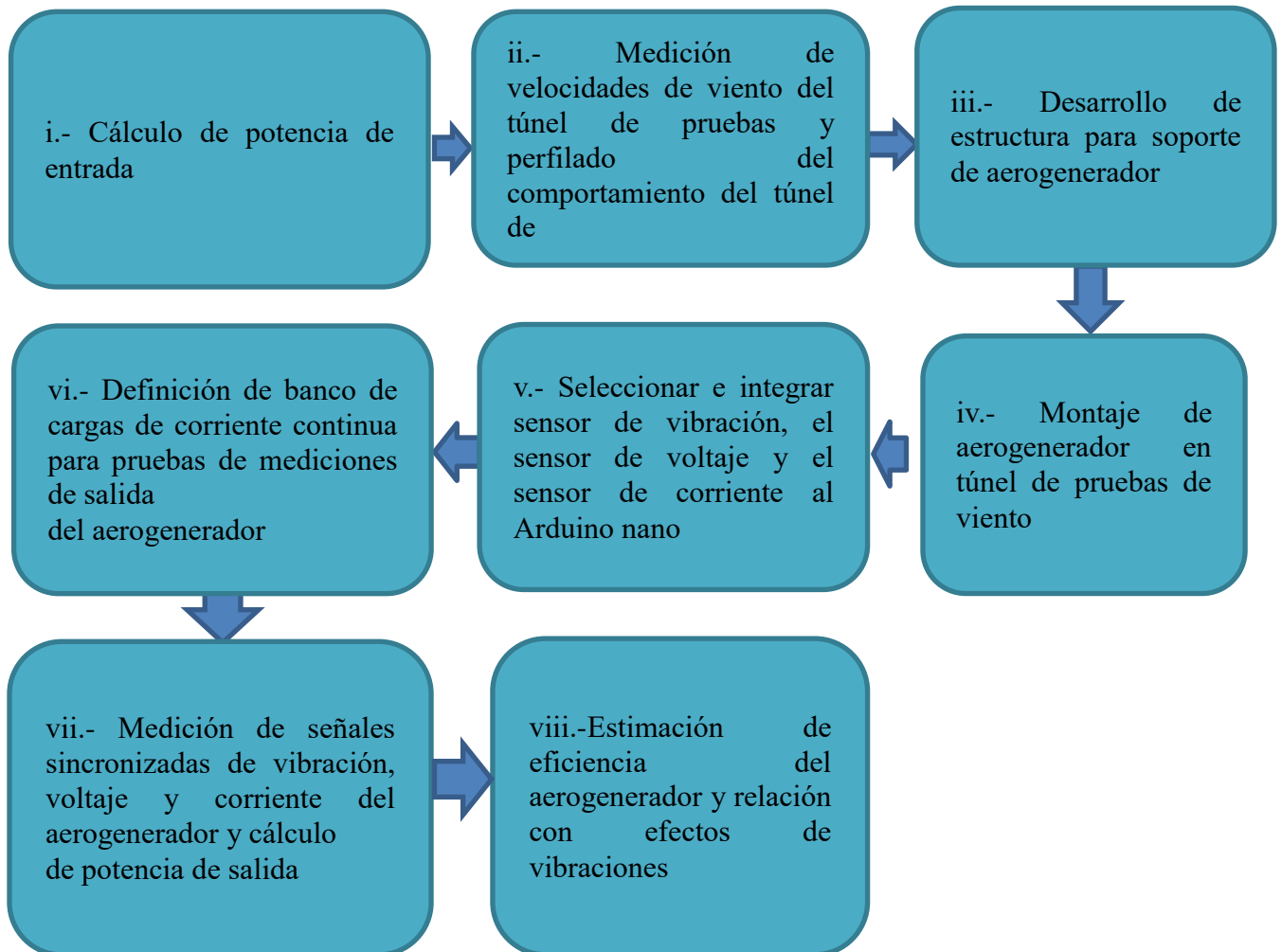


Figura 13. Diagrama de bloques de la metodología.

A continuación, se explica en detalle cada etapa (sub-bloque) de la metodología propuesta, considerando el orden y flujo en el que son presentados en el diagrama.

i.- Cálculo de la potencia de entrada

Para realizar un banco de experimentación controlado se utilizó el túnel de viento que se encuentra en los laboratorios de la UAQ en la Facultad de Ingeniería campus San Juan del Río, el cual puede proporcionar distintas velocidades de viento ya que el motor con el que se mueve la turbina cuenta con un variador de frecuencia.

Para calcular la entrada de la potencia se utilizó la expresión en (4) vista en el apartado 5.5, considerando el valor de la densidad del aire para la ubicación geográfica de San Juan del Río mencionada en el apartado 5.6, así que, lo único necesario a determinar fue la velocidad del aire a la que se estuvo trabajando en el túnel de viento durante las experimentaciones.

ii.- Medición de velocidades de viento

Para obtener las velocidades de viento con las que se iba a trabajar se colocó un anemómetro digital en la salida del túnel de viento, el cual se sostenía con una varilla, sujeta a la orilla del túnel de viento, y una base, sujeta a la otra orilla de la varilla, localizada a una distancia de 10 cm desde la orilla derecha y centrado a una distancia de 72.5 cm desde ambas orillas, la superior y el inferior como está representado en la Figura 14. Debido a las características de la construcción del túnel se observó que el viento se concentra en las orillas de las paredes del túnel y no en el centro como se debería esperar. Lo cual trae como consecuencia que al colocar el anemómetro justo en el centro de la salida del túnel no se registrara medición significativa de la velocidad del viento, y esta es la razón por la cual se buscó de manera experimental la zona en la que el viento era percibido con mayor variación.

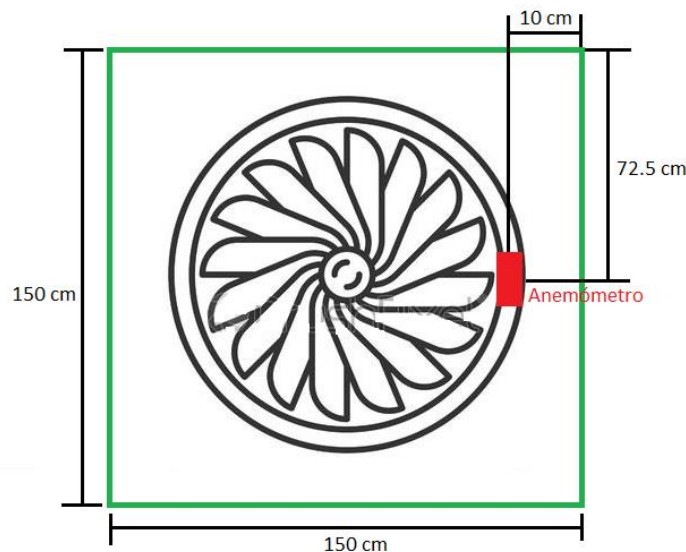


Figura 14.- Representación esquemática del túnel de viento y la ubicación del anemómetro digital.

Una vez colocado el anemómetro se realizaron mediciones cambiando la frecuencia en el variador que alimenta al motor que mueve la turbina del túnel. Se cambiaron las frecuencias a 10 hz, 20 hz, 30 hz, 40 hz, 50 hz y 60 hz, y se hicieron 40 mediciones en cada frecuencia. Esto fue para caracterizar el túnel de viento registrando las velocidades alcanzadas en metros por segundo (m/s) obtenidas con el anemómetro para cada una de las frecuencias correspondientes.

iii.- Estructura de soporte de aerogenerador

Para colocar el aerogenerador en la salida de aire del túnel de viento era necesario utilizar una base. Para esto, se planeó que fuera construida de manera que no se afectara el túnel de viento, así que se pensó en una base para poder sujetarla al túnel con prensas C y que dos partes de la base estuvieran sujetas mediante tornillos para controlar el nivel de la sujeción. La Figura 15 muestra el boceto de la base que se propuso realizar.

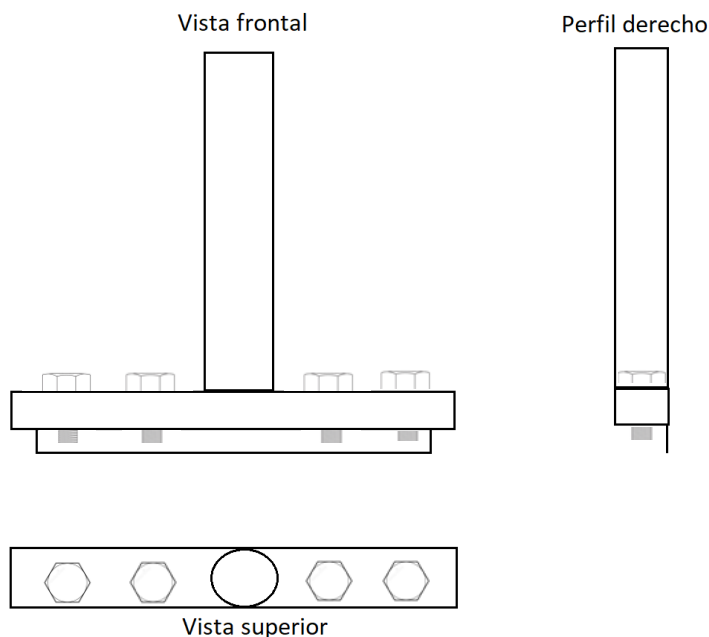


Figura 15.- Diseño de la base del aerogenerador.

Para su elaboración se usaron un tubo metálico de 62.5 cm de altura con 2 pulgadas de diámetro, un perfil rectangular de 1 in x 3 in de 30 cm de largo, un perfil angular de 3 in de lado y 42 cm de largo y 4 tornillos $\frac{1}{4}$ de in y de 2 in de largo con su juego de tuercas y rondanas de presión.

Las piezas se cortaron para poder encajar bien en el túnel de viento, se les limó la rebaba, se soldaron y se barrenó la base para la ubicación de los tornillos de sujeción que estaría sujeta al túnel de viento.

iv.- Montaje del aerogenerador en el túnel de viento

Para montar la base al túnel de viento se utilizaron 4 prensas C, de esta manera no se afecta la integridad del túnel de viento en su estructura original pero la base se mantendrá sujeta firmemente. Como en la base del aerogenerador de colocaron tornillos para sujetar 2 de sus piezas estos fueron para inducir vibraciones en el sistema, apretando o aflojándolos, de tal manera que mientras estén más apretados las vibraciones disminuían y mientras menos apretados estén las vibraciones aumentaban.

v.- Selección e integración de los sensores a utilizar

Para las mediciones se colocó la placa Arduino nano en la parte superior del aerogenerador (Humberto, 2020) junto con el acelerómetro, mientras que los sensores de voltaje y de corriente estarán a un metro de distancia colocados cerca de las cargas.

El acelerómetro que se usó para obtener las vibraciones fue el Accel 14 click de la marca Mikroe, el cual permite una selección de medición de escala en rangos de ± 2 g, ± 4 g, ± 8 g, ± 16 g en los 3 ejes, y es capaz de medir aceleraciones con un ancho de banda de hasta 6KHz con una salida de 26.7 kHz.

El sensor de voltaje a utilizar es el FZ0430, un sensor diseñado para trabajar con Arduino, capaz de medir hasta 25 volts con una resolución de 0.15 mV.

El sensor de corriente a utilizar es el ACS712, un sensor diseñado para trabajar con Arduino, capaz de medir hasta un máximo de 20 A y un mínimo de -20 A con una resolución de 49 mA.

De esta manera las 3 variables que se necesitan son medidas y enviadas al Arduino, tal como se muestra en el esquema de la Figura 16.

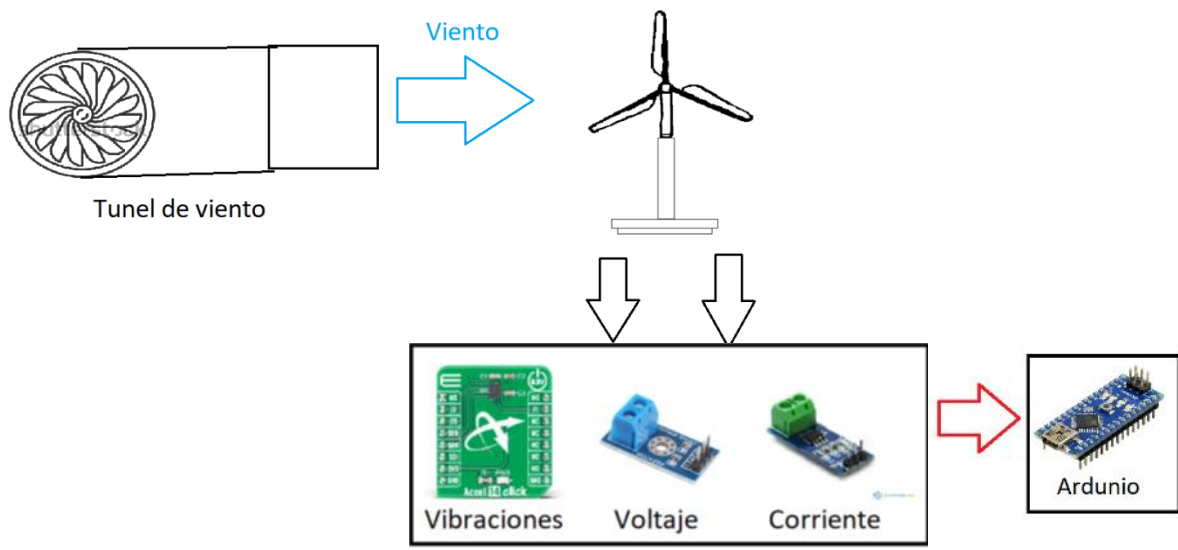


Figura 16.- Diagrama a bloques del montaje del sistema.

vi.- Definición de banco de cargas

Para el banco de cargas se utilizaron LEDs de potencia, que consumen hasta 7.5 Watts, colocados en paralelo. Se conectaron distintas cantidades de LEDs para poder encontrar la cantidad máxima que el aerogenerador puede alimentar con la mínima velocidad de viento que otorga el túnel de viento, una vez obtenido cual es el número máximo de LEDs que se pueden alimentar se harán los bancos de pruebas con distintas cantidades de LEDs. Para que las vibraciones no afectaran las conexiones de estos LEDs se fijaron a una base metálica similar a las bases de los alumbrados públicos y dicha base estaba en una mesa alejada de la base del aerogenerador.

vii.- Medición de las señales y cálculo de potencia de salida

Para la adquisición de los datos se utilizó un código escrito en Python que tomó los datos que está recibiendo la placa de Arduino nano y las guardará en un archivo de Excel, una vez en Excel se procesaran los datos para obtener la potencia utilizando la expresión en (8), mencionada en la sección 6.8, y para obtener las vibraciones se utilizó el programa de Matlab, usando un Script para que a la señal de las vibraciones obtenidas se le aplicara la transformada de Fourier y así obtener las componentes en frecuencia que más destacan en cada prueba.

viii.- Estimación de eficiencia del aerogenerador y relación con vibraciones

Al obtener las potencias de entrada y de salida, como se describen en el punto i y el punto vii, respectivamente, se obtiene la eficiencia en cada uno de los experimentos y se relacionan con las vibraciones al comparar cual es la eficiencia, obtenida con la fórmula 10 del apartado 6.9, en cada experimento y ver cuales vibraciones van aumentando o cambiando en relación con esta eficiencia.

9 Experimentación y resultados

Para saber la velocidad del viento del túnel con el que trabajamos, se colocó el anemómetro como se explica en el punto ii. Al momento de hacer las mediciones se encontró que el túnel de viento no tenía un flujo homogéneo en toda la salida, por ello se colocó el anemómetro en el punto indicado en vez del centro del túnel, justo como se ve en la Figura 17, ya que se encontró que en este punto se podía obtener la medición máxima del flujo de aire.



Figura 17. Anemómetro colocado

Como se explica en el punto ii se usó una prensa tipo C para sujetar la varilla que sostenía la base del anemómetro a una distancia de 10 cm de distancia desde el extremo derecho del túnel de viento, como se ve en la Figura 18 y como se representa en la Figura 14, de esta manera la integridad del túnel de viento no se ve afectada.



Figura 18.- Sujeción de la base del anemómetro al túnel de viento

De igual manera, como se menciona en el punto ii se realizaron las mediciones modificando en cada medición la velocidad del motor que se ve en la Figura 19. Se anotaron los datos de todas las mediciones necesarias, se guardaron los datos en un documento de Excel y se graficaron dichos datos.



Figura 19. Turbina del túnel de viento

El variador de frecuencia que se utilizó fue un variador de la marca Weg modelo CFW08 capaz de soportar potencias de 5 hp a 440 volts, el cual se muestra en la Figura 20, con el cual se obtuvieron 6 velocidades al aumentar la frecuencia en incrementos de 10hz hasta un máximo de 60 hz.



Figura 20. Variador de frecuencia utilizado

En la Tabla 1 se muestra un resumen de las frecuencias utilizadas, o programadas en el variador de frecuencia que alimenta el ventilador del túnel de viento. Con dicho variador logramos que se obtengan distintos niveles de ráfagas de viento y sus respectivas velocidades, se trata de velocidades promedio para un ejercicio de 10 pruebas por frecuencia.

Frecuencia del variador (hz)	0	10	20	30	40	50	60
Velocidad medida (m/s)	0	0.4575	1.1437	1.6337	2.0862	2.5062	2.905

Tabla 1. Promedios de velocidades del túnel de viento

Los resultados de las mediciones se muestran en la Figura 21, donde se muestra la regresión lineal R, la cual, al estar más cerca del valor de 1, nos dice que los datos obtenidos se comportan de manera lineal. Con estos datos sabemos a qué velocidad estamos

trabajando en cada frecuencia y que al aumentar la frecuencia la velocidad resultante aumentará proporcionalmente.

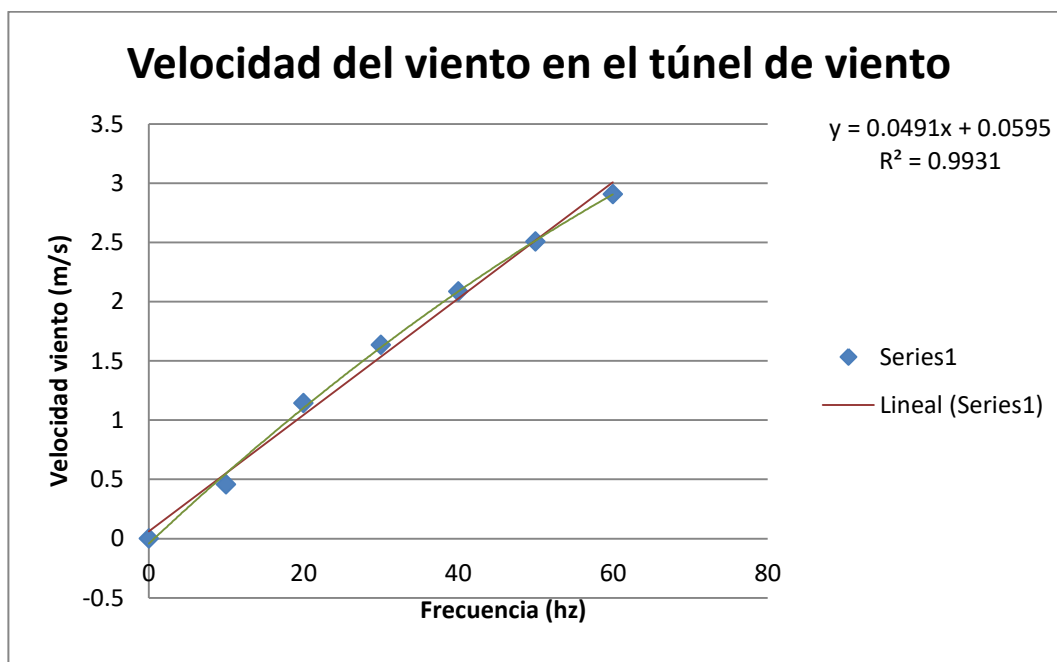


Figura 21. Grafica de la velocidad del túnel de viento

Se pudo observar a través de la ejecución de varios experimentos, después de probar el generador con distintas velocidades de la turbina del túnel de viento, que las frecuencias menores a 45 hz no lograban romper la inercia del generador eólico por la baja velocidad que alcanzaba el aire, por ello para los experimentos se usaron las frecuencias de 45 hz, 50 hz, 55 hz y 60 hz. Sabemos que la velocidad del viento que proporciona el aerogenerador se comporta linealmente respecto a la frecuencia, por lo tanto, se puede saber qué velocidad se tiene a los 45 hz, 50 hz, 55 hz y 60 hz usando la fórmula de $y = 0.0491x + 0.0595$ vista en la Figura 21. En la Tabla 2 podemos ver las velocidades obtenidas con esta expresión.

Frecuencia utilizada (hz)	45	50	55	60
Velocidad calculada (m/s)	2.2690	2.5145	2.7600	3.0055

Tabla 2.- Velocidades utilizadas para los experimentos finales

Conociendo los datos de la velocidad del viento se puede obtener la potencia de entrada que nos está dando el túnel de viento usando la expresión en (4) en la sección 6.5.

Velocidad de entrada (m/s)	2.2690	2.5145	2.7600	3.0055
Potencia calculada (W)	7.3700	10.0300	13.2637	17.1273

Tabla 3.- Potencias de entrada calculadas

Para la manufacturación de la base del aerogenerador se realizó el procedimiento del punto 3. A continuación, se muestran los pasos del proceso y los resultados obtenidos. Se cortaron las piezas metálicas mencionadas utilizando la sierra circular que se encuentra en el taller de soldadura y se eliminó la rebaba con un esmeril como se muestra en la Figura 22.



Figura 22. Corte y eliminación de rebaba de las piezas

Para asegurar que las piezas estén perpendiculares se utilizó una escuadra y regla, como se ve en la Figura 23, así se evita que haya algún desfase o alguna irregularidad en la fase.



Figura 23.- Posicionamiento de las piezas de la base

Una vez que las piezas están centradas y perpendiculares se soldaron el perfil rectangular junto con el perfil circular con micro alambre. El resultado es el observado en la Figura 24.



Figura 24. Piezas soldadas

Para el tema de modificar la sujeción se planeó en colocar 4 tornillos en las piezas que se ven en la Figura 25, para lo cual era necesario realizar los barrenos que atravesaran ambas piezas.



Figura 25. Piezas a barrenar

Para unir la base con perfil rectangular con la pieza de perfil angular se hicieron 4 barrenados a las piezas para poder poner 4 tornillos, 2 a la izquierda y 2 a la derecha, estos tornillos son los que servirán para cambiar la sujeción más adelante. Para hacer los barrenos se utilizó el taladro de banco del taller, la figura 25 muestra una parte del proceso.



Figura 26.- Piezas barrenándose

Ya con los tornillos, las armellas y las tuercas se tiene la base terminada y lista para ser colocada en la estructura del aerogenerador, el resultado se ve en las Figuras 27 y 28.



Figura 27. Base terminada vista frontal



Figura 28. Base terminada recostada

Teniendo la base terminada se procedió a colocarla en el túnel de viento como se describe en el punto 4. La Figura 29 muestra el aerogenerador listo para realizar las mediciones, el cual es un generador de 3 palas, 400 W, 12 V, modelo FWS03/06-12/24, con un controlador de 12/24 VCD.



Figura 29.- Aerogenerador y base colocados en el túnel de viento

El aerogenerador en si otorga una salida de tres fases en corriente alterna, pero gracias al controlador al que se conecta se puede obtener una señal de corriente continua, con la cual los sensores pueden trabajar. Cabe mencionar que lo esperado es que el aerogenerador montado estará sujeto a los efectos del flujo de aire del túnel de viento, estos inducirán vibraciones en la estructura del generador, estas vibraciones serán controladas en amplitud por medio del ajuste de la sujeción de la base como ya se mencionó, y a su vez las vibraciones impactarán en la energía generada a la salida del controlador en forma de corriente continua.

Como se menciona en el punto vii se realizaron 3 códigos para obtener los datos y poder trabajar con ellos. La primera parte del código en Arduino busca obtener las variables de voltaje, corriente y vibraciones en los ejes X, Y, y Z. En las Figuras 30 y 31 se muestra el código utilizado en donde primero se hace la medición de las vibraciones, luego el voltaje y por último la corriente.

```
pruebasexcel$  
#include <SPI.h>  
// CS: pin 10  
// MOSI: pin 11  
// MISO: pin 12  
// SCK: pin 13  
const int CS = 10;  
const byte READ = 0b10000000;  
  
void setup() {  
  Serial.begin(9600);  
  
  pinMode(5, OUTPUT);  
  
  SPI.begin();  
  pinMode(CS,OUTPUT);  
  SPI.beginTransaction(SPISettings(100000, MSBFIRST, SPI_MODE0));  
  digitalWrite(CS,HIGH);  
  //writeReg (0x0D,0x01); // Habilita interrupcion 1  
  writeReg (0x15,0x00); // 3-axis mode enable  
  writeReg (0x10,0xA0); // Enable accelerometer (ODR=26.66kHz,Fs=+/-2g)  
}  
  
void loop() {  
  
  unsigned int x_lbs = readReg (0x28,2); // LBS x axis  
  unsigned int x_mbs = readReg (0x29,2); // MBS x axis  
  
  unsigned int y_lbs = readReg (0x2A,2); // LBS y axis  
  unsigned int y_mbs = readReg (0x2B,2); // MBS y axis  
  
  unsigned int z_lbs = readReg (0x2C,2); // LBS z axis  
  unsigned int z_mbs = readReg (0x2D,2); // MBS z axis  
  
  int x_axis = (x_mbs<<8) | x_lbs;  
  double x_axis_fl=0;  
  
  if (x_axis > 32768)  
    x_axis = x_axis - 65535;  
  x_axis_fl = (x_axis*0.061)/1000;  
  
  int y_axis = (y_mbs<<8) | y_lbs;  
  double y_axis_fl=0;  
  
  if (y_axis > 32768)  
    y_axis = y_axis - 65535;  
  y_axis_fl = (y_axis*0.061)/1000;  
  int z_axis = (z_mbs<<8) | z_lbs;  
  double z_axis_fl=0;
```

Figura 30. Código de Arduino primera parte

```

pruebasexcel$
int z_axis = (z_mbs<<8) | z_lbs;
double z_axis_fl=0;

if (z_axis > 32768)
  z_axis = z_axis - 65535;
  z_axis_fl = (z_axis*0.061)/1000;

Serial.print(x_axis_fl);
  Serial.print(" ");
Serial.print(y_axis_fl);
  Serial.print(" ");
Serial.print(z_axis_fl);
  Serial.print(" ");
//////////Voltage//////////

float voltaje = analogRead(A5);
Serial.print(voltaje);
  Serial.print(" ");

//////////Corriente//////////

float I= analogRead(A2);
Serial.print(I);
  Serial.print(" ");
}

unsigned int readReg (byte reg, int bytesToRead){
  byte inByte = 0;
  unsigned int result = 0;
  digitalWrite(CS,LOW);
  SPI.transfer(reg|READ);
  bytesToRead--;
  if (bytesToRead > 0) {
    result = result << 8;
    inByte = SPI.transfer(0x00);
    result = result | inByte;
    bytesToRead--;
  }
  digitalWrite(CS,HIGH);
  return result;
}

void writeReg (byte reg,byte val) {
  digitalWrite(CS,LOW);
  SPI.transfer(reg);
  SPI.transfer(val);
  digitalWrite(CS,HIGH);
}
}

```

Figura 31.- Código en Arduino segunda parte

Una vez que el código de Arduino entrega los datos necesarios se realizó un código en Python para que estos datos se guarden en Excel y así fuera más fácil trabajar con los datos de los sensores. Se optó por usar Python ya que tiene una librería fácil de utilizar para la comunicación entre el puerto conectado al Arduino que está recibiendo los datos con el programa de Excel. Se puede ver el código utilizado en las Figuras 32, 33 y 34.

```
Turbina > serialToExcel-master > serialToExcel-master > serialToExcel.py > ...
1  import serial
2  import xlwt
3  from datetime import datetime
4
5  class SerialToExcel:
6
7      def __init__(self,port,speed):
8
9          self.port = port
10         self.speed = speed
11
12         self.wb = xlwt.Workbook()
13         self.ws = self.wb.add_sheet("Data from Serial",cell_overwrite_ok=True)
14         self.ws.write(0, 0, "Data from Serial")
15         self.columns = ["Date Time"]
16         self.number = 100
17
18
19     def setColumns(self,col):
20         self.columns.extend(col)
21
22     def setRecordsNumber(self,number):
23         self.number = number
24
25     def readPort(self):
26         ser = serial.Serial(self.port, self.speed, timeout=1)
27         c = 0
28         for col in self.columns:
29             self.ws.write(1, c, col)
30             c = c + 1
31         self.fila = 4
32
33         i = 0
34         while(i<self.number):
35             line = str(ser.readline())
36             if(len(line) > 0):
```

Figura 32.- Código de Python a)

```

25     def readPort(self):
26         ser = serial.Serial(self.port, self.speed, timeout=1)
27         c = 0
28         for col in self.columns:
29             self.ws.write(1, c, col)
30             c = c + 1
31         self.fila = 4
32
33         i = 0
34         while(i<self.number):
35             line = str(ser.readline())
36             if(len(line) > 0):
37                 now = datetime.now()
38                 date_time = now.strftime("%m/%d/%Y, %H:%M:%S")
39                 print(date_time,line)
40                 if(line.find(" ")):
41                     c = 1
42                     self.ws.write(self.fila, 0, date_time)
43                     columnas = line.split(" ")
44                     for col in columnas:
45                         self.ws.write(self.fila, c, col)
46                         c = c + 1
47
48                     i = i + 1
49                     self.fila = self.fila + 1
50
51     def writeFile(self,archivo):
52         self.wb.save(archivo)
53
54

```

Figura 32.- Código de Python b)

```

Turbina > serialToExcel-master > serialToExcel-master > example.py > ...
1  from serialToExcel import SerialToExcel
2
3  serialToExcel = SerialToExcel(["COM4",9600])
4
5  columnas = ["X","Y","Z","V","I"]
6
7  serialToExcel.setColumns(["X","Y","Z","Voltaje","Corriente"])
8  serialToExcel.setRecordsNumber(1000)
9  serialToExcel.readPort()
10
11 serialToExcel.writeFile("mar0.xls")

```

Figura 33.- Código de Python c)

Con este código de Python se obtenía una hoja de datos con los valores de voltaje y de corriente leído con los sensores, pero sin convertir a valor real por lo cual se realizaron las debidas conversiones y con esto se obtuvieron los datos de potencia de salida y así se podía obtener la eficiencia. En la Tabla 4 se pueden observar las mediciones del sensor y los valores calculados.

Fecha y hora	Vibraciones			Medicion sensor voltaje	Medicion sensor corriente	Corriente (A)	Voltaje (V)	Potencia (W)	Potencia promedio salida (W)	Potencia entrada (W)	Eficiencia (%)
	Eje X	Eje Y	Eje Z								
07/21/2021, 13:41:33	0.15	-0.14	1.03	362	506	0.383193704	8.67652981	3.324791599	3.922075041	15.64714397	25.06575671
07/21/2021, 13:41:33	0.13	-0.16	1.06	397	505	0.452865287	9.53185728	4.316647281			
07/21/2021, 13:41:33	0.12	-0.17	1.06	373	508	0.243850539	8.94534702	2.181327692			
07/21/2021, 13:41:33	0	-0.1	1.08	363	509	0.174178956	8.70096774	1.515525481			
07/21/2021, 13:41:33	0.06	-0.01	1.07	389	506	0.383193704	9.33635386	3.577632019			
07/21/2021, 13:41:33	-0.08	0.05	1.08	394	506	0.383193704	9.4585435	3.624454319			
07/21/2021, 13:41:33	-0.16	0.09	1.02	401	505	0.452865287	9.62960899	4.360915638			
07/21/2021, 13:41:33	0.12	-0.16	1.06	396	503	0.592208452	9.50741935	5.630374097			
07/21/2021, 13:41:33	-0.02	-0.15	1.08	392	505	0.452865287	9.40966764	4.261311836			
07/21/2021, 13:41:33	0.17	-0.22	1.05	380	504	0.522536869	9.11641251	4.763661653			
07/21/2021, 13:41:33	0.07	-0.13	1.06	357	508	0.243850539	8.55434018	2.085980463			
07/21/2021, 13:41:33	-0.01	-0.05	1.04	365	509	0.174178956	8.7498436	1.524038627			
07/21/2021, 13:41:33	-0.27	-0.08	1.07	373	508	0.243850539	8.94534702	2.181327692			
07/21/2021, 13:41:33	0.22	-0.16	1.01	387	505	0.452865287	9.28747801	4.20597639			
07/21/2021, 13:41:33	-0.28	-0.13	1.01	395	503	0.592208452	9.48298143	5.61590175			
07/21/2021, 13:41:33	0.17	-0.15	0.99	399	504	0.522536869	9.58073314	5.006286299			
07/21/2021, 13:41:33	0.23	-0.16	1.06	390	504	0.522536869	9.36079179	4.891358835			
07/21/2021, 13:41:33	0.02	-0.15	1.08	380	506	0.383193704	9.11641251	3.493351879			
07/21/2021, 13:41:33	0.02	-0.15	1.06	358	509	0.174178956	8.5787781	1.494242618			
07/21/2021, 13:41:33	-0.24	0	1	364	506	0.383193704	8.72540567	3.343520519			
07/21/2021, 13:41:33	0.15	0.07	1.04	396	501	0.731551617	9.50741935	6.955168002			
07/21/2021, 13:41:33	-0.2	0.03	0.99	397	504	0.522536869	9.53185728	4.980746863			
07/21/2021, 13:41:33	0.14	-0.09	1.06	397	505	0.452865287	9.53185728	4.316647281			
07/21/2021, 13:41:33	0.08	-0.17	1.03	380	506	0.383193704	9.11641251	3.493351879			
07/21/2021, 13:41:33	0.13	-0.15	1.08	360	509	0.174178956	8.62765396	1.502755763			
07/21/2021, 13:41:33	-0.01	-0.11	1.06	361	508	0.243850539	8.65209189	2.10981727			

Tabla 4.- Datos obtenidos de sensores

En el código de Matlab que se muestra en la Figura 35 se utilizó para obtener las frecuencias que más influyen en cada prueba mediante la transformada de Fourier.

```

1 - S = xlsread('mier214');
2 - Sx = S(:,1);
3 - Sy = S(:,2);
4 - Sz = S(:,3);
5
6
7 - Fs=30;
8 - T=1/Fs;
9 - L=277;
10 - t= (0:L)*T;
11
12 - subplot(1,3,1)
13 - plot(f,Plx)
14 - title('Eje X')
15 - xlabel('f (Hz)')
16 - ylabel('A (m/s^2)')
17
18 - Yx = fft(Sx);
19 - Plx = 2.*(abs(Yx(1:L/2+1)/L));
20 - f= Fs*(0:(L/2))/L;
21
22 - %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
23 - Yy = fft(Sy);
24 - P2y = abs(Yy/L);
25 - Ply = P2y(1:L/2+1);
26 - Ply(2:end-1) = 2*Ply(2:end-1);
27 - f= Fs*(0:(L/2))/L;
28

```

Figura 34.- Código de Matlab para el análisis de Fourier

En la Figura 36 se muestra un ejemplo de las gráficas de las vibraciones que se obtuvieron de Matlab en el dominio del tiempo. Se presentan las gráficas en los ejes X, Y, y Z.

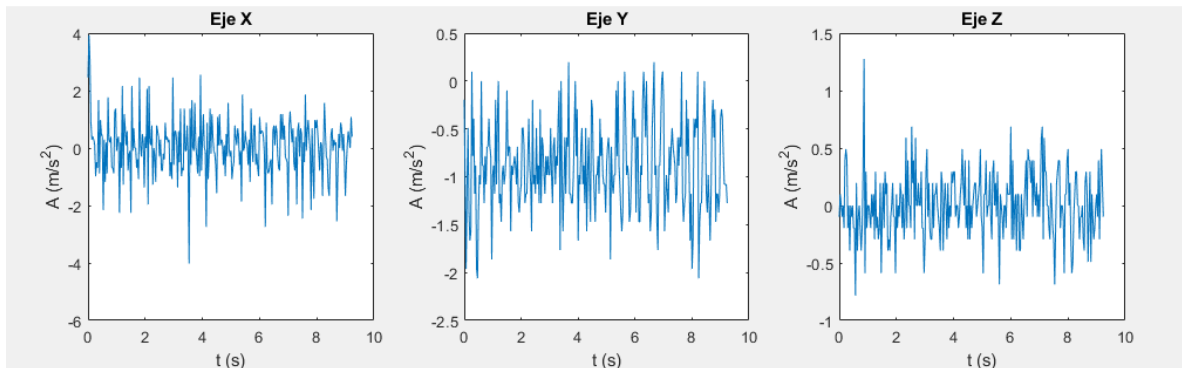


Figura 35. Vibraciones en el dominio del tiempo

En la Figura 37 se muestra un ejemplo de las gráficas de vibraciones que se obtuvieron de Matlab en el dominio de la frecuencia, ya después de ser aplicada la transformada de Fourier. Ya en el dominio de la frecuencia se pueden apreciar de mejor manera las componentes de aceleración en los tres ejes. En los casos del eje X y Z se pueden ver distintas frecuencias que sobresalen y los valores de amplitud que tienen, pero en el caso del eje Y se puede ver una componente cercana a la frecuencia 0 Hz, la cual pertenece a la aceleración de la gravedad que está siendo leída por el acelerómetro, que se descarta porque se sabe que no pertenece a ninguna vibración que se esté induciendo.

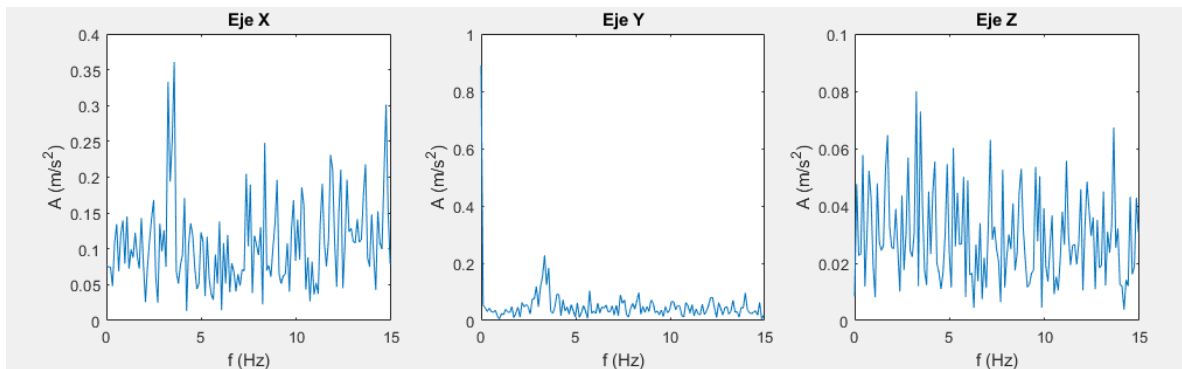


Figura 36. Vibraciones en el dominio de la frecuencia

Se hizo una comparación con los datos de la eficiencia y del número de vueltas que se aflojo cada tornillo de la base en distintas frecuencias-velocidades, la comparación de dichos datos se representan en la Tabla 5.

45 Hz – 2.2690 m/s				
Afloje	0 vuelta	1/4 vuelta	1/2 vuelta	1 vuelta
Eficiencia	12.0394142	8.07451038	3.59096675	3.18130284
50 Hz – 2.5145 m/s				
Afloje	0 vuelta	1/4 vuelta	1/2 vuelta	1 vuelta
Eficiencia	17.4093521	15.0442862	13.2944741	12.0233492
55 Hz – 2.7600 m/s				
Afloje	0 vuelta	1/4 vuelta	1/2 vuelta	1 vuelta
Eficiencia	21.6459312	20.2513231	19.5941447	18.1264565
60 Hz – 3.0055 m/s				
Afloje	0 vuelta	1/4 vuelta	1/2 vuelta	1 vuelta
Eficiencia	25.0657567	24.3018276	22.6457328	21.0431134

Tabla 5. Resultados de los experimentos

Como se puede observar hay una disminución de la eficiencia conforme se va aflojando la base, algo que se puede apreciar de mejor manera en las Figuras 38, 39, 40 y 41.

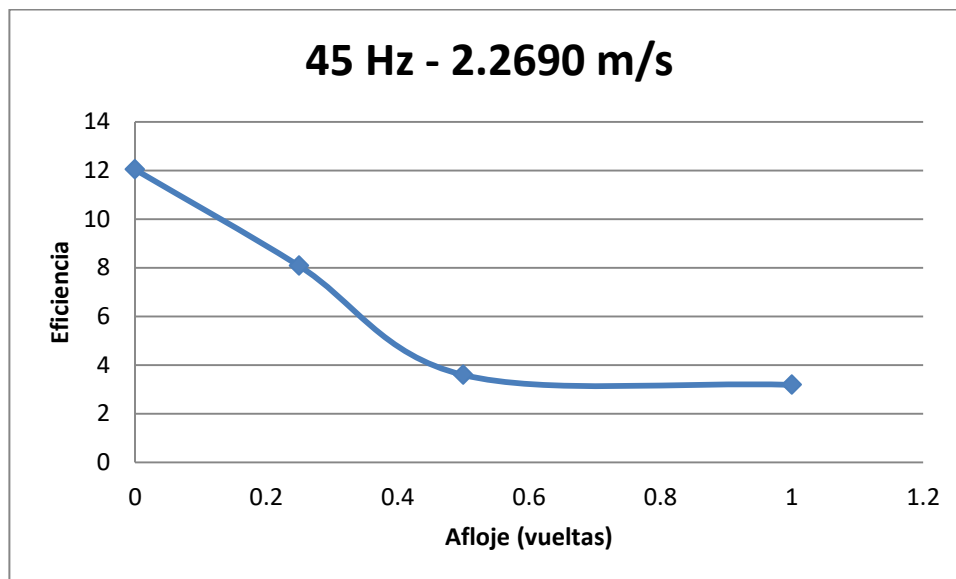


Figura 37. Gráfico eficiencia-afloje a 2.2690 m/s

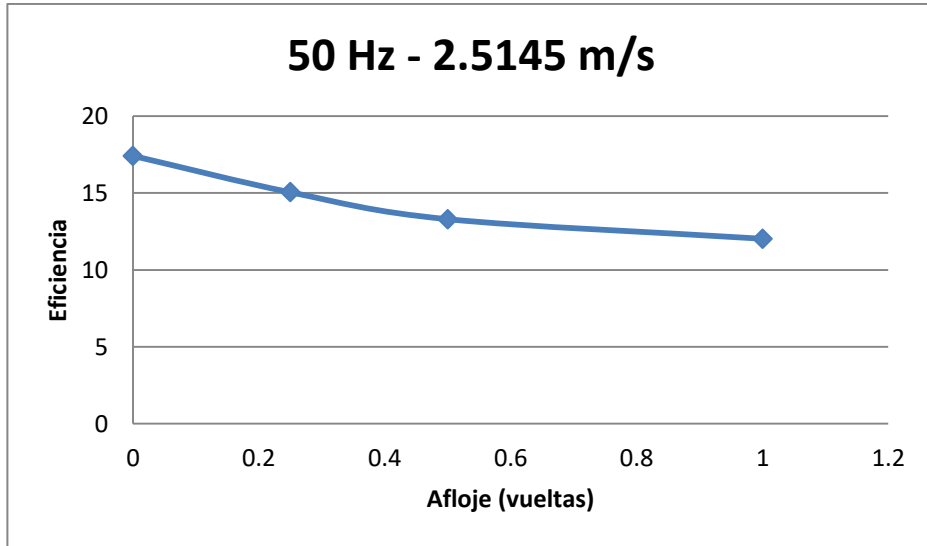


Figura 38. Gráfico eficiencia-afloje a 2.5145 m/s

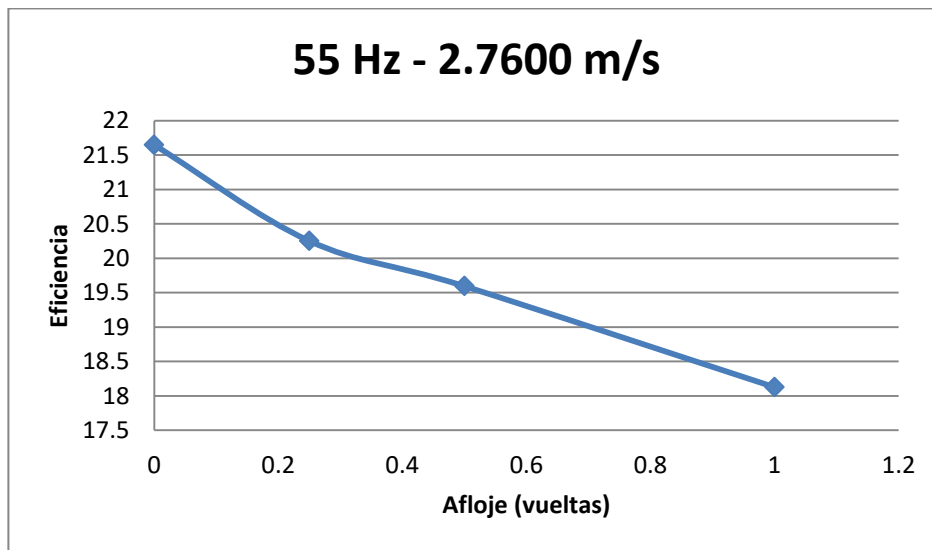


Figura 39. Gráfico eficiencia-afloje a 2.7600 m/s

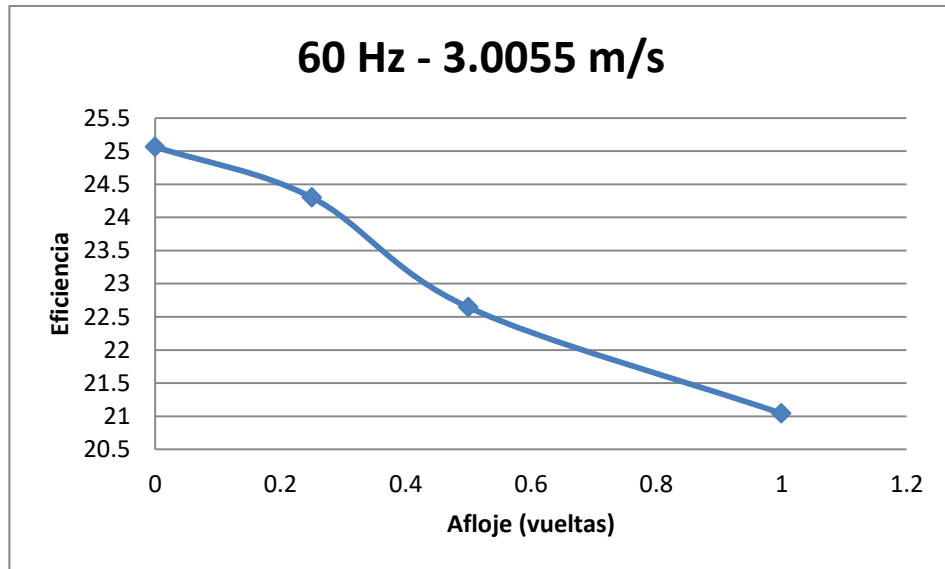


Ilustración 40 Gráfico eficiencia-afloje a 3.0055 m/s

Durante las pruebas mientras la velocidad aumentaba, cambiando la frecuencia a 45hz, 50hz, 55hz y 60hz, más brillantes se veían los LEDs a simple vista, pero a todas las velocidades los LEDs parpadeaban cuando el afloje estaba en $\frac{1}{2}$ vuelta y 1 vuelta, aun estando lejos de la base del aerogenerador y lejos de las mismas vibraciones, algo que disminuía con un afloje de $\frac{1}{4}$ de vuelta y con 0 vueltas, es decir completamente apretado, desaparecía y los LEDs tenían una iluminación constante y homogénea.

Se buscaron cuáles eran las frecuencias que aumentaban conforme el número de vueltas lo hacían y se encontraron que para cada uno de los ejes ciertas frecuencias las cuales se copilaron en la Tabla 6.

Eje X				
	0 vuelta	1/4 vuelta	1/2 vuelta	1 vuelta
13 Hz	0.02410317	0.03221349	0.03342571	0.10930018
Eje Y				
	0 vuelta	1/4 vuelta	1/2 vuelta	1 vuelta
7.5 Hz	0.0210657	0.05113237	0.05439969	0.09155408
8.5 Hz	0.00574542	0.0101354	0.06456785	0.06530036

Eje Z				
	0 vuelta	1/4 vuelta	1/2 vuelta	1 vuelta
0.75 Hz	0.01772873	0.02898806	0.04815337	0.05224031
13 Hz	0.02108277	0.02401655	0.04100923	0.04501142

Tabla 6. Frecuencias destacables

Las frecuencias presentadas en la Tabla 6 tendían a aumentar conforme la sujeción disminuía. El resto de las frecuencias, en general, se mantenían constantes y con cambios mínimos. Hubo ciertos casos en los que las vibraciones en ciertas frecuencias se comportaban de manera errática, es decir, aumentaban y disminuían sin ninguna razón aparente.

10 Conclusiones

- Se logró cumplir con el objetivo general del proyecto, que en fue el determinar la eficiencia de un aerogenerador de baja potencia operando a diferentes niveles de vibración. Con esto se lograron obtener varias conclusiones, como el hecho de que el flujo de aire para este tipo de aerogeneradores debe alcanzar cierta velocidad para poder poner en marcha las palas del generador. Y aún después de esto la energía generada será muy baja dificultado el cálculo de la eficiencia.

- Al comparar los valores de los experimentos a diferentes velocidades se comprobó que mientras más se aflojaban los tornillos de la base más vibraciones se inducían y por tanto la eficiencia disminuía, siendo el caso más visible el de los experimentos a una velocidad del viento a 2.2690 m/s donde se pasó de tener una eficiencia de 12.039 % a 0 vueltas, es decir completamente apretado, a una eficiencia de 3.1813% cuando los tornillos se aflojaban 1 vuelta.

- Visiblemente se podía apreciar como la potencia disminuía al aumentar las vibraciones ya que, aunque las conexiones estaban fijas y encintadas correctamente y los LEDs estaban lejos de la base del aerogenerador que estaba vibrando, se observaba como los LEDs parpadeaban y este mismo parpadeo disminuía cuando las vibraciones disminuían, cuando los tornillos estaban apretados y la base bien fija.

- Se encontraron frecuencias en los ejes X, Y, y Z que aumentaban conforme se iba aflojando la base, las cuales podrían ser las frecuencias que afectan más este sistema específicamente, aunque es posible que el valor en conjunto de todas las vibraciones sea el que afecta el sistema y no solo las vibraciones.

- Se logró realizar un sistema para adquirir y almacenar los datos de frecuencia, voltaje y corriente otorgados por el aerogenerador para poder realizar el análisis sobre dichos datos.

- Entre los inconvenientes que surgieron durante la realización del proyecto estuvieron la potencia otorgada por el túnel de viento, por lo cual no pudimos aumentar el número de pruebas a distintas velocidades, y también la carga que podía ser alimentada por el aerogenerador, ya que si se aumentaba el número de LEDs estos no logran encender.

- Queda como prospectiva poder ahondar en aquellas limitaciones encontradas durante el desarrollo del proyecto, como trabajar con un túnel que permita controlar el tipo de flujo de aire que alimenta al aerogenerador, por ejemplo, flujo laminar o turbulento. También, alcanzar velocidades de viento más altas que permitan obtener la potencia nominal, o cercana a fin de tener una matriz de experimentos que permita colocar cargas más significativas. Finalmente, probar con la lectura de otras variables físicas, como corrientes y voltajes en niveles de AC, ya que el controlador influye también en la eficiencia general del sistema.

11 Referencias

- Isaza, C. A., C. Maigua, W. Quitiaquez, I. Simbaña, P. Quitiaquez & F. Toapanta. 2020. Diseño de un Sistema de Monitoreo de Vibraciones Mecánicas en Generadores Hidroeléctricos de Media Potencia.
- Tomas, M., S. Hashi, M. Santos & T. Elsaghir. 2018. Análisis de vibraciones en turbinas marinas.
- Soto, R. A. 2014. Conversión de energía eólica mediante vibraciones inducidas.
- Rangel, A. 2020. Detección de desbalance en aerogeneradores de baja potencia usando vibraciones y transformada de Fourier.
- Sánchez, J., A. Téllez, R. Escobar, G. Chávez & J. Gutiérrez. 2019. Sistema de análisis de vibraciones aplicado a la detección de fallas en aerogeneradores.
- Vargas, C. 2004. Análisis de Vibraciones en Cajas Multiplicadoras y Generadores, aplicados a fallas en rodamientos y engranajes.
- Cueva, L. 2015. Diseño y construcción de un generador eólico de eje vertical tipo Savonius para producir 20 watts.
- Menghini, M., A. Martínez, A. Scarabino & M. Actis. 2010. Determinación numérica y experimental del incremento en las frecuencias naturales de una pala de generador eólico debido a su rotación.
- Vera, P. & K. Andre. 2016. Prototipo generador de energía eléctrica por el uso de una bicicleta elíptica para la iluminación de un ambiente de deporte.
- Ortiz, A. & P. Parejo. 2002. Diseño y construcción de un prototipo que genera energía eléctrica a partir del fenómeno de resonancia.
- Guiérrez, K. 2017. Implementación de un sistema de diagnóstico por monitoreo de vibraciones en la caja multiplicadora y el generador para un procedimiento de toma de decisiones por redes neuronales para el aerogenerador g52/850 número 5 del Parque Eólico Los Santos.
- Garcia, S. E. 2015. Modelación y reducción de las vibraciones torsionales de una turbina eólica de eje vertical.
- Alvarez, G. & A. Mirasso. 2013. Análisis de reducción de vibraciones en torres mediante un sistema de control activo.
- Valeska, A., A. Gonzalez, J. Ferguson, J. Puga & V. Serrano. 2021. Generador eléctrico excitado por la vibración, como fuente de alimentación para sistema de monitoreo de puentes.
- Rivera, M. A. 2010. Diseño, Construcción y Calibración de un Generador de Vibraciones y su Aplicación en una Pasarela Peatonal.

- López, F. 2018. Análisis de vibraciones para la detección y diagnóstico de fallas en el generador de inducción doblemente alimentado (GIDA) para el diseño de aerogeneradores de velocidad variable.
- Graciano, D. M. 2020. DETERMINACIÓN DEL EFECTO DE LA ESTELA DE VÓRTICES EN LA OSCILACIÓN DE UN CONJUNTO DE GENERADORES EÓLICOS POR VORTICIDAD.
 - Isaías, R. 2014. Vibraciones mecánicas en sistemas de combustión interna.
 - Perdomo, A. A. & O. A. Ceron. 2008. Diseño de un banco de pruebas para la generación de vibraciones controladas en sillas de automóviles para la detección de ruidos parásitos BPDRP.
 - Camacho, D. A. & J. C. Rincon. 2016. Diseño y construcción de un prototipo captador de energía electromagnética de baja potencia a partir de vibraciones.
 - *Ley de Betz.* (2003). www.wikipower.org. <http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/stat/betzpro.htm>
 - *San Juan del Rio.* (2019, 10 junio). climate-data.org. <https://es.climate-data.org/america-del-norte/mexico/queretaro/san-juan-del-rio-28385/>
 - Mirez, J. L. (2011, 16 agosto). *J277: Representación de potencia y energía extraíble de viento en turbinas eólicas. . . . Matlab/Simulink and Renewable Energy* [Jorge Mírez]. <https://jmirez.wordpress.com/2011/07/02/j277-representacion-de-potencia-y-energia-extraible-de-viento-en-turbinas-eolicas/>
 - *Energía eólica: cómo funciona y sus ventajas.* (2021, 27 junio). factorenergia. <https://www.factorenergia.com/es/blog/eficiencia-energetica/energia-eolica/>
 - Aprende Institute. (2021, 23 julio). *Todo lo que debes saber sobre aerogeneradores.* <https://aprende.com/blog/oficios/energia-eolica/todo-lo-que-debes-saber-sobre-aerogeneradores/>
 - *Demostración de la ley de Betz.* (2003a, mayo 12). www.windpower.org. <http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/stat/betzpro.htm>

