



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DISEÑO DE UN MICROAEROGENERADOR DE EJE VERTICAL

TESIS DE LICENCIATURA
Para obtener el título de:
Ingeniero Industrial

Presenta:

SANDRA LAURA CHÁVEZ VELÁZQUEZ

Director:

Dr. JOSÉ LUIS FERNÁNDEZ ZAYAS



Ciudad Universitaria, México D.F.
Mayo 2010



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.

AGRADECIMIENTOS

Esta tesis es la consolidación de uno de mis grandes sueños, el cual compartieron conmigo las personas más importantes de mi vida.

A mi familia y sobre todo a mis papas Felipe y Tere gracias por guiarme durante tantos años, por ser un ejemplo para mí y sobre todo por quererme y apoyarme en todo momento. A mi hermano Toño, gracias por crecer conmigo y desafiarme para ser mejor persona.

A mis amigos, por sus sonrisas, palabras de aliento y sobre todo el cariño que han sido pilares para seguir esta locura hasta convertirla en una realidad. Gracias por que sin importar la distancia, han estado y continuaran a mi lado.

A mis maestros por los retos que me pusieron y me ayudaron a superar; por su disponibilidad, dedicación y paciencia que me mostraron.

A mis sinodales, el Dr. Arturo Reinking, el Mtro. Esteban Barrios, la Ing. Alejandra Garza y el Ing. Martín Bárcenas, por la confianza y su atención de calidad y con calidez durante este proceso.

Con mucho cariño al Dr. José Luis Fernández, mi director de tesis, por ser el principal cómplice en este sueño y sobre todo por enseñarme a disfrutar y divertirme durante la realización de este trabajo. Gracias por creer en mí y brindarme su asesoría.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería por la formación integral que me otorgaron.

A la Sociedad de Energía y Medio Ambiente SOEMA por las ideas innovadoras y el alentador entusiasmo de los integrantes.

Y a todas las personas con las cuales hoy puedo compartir la alegría que esta tesis me da.

El futuro tiene muchos nombres. Para los débiles es lo inalcanzable. Para los temerosos, lo desconocido. Para los valientes es la oportunidad.

Víctor Hugo (1802-1885)

ÍNDICE

	Página
Introducción	8
Capítulo I. La Energía Eólica en nuestros tiempos	
1.1 Transición de los combustibles fósiles a la energía renovable	10
1.2 Renovables en México	12
1.3 La generación en pequeña escala	17
Capítulo II. Energía Eólica de eje vertical	
2.1 Clasificación de Aerogeneradores	18
2.2 Antecedentes de Aerogeneradores de eje vertical	22
2.3 Tipos	23
2.4 Aplicaciones contemporáneas	24
Capítulo III Fundamentos Teóricos de los Microaerogeneradores de eje vertical.	
3.1 Potencia en el viento	28
3.2 Limite de Betz	29
3.3 Generación de Energía mediante el arrastre.	32
3.4 Generación de Energía mediante la sustentación.	34
3.5 Aerodinámica de los aerogeneradores de eje vertical	35
3.6 Funcionamiento de Aerogeneradores tipo Savonius	37
3.7 Funcionamiento de Aerogeneradores tipo Darrieus	38
Capítulo IV Diseño de Componentes de Microaerogenerador de eje vertical	
4.1 Análisis del Viento	42
4.2 Análisis de las aspas	42
4.2.1 Análisis Experimental	44
4.2.2 Análisis Teórico	52
4.3 Prototipo Híbrido Savonius–Delta	55

4.4 Ventajas	59
4.5 Construcción a escala casera	60
4.6 Otras aplicaciones	63
Capítulo V Conclusiones y Recomendaciones	66
Referencias	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 1

- Figura 1.1 Consumo mundial de Energía
- Figura 1.2.1 Valor porcentual de las exportaciones de México.
- Figura 1.2.2 Producción Nacional de Petróleo Crudo
- Figura 1.2.3 Uso de Energía Primaria en México
- Figura 1.2.4 Precios de Crudo de Petróleo de 1861-2007
- Figura 1.2.5 Mapa Eólico de Oaxaca
- Figura 1.2.6 Balance Nacional de Energía

Capítulo 2

- Figura 2.1 Clasificación de los aerogeneradores
- Figura 2.1.1 Aerogeneradores por Tamaño
- Figura 2.1.2 Alcances en la generación
- Figura 2.1.3 Componentes de un Aerogenerador
- Figura 2.1.4 Tipos de aerogeneradores
- Figura 2.2.1 Primer aerogenerador de eje Vertical
- Figura 2.3.1 Anemómetro de Copa
- Figura 2.3.2 Aerogeneradores de eje vertical
- Figura 2.4.1 Aerogenerador Savoniux Helix
- Figura 2.4.2 Aerogenerador AeroCam
- Figura 2.4.3 Aerogenerador de 10 kW Ever Wind
- Figura 2.4.4 Aerogenerador casero

Capítulo 3

- Figura 3.2.1 Desviación del viento por el aerogenerador
- Gráfica 3.1.1 Coeficiente Ideal de Potencia
- Gráfica 3.1.2 Comportamiento de la presión y la velocidad
- Figura 3.3.1 Condiciones de Flujo y fuerzas aerodinámicas en el levante
- Figura 3.4.1 Fuerza de sustentación
- Figura 3.4.2 Análisis de fuerzas de sustentación
- Figura 3.5.1 Coeficientes de poder en el rotor de los diversos aerogeneradores
- Figura 3.5.2 Coeficientes de poder en el rotor de los diversos aerogeneradores
- Figura 3.6.1 Coeficientes de poder en el rotor de los diversos aerogeneradores
- Figura 3.7.1 Aerogeneradores tipo delta
- Figura 3.7.2 Aerogenerador Giromill
- Figura 3.7.3 Aerogenerador Triposkein

Capítulo 4

- Figura 4.2.1 Prototipos caseros del aerogenerador
- Figura 4.2.1.1 Metodología de la experimentación con los aerogeneradores
- Figura 4.2.1.2 Resultado de experimentación a velocidad constante
- Figura 4.2.1.3 Resultado en prueba de túnel de viento del prototipo Savonius 2

Figura 4.2.1.4	Resultado en prueba de túnel de viento del prototipo Delta
Figura 4.2.1.5	Resultado en prueba de túnel de viento del prototipo Darrieus
Figura 4.2.1.6	Resultado en prueba de túnel de viento del prototipo Híbrido Darrieus-Savonius
Figura 4.3.1	Aerogenerador Híbrido entre Savonius y Delta
Figura 4.3.2	Diagrama de fuerzas del aerogenerador
Figura 4.3.3	Resultado en prueba de túnel de viento del prototipo Híbrido
Figura 4.4.1	Instalación de este aerogenerador en una casa
Figura 4.5.1	Aerogenerador Híbrido entre Savonius y Delta
Figura 4.5.2	Dispositivos de almacenamiento de Energía
Figura 4.6.1	ONG dedicadas al desarrollo de comunidades rurales
Figura 4.6.2	Panel solar de Light up the World LUTW
Figura 4.6.3	Construcciones de Un techo para mi país UTPMP

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1	Emisiones de CO2 de los combustibles fósiles
Tabla 1.2	Composición del crudo de petróleo
Tabla 1.3	Reservas y Producción de combustibles fósiles
Tabla 4.2.1.1	Resultado en prueba de túnel de viento del prototipo Savonius
Tabla 4.2.1.2	Resultado en prueba de túnel de viento del prototipo Savonius 2
Tabla 4.2.1.3	Resultado en prueba de túnel de viento del prototipo Delta
Tabla 4.2.1.4	Resultado en prueba de túnel de viento del prototipo Darrieus
Tabla 4.2.1.5	Resultado en prueba de túnel de viento del prototipo Híbrido Darrieus-Savonius
Tabla 4.3.1	Resultado aerogenerador Híbrido
Tabla 4.4.1	Presupuesto del prototipo

INTRODUCCIÓN

El objetivo de esta tesis es el diseño de un micro aerogenerador de eje vertical de manufactura casera usado para generar electricidad en las casas y edificios de la ciudad, así como en las zonas rurales alejadas de la red eléctrica. Con esto se pretende fomentar la generación distribuida con fuentes renovables así como reducir las pérdidas en el transporte de la electricidad.

Hoy en día desarrollar tecnologías amigables con el medio ambiente es primordial debido a problemas ambientales a los que se enfrenta la humanidad como el calentamiento global. Esta tesis es una aplicación de la ingeniería en respuesta a las necesidades energéticas actuales.

Para comenzar el Capítulo uno es una reseña de la situación energética global actual enfatizando la dependencia a los combustibles fósiles y el porqué es necesaria una inminente transición a fuentes renovables de energía. En el caso particular de México se habla por un lado de la importancia económica que tienen los combustibles fósiles para el país y por el otro del gran potencial para la generación de electricidad mediante fuentes renovables.

Se propone la generación distribuida para aprovechar los recursos diversos en los lugares de consumo de la energía tendiendo así a una red inteligente que no dependa de combustibles fósiles.

Posteriormente, durante el Capítulo dos se discute a detalle la energía eólica como opción de fuente de energía a pequeña escala, se hace un análisis de los tipos de aerogeneradores y se explica el potencial de los microaerogeneradores de eje vertical para los objetivos de esta tesis. Adicionalmente se resumen los antecedentes de estos aerogeneradores hasta las aplicaciones actuales para sentar las bases del diseño propuesto.

El Capítulo tres trata de los fundamentos teóricos de este tipo de turbinas eólicas, las ecuaciones de potencia generada mediante el arrastre y la sustentación. Se hace una especial distinción pues los diseños actuales requieren una combinación de ambas fuerzas en contraste con los primeros modelos. También se analiza el aerodinamismo de este tipo de aerogeneradores.

Durante el Capítulo cuatro se utilizan dichos fundamentos teóricos para diseñar un nuevo prototipo de un micro aerogenerador. La metodología consistió en construir seis prototipos basados en las geometrías existentes los cuales se sometieron a pruebas experimentales a velocidad constante y aceleración angular constante en el túnel de

viento así como a pruebas teóricas de la potencia generada esperada. Con estas pruebas se revisó el comportamiento de los aerogeneradores con una manufactura rudimentaria para proponer un nuevo prototipo funcional bajo estas condiciones.

Por último el Capítulo cinco presenta las conclusiones que se obtuvieron de este trabajo en cuanto a su diseño y los futuros alcances que podría tener, planteando recomendaciones para que se siga trabajando en la construcción a escala real y posteriormente en la instalación de viviendas rurales.

Capítulo I: La energía eólica en nuestros tiempos

1.1 Transición de los combustibles fósiles a la energía renovable.

Desde el inicio de la civilización, la energía, en diversas formas, se ha relacionado directamente con el desarrollo de la humanidad.

Primero se utilizó la energía del sol, del viento, de los animales y hasta de los esclavos. Posteriormente se encuentran grandes adelantos tecnológicos como la máquina de vapor, la cual facilitó en gran medida las labores cotidianas, favoreciendo así el desarrollo.

Para satisfacer las grandes demandas de vapor asociadas se utilizó carbón, el cual se convirtió en un combustible muy popular. Más de 200 años después, el carbón junto a otros combustibles fósiles, continúan siendo fundamentales para la producción energética a pesar de los daños que, sabemos, estos generan al medio ambiente y a la salud humana.

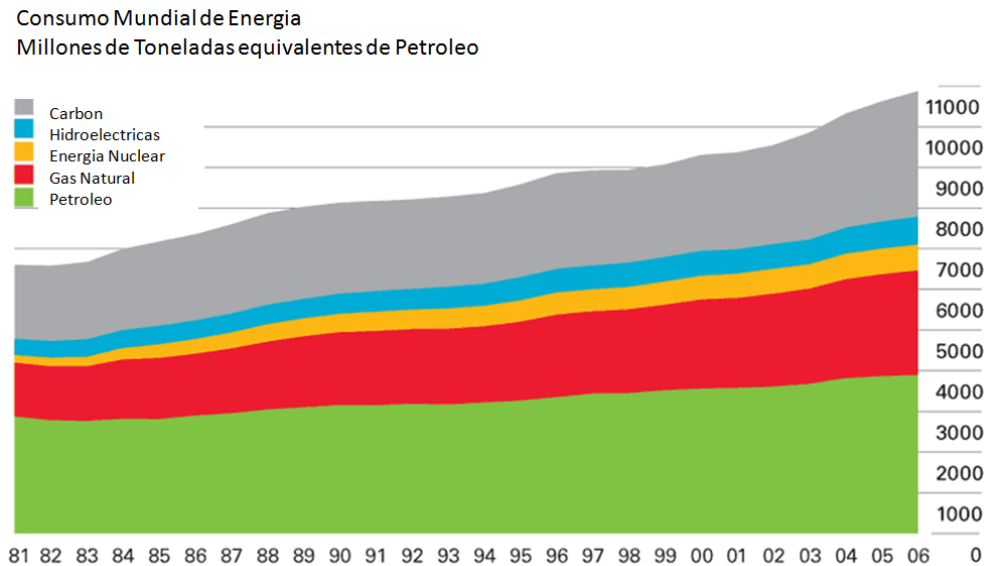


Figura 1.1

Consumo mundial de Energía

Fuente: BP Statistical Review of World Energy 2007

Por ejemplo, en el 2008 el 86% de la energía de EUA provino de combustibles fósiles con un consumo per cápita promedio anual de 96,000 kWh (Un poco más de 5 veces el promedio mundial, 17,500 kWh) (Smith, Tylor 2008).

El problema es que el consumo de combustibles fósiles tiene impacto ambiental adverso y a la salud humana porque genera sustancias nocivas como CO₂ que resulta en el calentamiento Global (Ristinen R., KraushaarJ.2006).

En la siguiente tabla se muestra las cantidades de CO₂ que se emiten a la atmósfera por cada kg consumido de los siguientes combustibles fósiles.

Producción de CO₂

Combustible Fósil	(kgC/kg)	(kgCO₂/kg)
Crudo (Oil)	0.85	3.117
Gas Natural	0.72	2.64
Carbón	0.71	2.6

Tabla 1.1
Emisiones de CO₂ de los combustibles fósiles

Además del CO₂ hay otros elementos dañinos para el medio ambiente, por ejemplo a continuación se muestra la composición porcentual por unidad de masa de crudo de petróleo:

Elemento	%
Carbón	83-87
Hidrógeno	11-15
Nitrógeno	0.1-2
Oxígeno	0.1-1.5
Azufre	0.5-6
Otros metales	Al- metales pesados

Tabla 1.2
Composición del crudo de petróleo

Durante la combustión el Nitrógeno y el Azufre generan NO_x y SO_x en la atmósfera y los metales como el Aluminio generan daños a la salud humana, principalmente al limitar la capacidad de aprendizaje.

Además de los daños al medio ambiente mencionados, no se sabe con certeza para cuantos años nos alcanzarán los combustibles fósiles. A pesar de que están mejorando las técnicas de exploración y es más sencillo llegar a reservas que hace algunos años parecían inalcanzables, tecnológica y económicamente, existen pronósticos como el realizado en el 2007 por BP revisión estadística de Energía que dice:

2007	Reservas (R)	Producción (P)	R/P (años)
Crudo	1237.9 billion bbl	29.8 billion bbl/año	41.5
Gas Natural	177.36 trillion m ³	2.94 trillion m ³ /año	60.3
Carbon	847.5 billion tonnes	6.4 billion tonnes/año	132.5

Tabla 1.3
Reservas y Producción de combustibles fósiles
BP statistical Review of Energy 2007

Es muy importante la transición de los combustibles fósiles a nuevas fuentes de energía, no solo por la incertidumbre de la obtención de más reservas de combustibles fósiles, sino por el daño ambiental que los combustibles fósiles generan en el ambiente.

Una excelente opción son las energías renovables, las cuales generalmente provienen del aprovechamiento directo o indirecto de la energía del sol y son llamadas así porque se renuevan con el tiempo y estarán en la tierra por mucho tiempo, las usemos o no.

Las energías renovables presentan grandes ventajas como:

- Ser inagotables, porque la mayoría provienen del sol.
- Mínima generación de CO₂.

Actualmente la tecnología no es suficiente para eliminar por completo el uso de combustibles fósiles, ya que la densidad energética de las fuentes renovables de energía es mucho menor que la de los combustibles fósiles por lo que económicamente se vuelve casi imposible competir con ellas, en términos de la contabilidad de costos que prevalece, la que lamentablemente favorece el daño ambiental.

No se pueden seguir emitiendo las cantidades actuales de CO₂, se tiene que desarrollar la tecnología necesaria para gradualmente cambiar las fuentes de consumo energético.

1.2 Renovables en México

México es un país petrolero. El 88% de la Energía que se consume proviene del petróleo, económicamente representa 10% del Producto Interno Bruto (**PIB**). Es un gran negocio para el país como se muestra en la figura 1.2.1. Por ejemplo en 2005, la industria petrolera de **México exportó 31 890.8 millones de dólares**, lo cual representa 14.9% del total del valor de las exportaciones hechas por nuestro país en ese año (Inegi 2006).

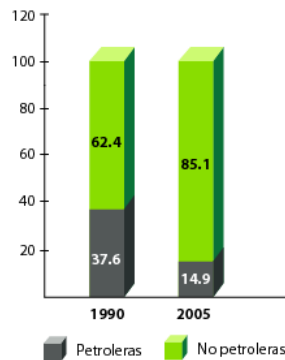


Figura 1.2.1

Valor porcentual de las exportaciones de México.

Fuente: Pemex 2005

Durante 2008 la producción nacional de petróleo crudo promedió 2,798.6 miles de barriles diarios, 3.8 % de la producción mundial. Sin embargo, como podemos ver en la figura 1.2.2, el promedio anual fue menor al registrado en años anteriores.

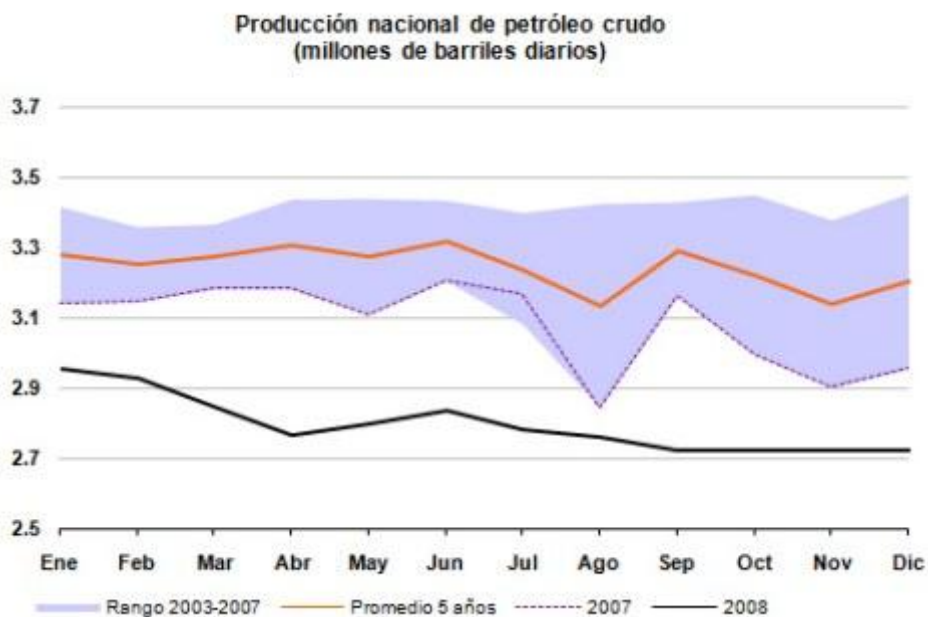


Figura 1.2.2

Producción Nacional de Petróleo Crudo
Fuente: Sistema de Información Energética

Esto no es una buena noticia para el país pues la producción de energía primaria está basada en hidrocarburos (aproximadamente 90%), como muestra la figura 1.2.3.

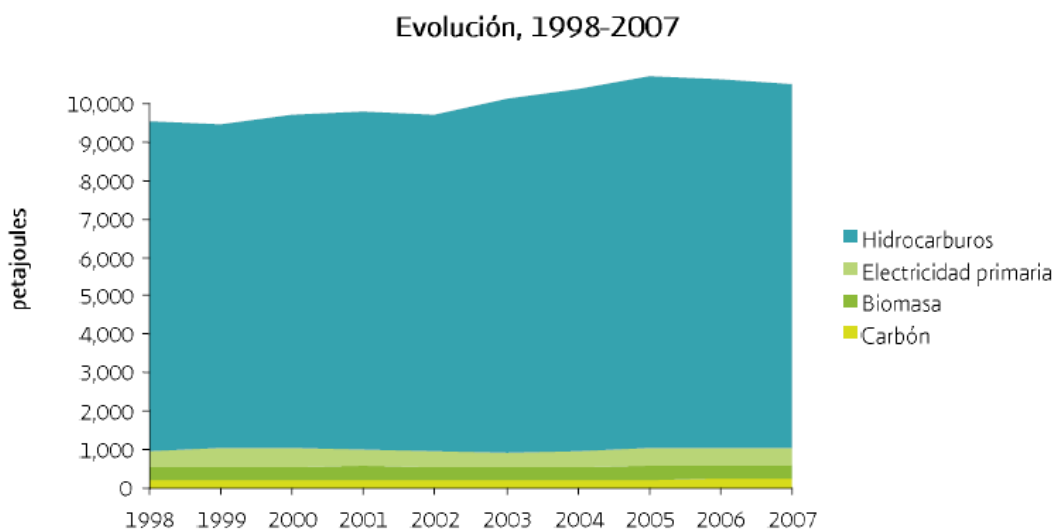


Figura 1.2.3

Uso de Energía Primaria en México
Fuente: Sistema de Información Energética

Por esto, cuando a partir de 1973 se presentaron eventos importantes en el mundo del petróleo (debido a problemas en Medio Oriente) los cuales resultaron en un aumento de los precios del mismo, México, como muchos otros países, debido a la preocupación por el precio de la energía, comenzó a desarrollar tecnologías renovables como la solar con sus manifestaciones secundarias: eólica, hidráulica y biomasa.

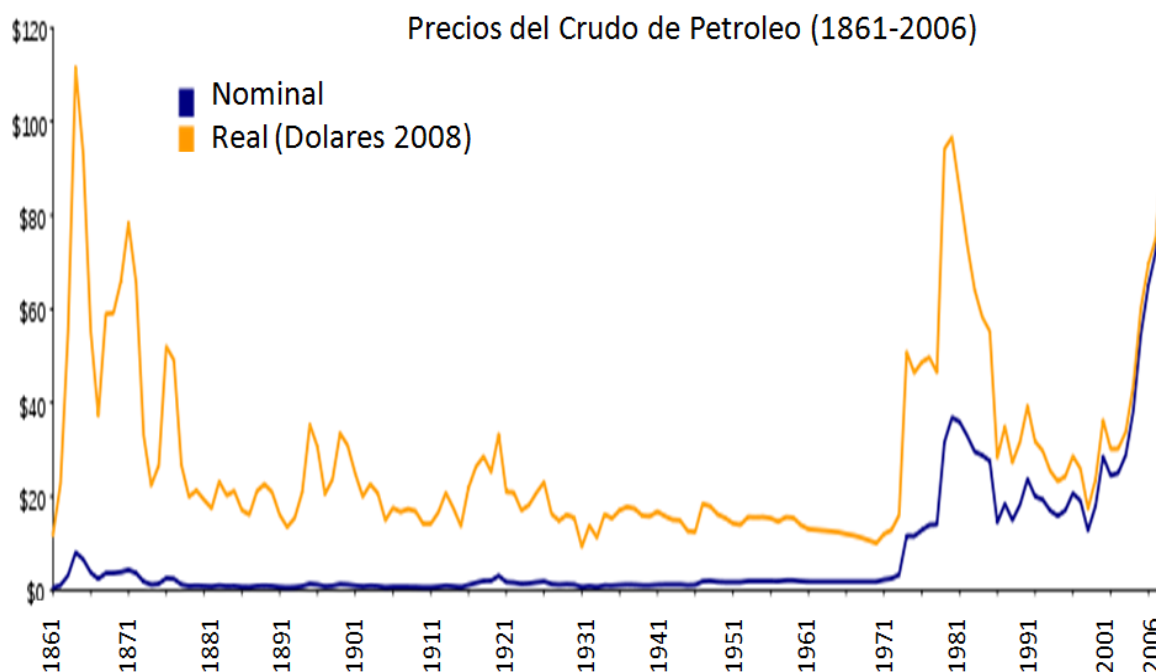


Figura 1.2.4

Precios de Crudo de Petróleo de 1861-2007

Fuente: Administración de Información Energética

Otro evento mundial que ha acelerado el desarrollo de las tecnologías renovables ocurrió en la década de los ochenta con la aparición de evidencia de un aumento en las concentraciones de gases que provocan el efecto de invernadero en la atmósfera terrestre, las cuales han sido atribuidas, en gran medida, a la quema de combustibles fósiles.

Afortunadamente México cuenta con un potencial muy importante en cuestión de recursos energéticos renovables, por ejemplo la región de la Ventosa en Oaxaca tiene uno de los más altos potenciales eólicos del mundo.

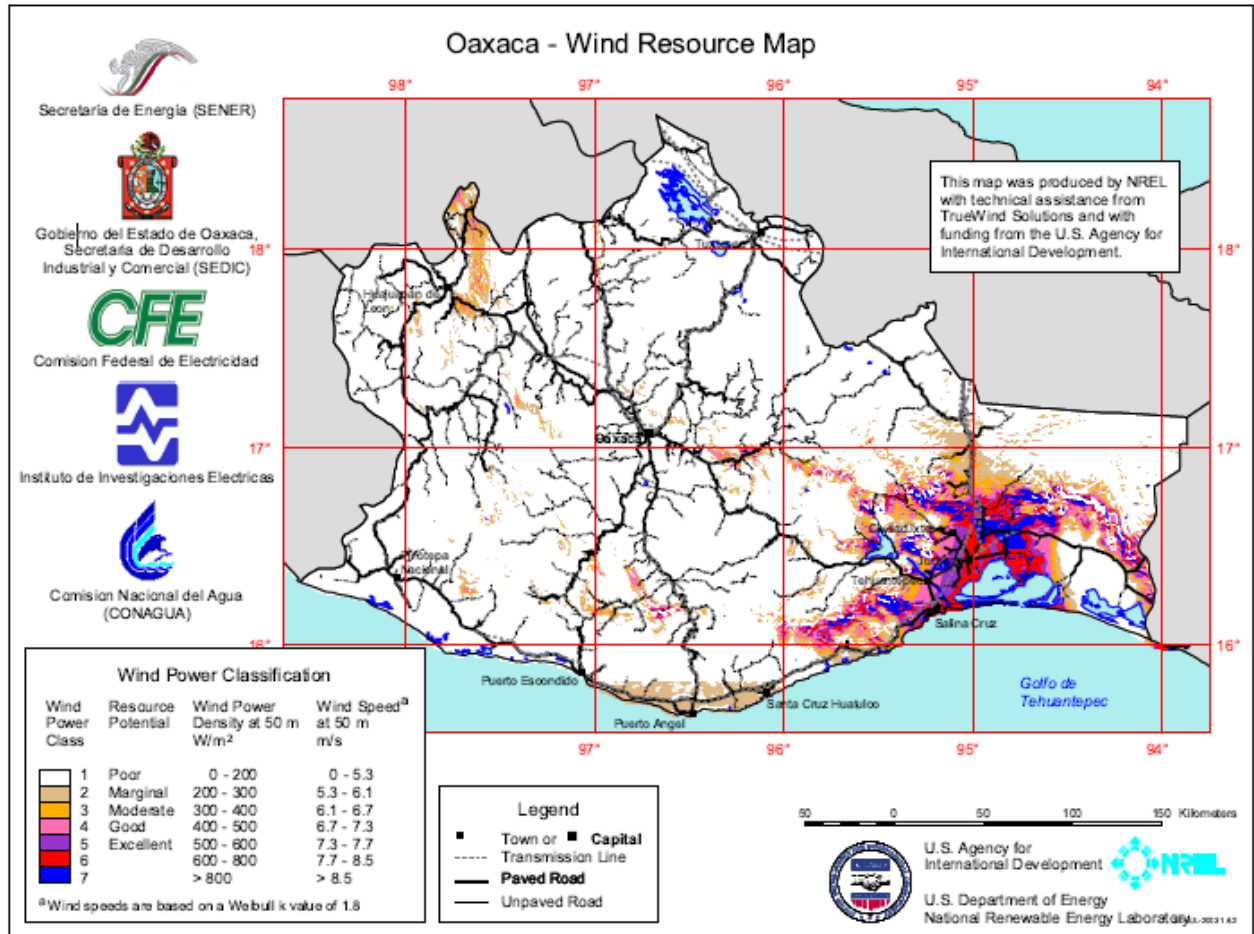


Figura 1.2.5

Mapa Eólico de Oaxaca

Fuente: National Renewable Energy Laboratory

Hay que explotar este potencial para que el país pueda contar con una mayor diversificación de fuentes de energía, mediante lo cual se logren atenuar los impactos ambientales ocasionados por la generación energética basada en combustibles fósiles.

A continuación se muestra el balance nacional de energía del 2007 (SIE Sistema de Información Energética 2007) en el cual se puede ver la distribución de la energía dominada por el petróleo y el gas natural (90% de la energía primaria).

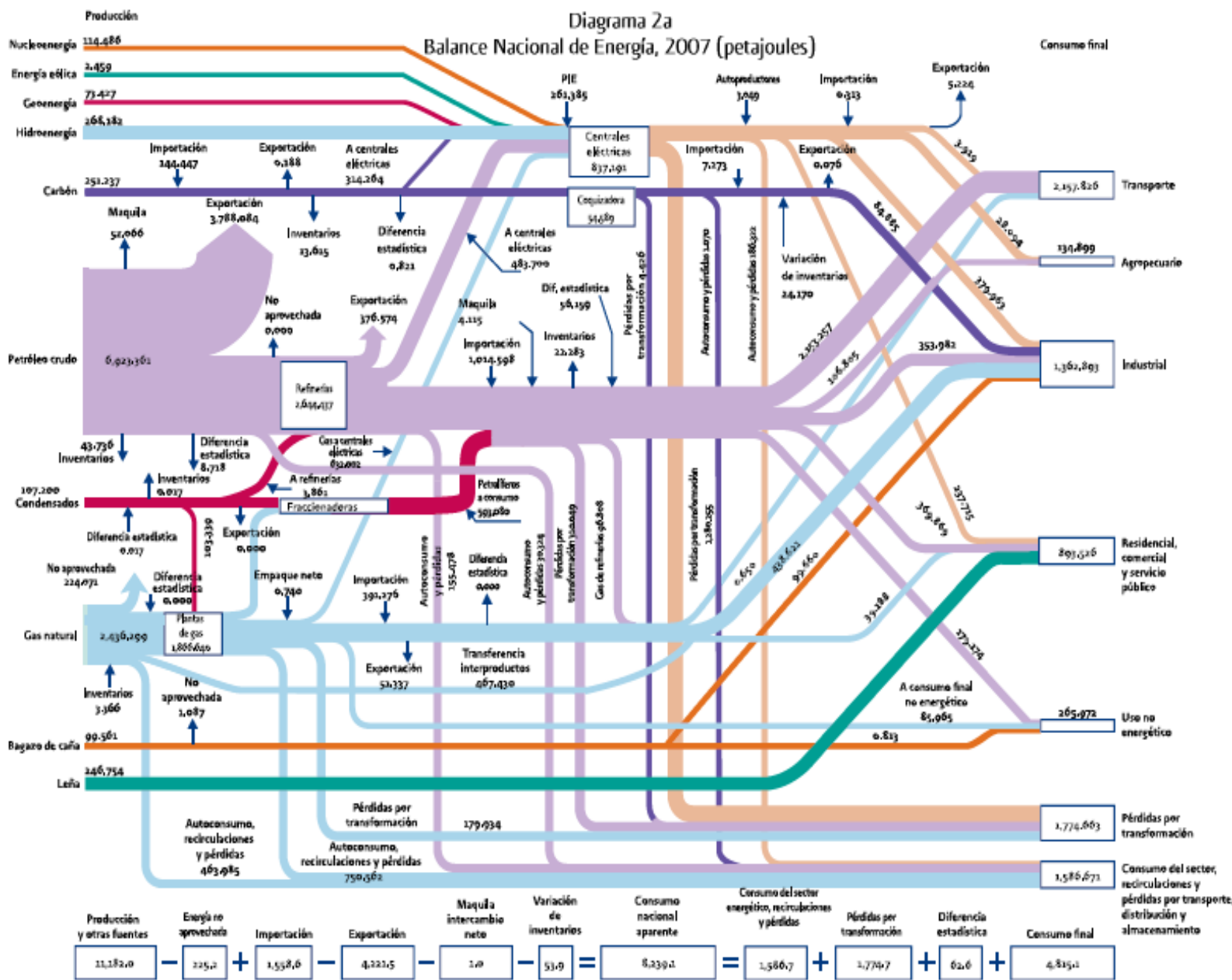


Figura 1.2.6

Balance Nacional de Energía

Fuente: Sistema de Información Energética

Solo el 3.3% de la producción de energía primaria proviene de energías renovables (Eólica, Hidráulica y Geotérmica). Sin embargo, la participación de la Energía Eólica presentó un aumento del 446% en un año gracias a la apertura de la Central Eléctrica “LA VENTA II”. (SIE 2007).

1.3 La generación en pequeña escala

Un tercio de la población mundial vive sin energía eléctrica (Gipe 2004), siendo los países tercermundistas los más afectados, particularmente las zonas rurales alejadas de las ciudades. Esta falta de electricidad tiene graves implicaciones en el desarrollo, salud y educación de los habitantes de estos lugares, es por esto que organismos como el Banco Mundial están interesados en combatir este problema. Como posible solución se ha propuesto la generación distribuida, la cual consiste en generar la energía eléctrica en la cercanía de los centros de consumo, por esto la generación eléctrica será en pequeña o mediana escala (100 KW-10MW).

Sistemas Eólicos, Solares y mini-hidráulicos, así como híbridos entre estos, son idóneos para este fin, ya que pueden generar las pequeñas cantidades de energía que estas regiones requieren a un bajo costo de mantenimiento y evitando las pérdidas en la transmisión que podría presentar el conectarse los grandes centros de generación eléctrica.

Por ejemplo, colocar una pequeña turbina eólica en una zona rural puede proporcionar energía eléctrica con diversas ventajas como:

- No se requiere una gran infraestructura para su instalación.
- Puede funcionar desconectada de la red eléctrica (off grid)

Actualmente tres de cada cuatro de las pequeñas turbinas eólicas son destinadas para proveer energía a sitios remotos, ya sea para uso doméstico o para dar energía a centros de monitoreo meteorológico o de telecomunicaciones.

Capítulo II. Energía Eólica de eje vertical

2.1 Clasificación de Aerogeneradores

El sol calienta el planeta con una intensidad aproximada de 250 W/m^2 produciendo diferencias de temperatura. Estas diferencias aunadas al movimiento rotacional del planeta generan viento. Se estima que de 1 a 3% de la energía del Sol que llega a la Tierra es convertida en viento.

Factores como montañas, edificios y hasta la rugosidad del terreno limitan su flujo, pero sobre cuerpos de agua, planicies y a grandes alturas el viento alcanza grandes velocidades.

Un aerogenerador o turbina eólica es un dispositivo diseñado para transformar una parte de la energía cinética del viento en energía mecánica, la cual se utiliza para generar energía eléctrica, bombeo de agua y molienda de granos.

Por esto, es necesario tener diversos tipos de aerogeneradores que se adecuen a las condiciones particulares de cada lugar y a las necesidades del usuario.

Podemos clasificar a los aerogeneradores de la siguiente manera:

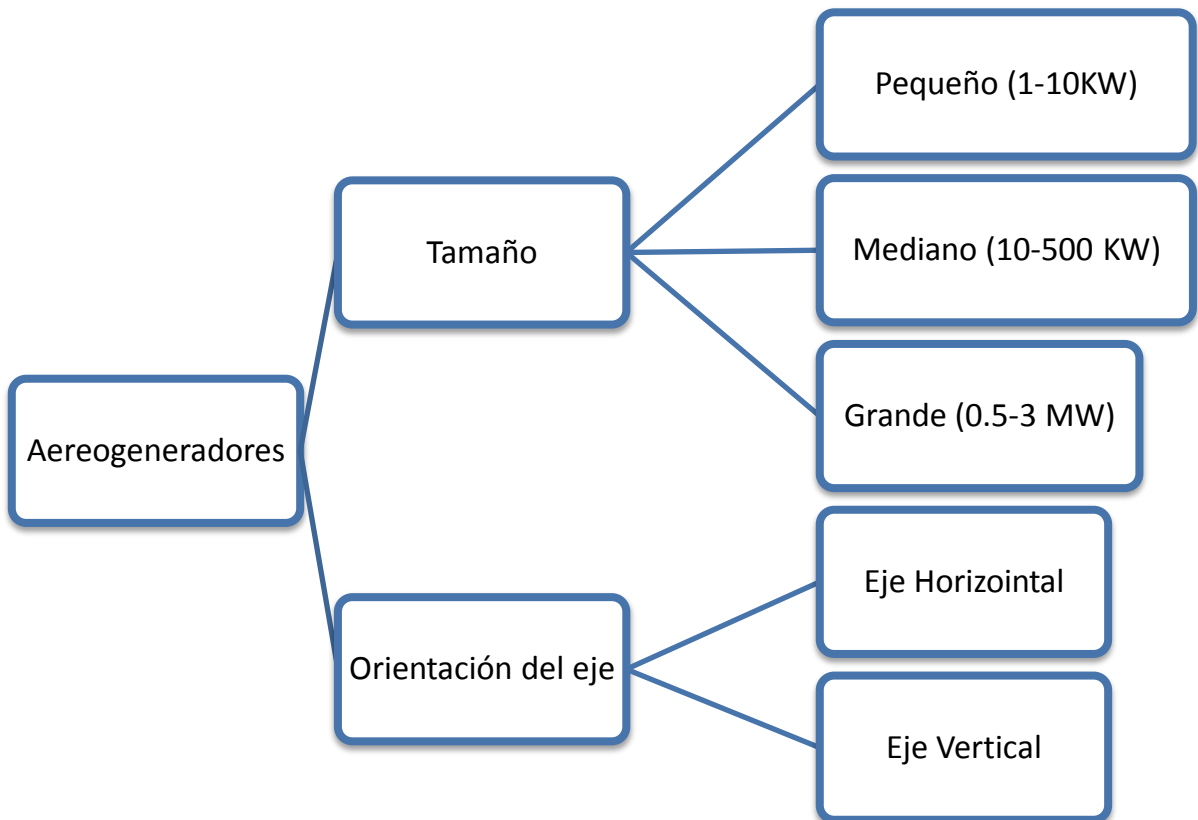


Figura 2.1
Clasificación de los aerogeneradores

Clasificación por tamaño

Pequeños Aerogeneradores: Hasta 10 KW y a su vez lo podemos dividir en 3 subgrupos dependiendo del tamaño del diámetro del rotor.

- **Micro Aerogeneradores:** Son los más pequeños de todos, tendiendo un diámetro hasta de 1.25 m.
- **Mini Aerogeneradores:** Con un diámetro de hasta 3m.
- **Aerogeneradores tamaño casero:** Con un diámetro de hasta 10m.

Medianos Aerogeneradores: Aquellos que generan de 10 KW hasta 500 KW. Llegan a tener un diámetro de hasta 50 metros.

Grandes Aerogeneradores: Generan de 1.5 a 3 MW, llegan a tener un diámetro hasta del tamaño de una cancha de fútbol (Poco más de 100 m) (Gipe. 2004).

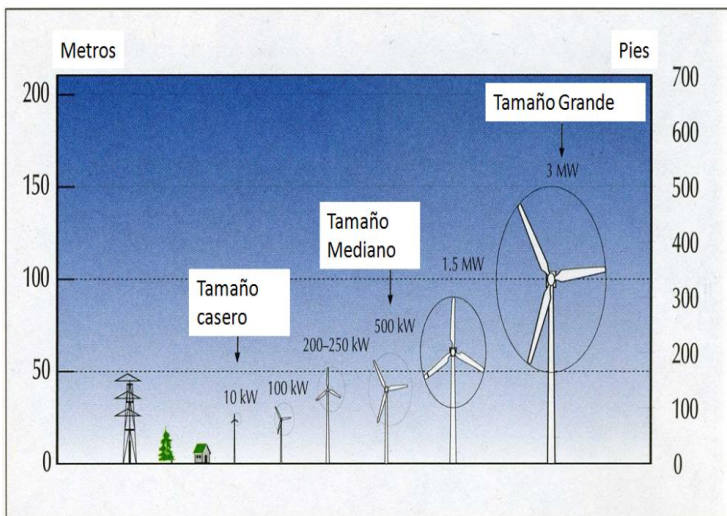


Figura 2.1.1
Aerogeneradores por Tamaño
Fuente: Gipe 2004

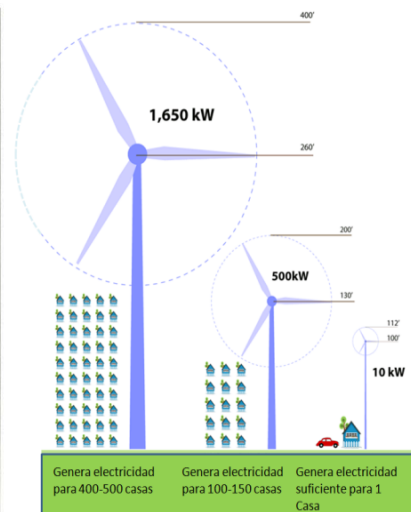


Figura 2.1.2
Alcances en la generación
Fuente: ASTAE Banco Mundial

Clasificación por la orientación del eje de giro del rotor

En la figura 2.1.3 se encuentran indicados los principales componentes de un aerogenerador grande el cual es usado como ejemplo para definir la diferencia de los aerogeneradores de eje horizontal o vertical.

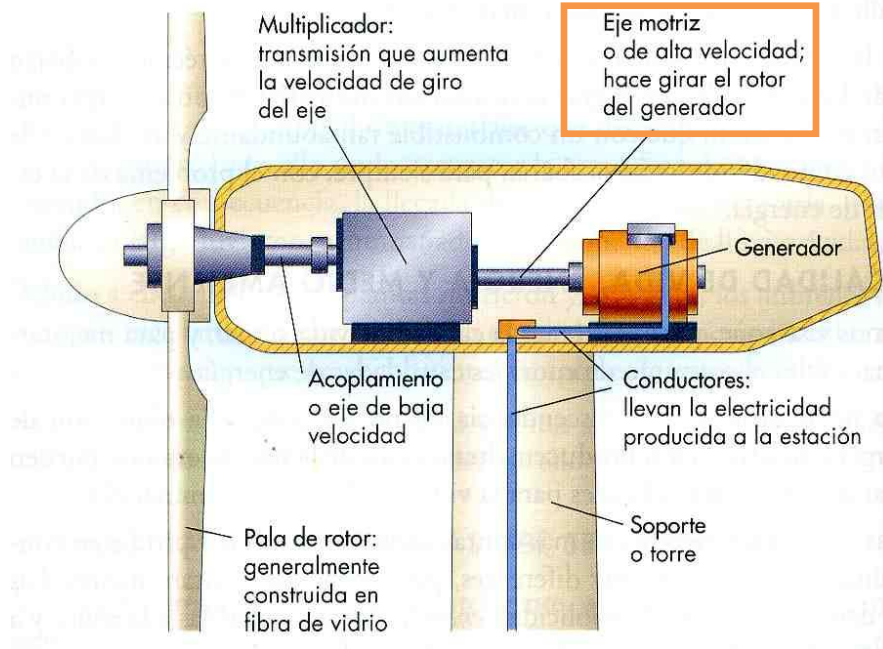


Figura 2.1.3
Componentes de un Aerogenerador

Los ejes de alta y baja velocidad dependiendo de su orientación determinan si el aerogenerador será de eje vertical u horizontal, como se muestra en la figura 2.1.4.

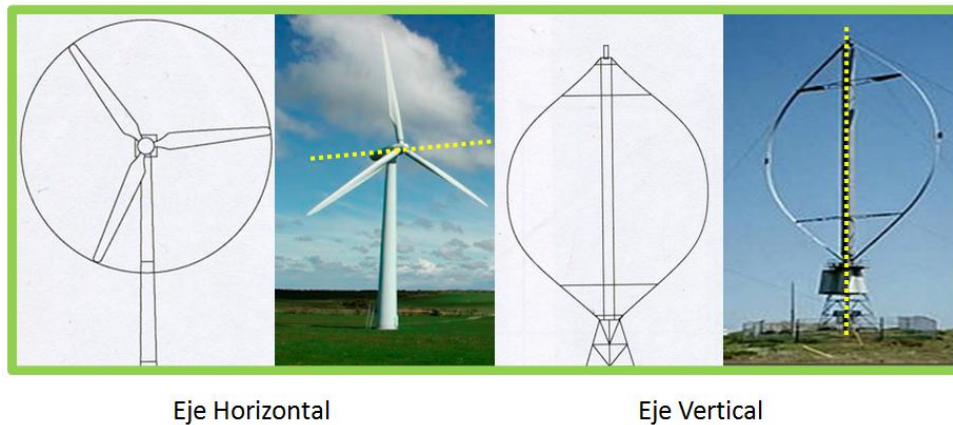


Figura 2.1.4
Tipos de aerogeneradores

Eje Horizontal:

Los aerogeneradores de eje horizontal también son conocidos como HAWT por sus siglas en inglés (Horizontal Axis Wind Turbine). Este tipo de aerogeneradores es el más común entre los aerogeneradores de gran escala por las ventajas a continuación presentadas sin embargo también se discuten sus desventajas.

Eje Horizontal

Ventajas

- ✓ Pueden transformar la energía cinética del viento en un 70%.
- ✓ Pueden ser construidos a mayores escalas.
- ✓ Pueden utilizar al máximo la fuerza de arrastre variando la aerodinámica de la pala.

Desventajas

- ✗ Requieren flujos de viento constante para un buen desempeño.
- ✗ Presenta problemas por las fuerzas giroscópicas en el rotor, para cambiar su orientación con la dirección del viento.

Eje Vertical

VAWT, por sus siglas (Vertical Axis Wind Turbine)

Eje Vertical

Ventajas

- ✓ Son omnidireccionales
Aceptan la dirección del viento en cualquier dirección, por lo que tienen un diseño más simple.
- ✓ Tienen el generador montado a nivel de piso.
- ✓ Costos de mantenimiento más bajos.
- ✓ Bajos niveles de ruido.
- ✓ Pueden funcionar en condiciones climáticas extremas.

Desventajas

- ✗ Vientos lentos/ escasos por estar a nivel de suelo.
- ✗ Mucho más material por metro cuadrado que las HAWT.
- ✗ Bajo TSR, por lo que es difícil la generación eléctrica a partir de estas.
- ✗ Incapacidad para controlar la potencia entregada por no poder moderar las palas.
- ✗ Es difícil automatizarlos aerogeneradores del tipo Savonius y Darrieus.

A pequeña escala, es decir con una potencia máxima de 10KW:

Eje Vertical (Pequeña escala)

Ventajas

- ✓ Debido a que es más ligera, puede instalarse en mástiles o sobre edificios altos.
- ✓ Puede ser instalada en la ciudad sin

Desventajas

- ✗ Difícil colocar un sistema que regule la velocidad cuando hay grandes vientos (Rotor-H)

- ✓ molestar a los vecinos a causa del ruido.
- ✓ Algunos sistemas híbridos (Savonius y Darrieus) no requieren sistema de freno, aprovechando así al máximo la velocidad del viento.
- ✓ Es más eficiente, por que al ser Generación Distribuida tiene menos pérdidas en la transmisión.

Dado que el propósito de esta tesis es el desarrollo de un micro aerogenerador de eje vertical, en lo sucesivo me enfocaré únicamente en este tipo de aerogeneradores.

2.2 Antecedentes de los aerogeneradores de eje vertical.

El primer antecedente de los aerogeneradores fueron los molinos de viento utilizados en 1800 para bombear agua en lugares remotos. Posteriormente fueron utilizados para la molienda de granos.

Entre los pioneros se encuentra Charles F. Brush con su turbina eólica de 12 KW para producir electricidad en corriente continua en 1880 en EUA. (Blanco. 2004)

Sin embargo, no fue hasta las crisis petroleras de los 70's que la energía eólica se empezó a desarrollar con propósitos de generación a gran escala.

Así surgió el primer diseño de un aerogenerador de eje vertical, el cual estaba compuesto por palas rectas unidas por un eje horizontal (Figura 2.2.1). Una gran limitante de este diseño era que a causa de su configuración se generaban fuerzas centrífugas que a su vez producían esfuerzos en las uniones de las palas.

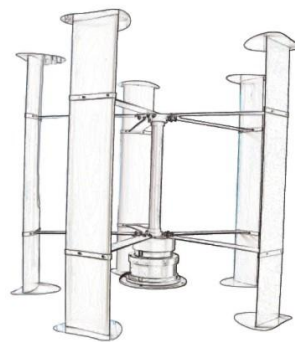


Figura 2.2.1
Primer aerogenerador de eje Vertical

1922 el finlandés Sigurd J. Savonius diseñó un nuevo prototipo de aerogenerador, dicho diseño es uno de los más simples aerogeneradores del tipo arrastre.

Este tipo de aerogeneradores giran relativamente lento pero a gran torque¹, por lo que han sido usados para bombeo de agua y molienda de granos. Sin embargo, para la generación de electricidad presenta inconvenientes, por ejemplo, giran en promedio a 100 RPM.

Para 1927 el inventor francés D. G. M. Darrieus patentó una nueva propuesta la cual en vez de tener palas rectas, tiene palas curvas unidas a ambos lados del tubo de torque del rotor; por esto este tipo de aerogeneradores es también conocido como batidora de huevo. Debido al diseño, las fuerzas centrífugas se transmiten a lo largo de la pala hasta el punto de unión. Este esfuerzo es de tensión y no de flexión por lo que la pala resiste más, incluso puede ser de materiales más ligeros (Eggleston).

Desafortunadamente, en los últimos años el trabajo sobre este tipo de aerogeneradores a gran escala prácticamente ha cesado, debido a su pobre desempeño y a su baja eficiencia. Sin embargo a pequeña escala tienen un gran potencial debido a la versatilidad de velocidades de vientos en la que pueden funcionar, por lo que se están haciendo nuevos prototipos.

2.3 Diseños de aerogeneradores de eje Vertical

Debido a la versatilidad en el diseño que este tipo de aerogeneradores puede presentar existen los siguientes 2 modelos dependiendo de la función aerodinámica del rotor.

- De arrastre (Drag based)
- De sustentación (Lift based)

Los aerogeneradores basados exclusivamente en arrastre funcionan como una pala en el agua impulsando a un cuerpo; la velocidad máxima que puede tener el cuerpo será la velocidad con la que la pala arrastra el agua. Los anemómetros de copa funcionan bajo este principio, las copas giran a la velocidad del viento como lo muestra la figura 2.3.1.

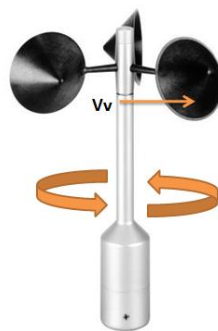


Figura 2.3.1
Anemómetro de Copa

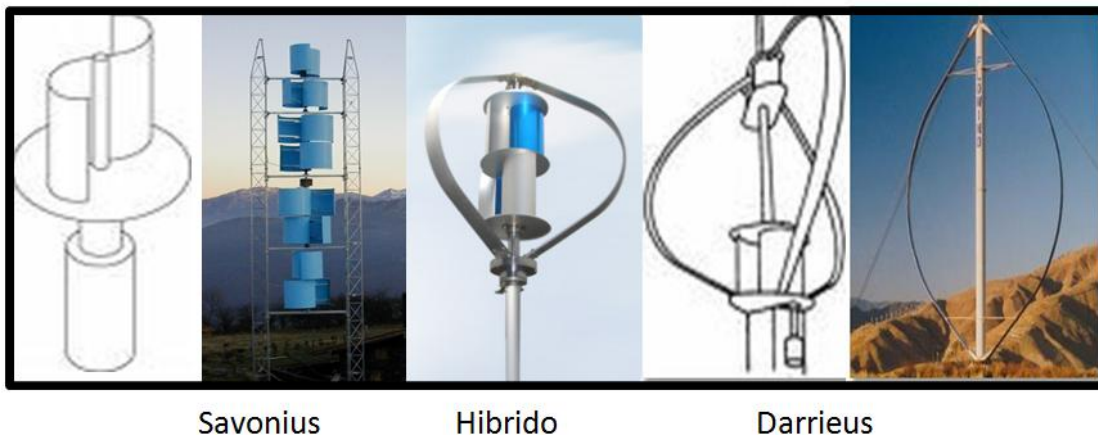
¹ En castellano es conocido como PAR DE FUERZAS

Con ello, podemos definir el TSR (*Top Speed Ratio*), como la velocidad máxima del aerogenerador en relación con la velocidad del viento. El TSR nos sirve para caracterizar para los aerogeneradores, en el caso que funcionen bajo el principio de arrastre el TPS será siempre 1 o menor mientras que si funcionan bajo el principio de sustentación el TSR podrá ser mayor a 1.

Los aerogeneradores Savonius (Figura 2.3.1) están basados en el arrastre. Giran a velocidades menores a 100 RPM pero con un gran torque por lo que son mejores para el bombeo de agua que para la generación de electricidad.

El otro tipo, los de sustentación, usualmente sí son usados para la generación de electricidad pues entregan más potencia con mayor eficiencia

. Un ejemplo son los aerogeneradores Darrieus (Figura2.3.1), cuyas palas tienen su máxima sustentación 2 veces por revolución. Estos aerogeneradores tienen TSR mayor a 1 (Eggleston).



Savonius

Hibrido

Darrieus

Figura 2.3.2
Aerogeneradores de eje vertical

2.4 Aplicaciones contemporáneas

A continuación se muestran algunos ejemplos de aerogeneradores de eje vertical que están en el mercado, principalmente para casas y edificios.

Aerogenerador HELIX

Es una turbina del tipo Savonius con un generador de 2.5 kW diseñada para casas y edificios. El área de barrido es de 3.19 m^2 , pesa 140 kg, funciona en un rango de velocidad del viento de 5-10 m/s y se conecta a la red. Helix es fabricada en Estados Unidos y se muestra en la figura 2.4.1 (Helix.com).



Figura 2.4.1
Aerogenerador Savonius Helix
Fuente: Helixwind.com

Aerogenerador Aero Cam

Otra opción para instalar en casas y comercios, tiene un área de barrido de 1.20 m y puede funcionar con vientos desde 5 hasta 20 m/s. Se pueden instalar en serie a grandes altitudes para lograr mayores potencias.

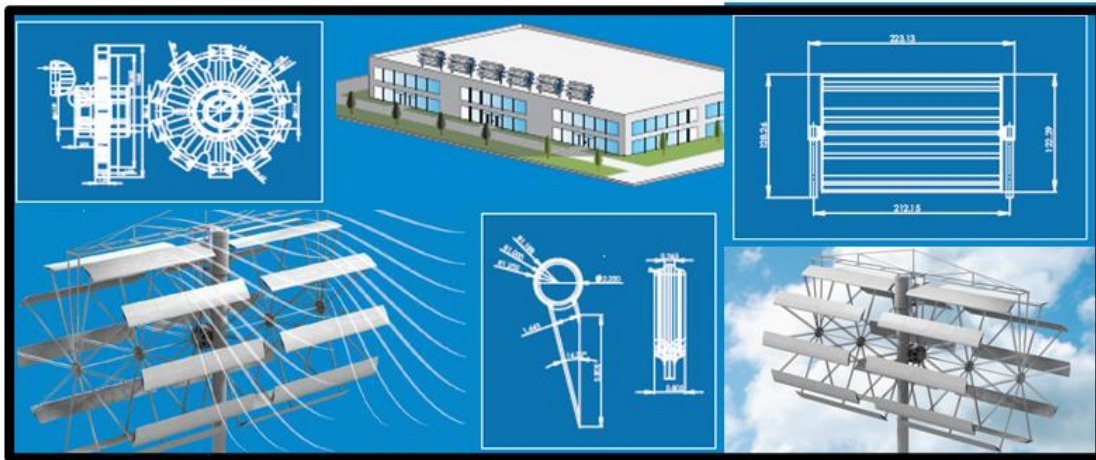


Figura 2.4.2
Aerogenerador AeroCam
Fuente: broadstarwindsystems.com

Aerogenerador Ever Wind

En Canadá se encuentra esta empresa distribuidora de VAWT, la cual cuenta con turbinas para uso doméstico de 1-5 kW y para uso comercial de 10 kW con el modelo mostrado en la figura 2.4.3.



Figura 2.4.3
Aerogenerador de 10 kW Ever Wind
Fuente: everwindpower.com

Sin embargo, existen otras alternativas que resaltan por su sencillez y uso de materiales reciclados, opciones que pueden ser económicamente atractivas aunque sacrifican el desempeño.



Figura 2.4.4
Aerogenerador casero
Fuente: instructables.com

Muchos esfuerzos se han hecho para diseñar un generador lo suficientemente barato para ser competitivo, sin embargo el menor coeficiente de poder es una limitante. Pero por otro lado se cree que aun no se ha explotado todo su potencial.

Capítulo III. Fundamentos teóricos de los microaerogeneradores de eje vertical

3.1 Potencia en el viento

La función de los aerogeneradores es interceptar la energía del viento que pasa a través de la zona de barrido del rotor para transformarla así en electricidad.

El viento con una masa m que se mueve a una velocidad v genera energía cinética E_C que es calculada mediante la fórmula:

$$E_C = \frac{1}{2} m v^2 \dots (3.1)$$

Así, la energía cinética del viento es directamente proporcional a la densidad del aire. A presión atmosférica normal y a 15° C el aire pesa unos $1.225 \frac{kg}{m^3}$, aunque la humedad, el calor y las bajas presiones resultan en menores densidades (windpower.org).

$$\rho = mv \dots (3.2)$$

Considerando un área transversal cualquiera A por donde pasa el viento a velocidad v en una unidad de tiempo existe un volumen circulando \dot{V} conocido como flujo volumétrico (3.2) y un flujo másico \dot{m} (3.3).

$$\dot{V} = vA \dots (3.2)$$

$$\dot{m} = \rho vA \dots (3.3)$$

Al expresar la energía cinética del viento que pasa por el área transversal A por unidad de tiempo obtenemos la ecuación para calcular la potencia en el viento P (3.4) (Hau,2006).

$$\frac{E_C}{t} = \frac{1}{2} m v^2 \left(\frac{A}{t} \right)$$

$$P = \frac{1}{2} \dot{m} v^2 (A)$$

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

$$P = \frac{1}{2} \rho v^3 A \dots (3.4)$$

La pregunta ahora es ¿Cuánta de esa energía puede ser extraída si en el flujo del viento colocamos un aerogenerador? En la sección 3.2 se explica la respuesta.

3.2 Limite de Betz

Partiendo del principio de que *“la energía no se crea ni se destruye, solo se transforma”* la máxima cantidad de energía mecánica que podemos extraer es la energía cinética del viento (3.1), lo cual se verá reflejado en la velocidad del mismo después del aerogenerador **V2**. Partiendo de esto podemos llegar a las siguientes conclusiones:

1. Si fuera posible extraer toda la energía cinética la velocidad V2 sería igual a cero, por lo que el viento dejaría de fluir.
2. Para conservar el flujo volumétrico, la sección transversal **A** tiene que volverse más ancha (Figura 3.2.1).

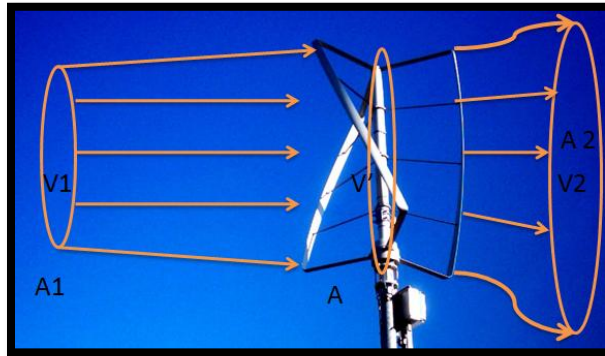


Figura 3.2.1
Desviación del viento por el aerogenerador

La potencia que se extrae corresponde a la expresión 3.5.

$$P = \frac{1}{2} \rho (v_1^3 A_1 - v_2^3 A_2)$$

$$\rho v_1 A_1 = \rho v_2 A_2$$

$$P = \frac{1}{2} \rho v_1 A_1 (v_1^2 - v_2^2)$$

$$P = \frac{1}{2} \dot{m} (v_1^2 - v_2^2) \dots (3.5)$$

Sin embargo para asegurarnos de que no ocurra el caso en el que V2=0 se tiene que usar una ecuación para expresar la potencia mecánica. Con base en la ley de conservación del momento, la fuerza con la que el viento que golpea el aerogenerador puede se expresar de la siguiente manera:

$$F = \dot{m}(v_1 - v_2) \dots (3.6)$$

Y como a “*toda acción corresponde una reacción*” el aerogenerador responde con una fuerza equivalente en sentido opuesto para contrarrestar el viento con una velocidad v' por lo que se requiere la siguiente potencia:

$$P = Fv' = \dot{m}(v_1 - v_2)v' \dots (3.7)$$

La potencia mecánica extraída del aire puede ser derivada mediante la diferencia de potencia antes y después del aerogenerador, así como el empuje y la velocidad del flujo. Igualando las dos ecuaciones (3.5 y 3.7) podemos llegar a una relación de la velocidad del flujo v' :

$$\frac{1}{2}\dot{m}(v_1^2 - v_2^2) = \dot{m}(v_1 - v_2)v' \dots (3.8)$$

Entonces en nuestro aerogenerador la velocidad del flujo v' se vuelve la media aritmética entre v_1 y v_2 :

$$v' = \frac{1}{2}(v_1 + v_2) \dots (3.9)$$

Y el flujo másico en el aerogenerador:

$$\dot{m} = \rho Av' = \frac{1}{2}\rho A(v_1 + v_2) \dots (3.10)$$

Con esto, la potencia mecánica en la salida del aerogenerador se obtiene sustituyendo la ecuación 3.9 en 3.5.

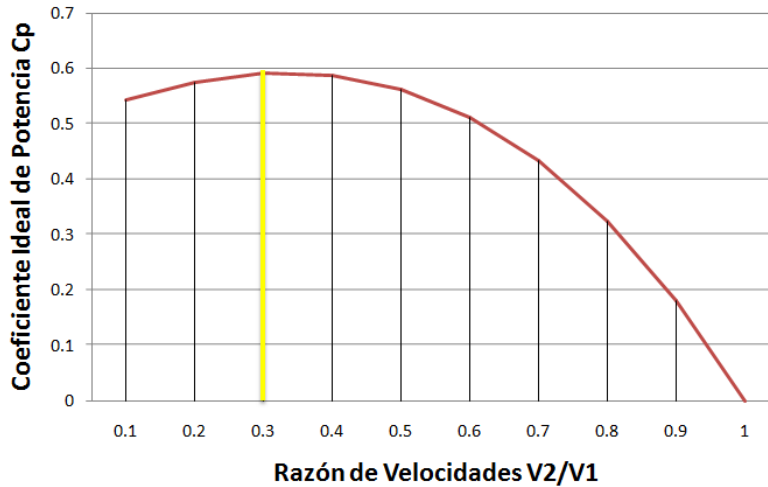
$$P = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{2}\rho A(v_1 + v_2)\right)(v_1^2 - v_2^2) = \frac{1}{4}\rho A(v_1 + v_2)(v_1^2 - v_2^2) \dots (3.11)$$

Para tener una referencia del poder del viento en la misma área transversal pero sin aerogenerador tenemos P_0 que es la ecuación 3.4. La potencia extraída y el aire en un flujo libre son conocidos como “COEFICIENTE DE POTENCIA” C_p :

$$C_p = \frac{P}{P_0} = \frac{\frac{1}{4}\rho A(v_1 + v_2)(v_1^2 - v_2^2)}{\frac{1}{2}\rho v_1^3 A}$$

$$C_p = \frac{P}{P_0} = \frac{1}{2}\left|1 - \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^2\right|\left|1 + \frac{v_2}{v_1}\right| \dots (3.13)$$

El C_p es el coeficiente de potencia que determina el rendimiento aerodinámico del rotor. Si se grafica la expresión 3.12 obtenemos la gráfica 3.1.1 en la cual podemos ver que cuando la razón de velocidades es igual a $1/3$ obtenemos el C_p máximo, el cual es cercano a 0.6.



Gráfica 3.1.1
Coeficiente Ideal de Potencia

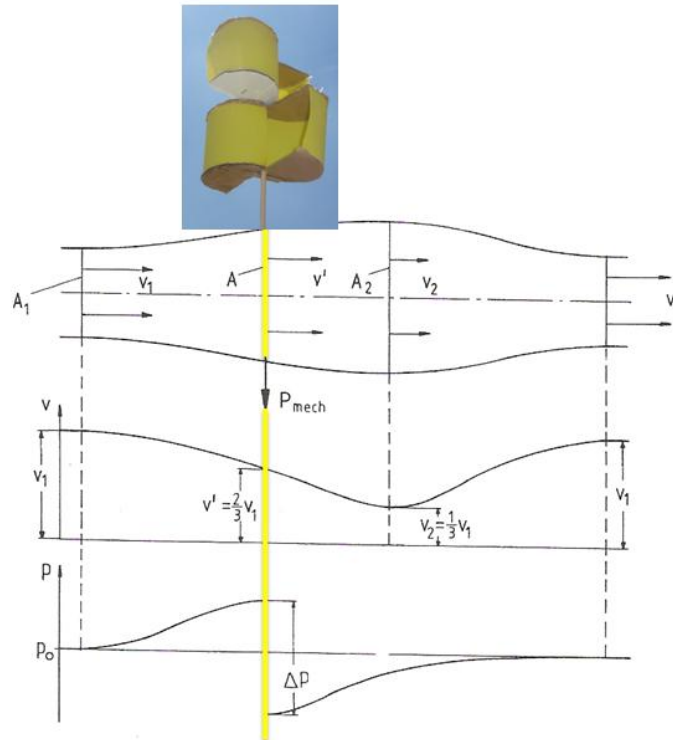
$$C_p = \frac{1}{2} \left| 1 - \left(\frac{1}{3} \right)^2 \right| \left| 1 + \frac{1}{3} \right| = \frac{32}{54} = \frac{16}{27} = \mathbf{0.593}$$

El científico alemán Dr. Albert Betz fue el primero en descubrir este factor el cual a menudo es llamado el límite de Betz. En base a estos datos las velocidades del viento en el aerogenerador y después de este, están determinados por las ecuaciones 3.13 y 3.14 respectivamente.

$$v' = \frac{2}{3} v_1 \dots (3.13)$$

$$v_2 = \frac{1}{3} v_1 \dots (3.14)$$

En la gráfica 3.1.2 podemos ver claramente cómo se comporta la velocidad y la presión del viento al pasar por el aerogenerador.



Gráfica 3.1.2

Comportamiento de la presión y la velocidad

Así la potencia que puede ser extraída del viento por el aerogenerador está definida por la ecuación 3.15, a la cual también le podemos agregar la eficiencia mecánica y eléctrica en la transmisión y generación eléctrica.

$$P = \eta_e \eta_m C_p \frac{1}{2} \rho v^3 A \dots (3.15)$$

3.3 Generación de Energía mediante el arrastre.

Como vimos en la sección 3.1 el viento posee una cierta energía la cual buscamos extraer mediante un aerogenerador, para esto podemos usar el arrastre o la sustentación aerodinámica.

La forma más fácil de convertir esta energía es mediante el arrastre aerodinámico. Cuando el viento se impacta en una superficie A con una velocidad v_v se obtiene una potencia P, la cual puede ser calculada de la siguiente manera:

$$P = D v_v \dots (3.16)$$

Este fenómeno puede ser observado en los veleros y en las VAWT del tipo Savonius, como se muestra en la figura 3.3.1, donde también se pueden observar las fuerzas involucradas en la ecuación 3.16.

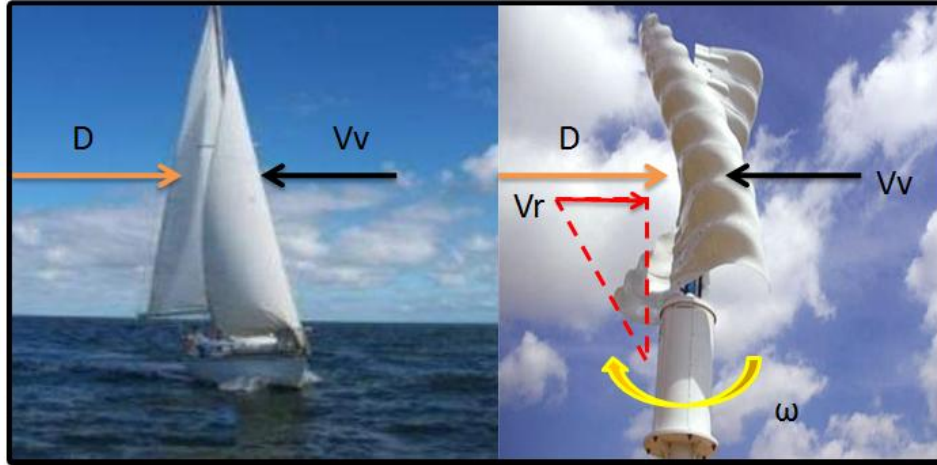


Figura 3.3.1
 Condiciones de Flujo y fuerzas aerodinámicas en el levante
 Fuente: Hau 2006

La velocidad relativa $v_r = (v_w - v)$ que impacta efectivamente el área de arrastre es decisiva, así que usando el coeficiente común de arrastre aerodinámico c_D el arrastre aerodinámico D se expresa de la siguiente manera:

$$D = c_D \frac{\rho}{2} (v_v - v_r)^2 A \dots (3.17)$$

Al sustituir la ecuación 3.2 en la 3.1 tenemos la ecuación final para el cálculo de la potencia resultante:

$$P = \frac{\rho}{2} c_D (v_v - v_r)^2 A v_r \dots (3.18)$$

Si la potencia es expresada en términos de potencia contenida en un flujo libre de aire, se obtiene el siguiente coeficiente de potencia:

$$C_p = \frac{P}{P_0} = \frac{\frac{\rho}{2} c_D (v_v - v_r)^2 A v_r}{\frac{\rho}{2} (v_v)^3 A} \dots (3.19)$$

Análogamente a la ecuación 3.12 y la figura 3.1.1 el máximo valor de C_p se alcanza cuando $v_r/v_w = 1/3$, y al sustituir este valor en la ecuación 3.19 obtenemos la expresión 3.20, la cual representa el máximo coeficiente de potencia.

$$C_{P \max} = \frac{4}{27} C_D = 0.148 \dots (3.20)$$

Entonces, el máximo coeficiente de potencia para un aerogenerador que funcione puramente con arrastre será aproximadamente 0.2. Este resultado representa un tercio del coeficiente ideal de potencia de Betz.

3.4 Generación de Energía mediante la sustentación.

Otra forma de utilizar la fuerza del viento es mediante el uso de la fuerza de sustentación, como sucede en los aviones modernos y en algunos aerogeneradores (Figura 3.4.1)



Figura 3.4.1
Fuerza de sustentación

Esto aumenta considerablemente el C_p que el aerogenerador puede alcanzar, pues usan la fuerza de sustentación junto a la velocidad angular del rotor y la velocidad del viento, estas últimas dos generan el ángulo aerodinámico de ataque ν_r .

Dicha fuerza puede ser descompuesta en un componente en la misma dirección del viento conocido como arrastre D y otro componente perpendicular L conocido como sustentación (Como se muestra en la figura 3.4.2). A su vez L puede ser descompuesto en la sustentación de empuje L_{empuje} , la cual es responsable del empuje del rotor, y la sustentación de torque L_{torque} , en dirección al eje de giro del rotor.

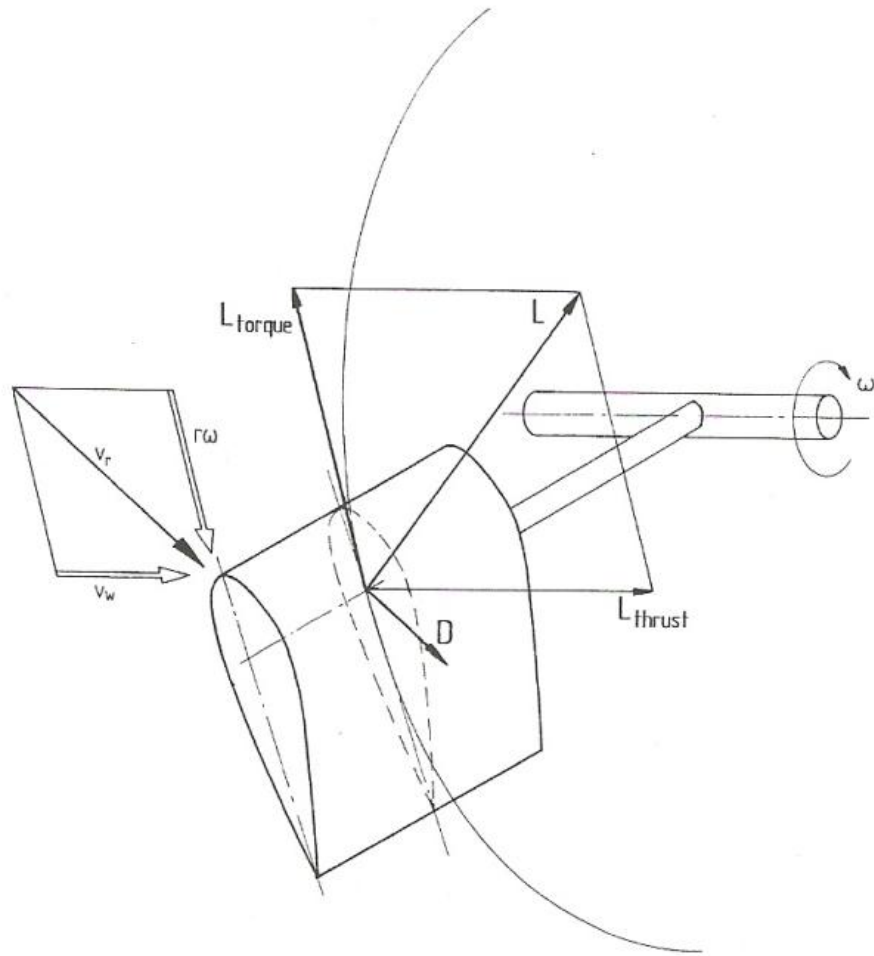


Figura 3.4.2
Análisis de fuerzas de sustentación

En el caso de los aerogeneradores contar con un diseño aerodinámico que les permita utilizar la sustentación y el arrastre, y esa es una de las razones por las cuales existen tan diversas geometrías.

3.5 Aerodinámica de los aerogeneradores de eje vertical

En el caso de los VAWT, el ángulo aerodinámico de ataque de las aspas varía constantemente durante la rotación (Como se muestra en la figura 3.2.1). Mientras una pala se mueve en dirección del viento en un periodo de π , la otra pala se mueve en contra de este; entonces la potencia generada es proporcional a la energía extraída únicamente por la pala que está en contra del viento.

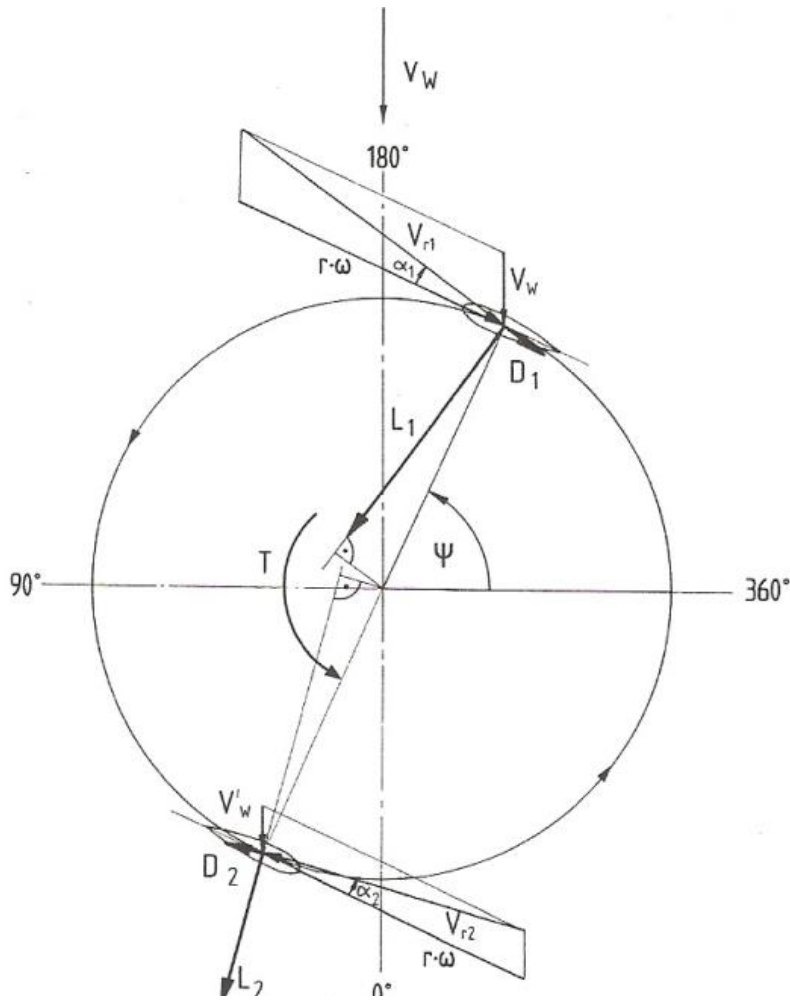


Figura 3.5.1

Coefficientes de poder en el rotor de los diversos aerogeneradores

En una revolución, cada pala genera en un momento un torque positivo cuando está en contra del viento y en otro de torque negativo cuando está a favor. Este torque puede ser balanceado cuando se cuenta con 3 aspas en el generador.

Una de las mayores limitantes de los VAWT es que necesitan una velocidad angular para funcionar, por lo que la mayoría de las veces requieren de intervención externa para arrancar. Otra es que su máximo coeficiente de potencia del rotor C_{PR} ha sido determinado por los autores entre 0.4 a 0.42, lo cual comparado con los aerogeneradores de eje horizontal a un mismo TSR es ligeramente menor (como se muestra en la figura 3.5.2).

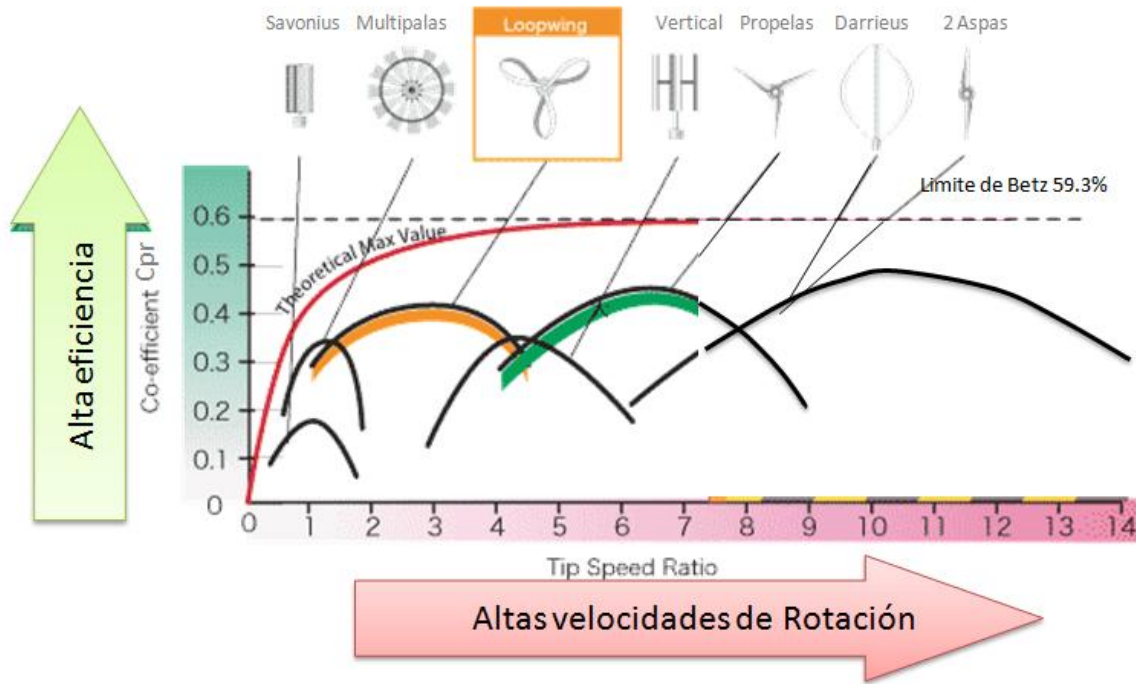


Figura 3.5.2
Coeficientes de poder en el rotor de los diversos aerogeneradores

Los rotores de los aerogeneradores de eje vertical giran más lento por lo que la potencia es generada a torques más altos. Sin embargo la deficiencia aerodinámica de estos es únicamente un indicador de su estado de desarrollo, aun hay que investigar más antes de que lleguen a un periodo de madurez suficiente para que sean competitivos comercialmente.

Las palas están aerodinámicamente diseñadas para captar la mayor energía del viento posible, para esto además de la forma se puede controlar el ángulo de ataque. A causa del viento se produce en las palas una fuerza de sustentación que a su vez produce un torque en el rotor que lo hace girar.

3.6 Funcionamiento de Aerogeneradores tipo Savonius

Este tipo de aerogenerador puede ser construido sencillamente con un barril cortado a la mitad y sujetado como se muestra en la figura 3.6.1. Este tipo de aerogeneradores son usados en zonas rurales para el bombeo de agua principalmente.

Para lograr su máximo desempeño la mejor configuración es dada mediante la siguiente relación:

$$R = D - 0.5S \dots 3.21$$

$$S = 0.1D \dots 3.22$$

El torque se genera a causa de las diferencias de presión entre la superficie cóncava y convexa, así como la recirculación del aire. Esto genera una eficiencia hasta de 31%, sin embargo es de resaltar la gran cantidad de material que se requiere (Un aerogenerador Savonius necesita 30 veces más material que un aerogenerador convencional de 3 aspas de eje horizontal).

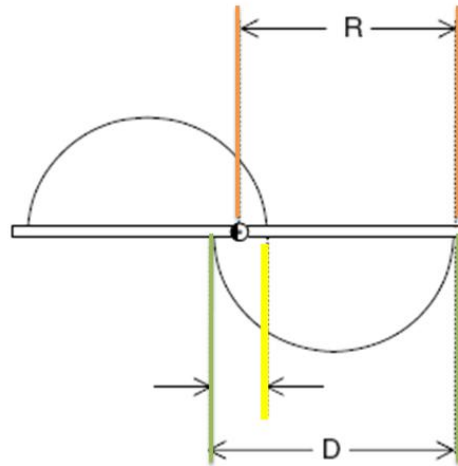


Figura 3.6.1

Coefficientes de poder en el rotor de los diversos aerogeneradores

Dado que en la superficie cóncava hay más arrastre que en la convexa, se pueden usar aspas a 90° para suavizar las fluctuaciones durante la rotación. Además su baja velocidad de arranque (desde 2.5 m/s) lo hacen una opción muy atractiva para las casas.

3.7 Funcionamiento de Aerogeneradores tipo Darrieus

Como ya se mencionó, este tipo de aerogeneradores funcionan mediante el efecto de sustentación que el viento produce. Se cuenta con 3 diferentes clases:

- Triangular o tipo Delta
- GiroMill
- Troposkein o batidora de huevo

El **tipo triangular** presenta aspas rectas y geometrías variables, por lo que la rotación tiende a ser constante a diferencia de los Savonius.

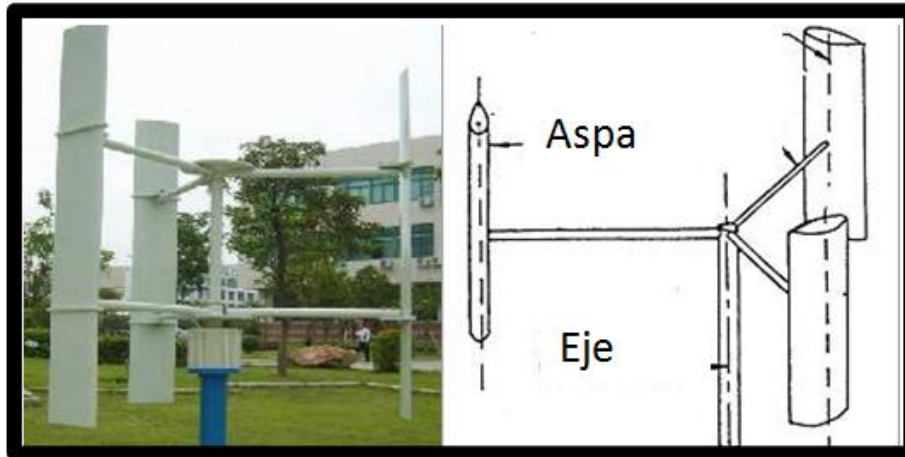


Figura 3.7.1
Aerogeneradores tipo delta

Los Aerogeneradores **Giromill** también tienen palas rectas verticales y un movimiento de rotación alrededor del eje. Es un mecanismo automático que mantiene la posición de Angulo de ataque todo el tiempo lo cual favorece su desempeño.



Figura 3.7.2
Aerogenerador Giromill

Finalmente la tipo **Tripeskein** o batidora de huevo, son el diseño original de las VAWT, además son los únicos que han sido probados a gran escala. Diversos estudios de este tipo de turbinas han probado sus beneficios económicos (Muy poco material), el potencial para la generación de electricidad por su alto TSR así como su simplicidad de construcción.

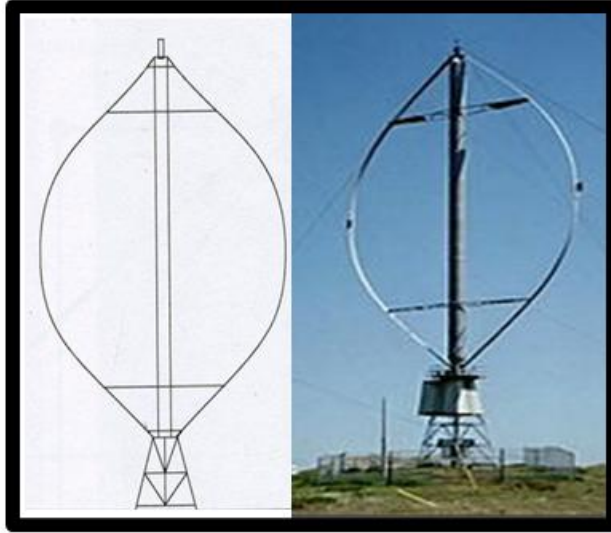


Figura 3.7.3
Aereogenerador Triposkein

Básicamente este aerogenerador consiste en 2 aspas curvas con secciones que se deslizan, las cuales se conectan con el rotor vertical de punta a punta del eje. Como funcionan con fuerza centrífuga las palas sufren muchos esfuerzos.

Para mejorar su desempeño se ha intentado colocar un embudo reverso detrás del aerogenerador, sin embargo presenta graves desventajas bajo condiciones climáticas adversas a causa de la gran cantidad de material. (Sthayajith.2006) (Farret.2006) (Rosenberg. 1993)

Capítulo IV. Diseño de componentes de microaerogenerador de eje vertical

4.1 Análisis del Viento

Para el diseño del aerogenerador de eje vertical no se requiere un análisis estadístico del viento como en el caso de los aerogeneradores de eje horizontal, debido a que el método de diseño se encuentra en una etapa de desarrollo de menor madurez, por lo que para cada nuevo prototipo se requiere de experimentación.

Además, la intención de este prototipo es poder ser fabricado masivamente para abatir costos y de esta manera poder abarcar un mercado mayor. Por estas dos razones el prototipo será probado a velocidades de viento desde 8 m/s.

4.2 Análisis de las aspas

Como ya se explicó en el capítulo 2 existen muchas configuraciones de aerogeneradores de eje vertical. Con el fin de encontrar el diseño que fabricado caseramente pueda tener un buen desempeño, se procedió a construir 6 prototipos de palas de aerogeneradores. Estos se muestran a continuación:

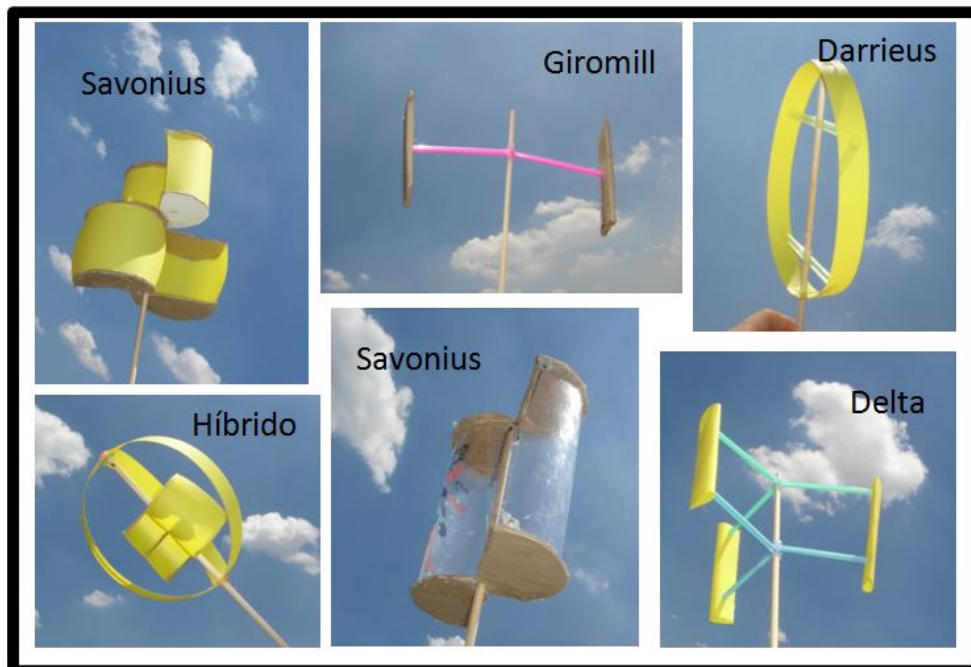


Figura 4.2.1
Prototipos caseros del aerogenerador

Para su elaboración, en todos los casos, los materiales empleados fueron láminas de polipapel (Láminas de polipropileno PP), cartón, popotes y palitos de madera.

La distribución de los 6 prototipos es la siguiente:

- 2 Savonius
- 3 Darrieus
- 1 Híbrido (Savonius + Darrieus)

Los aerogeneradores Savonius son el diseño más sencillo de construir, sólo se crearon medios cilindros y se acoplaron al eje. Para esto ya se contaba con la ecuación que describe la configuración ideal para poder extraer la máxima potencia del viento (Ecuaciones 3.21 y 3.22).

$$R = D - 0.5S \dots 3.21$$

$$S = 0.1D \dots 3.22$$

Para la construcción del Savonius 1 y el Savonius 2, el diámetro D fue de 15 cm, entonces las dimensiones ideales a la que se deben acoplar ambas palas se calcula a continuación:

$$S = 0.1(15\text{cm}) = 1.5 \text{ cm}$$

$$R = 15\text{cm} - 0.5(1.5\text{cm}) = 14.25\text{cm}$$

El Savonius 1 es el prototipo más sencillo, pero presenta el inconveniente de que es difícil que arranque cuando el viento no se encuentra perpendicular a una de las caras. Para minimizar este inconveniente se diseñó el Savonius 2, el cual cuenta con 4 palas desfasadas 90°.

Por otro lado, en las 3 configuraciones de Darrieus no se cuenta con un modelo matemático que maximice las condiciones de operación, por lo que para estos 3 casos se experimentó con la geometría de las palas. Se buscó un arranque sencillo debido a que al usar la fuerza de sustentación en lugar de la de arrastre para funcionar tienden a necesitar vientos a altas velocidades. Por esto la propuesta ha sido utilizar palas grandes para abarcar grandes áreas.

Otro parámetro que se cuidó, principalmente en los modelos Giromill y Delta, fue que las palas no estuvieran muy separadas del eje de rotación ya que el peso de estas generaría grandes esfuerzos en las uniones y además favorece altas velocidades de giro.

Finalmente el sexto modelo es un híbrido entre Savonius y Darrieus con el fin de tener un arranque a bajas velocidades de viento y a la vez un alto TSR (*Top Speed Ratio*).

Para esto se colocaron 2 palas Darrieus y para el pequeño generador Savonius se usaron las ecuaciones 3.21 y 3.22 utilizando un diámetro de 8 cm:

$$S = 0.1(8 \text{ cm}) = 0.8 \text{ cm}$$

$$R = 8 \text{ cm} - 0.5(0.8 \text{ cm}) = 7.6 \text{ cm}$$

Se espera que el prototipo híbrido sea el que mejor desempeño presentara en las pruebas a reportar en la siguiente sección.

4.2.1 Análisis Experimental

Para poder analizar su desempeño, se realizó una prueba de la capacidad de generación y otra de resistencia en el túnel de viento. Para la primera se acoplaron los prototipos a un generador y se compararon bajo condiciones similares de viento, generadas por una secadora de cabello casera. Y para la segunda utilice el túnel de viento del laboratorio de termo fluidos de la FI de la UNAM. Con estas pruebas se espera poder determinar cuál es el prototipo que mejor se desempeña bajo las condiciones rudimentarias de manufactura.

PRUEBA 1: A velocidad constante

El experimento consistió en medir el desempeño de los prototipos a velocidad constante un motor de corriente alterna el cual a su vez se acopló con el eje del aerogenerador mediante unas abrazaderas (como se muestra en la figura 4.2.2). Ya teniendo listo este sistema se utilizó una secadora de cabello a una distancia de 30 cm a la velocidad de viento más baja (10 m/s) y se procedió a probar los 6 diferentes prototipos de aerogeneradores.

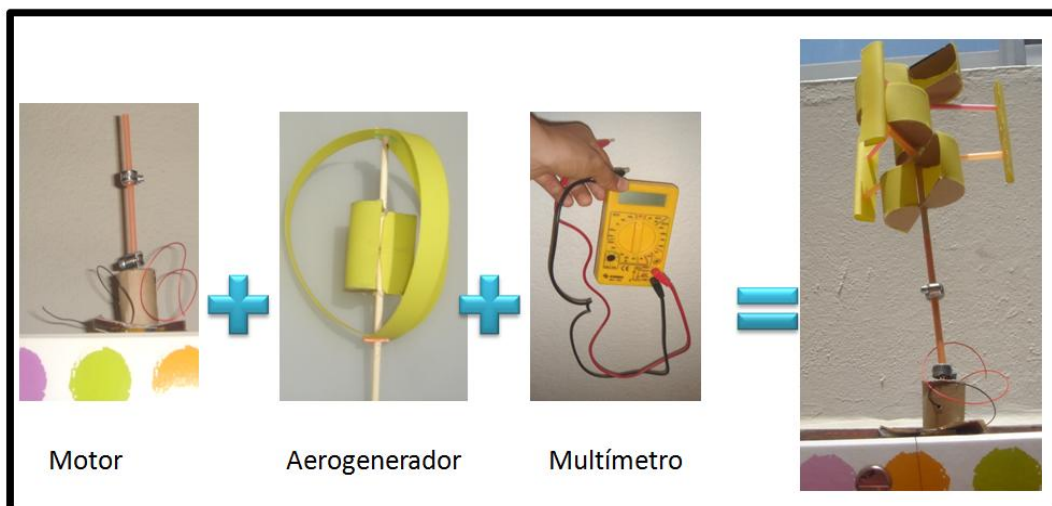


Figura 4.2.1.1

Metodología de la experimentación con los aerogeneradores

Se revisaron 2 parámetros en cada aerogenerador: la corriente y el voltaje generados. Estos se muestran en la siguiente tabla:

	Savonius	DCV (V)= 0.44	DCA(mA)= 11.5	<ul style="list-style-type: none"> • Intermitencia en la generación, pues presenta 2 impulsos por ciclo y esto hace que no gire homogéneamente.
	Savonius 2 **	DCV (V)= 0.52	DCA(mA)= 13.7	<ul style="list-style-type: none"> • Arranca fácilmente a bajas velocidades de viento, pues hay mucha superficie que se opone al viento en diferentes direcciones.
	Giromill	DCV (V)= 0.11	DCA(mA)= 1.4	<ul style="list-style-type: none"> • Presenta problemas para girar constantemente debido a que la fuerza de sustentación es pequeña.
	Delta **	DCV (V)= 0.28	DCA(mA)= 5.6	<ul style="list-style-type: none"> • Arranca con facilidad ya que las aspas están distribuidas de tal manera que pueden generar fuerzas de sustentación en 3 diferentes orientaciones.
	Darrieus	DCV (V)= 0	DCA(mA)= 0	<ul style="list-style-type: none"> • No consiguió arrancar por sí mismo a pesar del viento a grandes velocidades en diferentes direcciones, es necesario un mecanismo alterno de arranque.
	Híbrido Darrieus-Savonius	DCV (V)= 0.25	DCA(mA)= 2	<ul style="list-style-type: none"> • El generador Savonius fue muy pequeño, debido a esto no arranco fácilmente.

Figura 4.2.1.2
Resultado de experimentación a velocidad constante

Aunque se esperaba que el híbrido presentara el mejor desempeño de todos, debido a que utiliza la fuerza de sustentación y de arrastre, fue el Savonius 2 el que presentó mejores resultados porque el área de barrido es más grande.

PRUEBA 2: Túnel de viento (Sin aceleración angular)

Los prototipos de sometieron al túnel de viento de en un rango de velocidades de 8 a 14 m/s y mediante una balanza se registraron las fuerzas de arrastre y sustentación generadas en cada prototipo. Estos valores se registraron en una tabla y posteriormente se graficaron estos puntos para mediante una regresión lineal obtener la ecuación de la recta con la cual se obtienen los coeficientes de arrastre y sustentación que caracterizan cada prototipo.

Prototipo 1: Savonius

Este modelo es el que tiene mayor área de barrido por lo que las fuerzas generadas a bajas velocidades superaron la escala de medición de la balanza. Solo se pudo obtener una medición la cual se muestra en la siguiente tabla:

V [m/s]	V ² [m ² /s ²]	F _D [N]	F _L [N]
8	64	1.6	0.49

Tabla 4.2.1.1

Resultado en prueba de túnel de viento del prototipo Savonius

Es notorio que la escala de este prototipo fue inadecuada para el túnel de viento.

Prototipo 2: Savonius 2

Hay que destacar que este prototipo tuvo uno de los mejores desempeños en la prueba a velocidad constante sin embargo esto se debió a su gran área de barrido. Por lo tanto al igual que en el prototipo 1 la prueba se vio limitada por la balanza, solo que en este caso si fue posible hacer la grafica de los datos.

V [m/s]	V ² [m ² /s ²]	F _D [N]	F _L [N]
8	64	1.49	0.3
10	100	2.5	0.4

Tabla 4.2.1.2

Resultado en prueba de túnel de viento del prototipo Savonius 2

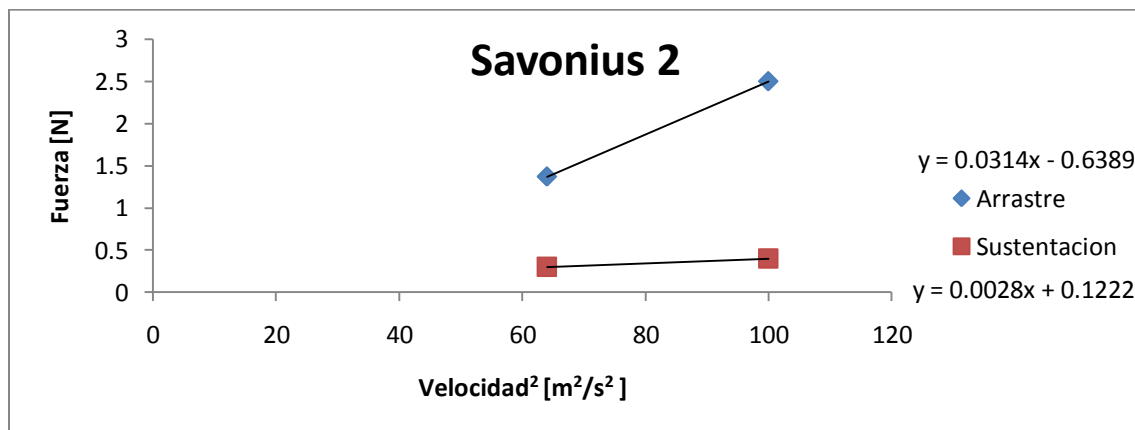


Figura 4.2.1.3

Resultado en prueba de túnel de viento del prototipo Savonius 2

De la regresión lineal obtenemos una ecuación para la fuerza de arrastre y una para la fuerza de sustentación.

Fuerza de Arrastre (D)

Se obtiene mediante regresión lineal la siguiente ecuación de una recta donde $F_D = y$ y $v^2 = x$.

$$F_D = 0.0314v^2 - 0.6389$$

Partiendo de la expresión de la potencia generada por la fuerza de arrastre vista en el capítulo 3 (Ecuación 3.16) podemos llegar a la ecuación de la fuerza de arrastre.

$$P_D = F_D v \dots (3.16)$$

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

$$F_D = \frac{1}{2} \rho v^2 A C_D \dots (4.1)$$

Así el coeficiente de arrastre (C_D) queda como única incógnita al igualar el valor de la pendiente de la regresión lineal con la expresión 3.21 y se puede despejar.

$$m = \frac{1}{2} \rho A C_D = 0.0314$$

Densidad del aire (ρ): $1.225 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ (A presión atmosférica normal y a $15^\circ C$)

Area de barrido (A): $0.0255 [m^2]$

$$\frac{1}{2} \left(1.225 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \right) (0.0255 [m^2]) C_D = 0.0085$$

$$C_D = \frac{0.0314}{\frac{1}{2} \left(1.225 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \right) (0.0255 [m^2])} = 2.0104$$

$$C_D = 2.0104$$

De la misma manera se calcula el coeficiente de sustentación C_L

Fuerza de Sustentación (L)

La ecuación de la regresión lineal es:

$$y = 0.0028x + 0.1222$$

$$F_L = 0.0028v^2 - 0.1222$$

$$F_L = \left(\frac{1}{2} \rho A C_L \right) v^2 \dots (4.2)$$

Usando la misma densidad y la misma area de barrido, tenemos:

$$\frac{1}{2} \left(1.225 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \right) (0.0255 [m^2]) C_D = 0.0028$$

$$C_L = \frac{0.0028}{\frac{1}{2} \left(1.225 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \right) (0.0255 [m^2])} = 0.1792$$

$$C_L = \mathbf{0.1792}$$

Prototipo 3: Giromill

Este prototipo tiene un área de barrido de 0.0026 m² por lo que la bascula en este caso no pudo detectar ningún tipo de fuerzas además que a grandes velocidades (Mayores de 10 m/s) el prototipo se notaba muy frágil.

Prototipo 4: Delta

Este prototipo se desempeño favorablemente en el túnel de viento generando mediciones de la fuerza de arrastre, no así de sustentación debido a su geometría. Estos son los resultados de la prueba:

V [m/s]	V ² [m ² /s ²]	F _D [N]
8	64	0.19
10	100	0.32
12	144	0.5
14	196	0.7

Tabla 4.2.1.3

Resultado en prueba de túnel de viento del prototipo Delta

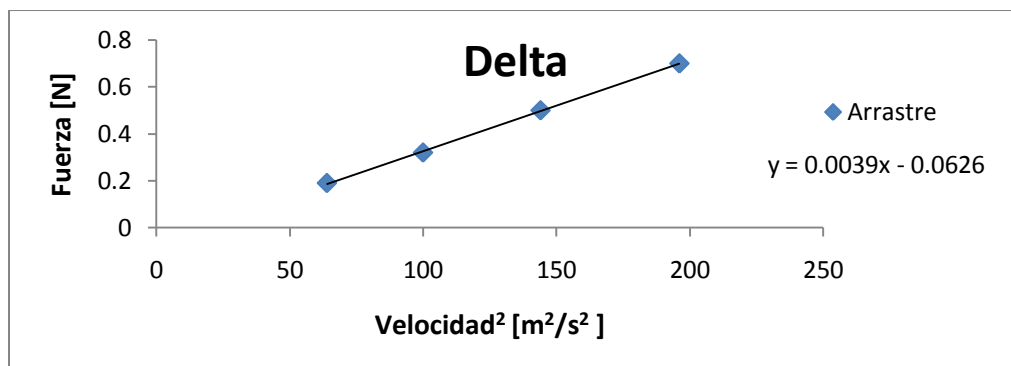


Figura 4.2.1.4

Resultado en prueba de túnel de viento del prototipo Delta

Fuerza de Arrastre (D)

Ecuación de la recta: $F_D = 0.0039v^2 - 0.0626$

Usando la ecuación 4.1 obtenemos el coeficiente de arrastre:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho v^2 A C_D \dots (4.1)$$

Área de barrido: 0.017 m^2

$$C_D = \frac{0.0039}{\frac{1}{2} \left(1.225 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \right) (0.017 \text{ [m}^2])} = 2.0104$$

$$C_D = 0.3745$$

Prototipo 5: Darrieus

En la prueba a velocidad constante este modelo presento un mal desempeño ya que no consiguió arrancar por sí mismo, en cambio en el túnel de viento arrojó los siguientes resultados:

V [m/s]	V ² [m ² /s ²]	F _D [N]	F _L [N]
8	64	0.15	0
10	100	0.18	0.12
12	144	0.23	0.17
14	196	0.34	0.31

Tabla 4.2.1.4

Resultado en prueba de túnel de viento del prototipo Darrieus

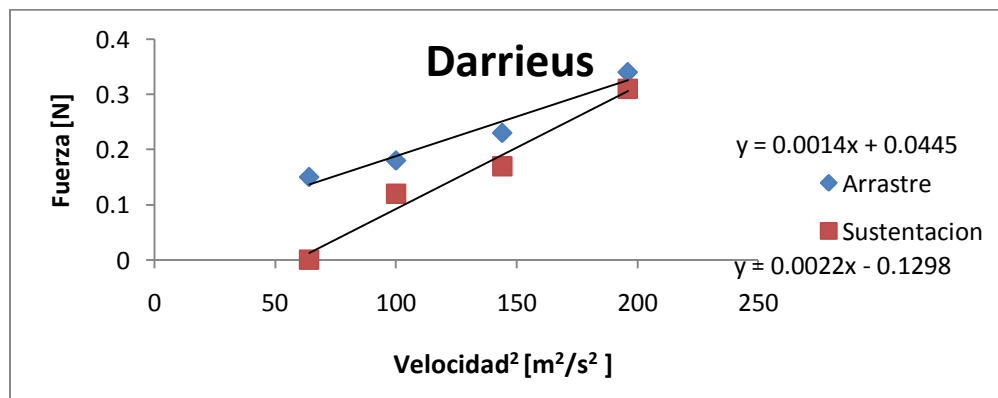


Figura 4.2.1.5

Resultado en prueba de túnel de viento del prototipo Darrieus

Area de barrido(**A**): 0.01404 [m²]

Fuerza de arrastre (D)

Ecuación de la recta: $F_D = 0.0014v^2 - 0.0445$

$$m = \frac{1}{2} \rho A C_D = 0.0014$$

$$\frac{1}{2} \left(1.225 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \right) (0.01404 [m^2]) C_D = 0.0014$$

$$C_D = \frac{0.0014}{\frac{1}{2} \left(1.225 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \right) (0.01404 [m^2])} = 0.1628$$

$$\mathbf{C_D = 0.1628}$$

Fuerza de Sustentación (L)

La ecuación de la regresión lineal es:

$$F_L = 0.0022v^2 - 0.1298$$

$$\mathbf{F_L = \left(\frac{1}{2} \rho A C_L \right) v^2 \dots (4.2)}$$

Usando la misma densidad y la misma area de barrido, tenemos:

$$\frac{1}{2} \left(1.225 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \right) (0.01404 [m^2]) C_D = 0.0022$$

$$C_L = \frac{0.0022}{\frac{1}{2} \left(1.225 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \right) (0.01404 [m^2])} = 0.2558$$

$$\mathbf{C_L = 0.2558}$$

Prototipo 6: Híbrido Darrieus-Savonius

Se esperaba un mejor desempeño en la prueba a velocidad constante sin embargo en esta prueba es notorio que este prototipo no está ejerciendo fuerza de sustentación por lo que la potencia generada no fue la esperada.

Siguiendo nuevamente el mismo protocolo que los anteriores

V [m/s]	V ² [m ² /s ²]	F _D [N]
8	64	0.32
10	100	0.5
12	144	0.8
14	196	1.16

Tabla 4.2.1.5

Resultado en prueba de túnel de viento del prototipo Híbrido Darrieus-Savonius

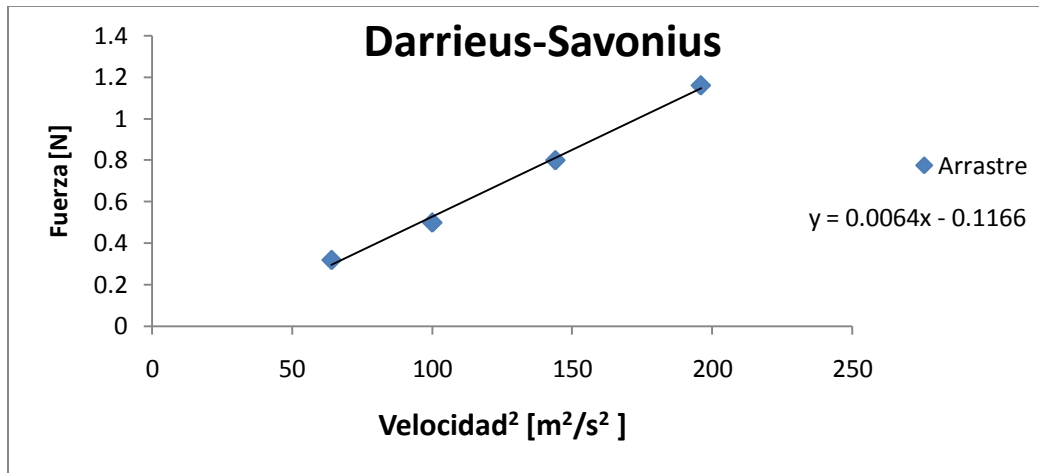


Figura 4.2.1.6

Resultado en prueba de túnel de viento del prototipo Híbrido Darrieus-Savonius

Area de barrido(A): 0.0186 [m²]

Fuerza de Arrastre (D)

Ecuación de la recta: $F_D = 0.0064v^2 - 0.1166$

Usando la ecuación 4.1 obtenemos el coeficiente de arrastre:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho v^2 A C_D \dots (4.1)$$

$$C_D = \frac{0.0064}{\frac{1}{2} \left(1.225 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \right) (0.0186 [\text{m}^2])} = 0.5617$$

$$C_D = 0.5617$$

Finalmente vale la pena enfatizar la importancia del análisis dimensional de los prototipos para lo cual se usa el Teorema de Pi o de Buckingham, el cual dice que:

“Si una ecuación con n variables es dimensionalmente homogénea con respecto a m dimensiones fundamentales, esta se puede expresar como una relación entre un mínimo de n-m grupos a dimensionales independientes” (Duarte 2008)

Así, ahora que tenemos los coeficientes de arrastre y sustentación mediante las ecuaciones 4.1 y 4.2 se puede calcular la fuerza real a la que estaría expuesto un prototipo a escala real o a otras velocidades.

Adicionalmente es necesario efectuar un análisis teórico, adentrándonos más en el comportamiento de cada prototipo y así proponer uno con características más adecuadas.

4.2.2 Análisis Teórico

Es el momento de contrastar los comportamientos que presentaron los aerogeneradores con la teoría. Es por ello que se realizó el cálculo de la potencia del viento que idealmente podrían extraer los aerogeneradores, dadas sus dimensiones.

Se utilizará la ecuación 3.15 que modela la potencia extraída por el aerogenerador:

$$P = \eta_e \eta_m C_p \frac{1}{2} \rho v^3 A \dots (3.15)$$

Si consideramos una eficiencia del 90% y la velocidad de viento de 10 m/s , el área A será la única incógnita de nuestra ecuación, por lo que se calcula a continuación.

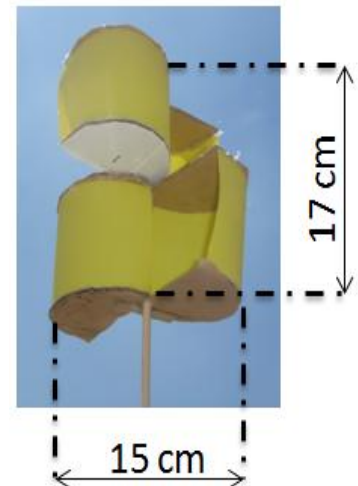
Savonius 2

Área de barrido

$$\begin{aligned} A &= DH \\ A &= (0.15 \text{ m})(0.17 \text{ m}) \\ \mathbf{A} &= \mathbf{0.0255 \text{ m}^2} \end{aligned}$$

Potencia

$$\begin{aligned} P &= C_p \frac{1}{2} \rho v^3 A \\ P &= \frac{1}{2} (0.6) (0.9) \left(1.225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) (0.0255 \text{ m}^2) \left(1 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^3 \\ \mathbf{P} &= \mathbf{8.4341 \text{ W}} \end{aligned}$$



Savonius 1

Área de barrido

$$A = DH$$

$$A = (0.15 \text{ m})(0.15 \text{ m})$$

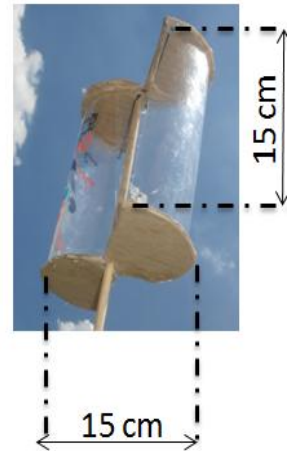
$$A = 0.0225 \text{ m}^2$$

Potencia

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

$$P = \frac{1}{2} (0.6)(0.9) \left(1.225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) (0.0225 \text{ m}^2) \left(1 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^3$$

$$P = 7.44 \text{ W}$$



Híbrido

Área de barrido

$$A_{\text{Savonius}} = DH$$

$$A_{\text{Darrieus}} = 0.65DH$$

$$A = DH + 0.65DH$$

$$A = (0.06 \text{ m})(0.08 \text{ m}) + 0.65(0.16 \text{ m})(0.13 \text{ m})$$

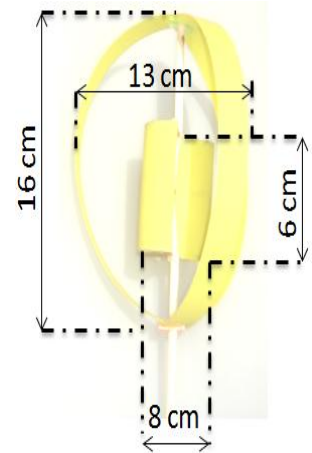
$$A = 0.0136 \text{ m}^2$$

Potencia

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

$$P = \frac{1}{2} (0.6)(0.9) \left(1.225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) (0.0136 \text{ m}^2) \left(10 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^3$$

$$P = 6.06 \text{ W}$$



Delta

Área de barrido

$$A = DH$$

$$A = (0.17 \text{ m})(0.10 \text{ m})$$

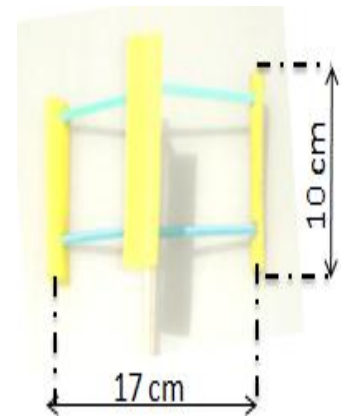
$$A = 0.017 \text{ m}^2$$

Potencia

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

$$P = \frac{1}{2} (0.6)(0.9) \left(1.225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) (0.017 \text{ m}^2) \left(10 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^3$$

$$P = 5.623 \text{ W}$$



Giromill

Área de barrido

$$A = DH$$

$$A = (0.13\text{m})(0.02\text{m})$$

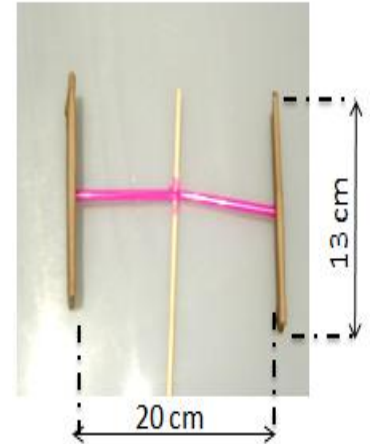
$$A = \mathbf{0.0026\text{ m}^2}$$

Potencia

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

$$P = \frac{1}{2} (0.6)(0.9) \left(1.225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) (0.0026\text{m}^2) \left(10 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^3$$

$$P = \mathbf{0.86\text{ W}}$$

Darrieus

Área de barrido

$$A = 0.65DH$$

$$A = 0.65(0.12\text{m})(0.18\text{m})$$

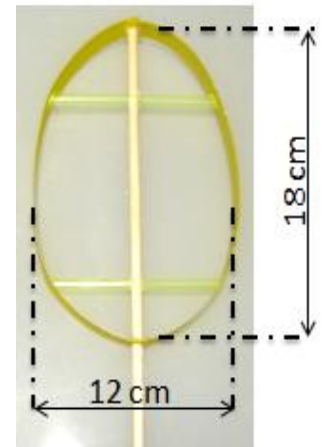
$$A = \mathbf{0.01404\text{ m}^2}$$

Potencia

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

$$P = \frac{1}{2} (0.6)(0.9) \left(1.225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) (0.01404\text{m}^2) \left(10 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^3$$

$$P = \mathbf{4.64\text{ W}}$$



Comparando los resultados teóricos y experimentales se puede destacar que los teóricos son mucho mayores a los experimentales, todo esto debido a pérdidas en la generación.

El parámetro que distingue cada aerogenerador es el área, la cual se relaciona proporcionalmente con la capacidad de generación; esto es, a mayor área se tiene un mayor potencial para extraer energía del viento.

Es importante destacar que el prototipo Savonius 2 tiene la mayor área, por lo que su capacidad de generación es mayor. Esta es la razón por la cual en la sección 4.2.1 este prototipo tuvo resultados notoriamente superiores.

Finalmente los modelos que mayor potencial teórico presentaron fueron el **Savonius 2** y el **Darrieus tipo Delta**, por lo que se detectó un gran potencial en la creación de un híbrido entre estos dos aerogeneradores.

Adicionalmente, presentaron facilidad de arrancar a bajas velocidades de viento, lo cual es muy deseable pues aumenta tiempo en el que podrá estar generando electricidad.

Este híbrido es la propuesta de prototipo resultante del análisis teórico experimental.

En la sección 4.3 se detallan los planos, las ventajas y su potencial implantación a nivel casero.

4.3 Prototipo Híbrido Savonius–Delta

Este prototipo (mostrado en la figura 4.3) tiene como características principales un arranque a bajas velocidades y el uso de la fuerza de sustentación y arrastre para extraer grandes potencias del viento.

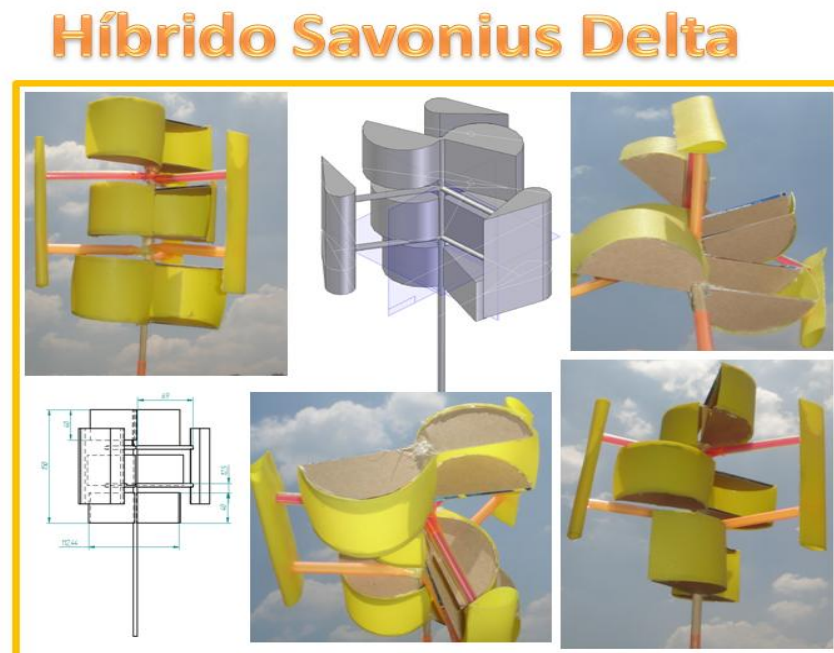


Figura 4.3.1

Aerogenerador Híbrido entre Savonius y Delta

Consta de 3 pares de aerogeneradores Savonius y 3 palas en configuración Delta. Los Savonius favorecen el arranque a bajas velocidades mediante el uso de la fuerza de arrastre. Adicionalmente, los 3 pares de palas están desfasados 30° para maximizar la probabilidad de que el viento impacte perpendicularmente alguna de las palas y este aporte impulsos constantes. Cabe aclarar que nuevamente se cuidó la distancia de las palas al eje para reducir los esfuerzos en las uniones.

La siguiente imagen (Figura 4.3.2) muestra un diagrama de fuerzas presentes en el aerogenerador, la cual explica la relación de las fuerzas de sustentación y de arrastre con el viento en diferentes direcciones.

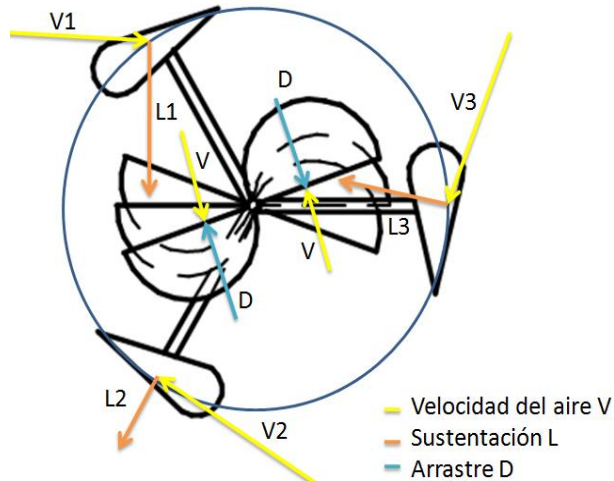


Figura 4.3.2

Diagrama de fuerzas del aerogenerador

Al igual que en los otros modelos se realizó el análisis teórico y experimental, los cuales se presentan a continuación.

Análisis experimental

Prueba1: A velocidad constante

Bajo las mismas condiciones de experimentación se encontró que este modelo generó 0.32 [V] y 0.15 [mA].

Prueba 2: A velocidad angular constante

Se siguió el mismo protocolo en el tunel de viento como se explicó en la sección 4.2.1 y se llegó a los siguientes resultados:

Híbrido			
V_{∞} [m/s]	V_{∞}^2 [m/s]	F_d [N]	F_L [N]
8	64	0.4	0.25
10	100	0.75	0.28
12	144	1.21	0.33
14	196	1.5	0.49

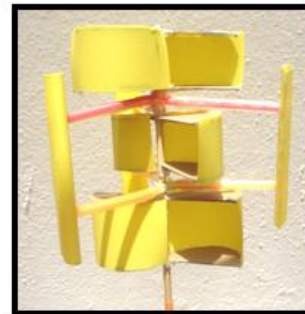


Tabla 4.3.1

Resultado aerogenerador Híbrido

Graficando las fuerzas de sustentación (D) y arrastre (L) contra la velocidad al cuadrado y haciendo una regresión lineal obtenemos la siguiente graficas y ecuaciones:

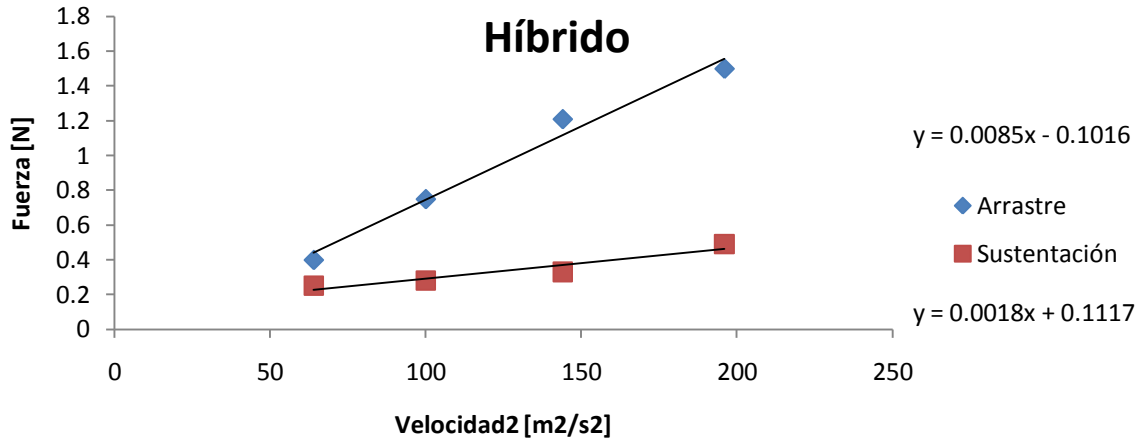


Figura 4.3.3
 Resultado en prueba de túnel de viento del prototipo Híbrido

Fuerza de Arrastre (D)

$$y = 0.0085x - 0.1016$$

$$F_D = 0.0085v^2 - 0.1016$$

Recordando la expresión de la potencia mediante el arrastre:

$$P_D = F_D v \dots (3.16)$$

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

Y despejándola de la formula de la potencia obtenemos la ecuación de la fuerza de arrastre.

$$F_D = \frac{1}{2} \rho v^2 A C_D \dots (3.21)$$

Igualando los términos con la ecuación obtenida de la regresión lineal con los puntos de la prueba en el túnel de viento queda el Coeficiente de arrastre (C_D) como única incógnita y se puede despejar.

$$\frac{1}{2} \rho A C_D v^2 = 0.0085x - 0.1016$$

$$v^2 = x$$

$$m = \frac{1}{2} \rho A C_D = 0.0085$$

Densidad del aire(ρ): $1.225 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ (A presión atmosférica normal y a 15° C)

Area de barrido(A): $0.03 [m^2]$

$$\frac{1}{2} \left(1.225 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \right) (0.03 [m^2]) C_D = 0.0085$$

$$C_D = \frac{0.0085}{\frac{1}{2} \left(1.225 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \right) (0.03 [m^2])} = 0.4626$$

$$C_D = \mathbf{0.4626}$$

El coeficiente de arrastre es una función del número de Reynolds, Re y en este caso es importante para caracterizar cada prototipo.

De la misma manera obtengo el coeficiente de sustentación C_L

Fuerza de Sustentacion (L)

Nuevamente con la ecuacion de la regresion lineal igualamos el valor de la pendiente con la ecuacion de la fuerza de sustentacion.

$$Y = 0.0018x + 0.1117$$

$$F_L = 0.0018v^2 + 0.1117$$

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

$$F_L = \left(C_L \frac{1}{2} \rho A \right) v^2$$

$$m = \frac{1}{2} \rho A C_L = 0.0018$$

Densidad del aire(ρ): $1.225 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ (A presión atmosférica normal y a 15° C)

Area de barrido(A): $0.03 [m^2]$

$$\frac{1}{2} \left(1.225 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \right) (0.03 [m^2]) C_L = 0.0018$$

$$C_L = \frac{0.0018}{\frac{1}{2} \left(1.225 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \right) (0.03 [m^2])} = 0.0980$$

$$C_L = \mathbf{0.0980}$$

Análisis teórico

Área de barrido

$$A = DH + 2(DH)$$

$$A = (0.15\text{m})(0.12\text{m}) + 2(0.06\text{m})(0.10\text{ cm})$$

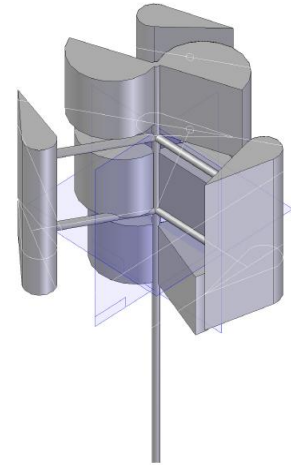
$$A = \mathbf{0.03\text{ m}^2}$$

Potencia

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

$$P = \frac{1}{2} (0.6)(0.9) \left(1.225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) (0.03\text{m}^2) \left(10 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^3$$

$$\mathbf{P = 9.92\text{ [W]}}$$



4.4 Ventajas

Este prototipo presenta un excelente desempeño y tiene características que lo hacen particularmente atractivo para la generación a nivel casero.

Dichas características son:

- Presenta una gama de funcionamiento grande debido a que inicia su funcionamiento a bajas velocidades de viento y continúa generando mediante la fuerza de sustentación para alcanzar altas velocidades, mayores a la del viento.
- Al ser colocado en el techo, alcanza grandes alturas que resultarían costosas de alcanzarse mediante una torre. De esta manera, se tiene acceso a vientos más veloces sin sacrificar recursos.
- Bajo nivel de ruido. A diferencia de los aerogeneradores de eje vertical este diseño es discreto y silencioso.

Pero, ¿es factible colocarlo un aerogenerador como este en una casa?

Tecnológicamente ya es posible. Como se explicara en la sección 4.5 podemos construir este prototipo a un tamaño adecuado para uso casero. Los materiales, el generador y el sistema de almacenaje (batería) ya existen; por lo que tecnológicamente es factible la realización de este proyecto.

Gracias a una batería podemos almacenar en cierto grado la energía que se genere para consumirla posteriormente.

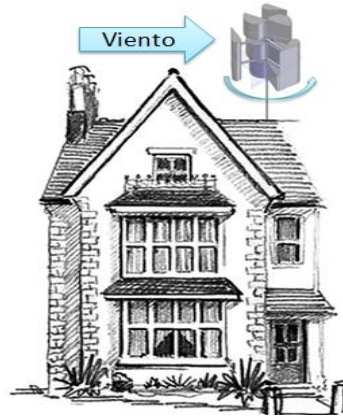


Figura 4.4.1

Instalación de este aerogenerador en una casa

Lo verdaderamente esencial de colocar tecnología de este tipo en el hogar es la actitud de generar mediante fuentes renovables un poco de la energía que se consume, demostrar que existen maneras de satisfacer nuestra demanda manteniéndonos amigables con el medio ambiente y reconocer que es una posibilidad tecnológica barata y muy real.

4.5 Construcción a escala casera

Este diseño puede ser reproducido a gran escala para generar electricidad.

Dependiendo de las características del lugar (tales como espacio, altura y obstáculos cercanos), se determina la cantidad de viento y se escala el prototipo a un aerogenerador más grande o más pequeño.

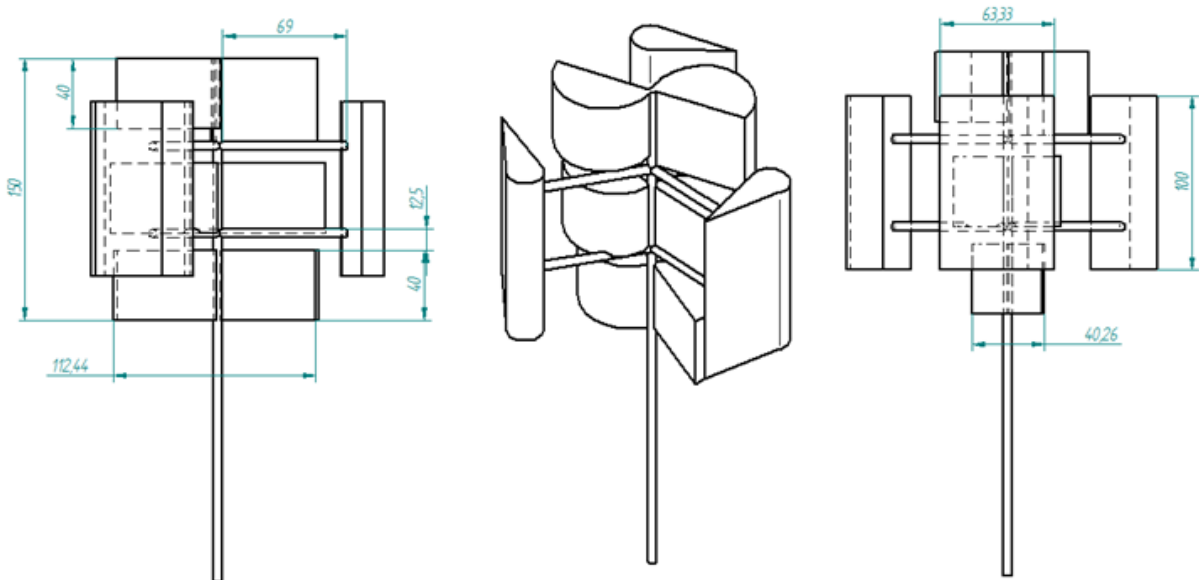


Figura 4.5.1

Aerogenerador Híbrido entre Savonius y Delta

Considerando que se tiene una casa de 2 niveles (aproximadamente 6m de altura) y no hay obstáculos grandes cercanos (como sería un gran edificio) se puede seguir el diseño de la figura 4.5.1 a una escala de 1:5.

Los materiales necesarios para la construcción de los componentes del aerogenerador son:

- **GENERADOR:** Se pretende utilizar un motor de extractor de jugo o, en su defecto, un motor de licuadora que funcionará como generador. Estos motores tienen la característica de tener un bajo torque y un tamaño adecuado para esta aplicación.
- **EJE DE ROTACIÓN:** Tubo de PVC, de esta manera al momento de acoplar las palas con el eje pueden utilizarse las uniones ya estandarizadas para estos materiales. El grosor del tubo dependerá en gran medida del motor seleccionado y muy probablemente se tenga que maquinar una pequeña junta para acoplar el motor con el eje.
- **PALAS SAVONIUS:** Botes, se puede utilizar cualquier bote de plástico que tenga una dimensión proporcional al diseño, con el fin de reutilizar productos y al mismo tiempo reducir el costo del aerogenerador. Los materiales candidatos deben ser ligeros y resistentes a la intemperie (lluvia, sol). Por ejemplo, se pueden usar pequeños tambos, recipientes de comida, cubetas etc.
- **PALAS DELTA:** Se necesitan hacer unas piezas estructurales en forma de gotas que soportarán las láminas para formar la pala. Estas piezas pueden ser de un plástico duro (Por ejemplo el polipropileno PP utilizado para el prototipo). Ya que se tengan estas 9 piezas, se acoplarán 3 de ellas a cada lámina para hacer las 3 palas tipo delta.

Adicionalmente ahí se requiere herramienta para su fabricación como:

- Pegamento de PVC
- Segueta
- Tijeras para el PP
- Pinzas
- Martillo

Con este material se puede construir el aerogenerador acoplado al motor, sin embargo, para poder dejar el sistema conectado a la instalación eléctrica de la casa es necesario un

inversor para lograr convertir de corriente directa a corriente alterna y de ese modo poder utilizar esa electricidad directamente en la casa.

En el caso de generar electricidad cuando no se demande en el sistema, esta se almacenará en una batería. Algunos ejemplos de baterías se muestran en la figura 4.5.2.

En principio, los acumuladores de automóvil son inadecuados para almacenar energía eólica debido a que no están diseñadas para ciclos de carga y descarga tan continuas y profundas. Actualmente en el mercado existen baterías desarrolladas específicamente para aplicaciones de energías renovables (eólica y solar) las cuales soportan más ciclos de carga y descarga. El gran inconveniente con estas baterías es que tienen un costo mayor a la ventaja competitiva que ofrecen (Mypower, 2008).

Así que por practicidad y costos es conveniente usar el acumulador automotriz para este sistema.



Figura 4.5.2
Dispositivos de almacenamiento de Energía

Presupuesto

A continuación se presenta un estimado del costo del proyecto, ya con el sistema de almacenamiento y conexión a la red.

	Cantidad	Precio(\$)
COMPONENTES		
Motor extractor de jugo	1	150
Tubo de PVC	3 m	50
Cubeta	3	100
Lámina de PP	3	60
Uniones	6	180
HERRAMIENTAS		

Pegamento de PVC	1	50
Segueta	1	60
Pinzas	1	30
Martillo	1	30
CONEXIÓN		
Batería (Alternador)	1	1,100
Cables	5 m	100
Inversor	1	100
	TOTAL	\$ 2,100

Tabla 4.4.1
Presupuesto del prototipo

El costo total del proyecto doméstico es aproximadamente de \$2,100.00, esto puede variar dependiendo qué tan creativos seamos para reusar materiales que tengamos en el hogar.

Lo ideal sería que en algún momento esto pudiera ser construido a gran escala, ya que eso abatiría costos de manufactura, aumentaría su calidad y facilitaría mucho la labor para el consumidor, llegando así a muchos más hogares.

Además, como la inversión inicial no es tan grande como para un aerogenerador comercial, este prototipo estándar puede usarse en muchos lugares. Incluso, dependiendo del tamaño de la casa o el edificio, se puede buscar una configuración en serie o paralelo de varios aerogeneradores.

Por el momento la recomendación es hacer un esfuerzo por construir caseramente este tipo de tecnologías para reconocer maneras de enfrentar los graves problemas ambientales de la actualidad, es decir, poner nuestro granito de arena y disfrutar de los beneficios que la generación distribuida nos ofrece.

4.6 Otras aplicaciones

Una gran preocupación es la pobreza. A lo largo del mundo hay millones y millones de personas viviendo sin un techo digno y mucho menos acceso a la electricidad.

Es por esto que existen organizaciones que están haciendo grandes esfuerzos a base de voluntarios para llegar a dichas comunidades y brindarles un sueño, demostrarles que sus vidas pueden cambiar radicalmente con el simple hecho de tener electricidad.

Particularmente hablaré de 2 organizaciones:

1. Light up the world (LUTW)
2. Un techo para mi país (UTPMP)



Figura 4.6.1

ONG dedicadas al desarrollo de comunidades rurales

Light up the World se dedica a la venta de equipos de iluminación altamente subsidiados a familias de escasos recursos en lugares apartados de la red. Estos equipos constan de 2 lámparas de LED alimentadas por un panel fotovoltaico de 5W colocado en el techo de la vivienda y una batería de 12 V.



Figura 4.6.2

Panel solar de Light up the World LUTW

Así como existen sistemas solares se pueden tener sistemas eólicos para respaldar y aumentar la capacidad de generación, permitiendo así más horas de luz u otras aplicaciones como bombeo de agua.

Un Techo para mi País funciona de manera similar pero el propósito es tratar de erradicar la pobreza extrema mediante 2 etapas, la primera es la venta y construcción de una casa de dos aguas o “techo” digno para las familias (De la misma manera está altamente subsidiado), esta casa no cuenta con ningún tipo de servicios, no tiene agua, luz etc.



Figura 4.6.3
Construcciones de Un techo para mi país UTPMP

La segunda etapa consiste en la incorporación a un plan de rehabilitación social en la que se impulsa a las familias a disminuir su situación de vulnerabilidad la cual les impide salir de la extrema pobreza.

Estas familias fácilmente podrían poner el ejemplo con la utilización de energías renovables que les permitirían contar cuando menos con luz en sus hogares. De la misma manera que las familias de LUTW ellos se encuentran muy alejados de la red y es extremadamente costoso e ineficiente buscar conectarlos.

Qué mejor campo de oportunidad para poner el ejemplo que las energías renovables y la generación distribuida. Definitivamente son la alternativa para brindarles a estas familias electricidad.

Capítulo V. Conclusiones y sugerencias

En la realización de esta tesis se cumplieron objetivos de aprendizaje e investigación que la creación de este micro aerogenerador implicaba. La construcción a gran escala, con las pruebas conducentes queda como propuesta para su futura realización, así como la búsqueda de programas sociales que los puedan incorporar a comunidades alejadas de la red eléctrica o con bajos recursos.

La energía es un factor crucial para el desarrollo de una sociedad, porque gracias a ella se pueden realizar actividades más complejas y con esto aumentar la calidad de vida de las personas (salud, mejores alimentos, electricidad, transporte y demás...). Sin embargo con algunas fuentes de energía, por ejemplo los combustibles fósiles, estamos dañando severamente al ambiente al punto que ya se presentan problemas de esta índole global como el Calentamiento Global.

Es por esto que a pesar de que para México los combustibles fósiles representan un gran negocio, es necesario virar a fuentes de energía que provengan de fuentes renovables.

La energía eólica es un ejemplo de este tipo de energías, la cual no contamina y se encuentra en todas partes, por lo que podemos generar la electricidad en el lugar de consumo minimizando así las pérdidas por la distribución.

Para la generación de electricidad mediante el viento se requiere un generador eólico o aerogenerador, el cual convierte la energía cinética del viento en energía mecánica y finalmente en electricidad.

El objetivo de esta tesis fue desarrollar un micro aerogenerador de eje vertical para ser usado principalmente en aplicaciones domésticas, debido a que los generadores de eje vertical presentan ventajas como: una sencilla instalación y mantenimiento, bajos niveles de ruido y simpleza en el diseño para su manufacturación casera.

La potencia que se puede extraer del viento es proporcional al cubo de la velocidad del viento, por lo que colocar un aerogenerador en el techo de una casa donde el viento es más veloz es extremadamente rentable.

Otro parámetro que es determinante para esta potencia es el área del aerogenerador expuesta al viento la cual puede producir fuerzas de arrastre o sustentación.

La geometría de las palas determina el área expuesta al viento y las fuerzas que se generan. Para el diseño de este elemento fue necesario realizar un análisis teórico y experimental debido a que no existe bibliografía del tema.

En los experimentos teóricos las condiciones que se buscaron fueron las siguientes:

- Un arranque sencillo.
- Rotación continua.
- Aprovechamiento de las fuerzas de sustentación y arrastre para maximizar su desempeño.

Estos son los parámetros que se analizan cotidianamente en los aerogeneradores y para los cuales ya existen prototipos muy estudiados, sin embargo, el objetivo de este prototipo fue que bajo una manufactura casera presentara un buen desempeño.

Se construyeron 7 pequeños prototipos a escala 1:5 los cuales se sometieron al análisis experimental que consistió en montarlos a un generador el cual a su vez se conectó a un multímetro y este sistema se puso en funcionamiento con una secadora de cabello a una distancia estándar.

Bajo esta metodología se midieron un voltaje y una corriente, con los cuales se destacan los siguientes resultados:

- Los diseños más sofisticados (Darrieus) no se desempeñaron bien, ya que presentaron grandes problemas para arrancar.
- Los que mejor funcionaron se basan en el arrastre (Savonius) y presentan una gran área de barrido.
- Esto desató problemas como gran peso en punta lo que generó esfuerzos en el acople con el eje.
- Algunos presentaron discontinuidades en el giro ya que por cada ciclo solo se presentaban 2 impulsos.

Por otra parte, la prueba teórica es únicamente un reflejo del área de barrido por lo que los resultados concuerdan con los teóricos, sin embargo, en una magnitud mucho mayor.

El modelo resultante es un híbrido entre Savonius y Darrieus tipo Delta, el cual arranca con facilidad, gira homogéneamente y tiene el peso bien distribuido a lo largo del eje.

Es un proyecto altamente factible, puede generar hasta 10 W con un presupuesto aproximado de \$2,100.00 si se fabrica por el usuario.

Debemos convertirnos en detonadores del cambio, enseñar con el ejemplo que obtener energía con fuentes renovables es posible, que cuidar el ambiente para generaciones futuras también lo es y que México tiene la capacidad para evolucionar a estas tecnologías. No hay que tener miedo al cambio, debemos salir de nuestra zona de confort

e intentar aplicar este proyecto que aunque tiene una gran área de mejora nos presenta enormes beneficios educativos y ambientales.

El viento está a disposición de todos esperando a ser utilizado, todo depende de las personas que si se comprometen con proyectos como este se puede llegar a generar un cambio social enorme.

Proyectos como este de generación distribuida pueden cambiar radicalmente la vida a las personas que se encuentran alejadas de la red eléctrica a generar su energía, por que donde no hay electricidad hay mas viento debido a que existen menos obstáculos.

Se sugiere se investigue más a detalle la posibilidad de incorporar este proyecto a comunidades rurales donde no se cuenta con electricidad, se logren alianzas con asociaciones civiles como UN TECHO PARA MI PAIS y LIGTH UP THE WORLD , y finalmente se pueda ayudar a muchas familias en zonas rurales.

Pero no hay que esperar estar en una situación precaria para instalar un aerogenerador, lo importante es hacer conciencia y tomar iniciativa en acciones para combatir el cambio climático, pues favorecen la reducción de gases de efecto invernadero mediante la producción de energías limpias la cual también minimiza las pérdidas en el transporte.

Seamos valientes e instalemos aerogeneradores en nuestras casas para disfrutar los beneficios que la energía renovable y la generación distribuida tienen para nosotros.

Este proyecto es muy real muy factible y solo falta que lo convirtamos en una realidad.

REFERENCIAS

Balance Nacional de Energía 2007. SENER Secretaria de Energía. México

Blanco, Fernando. 2004 .<<http://centros5.pntic.mec.es/ies.victoria.kent/Rincon-C/Curiosid/rc-74/rc-74.htm>>.

Broadstar Wind System.

<http://www.broadstarwindsystems.com/products_aerocams.php>

CONAE Comisión Nacional de Ahorro de Energía.

<<http://www.conae.gob.mx/work/sites/CONAE/resources/LocalContent/4830/2/semblanza.pdf>>

Duarte, Arturo. 2008. *"Hidráulica General"* Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia.

Erenovable 2007.Martin <<http://erenovable.com/2007/04/30/utilizando-el-espacio-sobre-las-autopistas-para-generar-energia-eolica/>>

Eggleston. Eric .AWEA Staff <<http://www.awea.org/faq/vawt.html>>

Ever Wind Power Corporation < <http://www.everwindpower.com/>>

Farret Felix. Simoes Godoy.2006. "Integration of alternative sources of energy" Wiley-IEEE Press

Gipe, Paul. 2004. *"Wind Power"*.

HelixWind. <<http://www.helixwind.com/en/>>

Hau. Erich. 2006. "Wind turbines: Fundamentals, Technologies, Applications, Economy"

INEGI Instituto Nacional de Estadística y Geografía.2006. Cuéntame. <http://cuentame.inegi.gob.mx/economia/petroleo/>

Instruatables <<http://www.instruatables.com/id/Cardboard-Savonius-turbine/>>

Ristinen. Robert , Jack J. Kraushaar.2006. "Energy and the Environment"

Sathayajith. Mathew.2006 "Wind Energy: Fundamentals, resources analysis and Economics" Srpinger

SIE Sistema de Información Energética. Balance Nacional de Energía 2007.
<<http://sie.energia.gob.mx/sie/bdiController>>

Smith, Tylor. 2008. "Renewable and Alternative Energy"

Smil Vaclav. 2005. ENERGY IN THE TWENTIETH CENTURY: Resources, Conversions, Costs, Uses, and Consequences

Rosenberg. Paul 1993 "Alternative Energy Handbook" Prentice Hall