



GOBIERNO DEL
ESTADO DE MÉXICO



TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE CHICOLOAPAN

Ingeniería en Energías Renovables

ESTUDIO DE UN SISTEMA DE RECOLECCIÓN DE ENERGÍA EÓLICA-
VIBRATORIA A TRAVÉS DE DISPOSITIVOS PIEZOELÉCTRICOS

Tesis profesional

Que para obtener el Grado de

Ingeniera en Energías Renovables

P R E S E N T A

Fatima Betsayda Alaniz Pérez

Frida Beyda Alaniz Pérez

Director: Dr. Daniel Hernández Rivera



Chicoloapan de Juárez, Estado de México a 9 de septiembre de 2024

Presentación y directorio de los asesores

El presente trabajo realizado bajo de la modalidad de Tesis profesional, titulado “Estudio de un sistema de recolección de energía eólica -vibratoria a través de dispositivos piezoeléctricos.” y que ha sido realizado por la alumna **Frida Beyda Alaniz Pérez y Fatima Betsayda Alaniz Pérez** con matrícula 19020020 y 19020037 ha sido aprobado al igual que aceptado como requisito para obtener el grado de **Licenciatura** en:

Ingeniería en Energías Renovables

Director:



Dr. Daniel Hernández Rivera

Revisor



Mtra. Brenda Beatriz Hernández Juárez

Revisor

Dr. Michael Jossue Rojas García

I. Agradecimientos

Con la importancia que tiene finalizar esta etapa de mi vida, con mucha alegría finalizo este camino con gusto por lo realizado, con aprendizaje y con experiencias vividas en el transcurso de esto. Tanto que he realizado ahora es momento de agradecer. Gracias a mis padres, José Antonio Alaniz Silva y María Beatriz Pérez Kennedy quienes con su inmenso cariño y apoyo incondicional me han alentado a seguir adelante en este camino. Gracias a mi hermana, por ser un soporte, acompañándome en una etapa más, trabajando juntas para el crecimiento profesional y personal. Gracias al apoyo de mis abuelos que me impulsaron a seguir adelante, con el desarrollo de este trabajo, al igual que me brindaron su apoyo incondicional para culminar esta etapa y mejorar cada vez más. Agradezco al Dr. Daniel Hernández Rivera por su disposición, su confianza y su asistencia que ha depositado en el desarrollo de este trabajo, por asesoramiento y paciencia durante esta etapa. Gracias a mi novio por el apoyo que me dio y me acompañó en los momentos importantes y con su apoyo puedo seguir adelante para mejorar profesionalmente. Gracias a mis amigos y compañeros que fueron parte de esta etapa y me acompañaron e impulsaron a seguir adelante manteniéndose alegres por mis logros y confortarme en las adversidades. Gracias al Tecnológico de Estudios Superiores de Chicoloapan, a todas y todos sus integrantes por lo largo de mi estadía me han enseñado el significado de comunidad y compañerismo. Haciendo que la experiencia universitaria una de las mejores etapas de mi vida, así como proveerme de herramientas y conocimiento que me permitirán realizar mejores beneficios a la sociedad.

Quiero expresar mi agradecimiento con gran importancia con el que tiene finalizar esta etapa de mi vida, con mucha alegría finalizo este camino con gusto por lo realizado, con aprendizaje y con experiencias vividas en el transcurso de esto. Tanto que he realizado ahora es momento de agradecer. Gracias a mis padres, José Antonio Alaniz Silva y María Beatriz Pérez Kennedy quienes con su inmenso cariño y apoyo incondicional me han alentado a seguir adelante en este camino y ayudándome a creer en mis capacidades de poder lograr todas las metas que me he planteado. Gracias a mi hermana, por ser un soporte, acompañándome en una etapa más, trabajando juntas para el crecimiento profesional y persona, así como su apoyo incondicional en cada momento difícil. Gracias al apoyo de mis abuelos que me impulsaron a seguir adelante, con el desarrollo de este trabajo, al igual que me brindaron su apoyo incondicional para culminar esta etapa y mejorar cada vez más. Agradezco al Dr. Daniel Hernández Rivera por su disposición, su confianza y su asistencia que ha depositado en el desarrollo de este trabajo, por asesoramiento y paciencia durante esta etapa. Gracias a mis amigos y compañeros que fueron parte de esta etapa y me acompañaron e impulsaron a seguir adelante manteniéndose alegres por mis logros y confortarme en las adversidades. Gracias al Tecnológico de Estudios Superiores de Chicoloapan, a todas y todos sus integrantes por lo largo de mi estadía me han enseñado el significado de comunidad y compañerismo. Haciendo que la experiencia universitaria una de las mejores etapas de mi vida, así como proveerme de herramientas y conocimiento que me permitirán realizar mejores beneficios a la sociedad.

II. Resumen

La transición energética consiste en el cambio del sector energético, que genere un mayor aprovechamiento de los combustibles y el uso de las energías renovables, con el fin de disminuir las emisiones de efecto invernadero. Las energías limpias se han convertido en una acción necesaria para mitigar la situación climática en la que se encuentra nuestro planeta. Con el desarrollo de tantos países se puede evaluar la participación de las energías renovables, como sería en un 24% de su generación de energía para el 2030. Estas tecnologías destacan la energía eólica como la segunda con mayor participación en el país, en México la energía eólica se ha desarrollado con tasas anuales de crecimiento desde el año de 1992 a enero de 2008, con un incremento del 30% su emisión, con el que se proporciona energía suficiente para satisfacer las necesidades de los hogares, obteniendo así un potencial eólico técnico y económicamente competitivo con 12 Mil MW para el año 2020; el alto volumen del potencial eólico indica que México es un país dotado con potencial para el uso de energía eólica. A medida que se ha desarrollado esta energía los costos han sido mayormente elevados por el incremento de los precios de materias primas, estos varían en función de la tecnología y tamaño de máquinas, afectando los costos de generación en el amplio margen de proyectos. Las energías mecánicas vibratorias se han mostrado como una fuente complementaria para el incremento de uso en zonas urbanas. El presente trabajo tiene como el objetivo de estudiar la producción de energía mediante las vibraciones presentes en puentes peatonales, en la que la intensidad de las vibraciones puede ser almacenada a través de materiales piezoeléctricos. La fase inicial del proyecto incluyó el análisis de las características vibratorias de diferentes zonas del puente peatonal. Con el cual nos permitió encontrar las zonas con mayor potencial para la generación. Relacionado con el potencial eólico registrado, empleando en ello un sistema conexión entre ambas técnicas, abarcando el uso de estos en zonas urbanas para el aprovechamiento de ambos teniendo una generación aprovechable del sistema híbrido.

III. Abstract

The energy transition consists of a change in the energy sector that generates a greater use of fuels and the use of renewable energies in order to reduce greenhouse gas emissions. Clean energies have become a necessary action to mitigate the climatic situation in which our planet finds itself. With the development of so many countries, it is possible to evaluate the participation of renewable energies, such as 24% of their energy generation by 2030. These technologies highlight wind energy as the second with the highest participation in the country, in Mexico wind energy has developed with annual growth rates from 1992 to January 2008, with a 30% increase in its emission, which provides enough energy to meet the needs of households, thus obtaining a technical and economically competitive wind potential with 12 thousand MW for the year 2020; the high volume of wind potential indicates that Mexico is a country endowed with potential for the use of wind energy. As this energy has been developed, costs have been mostly high due to the increase in raw material prices, which vary according to the technology and size of the machines, affecting the generation costs in the wide range of projects. Vibrating mechanical energies have been shown to be a complementary source for increased use in urban areas. The present work aims to study the production of energy through the vibrations present in pedestrian bridges, in which the intensity of the vibrations can be stored through piezoelectric materials. The initial phase of the project included the analysis of the vibrational characteristics of different areas of the pedestrian bridge. This allowed us to find the areas with the greatest potential for generation. Related to the registered wind potential, using a connection system between both techniques, covering the use of these in urban areas to take advantage of both having a usable generation of the hybrid system.

Contenido

I.	Agradecimientos.....	3
II.	Resumen	5
III.	Abstract.....	6
1.	Introducción.....	11
2.	Antecedentes.....	13
	2.1 Energías Renovables	13
	2.1.1 Energía Mecánica Vibratoria	16
	2.2 Aerogeneradores	16
	2.2.2 Aerogenerador sin palas	18
	2.3 Generación de electricidad a partir de energía eólica en México 19	
	2.3.2 Recolección de energía a partir de vibraciones utilizando materiales piezoeléctricos	20
	2.3.3 Recolección de energía para energías renovables a partir de vibraciones ambientales y ondas acústicas utilizando piezoelectricidad	20
	2.4 Energías híbridas	21
3	Marco teórico.....	24
	3.1 Energías Renovables	25
	3.2 Energías Limpias	26
	3.3 Energía Ambiental	27
	3.4 Valor de Pico	27
	3.5 Valor pico a pico	27

3.6 Aspectos técnicos de las características del viento	28
3.6.1 Principio de operación	28
3.6.2 Características del viento	28
3.6.3 El viento	29
3.6.4 Rosa de las rugosidades	30
3.5.5 Potencia generada	30
3.5.6 Curva de potencia	30
3.6 Densidad de potencia disponible del viento	31
3.7 Aerogeneradores	32
3.7.1 Dirección.	32
3.7.2 Componentes	33
3.7.3 Rotor	34
3.7.4 Palas o aspas del rotor	34
3.7.5 Multiplicador o caja de transmisión	35
3.7.6 Los tipos de cajas multiplicadoras son:	35
3.7.7 Flechas paralelas	35
3.7.8 Generador de baja velocidad nominal:	36
3.7.9 Generador	36
3.7.10 Eje Horizontal	36
3.7.11 Altura	37
3.7.12 Medición	38
3.7.13 Aerogenerador sin palas	39
3.7.14 Dimensionamiento de estructuras cilíndricas	40
3.7.15 Distribución de frecuencia de las velocidades del viento registradas durante un año	40

3.7.16	<i>Distribución de Weibull</i>	41
3.7.17	<i>Ley de Betz</i>	42
3.7.18	<i>Energy Harvesting (Cosecha de energía)</i>	44
3.7.19	<i>Sistemas de recolección de energía</i>	44
3.7.20	<i>Componentes Principales de un Circuito de Recolección de Energía</i>	45
3.7.21	<i>Aplicaciones de los Circuitos de Recolección de Energía</i>	46
3.7.22	<i>Desafíos y Soluciones Potenciales</i>	46
3.7.23	<i>Vibraciones mecánicas</i>	47
3.7.24	<i>Efecto piezoeléctrico</i>	48
3.7.25	<i>Clasificación de materiales piezoeléctricos</i>	48
4	Planteamiento del problema	50
5	Hipótesis	51
6	Objetivos	52
7	Metodología	53
7.1	<i>Pruebas de prototipo de aerogenerador y del sensor</i>	53
7.1.1	<i>Pruebas del sitio de estudio</i>	55
7.2	<i>Mediciones de prueba en laboratorio</i>	57
7.3	<i>Mediciones de prueba en sitio de estudio</i>	59
8	Resultados	67
8.1	<i>Gráficos obtenidos de las pruebas en laboratorio</i>	67
8.2	<i>Gráficos obtenidos de las pruebas en lugar de estudio</i>	72
8.3	<i>Gráficos de los puntos establecidos en el lugar de estudio</i>	77
8.4	<i>Gráfico del punto de estudio con mayor potencial eólico</i>	82
9	Conclusiones	84

10	Referencias	85
11	. Anexos	89

1. Introducción

Las energías renovables son un tipo de energía que proviene de fuentes naturales que son restablecidas más rápido de lo que son consumidas o que podría verse como inagotables a escala humana. Con esto se permite que el efecto perjudicial al medio ambiente sea menor con los otros tipos de energías. Las energías renovables generan menor cantidad de emisión de gases de efecto invernadero que los combustibles fósiles, dentro de los diferentes tipos de fuentes de energías renovables existe el tipo nombrado como energías limpias, las cuales tienen un impacto mínimo en el medio ambiente: La energía solar, la eólica y la hidráulica son de las principales fuentes de energía limpia que no generan de manera directa gases de efecto invernadero.

La energía eólica aprovecha la energía cinética del viento para la generación de energía eléctrica y ha mostrado un alto potencial para el abastecimiento de energía, sin embargo, su implementación presenta limitantes debido a sus dimensiones físicas y su principio de funcionamiento. El uso de palas de grandes dimensiones y la altura del mástil de los aerogeneradores ha dificultado su implementación ya que tiene impacto en el entorno Ambiental donde se instalan, teniendo amenazadas la conservación de algunas especies frente a este tipo de instalaciones, suponiendo que sería crítico, permanente e inasumible.

Los aerogeneradores basados en el fenómeno vibración inducida por vórtice (VIV) son una alternativa que se genera mediante una corriente de aire o de agua con una estructura al producirse el encuentro, la corriente tiene que rodear la estructura por ambos lados, sin embargo, este fenómeno no siempre ocurre simultáneamente: es muy frecuente que uno de los lados se retrase respecto al otro. El resultado es un patrón alternado de vórtices que al desprenderse de la estructura ejercen fuerzas a diferentes frecuencias que puede producir vibraciones sobre la estructura.

Los sistemas híbridos de generación de energía surgen como una alternativa para mejorar la eficiencia energética ya que permiten reducir las limitaciones de una u otra de las fuentes de energía involucradas, además, se aumenta la recolección de energía al haber múltiples formas de energía ambiental estimulando al sistema.

La energía vibratoria es una fuente de energía renovable que no se ha aprovechado adecuadamente debido a las limitaciones de los transductores. Los piezoeléctricos son elementos transductores que son capaces de transformar una presión en electricidad. Su funcionamiento se basa en someter a tensión mecánica produciendo una polarización eléctrica de manera que una zona adquiere carga negativa y otra positiva.

Las estructuras urbanas son susceptibles a vibración mecánica debido al flujo peatonal, vehicular, su interacción con el viento, entre otras.

En el presente trabajo se realizó un estudio de las vibraciones mecánicas y el recurso eólico en diferentes partes de un puente peatonal con la finalidad de establecer el potencial de generación de energía al implementarse un sistema de recolección de energía basado en nuestro principal objetivo es poder analizar las vibraciones mecánicas en diferentes partes de los puentes peatonales para poder conocer la frecuencia fundamental de oscilación y la intensidad de la vibración, esto tomando en cuenta en cómo es que se genera la energía eólica comercial actualmente por medio de diferentes diseños ya establecidos en el mercado.

2. Antecedentes

2.1 Energías Renovables

Las energías renovables son energía obtenida de recursos naturales que son abundantes y pueden durar cientos o miles de años, por lo que se consideran inagotables y, lo más importante, su impacto ambiental es mínimo. Por eso el sol, el viento, el agua, la descomposición orgánica se han vuelto tan atractivos para generar electricidad, y, además, el esfuerzo por obtener las materias primas para generar electrones. [1]

La efectividad de las energías de origen renovable ha crecido notablemente en los últimos años y la energía eólica ha sido una de las responsables. El incremento de escala de las máquinas eólicas ha permitido colocarlas entre las fuentes de energía más utilizadas. Sin embargo, en el ámbito de la energía distribuida, en donde la energía se genera cerca del punto de consumo, la tecnología más destacable quizá sea la energía fotovoltaica. La carencia de elementos mecánicos móviles permite recoger la energía del sol con un mínimo mantenimiento y nulo impacto medioambiental en forma de ruido. Además, es bien conocido que la combinación de fuentes de energía renovable es sinérgica por la compensación mutua en los periodos de ausencia de viento, de luz, etc. El desarrollo de un instrumento de generación eólica que emule las características que han hecho de la fotovoltaica la fuente de energía protagonista en el contexto de la energía distribuida puede ser muy útil. [2]

2.1.1 Energía eólica.

En México se han identificado diferentes zonas con potencial para la explotación eólica para la generación eléctrica, entre ellas destacan la zona del Istmo de Tehuantepec, en el estado de Oaxaca, La Rumorosa en el estado de Baja California, así como en los estados de Zacatecas, Hidalgo, Veracruz, Sinaloa, y en la Península de Yucatán. A finales de 2009, la capacidad instalada en generación eólica

superaba los 250 MW de potencia, mientras que la capacidad autorizada está en torno a los 2.300 MW, por lo que existe parte de la capacidad que aún están en desarrollo. El desarrollo de estos proyectos eólicos en México es consecuencia de una combinación de inversión nacional y extranjera. La Asociación Mexicana de Energía Eólica estima que el potencial de capacidad es de 10.000 MW. Por otro lado, los estudios realizados en el 2009 del Instituto de Investigaciones Eléctricas establecen un potencial competitivo en 5.000 MW y un potencial probable en 15.000 MW. La perspectiva de desarrollo que maneja la Comisión Federal de Electricidad (CFE) es de 7.000 MW. En el siguiente mapa se muestran la localización y el avance de los proyectos eólicos. [3], [4]



Figura 1 Potencial eólico en México [4]

La inversión específica en parques eólicos (€/MW) se ha reducido de forma progresiva a prácticamente la mitad en los últimos 20 años debido al incremento de tamaño, a la estandarización de productos al aumentar la demanda y a las mejores tecnologías. Sin embargo, en los últimos años esta tendencia ha cambiado, observándose un incremento de este parámetro debido, por un lado, a que ese

mayor tamaño no ha absorbido la reducción de costes y por otro a la mayor complejidad requerida a las máquinas para su integración en la red, sin olvidar el aumento del coste del acero, que conforme a las previsiones actuales (2010) aumentará a un ritmo igual o superior del 3% motivado por el fuerte crecimiento de la demanda internacional. La distribución del coste de inversión en un parque eólico es la siguiente:

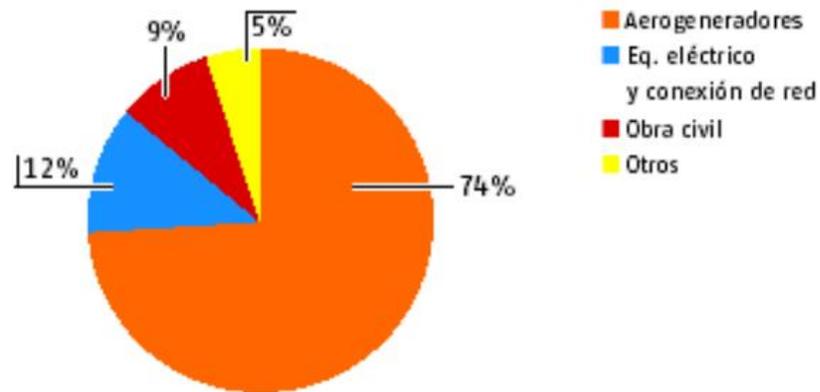


Figura 2 Grafico de Distribución del coste de inversión (AEE)

Con relación a la gran generación, la eólica offshore (molinos instalados en el océano) es muy prometedora. Uno de los problemas a los que se enfrenta es la agresividad del entorno marino, especialmente por la corrosión de elementos mecánicos móviles del molino. La eliminación total de engranajes, rodamientos, etc. en un dispositivo capaz de recoger la energía del viento puede ser ventajoso en este ámbito. La influencia en la fauna avícola, el impacto visual, la aparición de fenómenos EMI con antenas o radares, los costes y otros variados factores también deben considerarse a la hora de desarrollar un nuevo dispositivo de generación eólica[4], [5]

2.1.1 Energía Mecánica Vibratoria

El proyecto VIBRA es un trabajo impulsado por m-Elektronikos para diseñar, evaluar y construir un prototipo mecánico de laboratorio con el cual se pueda estudiar de manera práctica las vibraciones mecánicas.

Una de las intenciones principales de la realización de proyecto es obtener un prototipo portable, reproducible y con el costo más bajo posible

La empresa Elektronikos, patrocinador desde las primeras etapas del proyecto VIBRA, es el distribuidor autorizado de los productos de mikroElektronika en México.

La empresa se estableció año de 1997 como una firma especializada en electrónica y desde entonces ha tenido una gran expansión especializándose en campos de herramientas de desarrollo de microcontroladores, compiladores, sensores de aceleración y sistemas de adquisición de datos se realizó valore estándares de funcionamiento en frecuencia, velocidad de giro y par del motor.

En la fase se realiza la implementación del motor que suministrará la potencia al prototipo. Para ello se consideran las mejoras de diseño referentes a la transmisión de potencia, utilizando un motor CD. [6]

2.2Aerogeneradores

Los aerogeneradores son la tecnología utilizada para aprovechar la energía eólica o cinética del viento y transformarla en energía mecánica y posteriormente en energía eléctrica. Los más comunes son los aerogeneradores de eje vertical y de eje horizontal que se describen a continuación.

En la Tabla se observa una clasificación de los aerogeneradores en función de su potencia.[5], [7]

Tabla 1 Clasificación de aerogeneradores de eje horizontal para producción eléctrica en función de la potencia

Denominación	PN [kW]	R [m]	Aplicaciones
Muy baja	<1	<1	Embarcaciones, sistemas de comunicación, refugios de montaña, iluminación
	1-10	1-3	Granjas, viviendas aisladas (sistemas EO-FV), bombeo
Baja	10-100	3-9	Comunidades de vecinos, Pymes (sistemas mixtos EO-diésel), drenaje, tratamiento de aguas
Media	100-1000	9-27	Parques Eólicos (terreno complejo)
Alta	1000-	27-81	Parques Eólicos (terreno llano, mar adentro)
	10000		
Muy Alta	>10000	>81	En fase de investigación y desarrollo, requieren nuevos diseños y materiales no convencionales. Suponen un salto tecnológico. No antes del año 2010.

Dependiendo del margen de velocidad para el que fueron diseñados, les corresponde una clase de aerogenerador de acuerdo con la norma IEC-1400-1. Para regiones con vientos muy fuertes se propone un tipo de Clase 0 o Especial, estos aerogeneradores son conocidos como Multi-MW y su aplicación es fuera de costa o para sitios en tierra con muy buenos regímenes de viento. La Tabla indica la clase de aerogenerador según dicha norma.

Tabla 2 Clase de aerogenerador según la norma IEC-1400-1

Parámetros	Clase I	Clase II	Clase III	Clase IV
V_{ref} [m/s]	50	42.5	37.5	30
σ_v/V turbulencia	0.17	0.17	0.17	0.17

2.2.2 Aerogenerador sin palas

Los aerogeneradores sin palas de Vortex Bladeless, se caracterizan que, en vez de ver girar las palas clásicas, vemos moverse un cilindro fijo por la parte inferior en varias direcciones.[8]

El sistema está inspirado en la resonancia Aero elástica. Esta nueva generación de aerogeneradores carece de palas o engranajes, lo que simplifica su mantenimiento. La parte visible del aerogenerador eólico, o mástil, es un cilindro rígido que oscila en todas direcciones por la fuerza del viento. La base está anclada en el suelo con una varilla o núcleo, esa oscilación es la encargada de generar la energía eléctrica. Supongamos una varilla flexible de longitud libre L empotrada en su parte superior al mástil y en su parte inferior a una fijación solidaria al suelo. Considerando el mástil un sólido rígido que oscila ángulos pequeños, es aceptable asumir que en[9]

$$y = L/2$$

la amplitud de oscilación x es nula

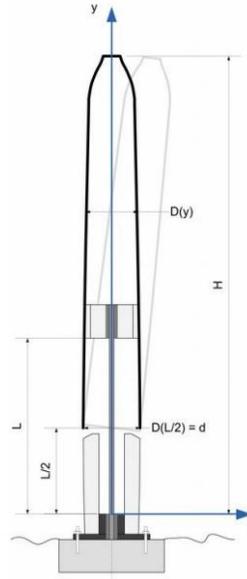


Figura 3 Modelo de prototipo de aerogenerador (Vortex Bladeless)

2.3 Generación de electricidad a partir de energía eólica en México

El viento es una fuente de energía inagotable, limpia y disponible sin ningún costo en la naturaleza, la cual puede ser transformada en energía eléctrica, por lo que es importante conocer las características propias del recurso eólico en los cuales pueden ser evaluados en términos de energía disponible. Para ello se lleva a cabo un estudio de los aspectos técnicos relacionados con la producción de electricidad a partir de energía eólica, lo que involucra caracterizar al viento, la tecnología de Aero-generación y los centrales Eolo-eléctricas.[10]

Debe resaltarse que el interés principal de este capítulo es la aplicación a gran escala, en consecuencia, el estudio se realiza para los aerogeneradores de eje horizontal y en particular los parques eólicos en tierra. También se incluyen las principales consideraciones en el diseño de un parque eólico fuera de costa (off-shore) que, a pesar de ser una modalidad todavía prematura, tiene metas de crecimiento, en países europeos, para poder resolver la creciente demanda de energía eléctrica y la crisis de los combustibles fósiles. Además de las características técnicas se realiza una descripción de las principales aplicaciones de la energía eólica.[4]

Aunado a esto, es importante conocer los efectos externos asociados a la producción de electricidad con energía eólica, por lo que al final de este capítulo, se incluyen los principales efectos externos o formas de contaminación asociados con esta tecnología en el ambiente.

2.3.2 Recolección de energía a partir de vibraciones utilizando materiales piezoeléctricos

El uso de materiales piezoeléctricos para capitalizar las vibraciones ambientales que rodean un sistema es un método que ha visto un aumento dramático en el uso para la recolección de energía. Los materiales piezoeléctricos tienen una estructura cristalina que les proporciona la capacidad de transformar la energía de deformación mecánica en carga eléctrica y, viceversa, de convertir un potencial eléctrico aplicado en deformación mecánica. Esta propiedad proporciona a estos materiales la capacidad de absorber energía mecánica de su entorno, generalmente vibraciones ambientales, y transformarla en energía eléctrica que, después de un acondicionamiento, se puede utilizar para alimentar otros dispositivos. Si bien los materiales piezoeléctricos son el principal método de recolección de energía, existen otros métodos; Por ejemplo, uno de los métodos convencionales es el uso de dispositivos electromagnéticos.

2.3.3 Recolección de energía para energías renovables a partir de vibraciones ambientales y ondas acústicas utilizando piezoelectricidad

La recolección de energía es el proceso de obtener energía eléctrica de los sistemas mecánicos vibratorios circundantes a través de un método de conversión de energía utilizando estructuras inteligentes, como materiales piezoeléctricos y electrostáticos. Los avances recientes en dispositivos electrónicos de baja potencia, sistemas microelectromecánicos y sensores inalámbricos han aumentado significativamente la demanda de energía local. Con el fin de eludir la demanda de energía; Para permitir un suministro de energía ilimitado y evitar el desperdicio químico de las

baterías convencionales, se proponen recolectores de energía locales de baja potencia para recolectar energía de diferentes fuentes de energía ambiental. Los materiales piezoeléctricos han recibido un gran interés en la tecnología de recolección de energía debido a su capacidad única para capitalizar las vibraciones ambientales para generar potencial eléctrico. Su configuración cristalina permite que el material convierta la energía de deformación mecánica en potencial eléctrico, y viceversa.[11], [12]

2.4 Energías híbridas

La hibridación consiste en generar energía utilizando dos o más fuentes de energía diferentes compartiendo un mismo punto de conexión.

La condición de una instalación híbrida es en el que coexisten diversas tecnologías de producción de energía con un mismo punto de conexión. La electricidad producida debe llegar a la misma subestación interna con un punto de conexión con la red común y un control que gestione conjuntamente la generación que se inyecte en dicho punto. La instalación híbrida puede contar o no con un sistema de almacenamiento.

Los tipos más comunes, excluyendo las instalaciones con generadores de diésel, son: (i) Fotovoltaica y Eólica, (ii) Hidráulica y Fotovoltaica, (iii) Hidráulica y Eólica y (iv) Termosolar y Biomasa (v) Eólica y Vibraciones.

Las energías híbridas como todo necesitan un acondicionamiento más detallado esto para que de manera factible se pueda utilizar esta energía producida.

2.4.1 Energía Fotovoltaica-Eólica

Este sistema mixto está especialmente diseñado para facilitar el autoconsumo. Combina las dos principales fuentes de energías renovables de la actualidad: el sol y el viento, compensando sus desventajas y potenciando todos sus puntos fuertes.

La energía eólica híbrida funciona combinando energía eólica y solar para generar electricidad, las turbinas eólicas se utilizan para capturar la energía cinética del

viento, mientras que las células fotovoltaicas (PV) se utilizan para capturar la energía solar del sol.

Las turbinas eólicas funcionan capturando la energía cinética del viento y convirtiéndola en fuerza de rotación, esta fuerza se utiliza luego para hacer girar un generador, que a su vez produce electricidad.

Por otro lado, las células fotovoltaicas se componen de múltiples células solares que absorben la luz solar y la convierten en energía eléctrica, estas celdas se conectan entre sí en un circuito en serie para formar un panel.

La electricidad generada a partir de estas dos fuentes se combina luego y se utiliza para alimentar hogares o negocios.

2.4.2 Energía Hidráulica- Eólica

La energía eólica marina es aquella fuente de energía limpia y renovable que se obtiene al aprovechar la fuerza del viento que se produce en alta mar, donde este alcanza una velocidad mayor y más constante debido a la inexistencia de barreras. Para explotar al máximo este recurso, se desarrollan mega estructuras asentadas sobre el lecho marino y dotadas con las últimas innovaciones técnicas.

Las instalaciones eólicas marinas presentan características diferenciadas ventajosas frente a las instalaciones en tierra. El recurso eólico existente en el mar es superior y más regular que en tierra firme, con lo que aumenta la generación eléctrica de los aerogeneradores con las mismas dimensiones. Además, la menor rugosidad superficial en el mar requiere una altura de torre menor si se compara con un aerogenerador terrestre.

En 2016, las compañías Max Boegl Wind AG y GE Renewable Energy comenzaron el desarrollo de la primera turbina eólica con su propia central hidroeléctrica en miniatura. La torre de este sistema de energía híbrida alcanza los 180 metros de longitud y en su base hay un tanque de agua situado a distintas alturas, para así transformar esta energía cinética en eléctrica. Cuando la demanda supera a la

producción, se bombea agua dentro de la turbina, que funciona de forma similar a una batería de gran potencia. Por lo tanto, este sistema de energía híbrida le permite funcionar durante 24 horas todos los días del año, ya que no depende por completo de la inconstante fuerza del viento.

2.4.3 Energía Eólica-Vibratoria

La energía vibratoria se genera cuando una corriente de agua o aire se encuentran con alguna estructura, que, al producirse el encuentro, la corriente tiene que rodear la estructura de ambos lados, sin embargo, este fenómeno no siempre ocurre simultáneamente en el cual da como resultado un patrón alternado de los vórtices que al desprenderse de la estructura ejercen fuerzas a diferentes frecuencias que pueden producir vibraciones sobre la estructura.

Las energías producidas por vórtices constituyen a un fenómeno físico que estudia la mecánica de fluidos (líquidos o gases) en él estudió del movimiento y los procesos de interacción de los cuerpos sólidos. Esto permitiendo comprender como es que se da el comportamiento de estos fluidos con las masas. [13][14]

3 Marco teórico

Las Energías Renovables son aquellas que se obtienen de fuentes naturales que son tan abundantes que perdurarán cientos o miles de años, por ello se consideran inagotables y lo mejor, sus impactos medioambientales son muy poco significativos. Por eso, el sol, el viento, las caídas de agua, el océano, el calor de la Tierra o la descomposición orgánica se vuelven tan atractivos para generar electricidad, además de que el esfuerzo de obtención de la materia prima para producir electrones es prácticamente menor con relación a las fuentes de energías convencionales.

En el caso particular de México las Energías Renovables, la Transición Energética y el combate al Cambio Climático son temas que han comenzado a legislarse en la materia. Todavía más, cuando se le relaciona con el sector eléctrico, resulta que nuestro modelo en este tema tiene poco más de un lustro. Sobre este último asunto, hay que recordar que pasamos de un modelo eléctrico con una sola compañía estatal, a otro que privilegió la apertura, el mercado y la competencia con múltiples participantes

El nuevo Gobierno Federal entró en funciones en diciembre de 2018. Hoy en día, se cuenta con tres documentos oficiales que dejan clara la política energética de la nueva administración en materia de Energías Renovables, Transición Energética y Cambio Climático, a saber: el Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024; el Programa para el Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2019-2033 y, la Estrategia de Transición para promover el Uso de Tecnología y Combustibles más Limpios. Hacia una Transición Energética Soberana de México. En estos documentos hay una palabra que se usa de manera reiterada: Soberanía.[2]

Las energías de origen fósil como el petróleo y sus derivados, gas natural o carbón han sido utilizadas mayoritariamente para dicho fin, a veces de forma justificada y muchas otras no. Su uso más que intensivo durante las últimas décadas ha llevado a consecuencias considerables en contra del medio ambiente. Es en este contexto que las Energías Renovables se han considerado como una opción viable y

sostenible para solucionar el dilema que existe entre la aspiración de crecimiento y desarrollo de las economías de los países y, al mismo tiempo, tener menores impactos medioambientales.

3.1 Energías Renovables

Las Energías Renovables son aquellas que se obtienen de fuentes naturales que se regeneran y son tan abundantes que perdurarán cientos o miles de años. Por lo tanto, se consideran inagotables, de libre disposición, y se distribuyen en amplias zonas con impactos ambientales poco significativos debido a que no producen emisiones de dióxido de carbono (CO₂) y otros gases contaminantes a la atmósfera. La fracción XVI del artículo 3 de la Ley de Transición Energética (LTE) en México, establece que las Energías Renovables son: “aquellas cuya fuente reside en fenómenos de la naturaleza, procesos o materiales susceptibles de ser transformados en energía aprovechable por el ser humano, que se regeneran naturalmente, por lo que se encuentran disponibles de forma continua o periódica, y que al ser generadas no liberan emisiones contaminantes”. La LTE 2 también identifica seis tipos de fuentes de Energías Renovables, cuyas definiciones se observan en la Figura 8:[15]

1. Viento (eólica)
2. Radiación solar en todas sus formas
3. Hidráulica
4. Oceánica en sus distintas formas
5. Geotérmica
6. Bioenergético



Figura 4 Tipos de energías Renovables

3.2 Energías Limpias

La fracción XXII, artículo 3 de la Ley de la Industria Eléctrica (LIE) define a las Energías Limpias como: “Aquellas fuentes de energía y procesos de generación de electricidad cuyas emisiones o residuos, cuando los haya, no rebasen los umbrales establecidos en las disposiciones reglamentarias que para tal efecto se expidan”. La LIE no conceptualiza a las Energías Renovables como tal, sí las incorpora como un subconjunto de las Energías Limpias.

Esta norma desdobra las Energías Limpias en catorce fuentes diferentes. No obstante, el número puede ampliarse, debido a que el último inciso de la fracción y artículo antes mencionado señala que es posible adicionar: “Otras tecnologías que determinen la Secretaría [de Energía] y la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, con base en parámetros y normas de eficiencia energética e hídrica, emisiones a la atmósfera y generación de residuos, de manera directa, indirecta o en ciclo de vida”.[16]

A continuación, se identifican las fuentes de Energías Limpias y Energías Renovables en un comparativo entre la LIE y la LTE.

3.3 Energía Ambiental

Es toda aquella energía derivada de fuentes naturales que, a su vez, se reponen a un ritmo mayor del que se consumen.

Entre estas fuentes que se reabastecen por la naturaleza se encuentran la hidráulica (de los ríos), la solar (del sol), la eólica (del viento), la biomasa (de la materia orgánica), la geotérmica (del interior de la Tierra) y la oceánica (de las mareas y las olas)

3.4 Valor de Pico

Es el valor de la amplitud más alta presente en la señal, también llamado “Valor de pico verdadero” en muchas plataformas. Su aumento puede indicar la aparición de impactos en la señal. El valor máximo alcanzado por una cantidad alterna durante un ciclo se llama su Pvalor máximo. También se conoce como valor máximo o amplitud o valor de cresta.[17]

3.5 Valor pico a pico

El voltaje pico a pico, VPP, es una forma de onda de voltaje que se mide desde la parte superior de la forma de onda, llamada cresta, hasta el fondo de la forma de onda. Puede ver que todo esto se muestra en el diagrama anterior. Por lo tanto, el voltaje pico a pico es sólo la longitud vertical completa de una forma de onda de voltaje desde la parte superior hasta la parte inferior.

Del mismo modo, la amplitud Pico a Pico no proporciona ninguna información sobre la cantidad de energía dentro de la señal de vibración, sólo proporciona información sobre los valores más altos y bajo.[18]

3.6 Aspectos técnicos de las características del viento

En este apartado se estudiarán las principales características del viento, el principio de operación de los aerogeneradores, las características de sus componentes y los tipos y particularidades de los parques eólicos a gran escala.[19]

3.6.1 Principio de operación

La energía cinética del viento es la fuente de energía que utilizan los aerogeneradores para producir electricidad. Sus principales características se describen a continuación.

3.6.2 Características del viento

Para conocer el potencial eólico de un sitio se deben tomar en cuenta las características globales y locales del viento descritas a continuación.

- **Velocidad.** Determina en gran medida el potencial eólico de un lugar, ya que la energía contenida en el viento varía con el cubo de la velocidad media del mismo, como se verá más adelante. Tiene una relación estrecha con la topografía del lugar, quien incluso puede llegar a nulificar la.[20]

Es una característica variable a consecuencia de los cambios de temperatura, presión, densidad del aire, altura, etc. por lo que es indispensable medirla por largos períodos de tiempo, con el fin de tener un registro confiable de su comportamiento en el sitio de interés.

El viento puede clasificarse por la magnitud de su velocidad como se muestra en la Tabla II. La velocidad del viento a la cual se puede empezar a generar electricidad con un aerogenerador es a partir de los 4 ms y hasta 25 ms.

Tabla 3 Clasificación del viento debido a su velocidad

Velocidad a 10m de altura			
[m/s]	nudos	Escala Beaufort	Tipo de viento
0.0-0.4	0.0-0.9	0	Calma
0.4-1.8	0.9-3.5	1	Ligero
1.8-3.6	3.5-7.0	2	
3.6-5.8	7.0-11	3	
5.8-8.5	11-17.	4	Moderado
8.5-11	17-22	5	Fresco
11-14.	22-28	6	Fuerte
14-17	28-34	7	Temporal
17-21	34-41	8	
21-25	41-48	9	
25-29	48-56	10	Fuerte Temporal
29-34	56-65	11	
>34	>65	12	Huracán

3.6.3 El viento

Es un recurso natural inagotable obtenido como consecuencia de la energía solar. Corresponde al 1 o 2% del total de dicha energía emitida a la tierra y se genera por diversos efectos físicos que trabajan en conjunto. Con los cambios de temperatura el aire caliente es más ligero que el frío, por lo que las zonas cálidas del planeta (las que están sobre y cerca del Ecuador) distribuyen el aire caliente unos 10 km hacia los polos norte y sur; después, debido a la rotación de la tierra este aire es desplazado hacia la derecha, visto desde el polo norte y a la izquierda visto desde el hemisferio sur, de esta manera se produce el viento.

La fuerza que hace que el aire se desvíe se conoce como fuerza de Coriolis. Tanto el desplazamiento de altura como de curvatura del viento son detenidos por las altas

presiones (el aire frío) en ambos hemisferios y el aire nuevamente desciende hacia el Ecuador manteniéndose un movimiento constante, además de una dirección.

Estos fenómenos le dan al viento un comportamiento variable durante el día y durante las estaciones del año. A estos vientos se les conoce como vientos globales.

3.6.4 Rosa de las rugosidades

Tiene una presentación similar a la rosa de los vientos. Cada sector representa la rugosidad en cada dirección del viento y su importancia está en obtener una rugosidad media de todo el terreno.

3.5.5 Potencia generada

Como se vio en el apartado anterior, existen diversas variables que afectan la velocidad del viento y en consecuencia la energía utilizable para producir electricidad. Los aspectos teóricos sobre contenido energético del viento y su producción eléctrica se verán a continuación.

3.5.6 Curva de potencia

Se obtiene a partir de las velocidades de viento medidas con el anemómetro y el cálculo de su potencia eléctrica correspondiente. Son información importante de los aerogeneradores, sin embargo, las mediciones son para un emplazamiento particular que puede no corresponder con las características de variación del viento, turbulencias, obstáculos, etc. del sitio donde se instalarán los aerogeneradores. Por lo que debe tenerse especial cuidado al tomar la potencia directa de estas curvas para una velocidad de viento determinada. La Figura 5 es un ejemplo de curva de potencia de una Aero turbinas para regímenes de viento medios y altos.

Curva de Potencia Gamesa G52-850kW
(para una densidad del aire de 1,225 kg/m³)

Curva de potencia calculada con base a datos de perfiles aerodinámicos NACA 63.XXX y FFA-W3 (perfiles de pala).
Parámetros de cálculo: 50 Hz de frecuencia de red; ángulo de calado de pala variable (control tipo pitch); intensidad de turbulencia del 10% y una velocidad variable del rotor de 14,6 - 30,8 rpm.

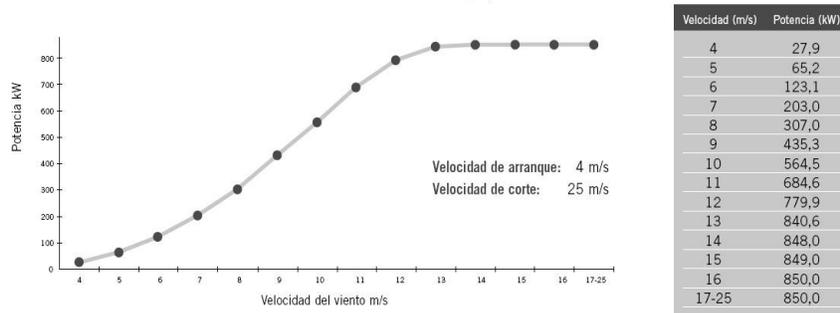


Figura 5 Curva de potencia de un aerogenerador tripala de 850 kW [27]

Cuando se tienen estas dos informaciones: la distribución de Weibull y la curva de potencia puede obtenerse la potencia que se estará produciendo en el lugar donde se instalarán los aerogeneradores.

3.6 Densidad de potencia disponible del viento

La potencia eólica disponible en el viento depende de tres factores: el área de sección transversal por donde pasa el viento, la densidad del aire y la velocidad del viento; es decir, la densidad de potencia expresa la energía contenida en el viento por metro cuadrado. [12]

La densidad de potencia es directamente proporcional a la velocidad promedio del viento elevada al cubo y la densidad del aire. La variación de la densidad de potencia tiene en cuenta las variaciones del aire respecto a la altura en msnm, lo que lleva a un cambio de potencia en distintas zonas, así estas tengan una misma velocidad del viento. La potencia disponible esta expresada en W/m², y es determinada.

$$P = \frac{1}{2} \rho A V_{prom}^3$$

$$P = \frac{1}{2} \rho A V_{prom}^3$$

La densidad del aire ρ es la medida experimental realizada en la zona que varía con respecto a la altura. La densidad de potencia Pd/A , se define en la siguiente ecuación.

$$\frac{Pd}{A} = \frac{1}{2} \rho V_{prom}^3$$

Las estimaciones de la densidad de potencia obedecen a las variaciones de la velocidad del viento durante un periodo de tiempo.

La determinación del potencial eólico cumple un proceso de observación, adquisición, compilación, procesamiento e interpretación de la información, dadas las características del viento en el sitio. Una vez se conoce la potencia del viento a una altura de referencia, se estima un perfil de potencia con relación a las velocidades desde los 10 m hasta los 50 m de altura.

3.7 Aerogeneradores

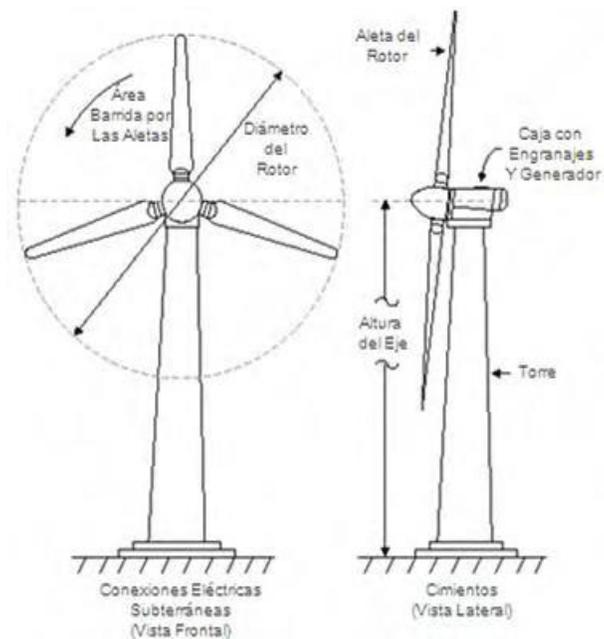
3.7.1 Dirección.

Es la orientación a la cual se dirige el viento y se debe, para vientos globales, a fenómenos que ocurren en la estratosfera, pero es afectada por la topografía del terreno cuando se trata de alturas menores a 100 m. Es indispensable conocer la dirección dominante del viento para ubicar estratégicamente las Aero turbinas que

capturarán la energía cinética del viento, de manera que se aproveche al máximo el recurso eólico y no se obstruya con los propios aerogeneradores. La dirección dominante se determina con una veleta.[21]

3.7.2 Componentes

Sus componentes se han diseñado para tener una vida útil de 20 años, por lo que el material de construcción debe ser resistente a las condiciones de viento donde serán instalados. Las características y evolución de ellos se explican a continuación. La Figura 6 muestra un esquema general de un aerogenerador horizontal. Mientras que en la Figura 7 se ilustran los componentes del aerogenerador con mayor detalle.



[22]

Figura 6 Esquema general de la turbina eólica

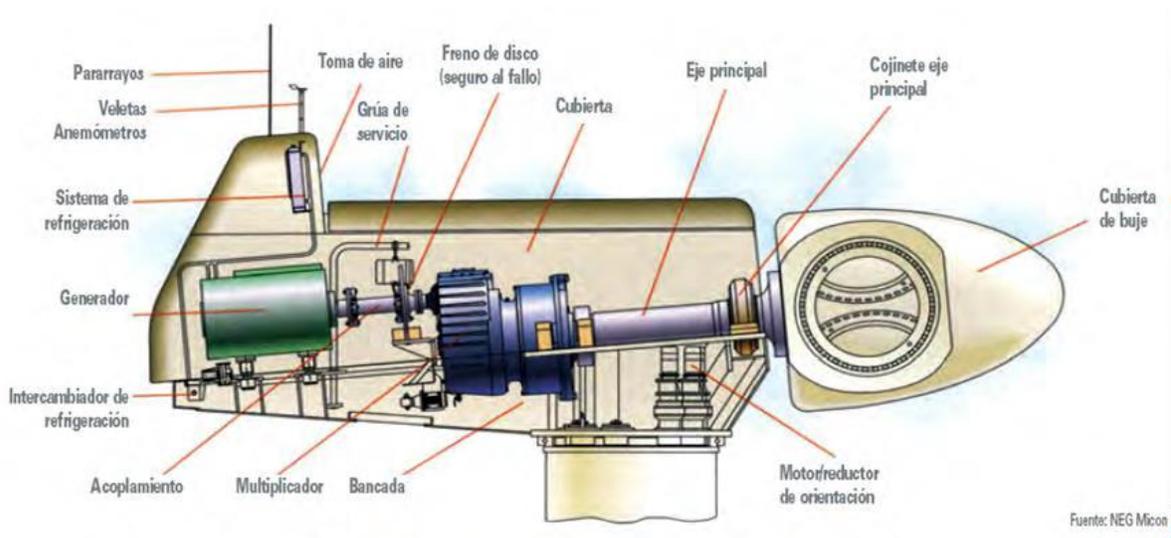


Figura 7 Componentes del aerogenerador[23]

3.7.3 Rotor

Formado por las palas, cubo y nariz. Convierte la energía eólica en energía mecánica a través de las palas que van incrustadas en el cubo de este, quien además transmite la potencia del viento a la flecha o eje principal del aerogenerador. La función de la nariz o cubierta de buje es erradicar turbulencias en el centro del rotor, desviar el viento hacia las palas y ventilar el interior.

3.7.4 Palas o aspas del rotor

Captan la energía cinética del viento para hacer girar al rotor. Un cambio en el diámetro de su rotor, o bien en la longitud de las palas, es proporcional a la energía captada. La evolución de las Aero turbinas está marcada por el aumento en el tamaño de sus componentes, como puede observarse en la Figura 8 además de la relación del diámetro del rotor con la potencia generada.

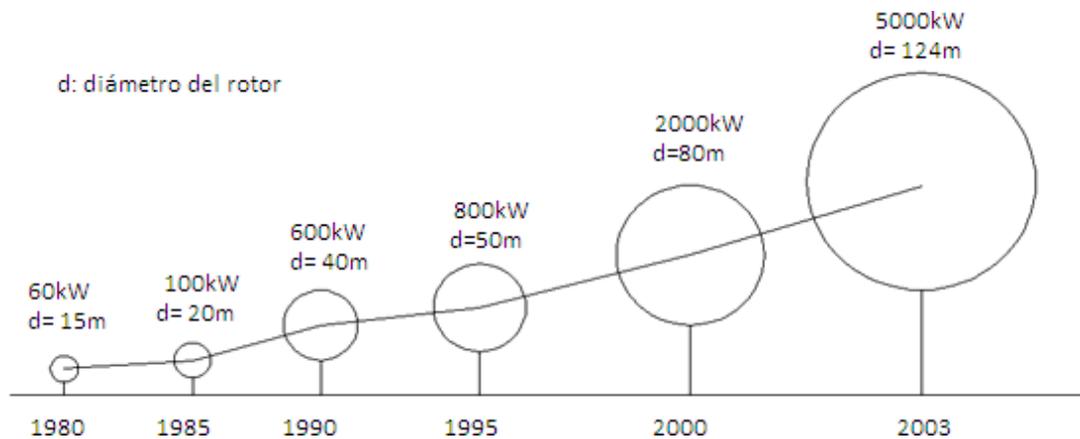


Figura 8 Variación del diámetro del rotor con la potencia generada (Fuente: EWEA 8, 2004)

El material utilizado lo determina el peso, la resistencia estructural, la resistencia de fatiga resistencia a agentes medioambientales, facilidad de fabricación y el costo. Algunos de los materiales más utilizados son la fibra de vidrio poliéster, fibra de vidrio epoxy, fibra de carbono epoxy y mixto, fibra de vidrio y fibra de carbono.

3.7.5 Multiplicador o caja de transmisión

Transforma la velocidad de giro del eje del rotor, a una velocidad mayor, mediante una serie de engranajes. Esta conversión es necesaria por el tamaño y la cantidad de polos del generador que se utiliza, si la conexión del rotor con el generador fuera directa, el rotor requeriría una velocidad extremadamente alta o bien ser muy lento, pero contener cientos de polos que implican un mayor tamaño de este. En ambos casos el diseño sería muy costoso, por lo que la caja multiplicadora es la mejor opción para conectar estos dos componentes.

3.7.6 Los tipos de cajas multiplicadoras son:

3.7.7 Flechas paralelas

Planetario: cajas compactas, de menor peso, menor emisión de ruido y eficiencia más alta en condiciones de carga parcial.

Falla de los materiales de los componentes por aplicar repetidamente cargas.

3.7.8 *Generador de baja velocidad nominal:*

Es la otra opción para no utilizar una caja de engranajes. Ocupan más espacio que la caja de transmisión, el rotor está conectado directamente al generador.

3.7.9 *Generador*

Convierte la energía mecánica que recibe del eje del rotor a energía eléctrica. Los hay síncronos y asíncronos, esta elección depende de la caracterización propia del aerogenerador. Determina la potencia de salida, su tipo de regulación y si la conexión será directa o indirecta a la red.

3.7.10 *Eje Horizontal*

Son el tipo de aerogenerador más comercializado, el único empleado en centrales eólicas y de uso común para generación de electricidad a pequeña escala. Los hay de una, dos, tres y múltiples palas (usados para bombeo de agua). Los más comunes son de tres palas porque reducen las cargas dinámicas, son más estables, ahorran material y peso, además de ser atractivos a la vista. Los casos de una y dos palas ahorran material y peso, pero son menos eficientes y más inestables. Su capacidad de generación determina la aplicación para la que fueron diseñados. La Figura 9 un tipo común de aerogenerador tripala utilizado en parques Eolo-eléctricas Empresa española dedicada a la producción de tecnología para la generación de electricidad con viento, es uno de los principales fabricantes de tecnología eólica en el mundo.



Figura 9 Aerogenerador eje horizontal

3.7.11 **Altura.**

La velocidad del viento también cambia con la altura debido en parte a los obstáculos presentes en el terreno. A mayor altura la velocidad del viento se incrementa. Para conocer una velocidad a una altura distinta a la que se realizaron las mediciones de velocidad del viento, se utiliza la siguiente expresión.

Para evitar turbulencia entre turbinas corriente abajo, o por el efecto estela se colocan a una distancia mínima de tres diámetros del rotor.

Donde z_0 es la longitud de rugosidad del terreno donde se instalarán los aerogeneradores, z la altura a la cual se desea conocer la velocidad de viento y altura a la que está colocado el equipo de medición. Los valores para la longitud de rugosidad.

Para medir la velocidad y dirección del viento se utilizan generalmente anemómetros que capturan el viento, además de una veleta que indica permanentemente la dirección de este. Se sitúan en una torre de una altura a la que eventualmente se instalará la torre del aerogenerador, o a la que se quiere conocer la velocidad del viento para llevar un registro del recurso eólico del sitio.

Las mediciones de las revoluciones por segundo a las que giran las cazoletas del anemómetro son registradas electrónicamente por un sistema denominado “data logger”, este sistema permite además obtener gráficos relacionados con las características del viento: distribución de frecuencia de las velocidades, comportamiento de la velocidad en el tiempo, construye la rosa de vientos, rosa de rugosidades, entre otras.

Cuando se instalan los aerogeneradores se colocan junto con el equipo de medición pues este sirve para decidir si es oportuno o no accionar las máquinas, para controlar la dirección de las turbinas y como elemento de protección. La Figura 10 ilustra un equipo de medición clásico montado sobre una torre de medición.



Figura 10 Torre de medición con anemómetro y veleta.

También hay anemómetros con hélices, con ultrasonido, con rayo láser y de hilo electro calentado.

La frecuencia relativa es una medida que indica el número de veces que aparece un valor en una muestra de datos en forma de proporción o porcentaje. En concreto, la frecuencia relativa es igual a la frecuencia absoluta dividido por el número total de datos.

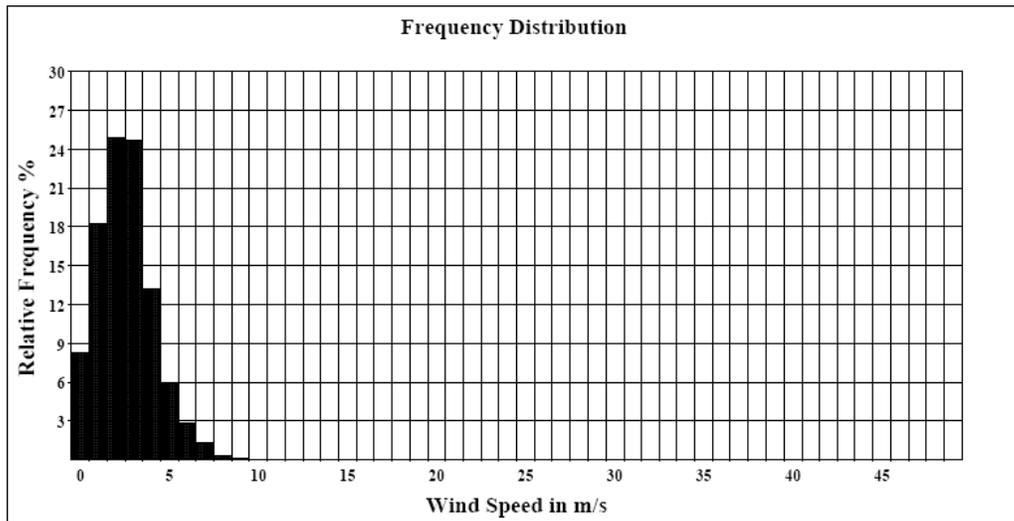


Figura 11 emplazamiento obtenidas con el data logger.

Todas las representaciones gráficas antes mencionadas son importantes para conocer la energía que puede producirse con el recurso eólico.

3.7.13 Aerogenerador sin palas

Los aerogeneradores sin aspas son cilindros los cuales oscilan cuando el viento impacta sobre ellos, debido a los vórtices producidos durante el impacto.

Estos cilindros son anclados al suelo mediante una varilla o núcleo (el núcleo a su vez se encarga de sujetar el mástil). Mientras que, en la estructura, la composición está formada por fibra de vidrio o carbono, además de otros materiales que suelen utilizarse para los aerogeneradores convencionales.[24]

3.7.14 *Dimensionamiento de estructuras cilíndricas*

La dimensión característica para estructuras cilíndricas mencionada en la ecuación toma el valor del diámetro. Esta aproximación se ajusta bien para estructuras estáticas, pero con estructuras cuya oscilación no es despreciable se puede comprobar que un mejor ajuste se obtiene con:

$$\Phi = D + a \cdot X$$

En donde la dimensión característica Φ es la suma del diámetro del mástil y la amplitud de oscilación X multiplicada por un factor de ajuste a dependiente de Reynolds. Un correcto ajuste de este factor permite un desprendimiento ordenado de vórtices.[24]

3.7.15 *Distribución de frecuencia de las velocidades del viento registradas durante un año*

3.7.15 Rosa de los vientos

Es una representación gráfica de las direcciones del viento y de sus respectivas frecuencias de ocurrencia, así como del contenido energético en cada dirección. Está dividida en 8, 12 o 16 sectores. Sirve para reconocer la dirección dominante del viento y la zona que aporta la mayor velocidad media del lugar, es decir, representa la contribución energética que tiene cada una de las direcciones del

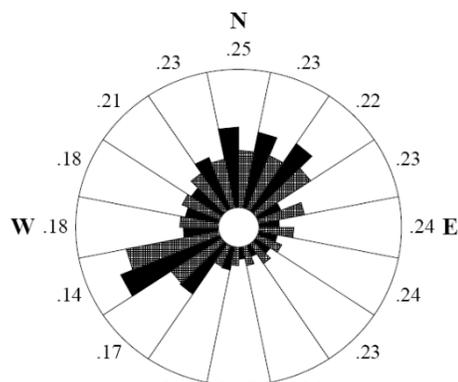


Figura 12 Rosa de los vientos del Jardín Botánico

viento en la energía eólica total del sitio. Es una huella meteorológica del emplazamiento. La Figura 12 es un ejemplo de una rosa de los vientos con 16 sectores.

3.7.16 *Distribución de Weibull*

Para representar las variaciones de velocidad del viento suele utilizarse la distribución de Weibull, que no es otra cosa más que una distribución de probabilidad. En ella se encuentran contenidas las probabilidades de que el viento sople a cualquier velocidad. Generalmente esta representación es asimétrica y con ella puede obtenerse la velocidad media del viento o el promedio de las velocidades vistas en el emplazamiento. Otra manera de obtener la velocidad media del viento es multiplicar la probabilidad de tener la velocidad modal de la distribución, que es la velocidad con mayor probabilidad de ocurrencia en la distribución de Weibull, por cada uno de los intervalos de velocidad y finalmente sumamos todos estos.

La distribución de Weibull varía de un lugar a otro en su forma y en su velocidad media. El factor de forma o k , indica el tipo de distribución de Weibull un ejemplo de distribución del viento típica, con un factor de forma $k=2$ también llamada distribución de Rayleigh.

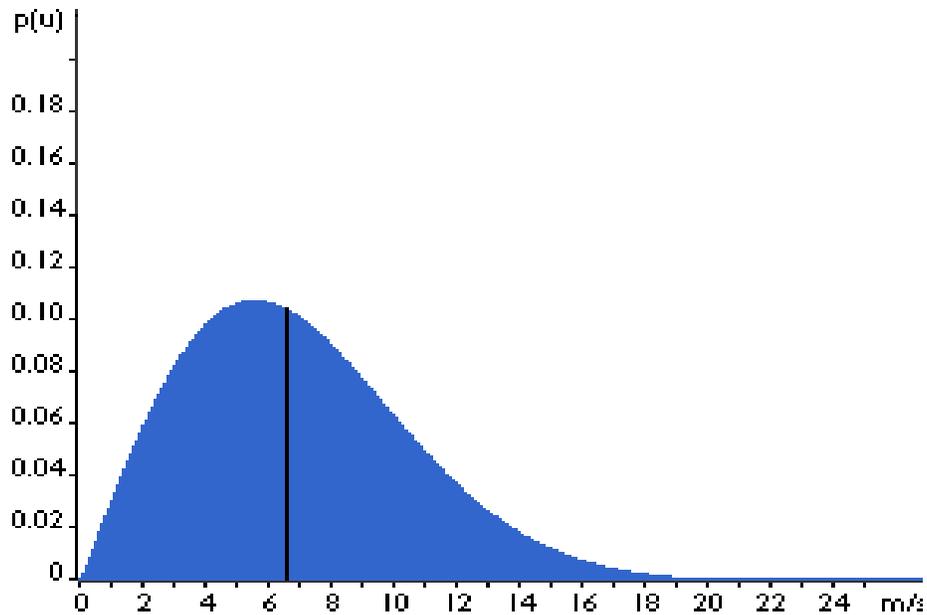


Figura 13 Distribución de Rayleigh

La potencia obtenida por los aerogeneradores depende de la densidad del aire, el área de barrido del rotor y la velocidad del viento. Entre más pesado sea el aire que pasa a través de la turbina más energía cinética recibe para ser transformada en electricidad. Por esta razón, en invierno hay más disponibilidad de esta tecnología pues las masas de aire son frías y en consecuencia más pesadas.

La velocidad media del viento utilizada en este cálculo de potencia se refiere a una velocidad efectiva, basado en el hecho de que la potencia promedio varía con el cubo de la velocidad del viento promedio y se obtiene la expresión. Donde v es la velocidad media obtenida de la distribución de Weibull y h es la altura.

3.7.17 Ley de Betz

Esta ley fue formulada por el físico alemán Albert Betz (1919) y detallada en su libro *Wind- energie*. En ella se afirma que sólo un 59% de la energía eólica (energía cinética del viento) puede ser transformada en energía mecánica. Es aplicable para todo aerogenerador con rotor en forma de disco y lleva implícito el hecho de que no se puede captar toda la energía disponible del viento, porque desde el inicio, el aerogenerador desvía el viento, el rotor frena su velocidad, la presión es mayor en

la parte de recepción de aire que a la salida de la turbina y en consecuencia el volumen de aire es mayor a la salida de la turbina que a la entrada.

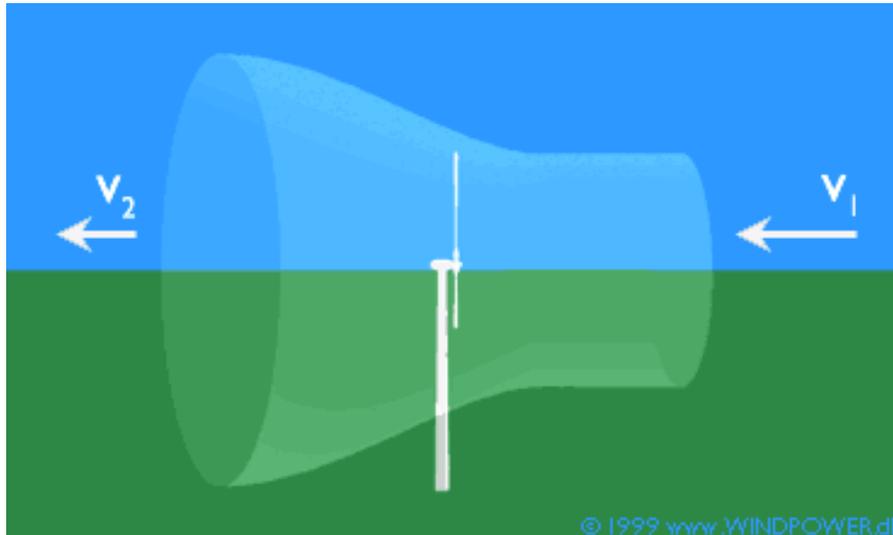


Figura 14 Comportamiento del viento al atravesar un aerogenerador

Considerando estas características, la expresión para la potencia media (Pm) obtenida del viento

$$P_m = \frac{1}{2} \rho V_1^3 A \left(1 - \frac{V_2^2}{V_1^2} \right) \left(1 + \frac{V_2}{V_1} \right) = \frac{1}{2} \rho C_p V_1^3 A$$

En esta posición la dimensión característica según coincide con el diámetro del mástil $\Phi = D(L/2) = d$, la amplitud de oscilación (S_t) y la frecuencia f de desprendimiento de vórtices con velocidad del viento $v_\infty(L/2)$ es:

$$f = \frac{S_t \cdot v_\infty(L/2)}{d}$$

Para cualquier otra sección del mástil en donde el valor de la oscilación no es despreciable, la frecuencia de desprendimiento de vórtices resulta; donde $v^\infty(y)$ y $X(y)$ son respectivamente la velocidad del fluido.

$$f(y) = \frac{S_t \cdot V_\infty(y)}{D(y) + a \cdot X(y)}$$

3.7.18 *Energy Harvesting (Cosecha de energía)*

Cuando se habla de sistemas de energy Harvesting o energy scavening se hace referencia a sistemas encargados de la recuperación, utilización y aprovechamiento de los diferentes tipos de energía. Es el proceso de captura de energía del entorno del sistema y se convierte en energía eléctrica utilizable, es un conjunto de técnicas orientadas a recolectar y aprovechar la energía presente y distribuida en el ambiente que pueden ser proveniente de diversas fuentes: luz, calor ,vibración ,presión ,movimiento o electricidad estática, energía química ,etc. .mediante diferentes dispositivos como paneles solares ,antenas ,elementos piezoeléctricos y termoeléctricos, inductores ,celdas electroquímicas entre otras.[25]

Los captadores de energía más conocidos son los paneles solares y los generadores eólicos, que se han convertido en importantes fuentes de energía alternativas en la red eléctrica. en cambio, los pequeños dispositivos integrados deben depender de sistemas de captación de energía que puedan capturar milivolts de energía, gracias a los MCU(Microcontrolador) estos recolectores de energía de micro potencia pueden extender en gran medida la vida útil de las baterías en aplicaciones de consumo.

3.7.19 *Sistemas de recolección de energía*

Los circuitos de recolección de energía generalmente constan de cuatro componentes principales en el que se encuentra el transductor que es aquel

dispositivo que convierte toda la energía ambiental en electricidad, el regulador de voltaje que se utiliza para asegurar que el voltaje de salida se mantenga constante, independientemente de las fluctuaciones en la entrada y finalmente el almacenamiento de la energía, que puede ser una batería o un supercondensador, y se utiliza para almacenar la energía recogida para su uso posterior.[26]

En los tipos de recolección de energía podemos encontrar los siguientes:

Recogedores de Energía solar: Estos utilizan celdas fotovoltaicas para convertir la luz solar en electricidad. Esta es una forma común y eficaz de recolección de energía.

Recogedores de Energía Térmica: Estos aprovechan el calor ambiental y lo convierten en electricidad mediante el uso de un dispositivo termoeléctrico. Esta es utilizada normalmente en lugares donde se encuentra una fuente de calor constante.

Recogedores de energía cinética: Estos capturan la energía del movimiento, como la vibración o la rotación y la convierten en energía eléctrica, pueden ser utilizados en una variedad de aplicaciones.

3.7.20 ***Componentes Principales de un Circuito de Recolección de Energía***

Los circuitos de recolección de energía generalmente constan de cuatro componentes principales: el transductor, el rectificador, el regulador de voltaje y el almacenamiento de energía. El transductor es el dispositivo que convierte la energía ambiental en electricidad. Luego, el rectificador se encarga de transformar la corriente alterna generada en corriente continua, que es la que pueden utilizar la mayoría de los dispositivos electrónicos. El regulador de voltaje se utiliza para asegurar que el voltaje de salida se mantenga constante, independientemente de las fluctuaciones en la entrada. Finalmente, el sistema de almacenamiento de

energía puede ser una batería o un supercondensador, y se utiliza para almacenar la energía recogida para su uso posterior.[27]

3.7.21 *Aplicaciones de los Circuitos de Recolección de Energía*

Los circuitos de recolección de energía han encontrado una amplia gama de aplicaciones en la era actual de la tecnología. Aquí se presentan algunos ejemplos:

- **Dispositivos portátiles:** Los dispositivos como relojes inteligentes, monitores de actividad y auriculares pueden utilizar la energía generada por el movimiento del usuario para complementar o reemplazar las baterías tradicionales.
- **Internet de las cosas (IoT):** Los dispositivos de IoT a menudo operan en ubicaciones remotas donde el reemplazo de la batería es impracticable. Los circuitos de recolección de energía pueden alimentar estos dispositivos utilizando energía ambiental, lo que los hace esencialmente autónomos.
- **Edificios inteligentes:** Los sensores y los sistemas de control en edificios inteligentes pueden ser alimentados por recolectores de energía, lo que reduce la necesidad de cableado y aumenta la eficiencia energética.

3.7.22 *Desafíos y Soluciones Potenciales*

A pesar de su utilidad, los circuitos de recolección de energía enfrentan algunos desafíos. La cantidad de energía que pueden recolectar del ambiente es limitada, y esto puede no ser suficiente para alimentar algunos dispositivos. Además, las

fluctuaciones en la fuente de energía ambiental pueden llevar a una salida de energía inestable. Sin embargo, a medida que la tecnología avanza, estas cuestiones están siendo abordadas. El uso de supercondensadores y baterías de alta eficiencia puede ayudar a almacenar más energía y liberarla de manera más estable. La investigación continua en materiales y diseños más eficientes también está abriendo nuevas posibilidades para la recolección de energía.[5]

3.7.23 Vibraciones mecánicas

La vibración se define en la forma más simple, como un movimiento oscilatorio. Ha quedado implícito en el pasado e incluido en la mayor parte de las de funciones, que este movimiento oscilatorio es también periódico. Lo anterior no es tan cierto actualmente como lo fue una vez, puesto que ahora tenemos interés en el movimiento no periódico transitorio, y en los métodos analíticos utilizados para estudiar tal movimiento. Esto tiene importancia en la ingeniería para la predicción del esfuerzo máximo, del desplazamiento promedio o de cierta medición de la fuerza reactiva.[28]

La vibración es movimiento primero que todo, y dinámica es el término usado para denominar la porción de la mecánica que trata del estudio de los cuerpos en movimiento y de las fuerzas que originan este movimiento. La cinemática es aquella parte de la dinámica que consiste en el estudio de la geometría del movimiento, sin hacer referencia a la fuerza o a la masa. La cinética es el estudio de la relación entre el movimiento de los cuerpos, y las fuerzas que actúan sobre ellos.[29][30]

Todo interés en la vibración quedó confinado al del periodo del péndulo, de los cuerpos astronómicos y mareas y a las perturbaciones observadas en los mismos. Pero a fines del siglo diecinueve, la maquinaria de alta velocidad introdujo muchos nuevos problemas, que incluían los fenómenos actualmente asociados con vibración mecánica.[31]

En tiempos recientes han existido muchos investigadores que han contribuido también al desarrollo de este, y este tema se ha expandido en forma enorme. Se

hará referencia especial a los trabajos de S. Timoshenko y J. P. Den Hartog, que fueron precursores en la solución de problemas industriales en vibración mecánica, así como grandes maestros en la ingeniería.

3.7.24 Efecto piezoeléctrico

La piezoelectricidad es la característica de ciertos materiales que al observar sus celdas unitarias no tienen una simetría en sus centros eléctricos, al presentar un ion positivo alejado del centro de los elementos de carga negativa, gracias a esto aparece un momento dipolar. Al ejercer alguna presión o deformación mecánica sobre la masa de un material piezoeléctrico aparecen cargas eléctricas cuya polarización depende de la dirección de la deformación.

Propiedades piezoeléctricas [32][33]

Las propiedades piezoeléctricas se tomarán en cuenta en la elaboración de este proyecto.

Constate de carga piezoeléctrica (metros/Volt)

Representa la variación dimensional del material piezoeléctrico y la diferencia de potencia aplicado.

- Constante de tensión piezoeléctrica (Volts x metros /Newton)

Representa la diferencia de potencial en la fuerza aplicada, al disminuir la dimensión de material piezoeléctrico o aumentando la fuerza se aumentará la tensión generada, los materiales con mayor tensión, entrega mayor corriente a raíz de su deformación.

- Coeficiente de acoplamiento

Esta constante explica que tan eficiente es el material para convertir energía mecánica-eléctrica.[29][34]

3.7.25 Clasificación de materiales piezoeléctricos

Los materiales piezoeléctricos se clasifican en tipo HARD Y SOFT de acuerdo con sus propiedades y su aplicación[33], [35]

- Navy Type I (Hard): Recomendado para aplicaciones de media y alta potencia en condiciones de uso continuo y repetitivo. Es capaz de generar altas amplitudes de vibración manteniendo bajas las pérdidas mecánicas y dieléctricas.
- Navy Type II (Soft): Alta sensibilidad, ideal para dispositivos de transmisión y recepción de baja potencia. -presenta pérdidas dieléctricas y mecánicas que inutilizan la excitación continua con alta intensidad.
- Navy Type III (Hard): ES capaz de convertir el doble de potencia manteniendo bajas las pérdidas mecánicas y dieléctricas.
- Navy Type IV (Soft): Adecuado para aplicaciones de media potencia. Se ha vuelto obsoleto con llegada a los PZT's
- Navy Type V (Soft): Adecuado para aplicaciones que requieren altas potencias, presentan altas constantes g_{33} , conocido comercialmente como: PZT5J.
- Navy Type VI (Soft): Adecuado para aplicaciones que requieren grandes deformaciones mecánicas (DI)

4 Planteamiento del problema

La energía eólica representa un potencial importante para la generación de energía en nuestro país sin embargo la aplicación en zonas urbanas se ha limitado por las dimensiones de los aerogeneradores, el efecto estela que se produce, y otras limitaciones que hacen difícil su instalación en zonas urbanas.

5 Hipótesis

Los entornos urbanos son espacios en los que además de la energía solar, se pueden aprovechar otros tipos de energía a través de sistemas híbridos de recolección de energía. Los puentes peatonales son parte de la infraestructura urbana con el potencial para la implementación de sistemas de recolección eólica vibratoria debido a que en este tipo de infraestructura actúan simultáneamente ambos tipos de energía mecánica.

6 Objetivos

Objetivo general

Analizar las vibraciones mecánicas y el recurso eólico en diferentes zonas de los puentes peatonales para reconocer el potencial de generación de energía de generadores eólicos-vibratorios propuestos.

Objetivos específicos

- Visitar el puente peatonal de interés para conocer las dimensiones, inspección visual de las características físicas, percepción de las vibraciones y detalles adicionales que permitan generar una estrategia para el monitoreo del movimiento del puente.
- Analizar el recurso eólico de los puntos favorables para la determinación de la velocidad y vibraciones del prototipo del aerogenerador sin palas.
- Programar e implementar un código para una tarjeta de desarrollo Arduino que permita la utilización del sensor MPU6050
- Programar e implementar un código para una tarjeta de desarrollo Arduino que permita la utilización de un módulo para la lectura y escritura de una memoria MicroSD
- Programar e implementar un código para una tarjeta de desarrollo Arduino que permita la captura del voltaje generado por un transductor piezoeléctrico tipo disco

7 Metodología

7.1 Pruebas de prototipo de aerogenerador y del sensor

En el presente documento se muestra el estudio de un aerogenerador con material piezoeléctrico, en esta primera parte se realizó el análisis del prototipo (Figura 26) que se manejaría en el lugar de prueba (Puente peatonal), comenzando primero con pruebas para determinar si el funcionamiento es correcto y favorables para las siguientes pruebas.

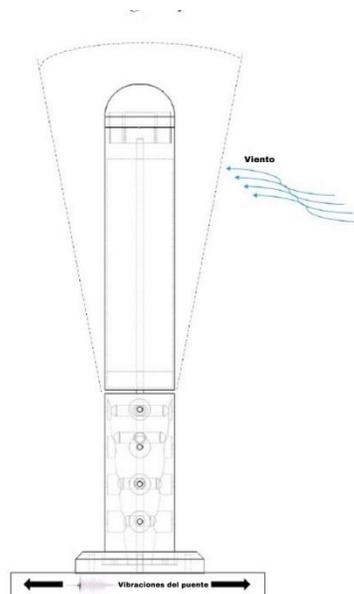


Figura 16 Prototipo de generador híbrido eólico-vibratorio

Primeramente, se crearon 3 placas PCB con Arduino Nano, Sensor MPU6050 Giroscopio acelerómetro y tarjeta de grabado en SD, la figura 44 muestra detalladamente esto.

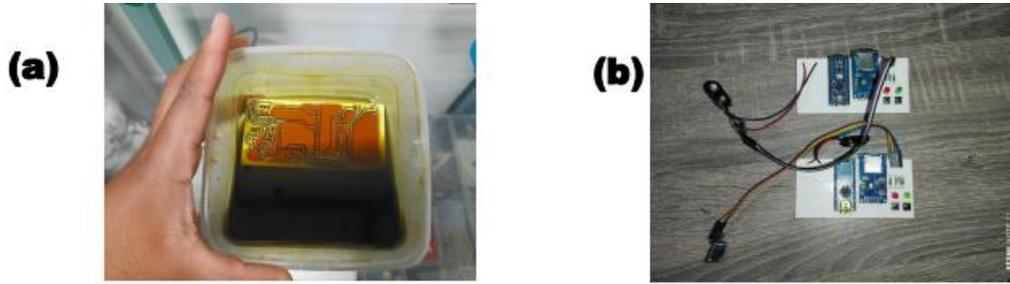
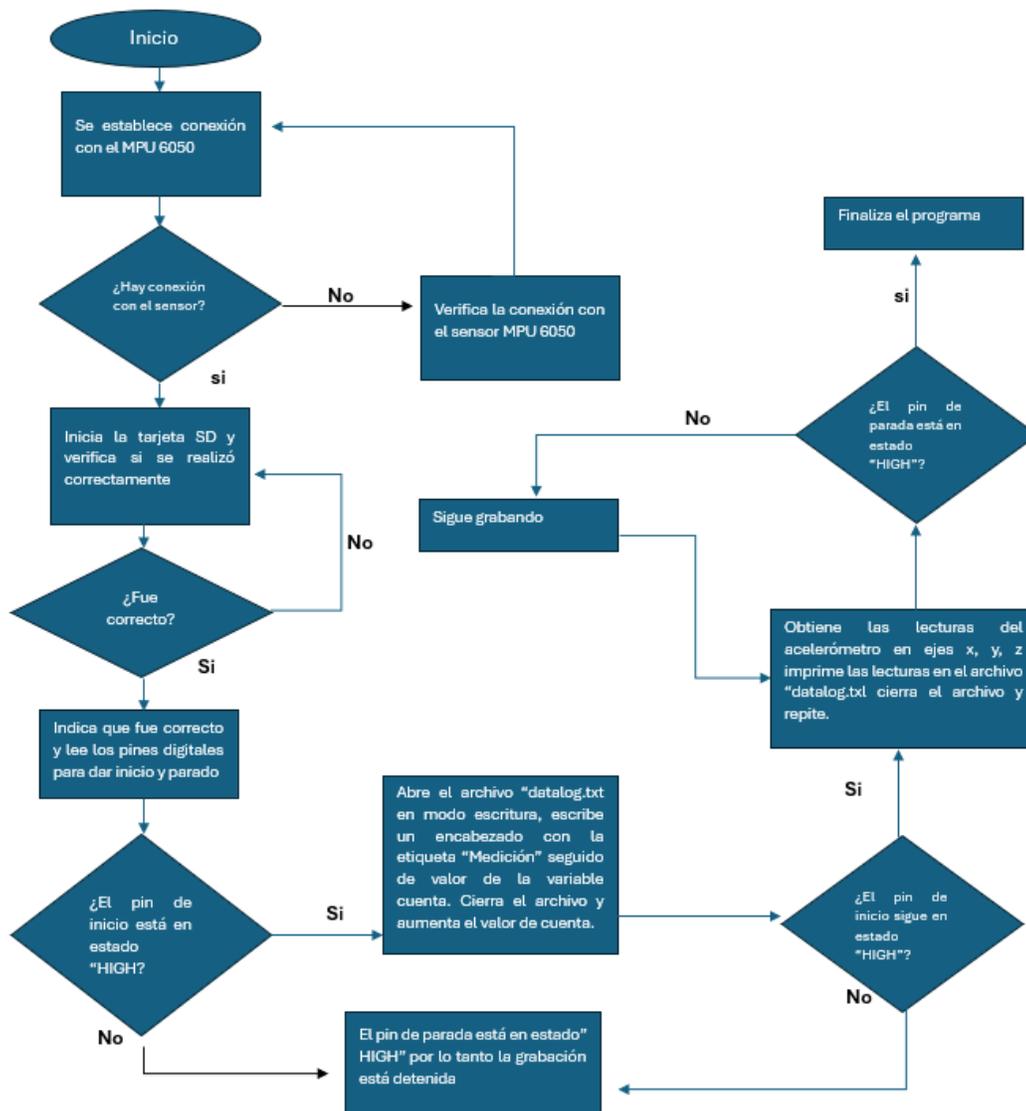


Figura 17 (a) Placa de baquelita en Cloruro Férrico. (b) Tarjetas de adquisición de datos.

A dichas placas se le grabó el programa de muestreo que toma datos cada 32 ms.



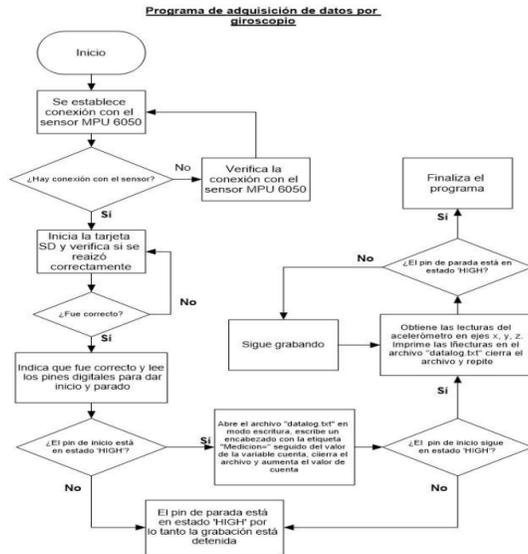


Figura 18 Diagrama de flujo de programa de monitoreo a través de sensor MPU 6050

7.1.1 Pruebas del sitio de estudio



Figura 19 Puente peatonal

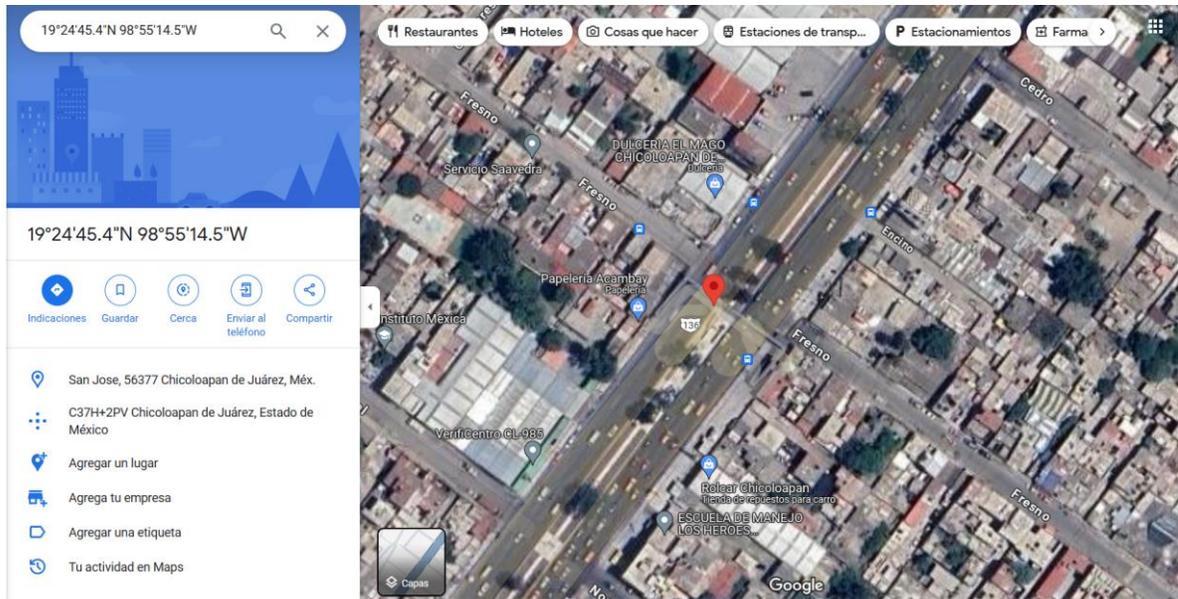


Figura 20 Ubicación del puente

La figura 21 muestra el esquema realizado en un software de diseño (AutoCAD) manejado como referencia para conocer las dimensiones del puente peatonal y ubicar los puntos de medición 1,2,3 y4

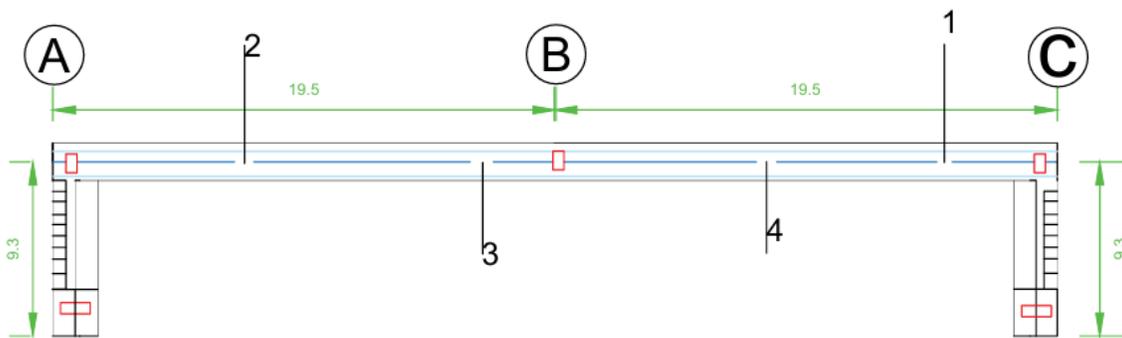


Figura 21 Esquema de puente peatonal de estudios y los 4 puntos de prueba para la adquisición de datos de vibración

Establecidos los puntos de estudio se prosiguió a realizar la siguiente etapa de este proyecto, basándonos en las vibraciones mecánicas del puente y con ello determinar la herramienta que nos servirá de manera aprovechable para medir las vibraciones mecánicas

Para ello, se decidió utilizar el módulo sensor MPU6050, el cual cuenta con un acelerómetro y giroscopio integrados de 3 ejes que pueden ser operados por una placa Arduino a través de comunicación i2c.

Que proporcionan datos de aceleración en los ejes X, Y Z, lo que nos permite comprender el movimiento de la estructura del puente peatonal a lo largo del tiempo. Para realizar el análisis de vibraciones del puente, se colocaron sensores verticalmente en diferentes áreas a lo largo de este.

En que se lleva a cabo el almacenamiento a través de un módulo en la placa Arduino que permite leer y escribir en la memoria MicroSD.

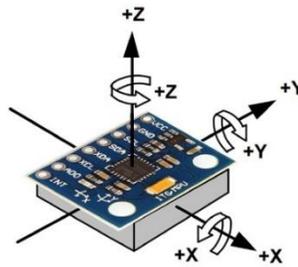


Figura 22 Sensor MPU6050

En este caso la técnica nos permitirá comprender la frecuencia de oscilación fundamental de las vibraciones mecánicas de un puente peatonal.

Con los datos obtenidos de cada medición se analizarán y trazarán, utilizando el software OriginLab.

7.2 Mediciones de prueba en laboratorio.

Por consiguiente, Por lo tanto, se realizaron las pruebas de los dispositivos en el laboratorio del tecnológico, para determinar cómo se comportaba el prototipo de aerogenerador con el sensor, para determinar las mediciones de vibración con relación al comportamiento del anemómetro



Figura 23 y 24 Mediciones en laboratorio

Después de realizar las primeras mediciones, se graficaron los datos obtenidos de las vibraciones en relación con el tiempo aproximado de un minuto cada gráfica; Estipulando cuál sería el intervalo de medición más favorable y que se modificaría para que las gráficas obtenidas entre la velocidad del viento y las vibraciones tengan mayor coincidencia.

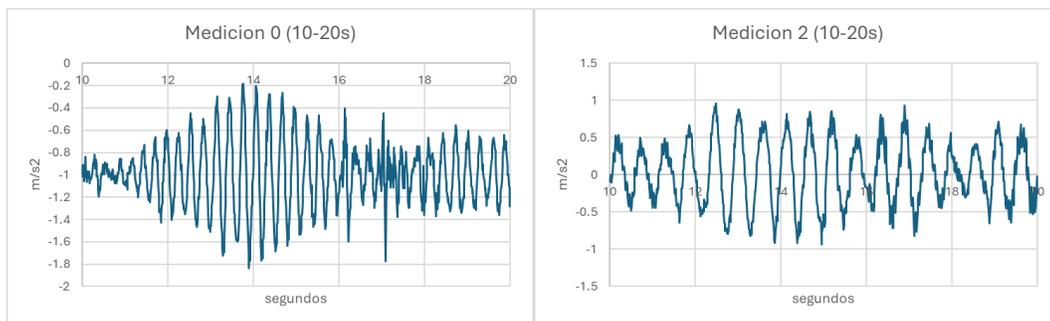


Figura 25 y 26 Graficas de vibraciones en intervalo de 10 seg. (prueba de laboratorio).

Con los resultados obtenidos en la primera prueba en el laboratorio se observó que si tenemos una variación en referencia a la velocidad del viento brindada en este caso por un ventilador donde el flujo de aire es variable. Por ello se realizaron dos pruebas más en donde se establecieron dos tipos de velocidades del flujo del viento para observar su comportamiento, con ello se determinaron los parámetros de medición respecto al tiempo, Adquiriendo un estudio más

claro de ambas velocidades tanto del viento variable, como de las vibraciones mecánicas que tendría el prototipo con el flujo de aire ejercido

7.3 Mediciones de prueba en sitio de estudio

Posterior a ello, se llevaron las placas a la ubicación de los puentes peatonales y se instalaron en ciertos puntos específicos, esto con la intención de identificar la frecuencia de resonancia de la estructura además de identificar modos de oscilación, así como interacción del entorno con la estructura.



Figura 27 y 28 Sentido de la vialidad en lado derecho para pruebas.

Ya localizado el punto donde se generó mayor obtención del flujo del aire y vibraciones del puente, se establece que de lado más aprovechables es el izquierdo para trabajar (Tabla 4), en el cual se establece mayor flujo de aire y vibraciones en el prototipo, tomando en consideración las vibraciones del puente.

Tabla 4 Velocidad promedio del viento en su ubicación

Nº Dato	Ubicación en el puente	Velocidad del viento registrado [m/s]
1	Grafica 1 lado derecho (Edo.Mex-CDMX)	1.54
2	Grafica 2 lado izquierdo (Edo.Mex-CDMX)	3.57
3	Grafica 3 lado izquierdo (CDMX-Edo.Mex)	2.6
4	Grafica 4 lado derecho (CDMX-Edo.Mex)	1.02

Nº Dato	Ubicación en el puente	Velocidad del viento registrado
1	Grafica 1 lado derecho (Edo.Mex-CDMX)	1.54
2	Grafica 2 lado izquierdo (Edo.Mex-CDMX)	3.57
3	Grafica 3 lado izquierdo (CDMX-Edo.Mex)	2.6
4	Grafica 4 lado derecho (CDMX-Edo.Mex)	1.02

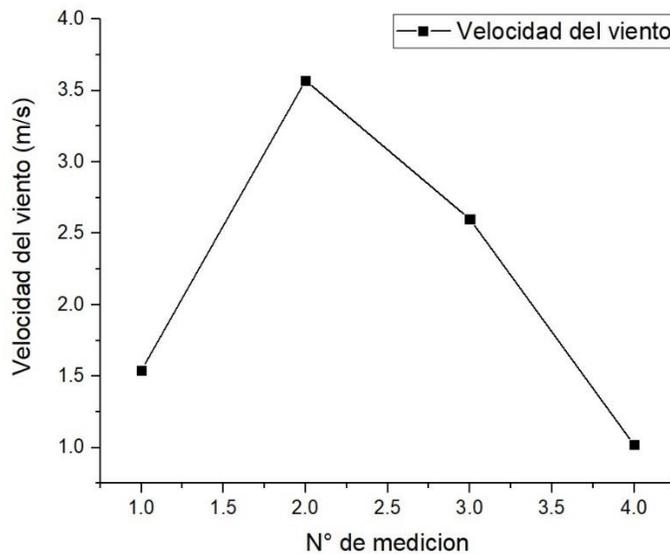


Figura 29 Gráfico de Promedios de Velocidad del viento

Con la determinación del promedio que tenemos de las velocidades registradas se determina cuales el sentido de mayor producción del potencial eólico, para esto se usó la fórmula de Betz para determinar este potencial eólico.

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3$$

P=Potencial eólico[W], ρ =Densidad del aire estándar A= Área de estudio[m]
V=Velocidad del viento [m/s]

Determinando así el punto pico de la producción de potencia que se tiene, así como el sentido y ubicación de las tomas realizadas.

$$P = \frac{1}{2} (1.25)(1)(1.54)^3 = 2.28 \text{ W} \quad (1)$$

$$P = \frac{1}{2} (1.25)(1)(3.57)^3 = 28.44 \text{ W} \quad (2)$$

$$P = \frac{1}{2} (1.25)(1)(2.6)^3 = 10.99 \text{ W} \quad (3)$$

$$P = \frac{1}{2}(1.25)(1)(1.02)^3 = 0.66 \text{ W} \quad (4)$$

Realizado la medición de los puntos de estudio junto con los promedios obtenidos en cada uno de ellos se utilizó la fórmula de Weibull para determinar la frecuencia acumulada con respecto a la velocidad del viento.

$$F(x) = 1 - e^{-(x\lambda)^k}$$

Para el empleo de la ecuación en frecuencia acumulada, la ecuación se transforma en la siguiente:

$$\ln(-\ln(1 - F(x))) = k \ln x - k \ln \lambda$$

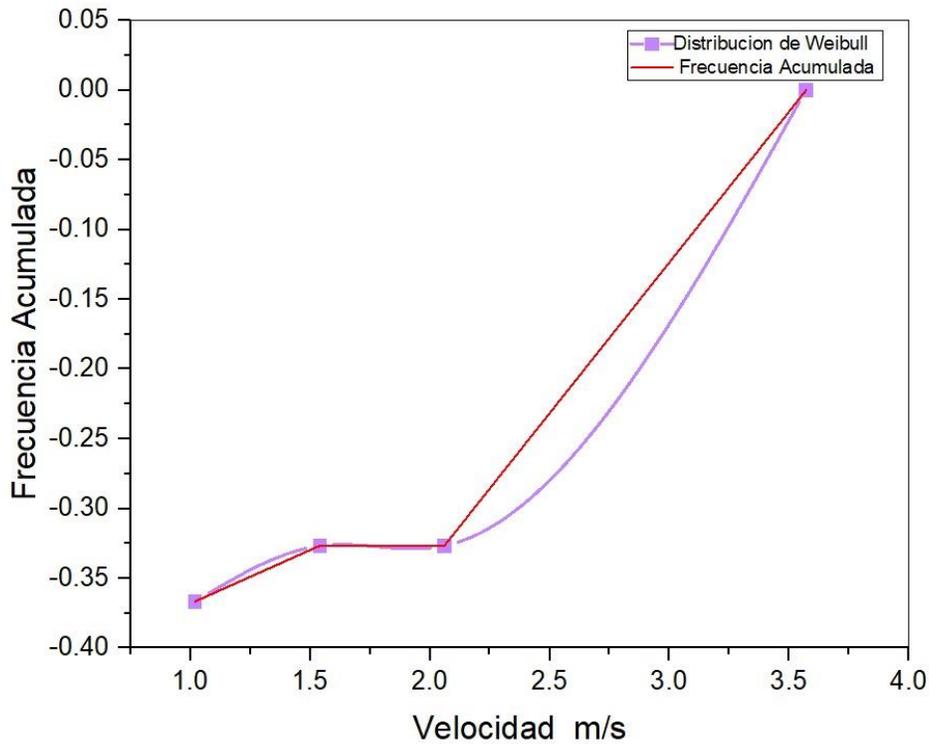
Donde:

$\ln(-\ln(1 - F(x))) \rightarrow \mathbf{Inx} \rightarrow y =$ Valor de la frecuencia acumulada

$k \ln x \rightarrow m \times x =$ Pendiente (k) \times Valor de x (velocidad viento)

$k \ln \lambda \rightarrow b =$ Complemento de la ecuación de la pendiente

Introduciendo en Origin Lab, los datos obtenidos se graficaron con la ecuación de la distribución de Weibull, obteniendo lo siguiente:



Con respecto a las observaciones y mediciones de las frecuencias obtenidas de las mediciones de ambos dispositivos, se realizaron las pruebas en el sitio de estudio, y con el estudio previo de la vialidad se colocó el prototipo del aerogenerador y de la placa con el sensor para que empezara a marcar los datos del lado izquierdo, para poder graficar los datos obtenidos y como es que interactúa la placa del registro ante las vibraciones por medio de la estructura del puente y de la vialidad automovilística.

Con respecto a las observaciones de las mediciones de ambos dispositivos se realizaron las pruebas en el sitio de estudio, y con el estudio previo de la vialidad se colocó el prototipo del aerogenerador y de la placa con el sensor para que empezara a marcar los datos del lado izquierdo para poder graficar los datos obtenidos y como es que interactúa la placa del registro ante las vibraciones por medio de la estructura del puente y de la vialidad automovilística.



Figura 30,31,32 Colocación de los dispositivos para medición.

Estableciendo las direcciones con los datos de pruebas que se hicieron, se realizaron las gráficas de ambos sentidos, obteniendo así los datos de las vibraciones que se tienen tanto en el área del puente con respecto a las vibraciones que tiene el aerogenerador en relación con el flujo del viento. Registrando su aceleración en un tiempo determinado, estudiando sus parámetros de medida en metros por segundo.

En relación con los datos obtenidos se realizó un suavizado en estos para tener una mejor visibilidad de la tendencia que se tiene en la velocidad del viento con respecto a las vibraciones y algún otro factor que influya en este, como podrían ser alteraciones de ruido y movimientos peatonales.

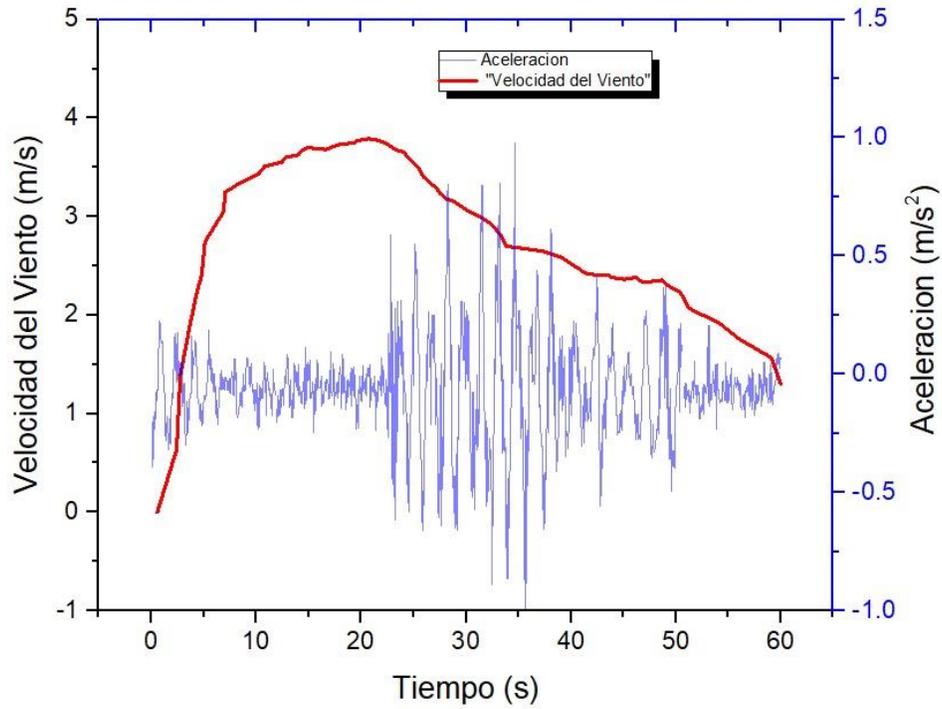


Figura 33 Mediciones de velocidad y aceleración lado derecho dirección Estado-Ciudad de México

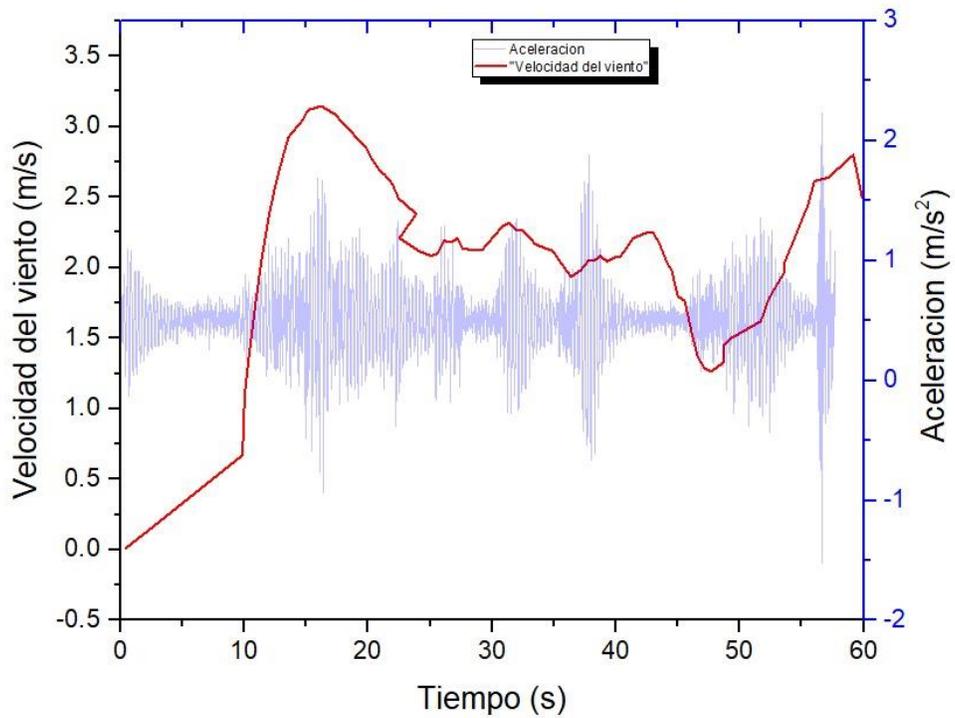


Figura 34 Mediciones de velocidad y aceleración lado derecho dirección Ciudad-Estado de México.

Seguidamente colocamos el anemómetro del lado izquierdo del puente para medir la velocidad del viento con respecto al flujo de los carros para observar los registros de la velocidad y vibraciones que se generan.



Figura 35,36 Sentido de la vialidad en lado izquierdo para pruebas de anemómetro.

Consecutivamente colocamos ya los dispositivos, como sería el prototipo con las placas de los sensores para que se empezara a medir las vibraciones y la aceleración que registre en relación con el flujo de aire y de los autos en determinado tiempo de estudio.



Figura 37,38 Colocación de prototipo lado izquierdo

8 Resultados

8.1 Gráficos obtenidos de las pruebas en laboratorio

Para la primera prueba se realizó la gráfica con el programa OriginLab, donde se estableció un flujo constante de aire con la velocidad más alta del ventilador. Para que con los datos de la prueba se observe con mayor claridad y concordancia las velocidades y vibraciones que tiene el prototipo con este tipo de velocidad constante.

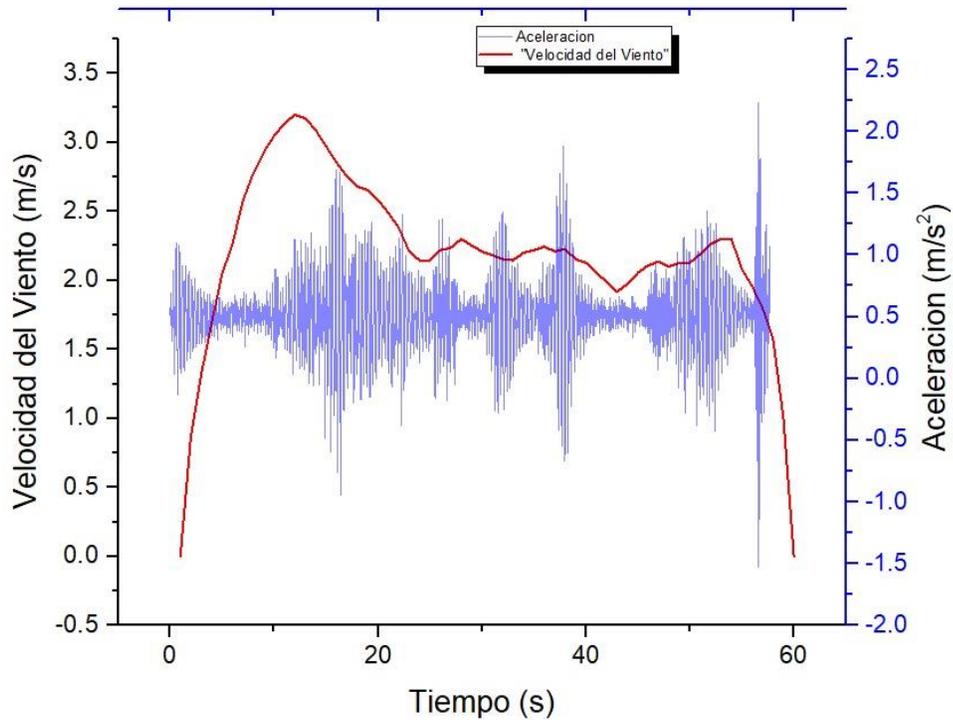


Figura 39 Prueba Realizada en el laboratorio de la escuela, estableciendo un flujo máximo del aire proporcionado.

Continuando con la siguiente velocidad, pero esta vez con un flujo de aire medio, para ver si las velocidades tendrían alguna diferencia y si tendrían las mismas velocidades con respecto a las vibraciones del prototipo, generando una variación de velocidad del viento registrada y de vibraciones registradas en base a la prueba anterior.

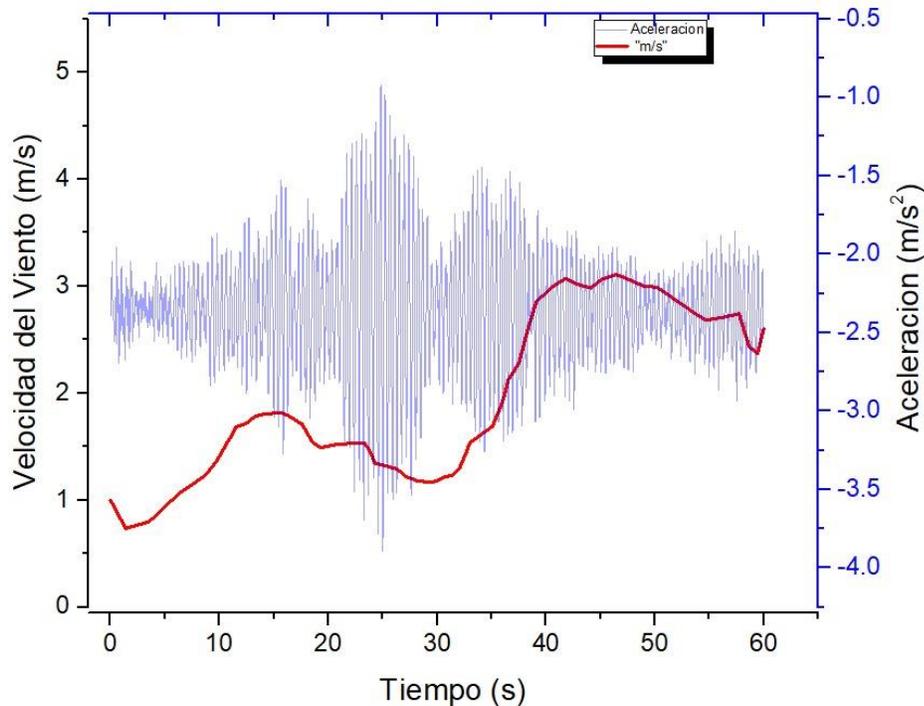


Figura 40 Prueba Realizada en el laboratorio de la escuela, estableciendo un flujo medio del aire proporcionado.

Para conclusión de las primeras pruebas de laboratorio se ha observado como es que se va variando tanto la velocidad del viento registrado con respecto a la velocidad de vibración, así como las variaciones que se tiene que registrar de las diferentes velocidades en las que se desarrolló el primer estudio.

Teniendo en cuenta las variaciones del flujo de aire proporcionado se realizó una segunda prueba esto para determinar el funcionamiento correcto del prototipo y tengamos un estudio más claro. Con ello en esta segunda prueba se implementaron tres velocidades en el flujo de aire, para ver cómo se comportaría en menores cantidades de aire el aerogenerador y como sería la generación mediante vibraciones.

Para la primera velocidad se determinó que de igual forma sea de manera constante el flujo del aire máximo con una distancia determinada, para poder graficar su

comportamiento de las velocidades del aire y de las vibraciones, así como el estudio de su aceleración que tiene en un tiempo determinado.

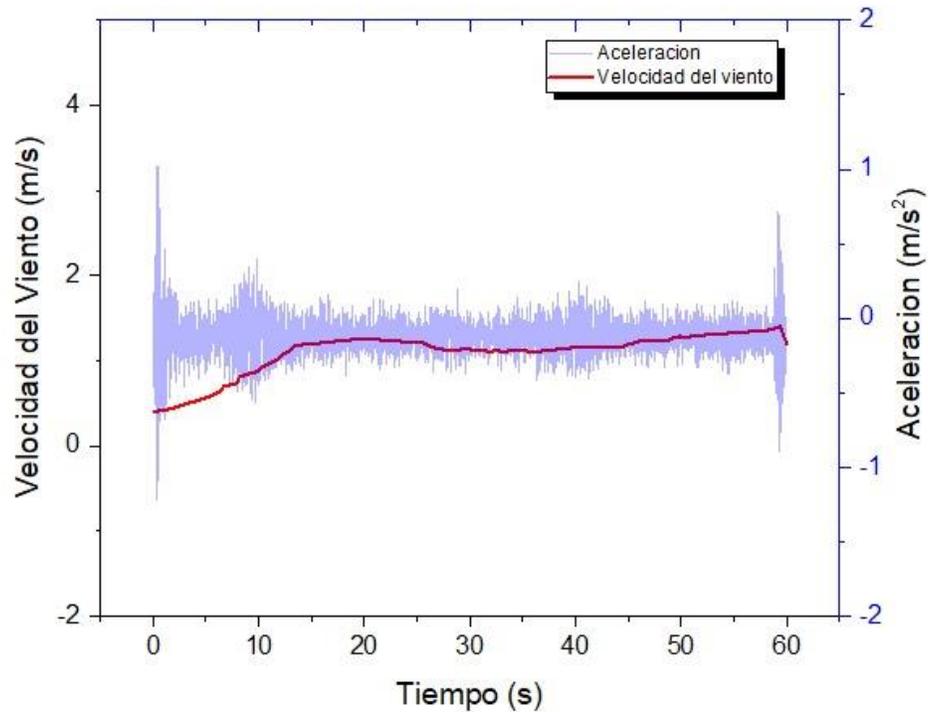


Figura 41 Prueba Realizada en el laboratorio de la escuela, estableciendo un flujo mínimo del aire proporcionado.

Por consiguiente, se pasó a la siguiente velocidad con un flujo de aire media para de la misma forma graficar el comportamiento que se tiene de lo que se está estudiando que sería las vibraciones y la velocidad del viento con el mismo tiempo y la misma distancia que la prueba anterior.

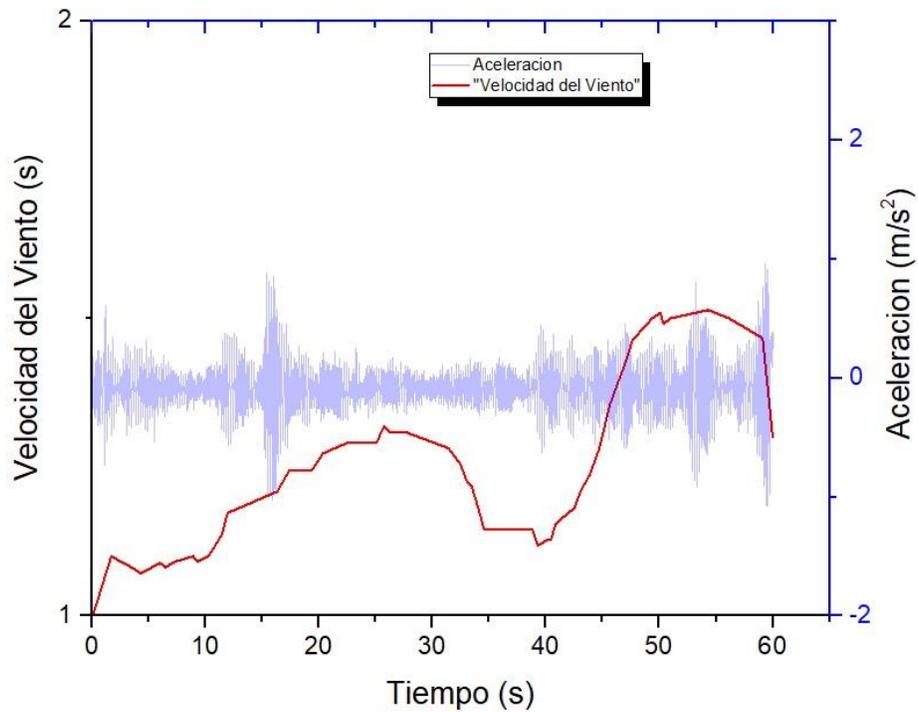


Figura 42 Prueba Realizada en el laboratorio de la escuela, estableciendo un flujo medio de aire proporcionado constantemente.

Para concluir esta prueba y comparar los datos para observar su comportamiento se realizó la prueba con una velocidad de flujo máximo de aire, con las mismas características de tiempo y distancia, con ello observaremos su comportamiento de vibraciones y la aceleración que registra.

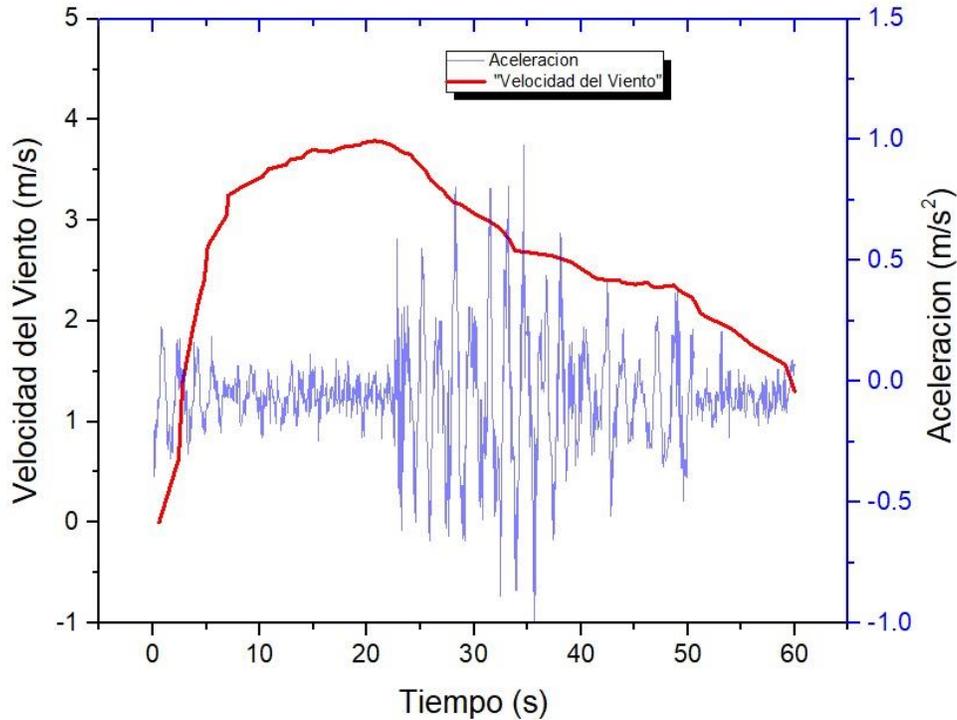


Figura 43 Prueba Realizada en el laboratorio de la escuela, estableciendo un flujo máximo de aire proporcionado constantemente.

En base a los resultados obtenidos se determinó el funcionamiento correcto del prototipo, así como la placa para las mediciones de vibraciones, por lo que se indicó que se continuara con las pruebas siguientes ahora en el lugar de estudio, para determinar si habría algún problema en dicho lugar de estudio y cuáles serían nuestros resultados obtenidos para que el estudio sea de una manera aceptable y favorable a la sociedad.

8.2 Gráficos obtenidos de las pruebas en lugar de estudio.

En relación con las mediciones en laboratorio, se realizaron las pruebas ahora en el lugar de estudio, para ver el comportamiento que tiene el prototipo en referencia al flujo del viento que se tiene y como es que se comportan las vibraciones con la estructura del puente.

En base a esto se realizaron las pruebas de distintos puntos del puente, para ver su comportamiento en varios puntos, al igual que observar y analizar los obstáculos que tiene el mismo puente. Comenzamos midiendo el flujo del viento con respecto a la dirección de los autos para observar si tienen algún impacto en los datos, teniendo como resultado las gráficas de la velocidad referente a un tiempo establecido de prueba.

Los datos a continuación son del lado derecho del puente, con la circulación de los carros en referencia a el estado de México y la dirección a la ciudad, con ello determinamos cual es la mejor posición de sentido del anemómetro.

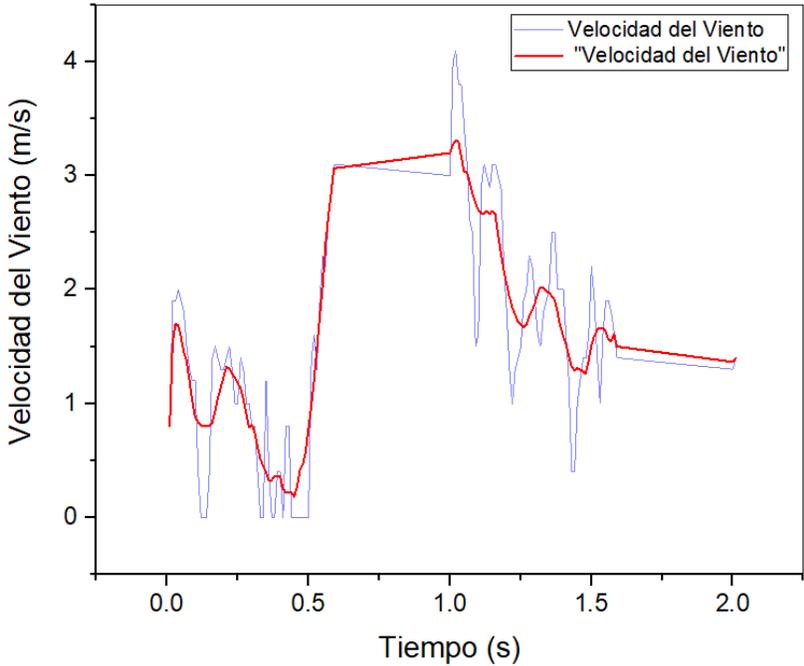


Figura 44 Prueba 9 Realizada en el puente, midiendo la velocidad generada en el puente con respecto a la circulación de los automóviles de lado Derecho.

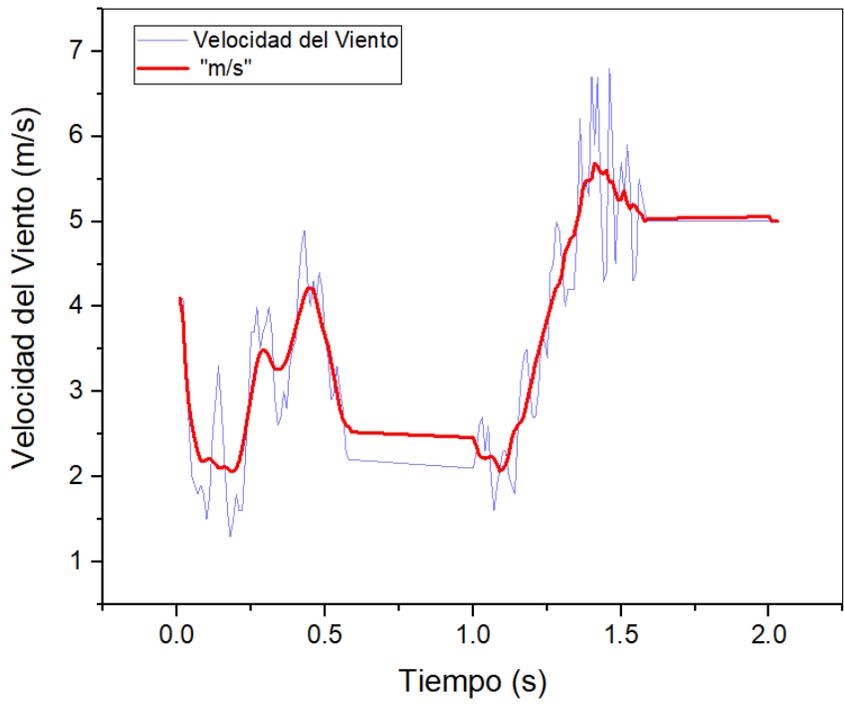


Figura 45 Prueba Realizada en el puente, la velocidad generada con respecto a la circulación de los automóviles lado Derecho, circulación Texcoco-Reyes

Concluyendo con las pruebas del aire en el lado derecho, pasamos a realizar ahora en el lado izquierdo del puente mismas mediciones del flujo del aire y de las vibraciones que generan con sentido de los carros en dirección al estado y la ciudad

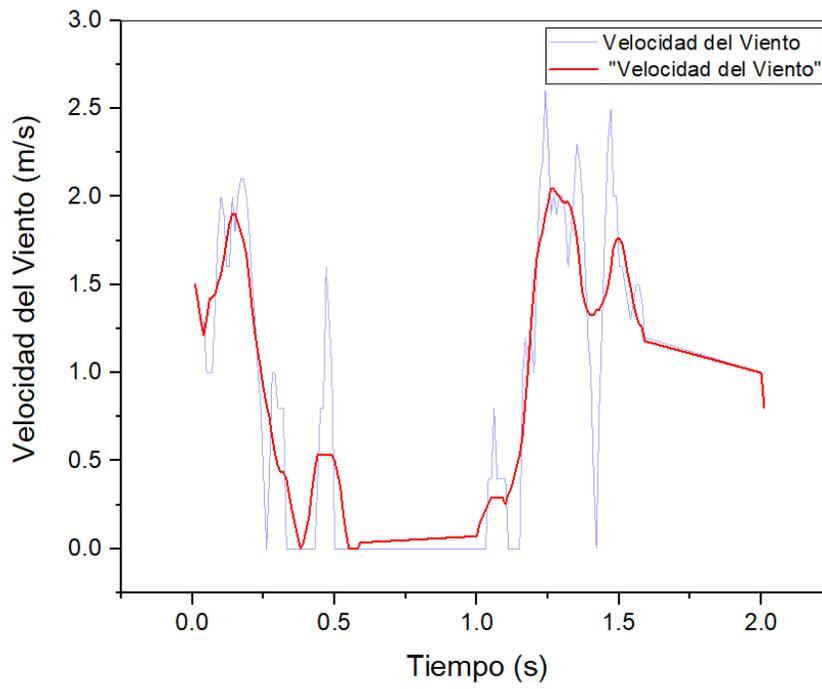


Figura 46 Realizada en el puente, midiendo la velocidad generada con respecto a la circulación de los automóviles de lado izquierdo.

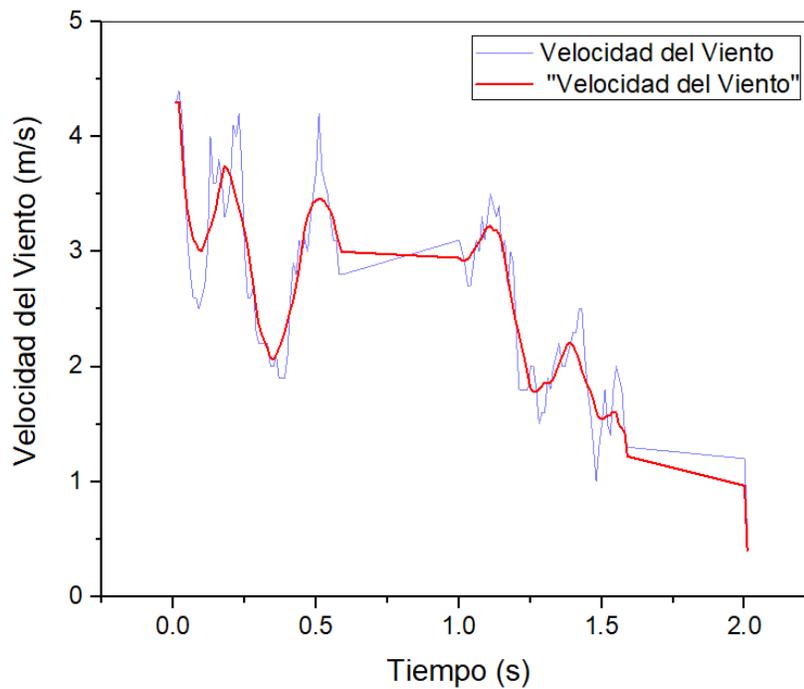


Figura 47 Realizada en el puente, la velocidad generada con respecto de la circulación de los automóviles lado Izquierdo, circulación Texcoco-Reyes

Observando las mediciones de ambos sentidos y los diferentes puntos de prueba, definimos cual sería el mejor punto para realizar las pruebas del estudio del prototipo, si tuviera el sentido de los carros en dirección a la ciudad de México. con el flujo de carros que se muestra.

Con respecto a las pruebas ya realizadas en la investigación y tomando en cuenta las mediciones obtenidas, se hace del conocimiento que se presenta una mayor captación de viento en él lo que se representa como la mitad del puente.

8.3 Gráficos de los puntos establecidos en el lugar de estudio

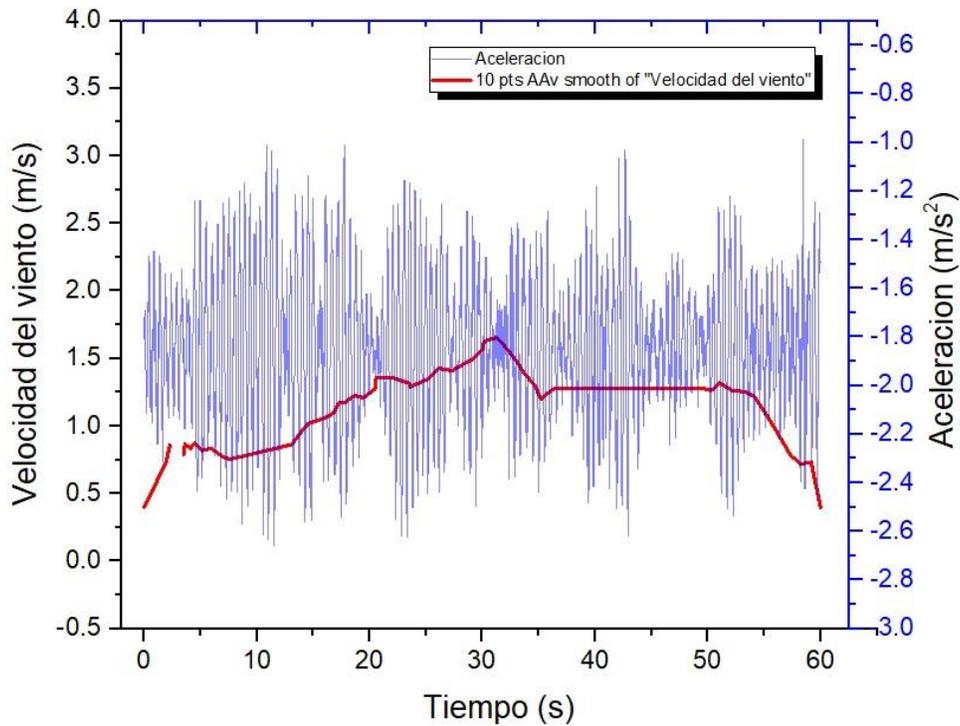


Figura 48 Grafico de velocidad y vibraciones lado derecho prueba final

De igual manera se puede ver que en la prueba que se realizó de lado Derecho con dirección Texcoco- Reyes se puede representar más fluides del viento de una manera constante, esto también representando la cuestión que se presentaron más vibraciones del prototipo en el que es evidente por su comportamiento que influyen la circulación constante que se generan por los autos que transitan en la carretera.

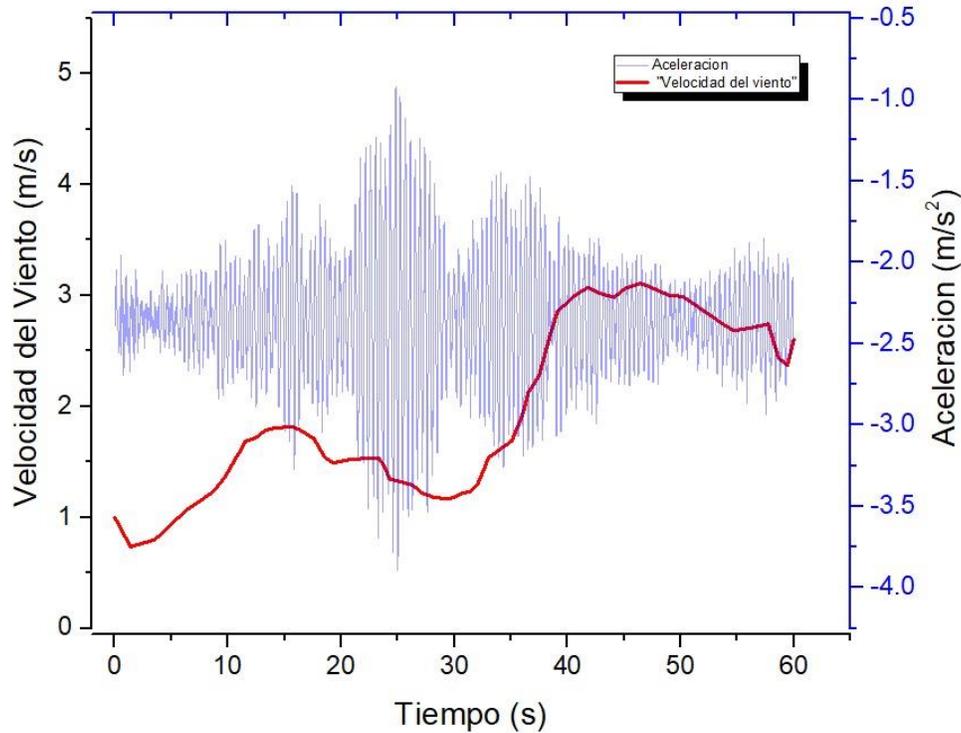


Figura 49 Gráfico de velocidad y vibraciones lado izquierdo prueba final

Estableciendo una velocidad inferior por cuestión de que no se encuentra en ninguno de los dos puntos del puente en el que se pueda generar una flujos del aire con respecto a que se encuentra obstrucción por iluminaria publica y árboles, se puede presentar una mayor vibración del prototipo esto con respecto a la estructura del puente en el que se encuentra con algunas irregularidades en esta misma.

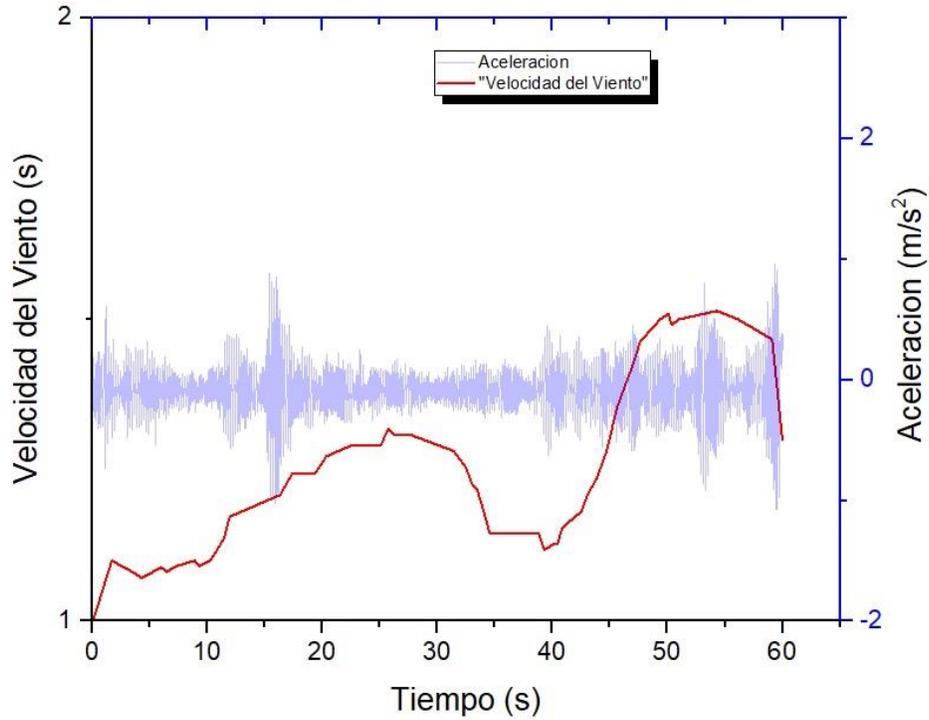


Figura 50 Grafico de lado izquierdo de flujo vial

Estableciendo una colocación del prototipo de lado izquierdo del puente con dirección Reyes-Textcoco en el que se presenta menos fluides de los carros, esto debido al tráfico que se produce en esa dirección, con ello también se representa una vibración del prototipo menor y una velocidad del viento menor, estableciendo que el lado derecho del puente es una de las fuentes de captación del viento y de vibraciones más aprovechables.

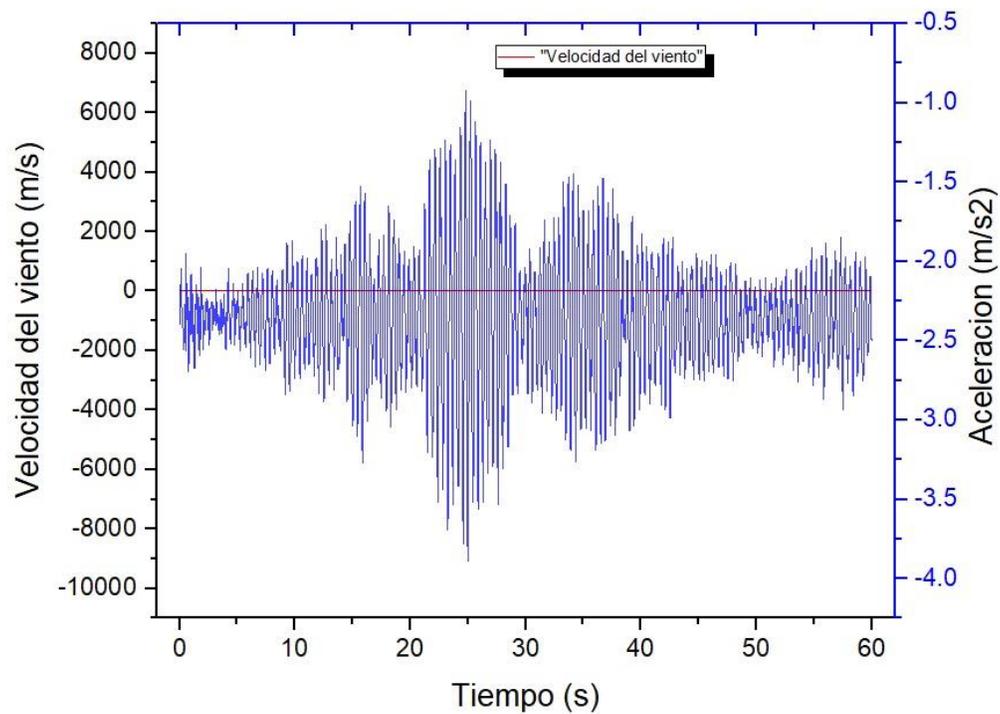


Figura 51 Grafico de flujo de aire y vibraciones

Obtenido los datos graficamos en el programa para estudiar los datos y dar una relacion de ambos con respecto a su ubicación,teniendo que como observacion que encontramos de ese lado del puente encontramos letreros de la comunidad teniendo con ello un estudio del flujo de aire menor al otro punto del estudio,impidiendo esto que sea una relacion de una mejor manera entre la velocidad que est ateniendo el aire y las vibraciones que se llegaron a presentar.

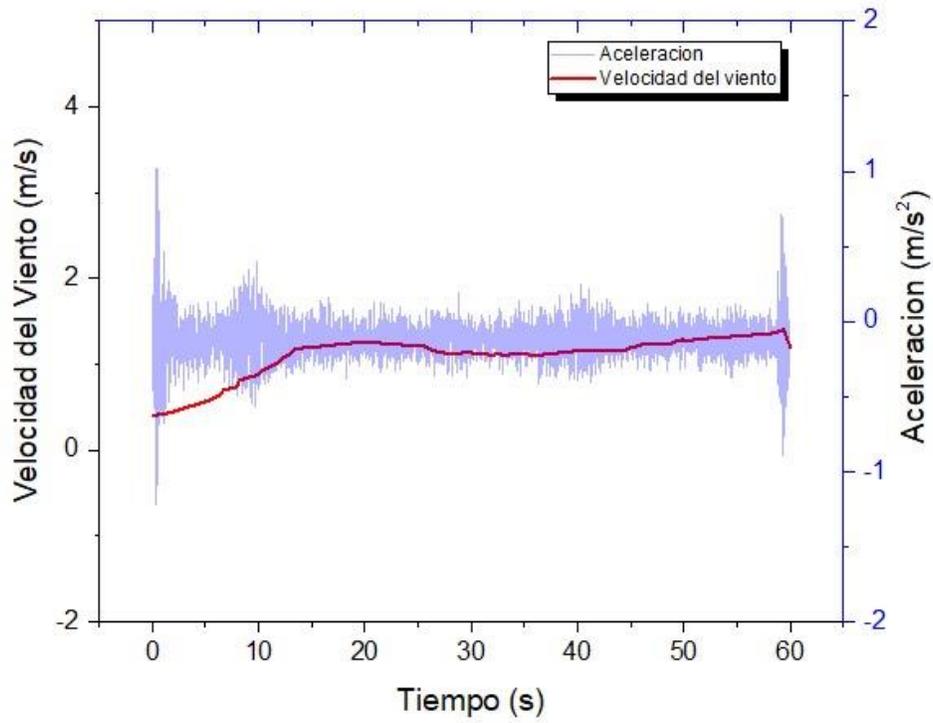


Figura 52 Mediciones de velocidad y aceleración lado izquierdo dirección Estado-Ciudad de México

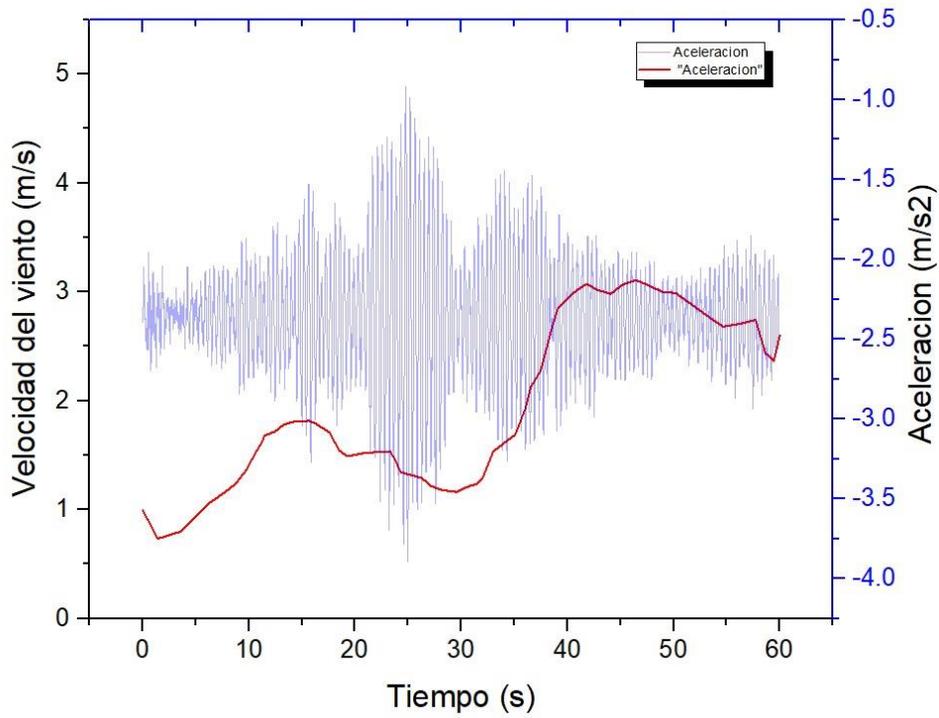


Figura 53 Mediciones de velocidad y aceleración lado izquierdo dirección Ciudad-Estado de México

8.4 *Gráfico del punto de estudio con mayor potencial eólico*

Teniendo como resultado del potencial eólico en Watts de los promedios por medio de la fórmula de Betz observados en la siguiente tabla.

Tabla 5 Datos de potencial eólico con valores promedios de la velocidad del viento

Ubicación en el puente	Velocidad promedio del viento registrado [m/s]	Potencial eolica promedio [W]
Grafica 1 lado derecho	1.54	2.28
Grafica 2 lado izquierdo	3.57	28.44
Grafica 3 lado izquierdo	2.6	10.99
Grafica 4 lado derecho	1.02	0.66

Ubicación en el puente	Velocidad promedio del viento registrado	Potencia eolica promedio
Grafica 1 lado derecho	1.54	2.28
Grafica 2 lado izquierdo	3.57	28.44
Grafica 3 lado izquierdo	2.6	10.99
Grafica 4 lado derecho	1.02	0.66

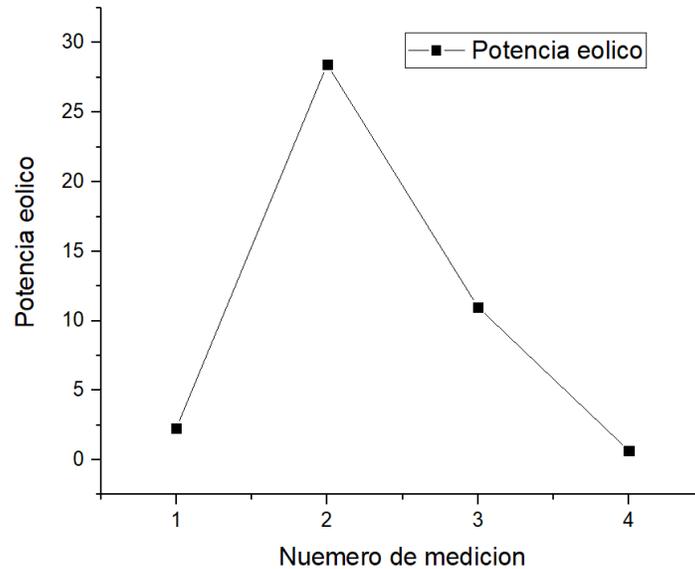


Figura 54 Grafico de potencial eólico registrado

Concluyendo con las pruebas que tenemos mejor estabilidad entre el flujo del aire y las vibraciones del lado derecho del puente, instalando el anemómetro en sentido a la circulación de los autos ya que es un factor que, si influye, al igual que influye el flujo de los autos para las velocidades y vibraciones del puente, ya que con mayor circulación se eleva el flujo del aire y tenemos vibraciones del puente por medio del movimiento de este.

Como de tal forma también se tiene que tomar en cuenta la circulación de la gente que llega a tener el puente, debido a que con esto se genera mayor aceleración de vibraciones en el tiempo de pruebas, sin que el flujo de viento este presente en ese momento. Teniendo con ello de manera positiva ese factor de generación de energía sin que afecte a la sociedad y tenido un estudio más claro de este tipo de recolección de energía.

9 Conclusiones

Tomando en cuenta los resultados que se presentaron se establece que la generación de energía eólica con aerogeneradores comerciales puede ser modificada con el fin de generar una nueva fuente de energía, esto llevándose a cabo con la modificación de los prototipos en los que se pueda generar una recaudación de energía de una manera simultánea con otra. Por lo que se establece que las vibraciones mecánicas de los puentes generadas por la oscilación del movimiento.

En las que también se establece que las estructuras del diseño, materiales y colocación de los puentes pueden ser factores importantes para la obtención de datos. Dichos datos obtenidos a través de sensores MPU6050 conllevando a la interpretación de datos desarrollados por un sistema de programación generando un informe de la generación del comando para la utilización de este tipo de sensores.

Así mismo estableciendo un diseño conciso y diferente de un aerogenerador comercial, especificando la obtención de un sistema híbrido, con el fin de la obtención de energía de una manera simultánea para el aprovechamiento completo de esta.

10 Referencias

- [1] “¿Qué son las energías renovables? | National Geographic.” Accessed: jul. 09, 2024. [Online]. Available: <https://www.nationalgeographicla.com/medio-ambiente/2022/11/que-son-las-energias-renovables>
- [2] “Tipos de energías renovables - Factorenergia.” Accessed: jul. 09, 2024. [Online]. Available: <https://www.factorenergia.com/es/blog/noticias/energias-renovables-caracteristicas-tipos-nuevos-retos/>
- [3] “Energía Eólica: qué es, cómo funciona y sus ventajas - Iberdrola.” Accessed: jul. 09, 2024. [Online]. Available: <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/energia-eolica>
- [4] Proyecto, “La Energía Eólica En MÉXICO Proyecto financiado por”, Accessed: jul. 09, 2024. [Online]. Available: www.tech4cdm.com
- [5] E. Caldera, M. Prólogo, and E. A. R. Mejía, “INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE LA ENERGÍA EÓLICA EN MÉXICO,” 2006.
- [6] L. Fernando and amiño Hernández ASESOR Ricardo Fernández del Busto Ezeta México, “INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY CAMPUS CIUDAD DE MÉXICO ESCUELA DE DISEÑO INGENIERÍA Y AHQUITECTURA DEF>ARTAMENTO DE INGENIERÍA MECATRÓNICA INGENERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA Biblioteca,” 2014.
- [7] “La energía eólica off-shore y los aerogeneradores en el mar | Twenergy.” Accessed: jul. 09, 2024. [Online]. Available: <https://twenergy.com/eficiencia-energetica/almacenamiento-de-energia/sistemas-de-almacenamiento-energetico-para-energia-eolica-off-shore-2469/>
- [8] “Vortex Bladeless | Eólica sin Palas.” Accessed: jul. 09, 2024. [Online]. Available: <https://vortexbladeless.com/es/>

- [9] “Aerogeneradores sin aspas, innovación eólica | Repsol.” Accessed: jul. 09, 2024. [Online]. Available: <https://www.repsol.com/es/energia-futuro/futuro-planeta/aerogeneradores-sin-aspas/index.cshtml>
- [10] “La importancia de las energías renovables | ACCIONA | BUSINESS AS UNUSUAL.” Accessed: jul. 09, 2024. [Online]. Available: https://www.acciona.com/es/energias-renovables/?_adin=02021864894
- [11] J. Jia, X. Shan, D. Upadrashta, T. Xie, Y. Yang, and R. Song, “Modeling and Analysis of Upright Piezoelectric Energy Harvester under Aerodynamic Vortex-induced Vibration,” *Micromachines* 2018, Vol. 9, Page 667, vol. 9, no. 12, p. 667, Dec. 2018, doi: 10.3390/MI9120667.
- [12] R. Ahmed, F. Mir, and S. Banerjee, “A review on energy harvesting approaches for renewable energies from ambient vibrations and acoustic waves using piezoelectricity,” *Smart Mater Struct*, vol. 26, no. 8, p. 085031, jul. 2017, doi: 10.1088/1361-665X/AA7BFB.
- [13] I. Repiso López, “Diseño y ensayo de una turbina sin aspas,” 2023, Accessed: jul. 09, 2024. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/10630/26431>
- [14] J. Francisco and Q. Rojas, “Diseño y análisis CFD de guías internas de flujo para una turbina banki adaptada a un recurso mareomotriz,” 2016, Accessed: jul. 09, 2024. [Online]. Available: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/139762>
- [15] “(PDF) ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL DE LA ENERGÍA EÓLICA EN MÉXICO Y PERSPECTIVAS DE CRECIMIENTO.” Accessed: jul. 09, 2024. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/324656968_ANALISIS_DE_LA_SITUACION_ACTUAL_DE_LA_ENERGIA_EOLICA_EN_MEXICO_Y_PERSPECTIVAS_DE_CRECIMIENTO
- [16] Viaintermedia.com, “Energías Renovables, el periodismo de las energías limpias.”

- [17] "MECAPEDIA • Valor de pico." Accessed: jul. 09, 2024. [Online]. Available: https://www.mecapedia.uji.es/pages/valor_de_pico.html
- [18] "Calculadora del valor eficaz (RMS), pico a pico y máximo de una onda senoidal." Accessed: jul. 09, 2024. [Online]. Available: <https://www.herramientasingeneria.com/onlinecalc/spa/electronica/valor-eficaz.html>
- [19] J. Ferrer I Ferrer, D. Joan, and A. M. Mora, "Caracterización de sensores piezoeléctricos y capas de adaptación (matching layer) para detectores de partículas tipo PICO' TESIS DE MASTER".
- [20] "Vista de Editorial." Accessed: jul. 09, 2024. [Online]. Available: <http://revistas.ustatunja.edu.co/index.php/lingenieux/article/view/1839/1638>
- [21] I. Calderón González, "Modelo matemático y simulación de un aerogenerador sin aspas," <http://alejandria.ufps.edu.co/descargas/tesis/1121261.pdf>, 2020, Accessed: jul. 09, 2024. [Online]. Available: <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/3707077>
- [22] "RETSscreen." Accessed: Aug. 18, 2024. [Online]. Available: <https://natural-resources.canada.ca/maps-tools-and-publications/tools/modelling-tools/modelling-tools/retscreen/7465>
- [23] "Energías Renovables, el periodismo de las energías limpias." Accessed: Aug. 18, 2024. [Online]. Available: <https://www.energias-renovables.com/>
- [24] "Aerogenerador sin aspas, ¿qué es y cómo funciona? - Energia Evolucionaria." Accessed: jul. 31, 2024. [Online]. Available: <https://energiaevolucionaria.org/energias-renovables/eolica/aerogeneradores/sin-aspas/>
- [25] T. Li and P. S. Lee, "Piezoelectric Energy Harvesting Technology: From Materials, Structures, to Applications," *Small Struct*, vol. 3, no. 3, p. 2100128, Mar. 2022, doi: 10.1002/SSTR.202100128.

- [26] “Offshore Wind: Una nueva tendencia en energía eólica - Global Energy.” Accessed: jul. 09, 2024. [Online]. Available: <https://globalenergy.mx/noticias-especiales/columnas/offshore-wind-una-nueva-tendencia-en-energia-eolica/>
- [27] “El futuro de las tecnologías offshore.” Accessed: jul. 09, 2024. [Online]. Available: <https://www.siemensgamesa.com/es-es/descubrir/revista/2021/03/siemens-gamesa-future-offshore-wind-technology>
- [28] S. Fernando, “Laboratorio 4-Departamento de Física-Prof”.
- [29] Y. Li, X. Shen, and Y. Chen, “Design, experiment and verification of a refined resonance method for property measurement of piezoelectric stack,” *Smart Mater Struct*, vol. 28, no. 1, p. 015033, Dec. 2018, doi: 10.1088/1361-665X/AAF49E.
- [30] “Transductores piezoeléctricos | Power-MI.” Accessed: jul. 09, 2024. [Online]. Available: <https://power-mi.com/es/content/transductores-piezoel%C3%A9ctricos>
- [31] “▷ Piezoelectricidad.” Accessed: jul. 09, 2024. [Online]. Available: <https://www.ingenierizando.com/electronica/piezoelectricidad/>
- [32] S. W. Mahon, D. Moloney, F. Lowrie, and A. R. Bowles, “Stress Dependence of the Piezoelectric, Dielectric and Elastic Properties of PZT Ceramics,” *Piezoelectric Materials: Advances in Science, Technology and Applications*, pp. 159–168, 2000, doi: 10.1007/978-94-011-4094-2_17.
- [33] A. Javier and I. García, “E-STEP: GENERADOR PIEZOELÉCTRICO,” 2012.
- [34] “Dspace.” Accessed: jul. 09, 2024. [Online]. Available: <https://cybertesis.unmsm.edu.pe/item/3aa11d62-5fdc-4577-b44a-132bdcb6b65f>
- [35] B. Jiménez, “Cerámica y Vidrio”.

11. Anexos

PRN-11040/1105405K DATE:2018.05.26 REV.1

UNI-T

UT363 BT

Mini Anemometer(Bluetooth Version) Operating Manual

1. Introduction

UT363 BT with Bluetooth function is a stable, safe, reliable mini digital anemometer, widely used in mining, electric, iron and steel, petrochemical, energy-saving, navigation, fan manufacturing, exhaust ventilation, sporting and many more industries.

This operating manual includes relevant safety information and warnings. Please read this manual carefully and observe all the cautions strictly.

Warning:

Before using the product, please read the operation safety rules carefully.

2. Out of the Box

Open the packing box and take out the meter. Please check carefully if any items below are missing or damaged.

1. Blister _____ 1
2. Operating manual _____ 1

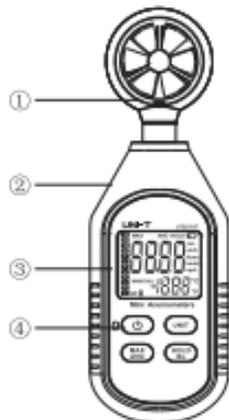
3. Operation Safety Rules

1. Please check the meter and the accessories before using and beware of any damage or abnormal phenomenon. If you find the case is damaged or the LCD shows nothing, or you consider that the meter could not work properly anymore, please stop using it.
2. Observe the operating instructions while measuring.
3. Do not open the meter at will or change internal wiring to avoid damages to the meter.
4. When the LCD displays "BL", replace the battery timely. Remove the battery if the meter is not used for a long time.
5. Do not store or use the meter in high temperature, high humidity, flammable, combustible, or strong electromagnetic environment.
6. Please use soft cloth and neutral detergent to clean the case for maintenance. Do not use grinding agent and solvent to avoid case corrosion and damaging the meter.
7. This product has passed CE certification

Warning: Based on the principle of magnetic induction wind speed measurement, the product may be subject to interference under strong battery radiation condition. Please stay from those conditions as far as possible.

4. Product Exterior

1. Wind speed sensor/Temperature Sensor
2. Meter case
3. LCD display
4. Function keys



5. Display Interface



1	Maximum measurement
2	Average value
3	Data hold
4	Low battery
5	m/s
6	km/h
7	ft/min
8	Knots
9	Mph
10	Celsius
11	Fahrenheit
12	Temperature value
13	Wind chill notification
14	Wind speed value
15	Beaufort scale
16	Bluetooth communication symbol indication

6. Key functions and setup

(remark : "short press" means : about 1 second continuous press; "long press" means : about 2 second continuous press)

1. ON/OFF / Bluetooth communication

Short press once to start up , short press again to power off .
Bluetooth communication : Under the state of boosting unit , long press to enter Bluetooth communication mode, and then long press again to quit Bluetooth communication mode.

2. UNIT: Unit conversion key

Short press this key and the wind speed value cycles m/s, km/h, ft/min, knots, and mph. Long press this key and the temperature unit changes between °C and °F.

3. MAX/AVG:

Pressing this key can select maximum, average and normal value measurement; select maximum and the meter will always show the maximum reading; select average and the meter will always show the average reading.

4. HOLD/BL

HOLD: Short press this key once to hold the measurement; short press this key again to exit data hold and continue normal measurement.
BL: Long press this key to turn on backlight; long press this key again to turn off backlight.

5. Automatic shutdown

No operation 5 minutes after , then shut down the unit automatically (the default is automatic shutdown mode)

When you want to remove the automatic shutdown function, hold down the "hold" + "ON/OFF" key to boot. LCD has a "APO OFF" character prompt, the automatic shutdown function will be removed .

7. Bluetooth APP specification

- To connect Bluetooth , you need to install the application (iENV APP) on the smartphone
- iOS device access it in App Store , Android device access it in Play Store or Please login www.uni-trend.com to download.

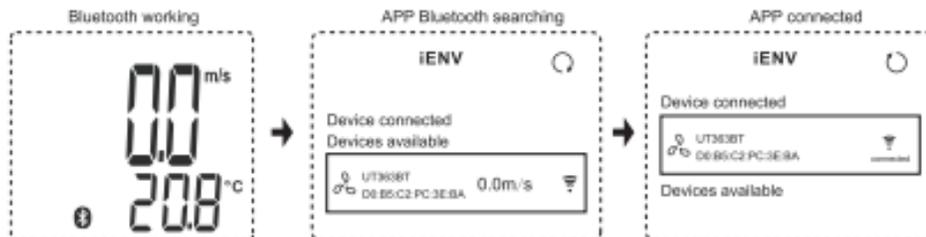
Compatibility:

ios 8.4 or higher version
 Android 4.3 or higher version
 Bluetooth 4.0 or higher version
 Memory 1G or more

- Before Bluetooth APP and product are connected , you need to open the Bluetooth at the same time, and through the APP search the Bluetooth, and select the corresponding products to be connected in iENV APP

● When in the working state, long press the power button to turn on or off the Bluetooth

- Bluetooth icon is flashing, indicating that the product is not connected with APP
- Bluetooth icon isn't flashing, indicating that the product is connected with APP



8. Performance Testing

1. Technical Parameter

Function	Range	Resolution	Accuracy	Remark
Wind Speed Measurement	0~30m/s (Standard)	0.1	±(5%rdg+0.5)	Ambient temperature: 23°C±5°C Ambient humidity: <80%RH
	1.4~108 Km/h (Reference)		±(5%rdg+15dgts)	
	0.7~58 Knots (Reference)		±(5%rdg+10dgts)	
	0.8~67 mph (Reference)		±(5%rdg+10dgts)	
	78~5905 ft/min(Reference)		±(5%rdg+100dgts)	
Temperature Measurement	-10~50°C	0.1°C	±2°C	Sensor operating temperature
	14~122°F	0.2°F	±4°F	
Wind Rating	0~12	1	±1	PUFU Wind rating as reference

2. General Type

- LCD display: 4-bit LCD display. The displayed maximum is 9999.
- Overload indication: When the wind speed is over 45m/s or the temperature is lower than -10°C or higher than 50°C, "OL" will be displayed.
- Low battery display: Prompt "🔋".
- Sampling rate: 0.5s
- Sensor type: Magnetic induction type wind speed sensor and NTC negative temperature coefficient sensor.
- When the temperature is lower than 0°C and the wind speed is over 5m/s, the meter shows "WINDCHILL".
- Impact strength: Can withstand the impact of landing from 1 meter's height.
- Power requirement: 1.5V batteries (AAA) ×3
- Power consumption: More than 12 hours with Bluetooth enabled
- Product size: 163×55×28mm
- Spec of thread to connect the product with three tripod: $\frac{1}{4}$ "
- Weight: 118g

3. Environment Limitation

- Indoor use
- Maximum height: 2000m
- Pollution level: 2
- Working temperature and humidity: 0°C~40°C (not greater than 80%RH)
40°C~50°C (not greater than 45%RH)
- Storage temperature and humidity: -20°C~60°C (not greater than 75%RH)

4. General Maintenance

Warning: please do not open the meter case to avoid affecting device accuracy or damage to the meter.

- Maintenance and service of the meter should be accomplished by professional personnel or designated maintenance department.
- Clean the case by dry cloth periodically, detergent with abrasive or solvent composition shall not be used.

5. Battery Installation and Replacement

- The meter uses 3 pieces of AAA 1.5V batteries. Please see figure below for steps of battery installation and replacement.
- Turn the panel down, push the battery cover open in the direction of the arrow, lift the cover and remove the batteries; install new batteries in accordance of polarity indications.
- Please use batteries of same type instead of improper ones.
- Close the cover tightly after installing new batteries.



UNI-T UNITREND TECHNOLOGY (CHINA) CO., LTD.

No.6, Gong Ye Bei 1st Road,
 Songshan Lake National High-Tech Industrial
 Development Zone, Dongguan City,
 Guangdong Province, China
 Tel: (86-769) 8572 3888
<http://www.uni-trend.com>