



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
ENERGÍA – PROCESOS Y USO EFICIENTE DE LA ENERGÍA**

EÓLICA DE BAJA POTENCIA

**TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA**

**PRESENTA:
ABRAHAM ZEPEDA GONZÁLEZ**

**TUTOR PRINCIPAL
DR. JESÚS ANTONIO DEL RIO PORTILLA, Instituto de Energías Renovables**

MÉXICO, D. F. MARZO 2013



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Eólica de baja potencia.

Ing. Abraham Zepeda González

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Campos Amezcua Rafael
Secretario: Dr. Del Río Portilla Jesús Antonio
Vocal: Dr. Jaramillo Salgado Oscar Alfredo
1 er. Suplente: M.I. Guillén Solís Omar
2 d o. Suplente: Dr. Ángeles Camacho César

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Temixco, Morelos.

TUTOR DE TESIS:

Dr. Jesús Antonio del Río Portilla

FIRMA

*A Dios.
A Vidal y Maribel por su apoyo incondicional en la construcción de este
proyecto de vida;
Emiliano y Hugo por todo el tiempo que hemos pasado juntos;
Mami y Papi por sus consejos de vida;
Gisela por todo el amor que me ha dado;
Gil, Jerry, Daniel, Isaac, Roberto por su fraternal amistad;
a todos ustedes les dedico este trabajo.*

Agradecimientos

Deseo agradecer al Doctor Jesús Antonio del Río Portilla por todo su tiempo y conocimiento brindados a lo largo de este proyecto como tutor de tesis, por la amistad que me ofreció desde que fue mi maestro de matemáticas, por enseñarme como una persona ética, humilde y con principios puede vivir y ser exitosa en este país y por último el haberme permitido ir a la Universidad de Cambridge donde viví los mejores días de mi vida.

A los Doctores Oscar Alfredo Jaramillo Salgado, Rafael Campos Amezcua, César Ángeles Camacho y al Maestro Omar Guillén Solís por haber aceptado ser mis sinodales de tesis, ya que a pesar de estar ocupados en sus labores personales me asignaron un poco de su tiempo y paciencia para la revisión de este trabajo.

A los Doctores Mariano López de Haro por sus consejos de vida que me transmitió con su gran experiencia, por su profesionalismo al trabajar como coordinador del posgrado y principalmente por su amistad ofrecida, Ramón Tovar Olvera por haberme invitado a trabajar en su compañía y por todas las facilidades que me ofreció y a Sergio Cuevas García por hacerme estudiar como nunca lo había hecho antes y que a pesar de haber sido tan exigente laboralmente nunca dejó su lado humano, de la misma manera quiero dar un reconocimiento a los Doctores Miguel Robles Pérez y Eduardo Ramos Mora por ayudarme a resolver mis dudas de mecánica y física respectivamente.

Al Doctor Rafael Castrejón Pita que me ofreció su amistad y me aceptó en su equipo de trabajo en la Universidad de Cambridge y que con su hermano el Doctor Alfonso Castrejón Pita me enseñaron técnicas de velocimetría. De la misma manera quiero agradecer a Jenny Hornett así como a los Doctores Carlos López y Nicholas Shannon porque hicieron más agradable mi estancia en el Reino Unido.

A Blanca Ruiz por su ayuda a lo largo de su servicio social, al Doctor Eduardo Venegas Reyes por haberme enseñado a usar la estación anemométrica, al M.I. Osvaldo Rodríguez por sus asesorías en Latex, al Doctor Karim Monfil y al M.I. Edgar Durán por sus amistades y por último al Ing. Felipe de Jesús Tena por haber sido pionero en engendrarme la pasión por las energías renovables.

Resumen

En este trabajo se analizan generadores eólicos de baja potencia. Para esto se diseñaron, construyeron e instalaron un par de aerogeneradores de eje vertical *twister Savonius* en el Instituto de Energías Renovables ubicado en la ciudad de Temixco Morelos, la cual es una región de baja disponibilidad de viento.

En un país tan grande como México el hacer posible llegar a todos los sitios poblados la red de distribución eléctrica, es sumamente difícil y costoso y si aunado a esto se consideran los altos niveles de contaminación que actualmente existen en la Tierra, es menester buscar otras maneras para satisfacer las principales necesidades energéticas que demanda el humano. Por lo anterior y que esta nación cuenta con un recurso eólico envidiable en una gran área de su territorio se determinó desarrollar este proyecto para corroborar las condiciones necesarias para el uso de la energía eólica.

Tradicionalmente para analizar la factibilidad de un proyecto eólico se considera necesario tener un historial de las velocidades de viento de varios años, afortunadamente se contó desde un inicio con información de más de tres años para el desarrollo de este tema. Por lo que el diseño mecánico, aerodinámico y de sujeción fueron basados en la velocidad máxima registrada en una estación anemométrica ubicada en Temixco Morelos donde se instalaron los aerogeneradores.

Para contrarrestar las bajas velocidades de viento que existen en Temixco se optó por utilizar materiales de bajo peso como vela de barco y aluminio, así mismo se usó un sistema de transmisión de potencia por cadena. El periodo de pruebas fue de febrero a abril debido a que en estos meses el flujo de viento es mayor que en el resto del año y por ende son las mejores condiciones para esta investigación.

En el primer capítulo de este trabajo se encuentran los objetivos, justificación, alcances, limitaciones y todo lo que impulsó a la realización del mismo. Así mismo la segunda sección esta conformada tanto por una breve historia de la energía eólica como de la teoría necesaria para comprender el funcionamiento de los aerogeneradores. En el tercer capítulo se muestran los cálculos de diseño mecánico, esfuerzos en las estructuras de sujeción y perfil aerodinámico de los aerogeneradores de eje vertical tipo *twister savonius*. El cuarto capítulo

está comprendido por toda la información de los parámetros para realizar la experimentación de este proyecto que van desde mediciones, tiempos, sitio de análisis entre otras variables. Por último en el quinto y sexto capítulo se muestran tanto los resultados obtenidos a lo largo del periodo de medición como las conclusiones de este proyecto respectivamente.

Índice general

Agradecimientos	4
Resumen	6
Lista de figuras	10
Lista de tablas	12
1. Introducción.	14
1.1. Motivación.	14
1.2. Alcances y Limitaciones.	15
1.3. Justificación.	15
1.4. Objetivos.	16
1.5. Metodología.	16
1.6. Estructura del trabajo.	17
2. Energía eólica aspectos técnicos.	18
2.1. Historia de la energía eólica.	18
2.2. Turbinas de eje vertical.	19
2.2.1. Datos técnicos.	19
2.2.2. Aerogeneradores de eje vertical.	20
2.3. Medición del viento e instrumentación.	23
2.3.1. Instrumentación para medir la velocidad del viento.	23
2.3.2. Variación en el modelado de la velocidad del viento.	24
2.3.3. Espectro de Van der Hoven.	25
2.3.4. Distribución de frecuencia.	26
2.4. Generadores de corriente eléctrica.	26
2.4.1. Corriente directa.	26
2.4.2. Corriente alterna.	27
2.5. Transmisión mecánica por cadena.	29
2.5.1. Ventajas y desventajas de cadenas para la transmisión de energía.	29
2.6. Teoría para el uso de la energía eólica.	29
2.6.1. Potencia del viento.	29

2.6.2. Límite de Betz.	31
3. Diseño mecánico y aerodinámico de un aerogenerador de eje vertical tipo twister-Savonius.	34
3.1. Diseño estático y dinámico.	35
3.1.1. Prototipo 1.	35
3.1.2. Prototipo 2.	43
3.2. Diseño aerodinámico.	47
3.3. Sistema de sujeción.	49
3.3.1. Estructura de sujeción del diseño 1.	49
3.3.2. Estructura de sujeción del diseño 2.	50
4. Marco experimental.	54
4.1. Velocidad de diseño para generación de potencia.	54
4.2. Período de adquisición de datos.	55
4.3. Ubicación del montaje y viabilidad eólica del sitio.	57
4.4. Sistema de adquisición de datos.	59
4.5. Generadores de energía eléctrica usados.	59
5. Resultados de las mediciones del recurso eólico de baja potencia.	62
5.1. Calibración de generadores.	62
5.2. Diseño mínimo requerido para el lugar de estudio.	65
5.3. Resultados de las mediciones.	68
6. Conclusiones.	72

Índice de figuras

2.1. Dibujo principal de la patente de Savonius de 1929.	20
2.2. Turbina Savonius.	21
2.3. Turbina twisted savonius.	22
2.4. Turbina Darrieus.	22
2.5. Anemómetro de copas.	24
2.6. Espectro de Van der Hoven.	25
2.7. Dínamo usado comunmente por ciclistas.	27
2.8. Potencia generada de un aerogenerador en función de la velocidad y el área.	30
2.9. Curva de eficiencia de Betz	33
3.1. Prototipo 1.	35
3.2. Base de prototipo 1.	36
3.3. Esqueleto con base del aerogenerador 1.	36
3.4. Reacciones.	37
3.5. Diagrama de fuerza cortante y momento flector.	38
3.6. Prototipo 2.	43
3.7. Reacciones.	44
3.8. Diagramas de cuerpo libre, fuerzas y momentos.	45
3.9. Trayectorias del viento alrededor de edificios.	47
3.10. Ángulo de twist.	48
3.11. Eficiencia de potencia contra ángulos de twist.	48
3.12. RPM contra velocidad del viento con diferentes ángulos de twist.	49
3.13. Nodos del prototipo 1 sujetos a análisis de esfuerzos.	50
3.14. Nodos del prototipo 1 sujetos a análisis de esfuerzos.	52
4.1. Curva de disponibilidad de viento.	56
4.2. Promedio de la velocidad del viento a lo largo de un año.	56
4.3. Anemómetro y veleta del IER.	57
4.4. Aerogeneradores instalados.	58
4.5. Potencia que se puede extraer en el sitio de estudio a lo largo de un año.	58
4.6. Generador de motocicleta.	60
5.1. Curva de potencia del generador de motocicleta.	63

5.2. Curva de potencia del dínamo.	64
5.3. Área de rotura del aerogenerador 2.	66
5.4. Aerogerador después del colapso.	67
5.5. Espesor usado, sugerido y en el mercado.	67
5.6. Mediciones del dínamo de bicicleta en el prototipo 1.	70
5.7. Mediciones del dínamo de bicicleta en el prototipo 2.	71

Índice de cuadros

3.1. Desplazamientos y rotaciones aplicadas en las barras de la estructura del prototipo 1.	51
3.2. Fuerza y momentos aplicados en las juntas de la estructura del prototipo 1.	51
3.3. Desplazamientos y rotaciones aplicadas en las barras de la estructura del prototipo 2.	51
3.4. Nodos del prototipo 2 sujetos a análisis de esfuerzos.	52
5.1. Calibración de generadores.	63
5.2. Diagrama de espesores y diámetros internos y externos.	66

Capítulo 1

Introducción.

1.1. Motivación.

El hombre ha usado el viento para múltiples actividades desde hace mucho tiempo, comenzando con los barcos comerciantes fenicios hasta los molinos holandeses [1, 2]. A partir del siglo pasado se prestó un especial énfasis en el viento, con el objetivo de generar energía eléctrica con el mismo principio de la molienda de granos usado en los Países Bajos. Los pioneros en esta investigación fueron países europeos tales como Dinamarca y Alemania, los cuales se encuentran ubicados geográficamente alejados del Ecuador y cuentan con un recurso eólico envidiable para muchas naciones que se encuentran entre los trópicos [3].

El desarrollo tan rápido de esta tecnología se debió a, como anteriormente se mencionó, que en varios lugares del viejo mundo existía la información tecnológica necesaria para la construcción de turbinas de eje horizontal, las cuales son muy similares en el mecanismo de trabajo a los molinos de viento. Asimismo las universidades y centro de investigación pusieron especial hincapié en obtener la mayor cantidad de información posible tal como: perfiles aerodinámicos, rangos de velocidad, eficiencias de transformación de energía, entre otras. Todo esto con el fin de establecer granjas eólicas para abastecer a las ciudades de energía eléctrica verde [4].

Al mismo tiempo las grandes instituciones bancarias comenzaron a financiar proyectos de granjas eólicas a inversionistas mediante el uso de aerogeneradores de eje horizontal debido a que la tasa de amortización y la inversión inicial es menor que otras energías renovables [5, 6, 7]. Desgraciadamente esta infraestructura monetaria no ha sido distribuida homogéneamente alrededor del mundo ya que los bancos basan sus préstamos en la tasa interna de retorno que a su vez está en función del espectro de Van der Hoven, el cual tiene parámetros de medición muy específicos que sólo benefician algunos sitios en el mundo dejando fuera a lugares cercanos al Ecuador por sus bajos regímenes de viento

[5]. Es por esto que este proyecto de investigación se creó con el fin de analizar la viabilidad eólica en este tipo de lugares mediante el diseño y construcción de un par aerogeneradores de eje vertical para la generación de energía eléctrica.

1.2. Alcances y Limitaciones.

Con el diseño de un par de aerogeneradores de eje vertical se analiza la construcción de pequeños prototipos que puedan cubrir ciertas necesidades de bajo consumo energético, tales como cargar baterías de radios, iluminación de veleros y sistemas híbridos. Esta tecnología de generación de energía renovable es funcional en lugares como montañas y costas debido a que la velocidad del viento está en función de la altura y que el mar produce brisa capaz de producir energía. Existen lugares alejados de la red eléctrica con necesidades energéticas en los cuales el uso de este tipo de tecnología es viable a largo plazo debido a que otras fuentes de energía como pilas o plantas eléctricas impulsadas por diesel representan un costo de operación y contaminación al medio ambiente [2].

Es muy complicado competir con aerogeneradores que actualmente se encuentran en el mercado como Sauer energy o Venger wind por los sistemas de manufactura que tienen, sin embargo existen algunas variables que pueden ser modificadas tales como peso, materiales, perfil aerodinámico, entre otros con el fin de generar energía para consumo personal. En este proyecto se enfocó principalmente en los materiales de fabricación para reducir los costos de construcción, por lo que se utilizó vela de barco, elastano y aluminio.

Comúnmente son despreciados los lugares donde la velocidad promedio del viento no supera los $5 \frac{m}{s}$ [2, 6] debido a la baja potencia que puede ser generada, la cual va de la mano con la tasa neta de retorno que comúnmente en este tipo de proyectos oscila entre 5 y 8 años [2]. La razón por lo que la velocidad y la persistencia del viento son tan importantes es que entre mayor sea esta más potencia generarán los aerogeneradores y a la vez la inversión inicial será cubierta en un tiempo menor [1, 8, 9].

1.3. Justificación.

La energía eólica es un área que ha sido investigada y explotada desde hace mucho tiempo, sin embargo a partir de la crisis del petróleo en el siglo XX, se puso un especial énfasis en este rubro energético [2, 8, 10]. Desafortunadamente el desarrollo de esta tecnología fue mundialmente heterogéneo debido a que países en desarrollo o con poca tradición en la investigación en energías alternas se quedaron resagados en avances de este tecnología, en cambio naciones como Alemania, Estados Unidos, Dinamarca y Holanda [2, 8] tenían el capital necesario para poder indagar en energías renovables. Lo que generó que la mayoría

de los avances, bases de datos, ciencia y tecnología fueran aplicables sólo para ciertas áreas geográficas [1, 2, 9, 10].

Debido a la globalización y al calentamiento global países como Egipto, Grecia y México entre otros, comenzaron a investigar en esta tecnología, ya que cuentan con los tres potenciales eólicos mayores a nivel mundial respectivamente [7]. Lo anterior debe fundamentar que es necesario innovar en energía renovable, especialmente en la eólica para demostrar que es viable generar potencia eléctrica de manera alterna en lugares que anteriormente no estaban previstos.

1.4. Objetivos.

De esta manera los objetivos del presente trabajo son:

- Diseñar, construir y montar un aerogenerador de eje vertical con el uso de materiales como vela de barco, licra y aluminio.
- Estudiar las posibilidades de producción de energía eólica de baja potencia en lugares que se encuentran entre los trópicos.
- Evaluar la viabilidad de sitios, mediante el estudio de la energía generada por los aerogeneradores de eje vertical.

1.5. Metodología.

A lo largo de este proyecto fue necesario realizar algunas actividades en cierto orden, con el fin de elaborar un trabajo de calidad y sobre todo bien fundamentado para su posterior uso. La actividad inicial consistió en una revisión del estado del arte que abarcará clases de aerogeneradores, historia, velocidad del sitio, entre otras variables. Posteriormente se procedió al diseño mecánico con el uso de herramientas como solid works, selección de los generadores eléctricos y a la compra del material, para que el taller mecánico del IER constuyera el prototipo en base a los planos anteriormente elaborados.

La ubicación de los aerogeneradores de eje vertical fue en la azotea del edificio del posgrado en la dirección predominante del viento, exactamente al lado de la estación solarimétrica del IER con el fin de comparar los valores de la velocidad del viento con la potencia generada del diseño. La recaudación de datos fue mediante una tarjeta adquisidora Agilent modelo 35970A, datos que fueron analizados posteriormente con el fin de redactar las conclusiones del trabajo.

1.6. Estructura del trabajo.

El presente trabajo está enfocado en la energía verde, la cual reduce las emisiones contaminantes de CO_2 . En el primer capítulo se hace especial hincapié en las razones por las que se comenzó este proyecto y los objetivos que se esperan lograr. El capítulo dos aporta referencias históricas y conceptos fundamentales de la industria eólica como componentes de la turbina, tipos de aerogeneradores, generadores eléctricos y aparatos de medición entre otros. Así mismo se presenta el formalismo teórico necesario para medir la velocidad del viento, entender el límite de Betz y determinar la potencia generada entre otras.

El tercer capítulo es sumamente importante ya que contiene los datos del perfil aerodinámico, el diseño mecánico del prototipo y el análisis de las fuerzas que actúan en el sistema de sujeción. El capítulo cuatro contiene la manera en que se realizaron los muestreos, esto incluye tiempos de análisis, herramientas utilizadas y lugar de experimentación. De la misma manera en el capítulo cinco y seis se presentan los resultados y conclusiones obtenidos en el proyecto respectivamente.

Capítulo 2

Energía eólica aspectos técnicos.

La energía eólica es aquella que es generada mediante el viento. En otras palabras es la energía cinética que se obtiene por el movimiento del aire y que después el hombre la transforma para diferentes usos.

2.1. Historia de la energía eólica.

La primera máquina eólica de la que se tiene noticia data del año 1700 A.C. en Babilonia, usándose para bombear agua [1, 2], a partir del siglo XI aparecen en la zona mediterránea molinos con rotores a vela [3], aunque la evolución en la historia de los molinos de viento transcurre de forma continua, a finales de la Edad Media las innovaciones y las aplicaciones de las máquinas eólicas se producen con rapidez. Entre la segunda mitad del siglo XVIII y la segunda mitad del XIX, los molinos de viento europeos alcanzan su más alto nivel de perfeccionamiento, dentro de las limitaciones de la tecnología artesanal [9].

En la segunda mitad del siglo XIX aparece una nueva generación de máquinas eólicas, con una concepción de diseño diferente nombrado el multipala americano [1], el cual abrió el camino hacia mejoras en el rendimiento de esta tecnología, que no se produjo realmente hasta principios del siglo XX, cuando se diseñaron rotores aerodinámicos. A lo largo del siglo XX, las aplicaciones basadas en el aprovechamiento del viento fueron declinando, a medida que se hacía más popular el uso del petróleo. Sin embargo, la crisis energética ha iniciado de nuevo un período en el campo del aprovechamiento eólico, habiéndose elaborado innumerables programas de estudio que han centrado su interés en la elaboración de mapas eólicos, localización de emplazamientos y construcción de plantas de alta potencia [4, 5, 8].

Paralelamente se ha pretendido crear incentivos que motiven a la iniciativa privada a fabricar y comercializar pequeños prototipos de funcionamiento autónomo, que permitan cubrir las necesidades de explotaciones agrícolas o industriales situadas en zonas apartadas [2, 6].

2.2. Turbinas de eje vertical.

En la sección anterior se presentó una descripción general de los componentes que conforman a los aerogeneradores, sin embargo existen variables que las diferencian unas de otras. Las turbinas de eje vertical convencionales fueron desarrolladas en el siglo XX principalmente por Sigurd J. Savonius y George Darrieus [1, 7] con la intención de innovar alternativas sobre la tecnología ya existente. Prácticamente tanto las turbinas de eje vertical como horizontal contienen las mismas partes pero existen algunas modificaciones de diseño como la ubicación del generador, caja de engranes, eje de giro, sistema de referencia, entre otras.

2.2.1. Datos técnicos.

A pesar de que los aerogeneradores de eje vertical como horizontal tienen muchas similitudes como las fuerzas que actúan (arrastre, empuje, sustentación, gravedad), logística del diseño (aerodinámica, peso, transformación del momentum a energía eléctrica, etc.), flujo de viento, entre otras; existen diferencias entre las turbinas de eje horizontal y vertical [2, 6, 8].

Como se mencionó anteriormente a pesar de que exista relación entre las partes que componen a los aerogeneradores, existen ventajas en los verticales, por ejemplo, que no es necesario utilizar sistemas de orientación de la turbina debido a que el eje vertical les permite generar potencia independientemente de la dirección en la que se encuentre el viento, así mismo son capaces de producir energía con ráfagas de corta duración, otra ventaja considerable es que el mantenimiento y la instalación son más sencillos y menos riesgosos ya que el generador y la caja de engranes se pueden encontrar a nivel de piso.

Desafortunadamente también existen desventajas considerables en los verticales sobre los horizontales, ya que el momento de inercia es muy elevado siendo necesario el uso de un motor para romper el mismo; también el ángulo de ataque no puede ser controlado en altos vientos lo que hace necesario un sistema para rotar el aerogenerador 90° , por último las tierras donde se encuentren las turbinas no pueden ser usadas para la agricultura por razones de seguridad ya que los álabes giran muy próximos al suelo, pero en aplicaciones de baja potencia pueden ser ubicados en techos.

2.2.2. Aerogeneradores de eje vertical.

Una gran variedad de diseños de turbinas de eje vertical se han propuesto en décadas pasadas, así mismo se ha realizado un número considerable de publicaciones en esta área tecnológica [19] . Algunos diseños se presentan a continuación:

Savonius.

La necesidad de bombear agua en lugares rurales o remotos impulsó el desarrollo de aerobombas para cubrir esta necesidad. A principios del siglo XX un gran número de innovaciones fueron creadas por diversos personajes tales como Savonius, el cual patentó su dispositivo en 1929 [14]. Este equipo utilizó un rotor hecho por dos medias circunferencias unidas a la vez a una flecha tal como se muestra en la Fig.2.1. La turbina Savonius ha sido muy popular por años debido a su fácil y económica forma de construir.

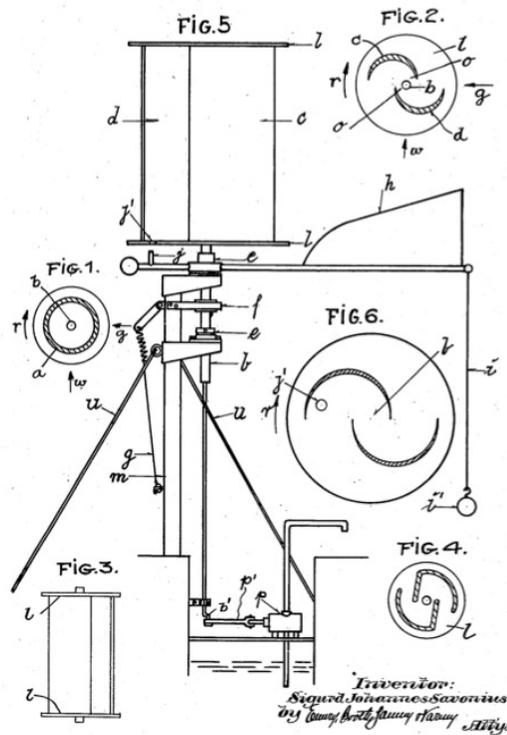


Figura 2.1: Dibujo principal de la patente de Savonius de 1929.

Muchas variaciones de este diseño han sido desarrolladas, sin embargo debido a su alta solidez y peso excesivo han sido descartadas para la producción

eléctrica a gran escala. Aun así existe un gran número de lugares de aplicación como anemómetros de copas, el ventilador Flettner el cual es utilizado en techos de edificaciones como extractor de aire caliente y para la carga de baterías. La baja velocidad de punta que se genera en el Savonius Fig.2.2, ha llamado la atención debido a que las emisiones aerodinámicas de ruido son relativamente bajas [6], problema que es usual en aerogeneradores de eje horizontal. Sin embargo un número considerable de retos existen en el área costo-eficiencia en la generación eléctrica en sitios urbanos que son caracterizados por bajas velocidades de viento y altos índices de turbulencia provocados por las edificaciones y obstáculos naturales.

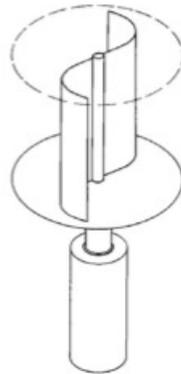


Figura 2.2: Turbina Savonius.

El Savonius es básicamente un dispositivo de arrastre debido a que el rotor gira al entrar en contacto el aire con sus copas, como se mencionó anteriormente, las velocidades de giro son bajas por lo que usualmente se usan cajas de engranes para incrementar las revoluciones por minuto .

Twister Savonius.

Esta variante en la turbina Savonius que se presenta en la Fig.2.3 fue concebida en Finlandia con la ventaja del bajo costo y la mejora en el diseño, debido a que el modo de generación incluye sustentación y no sólo arrastre como la savonius, sin embargo la construcción de la turbina twister savonius resulta complicada debido a la curvatura de sus aspas lo que genera un costo adicional en la manufactura [15]. La fuerza de sustentación se genera debido a que existe un gradiente de presión entre la parte inferior y superior del prototipo.

En la ciudad de Turku la empresa Windside ha instalado un par de estos prototipos con un área de barrido de $12 m^2$, los cuales son capaces de generar hasta 50 kW [16] y tienen como objetivo principal el climatizar un centro comercial.



Figura 2.3: Turbina twisted savonious.

Darrieus.

El diseño patentado por Jean Marie Darrieus en 1932, Fig.2.4 es el más eficiente y popular de los aerogeneradores de eje vertical debido a que su alta velocidad de punta hace que este prototipo sea capaz de generar electricidad en el rango de MW[16]. El rotor consta de dos finas palas simétricas que están unidas a un eje por ambos extremos con un característica curva que permite una mejora en el rendimiento debido a que es impulsado por sustentación y no sólo por arrastre como el Savonius Fig.2.1.



Figura 2.4: Turbina Darrieus.

Al igual que los otros aerogeneradores de eje vertical el Darrieus no necesita de un sistema de orientación, esta característica de captación omnidireccional le permite ser instalado en cualquier terreno sin necesidad de levantar altas torres, lo cual se traduce en un ahorro sustancial. Al poseer una forma parecida a una

cuerda para saltar, hace que los alerones del Darrieus experimenten una fuerte fuerza centrífuga [17].

Una de las desventajas de este prototipo es que está limitado para arrancar por sí mismo debido a que el torque es insuficiente para romper el momento de inercia. Esto es obvio debido a que cuando se encuentra estático totalmente, las fuerzas de sustentación son despreciables, lo que hace necesario la instalación de un motor de arranque el cual representa un costo extra en el diseño [18].

2.3. Medición del viento e instrumentación.

Para obtener datos de viento es necesario tener ciertos parámetros (ubicación, altura, periodo de recolección), sensores (caracterizados y calibrados) y el tipo de información que se recolecta. Actualmente el servicio nacional meteorológico, la industria privada y personas interesadas en la energía eólica utilizan instrumentos como anemómetros y veletas para medir y caracterizar tanto la velocidad como la dirección del viento, así mismo se apoyan en aparatos especializados para obtener información sobre turbulencia y ráfagas. Existe una gran cantidad de dispositivos para cada aplicación en la recolección de información eólica, sin embargo en este proyecto se utilizaron únicamente un anemómetro de copas para medir la velocidad del viento y una veleta para verificar la dirección del mismo.

2.3.1. Instrumentación para medir la velocidad del viento.

Los sensores para la medición del viento pueden ser clasificados de acuerdo a su principio de operación en:

- Transferencia de momentum - copas, propelas, platos de presión.
- Presión o sensores estacionarios - tubos de pitot y esferas de arrastre.
- Transferencia de calor - hilo caliente y películas calientes.
- Efectos Doppler - Acústicos y láser.
- Métodos especiales - desplazamiento de iones y desprendimiento de vórtices.

Comúnmente la dirección del viento es medida mediante el uso de veletas. Una veleta eólica convencional tiene como función mantener los álabes en la dirección perpendicular al viento, ésta consiste en un contrapeso, el cual está sujeto a un eje. La fricción es minimizada mediante el uso de rodamientos y ocupan

de un mínimo de fuerza para romper el momento de inercia ($1 \frac{m}{s}$) [7].

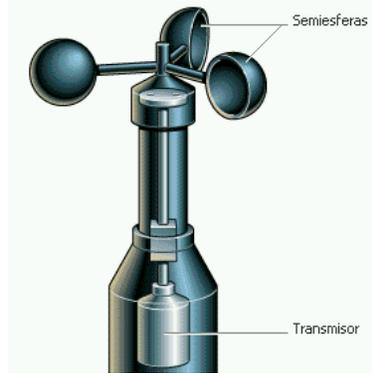


Figura 2.5: Anemómetro de copas.

A pesar de que existe una gran cantidad de equipos para realizar mediciones de viento, normalmente son usados el anemómetro de copas, propela de copas y sensores acústicos tipo Doppler (SODAR). Los sistemas anteriormente mencionados son usados debido aunque son sencillos de manipular, económicos y existe una considerable asesoría técnica [1]. En la Fig.2.5 se presenta un anemómetro de copas el cual es impulsado por la fuerza de arrastre del viento; en este proyecto para la recaudación de datos fue utilizado un sistema de este tipo con veleta.

2.3.2. Variación en el modelado de la velocidad del viento.

La medición anual de la velocidad del viento proporciona suficiente información para estimar cuánta energía ($\frac{kWh}{m^2}$) o potencia por unidad de área $\frac{W}{m^2}$ pueden ser generadas por un aerogenerador. La media anual de la velocidad del viento es uno de los factores más importantes en la selección de un lugar para la instalación de un campo eólico [4]. Sin embargo, este dato no indica las variaciones anuales. Ya que solo aporta a grosso modo el potencial eólico de un área. Es posible encontrar dos sitios con la misma velocidad de viento promediada anualmente, pero con diferente potencial para producir energía debido al relieve que exista en el lugar [1].

Es bien sabido que la velocidad del viento cerca de la superficie de la Tierra es baja debido a la fricción que genera por el contacto del aire con la superficie y objetos que se cruzan en su camino. Por ende entre más alejado del suelo se registren las mediciones, mayor será la velocidad del mismo pero con menor densidad [4, 19].

2.3.3. Espectro de Van der Hoven.

La energía disponible en el viento varía con el cubo de la velocidad del mismo, para comprender las características del recurso eólico hay que comprender varios aspectos críticos como la identificación de lugares adecuados debido a que sólo ciertas áreas a nivel mundial pueden ser utilizadas en esta tecnología, el diseño de las turbinas que esta en función tanto del recurso eólico como de la potencia que se pretende obtener, la red eléctrica y la viabilidad económica [5].

El viento varía tanto temporalmente como geográficamente, además esta variabilidad aplica en un amplio rango de escalas tanto en tiempo como espacio. La variación espacial representa los sitios más ventosos del mundo. Estas regiones se encuentran dictadas por la latitud donde se encuentra, los cuales reciben distintas cantidades de insolación, a pesar de que existen lugares con similares condiciones climatológicas, el recurso eólico puede variar por razones topográficas debido a que no son las mismas condiciones geográficas en un valle que en una montaña, así mismo la vegetación es relevante debido a que arbustos y arboles pueden fungir como obstaculos [5].

La variabilidad temporal en gran escala significa la cantidad de viento que puede variar en un sitio determinado de un año a otro o en un periodo mayor como una década, estas largas diferencias no son bien comprendidas actualmente y complican las predicciones precisas en la viabilidad económica de proyectos eólicos. En escalas más cortas que un año tales como estaciones, la exactitud con la que se puede contar es mayor debido a que el tiempo de análisis es menor.

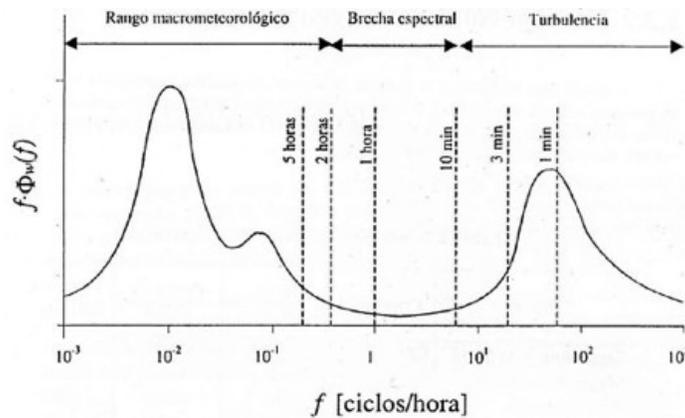


Figura 2.6: Espectro de Van der Hoven.

En la Fig.2.6 se pueden apreciar tres diferentes regiones, donde el pico más grande representa el rango macrometeorológico que se encuentra relacionado con el cambio del clima, el pico más chico muestra la variación a lo largo de la

noche, por último el pico mediano caracteriza la turbulencia, característica que es sumamente importante en cuestiones de diseño de fatiga mecánica en varios componentes y en la eficiencia de las turbinas. Van der Hoven construyó esta gráfica en 1957 con el objetivo de mostrar las fluctuaciones del viento a lo largo de un periodo, estudio al que llamo brecha espectral y que actualmente es utilizado para analizar la viabilidad eólica de sitios particulares.

2.3.4. Distribución de frecuencia.

La distribución de frecuencias es un método de representación gráfica para un conjunto de datos que se divide en intervalos de clase llamados bins y que a su vez son contabilizados y clasificados en la clase que les corresponde. Gráficamente consiste en rectángulos cuyos anchos son definidos por los límites de cada intervalo y las alturas a su vez dependen del número de valores que contenga cada bin. Los histogramas como también es llamada la distribución de frecuencia muestran información sobre el conjunto de datos como la localización, dispersión y simetría; siendo un método útil para la identificación rápida de una muestra multimodal [10].

2.4. Generadores de corriente eléctrica.

Un generador eléctrico es una máquina capaz de transformar energía mecánica en energía eléctrica, esto es debido a la diferencia de potencial que hay entre dos de sus polos, dicha transformación puede ser directa o alterna y se consigue por la acción de un campo magnético sobre los conductores eléctricos que se encuentran en una armadura nombrada estator.

2.4.1. Corriente directa.

La corriente continua o mejor conocida como corriente directa es el flujo de electrones a través de un conductor entre dos puntos de distinto potencial, donde a diferencia de la corriente alterna los electrones fluyen siempre en la misma dirección.

Generador de corriente continua.

Los generadores de corriente continua son máquinas que producen tensión mediante el principio de la bobina giratorio dentro de un campo magnético, si una armadura gira entre dos polos fijos la corriente en la armadura circula en un sentido durante la mitad de cada revolución y en el otro sentido durante la otra mitad. Para producir un flujo constante de corriente en un sentido, o corriente continua, en un aparato determinado, es necesario disponer de un medio para

invertir el flujo de corriente fuera del generador una vez durante cada revolución [21].

Dínamos.

Un dínamo es una máquina que produce energía eléctrica en forma de corriente continua aprovechando el fenómeno de inducción electromagnética. Para ello está dotada de un armazón fijo llamado estator encargado de crear el campo magnético en cuyo interior gira el rotor donde se crean las fuerzas electromotrices inducidas.

Sin embargo coloquialmente se les ha llamado dínamos, Fig.2.7 a los equipos utilizados por los ciclistas durante años, ya que genera energía eléctrica que los ayuda a visualizar las calles en la noche. En realidad, esta herramienta usada en bicicletas son alternadores, ya que consisten en un imán fijo al eje de giro, una bobina estática, sin láminas de cobre ni escobillas que rectifiquen la corriente producida, la cual es alterna y no continua, a pesar de ello se les ha popularizado como dínamos.



Figura 2.7: Dínamo usado comunmente por ciclistas.

2.4.2. Corriente alterna.

La característica principal de una corriente alterna es que durante un instante de tiempo un polo es negativo y el otro positivo, mientras que en el instante siguiente las polaridades se invierten tantas veces como ciclos por segundo o hertz presente esa corriente. No obstante, aunque se produzca un constante cambio de polaridad, la corriente siempre fluirá del polo negativo al positivo, tal como ocurre en las fuentes de FEM que suministran corriente directa [7]. Para

producir corriente eléctrica es necesario del uso de un generador ya sea síncrono o asíncrono teniendo como principal diferencia las r.p.m. a las que trabajan ya que el primero trabaja únicamente a una cierta velocidad angular mientras el segundo puede operar a velocidades menores, los generadores asíncronos tienen como principal aplicación la energía eólica por la inestabilidad del viento.

Generadores síncronos.

El generador síncrono es un tipo de máquina eléctrica rotativa capaz de transformar energía mecánica en energía eléctrica donde su principio de funcionamiento consiste en la excitación de flujo en el rotor. Este generador está compuesto principalmente de una parte móvil o rotor y de una parte fija o estator. El rotor gira recibiendo un empuje externo desde una turbina el cual tiene acoplada una fuente de corriente continua de excitación independiente que genera un flujo constante, pero que al estar acoplado al rotor, crea un campo magnético giratorio que genera un sistema trifásico de fuerzas electromotrices en los devanados estatóricos [15].

El rotor también conocido como inductor es la parte que induce el voltaje en el estator al girar concéntricamente en el eje del generador a una velocidad sincrónica de 1500 r.p.m. para 50 Hz y 1800 r.p.m. para 60 Hz. El núcleo del rotor es construido de lámina troquelada de acero al silicio, material de excelentes características magnéticas, con la finalidad de evitar pérdidas por histéresis y corrientes parasitas [22, 23].

Generadores asíncronos.

La mayoría de turbinas eólicas del mundo utilizan un generador asíncrono trifásico, también llamado generador de inducción, para generar corriente alterna [15]. Fuera de las pequeñas unidades hidroeléctricas y de industria eólica donde su uso es trascendental debido a las fluctuaciones en la velocidad del viento, este tipo de generadores no se encuentra muy extendido ya que la velocidad angular del rotor puede ser controlada en otras aplicaciones.

El motor asíncrono trifásico está formado por un rotor, que puede ser de dos tipos: de jaula de ardilla o bobinado, ambos contienen un estator, en el que se encuentran las bobinas inductoras, dichas bobinas son trifásicas y se encuentran desfasadas entre sí a 120° en el espacio. Las turbinas eólicas utilizan generadores asíncronos porque el viento es una variable difícil de predecir, fluctúa estocásticamente y el tamaño comparado con los síncronos es mucho menor [15]. También cabe destacar que el uso de inversores para invertir de corriente directa a alterna es necesario ya que minimiza las pérdidas eléctricas que se generan por los largos cables de transmisión que van desde la turbina hasta la subestación [24].

2.5. Transmisión mecánica por cadena.

Una cadena es un componente confiable de una máquina que transmite energía por medio de fuerzas extensibles y se utiliza sobre todo para la transmisión y transporte de energía en los sistemas mecánicos, está se encuentra formada por una serie de piezas que actúan como cojinetes, estando situadas cada conjunto a una distancia precisa del otro mediante otras piezas planas llamadas placas. El conjunto cojinete se forma por un pasador y un casquillo sobre el que gira el rodillo de la cadena estos se encuentran articulados entre si bajo presiones elevadas para soportar las presiones generadas por la carga y la acción de engrane impartida a través de los rodillos de la cadena, generalmente las placas exteriores e interiores que recubren el cojinete se someten a un proceso de templado para obtener una mayor tenacidad.

2.5.1. Ventajas y desventajas de cadenas para la transmisión de energía.

Las cadenas mecánicas son los componentes para transmisión de energía más económicos actualmente, ya que son utilizadas en procesos de baja y alta velocidad como en bicicletas y en el eje de levas de los motores de automóviles respectivamente, las cadenas facilitan el mantenimiento preventivo como predictivo debido a que su periodo de vida es mayor comparado con otros sistemas de transmisión de potencia, ya que no están inmersas a esfuerzos torsores.

Sin embargo para mantener el correcto funcionamiento de las cadenas es necesarios lubricarlas con grasa periódicamente así mismo el peso, la correcta alineación y los altos ruidos son variables que deben tomarse en cuenta para lograr altos índices de eficiencia [24].

2.6. Teoría para el uso de la energía eólica.

En esta sección se analizarán los modelos matemáticos para poder estudiar la energía eólica, de la misma manera se pretende explicar la máxima eficiencia que es posible alcanzar en un aerogenerador.

2.6.1. Potencia del viento.

El viento es una masa de aire en movimiento que se encuentra relacionada directamente con la Ec. 2.1 de la energía cinética, donde m es la masa [kg], ν la velocidad del viento [$\frac{m}{s}$] y E_c la energía cinética [J].

$$E_c = \frac{1}{2}m\nu^2. \quad (2.1)$$

De la misma manera podemos definir a la potencia mediante Ec. 2.2.

$$P = \frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2} \frac{dmv^2}{dt}. \quad (2.2)$$

El flujo másico queda definido por la Ec. 2.3, donde ρ es la densidad $\frac{kg}{m^3}$, P la potencia [W], V el volumen [m^3]

$$\frac{dm}{dt} = \rho \frac{dV}{dt}. \quad (2.3)$$

El flujo volumétrico se obtiene mediante la Ec. 2.4, donde A el área [m^2].

$$\frac{dV}{dt} = Av. \quad (2.4)$$

Sustituyendo Ec. 2.4 en Ec. 2.3 obtenemos:

$$\frac{dm}{dt} = \rho Av \quad (2.5)$$

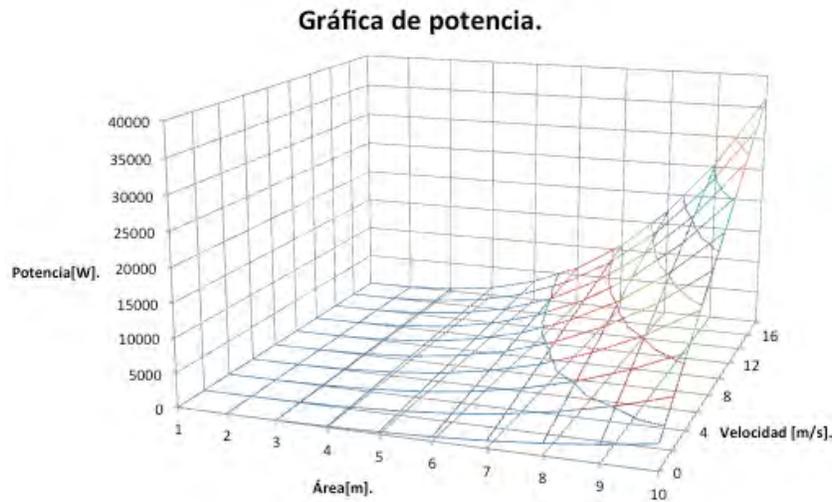


Figura 2.8: Potencia generada de un aerogenerador en función de la velocidad y el área.

Por último mediante la sustitución de la Ec. 2.5 en Ec. 2.2 se obtiene la Ec. 2.6, la cual calcula la potencia que se puede generar en una turbina eólica sin considerar pérdidas mecánicas o eléctricas [1]. La Fig.2.8 es una representación

gráfica de la Ec. 2.6, la cual está en función del área de barrido del aerogenerador y de la velocidad del viento.

$$P[W] = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad (2.6)$$

Se puede apreciar fácilmente que el factor de la velocidad es el más importante de la Ec. 2.6, ya que su valor se encuentra elevado al cubo. Esto significa que al duplicarse la velocidad la potencia obtenida se estará incrementando ocho veces.

2.6.2. Límite de Betz.

El coeficiente máximo de potencia que puede obtenerse del viento fue calculado por Albert Betz, ley que actualmente lleva su nombre. Esta ley parte de los principios de las ecuaciones de conservación de la masa y de momentum del aire, donde el máximo rendimiento posible es de $\frac{16}{27} = 0.593$, ya que despreció las pérdidas por fricción, rotación de la estela detrás del rotor y la cercanía de la punta de las aspas, supuso que el flujo es incompresible, densidad constante, adiabático, flujo con dirección axial hacia el rotor y con un número infinito de álabes que no son impulsados por arrastre [1]

La forma en que se dedujo la Ec. 2.6 no involucra aspectos de diseño, solo se considera un tubo formado por líneas de corriente, las cuales se expanden después del contacto con un disco actuador en aguas arriba, lo que genera que la velocidad del viento sea menor posteriormente, manteniendo esta tendencia hasta que el flujo se regenera totalmente. Una pregunta común en esta deducción es ¿porqué el aerogenerador no puede transformar toda la energía cinética del viento en energía mecánica? Esta pregunta es muy sencilla de responder ya que si la turbina absorbiera toda la energía pararía totalmente el viento, por lo tanto los aerogeneradores próximos siempre estarían parados. Como la energía mecánica sólo puede ser extraída a partir de la energía cinética contenida en el flujo de viento, esto significa que, con un flujo de masa sin cambios, la velocidad de flujo detrás del convertidor de energía eólica debe disminuir, por lo tanto la deducción de la ley de Betz se presenta de la siguiente manera [5].

$$P = \frac{1}{2}\rho A_1 \nu_1^3 - \frac{1}{2}\rho A_2 \nu_2^3 = \frac{1}{2}\rho(A_1 \nu_1^3 - A_2 \nu_2^3) \quad (2.7)$$

El flujo másico debe permanecer constante en toda la sección del tubo formado por las líneas de corriente tal como se presenta en la Ec. 2.8, donde ν_∞ es la velocidad del viento aguas arriba, ν_d la velocidad del disco actuador, ν_w la velocidad del viento aguas abajo, p_∞ la presión del viento y p_d la presión del viento en el disco actuador [4].

$$\rho A_1 \nu_1 = \rho A_2 \nu_2 \quad (2.8)$$

Sustituyendo Ec. 2.8 en Ec. 2.7 se obtiene la Ec. 2.9.

$$P = \frac{1}{2} \dot{m} (\nu_1^2 - \nu_2^2) \quad (2.9)$$

Usando la ley de conservación del momentum, la fuerza de el aire que se ejerce sobre el convertidor puede ser expresada como una relación de velocidades como se expresa en la Ec. 2.10

$$F = \dot{m} (\nu_1 - \nu_2) \quad (2.10)$$

De acuerdo con el principio de acción equivale a reacción, esta fuerza debe ser contrarrestada por una misma fuerza ejercida por el convertidor en el movimiento del aire. El empuje, por decirlo así traslada a la masa de aire en el plano del flujo del convertidor. La potencia necesaria para esto es.

$$P = Fv' = \dot{m} (\nu_1 - \nu_2) v' \quad (2.11)$$

Igualando la Ec. 2.7 y la Ec. 2.9 se obtiene la relación para la velocidad de flujo v' .

$$\frac{1}{2} \dot{m} (\nu_1 - \nu_2) (\nu_1 + \nu_2) = \dot{m} (\nu_1 - \nu_2) v'$$

$$v' = \frac{\nu_1 + \nu_2}{2}$$

Por lo tanto la velocidad de flujo a través del convertidor es igual a la media aritmética de ν_1 y ν_2 . La velocidad ν_2 y v' se expresan en términos de ν_1 por medio de un parámetro llamado factor de inducción de flujo axial y que es representado por la variable a [5].

$$v' = \nu_1 (1 - a) , \quad \nu_2 = \nu_1 (1 - a)$$

Utilizando las expresiones anteriores es posible definir la potencia como:

$$P = 2A\rho\nu_1^3(1 - a)^2 a \quad (2.12)$$

Obteniendo la potencia máxima

$$\frac{dP}{da} = 0 \rightarrow \left(a - \frac{1}{3}\right)(a - 1)(2\rho A\nu_{ent}) = 0$$

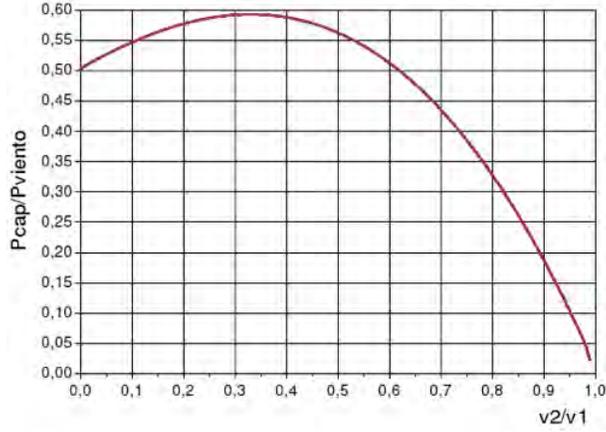


Figura 2.9: Curva de eficiencia de Betz

$$P_0 = 2\rho A v_1^3 \left(1 - \frac{1}{3}\right)^2 \frac{1}{3} = \frac{1}{2} \rho A v_1^3 \frac{16}{27}$$

La relación entre la potencia mecánica extraída por el convertidor y la de la corriente de aire sin perturbar es llamada el coeficiente de potencia C_P y se expresa como:

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho A v_1^3} \rightarrow C_p \leq 0.592$$

La Fig.2.9 expresa la relación de velocidades antes y después del disco así como la potencia del viento que existe según la Ley de Betz donde el valor más alto extraíble es de 0.59. Esto quiere decir como anteriormente se mencionó que la eficiencia máxima de una turbina sin considerar pérdidas mecánicas, eléctricas, estela después del rotor, turbulencia entre otros es del 59 % para todos los diseños posibles.

Capítulo 3

Diseño mecánico y aerodinámico de un aerogenerador de eje vertical tipo twister-Savonius.

En este capítulo se presentan los cálculos de diseño mecánico, aerodinámico y la distribución de fuerzas que actúan en el sistema de sujeción de dos aerogeneradores de eje vertical tipo twister savonius [17, 25] instalados en la ciudad de Temixco Morelos. Es importante mencionar que de acuerdo al criterio establecido para generadores grandes este lugar no es apto para el uso de esta tecnología por no cumplir con el parámetro de velocidad superior a $5 \frac{m}{s}$ promediado cada diez minutos [4]. Sin embargo es sumamente importante recalcar que este proyecto apunta hacia un generador de pequeña escala que pueda funcionar con los vientos característicos de la zona.

El diseño de los prototipos Fig.3.1 y Fig.3.6 es similar teniendo como principales diferencias la estructura de sujeción al suelo, el tamaño del área de captación y la distancia entre los rodamientos. La razón por la que se crearon dos prototipos fue para que al termino de las mediciones fuera posible comparar las eficiencias obtenidas entre ambos.

3.1. Diseño estático y dinámico.

3.1.1. Prototipo 1.

Diseño estático.

El prototipo 1, el cual se muestra en la Fig.3.1, tiene el eje principal de aluminio 6063 ($\rho = 2.69 \frac{gr}{cm^3}$) con un espesor de 4 milímetros fijado al suelo por dos remaches de 0.5 pulgadas de diámetro que atraviesan una simple estructura rectangular de acero Fig.3.2 conformada por dos placas de una pulgada de espesor, un par de rodamientos de bolas fueron utilizados para la rotación del prototipo sobre su propio eje, el primero a nivel de piso y el segundo a 50 centímetros de distancia.



Figura 3.1: Prototipo 1.

Al eje principal le fueron soldadas ocho medias circunferencias de aluminio 6063 desfasadas entre si 15° con el fin de aprovechar al máximo la sustentación y no sólo el arrastre como comúnmente se hace [20]. Para capturar la energía del viento fue utilizada licra la cual está sujeta a las medias circunferencias anteriormente mencionadas.

Los cálculos mecánicos se hicieron en el eje principal del aerogenerador debido a que es sobre la flecha donde se concentran los esfuerzos críticos tanto de torsión como de flección. De la misma manera se analizó con especial interés el área donde se encuentran ubicados los rodamientos, ya que las reacciones generadas en esos puntos son las que se contraponen al empuje del viento. El diseño mostrado en la Fig.3.3 tiene dos longitudes diferentes, una es la distancia entre cada media circunferencia y la otra entre los rodamientos, la razón por la que

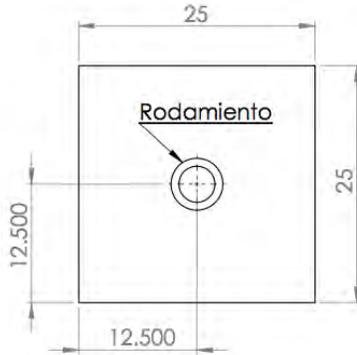


Figura 3.2: Base de prototipo 1.

son distintas es que entre mayor sea la distancia de los rodamientos menores serán los esfuerzos que soporten y por ende su vida útil será mayor.

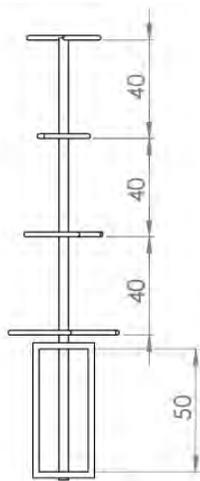


Figura 3.3: Esqueleto con base del aerogenerador 1.

La Fig.3.4 es un diagrama de fuerzas donde se considera que actúan puntualmente sobre el aerogenerador para el análisis estático, a pesar de que el empuje del viento en realidad actúa de forma distribuido en toda la superficie tubular. Las fuerzas que contrarrestan al aire se encuentran en los rodamientos.

Se supuso una velocidad constante de $10 \frac{m}{s}$ para el análisis de esfuerzos mecánicos debido a que era el dato correspondiente a la velocidad mas alta en la base de datos de la estación anemométrica y por ende los esfuerzos cor-



Figura 3.4: Reacciones.

tantes mayores ocurren en este valor. Sin embargo es muy importante aclarar que no es posible considerar el flujo de viento constante para la generación de potencia ya que existirían errores considerablemente grandes de diseño [26, 27]. La potencia máxima disponible teórica por el recurso eólico es posible calcularla como anteriormente se dijo utilizando la Ec. 2.6.

$$P = \frac{1}{2} \left(10 \frac{m}{s}\right)^3 \left(1.25 \frac{Kg}{m^3}\right) (0.7581m^2) = 474W$$

Con la potencia útil calculada a una velocidad del viento de $10 \frac{m}{s}$ es muy sencillo deducir la fuerza mediante la Ec. 3.1.

$$F = \frac{P}{v} \quad (3.1)$$

Sustituyendo valores de la potencia y velocidad en la Ec. 3.1:

$$F = \frac{474W}{10 \frac{m}{s}} = 47.4N$$

Las fuerzas que interactúan en el diseño fueron calculadas mediante una suma de momentos en el punto B ($\sum M_B$), asimismo se realizó un balance de fuerzas en la dirección Y ($\sum F_Y$), lo anterior puede observarse en la Fig.3.4.

$$\sum M_B = 0, R_A(0.5m) = -\left(39.5 \frac{N}{m}\right)(0.7m), R_A = -33.18N.$$

$$\sum F_Y = 0, R_B - 33.18N - 47.4N = 0, R_B = 80.58N$$

El valor de A es negativo debido a que se encuentra en la misma dirección del viento, mientras que B en sentido opuesto a las mismas.

Con los valores de las reacciones que soporta el dispositivo es posible dibujar un diagrama de fuerzas, esfuerzos cortantes y momento máximo flector para una mejor interpretación. La Fig.3.5 es una herramienta gráfica muy útil debido a que aporta los puntos más débiles del prototipo y cómo interactúan o interaccionan las fuerzas en el diseño [14]. En la parte superior del dibujo se encuentra el diagrama de fuerzas el cual ayuda a visualizar la posición magnitud

y dirección de las mismas, el diagrama de en medio es de esfuerzos cortantes el cual expresa el punto donde es más frágil a corte, un método para verificar si el diagrama es correcto es igualar las áreas para corroborar que haya balance de fuerzas por último el diagrama de momentos determina la carga que soporta a flexión el elemento [28, 29].

Después de obtener los valores del momento máximo flector y esfuerzo cortante tal como se muestran en la Fig.3.5, es necesario compararlos con la hoja técnica del fabricante mediante la Ec. 3.2, donde μ es el factor de seguridad que tendrá el prototipo, σ_{real} es el esfuerzo que soporta el material según el proveedor [MPa] y σ_{cal} es el esfuerzo calculado [MPa].

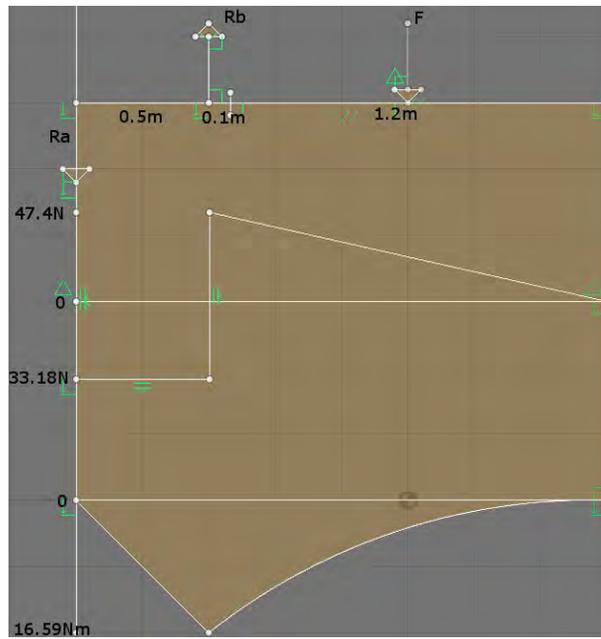


Figura 3.5: Diagrama de fuerza cortante y momento flector.

$$\sigma_{real} = \mu \sigma_{calculada} \quad (3.2)$$

El esfuerzo flector máximo $[\sigma_{cal}]$ actúa en el radio externo de la flecha debido a que tiene una relación con el incremento en la distancia y fue calculado mediante la Ec. 3.3, mientras que el momento de inercia con la Ec. 3.4, donde I es el momento de inercia $[m^4]$, c es el radio $[m]$ y M es el momento flector máximo $[Nm]$.

$$\sigma = \frac{Mc}{I}, \quad (3.3)$$

$$I = \frac{1}{4}\pi(r_1^4 - r_2^4) \quad (3.4)$$

Los valores obtenidos después de la sustitución de valores son:

$$I = \frac{1}{4}\pi(0.02^4 - 0.015875^4) = 7.578 \times 10^{-8} m^4, \quad c = 0.02m \quad M = 45.03Nm$$

Sustituyendo valores en Ec 3.3.

$$\sigma = \frac{Mc}{I} = \frac{(45.03Nm)(0.02m)}{7.578 \times 10^{-8} m^4} = 4.378MPa$$

Sustituyendo el valor de σ_{cal} y el dato que aporta la hoja técnica del fabricante en la Ec. 3.2.

$$\mu = \frac{\sigma_{real}}{\sigma_{calculada}} = \frac{4.378MPa}{1.2MPa} = 2.97$$

El valor de $\mu = 2.97$ obtenido anteriormente representa el factor de seguridad que el dispositivo tiene en respuesta al momento flector, por lo que se concluye que está sobre valuado el espesor del prototipo. Sin embargo para tener un estudio completo es necesario sumar el esfuerzo torsor que se genera en el mismo punto de análisis[30]. El esfuerzo torsor puede ser calculado mediante la Ec. 3.5 donde T es el momento de torsión externo aplicado [Nm], τ es el esfuerzo cortante en las fibras más alejadas [Pa], J es el segundo momento polar de área de la sección transversal del tubo [m^4] y r es el radio [m].

$$\frac{T}{J} = \frac{\tau}{r} \quad (3.5)$$

Los valores de J y r son sencillos de obtener mediante la medición del diámetro interno y externo del eje principal, sin embargo para obtener los valores de T y τ es necesario calcular la velocidad angular mediante la Ec. 3.6, con los valores de la velocidad inicial de $10 \frac{m}{s}$ y del radio externo.

$$J = \frac{\pi}{32}(D^4 - d^4) = \frac{\pi}{32}(0.04m^4 - 0.03175m^4) = 1.5156 \times 10^{-7} m^4, \quad r = 0.316m$$

$$\omega = \frac{v}{r} \quad (3.6)$$

Es necesario aclarar que para el cálculo de ω , fue considerado el valor de r como la distancia del centro del prototipo a la punta del mismo, debido a que el valor esta en función al radio. Sustituyendo valores:

$$\omega = \frac{10 \frac{m}{s}}{0.316m} = \frac{31.645}{s}$$

Con el valor de la velocidad angular y de la potencia anteriormente calculada es posible obtener el valor del momento de torsión externo aplicado en la orilla del eje mediante la Ec. 3.7.

$$T = \frac{P}{\omega} \quad (3.7)$$

Así mismo sustituyendo valores, se obtiene:

$$T = \frac{474W}{\frac{31.645}{s}} = 14.978Nm$$

El valor de τ se obtuvo mediante la Ec. 3.5.

$$\tau = \frac{(14.978Nm)(0.02m)}{1.5156 \times 10^{-7}m^4} = 1.9765MPa$$

Al sustituir los valores del esfuerzo torsor máximo T y el flector máximo M en la Ec 3.8 es posible obtener los esfuerzos máximos en cualquier ángulo a tensión $+$ y compresión $-$ que puede soportar el dispositivo. Cabe destacar que para el correcto uso de la Ec. 3.8, es necesario considerar a la flecha como un sólido ya que los esfuerzos mayores se presentan en la fibra mas alejada del centro.

$$\sigma_{(1,2)} = \left(\frac{D}{2J}\right)[M \pm \sqrt{M^2 + T^2}] \quad (3.8)$$

Sustituyendo valores en Ec. 3.8.

$$\sigma_1 = \left(\frac{1}{2}\right) \frac{0.04m}{1.5 \times 10^{-7}m^4} [16.59Nm + \sqrt{(16.59Nm)^2 + (14.978Nm)^2}] = 5.19MPa$$

$$\sigma_2 = \left(\frac{1}{2}\right) \frac{0.04m}{1.5 \times 10^{-7}m^4} [16.59Nm - \sqrt{(16.59Nm)^2 + (14.978Nm)^2}] = -0.77MPa$$

Una de las etapas finales en el diseño fue calcular el esfuerzo cortante máximo τ_{max} que soportará el eje mediante la Ec. 3.9. La seguridad en el diseño es la razón por la que se promedian los esfuerzos de compresión y tensión ya que sumados con el mismo signo el valor es mayor y el riesgo menor.

$$\tau_{Max} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (3.9)$$

Sustituyendo valores:

$$\tau_{Max} = \frac{1}{2}(5.19MPa + 0.77MPa) = 2.98MPa$$

Mediante la teoría de Von Mises se obtuvo el diámetro mínimo requerido de la flecha desde un punto de vista estático, donde fue necesario conocer el punto de fluencia S_y , el cual tiene un valor de 83 MPa según la hoja técnica del fabricante, mientras que con la Ec. 3.10 se obtuvo el valor de S_{sy} , el cual está en función del punto de fluencia y es el límite entre seguridad y el esfuerzo que se le puede aplicar al material [14].

$$S_{sy} = 0.577S_y \quad (3.10)$$

Por lo tanto el valor de S_{sy}

$$S_{sy} = (0.577)(82MPa) = 47.31MPa$$

El diámetro mínimo requerido estáticamente se obtuvo mediante la siguiente ecuación.

$$D_e = \left[\left(\frac{27.7\mu}{\pi S_y} \right) (M^2 + T^2)^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (3.11)$$

$$D_e = \left[\left(\frac{(27.7)(2.97)}{(\pi)(83MPa)} \right) ((45.03Nm)^2 + (14.978Nm)^2)^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{3}} = 0.025m$$

El diámetro obtenido anteriormente muestra que el diseño construido está en condiciones correctas de trabajo, sin embargo se calculó de nuevo el valor de J en función a las hoja técnica del fabricante, con el fin de comparar materiales.

$$J_2 = \frac{\pi}{32} ((0.025m)^4 - (0.0218m)^4) = 0.162 \times 10^{-7} m^4$$

Como el nuevo J_2 es menor que J inicialmente calculado, se concluye que el diseño estático está sobrado para el estudio.

Diseño dinámico.

Debido a que el prototipo estuvo continuamente en rotación, es necesario complementar los cálculos de diseño con un análisis dinámico que evalúen a la fatiga en función de los esfuerzos torsores y flectores, siendo estos últimos los más importantes en este proyecto, debido a que el aerogenerador de eje vertical no opone resistencia al giro y sí a la flexión por la constante fluctuación en el contacto entre la flecha y el aire. El procedimiento para el cálculo de la resistencia de un eje a cargas dinámicas es mediante las siguientes fórmulas [14].

Flexión.

$$\sigma_a = \frac{32M}{\pi D^3} \quad (3.12)$$

Sustituyendo los valores.

$$\sigma_a = \frac{(32)(45.03Nm)}{\pi[(0.04m)^3 - (0.03175m)^3]} = 14.37MPa$$

Torsión.

$$\tau_a = \frac{16T}{\pi D^3} \quad (3.13)$$

Sustituyendo valores.

$$\tau_a = \frac{(16)(19.975Nm)}{\pi[(0.04m)^3 - (0.03175m)^3]} = 3.11MPa$$

Mediante la teoría de diseño mecánico de Sines, la cual dice que la resistencia a la fatiga por flexión no varía por la existencia de un esfuerzo medio de torsión hasta que el esfuerzo cortante máximo es 1.5 veces mayor que el límite elástico S_{sy} , tal como se muestra en la siguiente ecuación [14].

$$\tau_{max} = 1.5S_{sy} \quad (3.14)$$

$$\tau_{max} = (1.5)(47.31MPa) = 70.97MPa$$

Como se observa en la eq. 3.14, el esfuerzo torsor es despreciable y es menester enfocarse solamente en los esfuerzos flectores. Por último para calcular el diámetro mínimo requerido analizado dinámicamente se calculó S_e , la cual es una variable que está en función del esfuerzo cortante σ_a .

$$\mu = \frac{S_e}{\sigma_a} \quad (3.15)$$

$$S_e = (2.97)(14.37MPa) = 42.68MPa$$

El diámetro mínimo requerido analizado desde una perspectiva de la dinámica se obtiene por la siguiente ecuación.

$$D_d = \left[\frac{32\mu}{\pi S_e} M \right]^{\frac{1}{3}} \quad (3.16)$$

Sustituyendo valores.

$$D_d = \left[\frac{(32)(2.97)}{(\pi)(42.68MPa)} 45.03Nm \right]^{\frac{1}{3}} = 0.031m$$

De acuerdo al valor del coeficiente de seguridad obtenido en los cálculos anteriores se puede concretar que el diseño cumplirá los requerimientos, debido a que el valor del esfuerzo cortante tolerable es mayor a los esfuerzos cortantes que puedan generarse por las diversas ráfagas de viento que predominan en el sitio de estudio. Aunque el prototipo tiene un factor de seguridad considerable es posible mejorarlo desde el lado económico, reduciendo los espesores de la flecha de aluminio y las costillas que soportan la licra para obtener una reducción de los costos y de la misma manera ocupar una cantidad menor de energía dinámica proveniente del viento para romper el momento de inercia, todo esto con el fin de obtener la mayor eficiencia energética posible [31].

3.1.2. Prototipo 2.

En la Fig.3.6 se presenta el prototipo 2 el cual fue diseñado y construido de la misma manera que en el diseño 1, pero con ciertas mejoras sobre el prototipo 1, tales como la reducción en el espesor de los tubos de aluminio para que el momento de inercia sea menor y por ende gire con mayor facilidad, sustitución de la licra por vela de barco para aprovechar la mayor cantidad de aire disponible, modificación del sistema de fricción por una cadena mecánica en el sistema transmisión con una relación de 3:1 y por último el incremento del área de barrido con el fin de obtener mayor potencia. El procedimiento para calcular los esfuerzos mecánicos en el prototipo 2 son los mismos que en el diseño 1.



Figura 3.6: Prototipo 2.

Tanto los datos de densidad, como la velocidad del viento se mantuvieron constantes para realizar un análisis comparativo del comportamiento de ambos prototipos, por lo tanto:

$$\rho = 1.25 \frac{Kg}{m^3}, A = 0.84m^2, \nu = 10 \frac{m}{s}$$

Así mismo la potencia máxima generada fue calculada mediante la Ec. 2.6 donde.

$$P = \frac{1}{2} (1.25 \frac{Kg}{m^3}) (0.84m^2) (10 \frac{m}{s})^3 = 525W$$

Por lo tanto la fuerza resultante que afecta el prototipo se calculó de la misma forma mediante la Ec. 3.1

$$\frac{P}{\nu} = \frac{525W}{10 \frac{m}{s}} = 52.5N$$

El cálculo de las reacciones en los soportes fueron significativamente menores que en el prototipo 1 debido a que los rodamientos se ubicaron a una mayor distancia tal como se aprecia en la Fig.3.7 Los valores de las fuerzas que contrarrestan el empuje del viento en el prototipo fueron calculadas mediante una sumatoria de momentos en el punto A ($\sum M_A$) así mismo de una sumatoria de fuerzas en la dirección Y ($\sum F_Y$), las cuales tuvieron como valores.



Figura 3.7: Reacciones.

$$R_A = 25.658N, R_B = 26.842N$$

En la Fig.3.8 se puede apreciar el diagrama de cuerpo libre, fuerzas y de momentos que ocurren en el prototipo 2, donde se puede observar que el momento máximo flector es cerca de la mitad de la viga con un valor de 9.576 Nm.

Con los valores nominales del diámetro tanto interno como externo del tubo de aluminio, es posible calcular el momento de inercia como el esfuerzo cortante

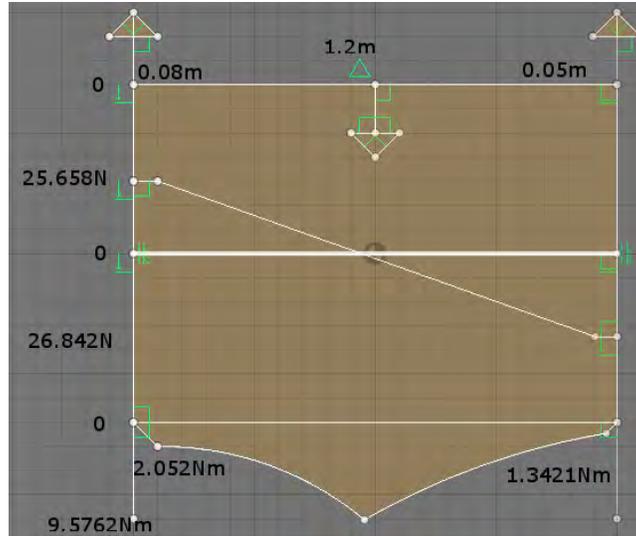


Figura 3.8: Diagramas de cuerpo libre, fuerzas y momentos.

mediante la Ec. 3.4, con el fin de comparar la resistencia mecánica del prototipo con la hoja técnica proporcionada por el proveedor. Los datos que a continuación se presentan son los valores obtenidos en la parte donde se encuentran los rodamientos la cual es la más fragil y por ende la que mayor atención debe tener.

$$I = 7.672 \times 10^{-9} m^4, \quad c = 0.0127 m, \quad M = 9.5768 Nm$$

Sustituyendo valores en Ec 3.3.

$$\sigma = \frac{(9.5768 Nm)(0.0127 m)}{(7.626 \times 10^{-9} m^4)} = 15.948 MPa$$

Por último se comparó el valor real que soporta el material con el valor calculado mediante la Ec. 3.2 para verificar si soportará la fuerza producida por el viento.

$$\mu = \frac{13}{15.9487} = 0.8151$$

A pesar de que el coeficiente de seguridad de diseño mínimo es de 1 según la mecánica de materiales [32, 33] se decidió hacer un prototipo con una pared delgada de 1.5 mm, el cual es inferior al espesor sugerido con el objetivo de reducir el peso del mismo y que fuera más sencillo romper el momento de inercia, hay que recalcar que la razón por la que el espesor es tan delgado es debido a

que el rango de velocidades en el sitio de análisis es muy bajo según las normas de medición [34, 35].

De la misma manera fue calculado el momento torsor para concretar el análisis del elemento mediante la Ec. 3.5 [36].

$$\frac{T}{J} = \frac{\tau}{R}$$

Sabidos los valores de $R = 0.0127$ y de $J = 1.5252 \times 10^{-8} m^4$, es posible calcular el valor de τ , ω y T mediante las Ec. 3.5, 3.6 y 3.7 respectivamente.

$$\omega = \frac{28.571}{s}, \quad T = 18.375 Nm, \quad \tau = 15.3 MPa$$

Como en el modelo anterior fueron calculados los esfuerzos totales $\sigma_{1,2}$, mediante la Ec. 3.8, los cuales son los límites de los esfuerzos a tensión y compresión respectivamente.

$$\sigma_1 = 25.23 MPa, \quad \sigma_2 = -9.28 MPa$$

Teniendo como resultado final el esfuerzo cortante máximo que soportará la flecha .

$$\tau_{max} = 17.25 MPa.$$

Los valores de S_y y S_{sy} son los mismos que en el prototipo 1, ya que es el mismo material, por lo tanto el D_e que se obtuvo fue de 0.0121 m, sin embargo comercialmente sólo se encuentra el perfil de media pulgada que equivale a 0.0125. El resultado del diámetro mínimo requerido cumple con las expectativas de diseño visto de un lado estático ya que es el mismo valor con el que se diseñó el aerogenerador.

Como se mencionó anteriormente este prototipo fue diseñado por debajo del nivel de seguridad mínimo requerido debido a las bajas ráfagas de viento que existen en el sitio. Sin embargo como medida preventiva fue puesto un cilindro sólido en la parte interna de la flecha a la altura del rodamiento para que la vida útil del aerogenerador fuera de por lo menos el periodo de medición.

Diseño dinámico.

Para concluir esta sección de diseño mecánico, se realizaron los cálculos del esfuerzo flector σ_a y torsor τ_a , los cuales tuvieron valores de 151.61 MPa y 145.43 MPa respectivamente. El valor de S_e y del diámetro fue de 123.57 MPa y 0.016 m. El diámetro calculado no existe en el mercado, por lo que es necesario diseñar con el diámetro exterior superior inmediato de 0.019 m y espesor 0.0028 m para que no colapse el aerogenerador .

3.2. Diseño aerodinámico.

El flujo del viento alrededor de edificaciones ha sido investigado por muchas razones que incluyen acumulación de nieve, dispersión de contaminantes, confort de peatones al caminar y por supuesto viabilidad en la instalación de aerogeneradores. El viento puede cambiar con mucha facilidad su trayectoria dependiendo de los obstáculos que se interpongan en su camino, los cuales en zonas urbanas van desde pequeños matorrales hasta grandes construcciones. El estudiar el comportamiento del aire al entrar en contacto con cuerpos tal como se muestra en la Fig.3.9 es de suma importancia debido a que en algunos lugares el viento es turbulento lo que genera que su captura para la transformación de energía eléctrica se convierta en una tarea muy complicada [37].

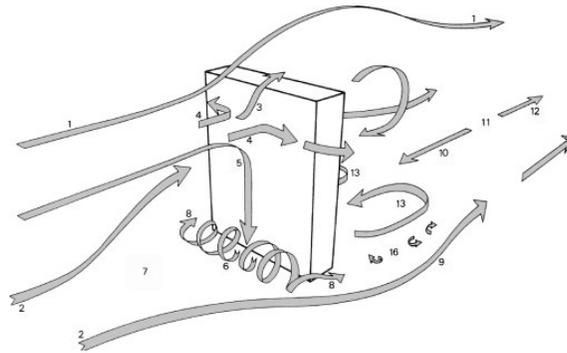


Figura 3.9: Trayectorias del viento alrededor de edificios.

La mejor ubicación para instalar un aerogenerador de eje vertical es en el borde de la azotea del edificio más alto debido a que el perfil de velocidad del viento aumenta con la altura [38]. Utilizar el centro de la construcción para la instalación de un aerogenerador es benéfico para todas las velocidades del viento, pero es necesario el levantamiento de una torre para evitar los vórtices que hay en el centro del mismo [39, 40], el peor lugar para esto, sería la orilla del edificio en dirección contraria al viento debido a que antes de que el flujo de aire llegue al aerogenerador habrá entrado en contacto con el edificio y modificado su comportamiento tal como se muestra en la Fig.3.9.

Un estudio enfocado en encontrar el ángulo óptimo de twist para aerogeneradores de eje vertical tipo savoius con baja velocidad medidos en un tunel de viento, fue utilizado para determinar la forma óptima en el diseño [41] donde la única variación fue el ángulo de torsión que existe entre la base y la superficie tal como se presenta en la Fig.3.10.

Mediante el software diseño de fluidos computacionales se simularon diferentes modelos de twister savonius con variaciones en el ángulo de torsión que van

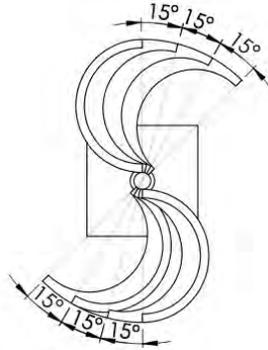


Figura 3.10: Ángulo de twist.

desde 0° hasta 60° con intervalos de 5° [32]. La Fig.3.11 representa los resultados experimentales de diversos aerogeneradores con ángulos de twist que van desde 0° hasta 60° , donde la máxima eficiencia es con el ángulo de 45° [42].

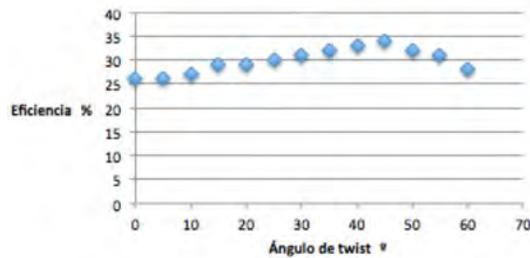


Figura 3.11: Eficiencia de potencia contra ángulos de twist.

La razón por la que usar un ángulo de torsión es benéfico para este proyecto es debido a que se busca explotar la sustentación del viento que se genera por el gradiente de presión que existe entre la parte superior e inferior del diseño y no sólo el arrastre como los Savonius tradicionales. El usar 45° de twist es idóneo debido a que se forma un perfil aerodinámico óptimo en el diseño ya que en este valor la energía generada por sustentación es mayor que la de arrastre [43].

La Fig.3.12 muestra las r.p.m. de cada diseño para rangos de velocidad de viento, esta imagen prácticamente representa las diferentes curvas de potencia para todos los prototipos, donde se encontró que los diseños con ángulo twist tienen mayor torque que los que tienen álabes rectos, lo que significa que necesitarán menos mantenimiento y por lo tanto su vida útil será mayor.

Lo descrito anteriormente tuvo gran relevancia en el diseño aerodinámico de los aerogeneradores debido a que ambos fueron construidos con un ángulo de

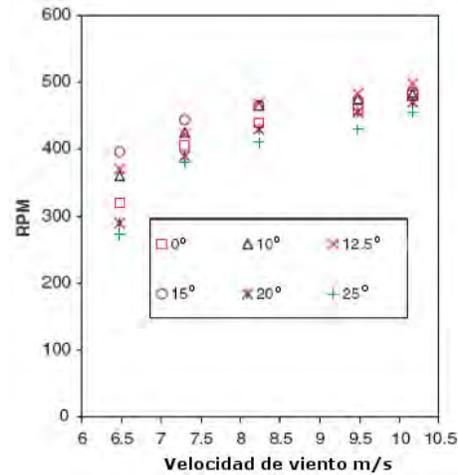


Figura 3.12: RPM contra velocidad del viento con diferentes ángulos de twist.

torsión de 45° , con el objetivo de obtener eficiencia altas que en este caso puede llegar a ser hasta de un 33%. Cabe recalcar que el proceso de manufactura para lograr dicho ángulo entre cada costilla fue lo más complejo en la construcción de los prototipos, debido al alto grado de alineación que se requiere [44].

3.3. Sistema de sujeción.

El diseño del sistema de sujeción es de suma importancia debido a que tiene como función mantener en la correcta posición al diseño y anclar el aerogenerador al suelo para evitar accidentes a terceros. Mediante el uso de un software llamado Staad Pro el cual es muy común en el área de ingeniería civil fue posible calcular los esfuerzos, fuerzas, momentos y desplazamientos que ocurren tanto en las uniones como en los elementos que conforman la estructura.

3.3.1. Estructura de sujeción del diseño 1.

El sistema que se muestra en la Fig.3.13 cuenta con una modificación respecto al diseño original de la Fig.3.1 debido a que el inicial cuenta con 2 placas de acero de una pulgada de espesor en la parte superior e inferior del mismo, este cambio se debió a que el software Staad Pro que tiene como principal función comprobar esfuerzos en armaduras, sólo puede analizar los esfuerzos en barras. En el cuadro 3.1 se muestran los desplazamientos y rotaciones que hay en cada junta de la estructura medidos en centímetros y radianes respectivamente.



Figura 3.13: Nodos del prototipo 1 sujetos a análisis de esfuerzos.

En el cuadro 3.1 se puede apreciar que el sistema en su mayoría de datos tienden a ser cero lo que significa que el desplazamiento es despreciable, así mismo el cuadro 3.2 se encuentra compuesto por las reacciones de fuerza y momento de cada soporte con unidades de Newton y Newton-metro, respectivamente. Por los resultados anteriores se puede corroborar que la distribución de fuerzas es correcta ya que tienen la misma magnitud, pero con diferente signo lo que significa que la estructura se encuentra en equilibrio de fuerzas y momentos en cada eje.

3.3.2. Estructura de sujeción del diseño 2.

El cuadro 3.3 presenta aporta los desplazamientos máximos posibles en centímetros y la rotación en radianes que existirán en cada junta debido a las condiciones iniciales del diseño donde se tomaron como referencia las reacciones de los rodamientos y la fuerza del viento. El signo negativo que aparece en algunos valores es debido al eje de referencia que se propuso en el software Staad Pro, así mismo los valores tan pequeños representan un alto índice de seguridad ya que tanto el desplazamiento como la rotación son mínimos.

El diagrama del sistema de protección y sujeción del prototipo número 2 se muestra en la Fig.5.6, el cual consiste en 22 barras de solera unidas entre si por medio de soldadura y con tres soportes para la fijación al suelo. La razón por la que se seleccionó una base triangular es para disminuir el desbalanceo de la estructura por las imperfecciones del suelo, así mismo las barras que unen a la flecha con el resto del diseño tienen un ángulo de inclinación con el fin de reducir las vibraciones mecánicas que se puedan generar por altos vientos [45, 46].

Junta	X-Desp	Y-Desp	Z-Desp	X-Rot	Y-Rot	Z-Rot
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
6	0.0002	0	0	0	0	0
7	0.0002	0	0	0	0	0
8	0.0002	0	0	0	0	0
9	0.0002	0	0	0	0	0
10	0.0002	0	0	0	0	0

Cuadro 3.1: Desplazamientos y rotaciones aplicadas en las barras de la estructura del prototipo 1.

Soporte	X-Fuerza	Y-Fuerza	Z-Fuerza	X-Mom	Y-Mom	Z-Mom
1	-11.85	-15.11	12.24	0.01	0.36	-1.6
2	11.85	15.11	-12.24	-0.01	0.36	1.6
3	-11.85	-15.11	12.24	0.01	-0.36	-1.6
4	11.85	15.11	-12.24	-0.01	-0.36	1.6

Cuadro 3.2: Fuerza y momentos aplicados en las juntas de la estructura del prototipo 1.

Junta	X-Desp	Y-Desp	Z-Desp	X-Rot	Y-Rot	Z-Rot
1	0	0	0	0.0001	0	0.0001
2	0	0	0	0	0	0.0003
3	0	0	0	-0.0001	0	0.0001
4	0	0.0001	0	0.0001	0	0.0001
5	-0.0003	-0.0024	0.0001	0.0001	0	0.0001
6	-0.0002	0.003	-0.0001	-0.0001	0	0.0001
7	-0.0013	0.0003	-0.0001	0	0	0.0002
8	-0.0674	0	-0.0009	0	0.0001	0.0002
9	-0.0725	-0.0001	0.002	0.0001	0.0001	0.0001
10	-0.0725	0.0001	-0.0048	0.0001	0.0001	0.0001
11	-0.0725	0.0002	-0.0015	0	0.0001	0
12	-0.0704	-0.0012	0.0008	0.0001	0.0001	0.0001
13	-0.0703	0.0017	-0.0032	-0.0001	0.0001	0
14	-0.0711	0.0003	-0.0014	0	0.0001	0.0001

Cuadro 3.3: Desplazamientos y rotaciones aplicadas en las barras de la estructura del prototipo 2.

Soporte	X-Fuerza	Y-Fuerza	Z-Fuerza	X-Mom	Y-Mom	Z-Mom
1	-24.41	54.09	8.25	0.0001	0	0.0001
2	5.83	0	-2.85	0	0	0
3	22.25	-50.09	-5.41	0	0	0

Cuadro 3.4: Nodos del prototipo 2 sujetos a análisis de esfuerzos.



Figura 3.14: Nodos del prototipo 1 sujetos a análisis de esfuerzos.

A diferencia del sistema de sujeción 1 donde la mayoría de los valores son cero, el sistema 2 tiene valores en casi todos sus componentes debido a que no es tan rígido, pero si muy seguro por sus bajos valores. Para completar el análisis sobre la estructura fue necesario calcular las fuerzas en Newtons y momentos en Newton-metro que existen entre el piso y los tres puntos de sujeción de la estructura como se muestra en el cuadro 3.4.

Los sistemas de sujeción presentados en esta sección son considerados seguros según el software Staad Pro ya que las vigas soportan bajos niveles de fuerzas, momentos, rotaciones y desplazamientos, así mismo se encuentran en equilibrio de fuerzas en cada eje ya que la sumatoria de fuerzas es cero.

En el siguiente capítulo se presenta el marco experimenta, el cual consiste en las actividades y consideraciones para realizar este proyecto.

Capítulo 4

Marco experimental.

En esta sección se presentan todas las actividades y consideraciones que se realizaron durante el proceso de pruebas con el fin de medir la velocidad del viento y la capacidad de los aerogeneradores de eje vertical twister savonius para producir energía eléctrica.

4.1. Velocidad de diseño para generación de potencia.

Una recomendación en el diseño de aerogeneradores respecto a la obtención de potencia es utilizar 1.7 veces la velocidad promedio del sitio, ya que la velocidad máxima del viento o la velocidad promedio porque ambos datos arrojan curvas de potencia diferentes, ya que si se considera la velocidad máxima del viento el diseño debería ser extremadamente robusto lo que generaría un incremento considerable en los costos y así mismo solo giraría en pocas ocasiones cuando existan ráfagas de grandes magnitudes. Por otro lado, si se utiliza la velocidad promedio se tendría un proyecto demasiado conservador a la hora de generar potencia, porque continuamente debería pararse por cuestiones de seguridad si las ráfagas exceden el valor nominal de diseño.

Estas condiciones para el diseño son demasiado complejas de resolver ya que puede ser considerado como secreto industrial por las compañías, sin embargo existen criterios ingenieriles [44, 48] en función de los materiales usados, el flujo de viento, costos de operación y mantenimiento que recomiendan tener un valor de 1.7 veces la velocidad promedio para un prototipo adecuado. Esta sugerencia se debe a que con este valor se abarca un área mayor bajo la curva de potencia que si se utilizara el promedio o la moda, considerando a la vez la viabilidad en los costos y las dimensiones del prototipo.

Con el apoyo de la Ec. 2.6, la velocidad promedio del sitio multiplicada por

el factor recomendado de 1.7[49], considerando una eficiencia del diseño máxima de 33 % como se muestra en la Fig.3.11 y sin considerar la transmisión mecánica ni el sistema de generación, fue calculada la potencia de salida por unidad de área de los aerogeneradores.

$$P = \frac{1}{2}\rho V^3 A, P = \frac{1}{2}(1.25 \frac{kg}{m^3})(5.1 \frac{m}{s})^3(0.758m^2), P = 62.84 \frac{W}{m^2}$$

Hay que recalcar que a este valor obtenido todavía hay que multiplicarlo por la eficiencia de transformación de energía cinética del viento a eléctrica, factor de planta por lo tanto será menor la potencia obtenida.

4.2. Período de adquisición de datos.

Para realizar un estudio de viabilidad eólica confiable es necesario tener un historial de velocidad y dirección del viento de por lo menos treinta años promediado cada lustro [50, 51]. Sin embargo existen otros periodos de medición viables no tan precisos descritos en la sección 2.4.1, los cuales mencionan de manera alternativa que con los datos de un año natural puede ser suficiente para el diseño de un aerogenerador, evaluación del recurso en sitio y pronóstico de la potencia de salida que se obtendrá.

Parece ser que dentro de cada lustro existe un año que es atípico, el cual varía hasta en un 25 % respecto a los otros cuatro [1], para el desarrollo de este proyecto se cuenta con información de tres años lo que permite comparar que tan constante es el flujo de viento a lo largo de los mismos. Otra variable que actualmente debe de considerarse es el cambio climático, ya que repercute directamente con el pronóstico del recurso eólico.

La Fig.4.2 es un historial que muestra las horas disponibles de viento que hay en un año para diversas velocidades en el lugar donde se instalaron los aerogeneradores. La forma en que se construyó esta gráfica fue mediante la separación de rangos de velocidad de $1 \frac{m}{s}$ llamados bins comúnmente, originarios de una base de datos con periodo del 1 de Enero del 2010 al 31 de Diciembre del 2010. Cabe recalcar que la moda en la información es de $2 \frac{m}{s}$ lo que significa que es el valor que más veces aparece en la base de datos, mientras que la velocidad promedio fue de $1.68 \frac{m}{s}$.

Para obtener la información del viento se usó la estación meteorológica que cuenta con un anemómetro de copas y una veleta como se muestra en la Fig.4.3, la cual es la misma ubicación donde se fijaron los aerogeneradores de eje vertical por último la información que arrojó el sistema de medición a la red de almacenamiento fue tomada cada segundo con promedios de diez minutos [1, 52].

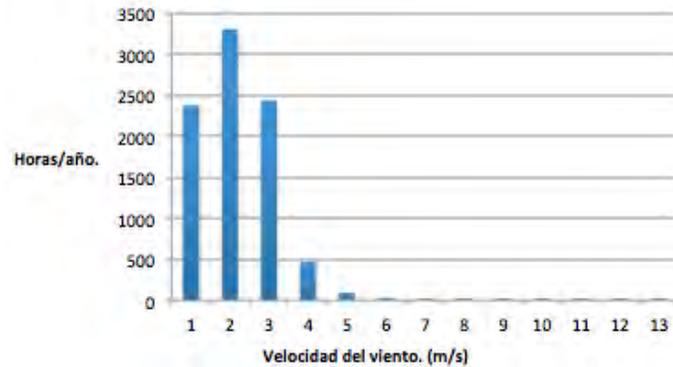


Figura 4.1: Curva de disponibilidad de viento.

Afortunadamente antes de la elaboración de este proyecto existía una base de datos con información de más de tres años, la cual ayudó a analizar la viabilidad de la instalación del prototipo [46, 53] y el periodo de experimentación para realizar las mediciones de viento, el cual se estableció del 15 de Enero del 2013 al 15 de Abril del 2013. La selección de este rango de tiempo fue debido a que en estas fechas la velocidad del viento es mayor que en el resto del año ya que existe un gradiente de temperatura entre la superficie del suelo y el aire por el cambio estacional de invierno a primavera.

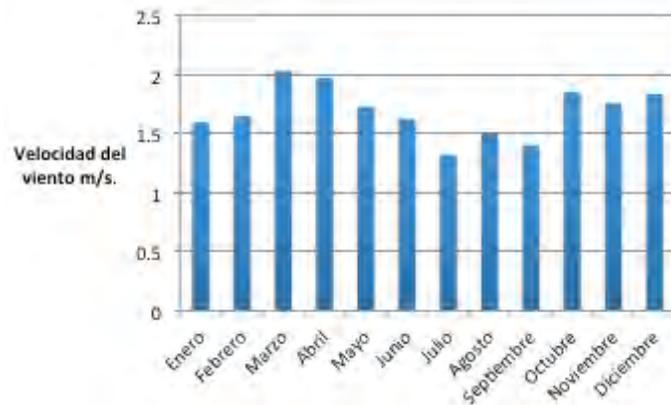


Figura 4.2: Promedio de la velocidad del viento a lo largo de un año.

A pesar que la estación meteorológica arroja datos cada segundo, por cuestión de almacenaje se decidió tomar como tiempo de muestreo dos segundos promediados cada diez minutos, la cantidad de datos obtenidos fue de 3888000



Figura 4.3: Anemómetro y veleta del IER.

los cuales se encuentran almacenados en una memoria para su posterior uso y fueron utilizados para hacer las gráficas de potencia generada, velocidad del viento y tiempo transcurrido de medición que se presentan en el capítulo cinco.

4.3. Ubicación del montaje y viabilidad eólica del sitio.

La ubicación donde se instalaron estos prototipos fue en el edificio de posgrado del Instituto de Energías Renovables tal como se ve en la Fig.4.4, el cual tiene un área de 526 m^2 y esta a una altura de 19.03 metros sobre el nivel del suelo de Temixco Morelos, ciudad que se encuentra en los $18^\circ 51'$ de latitud norte y los $99^\circ 14'$ de longitud oeste a una altura de 1280 metros sobre el nivel del mar. Temixco es un lugar en el cual sólo se pueden obtener ciertos niveles de producción de potencia con fin académico debido a que la velocidad promedio anual del viento es de $1.68 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, cuando el mínimo requerido para que un aerogenerador comercial comience a producir es de $5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ aproximadamente [1, 54, 55].

La razón por la que el valor de $5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ es trascendente es debido a que a esa velocidad los motores para romper el momento de inercia en los aerogeneradores de vertical como el sistema de ubicación de los aerogeneradores de eje horizontal comienzan a trabajar con el fin que la turbina produzca energía.



Figura 4.4: Aerogeneradores instalados.

Para definir la viabilidad de un lugar es necesario calcular la potencia de salida máxima que se puede generar en el sitio deseado, en la Fig.4.1 se presenta la potencia por unidad de área que habrá con diferentes regímenes de velocidad de viento, para construir esta gráfica fue necesario tomar los datos de un año y dividirlos en bins de $1 \frac{m}{s}$ para que posteriormente fueran agrupados entre sí.

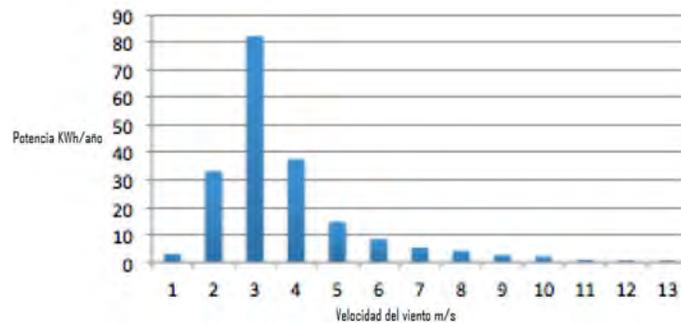


Figura 4.5: Potencia que se puede extraer en el sitio de estudio a lo largo de un año.

Como se puede observar en la Fig.4.5 la potencia disponible que se puede extraer en el sitio es pequeña por las bajas velocidades de viento que existen en

el sitio, sin embargo con el bajo peso de los diseños se busca generar la mayor cantidad de potencia posible con el objetivo de implementar este tipo de tecnología en una mayor cantidad de sitios con bajo recurso eólico.

4.4. Sistema de adquisición de datos.

Con el uso de una tarjeta adquisidora de datos marca Agilent modelo 35970 A, un módulo multiplexor de 40 canales capaz de registrar al mismo tiempo los valores de las mediciones de voltaje y corriente generados por los diferentes generadores que a su vez irán conectados a la tarjeta, donde los puertos 1 y 2 fueron utilizados para voltaje y los 21 y 22 para corriente. Entre las características principales de este adquirente de información se encuentran las siguientes: sistema portátil, programable desde su ubicación física o computadora externa, con una capacidad externa de 50000 lecturas, velocidad de lectura hasta de 600 lecturas por segundo en un solo canal y velocidades de adquisición de datos de hasta 250 canales por segundo.

La transferencia de información de los generadores de energía a la tarjeta adquisidora fue mediante el uso de cable trenzado UTP categoría 6, de la misma manera la adquisición de datos fue programada mediante el software de comunicación del SAD instalado en una computadora portátil con sistema operativo windows, por último fue necesario el uso de un sistema UPS para mantener los equipos encendidos en caso de falta de corriente eléctrica. Una vez almacenados los datos, estos fueron transferidos a archivos de texto para su posterior análisis.

4.5. Generadores de energía eléctrica usados.

De acuerdo a los cálculos iniciales de diseño los equipos utilizados en la transformación de la energía cinética del viento a energía eléctrica fueron un dínamo de bicicleta Fig.2.7 con capacidad de generar 1 W de potencia así como 2.5 V de voltaje alterno y un generador eléctrico de 6 V tal como el que se muestra en la Fig.4.6. Los dos sistemas de generación sólo se utilizaron en el prototipo 2 ya que el dínamo llegó a generar 2.2 V, valor cercano a su límite de producción de potencia que es de 2.5 V, por ende se buscó de manera alternativa un equipo que pudiera aprovechar de manera eficaz el diseño de aerogenerador, siendo este un generador de motocicleta con imanes permanentes y dos polos.

Los generadores de voltaje y corriente fueron impulsados de dos diferentes maneras en el prototipo #1 fue mediante fricción, donde la cabeza del dínamo se encuentra en contacto con un disco de 20 cm de radio que está unido al eje de giro del prototipo. Mientras que en el prototipo #2 es mediante una transmisión de cadena la cual se embonó a 2 estrellas de bicicleta, una en la flecha del



Figura 4.6: Generador de motocicleta.

aerogenerador y la otra sobre el generador de 6 V, como se muestra en la Fig.3.6.

Para conocer la potencia de salida en el dínamo o el generador fue necesario instalar una resistencia de 5Ω en la intersección de los cables de trenzado y de los generadores y mediante el uso de las ecuaciones 4.1, 4.2 y 4.3 fue posible calcular la potencia de salida de los generadores.

$$V = RI \quad (4.1)$$

$$P = VI \quad (4.2)$$

$$P = RI^2 \quad (4.3)$$

Mediante el uso del sistema de adquisición de datos Agilent el cual tiene la capacidad de registrar la información sobre la variable del voltaje V y al mismo tiempo con el uso de una resistencia R de valor conocido fue posible calcular la corriente I mediante la Ec. 4.1, de la misma manera al usar la Ec. 4.2 se obtuvo la potencia generada sin considerar las pérdidas que se generan por calor, ruido, cableado entre otras. El tiempo de captación fue cada dos segundos debido a que se pretendió obtener la mayor cantidad de datos posibles, al final del proceso de análisis se agrupó la información obtenida con el fin de depurar el ruido eléctrico de los resultados, mismos que a su vez se presentan en el próximo capítulo.

Capítulo 5

Resultados de las mediciones del recurso eólico de baja potencia.

En el capítulo anterior se presentaron las actividades que se realizaron para corroborar la viabilidad de la energía eólica de baja potencia en el edificio de posgrado del IER, por consiguiente en esta sección se presentan todos los resultados que se obtuvieron a lo largo de este proceso. La presentación de los resultados inicia con la información respecto a la calibración de los equipos a continuación el diseño ideal para que el aerogenerador no colapse por esfuerzos cortantes y por último los resultados obtenidos por las mediciones.

5.1. Calibración de generadores.

El primer paso en el que se obtuvieron valores relevantes fue a lo largo de la calibración del generador de 6 V y el dínamo de 2.5 V de capacidad, la razón por la que se realizó esta actividad fue para corroborar que los equipos generaran la potencia que describe el fabricante y por ende tener un parámetro de comparación de los datos tomados respecto a la hoja técnica de cada aparato.

El cuadro 5.1 presenta los valores de la corriente, voltaje y potencia que se encuentran a la vez en función del número de revoluciones por minuto que se aplica tanto al generador como al dínamo. La razón de tener esta información es para verificar a que velocidad angular los generadores producen diversos valores de potencia. Las Fig.5.1 y 5.2 contiene la misma información que el cuadro 5.1, la única diferencia es que estas describen distintas curvas de potencia de cada generador detalladamente.

Generador				Dinamo			
R.P.M.	Voltaje[V]	Corriente[A]	Potencia[W]	R.P.M.	Voltaje[V]	Corriente[A]	Potencia[mW]
150	0.14	0.54	0.08	50	0.09	0.01	0.01
250	0.42	1.21	0.48	90	0.09	0.01	0.25
300	0.65	1.57	1.01	150	0.14	0.11	0.4
370	0.83	2.48	1.76	280	0.83	0.13	104
470	1.05	2.45	2.45	500	1.47	0.18	257
480	2.12	2.73	5.79	980	1.67	0.24	320
540	2.40	3.12	7.48	530	2.02	0.31	606
740	3.17	3.51	11.16	550	2.21	0.36	795

Cuadro 5.1: Calibración de generadores.

Una cuestión trascendental en esta sección es conocer la velocidad lineal que el viento debió tener para lograr el empuje necesario para que el aerogenerador pudiera obtener los valores que se presentan en el cuadro 5.1.



Figura 5.1: Curva de potencia del generador de motocicleta.

El sistema de transmisión, como se mencionó en el capítulo 4, fue mediante una cadena y dos estrellas de bicicleta las cuales funcionan como engranes, el piñón que es la estrella más pequeña tiene 14 dientes mientras que la estrella grande que actúa como corona tiene 44 dientes. Mediante la Ec. 5.1 donde N es el número de dientes y ω la velocidad angular, se calculó la velocidad a la que debe girar el aerogenerador para que el generador y el dinamo puedan producir 1 W y 0.7956 W respectivamente, la razón por la que se escogieron estos valores no fue arbitraria y es porque son los valores mínimos para encender un LED de 1 V, el cual es el equipo electrónico que menos potencia demanda en la industria. Así mismo mediante la Ec. 5.2 se obtuvo la velocidad del viento necesaria para que los aerogeneradores produjeran energía.

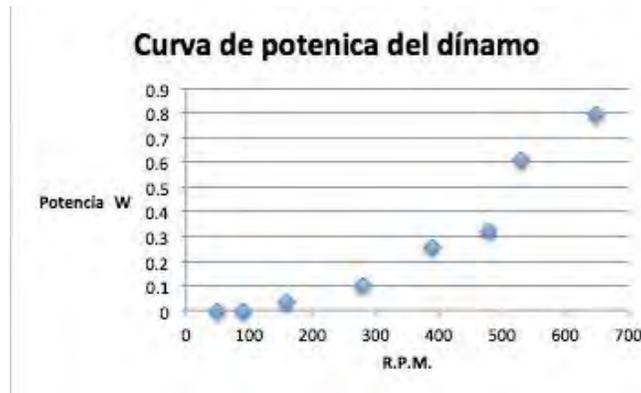


Figura 5.2: Curva de potencia del dinamo.

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (5.1)$$

$$\nu = \omega r \quad (5.2)$$

Generador de motocicleta.

Sustituyendo los valores del número de dientes de cada estrella y la velocidad angular para generar 1 W se obtuvieron las revoluciones por minuto a las cuales debe girar el aerogenerador de eje vertical para producir los valores anteriormente mencionados, todo esto mediante la Ec. 5.1.

$$\frac{300}{\omega_1} = \frac{44}{14}, \quad \omega = 96rpm$$

Así mismo con la ayuda de la Ec. 5.2 se obtuvo la velocidad tangencial en la orilla del aerogenerador.

$$\nu = (96rpm)(0.316)\left(\frac{2\pi}{60}\right), \quad \nu = 3.18 \frac{m}{s}$$

La relación de las revoluciones por minuto que debe tener el aerogenerador de eje vertical para que el generador de motocicleta sea capaz de producir ciertos niveles de potencia se pueden observar en la Fig.5.1.

Dínamo de bicicleta.

De la misma forma que el generador se utilizaron las ecuaciones 5.1 y 5.2 para calcular las r.p.m. que debe realizar el aerogenerador y la velocidad lineal del viento para que sea capaz el dínamo de producir 0.7956 W.

$$\omega = 207rpm , \nu = 6.85 \frac{m}{s}$$

Con base en los cálculos anteriores la velocidad mínima para que los generadores comiencen a producir energía es superior en la mayor parte del año a la velocidad promedio en Temixco varía de $1.68 \frac{m}{s}$ en el 2010 a $3.89 \frac{m}{s}$ en el 2011. Sin embargo en el periodo de diciembre a abril donde existe velocidades promedio de alrededor de $5 \frac{m}{s}$ [48, 56] es posible aprovechar este tipo de tecnología de baja potencia con el fin de encender luminaria o electrónicos que demanden poca potencia.

5.2. Diseño mínimo requerido para el lugar de estudio.

Como se esperaba el aerogenerador 2 tuvo una rotura por esfuerzo cortante tal como se muestra en las Fig.5.3 y 5.4, esto se sabía que podía pasar desde el inicio del proyecto debido a que el espesor de la pared era muy delgado y por ende el factor de seguridad era 0.81, menor a 1 el cual es el mínimo sugerido en la mecánica de materiales [49, 57]. Cabe recalcar que el sitio donde sucedió la fractura fue a 3 cm del sitio que se calculó en la sección 3.1.2, zona que desde el inicio del proyecto se sabía que era la más debil de la flecha de giro por lo que hay que destacar que el análisis mecánico fue el correcto.

El encontrar en el mercado tubos de aluminio de 1.7 mm de espesor es prácticamente imposible debido a que las empresas metalúrgicas no lo producen, sin embargo el grosor más cercano es el de 2.87 mm con el cual existiría un factor de seguridad de $[\mu]$ de 1.57, el cual es aproximadamente el doble del usado en este proyecto. El cálculo de los esfuerzos que se generan con los diferentes espesores no se presenta en la presente sección, sin embargo los resultados de los esfuerzos a tensión, compresión, cortante y factor de seguridad se pueden observar en el cuadro 5.2.

A lo largo de esta sección se presenta el diseño mínimo requerido para que el prototipo 2 tenga buen funcionamiento con la distribución de velocidad que existe en el lugar. El diagrama de fuerzas, momentos y cortante que se presentó en el apartado 3.1.2 es el mismo que se utiliza en el desarrollo de este nuevo diseño, la ubicación de los rodamientos y las dimensiones se mantuvieron constantes, sólo el espesor y diámetro interno de la pared de la flecha fueron



Figura 5.3: Área de rotura del aerogenerador 2.

Factor	D. Usado	D. Sugerido	D. Comercial
Seguridad [μ]	1.4	1.7	2.87
E. Tensión [σ_1]	2.78	2.6754	2.82
E. Compresión [σ_2]	-1.02	-0.98	-1.03
E. Cortante [τ]	15.3	12.4	7.94

Cuadro 5.2: Diagrama de espesores y diámetros internos y externos.

modificados para obtener un nivel de seguridad mayor. A pesar que el momento máximo es el mismo en ambos casos, los esfuerzos flectores y el cortante máximo son distintos [58, 59].

Se puede apreciar fácilmente tanto en la Fig.5.3 como en la Fig.5.4 que el espesor no fue el indicado para el eje principal de este proyecto, es por eso que el incrementar el número de cédula es necesario. Al realizar los cálculos de diseño como en la sección 3.1.2 se encontró que el grosor de la tubería mínimo para que se considerara seguro según la mecánica de materiales es de 1.7 mm o sea 0.3 mm mayor que el utilizado en los cálculos originales.

Los valores que más importancia tienen en el cuadro 5.2 son el incremento del factor de seguridad porque es una cierta referencia que pronostica el tiempo de vida del aerogenerador. También se puede observar una reducción drástica



Figura 5.4: Aerogerador después del colapso.

aproximada del 50 % en el valor del esfuerzo cortante debido a la reducción del espesor de la flecha siendo esta la razón por la que se fracturó el aerogenerador.

La Fig.5.5 es un diagrama de los espesores y diámetros tanto internos como externos que tienen como objetivo facilitar la interpretación de los distintos espesores que se propusieron en esta sección para solucionar el problema de la rotura en la flecha por esfuerzo cortante. El primero representa el tubo usado a lo largo del proyecto, el segundo es el mínimo que se debió haber usado para evitar la catástrofe y por último el tercero es el que comercialmente se puede encontrar en el mercado.

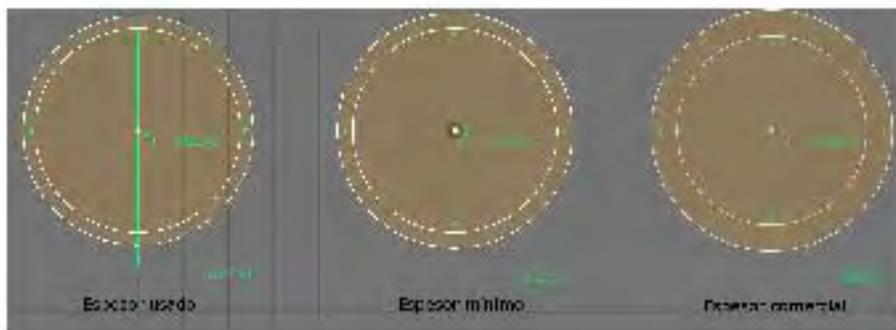


Figura 5.5: Espesor usado, sugerido y en el mercado.

Como se expresó anteriormente, el prototipo colapsó porque se buscó te-

ner la menor cantidad de peso posible para que el aerogenerador pudiera tener un mayor rendimiento aprovechando las bajas ráfagas de viento que existen en Temixco. Sin embargo el incrementar el grosor de la flecha del aerogenerador hará que la energía necesaria para romper el momento de inercia sea mayor y al mismo tiempo ocupará una mayor velocidad de viento para comenzar a generar energía, pero la vida útil del mismo se incrementará considerablemente.

5.3. Resultados de las mediciones.

Esta sección es de suma importancia debido a que se presentan los resultados obtenidos a lo largo del periodo de prueba y se pueden verificar en las Figuras 5.5, 5.6 y 5.7. Las gráficas están conformadas por la velocidad del sitio en el eje y_1 medida cada segundo y promediada cada diez minutos por la estación anemométrica del Instituto de Energías Renovables, de la misma manera en el eje y_2 se encuentra la potencia generada tanto por el dínamo como por el generador de motocicleta y por último en el eje de las ordenadas se ubica el tiempo medido en segundos.

La Fig.5.6 corresponde al prototipo 1 el cual se muestra en la Fig.3.1. Como se mencionó en la sección 3.1.1 el material utilizado para captar al viento fue licra, la cual es muy porosa y por ende la eficiencia es mínima debido a la gran cantidad de viento que se escapa a través de la misma. Además el sistema de transmisión de potencia es por fricción entre la cabeza del dínamo de bicicleta y un disco de acrílico. Los valores que se presentan en la Fig.5.6 muestran que solo bajo vientos de alrededor de $5 \frac{m}{s}$ el aerogenerador es capaz de producir hasta 0.4 W. Este sistema fue el que más tiempo de adquisición de datos tuvo, ya que se mantuvo intacto desde la instalación hasta el fin del proyecto por el buen espesor de sus materiales y porque no era necesario un cambio de generador en el mismo.

A pesar de que el tiempo de captación de información fue el mayor en este diseño, durante más de la mitad del periodo no se obtuvieron datos relevantes ya que las ráfagas máximas de viento fueron de $3 \frac{m}{s}$, la cual no fue capaz de mover ni el aerogenerador. Sin embargo durante marzo hubo periodos con velocidades de viento de alrededor de $5 \frac{m}{s}$ que hicieron que el dínamo produjera hasta 0.5 W.

El diseño de la estructura de este prototipo es buena debido a su alto factor de seguridad descrito anteriormente, sin embargo los resultados pudieron haber sido mejores si en lugar de licra se hubiese utilizado vela de barco como en el prototipo 2. A pesar de que no se realizaron mediciones en el diseño 1 con los dos materiales se cree que el rendimiento puede ser mejor si se utiliza vela de barco por su mayor eficiencia a la hora de absorber la energía dinámica del viento, así mismo el haber utilizado un sistema de transmisión por polea o cadena también hubiera incrementado la calidad del prototipo, ya que las pérdidas hu-

bieran sido menores.

La Fig.5.7 representa los datos obtenidos en el prototipo 2, el cual utilizó un dínamo de bicicleta como sistema de generación eléctrica. Fue posible transmitir la energía dinámica del viento al prototipo 2, por medio de un sistema de engranes conectados por una cadena de bicicleta, tal como se muestra en la Fig.3.6. El principal objetivo en la construcción de este diseño fue obtener mejoras en comparación del prototipo 1, el cual tenía un sistema de captación muy poroso, peso excesivo para aprovechar el recurso eólico del sitio y el sistema de transmisión por fricción generaba muchas pérdidas, para lo anterior fue necesario utilizar como se mencionó anteriormente engranes y una cadena, vela de barco en lugar de licra y por último reducir los espesores de la flecha y uniones lo máximo posible.

Los datos de la Fig.5.7 se puede considerar como la más exitosa en este proyecto debido a que a pesar de los bajos regímenes de viento presentados durante el periodo de medición, el bajo peso y el perfil aerodinámico permitieron que este prototipo aportara resultados. El diseño 2 tuvo un desempeño relevante mientras fue utilizado el dínamo de bicicleta debido a que constantemente generó energía en función a la velocidad del viento tal como se muestra en la Fig.5.7. Sin embargo se consideró realizar un cambio de generador en el diseño 2 debido a que la producción del dínamo se estancó cerca de 0.5 W y que el aerogenerador 2 sería capaz de transmitir suficiente energía proveniente del viento al generador de 6 V para que este produjera una mayor cantidad de energía.

El periodo de medición con el generador de motocicleta fue sólo de 2 semanas ya que el diseño colapsó en su parte más debil del eje principal debido a que la cantidad de energía que exigía el generador de motocicleta para romper el momento de inercia era mayor que el del dínamo. A pesar de saber la dificultad de lograr la velocidad nominal de generación del generador de motocicleta la cual es de 1800 r.p.m., se optó por utilizar este aparato debido a que en la instrumentación del cuadro 5.1 muestra que a partir de 180 r.p.m. el generador es capaz de producir 0.1 V y se estimó que con una velocidad promedio de $5.2 \frac{m}{s}$ era capaz de generar hasta 2.5 V, valor al cual no se pudo llegar debido a los altos niveles de fricción que existen en el eje principal del generador.

A pesar de que el aerogenerador logró romper el momento de inercia del generador de motocicleta al girar no fue capaz de producir potencia, sólo desgastó la pared del diseño hasta que fue cortado por esfuerzo cortante, consecuencia del bajo valor del coeficiente de seguridad del prototipo. El utilizar generadores de esta capacidad se cree que no es viable en esta zona debido a que se ocupan altas velocidades angulares requeridas para ser capaz de producir. Sin embargo un dínamo es una alternativa viable para producir energía y poder utilizarla en el encendido de una lámpara de leds de bajo consumo.

Resultados del dínamo de bicicleta del prototipo 1.

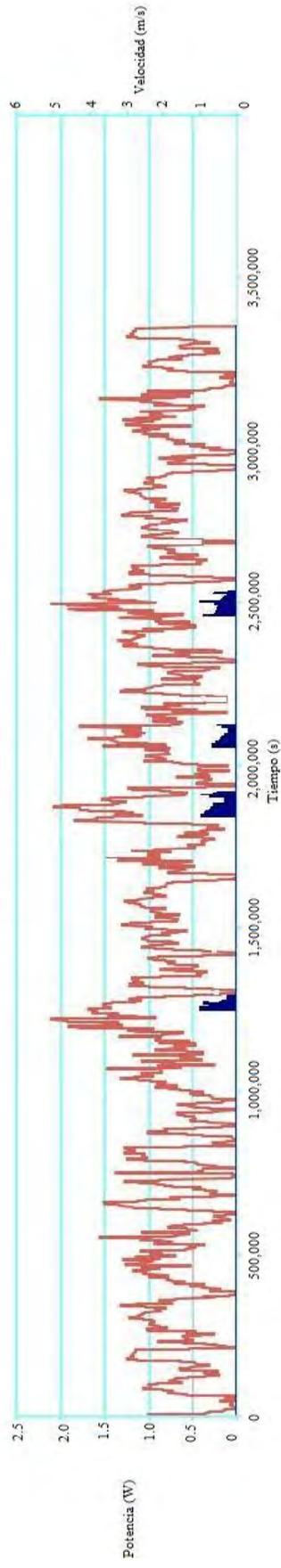


Figura 5.6: Mediciones del dínamo de bicicleta en el prototipo 1.

Resultados del dínamo de bicicleta en el prototipo 2



Figura 5.7: Mediciones del dínamo de bicicleta en el prototipo 2.

Capítulo 6

Conclusiones.

La generación de energía eólica continuamente se encuentra en crecimiento a nivel mundial es por eso que este proyecto, tuvo como objetivo inicial estudiar esta fuente energética en su fase de baja potencia mediante la construcción de dos aerogeneradores de eje vertical tipo twister savonius e instalarlos en el Instituto de Energías Renovables de la ciudad de Temixco, Morelos.

Derivado del desarrollo de este proyecto se concluyó que el estudio de la tecnología eólica de baja potencia en Temixco Morelos es viable sólo para electrónicos de bajo consumo energético como LEDs, ya que existen rachas de viento que pueden hacerlos funcionar. Desgraciadamente solo se presentan durante un par de horas en el atardecer y amanecer por el enfriamiento y calentamiento del suelo respectivamente.

Los materiales utilizados tales como la vela de barco, aluminio, rodamientos de bolas y el sistema de transmisión por cadena ayudaron a que los aerogeneradores fueran capaces de producir potencia, pero la construcción de los prototipos fue extremadamente complicada debido a la dificultad para alinear el generador y la cadena y también por la soldadura del aluminio entre el eje de giro y las costillas. Sabiendo que la vida útil del diseño estaba comprometida por el bajo nivel de seguridad, se optó por realizar una prueba destructiva del mismo con el fin de estudiar el comportamiento de los aerogeneradores en el mismo.

El prototipo número uno fue capaz de producir hasta 0.38 W, esto se debió a que el material utilizado era extremadamente poroso y que el sistema de transmisión no era eficiente y sumados generaban pérdidas considerables de energía. Así mismo el diseño dos fue capaz de producir hasta 0.42 W de potencia, de manera constante a lo largo de la más mínima ráfaga de viento que se presentó en el sitio porque con las mejoras de diseño en la reducción del momento de inercia de $7.7 \times 10^{-9} m^4$ en el aerogenerador uno a $7.6 \times 10^{-8} m^4$ en el aerogenerador dos tal como se presentó en el capítulo tres, facilitó que el dínamo generara corriente eléctrica continuamente.

El cambio de generador fue una idea errónea debido a que se requieren alrededor de 250 revoluciones por minuto para que el generador de motocicleta pueda producir 0.4 W, cantidad similar a la que produjo el dínamo de bicicleta en ambos prototipos. Debido al cambio de generador de corriente los esfuerzos aumentaron logrando cortar el eje principal de giro del aerogenerador, sitio donde se calculó inicialmente que era la parte más débil del mismo.

Una solución viable para el sistema es aumentar el espesor de la cédula para tener un factor de seguridad mínimo de 2, reducir el tamaño del generador con el objetivo de cargar electrónicos de baja demanda energética como radios y celulares. Por último es menester realizar nuevas mediciones en el mismo sitio con las mejoras mencionadas anteriormente.

Bibliografía

- [1] Manwell, J.F., Mc Gowan, J.G., Roges, A.I. (2002). *Wind energy explained*. Ed. John Wiley and Sons, LTD. (pp. 23-45, 71-123, 245-254)
- [2] Eldridge, F.R. (1980). *Wind machines*. Ed. Van Nostrand Reinhold Inc. (pp. 77-86.)
- [3] Rohatgi, J.S. (1994). *Wind characteristics: An analysis for the generation of wind power*. Ed. Alternative energy institute. (pp. 1-7)
- [4] Tong, W. (2010). *Wind power generation and wind turbine design*. Ed. WIT Press (pp. 143-155)
- [5] Burton, T. (2001). *Wind energy handbook*. Ed. Wiley. (pp. 14-16, 29-31)
- [6] Gipe, P. (1993). *Wind power for home and business*. Ed. Chelsea green. (pp. 80-104, 312-325)
- [7] Borja, M.A. (1998). *Estado del arte y tendencias de la tecnología eoloeléctrica*. UNAM (pp. 11-18, 77-98)
- [8] Taylor, W.P. (2002). *IEA wind energy annual report 2001*. 47º Reunión (pp. 155-160, 34-50)
- [9] Sloodweg, J.G. (2003). *Is the Answer Blowing in the Wind?* Ed. Relay press (pp. 27-33.)
- [10] Rodríguez, H.O. (2010). *Análisis de la confiabilidad de datos anemométricos empleados en la estimación de energía eoloeléctrica*. Tesis de maestría del IER (pp. 71-77)
- [11] ISLAM, M., (2009). *Aerodynamic models for Darrieus-type straight-bladed vertical axis wind turbines* ELSEVIER (pp. 8,11)
- [12] Secretaría general de la energía y recursos minerales; 1992, *Energía eólica*. (pp. 66-79)
- [13] Gipe, P. (2000). *Energía eólica práctica*. Ed. Progensa. (pp. 21-31, 35-39, 51-57.)

- [14] Timoshenko, S. (1980). *Resistencia de materiales*. Ed. Paraninfo (pp. 270-272, 398-414)
- [15] Jenkins, N. (2009). *Wind energy generation, modelling and control*. Ed. Wiley (pp. 2-17, 57-76.)
- [16] Departamento de ingeniería eléctrica de la Universidad de Chile. (Septiembre 2004). www.uv.es/navasqui/OtrosAerogeneradores/Aerogener-vertical.pdf Consultada en el 2012.
- [17] Savonius, S.J. (1976)..*Rotor adapted to be driven by wind or flowing water*, US Patent no. 1697574, 1929.
- [18] Modi V.J., Fernando U.K. (1989). On the performance of the Savonius wind turbine. *Journal of Solar Energy Engineering.*, (pp. 71-81)
- [19] Abramovich, H. (2008). *Vertical axis wind turbines: a survey and bibliography*. *Wind engineering*. Ed. Polytechnic international press (pp. 433-452)
- [20] Halsey, N. (2012). www.celloexpressions.com/ts/ModelingTheTwistedSavoniusWindTurbineGeometrically-longest.pdf Consultado en el 2012
- [21] Hill, N., Dominy, R. Ingram, G. (2009). Darries turbines *The physics of self starting*. *Proceedings of the 4º ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference* (pp. 23, 69)
- [22] MCT, (2011). *Marne Current Turbines*, www.marineturbines.com Consultado en el 2013.
- [23] OpenHydro, (2012). www.openhydro.com Consultado en el 2013
- [24] Lazauskas, L. (1992). *Three pitch control systems for vertical axis wind turbines compared* (pp. 269, 282) Consultada en el 2013
- [25] Garlov, A. (1997) www.sea-technology.com Consultado en el 2013.
- [26] Union for the coordination of transmission of electricity. (2004). *Integrating wind power in the european power systems: prerequisites for succesful and organic rowth*. MIT-CEEPR (Series); 05-003WP.
- [27] Fitzgerald, R.W.,(1984) *Mecánica de materiales*. Ed. Alfaomega (pp. 41-47, 71-91, 145-176)
- [28] Hall, A.S. 1993. *Diseño de máquinas* (pp. 173-178, 204-237.)
- [29] Beer, P.F., Johnston, E. R. (2005). *Mecánica vectorial para ingenieros*. Ed. Mc Graw Hill (PP. 115-128)
- [30] Halsey, N. (2011). *Modeling the Twisted Savonius Wind Turbine Geometrically and Simplifying its Construction* www.saltireserver.com/gx/vawt/PDFs/FullReport.pdf

- [31] Saha, U.K. (2006). *Journal On the performances analysis of Savonius with twisted blades*. ELSEVIER (pp. 1776, 1788)
- [32] Hussain M, (Enero 2008). *CFD analysis of low speed vertical axis wind turbine with twisted blades*. International Journal of Applied Engineering Research. Consultado en el 2013.
- [33] Golding, E.W. (1976). *The generation of electricity by wind power* Ed.Halsted press book (pp. 223-241)
- [34] Müller, G. (2009), *Vertical axis resistance type wind turbines for use of buildings*. www.eprints.soton.ac.uk/75881/ (pp. 1407-1412.) Consultado en el 2013
- [35] Sheldal, R.E., Blackwell, B.F., Feltz, L.V. (1978). *Wind tunnel performance data for two and three bucket Savonius rotors*. www.rc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/3.47966?journalCode=je, Journal of Energy, Vol. 2, No. 3, (pp. 160-164)
- [36] Rahai, H.R. (2005). *Development of optimum design configuration and performance for vertical axis wind turbine: feasibility analysis and final report*. (pp. 6, 28)
- [37] Sandia, Sandia National Laboratories. (2012). www.sandia.gov/ Consultado en el 2013
- [38] B. Kirke, (2008). Variable pitch Darrieus water turbines. *Journal of fluid science and technology* (pp. 430-438)
- [39] Lida, A.M., Fukudome K. (2009). Numerical simulation of aerodynamics noise radiated from vertical axis wind turbines *Proceedings. of the 4th ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference* (pp. 63, 69)
- [40] Price T.J, Large-scale wind energy programme from 1970 to 1990: the Camarthen Bay experiments and the Musgrove vertical axis wind turbines (2006). *Wind Engineering* (pp. 225-242)
- [41] Sharpe, D. (1990). *Wind energy conversion systems*. Ed. Freris L. (pp. 54,117)
- [42] Slootweg, J.G. (2002). *Wind turbines as power plants*. Ed. Ridderprint Offsetdrukkerij B.V. (pp. 23-37, 173-178)
- [43] Castro, G., Santos S. (1997). *Energía eólica, Monografías técnicas de energías renovables*. Ed. ProgenSA (pp. 12-15)
- [44] Gasch, R., Tvele, J. (2004). *Wind power plants*. Ed. Solarpraxis (pp. 12-15)
- [45] Hansen, M.O. (2012). *Aerodynamic of wind turbines*. Ed. TJ International (pp. 27-34.)

- [46] Jong I., Van Hulle, F. (1991). *Wind energy for rural areas*. Ed. Van Nostrand Reinhold Inc.(pp. 299-308.)
- [47] Dragoon, K. (2010). *Valuing wind generation on integrated power systems*. Ed. William Andrew .(pp. 101-115.)
- [48] Lubosny, Z. (2003). *Wind turbine operation in electric power systems*. Ed. Springer. (pp. 5-18.)
- [49] Sorensen, J.D., Sorensen, J.N. (2011). *Optimising design and construction for safe and reliable operation*. Ed. Woodhead (pp. 366-386.)
- [50] Hirahara, H., Hossain. M.Z., Kawahashi, M. (2009). *Testing basic performance of a very small wind turbine designed for multi-purposes*. ELSEVIER (pp. 12,19)
- [51] Thresher, C.S., Hock, R., Laxson, S. (2002). *Wind energy research program for low wind speed technology of the future*. Journal of solar energy engineering (pp. 124.)
- [52] Wright, A.D., Wood, D.H. (2004). *The starting and low wind speed behaviour of a small horizontal axis wind turbine*. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, (pp. 92.)
- [53] Madsen, J.A., (1985). *The actuator cylinder: a flow model for vertical axis wind turbine*. Proc. of the 7th british wind energy association. (pp. 147-154.)
- [54] Ushiyama, I. (1988). *Optimum design and performance of Savonius rotors*. ELSEVIER (pp. 59-75)
- [55] Rahai, H.R. (2005). *Development of optimum design configuration and performance for vertical axis wind turbine* Feasibility analysis and final report (pp. 147-154.)
- [56] Publicación por la SENER del estudio de potencial eólico y de otras tecnologías renovables. Obtenida el 26 de noviembre del 2012 www.amdee.org Consultada en el 2012
- [57] Strickland, J.H. (1986). A review of aerodynamic analysis methods for vertical axis wind turbines www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev.fl.25.010193.000555?journalCode=fluid. Consultado en el 2013
- [58] Strickland, J.H. (1975). Sandia National Laboratories, Report No: SAND75-0431. *The Darrieus turbine: a performance prediction model using multiple streamtubes*. Consultado en el 2013
- [59] Paraschivoiu, I., Desy, P. (1986). *Aerodynamics of small scale vertical axis wind turbines* École polytechnique du Montreal, Québec Canada(pp. 286,288)