



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE ELECTROTECNIA Y COMPUTACIÓN
DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA**

Tesis Monográfica para optar al de Ingeniero Eléctrico

Título:

“Estudio Comparativo de Aerogeneradores Eólicos de eje vertical y de eje horizontal”

Autor:

- **Br. Marcos Aurelio De Jesús Canizales Reyes. 2014 - 0223U**
- **Br. Josué Nahum Tercero Gutiérrez. 2014 – 0748U**

Tutor:

- **Msc. Sandro Yohasner Chavarría Condega.**

Managua – Nicaragua, 25 septiembre del 2020.

Dedicatoria

El presente trabajo monográficos es dedicado a nuestros padres y familiares que nos mostraron su cariño y apoyo incondicional durante este proceso de formación de manera espontánea y desinteresada; gracias por sus esfuerzos, hoy estamos viendo los frutos.

No queremos excluir de este agradecimiento especial a nuestro tutor y los profesores que con su permanente esfuerzo nos formaron para que seamos ciudadanos útiles a nuestras familias y la sociedad.

Resumen

El calentamiento global está afectando el funcionamiento natural del planeta por el alto consumo de combustible fósil, el cual es un indicativo para buscar alternativas que le permitan recuperarse y nosotros no nos veamos afectados por los cambios bruscos que se dan en este proceso.

La energía cinética de las masas de aire que es convertida en electricidad; esto se debe al movimiento de las masas de aire que se desplazan de zona de alta presión atmosférica hacia zona adyacentes de menor presión; por lo tanto, la energía eólica es un recurso abundante, renovable y limpio.

El presente trabajo monográfico consiste en el estudio comparativo de aerogeneradores de eje horizontal y de eje vertical, previendo que en el futuro será necesario el uso de energía limpia y accesible tanto para población como la industria, con este fin determinaremos cuál de los dos tipos de aerogeneradores resulta más conveniente para ser instalado tanto en zona urbana como rurales.

En el marco teórico, se define los conceptos básicos, los tipos de aerogeneradores eólicos, sus ventajas y desventajas. Para realizar las pruebas correspondientes se utilizará el módulo eólico LeXsolar – Wind Professional, el cual se encuentra disponibles en el laboratorio de energías renovables de la facultad de electrotecnia y computación.

En la metodología se empleará el método comparativo, haremos un análisis de aerogeneradores eólicos usando el kit de entrenamiento donde mediremos la velocidad del viento, ángulo de posicionamiento de las aspas, resistencia en base de esto dato haremos una comparación y para el resultado usaremos un instrumento de datos. Para finalizar determinaremos según nuestro análisis cuál de los dos tipos de aerogeneradores sería más conveniente instalar en las dos diferentes zonas.

Índice

I.	Introducción	1
II.	Antecedentes	2
III.	Objetivos	4
3.1	Objetivo General.....	4
3.2	Objetivos Específicos	4
IV.	Justificación.....	5
V.	Generalidades.....	6
5.1	Generación Eólica.....	6
5.2	Que es el viento	6
5.3	El generador eléctrico	6
5.4	Aerogenerador Eólico.....	6
5.5	Tipos de Aerogeneradores	6
5.5.1	Aerogenerador de eje horizontal.	7
5.5.1.1	Usos de los aerogeneradores	7
5.5.1.2	Clasificación de potencias de los aerogeneradores.	7
5.5.1.3	Tipos de aerogenerador de eje horizontal.	9
5.5.1.4	Ventajas y desventajas de los aerogeneradores de eje horizontal.	11
5.5.1.5	Tipos de turbinas de un aerogenerador.	12
5.5.1.6	Orientación de las aspas frente al viento.	14
5.5.2	Aerogenerador de eje vertical.	15
5.5.2.1	Tipos de aerogeneradores de eje vertical.	15
5.5.2.2	Ventajas del aerogenerador de eje vertical.....	17
5.5.2.3	Desventajas del aerogenerador de eje vertical.	17
5.6	Componentes de un aerogenerador.....	18
5.6.1	Góndola	18
5.6.2	Torres	19
5.6.3	Cimentación	21
5.7	Aerodinámica de un aerogenerador.....	22
5.7.1	Que es lo que hace que rotor gire.....	22
5.7.2	Sustentación	22
5.7.3	Perdida de sustentación	23

5.7.4	Resistencia aerodinámica	24
5.7.5	Aerodinámica del rotor.....	25
5.7.6	Por qué están torsionadas las palas del rotor.....	26
5.7.7	Variaciones en la velocidad del viento: efecto del ángulo de ataque.....	26
5.7.8	Dirección de sustentación, perfil y material de las palas	27
5.7.9	Control de potencia en los aerogeneradores.....	29
5.8	Aerogeneradores especiales de eje horizontal y de eje vertical.....	32
5.8.1	Aerogenerador Vortex.....	32
5.8.2	Aerogenerador Sheer-Wind.....	32
5.8.3	Aerogenerador Wind-Tree	33
5.8.4	Aerogenerador Liam F1	33
5.8.5	Aerogenerador COWM.....	34
VI.	Medición De Viento	35
VII.	Módulo Lexsolar-Wind Professional	35
7.1	Limitaciones del módulo Lexsolar – Wind Professional.....	38
VIII.	Eficiencia de un aerogenerador eólico.	40
8.1	Distribución de Weibull.....	40
8.2	La ley de Betz	40
8.3	El frenado ideal del viento.....	40
8.4	Función de densidad de potencia.....	42
8.5	Curva de potencia de un aerogenerador	42
8.6	Incertidumbre en mediciones de curvas de potencias	43
8.7	Verificación de las curvas de potencias.....	44
8.8	Riesgos en el uso de las curvas de potencias.....	44
8.9	Coeficiente de potencia	44
8.10	Una mayor eficiencia técnica no es necesariamente el camino a seguir	45
IX.	Metodología	46
X.	Desarrollos de Experimentos	48
10.1	Influencia de la variación del viento en velocidad y ángulo de posicionamiento de las aspas, sobre la tensión de salida de los generadores.....	48
10.1.1	Medición de la variación del viento en aerogeneradores.	48
10.1.2	Como afecta la variación del viento y el ángulo de posicionamiento de las aspas a la tensión de salida.	48

10.1.3	Observaciones del experimento	50
10.2	Comportamiento de las turbinas bajo carga con velocidad del viento constante.	51
10.2.1	Generador Sincrónico bajo carga.	51
10.2.2	Observaciones del experimento	52
10.3	Eficiencia de la turbina con carga constante y variación del viento.....	53
10.3.1	Generador Sincrónico.....	53
10.3.2	Observaciones del experimento	55
XI.	Conclusiones	56
XII.	Bibliografía.....	57
XIII.	Anexos.....	59
13.1	Instrumento de Datos.....	59
13.2	Módulo Lex-Solar Wind Professional.....	62

Índices de Figuras y Graficas

Figura 1. Diámetro de los aerogeneradores.....	9
Figura 2. Aerogenerador de 1 aspa.....	10
Figura 3. Aerogenerador de 2 aspa.....	10
Figura 4. Aerogenerador de 3 aspa.....	11
Figura 5. Aerogenerador multipala	11
Figura 6. Turbinas rápidas.....	13
Figura 7. Turbinas lentas	13
Figura 8. Rotores Sotavento y Barlovento	14
Figura 9. Aerogenerador Savonius.....	15
Figura 10. Aerogenerador Darrieus.....	16
Figura 11. Aerogenerador Giromil.....	16
Figura 12. Aerogenerador Windside	17
Figura13. Componentes de un aerogenerador.....	18
Figura 14. Torres en celosía	20
Figura 15. Torres tubulares	20
Figura 16. Torres de hormigón.....	21
Figura 17. Zapata de hormigón	21
Figura 18. Sustentación	23
Figura 19. Perdida de sustentación.....	24
Figura 20. Resistencia aerodinámica.....	24
Figura 21. Vista lateral y delantera de la turbina	25
Figura 22. Pala de un aerogenerador	27
Figura 23. Angulo de ataque de un aspa	27
Figura 24. Dirección de la sustentación	28
Figura 25. Aerogenerador vortex	32
Figura 26. Aerogenerador Sheer-wind	33
Figura 27. Aerogenerador Wind - tree	33
Figura 28. Aerogenerador Liam F1	34
Figura 29. Aerogenerador COWM.....	34
Figura 30. Componentes del módulo Lexsolar – Wind Professional (1).....	35

Figura 31. Componentes del módulo Lexsolar – Wind Professional (2).....	37
Figura 32. Componentes del módulo Lexsolar – Wind Professional (3).....	37
Figura 33. Frenado del viento	41
Figura 34. Coeficiente de potencia en función de la velocidad especifica	41
Ecuación 1. Potencial eólico	42
Gráficas 1. Curva de potencia de un aerogenerador de 600 kW	43
Ecuación 2. Coeficiente de Potencia	44
Gráficas 2. Velocidad del Viento vs Voltaje Generado (Eje Horizontal)	49
Gráficas 3. Velocidad del Viento vs Voltaje Generado (Eje Vertical)	49
Gráficas 4. Viento Constante vs Cargas Variables (Eje Horizontal)	51
Gráficas 5. Viento Constante vs Cargas Variables (Eje Vertical).....	52
Gráficas 6. Viento Variable Vs Voltaje Generado con carga de 25 Ω (Eje Horizontal).....	53
Gráficas 7. Viento Variable Vs Corriente Generada con carga de 25 Ω (Eje Horizontal).....	54
Gráficas 8. Viento Variable Vs Voltaje Generado con carga de 25 Ω (Eje Vertical).....	54
Gráficas 9. Viento Variable Vs Corriente Generada con carga de 25 Ω (Eje Vertical).....	55
Figura 35. Tablas de datos Velocidad vs Voltaje Generado	59
Figura 36. Tablas de datos Viento Constante vs Carga Variable.....	60
Figura 37. Tablas de datos Viento Constante vs Carga Variable.....	61
Figura 38. Turbina de eje horizontal	62
Figura 39. Turbina de eje vertical	62
Figura 40. Turbina de eje vertical con cargas resistiva (1)	63
Figura 41. Turbina de eje vertical con cargas resistiva (2)	63
Figura 42. Turbinas de eje horizontal con cargas resistiva (1).....	64
Figura 43. Turbina de eje horizontal con cargas resistivas (2).....	64
Figura 44. Tabla Comparativa entre Aerogeneradores de eje horizontal y de eje vertical	65
Figura 45. Tabla de Limitaciones del Kit Eólico Lex- Solar Wind Professional.....	65

Estudio Comparativo de Aerogeneradores Eólicos de eje vertical y de eje horizontal.

I. Introducción

La Generación de energía, es necesaria para el crecimiento de la economía y el desarrollo tecnológico mundial, esto exige un constante uso de energía, ante esta necesidad debemos pensar en la protección de los diferentes ecosistemas, necesitamos energías renovables, limpias y que garantice el desarrollo de la economía y no aumentar el calentamiento global.

Pensando en el cumplimiento de estos objetivos, realizaremos un estudio comparativo de aerogeneradores eólicos de eje horizontal y de eje vertical, ofreciendo alternativas tanto al área urbana y rural utilizando generadores de energía, de baja o alta potencia. Esto ofrece dos alternativas que beneficiarían a diferentes sectores poblacionales, también tendríamos un efecto positivo en la economía y el medio ambiente.

Este estudio se realizará para determinar la eficiencia eléctrica de los aerogeneradores eólico de eje horizontal y de eje vertical, con el fin de decidir cuál de los dos tipos resulta más conveniente en el área a utilizar; los resultados de las pruebas comparativas, se obtendrán utilizando el instrumento de recolección de datos, el kit de entrenamiento Lexsolar -Wind Professional, que al ser equipos a baja escala tienen algunas limitaciones.

Nuestras conclusiones los obtendremos realizando pruebas comparativas usando el kit de entrenamiento Lexsolar - Wind Profesional, cabe señalar que los datos son a escala.

En el resto del presente documento se describen los antecedentes, justificación y objetivos del estudio, así como la fundamentación teórica, diseño metodológico y planificación que se establecen el marco de referencia y el proceso metodológico que se siguió para llevarse a cabo.

Estudio Comparativo de Aerogeneradores Eólicos de eje vertical y de eje horizontal.

II. Antecedentes

Una de las primeras máquinas que aprovechaban la energía del viento para realizar un trabajo es el molino de viento; en Europa los primeros molinos aparecieron en el siglo XII en Francia e Inglaterra y luego se expandieron por todo el continente, eran unas estructuras de madera, conocidas como torres de molino, que se hacían girar a mano alrededor de un poste central para levantar sus aspas al viento, en la parte superior del molino sobresalía un eje horizontal, de este eje partían cuatro aspas, con una longitud entre 3 y 9 metros, el marco de madera se cubrían con telas o planchas de madera. En Estados Unidos, se desarrolló el molino de bombeo, reconocible por sus múltiples velas metálicas, fue el factor determinante que permitió el desarrollo de la agricultura y la ganadería en varias zonas con fácil acceso al agua.

Con el propósito de mejorar las condiciones ambientales de nuestras ciudades y el planeta se ha estado utilizando la generación de energía hídrica, geotérmica, solar y eólica, pero se necesita mayor generación de energía limpia para evitar el alto consumo de combustible fósil, que nos lleva al calentamiento global y al pago de una energía de alto costo, lo cual afecta la economía de instituciones públicas e industriales y de la población en general.

La energía eólica instalada en el mundo creció un 9,6% en 2018, hasta situarse en 591,000 MW, según datos del Global Wind Energy Council (GWEC). China, Estados Unidos, Alemania, India y España son los primeros productores mundiales y son países altamente desarrollados a nivel industrial. (Eolica, 2018)

En Nicaragua las turbinas más conocidas son las de eje horizontal, para su utilización se debe respetar la regulación que no permite la contaminación acústica y visual, estas no son viables en las ciudades porque los edificios son obstáculos y generan turbulencias, por lo que se instala en zonas rurales; actualmente se están creando turbinas verticales que son funcionales en la zona urbana, ya que funcionan con baja velocidad del viento, no tiene contaminación acústica y es omnidireccional.

En la Universidad Nacional de Ingeniería se han desarrollado proyectos y estudios relacionados al uso de la energía eólica para la generación de energía eléctrica, cuyos nombres son: “Diseño de un

Estudio Comparativo de Aerogeneradores Eólicos de eje vertical y de eje horizontal.

generador eólico de eje vertical para suministro eléctrico domiciliario“ en el 2012 e “Implementar y demostrar la construcción de generador eólico de eje horizontal, artesanal a pequeña escala, para fomentar el uso de energías renovables en nuestro país” en el 2014, los cuales no han servido como fuente de información para nuestro estudio. (Machado & Jarquin, 2014) (Maradiaga & Rocha, 2012)

Estudio Comparativo de Aerogeneradores Eólicos de eje vertical y de eje horizontal.

III. Objetivos

3.1 Objetivo General

- Realizar un estudio comparativo de la eficiencia entre los aerogeneradores eólicos de eje vertical y eje horizontal.

3.2 Objetivos Específicos

- Estudiar las características de cada tipo de aerogenerador eólico.
- Establecer pruebas comparativas a escala de los aerogeneradores de ejes verticales y de eje horizontales haciendo uso del módulo Lexsolar Wind Profesional.
- Determinar la eficiencia de los aerogeneradores eólicos.

Estudio Comparativo de Aerogeneradores Eólicos de eje vertical y de eje horizontal.

IV. Justificación

Nicaragua tiene una posición geográfica que propicia el aprovechamiento de las corrientes de viento, nuestro país pasa la mayor parte del tiempo bajo la influencia de los vientos alisios que provienen de los anticiclones subtropicales, debido a su posición astronómica éstos son vientos constantes, cálidos y húmedos. También cuenta con dos grandes lagos: Cocibolca 8,624 km² y Xolotlán 1,049 km² que garantiza el desplazamiento de las corrientes de viento; lo cual beneficia el uso de aerogeneradores para producir energía eólica, es una energía limpia, no perjudica el medio ambiente y más barata.

Nuestro trabajo está basado en el estudio comparativo de los tipos de turbinas eólicas, previendo que en el futuro será necesario el uso de energía limpia y accesible tanto para la población como la industria; con este fin determinaremos cuál de los dos tipos de aerogeneradores resulta más conveniente para ser instalado tanto en zonas urbanas como rurales.

Los aerogeneradores, tanto de eje horizontal como los de eje vertical presentan características propias y las cuales tiene efectos al producir la energía eléctrica; las turbinas horizontales necesitan vientos de mucha velocidad, estos son utilizados para generar grandes cantidades de energía; mientras que las turbinas verticales prácticamente trabajan con condiciones mínimas de viento, pero esto limita su capacidad de generar energía eléctrica. Para realizar este estudio nos apoyaremos con un kit de entrenamiento LeXsolar Wind Professional, que nos permita una justificación real y objetiva de nuestro planteamiento.

Estudio Comparativo de Aerogeneradores Eólicos de eje vertical y de eje horizontal.

V. Generalidades

5.1 Generación Eólica

La energía eólica es el aprovechamiento de la energía cinética de las masas de aire que puede convertirse en energía mecánica, la energía del viento es estable y predecible a escala anual, tiene muy pocas variaciones. (Alvarez, 2006)

En la actualidad, la energía eólica se utiliza principalmente para producir electricidad, es una ventaja para los parques eólicos que son una fuente de energía cada vez más barata y competitiva; además se puede proporcionar electricidad en regiones aisladas que no tienen acceso a la red eléctrica nacional.

5.2 Que es el viento

El viento es el movimiento del aire desde un área de alta presión a un área de baja presión. De hecho, el viento existe porque el sol calienta irregularmente la superficie de la tierra, conforme sube el aire caliente, el aire más frío se mueve para rellenar el vacío. (Geographic, 2010)

5.3 El generador eléctrico

Un generador es una máquina eléctrica rotativa que transforma energía mecánica en energía eléctrica. Lo consigue gracias a la interacción de sus componentes principales: el rotor (parte giratoria) y el estator (parte estática). Cuando un generador eléctrico está en funcionamiento, el rotor crea un campo magnético (actúa como inductor) y el estator donde se encuentra el bobinado que crea la corriente eléctrica que se aprovecha (actúa como inducido). (ENDESA)

5.4 Aerogenerador Eólico

Un aerogenerador, es un generador eléctrico que convierte la energía cinética del viento en energía mecánica, que se convertirá en energía eléctrica. (IngeOexpert, 2019.)

5.5 Tipos de Aerogeneradores

Las turbinas de viento se pueden separar en dos tipos básicos determinados por el eje en el que giran. Las turbinas de viento que giran alrededor de un eje horizontal son las más comunes (como

Estudio Comparativo de Aerogeneradores Eólicos de eje vertical y de eje horizontal.

un molino de viento), mientras que las turbinas eólicas de eje vertical se utilizan con menos frecuencia (Savonius y Darrieus). (Turcan, 2015)

Existen dos tipos de aerogeneradores de eje vertical y horizontal:

5.5.1 Aerogenerador de eje horizontal.

La hélice del rotor de estos tipos de aerogeneradores está montada sobre un eje horizontal, que, mediante algunos dispositivos electrónicos o colas, se orienta en la dirección del viento. Estos tipos de aerogeneradores se instalan en espacios abiertos, en sitios donde no hay obstáculos y con flujos de viento suaves. (Eolico)

Existen diferentes tipos de aerogeneradores de eje horizontal. Para clasificarlo se utilizan los siguientes criterios:

- Usos de los aerogeneradores.
- Clasificación de potencias de los aerogeneradores.
- Tipo de aerogeneradores de eje horizontal.
- Ventajas y desventajas de los aerogeneradores de eje horizontal.
- Tipos de turbinas de los aerogeneradores.
- Orientación de las aspas frente al viento.

5.5.1.1 Usos de los aerogeneradores

Para utilizar las maquinas eólicas se tiene que tener en cuenta el tipo de trabajo que se va a realizar con ella. Este trabajo puede ser bombeo de agua, generación de energía eléctrica y molino de granos. (Roman, 2012)

5.5.1.2 Clasificación de potencias de los aerogeneradores.

- Microturbinas (<3kW)

Suelen ser utilizadas en sistemas aislados para generar electricidad que posteriormente servirá para cargar unas baterías de almacenamiento. El generador eléctrico

Estudio Comparativo de Aerogeneradores Eólicos de eje vertical y de eje horizontal.

que normalmente utilizan es de imanes permanentes, y no suelen contar con caja multiplicadora entre el eje del rotor del aerogenerador y el generador eléctrico.

Habitualmente se trata de máquinas de eje horizontal con tres palas y diámetros pequeños (entre 1 y 5 metros) que trabajan a velocidades de rotación elevadas y generalmente variables. La electricidad que producen está en forma de corriente alterna de frecuencia variable, por lo que ésta es rectificadora, almacenada en baterías y posteriormente se convierte de nuevo en alterna, pero de frecuencia constante mediante un inversor. Finalmente un transformador es el que se encarga de subir la tensión a la que requiera el servicio. Ejemplo: Máquinas eólicas que se encargan de accionar bombas hidráulicas para la extracción de agua de los pozos. (Roman, 2012)

➤ Pequeños aerogeneradores (<50kW)

También suelen ser utilizados en sistemas aislados para generar electricidad que posteriormente servirá para cargar unas baterías de almacenamiento, es decir, cubren una demanda similar a la del grupo anterior, pero teniendo una mayor potencia. Además, también suelen utilizarse para formar sistemas híbridos, es decir, sistemas que combinan la energía eólica con otro tipo de energía como puede ser solar, hidráulica, diésel.

Si la potencia es hasta 10kW el tipo de generador eléctrico sigue siendo de imanes permanentes y sin hacer uso de caja multiplicadora. Sin embargo, para una gama de potencias más alta se introducen cajas de engranajes entre el eje del rotor y el del generador, ya que el generador eléctrico funciona a unas velocidades mucho mayores que las del rotor del aerogenerador. Ejemplo: Máquinas eólicas que se encargan de la iluminación de granjas de animales. (Roman, 2012)

➤ Grandes aerogeneradores (<850kW)

En este caso, la producción de electricidad ya se inyecta a la red. Suelen ser aerogeneradores rápidos de eje horizontal que cuentan normalmente con tres palas. Sus potencias suelen estar comprendidas entre 200 y 850 kW y sus diámetros entre 25 y 55 metros. Cuentan con cajas de engranajes para aumentar la velocidad y así poder accionar el

Estudio Comparativo de Aerogeneradores Eólicos de eje vertical y de eje horizontal.

generador eléctrico y sus palas suelen contar con un sistema de regulación (ya sea activo o pasivo) mediante el que se controla la potencia del rotor en función de la velocidad del viento. Ejemplo: Parques eólicos cuando éstos se encuentran en terrenos complejos. (Roman, 2012)

➤ Aerogeneradores multimegawat (1-3MW)

La electricidad que producen también se inyecta a la red. Son similares a los anteriores en cuanto a cajas de engranajes y sistemas de regulación, sin embargo, sus diámetros son mucho mayores (entre 50 y 90 metros) y su altura suele estar entre 60 y 100 metros. Ejemplo: parques eólicos offshore. (Roman, 2012)

Evolución del tamaño de los aerogeneradores

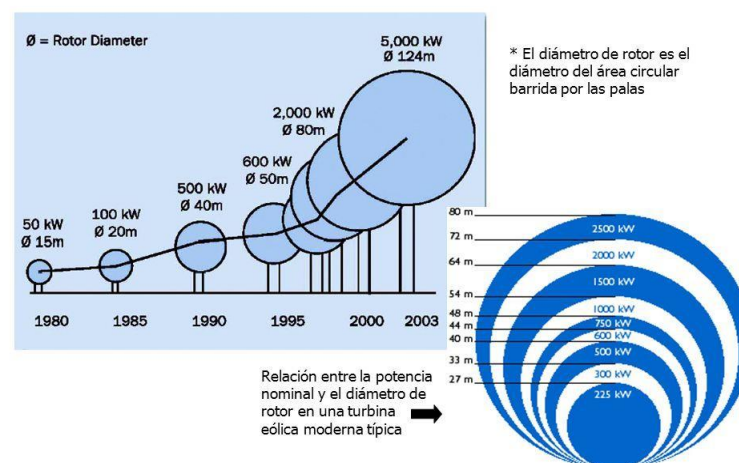


Figura 1. Diámetro de los aerogeneradores

5.5.1.3 Tipos de aerogenerador de eje horizontal.

Se puede distinguir 4 tipos de aerogeneradores principales, la diferencia entre estos son la forma del rotor, y la forma de las alas. (Eólico)

- Aerogenerador monopala (1 Aspa): Los aerogeneradores monopala requieren una mayor velocidad de giro para producir energía. Esto un inconveniente, porque el diseño de estos tipos de aerogeneradores es complejo, además de crear desventajas en lo que respecta al ruido como al aspecto visual. Al tener una sola pala, necesitan de un contrapeso en el lado del buje opuesto a la pala que equilibre el rotor.

Estudio Comparativo de Aerogeneradores Eólicos de eje vertical y de eje horizontal.



Figura 2. Aerogenerador de 1 aspa

- b) Aerogenerador bipala (2 Aspa): Los aerogeneradores bipala tienen la ventaja de ahorrar el coste de una pala y, por su puesto, su peso. Sin embargo, suelen tener dificultades para penetrar en el mercado, en parte porque necesitan una mayor velocidad de giro para producir energía. Esto supone una desventaja tanto en lo que respecta al ruido como al aspecto visual.



Figura 3. Aerogenerador de 2 aspa

Tanto el rotor monopala como el bipala, necesitan disponer de un buje oscilante, es decir, capaz de inclinarse, con el objetivo de evitar sacudidas en la turbina cada vez que las palas pasan por la torre.

- c) Aerogenerador tripala (3 Aspa): La mayoría de aerogeneradores modernos tienen diseños tripala, con el rotor a barlovento (en la cara de la torre que da al viento), usando motores eléctricos con mecanismo de orientación. Otra de las características es el uso de un generador síncrono. Este tipo de aerogenerador es más se usa mundialmente.

Estudio Comparativo de Aerogeneradores Eólicos de eje vertical y de eje horizontal.



Figura 4. Aerogenerador de 3 aspa

- d) Aerogenerador multipala (6 – 24 Aspa): Suele disponer de un numero de pala de 6 y 24, pueden trabajar con velocidades de viento lento y que tiene un excelente desempeño con altos vientos con un sistema de protección. Son utilizado generalmente para bombear agua o para producir electricidad a escala doméstica. Como generan poca potencia, nos son eficientes para grandes instalaciones.



Figura 5. Aerogenerador multipala

5.5.1.4 Ventajas y desventajas de los aerogeneradores de eje horizontal.

Ventajas del aerogenerador de eje horizontal.

- Son altamente eficientes porque aprovecha la gran corriente de viento.

Estudio Comparativo de Aerogeneradores Eólicos de eje vertical y de eje horizontal.

- Los aerogeneradores de eje horizontal presentan una velocidad de giro mayor que las de eje vertical, por lo que son más adecuadas para el accionamiento de generadores eléctricos que giran a 100 o 1500 rpm.
- Los aerogeneradores de eje horizontal permiten barrer mayores superficies que las de eje vertical, por lo que alcanzan potencias muchos mayores.
- Los aerogeneradores de eje horizontal aprovechan el efecto beneficioso del aumento de la velocidad del viento con la altura respecto al suelo, la configuración de las de eje vertical impiden alcanzar alturas elevadas y por lo tanto no puede aprovechar este efecto.

Desventajas del aerogenerador de eje horizontal.

- Estos aparatos no funcionan bien con vientos débiles y no generan mucha energía si los vientos cambian de dirección con frecuencia.
- Hay que tener en cuenta que su instalación se debe hacer en áreas abiertas y sin obstáculos.
- Requiere de una construcción sólida de la torre para soportar el peso de la góndola.

5.5.1.5 Tipos de turbinas de un aerogenerador.

- Turbinas eólicas rápidas

En este caso, el número de palas suele ser pequeño y como su potencia por unidad de peso es mayor y además son más ligeros, se pueden construir con radios mucho mayores y situar el buje a alturas también mayores, aprovechando de esta forma el aumento de la velocidad del viento con la altura. Actualmente se construyen rotores de hasta 90 metros de diámetro, alcanzando su potencia nominal los 300kW.

Requieren mayores velocidades de viento para su arranque que las eólicas lentas (necesitan 4-5m/s frente a los 2-3m/s que necesitan las lentas), alcanzan su potencia nominal a velocidades de viento entre 12 y 15 m/s y a partir de 25-30m/s se produce la parada del rotor para evitar daños en la máquina. El valor máximo del coeficiente de potencia C_p está en torno al 0,4 y se da para valores de velocidad específica entre 7 y 10 m/s (valores mayores que en el caso de las eólicas lentas).

Estudio Comparativo de Aerogeneradores Eólicos de eje vertical y de eje horizontal.

Además, como tienen un menor número de palas, es más fácil incorporar mecanismos de control de variación de ángulos de ataque con respecto a la dirección del viento, para así proteger mejor el equipo. (Roman, 2012)

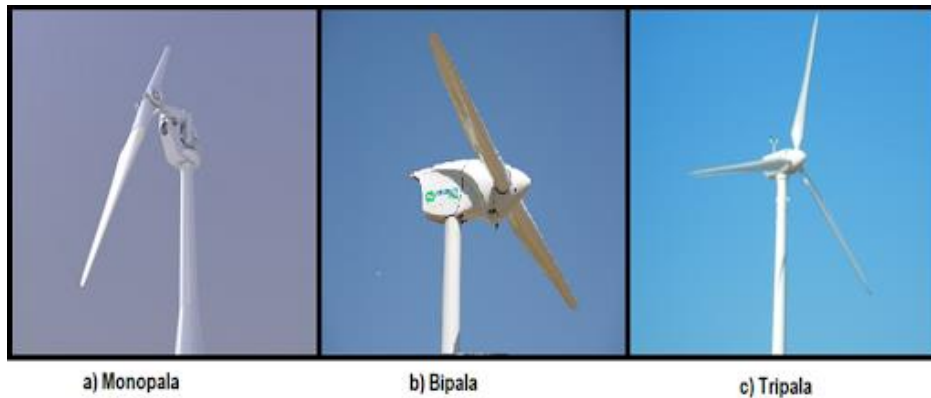


Figura 6. Turbinas rápidas

➤ Turbinas eólicas lenta

Normalmente cuenta con un elevado número de palas (entre 12 y 24) y su sistema de orientación se da mediante un timón-veleta que hace que el plano de la hélice esté siempre situado perpendicular al viento. Su diámetro es menor que en las máquinas eólicas rápidas (entre 1 y 3 metros), ya que éste está limitado por el peso del rotor y para que arranquen necesitan velocidades de viento entre 2-3m/s. Sus aplicaciones son sobre todo en instalaciones de extracción y bombeo de agua. (Roman, 2012)



Figura 7. Turbinas lentas

Estudio Comparativo de Aerogeneradores Eólicos de eje vertical y de eje horizontal.

5.5.1.6 Orientación de las aspas frente al viento.

➤ Aerogenerador con rotor barlovento.

El rotor se encuentra colocado de cara al viento, es decir, el viento atraviesa el rotor antes de llegar a la torre de manera que no se dificulta el paso de aire. A pesar de ello, aunque la torre sea redonda y lisa, el viento comienza a desviarse antes de alcanzarla, lo que se traduce en una ligera pérdida de potencia cada vez que una de las palas pasa paralela por la torre.

Estas desviaciones hacen que los rotores deban ser rígidos y estar situados a una distancia de la torre mayor que en los rotores sotavento, además de que debe instalarse un sistema de orientación para mantener el rotor de cara de viento. (Gomez, 2017)

➤ Aerogeneradores con rotor sotavento.

En este tipo de aerogeneradores, el rotor se encuentra colocado en sentido opuesto al viento y es atravesado por el aire después de que haya pasado por el soporte. Cuando las palas pasan por detrás de la torre se produce una disminución de la potencia que en las turbinas barlovento. Sin embargo, poseen la ventaja de poder instalarse sin un mecanismo de orientación. Esto se puede conseguir haciendo que la góndola gire forma pasiva según la fuerza ejercida por el viento o mediante la utilización de palas flexibles que se curven cuando las velocidades del viento son elevadas.

A pesar de esta ventaja, las fluctuaciones de fuerza que experimenta la estructura cuando las palas pasan por detrás de la torre aparece el efecto fatiga. (Gomez, 2017)

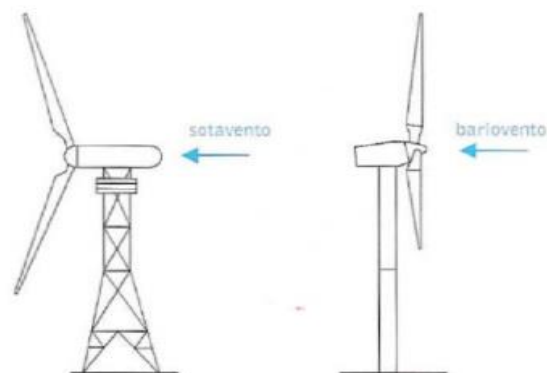


Figura 8. Rotores Sotavento y Barlovento

Estudio Comparativo de Aerogeneradores Eólicos de eje vertical y de eje horizontal.

5.5.2 Aerogenerador de eje vertical.

La instalación de estos tipos de aerogeneradores no es necesaria la dirección del viento, la contaminación acústica es casi nula y la contaminación visual es menor en estos tipos de aerogeneradores, por estos motivos se instalan en entornos urbanos. (Turcan, 2015)

5.5.2.1 Tipos de aerogeneradores de eje vertical.

Se puede distinguir 4 tipos de aerogeneradores principales, la diferencia entre estos son la forma del rotor, la dirección del eje del rotor y la forma de las alas. (Nuñez, 2004)

- a) Aerogenerador Savonius: Este tipo de aerogenerador es el modelo de rotor más sencillo, está formado por cilindros huecos desplazados respecto a su eje de forma que la parte cóncava en el empuje del viento ofrece a su parte convexa una menor resistencia al giro. Se suele mejorar su diseño dejando un espacio entre ambas caras para evitar la sobrepresión en el interior de la parte cóncava. No son útiles para la generación de electricidad debido a su elevada resistencia al aire. Sin embargo, su coste es bajo y el montaje es fácil lo que les hace útiles para aplicaciones mecánicas.



Figura 9. Aerogenerador Savonius

- b) Aerogenerador Darrieus: El aerogenerador Darrieus fue patentado por G.J.M. Darrieus en 1931. Es el modelo de los aerogeneradores de eje vertical de más éxito comercial. Consiste en un eje vertical asentado sobre el rotor, con dos o más finas palas en curva unidas al eje por los dos extremos, el diseño de las palas es simétrico y similar a las alas de un avión, el modelo de curva utilizado para la unión de las palas entre los extremos del rotor es el de

Estudio Comparativo de Aerogeneradores Eólicos de eje vertical y de eje horizontal.

Troposkien, aunque puede utilizarse también catenarias. Evita la necesidad de diseños complejos en las palas como los necesarios en los generadores de eje horizontal, permite mayores velocidades que las del rotor Savonius, aunque sin alcanzar las generadas por los modelos de eje horizontal, pero necesita de un sistema externo de arranque.



Figura 10. Aerogenerador Darrieus

- c) Aerogenerador Giromil: Este tipo de aerogeneradores también fue patentado por G.J.M. Darrieus. Consiste en palas verticales unidas al eje por unos brazos horizontales, que pueden salir por los extremos del aspa e incluso desde su parte central. Las palas verticales cambian su orientación a medida que se produce el giro del rotor para un mayor aprovechamiento de la fuerza del viento.



Figura 11. Aerogenerador Giromil

Estudio Comparativo de Aerogeneradores Eólicos de eje vertical y de eje horizontal.

- d) Aerogenerador Windside: el aerogenerador windside este se inspira en el modelo de rotor Savonius con la particularidad en un perfil alabeado con torsión que asciende por el eje vertical. Tiene la particularidad de producir energía a partir de 1.5 m/s y soportar velocidades de hasta 60m/s. Potencia de salida de 6 a 12 kW.



Figura 12. Aerogenerador Windside

5.5.2.2 Ventajas del aerogenerador de eje vertical.

- Dada su simetría vertical, no necesitan sistemas de orientación para alinear el eje de la turbina con la dirección del viento, como ocurre con las del eje horizontal.
- Su mantenimiento es más sencillo, dada su poca altura con respecto al suelo.
- Son silenciosos, su tamaño es bastante menor y más seguros para aves y personas.

5.5.2.3 Desventajas del aerogenerador de eje vertical.

- No son muy eficientes en el área rural.
- Las velocidades del viento a nivel del suelo son bajas, por lo que la potencia del viento será baja.
- Objetos muy grandes cercanos al suelo y el aerogenerador pueden provocar turbulencias, vibraciones y causar estrés en los componentes del aerogenerador

Estudio Comparativo de Aerogeneradores Eólicos de eje vertical y de eje horizontal.

5.6 Componentes de un aerogenerador

Los elementos que componen un aerogenerador eólico: son la góndola, la torre y la cimentación.

5.6.1 Góndola

Es el elemento situado en la parte superior de la torre. En su interior se encuentra el sistema mecánico utilizado para producir electricidad. Además de la carcasa que contiene todos los elementos. (Gomez, 2017)

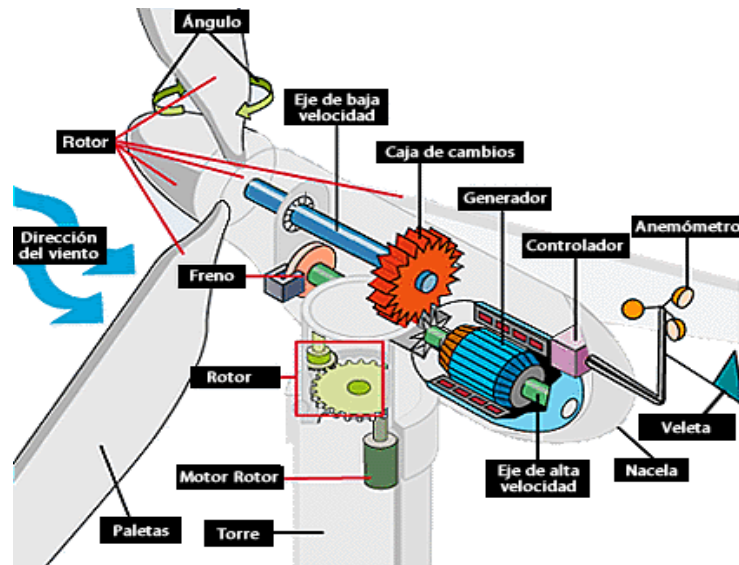


Figura13. Componentes de un aerogenerador

- Rotor: está compuesto por el conjunto de las palas y el buje. En el caso de las turbinas de tres palas, el buje es un elemento fijo que no admite inclinaciones. Transmite su giro a la caja de cambios mediante el eje de baja velocidad. Las palas suelen estar fabricadas de poliéster o epoxy reforzado con fibra de vidrio. Estas pueden medir desde 1 hasta 100 metros.
- Freno: es un elemento utilizado para reducir la velocidad del rotor e incluso para detenerlo en el caso de que la velocidad del viento sea muy elevada, con el fin de evitar sobrecargas en el generador y exceso de fuerzas centrífugas en las palas.

Estudio Comparativo de Aerogeneradores Eólicos de eje vertical y de eje horizontal.

- Caja de cambios o multiplicador: es un conjunto de engranajes utilizado para aumentar la velocidad de giro transmitida por el eje de baja velocidad, de forma que se adapte a las necesidades del generador.
- Generador: se encarga de transformar la energía mecánica obtenida a partir del giro del rotor en energía eléctrica. Pueden ser síncronos o asíncronos.
- Anemómetro y veleta: son dos elementos utilizados para conocer la velocidad del viento y su dirección, respectivamente.
- Controlador: se trata de un sistema electrónico utilizado para monitorizar todas las variables de funcionamiento del aerogenerador.
- Sistema de orientación: se encuentra en la zona inferior de la góndola y está en contacto con la torre. Se encarga de girar el conjunto de forma que el rotor el eje del rotor se sitúe paralelo a la dirección del viento.
- Sistema de cambio de paso y control de velocidad de las palas: utilizados para regular el ángulo de ataque de las palas y la velocidad de giro, con el objetivo de proteger a los sistemas de transmisión, evitar esfuerzos centrífugos excesivo y mantener el régimen de giro dentro del rango de revoluciones del generador eléctrico.

5.6.2 Torres

Es el elemento estructural que soporta todo el peso del aerogenerador y las fuerzas ejercida por el viento. Según como sean son 3 tipos: (Gomez, 2017)

- Torres en celosía: consiste en disponer una estructura metálica a partir de perfiles de aceros soldados. Son más baratas que las torres tubulares, pues se necesita menos material para construirlas. Este tipo de torres han sido progresivamente sustituidas por las torres tubulares, debido a que las tareas de mantenimiento son más complicadas y a que tienen un mayor impacto visual a distancia cercanas.

Estudio Comparativo de Aerogeneradores Eólicos de eje vertical y de eje horizontal.



Figura 14. Torres en celosía

- Torres tubulares: son las torres más utilizadas actualmente. Tienen forma cilíndrica y están elaboradas a partir de un único elemento o segmentos más pequeños para las torres más altas. Pueden ser de hormigón o de acero. Sin son elevada, en su interior suele incorporarse un ascensor.



Figura 15. Torres tubulares

- Torres de hormigón: son una solución alternativa a las torres convencionales de acero que permite acceder a emplazamientos con mayores alturas, ahorrar costes en la construcción del parque.

Estudio Comparativo de Aerogeneradores Eólicos de eje vertical y de eje horizontal.



Figura 16. Torres de hormigón

5.6.3 Cimentación

Es el elemento que actúa como soporte del aerogenerador. Suele tratarse de una zapata de hormigón con forma cuadrada que permite transmitir al suelo las cargas que va a soportar la estructura. (Gomez, 2017)

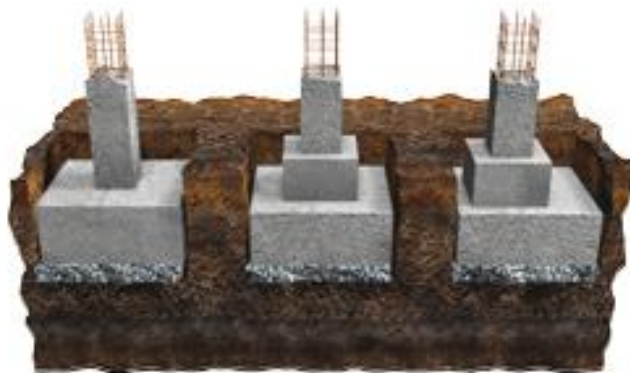


Figura 17. Zapata de hormigón

Estudio Comparativo de Aerogeneradores Eólicos de eje vertical y de eje horizontal.

5.7 Aerodinámica de un aerogenerador

El rotor, compuesto por las palas del rotor y el buje, está situado corriente arriba de la torre y la góndola en la mayoría de aerogeneradores modernos. Esto se hace sobre todo porque la corriente de aire tras la torre es muy turbulenta. (Energía Eólica , 2011)

5.7.1 Que es lo que hace que rotor gire

La respuesta parece obvia: el viento. Pero en realidad, no se trata simplemente de moléculas de aire que chocan contra la parte delantera de las palas del rotor. Los aerogeneradores modernos toman prestada de los aviones tecnología ya conocida, además de tener algunos trucos propios más avanzados, ya que los aerogeneradores trabajan en un entorno realmente muy diferente, con cambios en las velocidades y en las direcciones del viento. (Energía Eólica , 2011)

5.7.2 Sustentación

Los principios básicos del vuelo de un ave son similares a los de un avión. La fuerza de sustentación es producida por la acción del flujo de aire a través del ala, el cual es un perfil alar. La fuerza de sustentación se produce porque la presión del aire es menor en la parte inmediatamente sobre el ala y ligeramente superior en la parte inferior del ala.

Al planear tanto las aves como los planeadores obtienen a partir de sus alas tanto una fuerza vertical como una fuerza de empuje adelante. Esto es así porque la fuerza de sustentación se produce en una dirección perpendicular a la del flujo de aire, la que en vuelo horizontal se produce en la parte inferior del ala. Por lo tanto, la fuerza de sustentación posee un componente adelante. (El peso siempre actúa verticalmente abajo y por lo tanto no puede producir una fuerza adelante. Sin este componente adelante, un ave que planeara descendería en sentido vertical, en forma similar a como cae un paracaídas).

La figura del perfil cortado (sección transversal) del ala de un avión. La razón por la que un aeroplano puede volar es que el aire que se desliza a lo largo de la superficie superior del ala se mueve más rápidamente que el de la superficie inferior. Esto implica (efecto Venturi), una presión más baja en la superficie superior lo que crea la sustentación, es decir, la fuerza de empuje hacia arriba que permite al avión volar.

Estudio Comparativo de Aerogeneradores Eólicos de eje vertical y de eje horizontal.

La sustentación es perpendicular a la dirección del viento. El fenómeno de la sustentación es desde hace siglos bien conocido por la gente que trabaja en la construcción de tejados: saben, por experiencia, que el material de la cara a sotavento del tejado (la cara que no da al viento) es arrancado rápidamente, si no está correctamente sujeto a su estructura. (Energía Eólica , 2011)

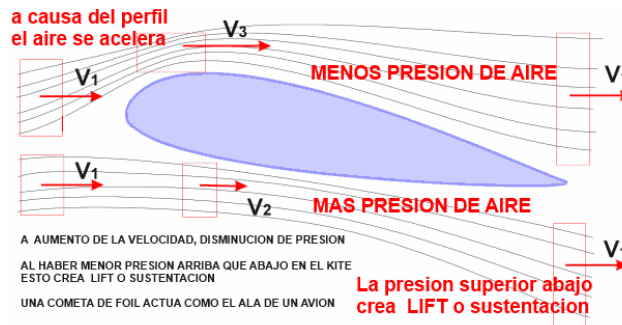


Figura 18. Sustentación

5.7.3 Pérdida de sustentación

Ahora bien, ¿qué es lo que ocurre cuando un avión se inclina demasiado hacia atrás en un intento de subir más rápidamente? La sustentación de la aspa va de hecho a aumentar, de repente, el flujo de aire de la superficie superior deja de estar en contacto con la superficie de la aspa. En su lugar, el aire gira alrededor se genera turbulencia. Bruscamente, la sustentación derivada de la baja presión en la superficie superior de la pala desaparece. Este fenómeno es conocido como pérdida de sustentación.

La pérdida de sustentación puede ser provocada si la superficie de la pala del avión o la pala del rotor de un aerogenerador, no es completamente uniforme y lisa. Una mella en la pala del rotor, o un trozo de cinta adhesiva, pueden ser suficiente para iniciar una turbulencia en la parte trasera, incluso si el ángulo de ataque es bastante pequeño. Obviamente, los diseñadores de aviones intentan evitar la pérdida de sustentación a toda costa, ya que un avión sin la sustentación de sus alas caerá como si fuera una piedra. (Energía Eólica , 2011)

Estudio Comparativo de Aerogeneradores Eólicos de eje vertical y de eje horizontal.

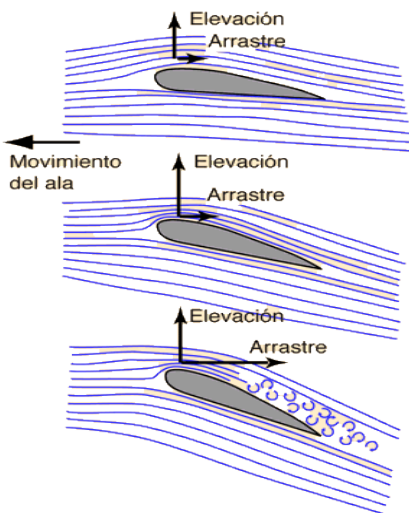


Figura 19. Pérdida de sustentación

5.7.4 Resistencia aerodinámica

Sin embargo, los diseñadores de aviones y los de palas de rotor no sólo se preocupan de la sustentación y de la pérdida de sustentación.

También se preocupan de la resistencia del aire, conocida en el argot técnico como resistencia aerodinámica. La resistencia aerodinámica normalmente aumentará si el área orientada en la dirección del movimiento aumenta. (Energía Eólica , 2011)

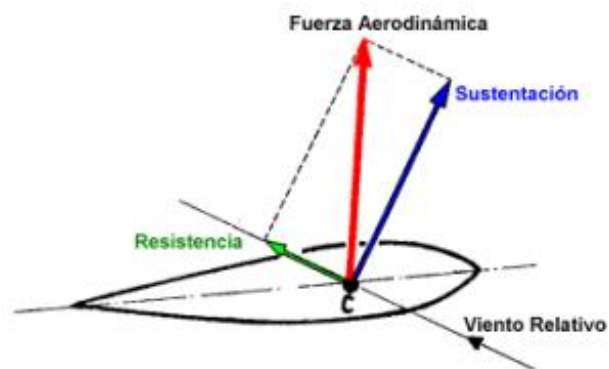


Figura 20. Resistencia aerodinámica

Estudio Comparativo de Aerogeneradores Eólicos de eje vertical y de eje horizontal.

5.7.5 Aerodinámica del rotor

El viento que llega a las palas del rotor de un aerogenerador no viene la dirección en la que el viento sopla en el entorno, es decir de la parte delantera de la turbina. Esto es debido a que las propias palas del rotor se están moviendo.

Para estudiar cómo se mueve el viento respecto a las palas del rotor de un aerogenerador, hemos fijado lazos rojos en los extremos de las palas del rotor, y lazos amarillos a una distancia al buje de aproximadamente $\frac{1}{4}$ longitud de la pala.

En la figura 20. Se proporcionan una vista lateral de la turbina, y otra vista desde la parte delantera de la turbina.



Figura 21. Vista lateral y delantera de la turbina

Los lazos amarillos, cerca del buje del rotor, serán llevados más hacia la parte de atrás de la turbina que los lazos rojos, en los extremos de las palas. Esto es debido a que la velocidad en el extremo de las palas es alrededor de 8 veces superior a la velocidad del viento que llega enfrente de la turbina.

Dado que la mayoría de las turbinas tienen una velocidad de giro ω constante, la velocidad a la que se mueve la punta de la pala suele estar alrededor de 64 m/s, mientras que en el centro del buje es nula.

Estudio Comparativo de Aerogeneradores Eólicos de eje vertical y de eje horizontal.

Esto es debido a que la velocidad del viento visto desde un punto de la pala es la suma vectorial de la velocidad del viento (observador fijo) más la velocidad de ese punto de la pala. Que a su vez es $V: \omega * r$ (r es la distancia del viento). (Energia Eolica , 2011)

5.7.6 Por qué están torsionadas las palas del rotor

Las palas del rotor de los grandes aerogeneradores están siempre torsionadas. Visto desde la pala del rotor, el viento llegará desde un ángulo (ángulo de ataque) mucho mayor (desde la dirección general de viento en el paisaje) conforme nos desplazamos hacia el buje (la base de la pala).

La pérdida de sustentación en la pala de un rotor dejará de proporcionar sustentación si el viento llega con un ángulo de ataque demasiado grande. Así pues, la pala debe estar alabeada, con el fin de que el ángulo de ataque sea el óptimo a lo largo de toda la longitud de la misma. Sin embargo, en el caso particular de aerogeneradores controlados por pérdida aerodinámica es importante que la pala esté construida de tal forma que la pérdida de sustentación se produzca de forma gradual desde la raíz de la pala y hacia el exterior a velocidades de viento altas. (Energia Eolica , 2011)

5.7.7 Variaciones en la velocidad del viento: efecto del ángulo de ataque

Las variaciones en la velocidad del viento tienen un mayor efecto en el ángulo de ataque cerca de la base de la pala que en su extremo.

La figura 21 la hemos sacado una de las palas del rotor de la figura 20 fuera de su buje, y miramos desde el buje hacia el extremo, en la parte posterior (cara a sotavento) de la pala. El viento en el paisaje sopla de 8 a 16 m/s (desde la parte inferior del dibujo), mientras que el extremo de la pala gira hacia la parte izquierda de la imagen.

Estudio Comparativo de Aerogeneradores Eólicos de eje vertical y de eje horizontal.

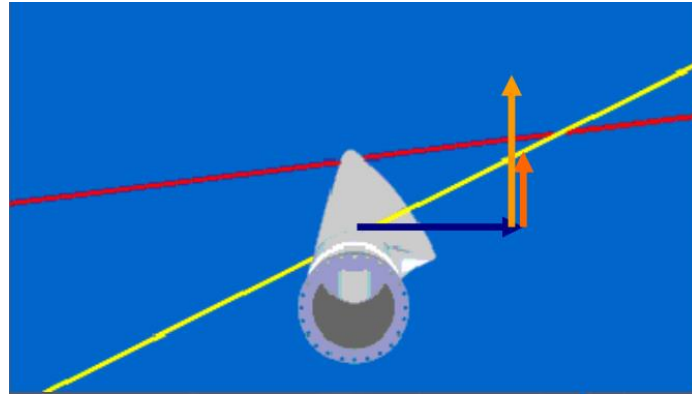


Figura 22. Pala de un aerogenerador

En la figura puede ver como el ángulo de ataque del viento cambia mucho más bruscamente en la base de la pala (línea amarilla), que en el extremo de la pala (línea roja), cuando el viento cambia. En el primer caso (base de la pala) sean añadido a la figura de los vectores de la velocidad del viento en el paisaje y es debido a la rotación de la pala que es la suma vectorial la que determina el ángulo de ataque. Si el viento llega a ser lo suficientemente fuerte como para que haya una pérdida de sustentación, este fenómeno empezará en la base de la pala. (Energía Eólica, 2011)

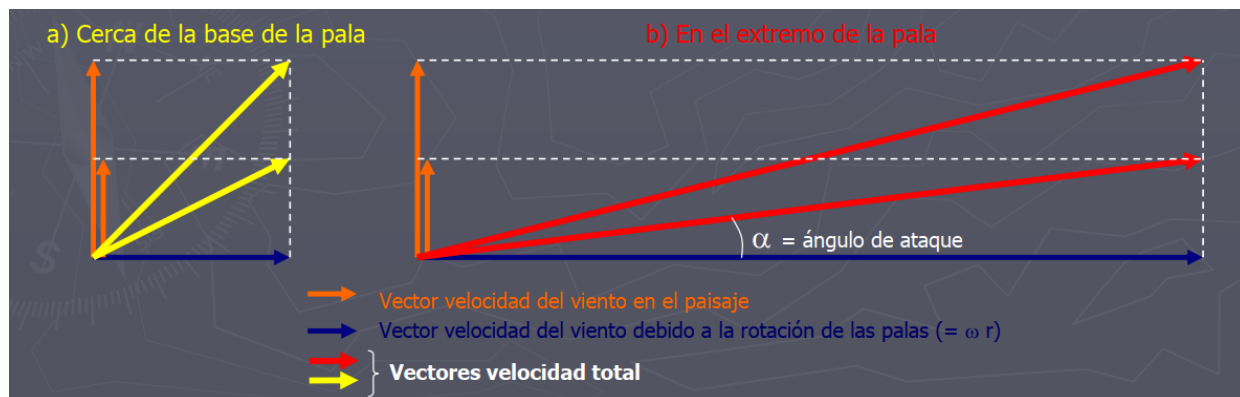


Figura 23. Angulo de ataque de un aspa

5.7.8 Dirección de sustentación, perfil y material de las palas

➤ Dirección de la sustentación

Cortamos ahora la pala del rotor en el punto por el que pasa la línea amarilla. En el siguiente dibujo la flecha gris muestra la dirección de la sustentación en ese punto.

Estudio Comparativo de Aerogeneradores Eólicos de eje vertical y de eje horizontal.

La sustentación es perpendicular a la dirección del viento. Tal y como puede observar, la sustentación empuja la pala parcialmente en la dirección que nosotros queremos, es decir, hacia la izquierda. (Energía Eólica , 2011)

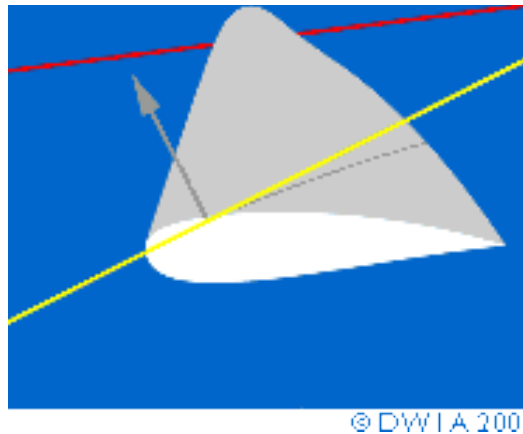


Figura 24. Dirección de la sustentación

➤ Perfiles de las palas de rotor

Como puede ver, las palas del rotor de un aerogenerador se parecen mucho a las alas de un avión. De hecho, los diseñadores de palas de rotor usan a menudo perfiles clásicos de alas de avión como sección transversal de la parte más exterior de la pala.

Sin embargo, los perfiles gruesos de la parte más interior de la pala suelen estar específicamente diseñados para turbinas eólicas. La elección de los perfiles de las palas del rotor conlleva una solución de compromiso entre unas características adecuadas de sustentación y pérdida de sustentación, y la habilidad del perfil para funcionar bien incluso si hay algo de suciedad en su superficie lo cual puede ser un problema en áreas en las que llueve poco. (Energía Eólica , 2011)

➤ Materiales de las palas del rotor

La mayoría de las modernas palas de rotor de grandes aerogeneradores están fabricadas con plástico reforzado con fibra de vidrio ("GRP"), es decir, poliéster o epoxy reforzado con fibra de vidrio. Utilizar fibra de carbono o aramidas como material de refuerzo es otra posibilidad, pero normalmente estas palas son antieconómicas para grandes aerogeneradores.

Estudio Comparativo de Aerogeneradores Eólicos de eje vertical y de eje horizontal.

Los materiales compuestos de madera, madera-epoxy, o madera-fibra-epoxy aún no han penetrado en el mercado de las palas de rotor, aunque existe un desarrollo continuado en esa área. Las aleaciones de acero y de aluminio tienen problemas de peso y de fatiga del metal, respectivamente. Actualmente sólo son utilizados en aerogeneradores muy pequeños. (Energía Eólica , 2011)

5.7.9 Control de potencia en los aerogeneradores

Los aerogeneradores están diseñados para producir energía eléctrica de la forma más barata posible. Así pues, están generalmente diseñados para rendir al máximo a velocidades alrededor de 15 m/s. Es mejor no diseñar aerogeneradores que maximicen su rendimiento a vientos más fuertes, ya que los vientos tan fuertes no son comunes. (Energía Eólica , 2011)

En el caso de vientos más fuertes es necesario gastar parte del exceso de la energía del viento para evitar daños en el aerogenerador. En consecuencia, todos los aerogeneradores están diseñados con algún tipo de control de potencia. Hay tres formas de hacerlo con seguridad en los modernos aerogeneradores:

1. Regulación de potencia por cambio de ángulo de paso.

En un aerogenerador de regulación por cambio del ángulo de paso, el controlador electrónico de la turbina comprueba varias veces por segundo la potencia generada. Cuando ésta alcanza un valor demasiado alto, el controlador envía una orden al mecanismo de cambio del ángulo de paso, que inmediatamente hace girar las palas del rotor ligeramente fuera del viento. Y a la inversa, las palas son vueltas hacia el viento cuando éste disminuye de nuevo. Así pues, las palas del rotor deben ser capaces de girar alrededor de su eje longitudinal (variar el ángulo de paso). El mecanismo de cambio del ángulo de paso suele funcionar de forma hidráulica.

El diseño de aerogeneradores controlados por cambio del ángulo de paso requiere una ingeniería muy desarrollada, para asegurar que las palas giren exactamente el ángulo deseado. En este tipo de aerogeneradores, el ordenador generalmente girará las palas unos pocos grados cada vez que el viento cambie, para mantener un ángulo óptimo que proporcione el máximo rendimiento a todas las velocidades de viento. (Energía Eólica , 2011)

Estudio Comparativo de Aerogeneradores Eólicos de eje vertical y de eje horizontal.

2. Regulación pasiva por pérdida aerodinámica.

Los aerogeneradores de regulación (pasiva) por pérdida aerodinámica tienen las palas del rotor unidas al buje en un ángulo fijo. Sin embargo, el perfil de la pala ha sido aerodinámicamente diseñado para asegurar que, en el momento en que la velocidad del viento sea demasiado alta, se creará turbulencia en la parte de la pala que no da al viento. Esta pérdida de sustentación evita que la fuerza ascensional de la pala actúe sobre el rotor.

La pérdida de sustentación se da conforme aumenta la velocidad real del viento en la zona, el ángulo de ataque de la pala del rotor también aumentará, hasta llegar al punto de empezar a perder sustentación.

Si mira con atención la pala del rotor de un aerogenerador regulado por pérdida aerodinámica observará que la pala está ligeramente torsionada a lo largo de su eje longitudinal. Esto es así en parte para asegurar que la pala pierde la sustentación de forma gradual, en lugar de hacerlo bruscamente, cuando la velocidad del viento alcanza su valor crítico.

La principal ventaja de la regulación por pérdida aerodinámica es que se evitan las partes móviles del rotor y un complejo sistema de control. Por otro lado, la regulación por pérdida aerodinámica representa un problema de diseño aerodinámico muy complejo, y comporta retos en el diseño de la dinámica estructural de toda la turbina, para evitar las vibraciones provocadas por la pérdida de sustentación. Alrededor de las dos terceras partes de los aerogeneradores que actualmente se están instalando en todo el mundo son máquinas de regulación por pérdida aerodinámica. (Energía Eólica, 2011)

3. Regulación activa por pérdida aerodinámica.

Un número creciente de grandes aerogeneradores (a partir de 1 MW) están siendo desarrollados con un mecanismo de regulación activa por pérdida aerodinámica. Técnicamente, las máquinas de regulación activa por pérdida aerodinámica se parecen a las de regulación por cambio del ángulo de paso, en el sentido de que ambos tienen palas que pueden girar. Para tener un momento de torsión (fuerza de giro) razonablemente alto a bajas velocidades del viento, este tipo de máquinas serán normalmente programadas para girar sus palas como las de regulación por cambio del ángulo

Estudio Comparativo de Aerogeneradores Eólicos de eje vertical y de eje horizontal.

de paso a bajas velocidades del viento (a menudo sólo utilizan unos pocos pasos fijos, dependiendo de la velocidad del viento).

Sin embargo, cuando la máquina alcanza su potencia máxima, observará que este tipo de máquinas presentan una gran diferencia respecto a las máquinas reguladas por cambio del ángulo de paso: si el generador va a sobrecargarse, la máquina girará las palas en la dirección contraria a la que lo haría una máquina de regulación por cambio del ángulo de paso. En otras palabras, aumentará el ángulo de paso de las palas para llevarlas hasta una posición de mayor pérdida de sustentación, y poder así consumir el exceso de energía del viento.

Una de las ventajas de la regulación activa por pérdida aerodinámica es que la producción de potencia puede ser controlada de forma más exacta que con la regulación pasiva, con el fin de evitar que al principio de una ráfaga de viento la potencia nominal sea sobrepasada. Otra de las ventajas es que la máquina puede funcionar casi exactamente a la potencia nominal a todas las velocidades de viento. Un aerogenerador normal de regulación pasiva por pérdida aerodinámica tendrá generalmente una caída en la producción de potencia eléctrica a altas velocidades de viento, dado que las palas alcanzan una mayor pérdida de sustentación. (Energía Eólica , 2011)

Estudio Comparativo de Aerogeneradores Eólicos de eje vertical y de eje horizontal.

5.8 Aerogeneradores especiales de eje horizontal y de eje vertical.

5.8.1 Aerogenerador Vortex

El aerogenerador vortex este es un modelo revolucionario en el campo de la industria eólica, ya que no presenta hélices. Su funcionalidad es bastante similar, pero con un ahorro bastante importante en lo que son los costos, este tipo de aerogenerador funciona aplicando materiales piezoeléctricos, aparte de que su instalación y mantenimiento resulta más barato. También tienen una reducción en el impacto medioambiental aparte de eliminar el ruido producido que si generan los aerogeneradores tradicionales. (Technology), 2019)



Figura 25. Aerogenerador vortex

5.8.2 Aerogenerador Sheer-Wind

Estos tipos de turbinas, en vez de alejarse del suelo, se acerca a él tanto como puede. Así, esta idea parte de ubicar la turbina en la zona inferior de una construcción especialmente diseñada para captar el viento y llevarlo bajo tierra. Para ello, se incluye un equipo que, en la parte superior, está dotado de una especie de embudo que captura el viento y lo dirige hacia el suelo a través de un conducto que se va estrechando. De esta manera se consigue un aumento de la velocidad del viento. A todo esto, se añaden las turbinas, en tierra, que permiten generar electricidad. (Technology), 2019)

Estudio Comparativo de Aerogeneradores Eólicos de eje vertical y de eje horizontal.

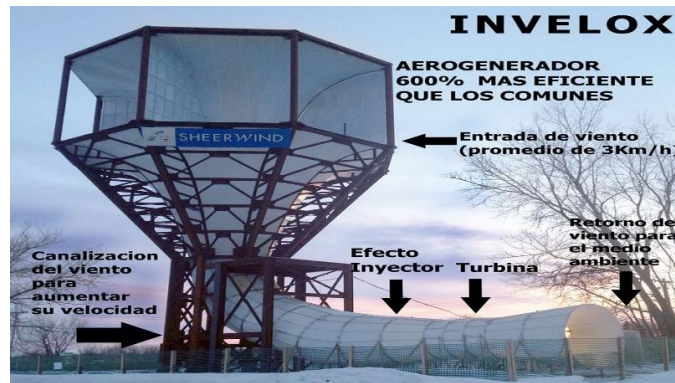


Figura 26. Aerogenerador Sheer-wind

5.8.3 Aerogenerador Wind-Tree

Es un proyecto bastante innovador, está compuesto de 72 hojas. Cada una de ellas es una turbina vertical con una forma cónica y pueden generar energía con solo 2 m/s. Su producción total es de 3.1 kW con las 72 turbinas funcionando y está diseñado para encajar en el entorno urbano. Soportan fuertes velocidades, además, las turbinas están cableadas en paralelo, de modo que, si una deja de funcionar, las demás no se verán afectadas. (Technology), 2019)



Figura 27. Aerogenerador Wind - tree

5.8.4 Aerogenerador Liam F1

Estos tipos de turbinas eólicas son para uso doméstico que produce mucha más energía que las actuales y apenas generan ruido, actualmente sigue en desarrollo y mejora continua. El diseño se basa en un rotor que captura la energía cinética del viento para convertirla en energía

Estudio Comparativo de Aerogeneradores Eólicos de eje vertical y de eje horizontal.

mecánica. Debido a su forma de tornillo, la Liam apuntará automáticamente a la posición óptima del viento, al igual que un banderín y por lo tanto tendrá un rendimiento máximo. (Technology), 2019)



Figura 28. Aerogenerador Liam F1

5.8.5 Aerogenerador COWM

Este aerogenerador consiste en un molino provisto de brazos giratorios alrededor de un eje vertical con la particularidad de que a dichos brazos se unen unas palas abatibles. Las palas ofrecen la máxima resistencia al viento cuando este impacta contra ellas y una resistencia prácticamente nula al viento cuando están en la zona de retorno. (Technology), 2019)



Figura 29. Aerogenerador COWM

Estudio Comparativo de Aerogeneradores Eólicos de eje vertical y de eje horizontal.

VI. Medición De Viento

El instrumento que mide la velocidad del viento, es el anemómetro, que generalmente está formado por un molinete de tres brazos, separado por ángulos de 120° que se mueve alrededor de un eje vertical. Los Brazos giran con el viento y acciona un contador que indica en base al número de revoluciones y la velocidad del viento incidente. (Turcan, 2015)

VII. Módulo Lexsolar-Wind Professional

Es un es un kit de entrenamiento que nos permite investigar y experimenta mediante laboratorio el uso de la energía eólica. Los componentes que posee este kit son:

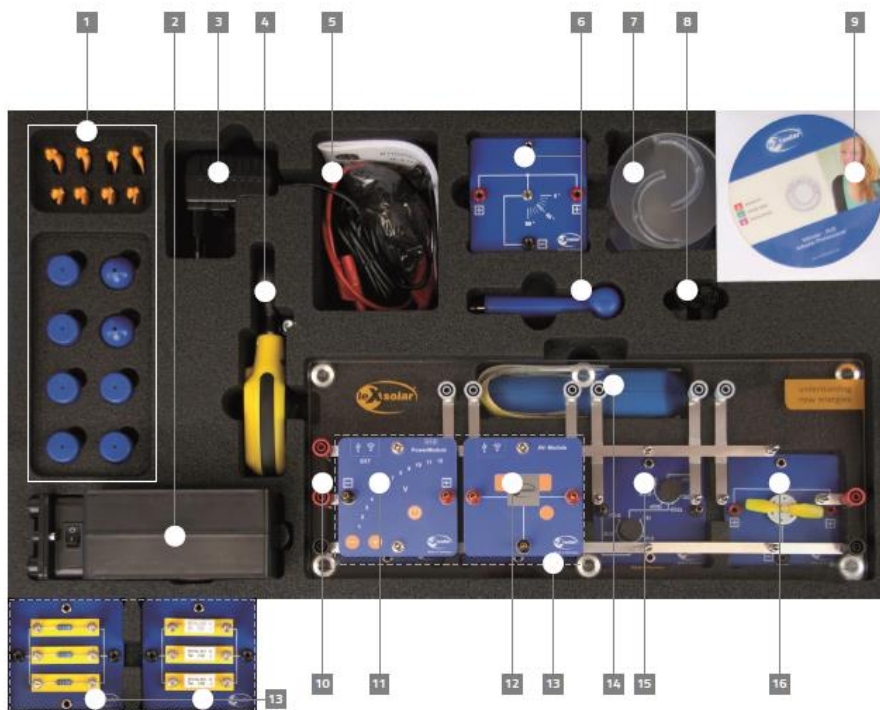


Figura 30. Componentes del módulo Lexsolar – Wind Professional (1)

Estudio Comparativo de Aerogeneradores Eólicos de eje vertical y de eje horizontal.

1. 1400-12 Lexsolar -Wind Set de rotores.
2. 1400-19 Lexsolar -Wind Maquina de vientos.
3. Fuente de alimentación para el power module.
4. 1400-20 Lexsolar -Wind Anemómetro.
5. L2-06-066/067 Cable de prueba rojo/negro de 25 centímetros.
L2-06-059/060 Cable de prueba rojo/negro de 50 centímetros.
6. 1118-03 Lexsolar -Wind Módulo de turbina.
7. 1118- 14 Lexsolar -Wind Módulo del rotor Savonius.
8. 3xL2-05-068 Lexsolar -Wind Enchufe de seguridad para cortocircuito.
9. L3-03-081 Lexsolar- Wind DVD-Professional.
10. 1400-13 Lexsolar -Wind Unidad de base.
11. 9100-05 Lexsolar - Wind Power Module.
12. 9100-03 Lexsolar-Wind AV- Module.
13. 2x1800 - 01 Módulo de resistencia triple con:
 - 3x1800 - 04 Elemento de resistencia insertable de 100 ohmio.
 - 2x1800 - 05 Elemento de resistencia insertable de 10 ohmio.
 - 1x1800 - 06 Elemento de resistencia insertable de 33 ohmio.
14. L2-06-062 Contador de r.p.m. (Revoluciones por minuto).
15. 1118-04 Módulo de potenciómetro.
16. 1118-02 Módulo de motor con: L2-02-017 Hélice

Estudio Comparativo de Aerogeneradores Eólicos de eje vertical y de eje horizontal.

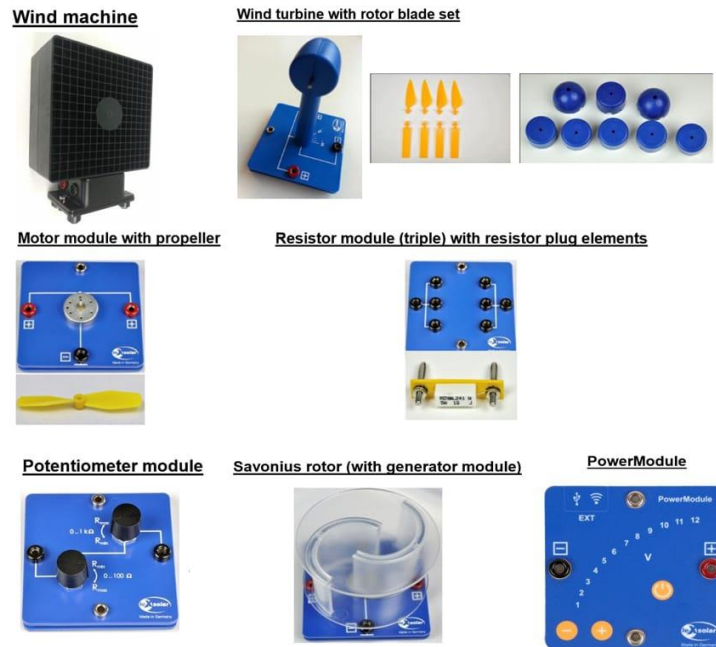


Figura 31. Componentes del módulo Lexsolar – Wind Professional (2)



Figura 32. Componentes del módulo Lexsolar – Wind Professional (3)

Estudio Comparativo de Aerogeneradores Eólicos de eje vertical y de eje horizontal.

7.1 Limitaciones del módulo Lexsolar – Wind Professional.

Al trabajar con un módulo de entrenamiento se tendrán algunas limitaciones a la hora de establecer pruebas comparativas en la eficiencia de los aerogeneradores de eje vertical y de eje horizontal.

Uno de los principales impedimentos para la realización de las pruebas comparativas fue la limitación de las velocidades del viento. Ya que, nos limitamos únicamente a una velocidad máxima de 5,4 m/s. La encargada de proporcionarnos el viento será la máquina de viento la cual deberá estar siempre alimentada al módulo de poder el cual solamente cuenta con voltaje máximo de salida de 12V.

Parte de estas limitaciones también están presentes en los ángulos de inclinación en que tienen predisuestas las aspas. Es decir, nuestras pruebas se limitan únicamente a las proporcionadas por el Kit Lex-Solar Wind Professional (20°, 25°, 30°, 50° y 90°) y con forma tradicional, basados en las alas de un avión que miden 5cm y están construidas con material PVC. En la vida real sabemos que los ángulos varían en función de distintos factores, como la potencia del viento, el terreno y hasta las características del mismo aerogenerador. El aerogenerador de eje vertical que está disponible en este kit es un Savonius tradicional, en la actualidad hay modelos de esta misma familia que son mucho más eficientes.

En cuanto a cargas se refiere contamos con un módulo de resistencias las cuales podemos conectar en paralelo para obtener distintas cargas al momento de realizar las pruebas. En nuestras pruebas utilizamos cargas de 10 Ω , 33 Ω y 100 Ω .

Además de estas limitaciones, uno de los principales puntos para determinar la eficiencia de los aerogeneradores es el Coeficiente de Potencia; el kit refleja valores demasiado pequeños que resulta difícil calcular este factor; más sin embargo adjuntamos una tabla-guía donde se reflejan los valores óptimos para cada tipo de aerogenerador.

Estudio Comparativo de Aerogeneradores Eólicos de eje vertical y de eje horizontal.

Existen diferentes modelos de aerogeneradores tanto de eje vertical como de eje horizontal, al querer establecer cuál de los dos tipos es más eficiente nos resulta imposible haciendo uso de un kit de entrenamiento el cual nos limita únicamente a dos modelos de aerogeneradores. En el caso del de eje horizontal el aerogenerador tripala y en el caso del de eje vertical sería el aerogenerador Savonius. Siendo estos dos modelos los sujetos de prueba de nuestros experimentos.

VIII. Eficiencia de un aerogenerador eólico.

Para determinar si una turbina es eficiente se deben tomar en cuenta algunos parámetros esenciales:

8.1 Distribución de Weibull

Para la industria eólica es muy importante ser capaz de describir la variación de las velocidades del viento. Los proyectistas de turbinas necesitan la información para optimizar el diseño de sus aerogeneradores, así como para minimizar los costes de generación. Los inversores necesitan la información para estimar sus ingresos por producción de electricidad. (Asociación danesa de la industria eólica, 2003)

Para realizar esta distribución se mide las velocidades del viento a lo largo de un año y dependiendo del terreno se podrá observar que en la mayoría de áreas los fuertes vendavales son raros, mientras que los vientos frescos y moderados son bastante comunes. (Asociación danesa de la industria eólica, 2003)

8.2 La ley de Betz

La ley de Betz dice que sólo puede convertirse el 59 % de la energía cinética en energía mecánica usando un aerogenerador. (Asociación danesa de la industria eólica, 2003)

En la figura 34 podemos observar que la turbina nunca pueda extraer toda la energía cinética del viento, puesto que el aire no se para al atravesar la turbina es decir $C_p < 1$. Su velocidad disminuye de V_1 a V_2 como muestra la figura 34. Por conservación de la masa, si la velocidad disminuye la sección del tubo de corriente aumentará.

8.3 El frenado ideal del viento

Cuanto mayor sea la energía cinética que un aerogenerador extraiga del viento, mayor será la ralentización que sufrirá el viento.

Estudio Comparativo de Aerogeneradores Eólicos de eje vertical y de eje horizontal.

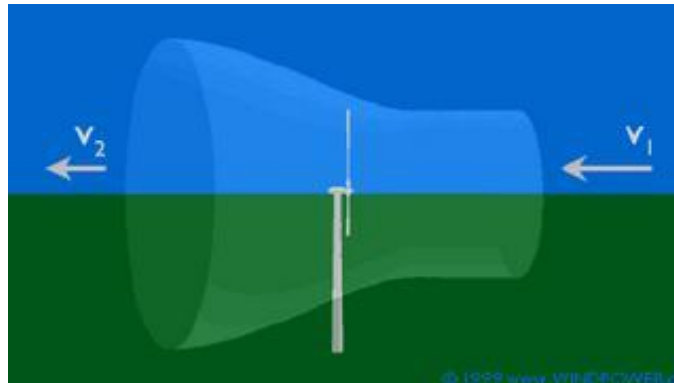


Figura 33. Frenado del viento

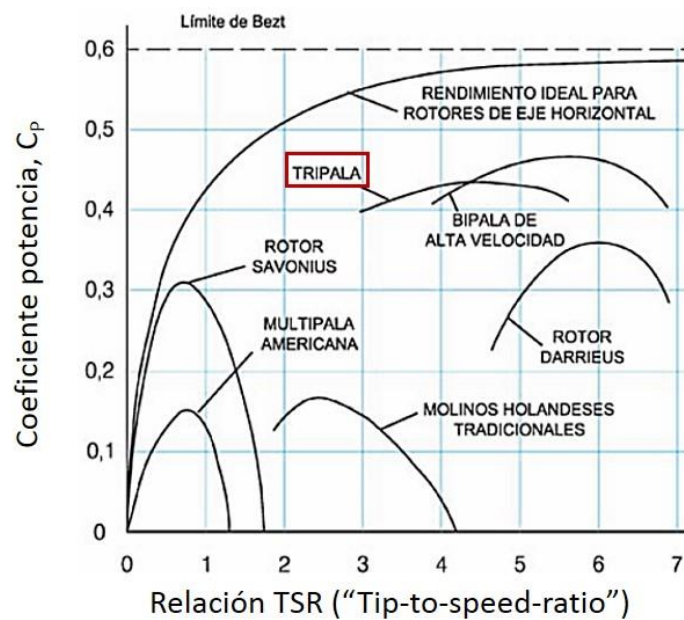


Figura 34. Coeficiente de potencia en función de la velocidad específica

Estudio Comparativo de Aerogeneradores Eólicos de eje vertical y de eje horizontal.

Si intentamos extraer toda la energía del viento, el aire saldría con una velocidad nula, es decir, el aire no podría abandonar la turbina. En ese caso no se extraería ninguna energía en absoluto, ya que obviamente también se impediría la entrada de aire al rotor del aerogenerador. En el otro caso extremo, el viento podría pasar a través de nuestro tubo (arriba) sin ser para nada estorbado. En este caso tampoco habríamos extraído ninguna energía del viento. (Asociación danesa de la industria eólica, 2003)

Así pues, podemos asumir que debe haber alguna forma de frenar el viento que esté entremedio de estos dos extremos, y que sea más eficiente en la conversión de la energía del viento en energía mecánica útil. Resulta que hay una respuesta a esto sorprendentemente simple: un aerogenerador ideal ralentizaría el viento hasta $2/3$ de su velocidad inicial. (Asociación danesa de la industria eólica, 2003)

8.4 Función de densidad de potencia

La potencia que puede extraer un equipo eólico está en función del cubo de la velocidad del viento, superficie de la sección y de la densidad del aire. Esta potencia se ve afectada por las condiciones del sitio de instalación, además de las características de funcionamiento de los equipos propiamente. (Nuñez, 2004)

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

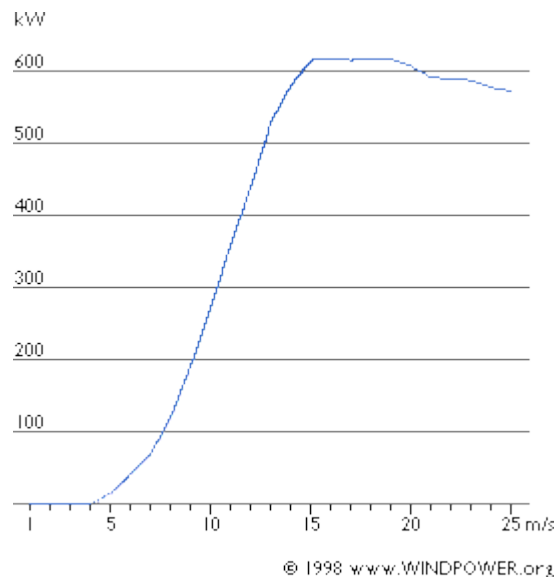
Ecuación 1. Potencial eólico

- A: (Superficie) [m^2]
- ρ : densidad del aire [$\frac{kg}{m^3}$] (varia con la temperatura, la altura y la humedad)
- v: velocidad del viento [$\frac{m}{s}$]

8.5 Curva de potencia de un aerogenerador

La curva de potencia de un aerogenerador es un gráfico que indica cuál será la potencia eléctrica disponible en el aerogenerador a diferentes velocidades del viento. (Asociación danesa de la industria eólica, 2003)

Estudio Comparativo de Aerogeneradores Eólicos de eje vertical y de eje horizontal.



Gráficas 1. Curva de potencia de un aerogenerador de 600 kW

Las curvas de potencia se obtienen a partir de medidas realizadas en campo, dónde un anemómetro es situado sobre un mástil relativamente cerca del aerogenerador (no sobre el mismo aerogenerador ni demasiado cerca de él, pues el rotor del aerogenerador puede crear turbulencia, y hacer que la medida de la velocidad del viento sea poco fiable). (Asociación danesa de la industria eólica, 2003)

Si la velocidad del viento no está variando demasiado rápido, pueden usarse las medidas de la velocidad del viento realizadas con el anemómetro y leer la potencia eléctrica disponible directamente del aerogenerador. (Asociación danesa de la industria eólica, 2003)

8.6 Incertidumbre en mediciones de curvas de potencias

En la práctica se debe tomar un promedio de las diferentes medidas para cada velocidad del viento, y dibujar el gráfico con esos promedios. (Asociación danesa de la industria eólica, 2003)

Además, es difícil hacer medidas exactas de la propia velocidad del viento. Si se tiene un 3% de error en las mediciones de la velocidad del viento, entonces la energía del viento puede ser un 9% superior o inferior (recuerde que el contenido energético varía con la tercera potencia de la

Estudio Comparativo de Aerogeneradores Eólicos de eje vertical y de eje horizontal.

velocidad del viento). En consecuencia, pueden existir errores hasta de $\pm 10\%$ incluso en curvas certificadas.

8.7 Verificación de las curvas de potencias

Las curvas de potencia están basadas en medidas realizadas en zonas de baja intensidad de turbulencias, y con el viento viniendo directamente hacia la parte delantera de la turbina. Las turbulencias locales y los terrenos complejos (ejemplo: aerogeneradores situados en una pendiente rugosa) pueden implicar que ráfagas de viento golpeen el rotor desde diversas direcciones. Por lo tanto, puede ser difícil reproducir exactamente la curva en una localización cualquiera dada. (Asociación danesa de la industria eólica, 2003)

8.8 Riesgos en el uso de las curvas de potencias

Una curva de potencia no indicará cuanta potencia producirá un aerogenerador a una cierta velocidad del viento media. Recordemos que la energía del viento varía fuertemente con la velocidad del mismo, es decir, si los vientos varían mucho o si soplan a una velocidad relativamente constante. (Asociación danesa de la industria eólica, 2003)

8.9 Coefficiente de potencia

El coeficiente de potencia indica con qué eficiencia el aerogenerador convierte la energía del viento en electricidad. Simplemente dividiendo la potencia eléctrica disponible por la potencia eólica de entrada, para medir como de técnicamente eficiente es un aerogenerador. (Asociación danesa de la industria eólica, 2003)

$$C_p = \frac{P_w}{P_o}$$

Ecuación 2. Coeficiente de Potencia

P_w: Potencia Eléctrica

P_o: Potencia Eólica

Estudio Comparativo de Aerogeneradores Eólicos de eje vertical y de eje horizontal.

8.10 Una mayor eficiencia técnica no es necesariamente el camino a seguir

No es un fin en sí mismo el tener una gran eficiencia técnica en un aerogenerador. Lo que en realidad interesa es el coste de sacar los kWh del viento. Dado que en este caso el combustible es gratis no hay necesidad de ahorrarlo. Por tanto, la turbina óptima no tiene por qué ser necesariamente la de mayor producción anual de energía. Por otro lado, cada metro cuadrado de área de rotor cuesta dinero, por lo que, por supuesto, es necesario obtener toda la energía que se pueda (mientras puedan limitarse los costes por kWh). (Asociación danesa de la industria eólica, 2003)

Estudio Comparativo de Aerogeneradores Eólicos de eje vertical y de eje horizontal.

IX. Metodología

Para llevar a cabo este estudio se empleará el método comparativo.

El método comparativo, se define como un procedimiento de investigación sistemático, basado en la diferencia de fenómenos, con la intención de establecer semejanzas y diferencias entre ellos. Como resultado pretende conseguir datos que lleven a la definición de un problema, al entendimiento de este e incluso búsqueda de posibles mejoras. La comparación es un método bastante eficaz para poner en práctica el conocimiento y las actitudes. Esto es posible demostrando en paralelo dos objetos o situaciones con leves diferencias y explicando las diferencias entre ellas.

Para realizar las pruebas de eficiencia eléctricas correspondientes, se utilizará el módulo eólico LeXsolar -Wind Professional, el cual se encuentra disponible en el laboratorio de energías renovables de la facultad de electrotecnia y computación.

Para la generación del viento, se utiliza una máquina de viento la cual está conectada al power module, cabe señalar que siempre debemos tener en cuenta la polaridad que se conectan los equipos para evitar que esto se dañen. Para determinar la velocidad del viento utilizaremos una fuente variable (Power Module) que va de 1V hasta los 12V en DC. Para medir la tensión de salida se ocupará un módulo AV el cual medirá el voltaje y la corriente de salida.

Este módulo cuenta con diferentes tipos de aspas, las que tienen un determinado ángulo de inclinación, las aspas tienen una parte redondeada que tiene que estar siempre hacia arriba, con esto se determina cuál es el tipo de aspas más eficiente para el aerogenerador de eje horizontal y para la medición del viento usaremos el anemómetro.

En el caso de la turbina eólica de eje vertical se utilizará la turbina eólica de tipo Savonius disponible en el módulo, en este caso se realizarán pruebas para determinar cuáles serían las condiciones óptimas de funcionamiento de las turbinas eólicas de eje vertical.

Una vez que se determinen todas las variables necesarias en cada uno de los aerogeneradores, se procederá a realizar una comparación entre ambos modelos, los cuáles consistirán en:

Estudio Comparativo de Aerogeneradores Eólicos de eje vertical y de eje horizontal.

- Influencia de la variación del viento en velocidad y ángulo de posicionamiento de las aspas, sobre la tensión de salida de los generadores.
- Comportamiento de las turbinas bajo carga con velocidad del viento constante.
- Eficiencia de la turbina con carga constante y variación del viento (Velocidad del Viento vs. Voltaje generado)

Para el resultado de nuestro análisis utilizaremos un instrumento de recolección de datos, el cual se encuentra disponible en los anexos.

X. Desarrollos de Experimentos

10.1 Influencia de la variación del viento en velocidad y ángulo de posicionamiento de las aspas, sobre la tensión de salida de los generadores.

La potencia captada por el aerogenerador se relaciona con la potencia disponible en el viento mediante el coeficiente de potencia C_p . Este se define como la relación entre la potencia mecánica extraída por la turbina y la potencia total del viento. Esto en combinación con el ángulo en que se encuentran distribuidas las aspas determinan cuanta potencia puede producir un aerogenerador. (Asociación danesa de la industria eólica, 2003)

Cabe señalar que en nuestro estudio comparativo contamos con la ayuda de un kit de entrenamiento eólico proporcionado por la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), ya que el acceso a realizar este tipo de prácticas a escala real conllevaría un inmenso gasto económico; además de una gran espera en caso de ser aprobada una visita a un parque eólico.

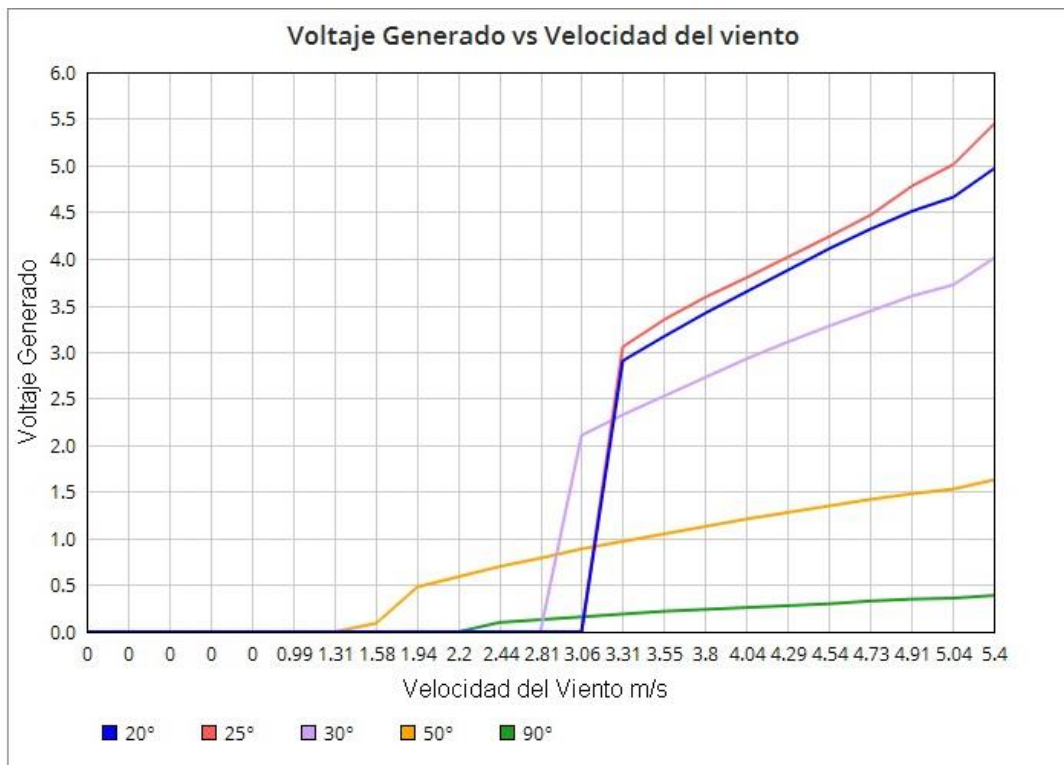
10.1.1 Medición de la variación del viento en aerogeneradores.

Esto se realiza utilizando un ventilador de corriente directa (DC) conectado a un variador de voltaje, con el fin de variar el voltaje de alimentación del ventilador y así obtener diferentes velocidades del viento. Las cuales se consiguen graduando el regulador de voltaje desde 0V hasta 12V.

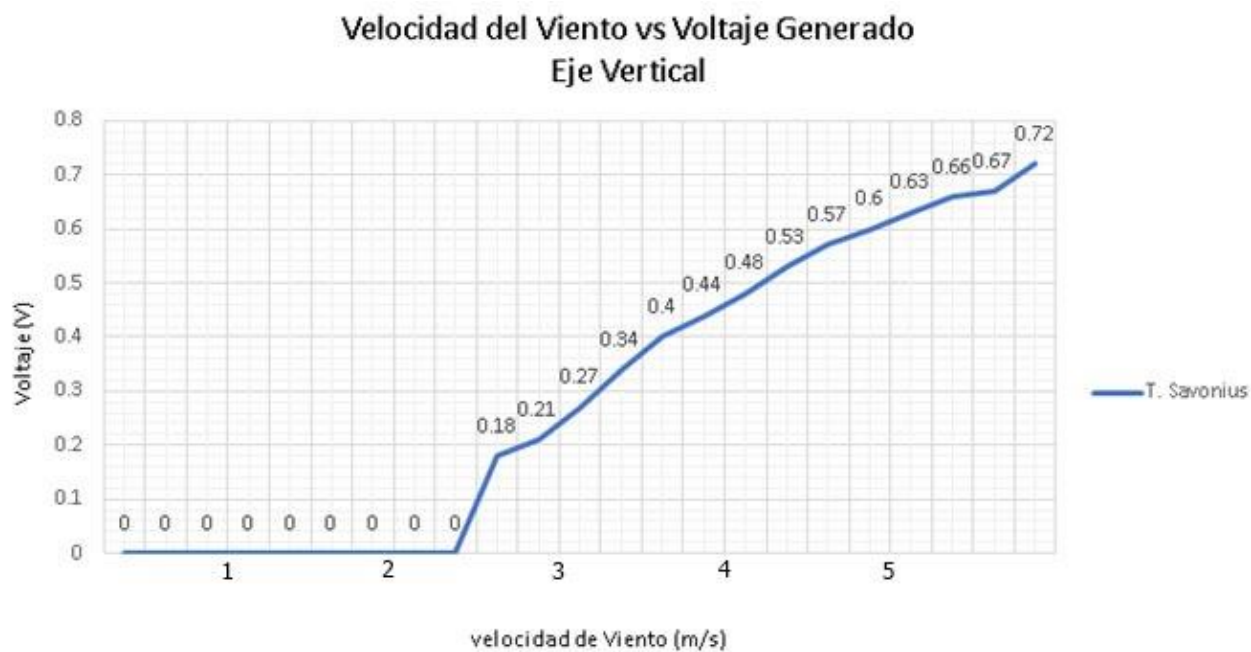
10.1.2 Como afecta la variación del viento y el ángulo de posicionamiento de las aspas a la tensión de salida.

El ángulo en que se encuentran posicionadas cada una de las aspas es igual de importante que la potencia del viento. El perfil aerodinámico hace que al incidir el viento perpendicularmente en ellas se genere una fuerza de sustentación que provoca el movimiento, y por consecuencia que el aerogenerador produzca energía. (Asociación danesa de la industria eólica, 2003)

Estudio Comparativo de Aerogeneradores Eólicos de eje vertical y de eje horizontal.



Gráficas 2. Velocidad del Viento vs Voltaje Generado (Eje Horizontal)



Gráficas 3. Velocidad del Viento vs Voltaje Generado (Eje Vertical)

Estudio Comparativo de Aerogeneradores Eólicos de eje vertical y de eje horizontal.

10.1.3 Observaciones del experimento

En la Gráfica 2 (aerogenerador tripala) y en la Gráfica 3 (aerogenerador Savonius) se puede observar el comportamiento que tuvieron cada uno de los modelos de aerogeneradores sometidos a prueba con el kit de entrenamiento Lex Solar-Wind profesional, tanto los de eje horizontal como de eje vertical. En la gráfica 2 se aprecia que, si bien es cierto que cuando las aspas de un aerogenerador de eje horizontal se encuentran en un ángulo de 50° (amarillo) de inclinación empiezan a producir energía eléctrica, pero esta generación no sobrepasa los 1.63V, mientras que con las aspas colocadas a un ángulo de 25° (naranja) son las que mejor aprovechan las corrientes de viento, produciéndose con estas mismas un total de 5.45v. Esto demuestra que este tipo de aerogeneradores generan grandes potencias por lo que deben ser instalados en zonas rurales.

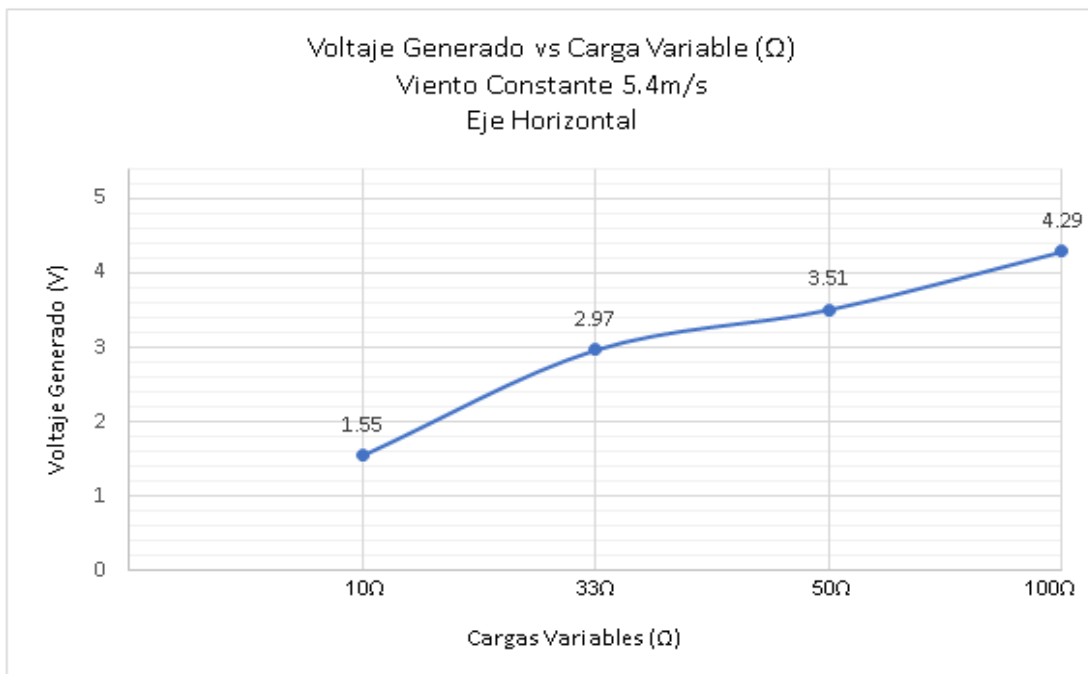
En el caso del rotor de tipo Savonius, como sabemos una de las principales características de este modelo es que empiezan a trabajar con corrientes de viento de menor intensidad, esto en consecuencia se verá reflejado en la generación de energía, ya que, en plena capacidad de viento apenas se logran producir 0.72V. Lo que comprueba la teoría de que estos tipos de aerogeneradores al tener poca capacidad de generación, son mayormente instalados en entornos urbanos.

Estudio Comparativo de Aerogeneradores Eólicos de eje vertical y de eje horizontal.

10.2 Comportamiento de las turbinas bajo carga con velocidad del viento constante.

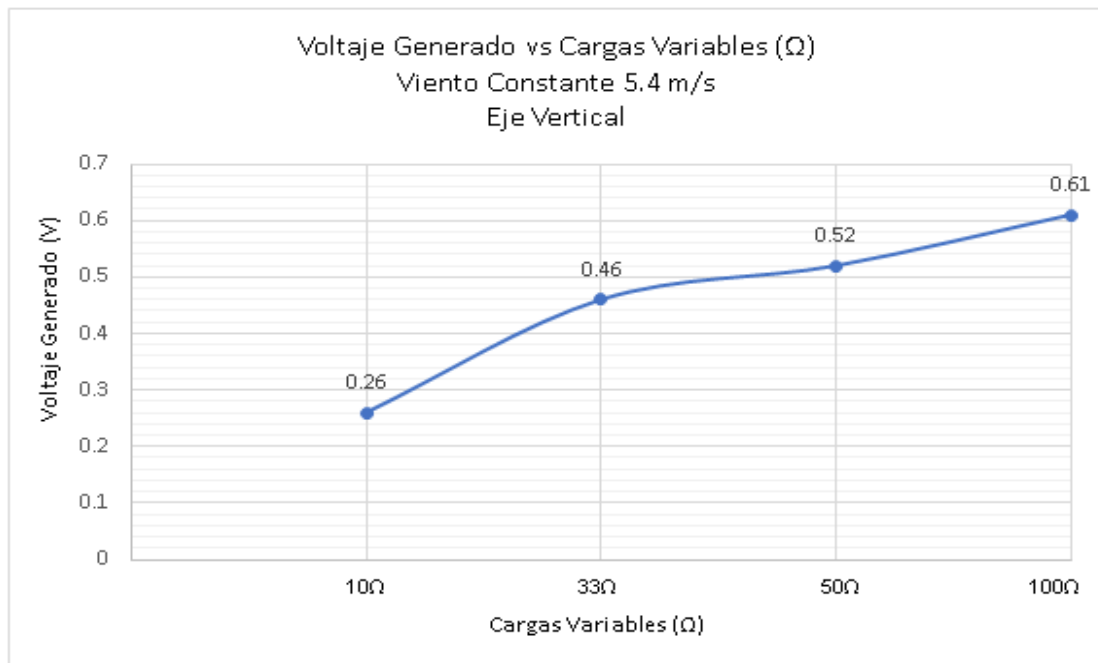
10.2.1 Generador Sincrónico bajo carga.

Existe diferencia de funcionamiento entre un generador en vacío y uno sometido a carga, ya que existe una composición de flujos, debido a las corrientes que circulan en el inducido, éstas alteran el valor y forma de la tensión inducida. Un incremento de carga es un incremento en la potencia real o la reactiva suministrada por el generador. Tal incremento de carga aumenta la corriente tomada del generador. Si no cambiamos la resistencia de campo, la corriente de campo se mantiene constante, y, por tanto, el flujo también es constantes, Adema si el motor primario mantuviera su velocidad constante, la magnitud del voltaje interno generado también sería constante. (Chapman, 2012)



Gráficas 4. Voltaje Generado vs Cargas Variables (Eje Horizontal)

Estudio Comparativo de Aerogeneradores Eólicos de eje vertical y de eje horizontal.



Gráficas 5. Viento Constante vs Cargas Variables (Eje Vertical)

10.2.2 Observaciones del experimento

Como se puede observar en esta práctica el comportamiento de los aerogeneradores tanto las de eje horizontal como las de eje vertical. Se demuestra lo que dice la teoría, que si la velocidad del primotor se mantiene constante; la magnitud del voltaje generado también se mantendrá estable.

Las pruebas se realizaron con vientos de 5.4 m/s y cargas de 10, 33, 50 y 100 ohms; y cada una se llevó a cabo durante 1 minuto para constatar si existían variaciones en el voltaje generado, resultando esto negativo.

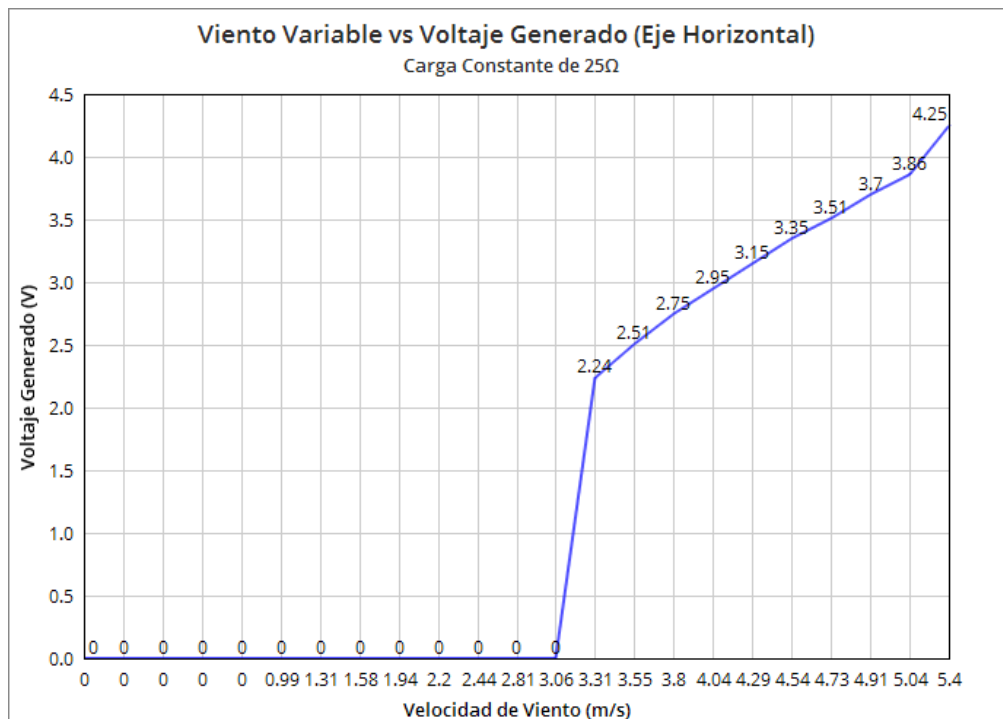
En el caso del aerogenerador tripala (gráfica 4) y el aerogenerador Savonius (gráfica 5) se aprecia el comportamiento que desarrollo la turbina, para ambos modelos se aplica el mismo principio de funcionamiento de la maquina síncrona. Durante las pruebas se usaron cargas fijas de 10, 33, 50 y 100 ohms. Como se observa al incrementar la carga en la salida del aerogenerador la turbina tiende a entregar un mayor voltaje de salida, esto obviamente para satisfacer la demanda a la cual se encuentra sometido. En esta prueba para constatar que el aerogenerador mantenía una magnitud constante en el voltaje de salida, estas se realizaron con una duración aproximada de no más de 2 minutos.

Estudio Comparativo de Aerogeneradores Eólicos de eje vertical y de eje horizontal.

10.3 Eficiencia de la turbina con carga constante y variación del viento.

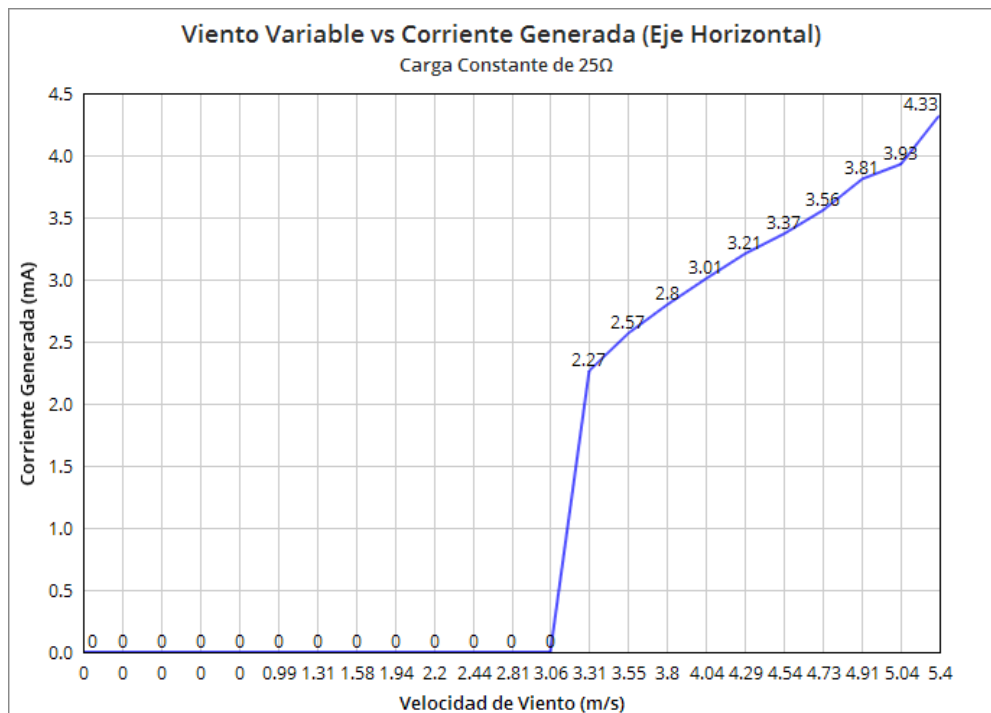
10.3.1 Generador Síncrono

Los generadores síncronos son dispositivos que convierten potencia mecánica de un primo motor en potencia eléctrica de AC, con un voltaje y frecuencia específicos. El término síncrono se refiere al hecho de que la frecuencia eléctrica de la máquina está confinada a, o sincronizada con, la tasa mecánica de rotación del eje. Esto traducido a los aerogeneradores se refiere a que la tensión generada está ligado directamente a la velocidad del viento, y como esta hace girar a las aspas de este mismo. (Chapman, 2012)

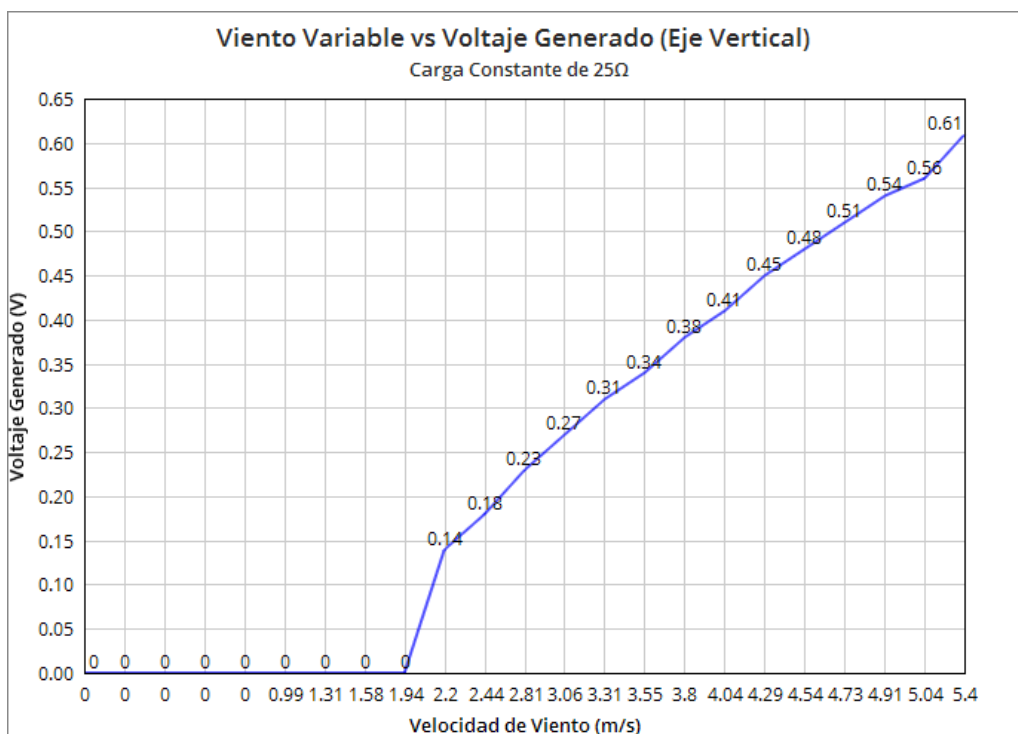


Gráficas 6. Viento Variable Vs Voltaje Generado con carga de 25 Ω (Eje Horizontal)

Estudio Comparativo de Aerogeneradores Eólicos de eje vertical y de eje horizontal.

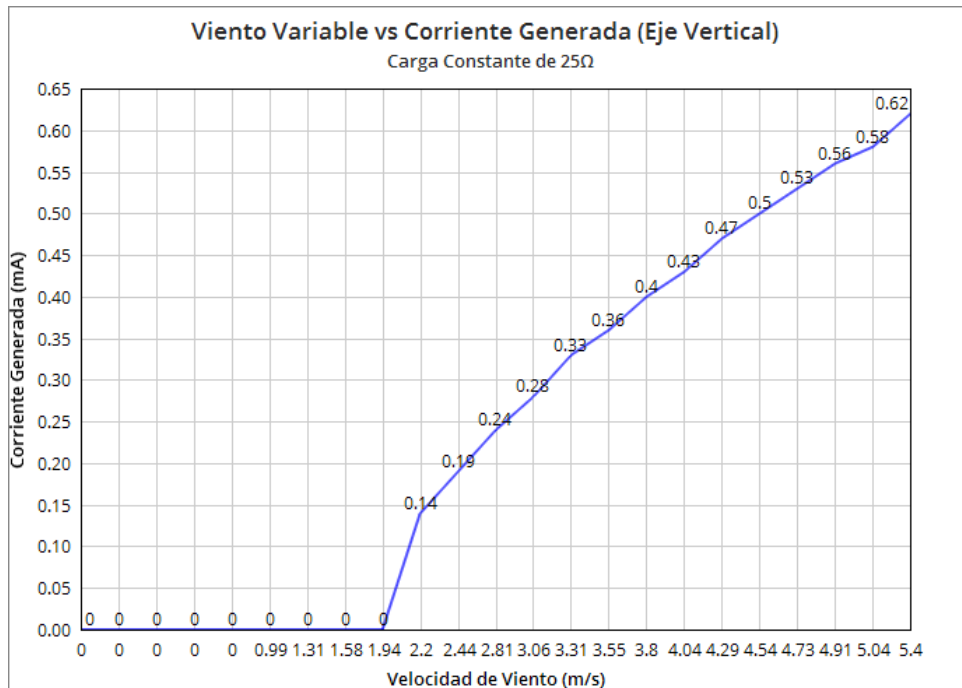


Gráficas 7. Viento Variable Vs Corriente Generada con carga de 25Ω (Eje Horizontal)



Gráficas 8. Viento Variable Vs Voltaje Generado con carga de 25Ω (Eje Vertical)

Estudio Comparativo de Aerogeneradores Eólicos de eje vertical y de eje horizontal.



Gráficas 9. Viento Variable Vs Corriente Generada con carga de 25Ω (Eje Vertical)

10.3.2 Observaciones del experimento

En el caso de tener cargas constantes, y con condiciones de viento variables supone un gran riesgo. Ya que se provocará una sobre producción para la carga sugerida. En los aerogeneradores a escala real se cuenta con una caja de cambios para regular la potencia de salida. Además de que se cuenta con controlador el cual se encarga de monitorear todos los datos de entrada del viento para regular la orientación de la turbina y el ángulo de posicionamiento de las aspas.

En la gráfica 6,7 y en la gráfica 8,9 se observa como el aerogenerador de eje horizontal (Tripala) y el aerogenerador Savonius, respectivamente, tienen un comportamiento ascendente en cuanto a la producción de voltaje, casi similares a los valores obtenidos en la prueba que se realizó con cargas variables. Esto como mencionamos anteriormente supone un gran riesgo, ya que la carga no aprovecharía todo el voltaje que estarían entregando los aerogeneradores. Y, por consecuencia, habría un desperdicio de potencia.

Estudio Comparativo de Aerogeneradores Eólicos de eje vertical y de eje horizontal.

XI. Conclusiones

En conclusión, mediante el desarrollo de este trabajo monográfico logramos determinar que:

- 11.1 El objetivo general de este estudio, fue determinar la eficiencia entre los aerogeneradores verticales y horizontales, obteniendo los siguientes resultados:
 - Existen diferentes modelos de aerogeneradores eólicos de eje horizontal y de eje vertical.
 - Logramos determinar que las turbinas de eje horizontal son de alta generación de energía utilizable en zona rurales; las de eje vertical son de baja generación de energía utilizable en zonas urbanas.
 - Logramos concluir que los más eficientes son los de eje horizontal, pero ambos tienen su utilidad en ambientes diferentes.
- 11.2 Existen diferentes modelos de aerogeneradores tanto de eje vertical como de eje horizontal, sin embargo, nuestro estudio está basado en los modelos Tripala y Savonius proporcionado por el kit de entrenamiento LeXsolar – Wind Profesional.
- 11.3 Los aerogeneradores de eje horizontal (Tripala) funcionan con aspas de 25° de inclinación, que con vientos de 5.4 m/s generó un voltaje de 5.45V; este tipo de turbina genera grandes potencias por lo que se usa en zona rurales; los aerogeneradores de eje vertical (Savonius) son turbinas cilíndricas de aspas cortada en formas de S, comienzan a funcionar con vientos de 2.2 m/s, cuando este alcanza velocidades máximas de 5.4 m/s genera un voltaje 0.72V, ellas funcionan con corrientes de viento de poca intensidad, propio de zonas urbanas.
- 11.4 Con los estudios realizados, podemos determinar que los aerogeneradores de eje horizontal son 7.5 veces más eficientes que los aerogeneradores de eje vertical, también contribuyen al no calentamiento global del planeta por ser una energía limpia.

Estudio Comparativo de Aerogeneradores Eólicos de eje vertical y de eje horizontal.

XII. Bibliografía

- Alvarez, C. (Septiembre de 2006). Energia Eolica . Obtenido de http://climantica.org/descargas/resource/GuiasEERREnergiaEolica_03.pdf.
- Asociación danesa de la industria eólica. (12 de Mayo de 2003). Obtenido de <http://xn--drmsttre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/tour/wres/pwr.htm>.
- Chapman, S. J. (2012). Maquinas Electrica Quinta Edicion . Mc Graw Hill.
- ENDESA, F. (s.f.). Generador Electrico. Obtenido de <https://www.fundacionendesa.org/es/recursos/a201908-generador-electrico.html#>
- Energia Eolica . (01 de 01 de 2011). Obtenido de <https://slideplayer.es/slide/107893/>
- Eolica, A. E. (2018). La eolica del mundo. Obtenido de <https://www.aeeolica.org/sobre-la-eolica/la-eolica-en-el-mundo>
- Eolico, G. (s.f.). Generadores Eolicos Horizontales. Obtenido de <https://www.generadoreolico.online/horizontales/>
- Geographic, N. (05 de Septiembre de 2010). El poder del viento. Obtenido de <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/el-poder-del-viento>
- Gomez, S. R. (13 de 07 de 2017). Estudio estructural del soporte de un aerogenerador. Obtenido de https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/27287/TFG_Sergio_Risueno_Gomez.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- IngeOexpert. (15 de Marzo de 2019.). Que es un aerogenerador y como funciona. Obtenido de <https://ingeoexpert.com/blog/2019/03/15/que-es-un-aerogenerador-y-como-funciona/>
- Machado, E., & Jarquin, E. (2014). Implementar y demostrar la cosntruccin de generador artesanal a pequeña escala para fomentar el uso de enrgia renovables de nuestro pais. Managua: Universidad Nacional de Ingenieria.
- Maradiaga, W., & Rocha, C. (2012). Diseño de un generador eolico de eje vertical para suministro electrico domiciliario. Managua: Universidad Nacional De Ingenieria.
- Nuñez, J. C. (2004). Diseño y construccion de un prototipo de generador eolico de eje vertical. . Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- Renovetec. (s.f.). Clasificacion de aerogenreadores. Obtenido de <http://www.mantenimientodeaerogeneradores.com/index.php/clasificacion-de-aerogeneradores>

Estudio Comparativo de Aerogeneradores Eólicos de eje vertical y de eje horizontal.

- Roman, A. L. (2012). Diseño de un aerogenerador para uso particular. Obtenido de https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/20245/TFG_Alvaro_Lucas_San_Roman.pdf?sequence=1
- Structuralia, B. (16 de Julio de 2018). Aerogeneradores de eje vertical y horizontal: tipos, ventajas e inconvenientes. Obtenido de <https://blog.structuralia.com/aerogeneradores-de-eje-vertical-y-horizontal-tipos-ventajas-e-inconvenientes>
- Technology), E. (. (7 de Enero de 2019). Turbinas sorprendentes que aspiran a escribir el futuro de la energía eólica. Obtenido de <https://ecoinventos.com/turbinas-eolicas-sorprendentes/>
- Turcan, N. (2015). Aerogenerador de viento. Manresa.

XIII. Anexos

13.1 Instrumento de Datos

Velocidad de viento y Voltaje Generado							
Velocidad del viento (m/s)	Voltaje (20°)	Voltaje (25°)	Voltaje(30°)	Voltaje(50°)	voltaje (90°)	Turbina Savonius	
0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	
0.99	0	0	0	0	0	0	
1.31	0	0	0	0	0	0	
1.58	0	0	0	0.09	0	0	
1.94	0	0	0	0.48	0	0	
2.2	0	0	0	0.59	0	0.18	
2.44	0	0	0	0.7	0.1	0.21	
2.81	0	0	0	0.79	0.13	0.27	
3.06	0	0	2.11	0.89	0.16	0.34	
3.31	2.91	3.06	2.33	0.97	0.19	0.4	
3.55	3.17	3.35	2.53	1.05	0.22	0.44	
3.8	3.42	3.59	2.73	1.13	0.24	0.48	
4.04	3.65	3.8	2.93	1.21	0.26	0.53	
4.29	3.88	4.02	3.11	1.28	0.28	0.57	
4.54	4.11	4.24	3.28	1.35	0.3	0.6	
4.73	4.32	4.47	3.44	1.42	0.33	0.63	
4.91	4.51	4.78	3.6	1.48	0.35	0.66	
5.04	4.66	5.01	3.72	1.53	0.36	0.67	
5.4	4.97	5.45	4.01	1.63	0.39	0.72	

Figura 35. Tablas de datos Velocidad vs Voltaje Generado

Estudio Comparativo de Aerogeneradores Eólicos de eje vertical y de eje horizontal.

Pruebas con Viento constante y Carga variable					
Viento	Cargas	Turbina de eje Horizontal		Turbina de eje Vertical	
m/s	Ω	V	I	V	I
5.4 m/s	10 ohms	1.55	147.2 mA	0.26	24.7 mA
5.4 m/s	33 ohms	2.97	89.7 mA	0.46	14.1 mA
5.4 m/s	50 ohms	3.51	71.5 mA	0.52	10.8 mA
5.4 m/s	100 ohms	4.29	43.1 mA	0.61	6.2 mA

Figura 36. Tablas de datos Viento Constante vs Carga Variable

Estudio Comparativo de Aerogeneradores Eólicos de eje vertical y de eje horizontal.

Pruebas con Carga constante (25 ohms) y Viento Variable				
Velocidad del viento	Turbina de eje horizontal		Turbina eje vertical	
(m/s)	V	I	V	I
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0.99	0	0	0	0
1.31	0	0	0	0
1.58	0	0	0	0
1.94	0	0	0	0
2.2	0	0	0.14	1.4 mA
2.44	0	0	0.18	1.9 mA
2.81	0	0	0.23	2.4 mA
3.06	0	0	0.27	2.8 mA
3.31	2.24 V	22.7 mA	0.31	3.3 mA
3.55	2.51 V	25.7 mA	0.34	3.6 mA
3.8	2.75 V	28 mA	0.38	4 mA
4.04	2.95 V	30.1 mA	0.41	4.3 mA
4.29	3.15 V	32.1 mA	0.45	4.7 mA
4.54	3.35 V	33.7 mA	0.48	5 mA
4.73	3.51 V	35.6 mA	0.51	5.3 mA
4.91	3.7 V	38.1 mA	0.54	5.6 mA
5.04	3.86 V	39.3 mA	0.56	5.8 mA
5.4	4.25 V	43.3 mA	0.61	6.2 mA

Figura 37. Tablas de datos Viento Constante vs Carga Variable

Estudio Comparativo de Aerogeneradores Eólicos de eje vertical y de eje horizontal.

13.2 Módulo Lex-Solar Wind Professional

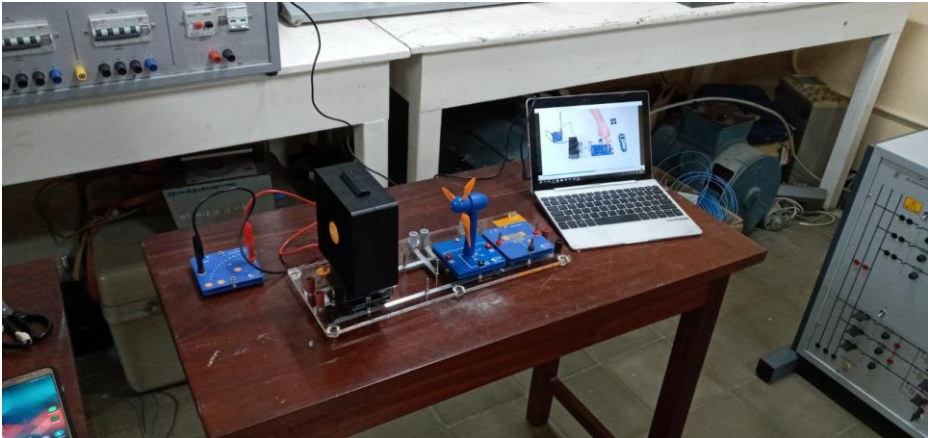


Figura 38. Turbina de eje horizontal



Figura 39. Turbina de eje vertical

Estudio Comparativo de Aerogeneradores Eólicos de eje vertical y de eje horizontal.



Figura 40. Turbina de eje vertical con cargas resistiva (1)

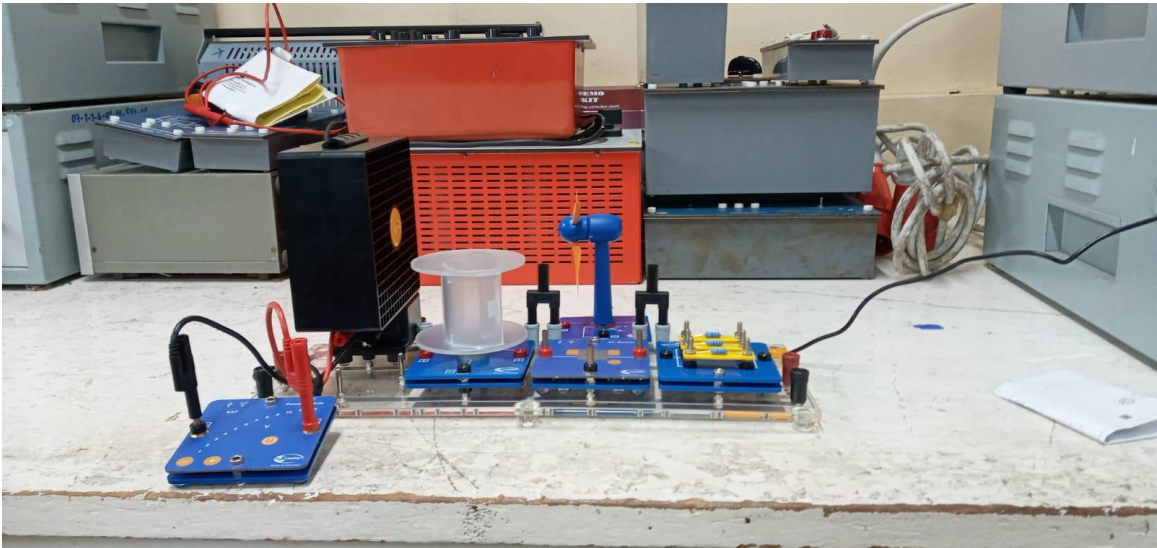


Figura 41. Turbina de eje vertical con cargas resistiva (2)

Estudio Comparativo de Aerogeneradores Eólicos de eje vertical y de eje horizontal.



Figura 42. Turbinas de eje horizontal con cargas resistiva (1)

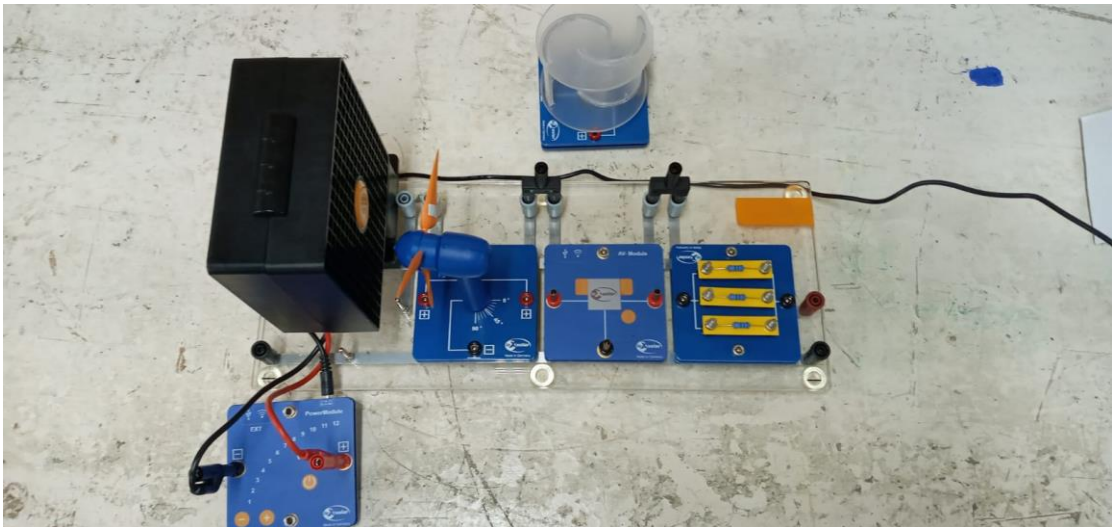


Figura 43. Turbina de eje horizontal con cargas resistivas (2)

Estudio Comparativo de Aerogeneradores Eólicos de eje vertical y de eje horizontal.

TABLA COMPARATIVA ENTRE AEROGENERADORES DE EJE HORIZONTAL (TRIPALA) Y DE EJE VERTICAL (SAVONIUS).	Aerogenerador de eje Horizontal	Aerogenerador de eje Vertical
		
Eficiencia con vientos fuertes	Alta	Baja
Eficiencia con vientos débiles	Baja	Alta
Superficie de barrido de viento	Amplia	Baja
Zona de instalación	Rural	Urbana (principalmente)
Mantenimiento	Complejo	Sencillo
Controlador de dirección del viento	Es necesario	No es necesario
Contaminación acústica/visual	Alta	Muy Baja
Potencia Generada.	Alta	Baja
Altura respecto al suelo	Gran altura	Poca Altura

Figura 44. Tabla Comparativa entre Aerogeneradores de eje horizontal y de eje vertical

TABLA DE LIMITACIONES DEL KIT EÓLICO LEX-SOLAR WIND PROFESSIONAL.	Aerogenerador de eje Horizontal	Aerogenerador de eje Vertical
		
Generación del viento.	La maquina de viento solo generaba 5,4m/s.	
Ángulo de inclinación de las aspas, formas de la aspas, tamaño de las aspas, material de fabricación de las aspas.	Se contaban con angulos de 20°, 25°, 30°, 50° y 90°. Fabricados con material PVC y con una longitud de 5cm.	Se contaba con un modelo Savonius. Fabricado con material PVC.
Limitación de las cargas.	Se contaban con cargas de 10Ω, 33Ω y 100Ω para las 2 turbinas	
Coefficiente de potencia	Dado que los resultados eran a escala es imposible calcular el coeficiente de potencia.	

Figura 45. Tabla de Limitaciones del Kit Eólico Lex- Solar Wind Professional