



UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA

ÁREA DE ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y LOS RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES



UNIDAD DE EFICIENCIA ENERGETICA

INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE ILUMINACIÓN
AUTOSUSTENTABLE ALIMENTADO POR UN AEROGENERADOR
ACCIONADO POR VIENTOS DE BAJA VELOCIDAD.”

TESIS DE GRADO PREVIA A LA
OBTENCION DEL TITULO DE
INGENIERO ELECTROMECAÁNICO

AUTOR:

Luis Felipe Valarezo Arellano

DIRECTOR:

Ing. Juan Pablo Cabrera Samaniego

Loja – Ecuador

2011

CERTIFICACIÓN

Ing.

Juan Pablo Cabrera Samaniego

DOCENTE DEL ÁREA DE LA ENERGÍA LAS INDUSTRIAS Y LOS RECURSOS
NATURALES NO RENOVABLES DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA

CERTIFICA:

Que la presente tesis de Ingeniería Electromecánica elaborada por el señor Luis Felipe Valarezo Arellano, con el tema “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE ILUMINACIÓN AUTOSUSTENTABLE ALIMENTADO POR UN AEROGENERADOR ACCIONADO POR VIENTOS DE BAJA VELOCIDAD.”, ha sido desarrollada bajo mi dirección, cumpliendo al momento con todos los requisitos de fondo y forma establecidos por los respectivos reglamentos e instructivos del Área de Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables, para los trabajos de esta categoría, por lo que autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.

Loja, octubre de 2011

Ing. Juan Pablo Cabrera Samaniego

DIRECTOR DE TESIS

AUTORÍA

Los criterios expuestos en el presente trabajo de tesis titulado “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE ILUMINACIÓN AUTOSUSTENTABLE ALIMENTADO POR UN AEROGENERADOR ACCIONADO POR VIENTOS DE BAJA VELOCIDAD.” Son de responsabilidad absoluta del autor, salvo las citas textuales que constan como tales en el desarrollo de la tesis

Luis Felipe Valarezo Arellano.

AUTOR

AGRADECIMIENTO

Expreso mi más sincero agradecimiento a la Universidad Nacional de Loja, al Área de Energía las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables y en especial a la Carrera de Ingeniería Electromecánica en la persona de sus dignas autoridades.

A Dios que me da la oportunidad de vivir esta etapa de mi vida, a mi familia y amigos quienes me apoyaron para salir adelante, a mis compañeros con quienes compartí las aulas y los anhelos de alcanzar nuestras metas profesionales.

A toda la planta docente de la carrera, en especial al Ing. Juan Pablo Cabrera Samaniego brillante profesional quien con sabiduría y dedicación dirigiera el desarrollo de la presente tesis

A todos los que creyeron en el logro de esta meta, mi más profundo agradecimiento.

DEDICATORIA

A Dios, Por haberme dado el valor, sabiduría y fortaleza suficiente para seguir adelante y culminar con éxito mi profesión.

A mis padres Ángel y Elina, a mis hermanos Ángel y Evelyn a todos ustedes dedico este triunfo, por su enorme sacrificio, pues con su impulso y apoyo incondicional supieron formar en mi valores de responsabilidad, humildad y sencillez, y me incentivaron a seguir adelante para concluir todas mis metas propuestas.

INDICE GENERAL

CERTIFICACIÓN	ii
AUTORÍA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
DEDICATORIA	v
ÍNDICE GENERAL	vi
1. RESUMEN	1
2. INTRODUCCIÓN	3
2.1. Problemática	3
2.1.1. Problemas específicos de investigación	4
2.2. Objetivos	5
2.2.1. Objetivo general	5
2.2.2. Objetivos específicos	5
2.3. Justificación	6
2.4. Viabilidad	6
3. REVISIÓN DE LITERATURA	7
3.1. Generalidades y hechos históricos sobre energía eólica	7
3.2. Como se produce y obtiene la energía del viento	12
3.2.1. Coste de la energía eólica	14
3.2.2. Producción por países	14
3.2.2.1. Energía eólica en Latinoamérica	16
3.2.2.2. Energía eólica en Ecuador	16
3.3. Aerogeneradores	17
3.3.1. La física de una instalación eólica	19
3.3.2. Aerogeneradores de eje horizontal	20
3.3.2.1. Control de potencia	21
3.3.2.2. Impacto sobre el medio	22
3.3.3. Aerogeneradores de eje vertical	22

3.3.4. Microgeneradores eólicos	24
3.3.5. Maquina savonius	25
3.3.6. Parámetros a tomarse en cuenta en microgeneradores	26
3.3.6.1. Configuración de las turbinas	26
3.3.6.2. Material de composición de las palas	26
3.3.6.3. Orientación	27
3.3.6.4. Robustez	27
3.3.6.5. Control de la potencia	27
3.3.6.6. Generadores	27
3.3.6.7. Modalidad de colocación y elección del lugar	28
3.3.7. Generación de electricidad	28
3.3.7.1. Sistemas DC	29
3.3.7.2. Sistemas CA	32
3.4. La tecnología LED	37
3.4.1. Generalidades	37
3.4.2. Aplicaciones	40
3.4.3. Conexión	41
3.4.4. Tecnología en iluminación LED	43
4. MATERIALES Y MÉTODOS	45
4.1. Introducción	45
4.2. Rotor	46
4.2.1. Tipo de rotor	46
4.2.2. Material de las palas del rotor	46
4.2.3. Ley de Betz	47
4.2.4. Análisis de la potencia en el viento	51
4.2.5. Análisis de la potencia en el rotor	51
4.2.6. Análisis de la potencia de generación mecánica y eléctrica	56
4.2.7. Dimensionamiento del rotor	56
4.2.8. Carcasa de toberas	58
4.2.9. Análisis de fuerzas en el rotor	61
4.3. Altura de la torre	63

4.4. Emplazamiento	64
4.5. Datos eólicos	64
4.6. Simulación de datos	64
4.7. Elección de la luminaria LED	64
4.8. Dimensionamiento de equipos eléctricos	65
5. RESULTADOS	68
5.1. Datos teóricos	68
5.1.1. Dimensionamiento del rotor	68
5.1.2. Dimensionamiento de carcasa de toberas	69
5.1.3. Cálculo de fuerzas en el rotor	70
5.1.4. Altura de la torre	72
5.1.5. Emplazamiento	73
5.1.6. Datos eólicos	74
5.1.7. Simulación de datos	75
5.1.8. Elección de la luminaria LED	77
5.1.9. Dimensionamiento de equipos eléctricos	79
5.2. Datos experimentales	83
5.3. Comparación de datos	95
5.4. Montaje	97
5.5. Evaluación económica	103
6. DISCUSIÓN	105
7. CONCLUSIONES	110
8. RECOMENDACIONES	112
9. BIBLIOGRAFÍA	114
10. ANEXOS	115

1. RESUMEN

El presente proyecto de tesis está encaminado a diseñar y construir un aerogenerador para alimentar una luminaria LED, y que el mismo pueda operar en las condiciones de viento establecidas para el sector donde se encuentra ubicada el AEIRNNR de la Universidad Nacional de Loja, por lo tanto se decidió llevar a cabo este trabajo de tesis de manera investigativa y practica con el fin de poder garantizar un diseño simple funcional y eficiente.

Este proyecto de tesis fue realizado mediante un estudio Teórico – Bibliográfico, el cual permitió establecer un marco teórico conceptual, mediante la revisión de normas técnicas, manuales de instalación, catálogos y modelos que nos permitieron conocer criterios para el diseño mecánico, eléctrico y electrónico de un aerogenerador para alimentación de luminarias LED

Una vez recogida y sistematizada la información, se analizó los criterios ingenieriles extraídos de trabajos antes realizados para de esta manera poder formar un criterio propio que mejore el funcionamiento del sistema tomando en cuenta las condiciones climáticas externas y la aplicación final para la que se va a diseñar. Finalmente el criterio formado nos ha llevado al diseño y construcción de un aerogenerador de eje vertical de multipala de cazoletas semicilíndricas con una carcasa de toberas cuyo objetivo es el de direccionar el viento para un mejor aprovechamiento del mismo, finalmente este generador alimentara a una luminaria LED en un sistema autónomo, es decir sin ninguna conexión a la red.

SUMMARY

This thesis project aims to design and build a wind turbine to power an LED lamp, and that it can operate in wind conditions established for the area where is located the AEIRNNR of the Universidad Nacional de Loja, therefore decided to carry out this thesis project in a research and practice in order to guarantee a simple design functional and efficient.

This thesis project was conducted with a theoretical study - Bibliography, which

allowed to establish a conceptual framework by reviewing technical standards, manuals, catalogs and models that allowed us to meet the design criteria for mechanical, electrical and electronic a wind turbine to power LED lights

Once collected and systematized information, discussed the engineering criteria drawn from work done before and in this way to form our own criteria to improve the functioning of the system, taking into account the external weather conditions and the final application to be design. Finally, the approach has been made to the design and construction of a vertical axis wind turbine multiblade of cups semi-cylindrical casing, nozzles whose objective is to address the wind to make better use of it, this generator finally fed to a LED luminaire on a standalone system, ie without any connection to the network.

2. INTRODUCCION

En la sociedad en la que vivimos es evidente el uso cada vez más agigantado de la valiosa energía eléctrica, indispensable para el buen vivir del hombre moderno. Desde hace muchos años atrás el hombre ha investigado nuevas formas de adquirir energía más barata, que no afecte al delicado medio ambiente y que a la vez no dependa de los combustibles fósiles. Esta lucha por la búsqueda de nuevas fuentes de energías ha abierto un gran camino para la investigación de energías limpias renovables que cada día crece y sorprende con cada vez nuevas utilidades que demandan menos gasto y mayor eficiencia.

La iluminación es un factor muy importante para la vida del hombre, y por esa misma importancia representa un gasto enorme para todos los países que tienen que consumir energía para iluminación pública, ahora todo sería más conveniente si este gasto diario se redujera significativamente con el empleo de energías alternativas, esta idea no es nueva ya que desde hace muchos años en países que gozan de potencial eólico se ha implementado el uso de esta energía para ayudar a que este gasto sea cada vez menor creando campos de recolección mediante aerogeneradores para producción de energía eléctrica.

Otro avance muy significativo y que crece cada día más es la tecnología de iluminación LED, que representa una gran opción para el remplazo de las actuales luminarias ya que consumen menos energía que las luminarias fluorescentes, y que con una correcta distribución de los diodos se pueden obtener una cantidad igual o superior de lúmenes que las convencionales y con un consumo de energía mucho menor

2.1. Problemática

Es importante aprovechar los recursos locales, y como es de conocimiento de todos que la provincia de Loja tiene un gran potencial eólico, que combinado con el avance de la tecnología en iluminación LED, nos daría una gran opción para utilizar este recurso como ayuda para aminorar el consumo diario que representa la iluminación pública. Ahora, partiendo de estos antecedentes y con la ayuda de los avances cada vez más

adelantados de la tecnología podemos diseñar y crear dispositivos que permitan una adecuada utilización del valioso potencial eólico que tenemos en nuestra provincia y aplicarlo para alimentar luminarias con tecnología LED autosuficientes que consuman esta energía que es gratis y no demanda gastos mayores.

En vista de que la universidad nacional de Loja, y específicamente en la carrera de Ingeniería electromecánica, es muy importante el estudio de energías alternativas como recursos energéticos, y es más importante aún si estos son aplicados para el desarrollo social de nuestra provincia, ayudándola en el aporte de proyectos que vinculen a nuestra universidad con las necesidades de nuestra sociedad. Es un reto encontrar la correcta utilización del potencial eólico de nuestra provincia y aplicarlo de manera eficiente para la iluminación pública, por esta razón se ha creído conveniente determinar el siguiente problema de investigación: ¿Cómo aprovechar de los vientos de baja velocidad para alimentar un sistema de iluminación basado en tecnología LED que permita su independencia de la red de distribución pública de energía eléctrica, para iluminación del área verde junto al boque uno del AEIRNNR de la Universidad Nacional de Loja?.

2.1.1. Problemas específicos de investigación

- La falta de conocimiento sobre la energía eólica y la tecnología LED.
- La determinación de la velocidad de los vientos existentes en el sitio específico de la aplicación.
- El diseño de iluminación LED acorde con los parámetros de eficiencia de iluminación para el sitio de la aplicación.
- El diseño de generación eólica eficiente que permita el mayor tiempo de funcionamiento posible.
- El acoplamiento eficiente en la construcción del aerogenerador con la luminaria LED, para que el sistema funcione de forma prevista por el diseño y los cálculos
- La falta de conocimiento sobre la relación de los resultados teóricos y prácticos después de construir el aerogenerador para alimentación de una luminaria LED.
- La falta de conocimiento sobre los parámetros de funcionamiento de la luminaria LED que permitan la correcta iluminación de parques y zonas estanciales con un menor consumo energético que el de las luminarias convencionales.

- La búsqueda de una forma de socialización correcta y comprensible que explique los resultados del proyecto

2.2.Objetivos

2.2.1. Objetivo general

- Diseñar y construir un sistema de iluminación autosustentable, alimentado por un aerogenerador accionado por vientos de baja velocidad, para iluminar el área verde junto al bloque uno ubicado en el AEIRNNR de la Universidad Nacional de Loja.

2.2.2. Objetivos específicos

- Sistematizar información que permita comprender la tecnología LED y el empleo del potencial eólico como fuente de energía.
- Determinar el régimen de vientos para el sitio de la aplicación
- Realizar el diseño de iluminación LED en función de los parámetros de eficiencia de iluminación requeridos para el lugar de la aplicación
- Realizar el diseño de generación eólica que permita el mayor tiempo de funcionamiento.
- Realizar la construcción y acoplamiento del aerogenerador a las expectativas de la luminaria LED y que funcione de forma prevista por el diseño y los cálculos.
- Realizar una relación comparativa de los resultados teóricos y prácticos.
- Indagar y escoger una luminaria LED que permita la correcta iluminación de parques y zonas estanciales con un menor consumo energético que el de las luminarias convencionales.
- Exponer y socializar de forma clara y concisa los resultados del proyecto.

2.3.Justificación

La elaboración del presente trabajo investigativo, pretende poner en práctica y al servicio de la sociedad todos los conocimientos adquiridos aplicándolos en el diseño y construcción de un aerogenerador que aproveche el potencial eólico de la ciudad de Loja, para alimentación de una luminaria LED de uso exterior.

La culminación de este trabajo nos permite determinar datos para comprobar la funcionalidad del dispositivo en lo que respecta a tiempo de funcionamiento y eficiencia, utilizando como única fuente de alimentación el potencial eólico de la ciudad de Loja.

Hemos tomado como base el SAMOT, el cual es un modelo pedagógico implementado en nuestra universidad, ya que relaciona la teoría con la práctica, y permite la interacción permanente de la colectividad que en este caso son todos los actores involucrados del tema, con el objeto de estudio.

El investigador como egresado de la carrera en Ingeniería Electromecánica está capacitado para poder cumplir la meta planteada, ya que a lo largo de la carrera universitaria pudo adquirir conocimientos importantes en materias de Electricidad, maquinas eléctricas, diseño eléctrico y electrónico, energías renovables, y eficiencia energética, las cuáles se las aplicaran para el desarrollo del proyecto, y así también para reforzar conocimientos, que luego se los aplicara en la vida profesional.

2.4.Viabilidad

Para la realización del presente trabajo investigativo se dispone del tiempo necesario, de los recursos humanos, materiales y económicos, además de la bibliografía especializada que permitirá obtener el cumplimiento de los objetivos planteados.

Contando con todos estos recursos, la investigación puede ejecutarse de una manera satisfactoria. El desarrollo del presente proyecto permite interactuar con los conocimientos adquiridos en todos los módulos cursados de la carrera de ingeniería electromecánica, y así ayudar en la formación del investigador en el desempeño profesional.

3. REVISION DE LITERATURA

3.1. Generalidades y hechos históricos sobre la energía eólica.

Una turbina eólica es una máquina capaz de transformar la energía del aire en cualquier otro tipo de energía, tanto mecánica como eléctrica. Este tipo de máquinas ha tenido una evolución muy rápida y espectacular, ya que sus orígenes eran equipos muy rudimentarios los cuales fueron desarrollados en distintas formas geométricas, tamaños y usos. En un principio este tipo de aerogenerador se usaba para realizar trabajos exclusivamente mecánicos principalmente para moler granos, aserrar madera y para el regadío de campos. (figura 1).



Figura 1. Posible inicio de los aerogeneradores

Posteriormente, a partir del siglo XIII, los molinos aparecieron y se extendieron por toda Europa, sobre todo en Bélgica y los Países Bajos. Los molinos de Holanda tienen 4 aspas de lona, mientras que los de Baleares y Portugal tienen 6 y los de Grecia 12.

El desarrollo de los molinos de viento se interrumpe con la revolución industrial. Se hace masiva la utilización del vapor, aparece la electricidad y los combustibles fósiles como fuentes de energía motriz. Es, sin embargo, en la segunda mitad del siglo XIX

cuando tiene lugar uno de los más importantes avances en la tecnología del aprovechamiento del viento: la aparición del popular modelo “multipala americano”. Este modelo, utilizado para bombeo de agua prácticamente en todo el mundo, habría de sentar las bases para el diseño de los modernos generadores eólicos.

El primer aerogenerador capaz de generar corriente continua fue fabricado por Charles Brush en los años 1886-87 (figura 2). Tenía un rotor de 17 m de diámetro y estaba constituido por 144 palas de madera (multipala americano). Podía generar hasta 12 kW de potencia.

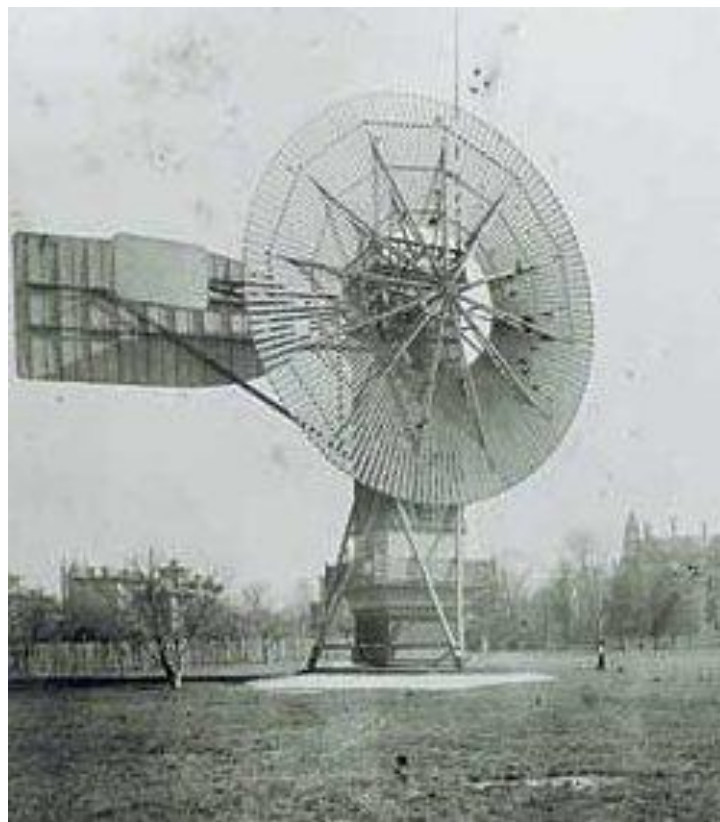


Figura 2. El primer aerogenerador.

Fue entre las guerras mundiales cuando los aerogeneradores empezaron a aparecer con mayor frecuencia, como consecuencia de los progresos técnicos de las hélices de aviación y con ellas los proyectos de grandes aerogeneradores de dos o tres palas. La primera tendencia fue construir bipalas, ya que resultaban más económicos. Incluso se pensó en utilizar una única pala equilibrada con un contrapeso.

Actualmente predominan los molinos tripalas. Estos aerogeneradores giran más rápidamente que los multipalas americanos, lo que constituye una ventaja cuando se trata de alimentar máquinas de gran velocidad de rotación como los alternadores eléctricos. Adicionalmente los estudios aerodinámicos revelaron que el tripala es el compromiso adecuado en cuanto a precio y estabilidad en la rotación del rotor.

Los aerogeneradores de eje vertical derivan indirectamente del primer molino de viento utilizado por la civilización persa en el año 600 d.C.

En 1925 el finés J. Savonius fue el primero en utilizar este concepto para estructurar su homónimo rotor vertical en la generación eléctrica. Más exitoso que el anterior fue el rotor de eje vertical patentado en 1931 en EEUU por el ingeniero francés Darrieus y luego cayó en un olvido casi total. Su estudio volvió a iniciarse en Canadá en 1973 y en Estados Unidos a partir de 1975 ya que estas máquinas, de 1 a 60 kW, podían construirse a precios inferiores al de los molinos de viento clásicos de eje horizontal. En EEUU, los laboratorios Sandia en Albuquerque (Nuevo México) estudiaron y comercializaron los molinos de viento Darrieus.

En Crimea (Rusia), frente al mar muerto, en 1931 se puso en funcionamiento un aerogenerador de 30 metros, que tenía que proporcionar 100 kW a la red de Sebastopol. El promedio durante dos años fue de 32 kW.

En 1941 la NASA construyó un bipala de 53 m de diámetro, previsto para una potencia máxima de 1250 kW que se instaló en Vermont, en el nordeste de EEUU. Las primeras pruebas, iniciadas en octubre de 1941, continuaron durante unos 15 meses. Un pequeño accidente en 1943 bloqueó la máquina durante dos años, debido a que las dificultades ligadas a la guerra retrasaron la fabricación de piezas nuevas. Vuelto a poner en marcha, el aerogenerador proporcionó energía al sector durante veintitrés días, luego se rompió una de las palas y se abandonó el proyecto.

En 1956, en Dinamarca, se construyó el primer aerogenerador de corriente alterna: el Gedser (figura 3). Tenía muchas innovaciones tecnológicas, no sólo en lo que concierne a la generación de electricidad, sino también en el campo de la aerodinámica y sistema de control (frenos aerodinámicos y regulación por pérdida de velocidad).



Figura 3. El primer aerogenerador de corriente alterna.

En 1975 se pusieron en servicio los aerogeneradores Mod-0 con unas palas de metal con un diámetro de 38 m, produciendo 100 kW. En 1977 se construyó el Mod-0A que tenía 200 kW. La General Electric terminó el bipala Mod-1 en 1978 que con un diámetro de 60 m acciona un alternador de 2MW.

En Francia, un vasto programa patrocinado por la Electricité de France, realizó un estudio del viento en todas las regiones y construyó varios grandes aerogeneradores experimentales. El aerogenerador “Best-Romani” tripala de 30 m de diámetro con capas de aleación ligera fue instalado en Nogent le Roy (Beauce). Podía proporcionar 800 kW a la red con un viento de

60 Km/h. Esta máquina experimental aportó, entre 1958 y 1962, mucha información sobre su funcionamiento en condiciones reales de explotación. La compañía Neyrpic instaló en Saint Rémy des Landes (Manche) dos aerogeneradores de tres palas. El primero de 21 m de diámetro que producía 130 kW de potencia, funcionó hasta marzo de 1966. El otro, de 35 m, previsto para producir 1000 kW, proporcionó una potencia

satisfactoria durante las pruebas, pero a la ruptura de un palier en 1964 hizo que se abandonase el programa de estudios.

Los primeros grandes aerogeneradores se encuentran en los Estados Unidos, donde ya en 1941 había uno cuya hélice pesaba 7000 kg y tenía un diámetro de 53 m. Desde 1973, y bajo la responsabilidad de la NASA, los Estados Unidos reanudaron la construcción de aerogeneradores gigantes. Los dos más grandes miden 61 y 91 m de diámetro y funcionan desde 1978 en Boone (Ohio) y Barstow (California). Producen de 2000 a 2500 kW de electricidad respectivamente.

El bajo precio del petróleo determinó entonces la suspensión total de los grandes proyectos en todo el mundo. Pero en la década de los setenta, coincidiendo con la primera crisis del petróleo, se inició una nueva etapa en el aprovechamiento de la energía eólica. Las aplicaciones de las modernas tecnologías, y en especial de las desarrolladas para la aviación, dieron como resultado la aparición de una nueva generación de máquinas eólicas muy perfeccionadas que permitieron su explotación, bajo criterios de rentabilidad económica, en zonas de potencial eólico elevado. En aquel momento se estimaba, en efecto, que esta energía renovable podría proporcionar energía a las redes eléctricas a un precio igual o inferior al de las centrales térmicas. Ello sería pronto una realidad con la puesta en servicio de grandes aerogeneradores que producirían potencias eléctricas comprendidas entre 2 y 5 MW. Hay que considerar que eran tiempos en que se empezaba a tomar en serio el hecho de que los yacimientos petrolíferos no durarían eternamente.

Hasta la fecha el aerogenerador instalado más grande es el E-112 de la empresa alemana Enercon (figura 4). Es un aerogenerador de eje horizontal con un rotor de 112 m de diámetro y puede generar una potencia de 4,5[MW]. Su generador es de tipo sincrónico especialmente dimensionado para evitar la utilización de una caja mecánica amplificadora de RPM. Evitar esta componente mecánica es ventajoso por la mejora sustancial de la eficiencia global del aerogenerador en la conversión de energía



Figura 4. E-112: el aerogenerador más grande del mundo.

3.2. Como se produce y obtiene la energía del viento

La energía del viento está relacionada con el movimiento de las masas de aire que se desplazan de áreas de alta presión atmosférica hacia áreas adyacentes de baja presión, con velocidades proporcionales al gradiente de presión.

Los vientos son generados a causa del calentamiento no uniforme de la superficie terrestre por parte de la radiación solar, entre el 1 y 2% de la energía proveniente del sol se convierte en viento. De día, las masas de aire sobre los océanos, los mares y los lagos se mantienen frías con relación a las áreas vecinas situadas sobre las masas continentales.

Los continentes absorben una menor cantidad de luz solar, por lo tanto el aire que se encuentra sobre la tierra se expande, y se hace por lo tanto más liviana y se eleva. El aire más frío y más pesado que proviene de los mares, océanos y grandes lagos se pone en movimiento para ocupar el lugar dejado por el aire caliente.

Para poder aprovechar la energía eólica es importante conocer las variaciones diurnas y nocturnas y estacionales de los vientos, la variación de la velocidad del viento con la altura sobre el suelo, la entidad de las ráfagas en espacios de tiempo breves, y valores máximos ocurridos en series históricas de datos con una duración mínima de 20 años. Es también importante conocer la velocidad máxima del viento. Para poder utilizar la energía del viento, es necesario que este alcance una velocidad mínima que depende del aerogenerador que se vaya a utilizar pero que suele empezar entre los 3 m/s (10 km/h) y los 4 m/s (14,4 km/h), velocidad llamada "*cut-in speed*", y que no supere los 25 m/s (90 km/h), velocidad llamada "*cut-out speed*".

La energía del viento es utilizada mediante el uso de máquinas eólicas (o aeromotores) capaces de transformar la energía eólica en energía mecánica de rotación utilizable (figura 1), ya sea para accionar directamente las máquinas operatrices, como para la producción de energía eléctrica. En este último caso, el sistema de conversión, (que comprende un generador eléctrico con sus sistemas de control y de conexión a la red) es conocido como aerogenerador.

En la actualidad se utiliza, sobre todo, para mover aerogeneradores. En estos la energía eólica mueve una hélice y mediante un sistema mecánico se hace girar el rotor de un generador, normalmente un alternador, que produce energía eléctrica. Para que su instalación resulte rentable, suelen agruparse en concentraciones denominadas parques eólicos (figura 5)



Figura 5. Parque eólico

3.2.1. Coste de la energía eólica

El coste de la unidad de energía producida en instalaciones eólicas se deduce de un cálculo bastante complejo. Para su evaluación se deben tener en cuenta diversos factores, entre los cuales cabe destacar:

- El coste inicial o inversión inicial, el costo del aerogenerador incide en aproximadamente el 60 a 70%. El costo medio de una central eólica es, hoy, de unos 2000 Dolares por kW de potencia instalada y variable según la tecnología y la marca que se vayan a instalar ("*direct drive*", "síncronas", "asíncronas", "generadores de imanes permanentes"...);
- Debe considerarse la vida útil de la instalación (aproximadamente 20 años) y la amortización de este costo;
- Los costos financieros;
- Los costos de operación y mantenimiento (variables entre el 1 y el 3% de la inversión);

La energía global producida en un período de un año, es decir el denominado factor de planta de la instalación. Esta se define en función de las características del aerogenerador y de las características del viento en el lugar donde se ha emplazado. Este cálculo es bastante sencillo puesto que se usan las "curvas de potencia" certificadas por cada fabricante y que suelen garantizarse a entre 95-98% según cada fabricante. Para algunas de las máquinas que llevan ya funcionando más de 20 años se ha llegado a respetar 99% de las curvas de potencia.

3.2.2. Producción por países

Existe una gran cantidad de aerogeneradores operando, con una capacidad total de 159.213 MW, de los que Europa cuenta con el 47,9% (2009). EE.UU. y China, juntos, representaron 38,4% de la capacidad eólica global. Los cinco países (EE.UU., China, Alemania, España e India) representaron 72,9% de la capacidad eólica mundial en 2009, ligeramente mayor que 72,4% de 2008. La Asociación Mundial de Energía Eólica (*WorldWindEnergyAssociation*) anticipa que una capacidad de 200.000 MW será superada en el 2010. (Tabla 1)

En 2006, la instalación de 7,588 MW en Europa supuso un incremento del 23% respecto a la de 2005.

Tabla 1: Capacidad total de energía eólica instalada por países

Capacidad total de energía eólica instalada (fin de año y últimas estimaciones)						
		Capacidad (MW)				
Posición	País	2009	2008	2006	2005	2004
1	USA	32.919	25.170	11.603	9.149	6.725
2	Alemania	25.030	23.903	20.622	18.428	16.628
3	China	20.000	12.210	2.405	1.260	764
4	España	(13%) 18.263	16.754	11.730	10.028	8.504
5	India	10.742	9.654	6.270	4.430	3.000
6	Francia	4.655	3.404	1.567	757	386
7	Italia	4.547	3.736	2.123	1.717	1.265
8	Reino Unido	4.015	3.241	1.963	1.353	888
9	Dinamarca	(20%) 3.384	3.180	3.136	3.128	3.124
10	Portugal	(15%) 3.374	2.862	1.716	1.022	522
11	Canadá	3.301				
12	Países Bajos	2.220				
13	Japón	1.980				
14	Australia	1.494				
15	Grecia	1.062				
16	Suecia	1.021				
17	Irlanda	1.002				
18	Austria	995				
19	Turquía	635				
20	Brasil	634				
	Total mundial	140.951	120.791	73.904	58.982	47.671

Alemania, España, Estados Unidos, India y Dinamarca han realizado las mayores inversiones en generación de energía eólica. Dinamarca es, en términos relativos, la más destacada en cuanto a fabricación y utilización de turbinas eólicas, con el compromiso realizado en los años 1970 de llegar a obtener la mitad de la producción de energía del país mediante el viento. Actualmente genera más del 20% de su electricidad mediante aerogeneradores, mayor porcentaje que cualquier otro país, y es el quinto en producción total de energía eólica, a pesar de ser el país número 56 en cuanto a consumo eléctrico.

3.2.2.1.Energía eólica en Latinoamérica

El desarrollo de la energía eólica en Latinoamérica está en sus comienzos, llegando la capacidad conjunta instalada en estos países a los 927 MW (datos de julio de 2010). A fecha de 2010, el desglose de potencia instalada por países y su porcentaje sobre el total de cada país es el siguiente:

- Brasil: 634 MW (0,4%)
- México: 85 MW (0,17%)
- Costa Rica: 70 MW (2,8%)
- Nicaragua 40 MW (5%)
- Argentina: 29 MW (0,1%)
- Uruguay: 20 MW (0,8%)
- Chile: 20 MW (0,2%)
- Colombia: 20 MW (0,1%)
- Cuba: 7,2 MW (0,05%)
- Ecuador: 2,4 MW (0,05%)
- Perú: 0 MW (0%)
- Venezuela: 0 MW (0%)

3.2.2.2.Energía eólica en Ecuador

El primer parque eólico del país se inauguró en octubre del 2007 en la isla San Cristóbal del Archipiélago de Galápagos, con una potencia instalada de 2,4 MW. Y se espera que en 2010 esté en operación un segundo parque eólico ubicado en otra de las islas del Archipiélago de Galápagos, proyecto Baltra – Santa Cruz, con una potencia instalada de 3,2 MW.

Dada la relevancia medioambiental del Archipiélago de Galápagos, el MEER se ha establecido como meta satisfacer toda la demanda eléctrica con energías renovables.

Las expectativas de potencia instalada en generación eólica para el 2015 que perfila el MEER, se encuentran entre los 40 y 50 MW:

Además, en 2009 se comenzó a trabajar en desarrollar el atlas eólico de Ecuador, con la finalidad de hacerlo accesible y publicarlo en la Web del MEER. A pesar de no disponer de la herramienta de evaluación del recurso eólico, está previsto el desarrollo de proyectos eólicos en aquellas localizaciones en las cuales hay referencias históricas de vientos constantes, se han realizado estudios de factibilidad y están a la espera de financiación. (Tabla 2)

Tabla2. Proyectos previstos de generación eólica en Ecuador (Fuente: MEER).

OPORTUNIDADES EOLICAS EN GALÁPAGOS	
San Cristóbal	2,4 MW
Baltra	2,25 MW hasta 12 MW
OPORTUNIDADES EOLICAS EN EL PAÍS	
Salinas	15 MW
Huascachaca	30 MW
Villonaco	15 MW
Las Chinchas	10 MW
Membrillo	45 MW

3.3. Aerogeneradores

Un aerogenerador es un generador eléctrico movido por una turbina accionada por el viento (turbina eólica). Sus precedentes directos son los molinos de viento que se empleaban para la molienda y obtención de harina. En este caso, la energía eólica, en realidad la energía cinética del aire en movimiento, proporciona energía mecánica a un rotor hélice que, a través de un sistema de transmisión mecánico (Figura 6), hace girar el rotor de un generador, normalmente un alternador trifásico, que convierte la energía mecánica rotacional en energía eléctrica.

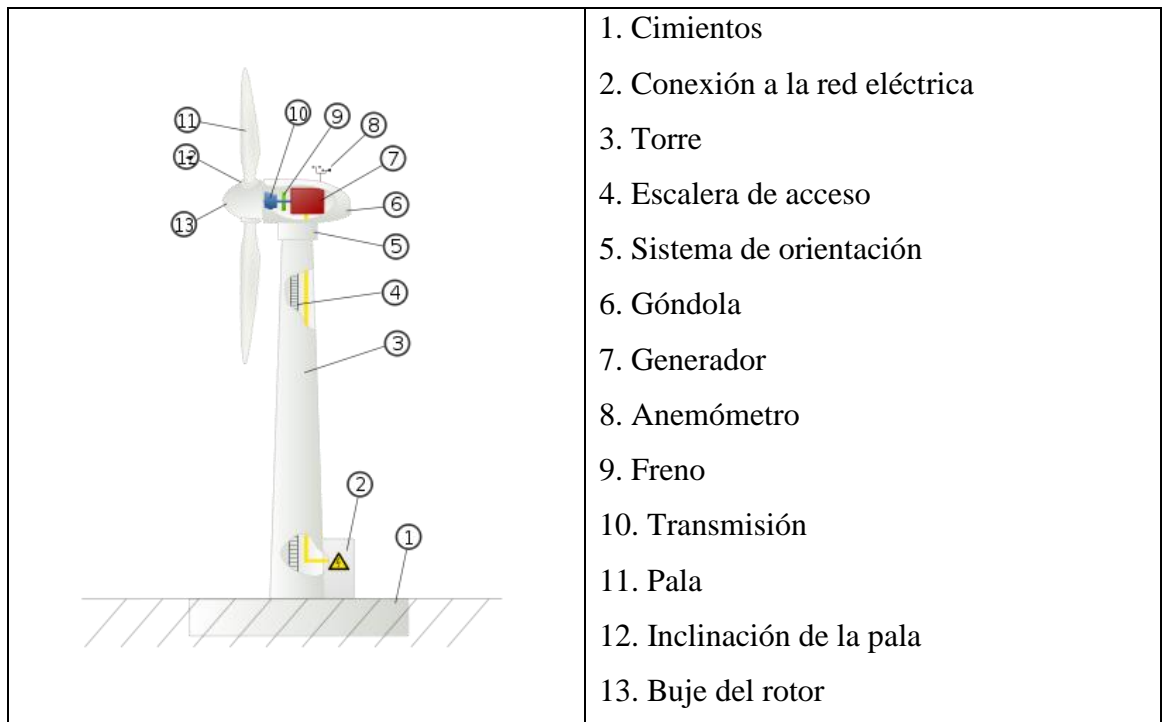


Figura 6. Componentes de un aerogenerador

Existen diferentes tipos de aerogeneradores, dependiendo de su potencia, la disposición de su eje de rotación, el tipo de generador, etc.

Los aerogeneradores pueden trabajar de manera aislada o agrupados en parques eólicos o plantas de generación eólica, distanciados unos de otros, en función del impacto ambiental y de las turbulencias generadas por el movimiento de las palas.

Para aportar energía a la red eléctrica, los aerogeneradores deben estar dotados de un sistema de sincronización para que la frecuencia de la corriente generada se mantenga perfectamente sincronizada con la frecuencia de la red.

Ya en la primera mitad del siglo XX, la generación de energía eléctrica con rotores eólicos fue bastante popular en casas aisladas situadas en zonas rurales.

En Europa se distingue claramente un modelo centro-europeo, donde los aerogeneradores llegan a ubicarse en pequeñas agrupaciones en las cercanías de las ciudades alemanas, danesas, neerlandesas, y un modelo español, donde los aerogeneradores forman agrupaciones (a veces de gran tamaño) en las zonas

montañosas donde el viento es frecuente, normalmente alejadas de los núcleos de población.

La energía eólica se está volviendo más popular en la actualidad, al haber demostrado la viabilidad industrial, y nació como búsqueda de una diversificación en el abanico de generación eléctrica ante un crecimiento de la demanda y una situación geopolítica cada vez más complicada en el ámbito de los combustibles tradicionales.

3.3.1. La física de una instalación eólica

Las turbinas eólicas – llamadas aerogeneradores – utilizan la energía cinética producida por un **flujo de aire** con densidad ρ que atraviesa el rotor (formado por las palas y el buje) del aerogenerador, reduciendo su velocidad desde el valor v no perturbado frente al rotor, a un valor inferior tras pasar por las palas. La diferencia de velocidad de la masa de aire en la entrada y en la salida del rotor se refleja, siendo constante el caudal del fluido a través de las palas en una diferencia en el área ocupada por la masa de aire, y mide justo la cantidad de energía cinética que mueve el rotor y el correspondiente generador eléctrico. La potencia extraíble de una turbina eólica se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$P = r/2 C_p h A v^3 \quad (1)$$

Dónde:

P = potencia medida en Vatios

r = densidad de la masa de aire medida en kg/m^3

C_p = coeficiente de potencia máximo de una turbina ideal de eje horizontal, igual
 $16/27 = 0.593$

h = eficiencia mecánica y eléctrica de la turbina

A = área circular de movimiento de las palas del rotor y en la que se mueve la
masa de aire expresada en m^2

v = velocidad de la masa de aire antes de pasar por las palas, medida en m/s

La potencia extraíble del recurso viento a través de un aerogenerador crece al aumentar el área cubierta por las palas (por lo tanto al aumentar su longitud), y la velocidad del viento; depende, además, de la densidad del aire, en función de las condiciones meteorológicas del lugar (temperatura, humedad,...).

3.3.2. Aerogeneradores de eje horizontal

Son aquellos en los que el eje de rotación del equipo se encuentra paralelo al piso. Ésta es la tecnología que se ha impuesto, por su eficiencia y confiabilidad y la capacidad de adaptarse a diferentes potencias.

Las partes principales de un aerogenerador de eje horizontal son:

- Rotor: las palas del rotor, construidas principalmente con materiales compuestos, se diseñan para transformar la energía cinética del viento en un momento torsor en el eje del equipo. Los rotores modernos pueden llegar a tener un diámetro de 42 a 80 metros y producir potencias equivalentes de varios MW. La velocidad de rotación está normalmente limitada por la velocidad de punta de pala, cuyo límite actual se establece por criterios acústicos.
- Caja de engranajes o multiplicadora: puede estar presente o no dependiendo del modelo. Transforman la baja velocidad del eje del rotor en alta velocidad de rotación en el eje del generador eléctrico.
- Generador: existen diferentes tipos dependiendo del diseño del aerogenerador. Pueden ser síncronos o asíncronos, jaula de ardilla o doblemente alimentados, con excitación o con imanes permanentes.
- La torre: sitúa el generador a una mayor altura, donde los vientos son de mayor intensidad y para permitir el giro de las palas y transmite las cargas del equipo al suelo.
- Sistema de control: se hace cargo del funcionamiento seguro y eficiente del equipo, controla la orientación de la góndola, la posición de las palas y la potencia total entregada por el equipo.

Todos los aerogeneradores de eje horizontal tienen su eje de rotación principal en la parte superior de la torre, que tiene que orientarse hacia el viento de alguna manera. Los aerogeneradores pequeños se orientan mediante una veleta, mientras que los más grandes utilizan un sensor de dirección y se orientan por servomotores. Dado que la velocidad de rotación de las aspas es baja, la mayoría hacen uso de una caja reductora para aumentar la velocidad de rotación del generador eléctrico.

En general, la hélice está emplazada de tal manera que el viento, en su dirección de flujo, la encuentre antes que a la torre (rotor a barlovento). Esto disminuye las cargas adicionales que genera la turbulencia de la torre en el caso en que el rotor se ubique detrás de la misma (rotor a sotavento). Las palas de la hélice se montan a una distancia razonable de la torre y tienen alta rigidez, de tal manera que al rotar y vibrar naturalmente no choquen con la torre en caso de vientos fuertes.

A pesar de la desventaja en el incremento de la turbulencia, se han construido aerogeneradores con hélices localizadas en la parte posterior de la torre, debido a que se orientan en contra del viento de manera natural, sin necesidad de usar un mecanismo de control. Sin embargo, la experiencia ha demostrado la necesidad de un sistema de orientación para la hélice que la ubique delante de la torre. Este tipo de montaje se justifica debido a la gran influencia que tiene la turbulencia en el desgaste de las aspas por fatiga. La mayoría de los aerogeneradores actuales son de este último tipo.

3.3.2.1. Control de potencia

En general, los aerogeneradores modernos de eje horizontal se diseñan para trabajar con velocidades del viento que varían entre 3 y 24 m/s de promedio. La primera es la llamada velocidad de conexión y la segunda la velocidad de corte. Básicamente, el aerogenerador comienza produciendo energía eléctrica cuando la velocidad del viento supera la velocidad de conexión y, a medida que la velocidad del viento aumenta, la potencia generada es mayor, siguiendo la llamada curva de potencia.

Asimismo, es necesario un sistema de control de las velocidades de rotación para que, en caso de vientos excesivamente fuertes, que podrían poner en peligro la instalación, haga girar a las palas de la hélice de tal forma que éstas presenten la mínima oposición al viento, con lo que la hélice se detendría.

Para aerogeneradores de gran potencia, algunos tipos de sistemas pasivos, utilizan características aerodinámicas de las palas que hacen que aún en condiciones de vientos muy fuertes el rotor se detenga. Esto se debe a que él mismo entra en un régimen llamado "pérdida aerodinámica".

3.3.2.2. Impacto sobre el medio

Este tipo de generadores se ha popularizado rápidamente al ser considerados una *fuentes limpia* de energía renovable, ya que no requieren, para la producción de energía, una combustión que produzca residuos contaminantes o gases implicados en el efecto invernadero. Sin embargo, su localización —frecuentemente lugares apartados de elevado valor ecológico, como las cumbres montañosas, que por no encontrarse habitadas conservan su riqueza paisajística y faunística— puede provocar efectos perniciosos, como el impacto visual en la línea del horizonte, el intenso ruido generado por las palas, etcétera, además de los causados por las infraestructuras que es necesario construir para el transporte de la energía eléctrica hasta los puntos de consumo. Otro problema que planteaban es la muerte de aves de paso al chocar contra las aspas, aunque debido a la velocidad de giro actual de éstas, ha dejado de ser un problema mayor.

Esta contaminación siempre será menor que la nuclear o la combustión sólida y con menos coste inicial para los ciudadanos. En cuanto a las medidas de seguridad e higiene, los gastos no son tan ingentes como los de las energías anteriormente citadas. Por otro lado, su disponibilidad no es constante, pues no siempre existe esa energía eólica necesaria para mover esas aspas (algunas de más de 50 metros de longitud). Se trata de encontrar un punto de equilibrio entre la contaminación y la seguridad de la fuente de energía.

3.3.3. Aerogeneradores de eje vertical

Son aquellos en los que el eje de rotación se encuentra perpendicular al suelo. También se denominan VAWT (del inglés, Vertical Axis Wind Turbine).(Figura 7)

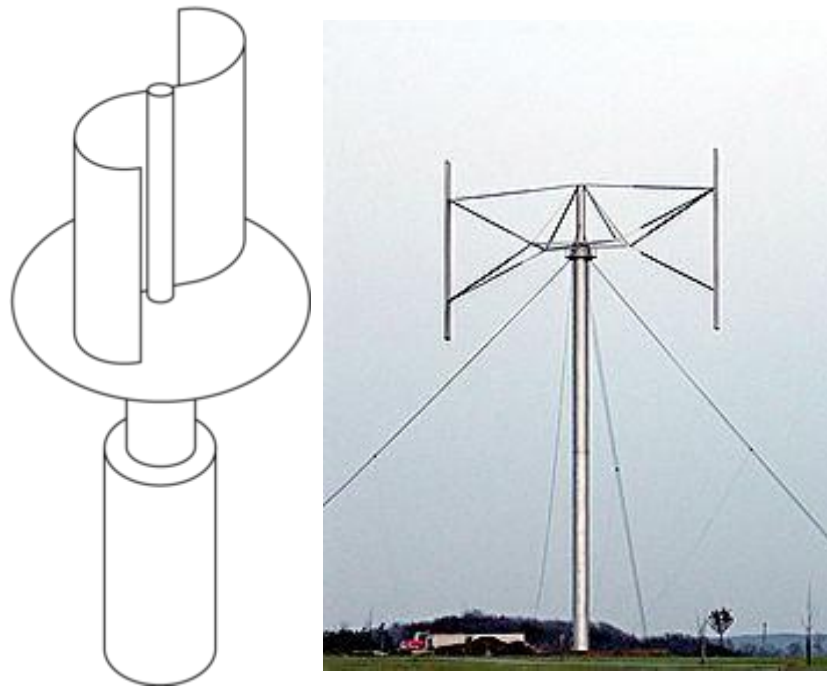


Figura 7. Aerogenerador tipo Savonius, aerogenerador Darrieus

Sus ventajas son:

- 1) no necesitan torre, por lo que la instalación y mantenimiento de los sistemas de generación es más fácil
- 2) no necesitan mecanismo de orientación para orientarse respecto al viento

Sus desventajas:

- 1) al estar cerca del suelo la velocidad del viento es baja
- 2) baja eficiencia
- 3) requieren cables tensores

3.3.4. Microgeneradores eólicos

Son generadores que se utilizan en barcos y caravanas. Los hay que producen desde 50 W hasta unos pocos kW.

La configuración más ideal para un aerogenerador es montado sobre un mástil sin necesidad de cables de anclaje y en un lugar expuesto al viento. Muchos de los diseños convencionales de turbinas eólicas no son recomendados para su montaje en edificios. Sin embargo, si el único sitio disponible es el tejado de un edificio, instalar un pequeño sistema eólico puede ser, sin embargo, factible si se monta lo suficientemente alto como para minimizar la turbulencia, o si el régimen del viento en ese emplazamiento en particular es favorable

La mayoría de los sistemas de energía eólica que están disponibles necesitan la intervención del dueño durante el funcionamiento. Muchos fabricantes ofrecen servicio de mantenimiento para las turbinas eólicas que ellos instalan. El fabricante debe al menos haber detallado la información acerca de los procedimientos de mantenimiento, y debe estar en condiciones de decirle cuándo debe ser llevado a cabo el mantenimiento.

Junto con los costes de inversión, se debe llevar a cabo una evaluación económica que incluya los siguientes aspectos:

- Reducción de los costes anuales de la electricidad como resultado de la producción de la misma por el sistema de energía eólica: debe tener en cuenta expectativas futuras del precio de la electricidad;
- Posibles programas de apoyo por parte del Gobierno, por ejemplo, subvenciones o incentivos fiscales para fomentar el uso de los sistemas de energía eólica;
- Costes asociados a la emisión de CO₂ (materias primas, construcción y mantenimiento).

Tras la evaluación económica, la energía mini-eólica también proporciona beneficios adicionales, tales como:

- Aumento de la eficiencia de la red eléctrica: si la energía se genera cerca de punto de consumo, las pérdidas en la red eléctrica disminuyen.

- Menores costes de servicio: después de su inversión inicial en energía eólica, la factura mensual se verá reducida; el viento, después de todo, es gratis.
- Protección del clima: los sistemas de energía eólica no emiten nada de dióxido de carbono durante su funcionamiento.
- Seguridad de suministro: si usa un sistema con baterías de almacenamiento, su sistema eólico puede funcionar aunque no se suministre electricidad de la red.

3.3.5. Máquina savonius

La máquina Savonius la inventó hace aproximadamente 60 años un finlandés (Figura 5), que le dio el nombre, y se ha utilizado sobre todo para el bombeo del agua. Las recientes aplicaciones también incluyen la producción de energía eléctrica.

Se trata de una máquina de eje vertical, muy sencillo desde el punto de vista constructivo y de funcionamiento.

Además de la sencillez, tiene la ventaja de ser muy robusta y de tener un fuerte par de arranque, cosa que permite el arranque incluso con vientos muy débiles.

Pero se puede utilizar solo con potencias reducidas ya que la turbina Savonius trabaja bien con vientos débiles, mientras que su rendimiento disminuye con vientos fuertes e incluso resulta vulnerable, ya que su tamaño no puede superar ciertos límites.

El rendimiento global máximo es igual a 0,2.

La máquina Darrieus fue inventada en los años 20 en su primera versión por un francés que le dio su nombre. Se llama también híbrida porque presenta características de otras máquinas: eje de rotación vertical – como la Savonius – y palas de tipo aerodinámico, como los otros aerogeneradores.

La máquina Darrieus se caracteriza por su sencillez de construcción y por un gran rendimiento, de aproximadamente 0,4, logrando juntar las ventajas de las otras tipologías. El régimen de rotación es muy elevado. En cambio, el par de arranque muy bajo no permite a esta tipología de máquinas arrancar de forma espontánea

3.3.6. Parámetros a tomarse en cuenta en microgeneradores

3.3.6.1. Configuración de las turbinas

La mayoría de los micro-generadores son de eje horizontal con rotor a barlovento respecto a la torre (el viento encuentra primero las palas y luego el soporte) y conicidad nula (el plano de rotación de las palas forma una línea paralela ideal con la horizontal).

Existen diferentes configuraciones de turbinas eólicas: monopala, bipala, tripala, multipala. El aumento del número de palas disminuye la velocidad de rotación, aumenta el rendimiento y encarece el precio de estas turbinas (Figura 8).

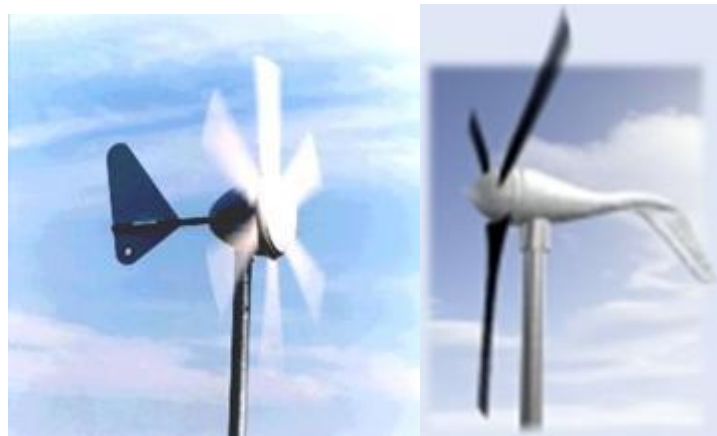


Figura 8. Aerogenerador multipala, aerogenerador tripala

Excluyendo la monopala y la multipala que tienen aplicaciones especiales, el mercado se ha concentrado en la bipala y en la tripala, orientándose sobre todo hacia esta última configuración, ya que está caracterizada por un motor más uniforme (y, por lo tanto, de mayor duración), la energía producida es ligeramente superior (o sea, en general con un rendimiento mayor), y además, son visualmente menos agresivos, gracias a que tienen una configuración más simétrica y una velocidad de rotación más baja, más relajante para los ojos de quien la observa.

3.3.6.2. Material de composición de las palas

La mayor parte de las turbinas mini-eólicas utilizan palas fabricadas con metal plaeado: poliéster reforzado con fibra de vidrio o, en menor proporción, con fibras de

carbono, y raramente madera. Se ha dejado de utilizar el aluminio por su tendencia a deformarse bajo esfuerzo.

3.3.6.3. Orientación

El tamaño reducido de las turbinas mini-eólicas no permite colocar motores con orientación del rotor en la dirección del viento u otros componentes metálicos que tienen las turbinas de tamaño mediano: casi todas las miniturbinas tienen brazos direccionales para orientar el rotor en la dirección del viento.

3.3.6.4. Robustez

Para obtener un buen rendimiento, las turbinas tienen que situarse en lugares batidos por vientos consistentes: para las máquinas de minieólica, teniendo en cuenta su reducido tamaño, es fundamental la robustez.

La experiencia nos lleva a decir que se impone la opción de la escuela del metal pesante: los aerogeneradores más pesados han dado pruebas de ser de mayor robustez y fiabilidad que los más ligeros. El peso de una turbina de minieólica comparada con el área batida por su rotor -la llamada masa específica, medible en kg/mq- es, por lo tanto, un buen indicador de elección entre máquinas diferentes. Normalmente, a una masa específica más alta corresponde un precio más alto.

3.3.6.5. Control de la potencia

En régimen de viento fuerte, las turbinas tienen que tener un sistema de posicionamiento pasivo del rotor que desvíe el eje respecto al de rotación de la pala. La mayor parte de las micro y mini turbinas se dobla sobre una bisagra, de modo que el rotor gire hacia el brazo direccional: algunas en vertical, otras en horizontal. La velocidad del viento a la que se realiza la desalineación y la forma en la que se verifica dependen de la bisagra colocada entre el brazo direccional y la góndola.

3.3.6.6. Generadores

La mayor parte de las turbinas eólicas utiliza alternadores de imán permanente: se trata de la configuración más sencilla y robusta. Para las turbinas de uso doméstico, las

configuraciones de alternador pueden ser las siguientes: imán permanente, alternador convencional con devanado del campo y generador de inducción.

3.3.6.7. Modalidad de colocación y elección del lugar

El lugar de colocación de la turbina tendrá que ser determinado debidamente a través de un estudio de la zona. Por una parte, la cercanía de los elementos que van a utilizar la energía puede resultar perjudicial para la funcionalidad de la máquina (interferencia del viento debida a la proximidad de los edificios). Además, hay que tener en cuenta el impacto del inevitable ruido producido por la turbina. Por otra parte, la lejanía de los elementos hace que los costes de cableado y enterramiento de las líneas eléctricas sean mayores, además de aumentar la dispersión de energía.

Hace falta encontrar una justa relación entre los dos términos, teniendo también en cuenta la importancia de que la posición de la máquina sea segura, o sea en un lugar donde, incluso en caso de hundimiento, los daños sean limitados.

Existen casos de aerogeneradores colocados en los tejados de las casas. Se trata de una modalidad bastante controvertida: por una parte, el montaje podría resultar sencillo pero, por la otra existen problemas de vibraciones transmitidas por la turbina a las estructuras sobre las que se monta, y de turbulencia que se va creando alrededor de los tejados, que es causa de una reducción de la potencia generada.

La instalación más común sigue siendo la torre, de celosía, tubular o arriostrada.

3.3.7. Generación de electricidad

En la generación de electricidad a partir de la energía del viento se utilizan dos familias de máquinas:

- Generadores de corriente continua,
- Generadores de corriente alterna.

Los generadores de corriente continua (DC) puros, o dinamos, se utilizan en pequeños aerogeneradores ya que la estructura de delgas y múltiples enrollados los hace

complejos y poco eficientes. Al aumentar la potencia generada, aumentan las pérdidas que se generan en la transición de las escobillas sobre las delgas.

Obtener corriente continua es factible también trabajando con máquinas alternas, gracias a los puentes rectificadores, compuestos por diodos en su forma más elemental. Hay varias técnicas de control que aprovechan los parámetros eléctricos del alternador para poder manejar las fluctuaciones de la potencia y consecuentemente del voltaje. Entre ellas se encuentran sistemas de control adaptativos y los siempre más frecuentes sistemas de lógica difusa.

3.3.7.1. Sistemas DC

Hay varias maneras de generar en continua:

- Con generadores de corriente continua,
- Con generadores síncronos de corriente alterna, con una posterior etapa de rectificación con semiconductores.

Dínamos.- Los generadores DC o dínamos convierten una energía mecánica de entrada en energía eléctrica de salida en forma de corriente continua. En la actualidad, estos generadores han caído en desuso y han sido sustituidos por rectificadores de silicio (diodos), que transforman la CA en DC en forma estática y con mayor rendimiento.

Consisten en un inductor (embobinado alimentado con DC) colocado en el estator el cual tiene la tarea de generar un campo magnético constante (idealmente podría ser un imán permanente). El rotor, y en este caso inducido giratorio, está provisto de un colector de delgas sobre el cual se deslizan las escobillas.

Alternador en continua.- Como se mencionó anteriormente es práctica común generar continua con máquinas alternas, típicamente alternadores (máquinas sincrónicas). Se puede afirmar que los pequeños aerogeneradores entregan su energía a una red DC, tal como se ve en la figura 10 y el generador de imán permanente mostrado en la figura 11.

En el ámbito eólico, la tendencia es utilizar alternadores de múltiples imanes permanentes con igual número de embobinados de estator lo cual define un gran número de polos. El descubrimiento de materiales que manifiestan un poder magnético superior ha sido determinante en el desarrollo de pequeños y medianos generadores permitiendo disminuir considerablemente su tamaño sustituyendo los electroimanes. Colocar un mayor número de imanes en el generador implica rebajar su rango de operación considerando revoluciones en el eje. Rebajar el rango de operación del alternador tiene el objetivo de evitar el uso de una caja mecánica amplificadora de RPM. Dejar de lado componentes mecánicos significa evitar pérdidas que comprometan la eficiencia global de la conversión energética.

En los últimos años se empezaron a construir enormes generadores con este mismo concepto para lograr una máxima eficiencia. Al tener rotores gigantescos, se ha optado por colocar innumerables electroimanes. La magnitud de esto se puede apreciar en el rotor del alternador del Enercon E-112 en la figura 9.



Figura 9. Rotor del alternador del E-112.

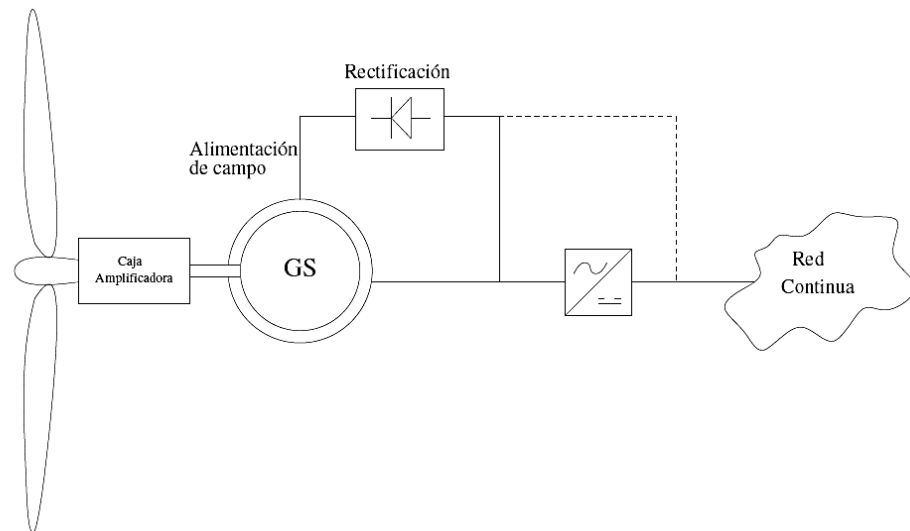


Figura 10. Alternador conectado a red continua.

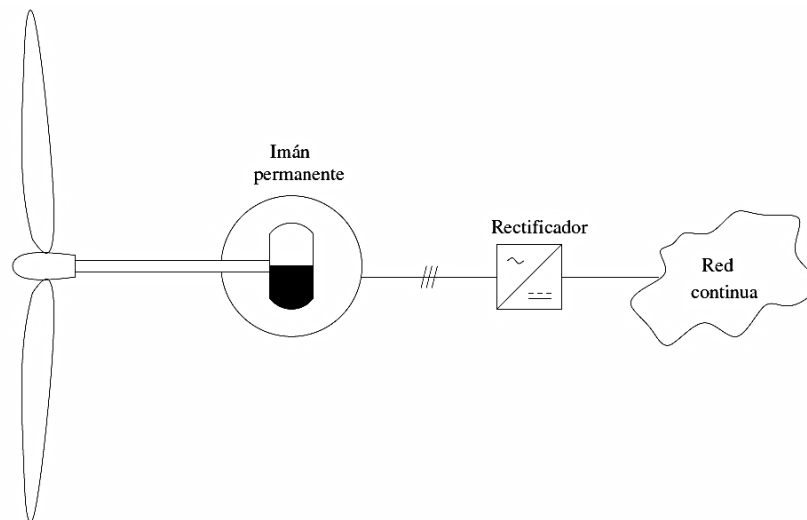


Figura 11. Generador de imán permanente conectado a una red continua.

Como se puede apreciar en la figura 10, el sistema contempla una caja amplificadora de RPM. Si se diseña un alternador con un número de polos adecuado para que su velocidad de operación coincida con la velocidad rotacional de las aspas, entonces, se puede omitir la caja amplificadora. Lo anterior es válido también para la configuración mostrada en la figura 11, donde el rotor es constituido por imanes permanentes. Se justifica el uso de estos imanes para lograr alternadores de múltiples polos con un rotor

de diámetro razonable. Si se quisiera dotar al rotor de electroimanes manteniendo el número de polos, difícilmente se lograría mantener el diámetro de la máquina y se agregaría, de todas formas, una complejidad estructural importante. Construir alternadores de múltiples polos con electroimanes es sustentable únicamente para generadores donde es posible concebir un rotor de diámetro muy grande.

3.3.7.2. Sistemas CA

Generadores sincrónicos.- Las máquinas sincrónicas tienen una velocidad de rotación rígidamente vinculada a la frecuencia de la red que alimenta el estator. Esta relación es definida por la ecuación 2.

$$n = 60 \cdot f / p \quad (2)$$

Donde:

n : revoluciones por minuto [RPM]

f : frecuencia de la red (en nuestro caso 60 [Hz])

p : número de pares de polos en el estator

También denominadas alternadores, estas máquinas son ampliamente utilizadas en la generación de electricidad por la facilidad de manejar la magnitud y el tipo de potencia que se inyecta a la red, modificando la corriente de campo. Manejando el punto de operación es posible determinar cuánta potencia activa y reactiva se está aportando a la red (o, consumiendo de la red). Esto permite al generador sincrónico ir ajustando el factor de potencia de forma fácil y rápida.

Hay varias configuraciones utilizadas en el ámbito eólico, sobre todo para grandes aerogeneradores que se conectan directamente a la red de un sistema interconectado. Estas configuraciones se pueden apreciar en las figuras 12 y 13.

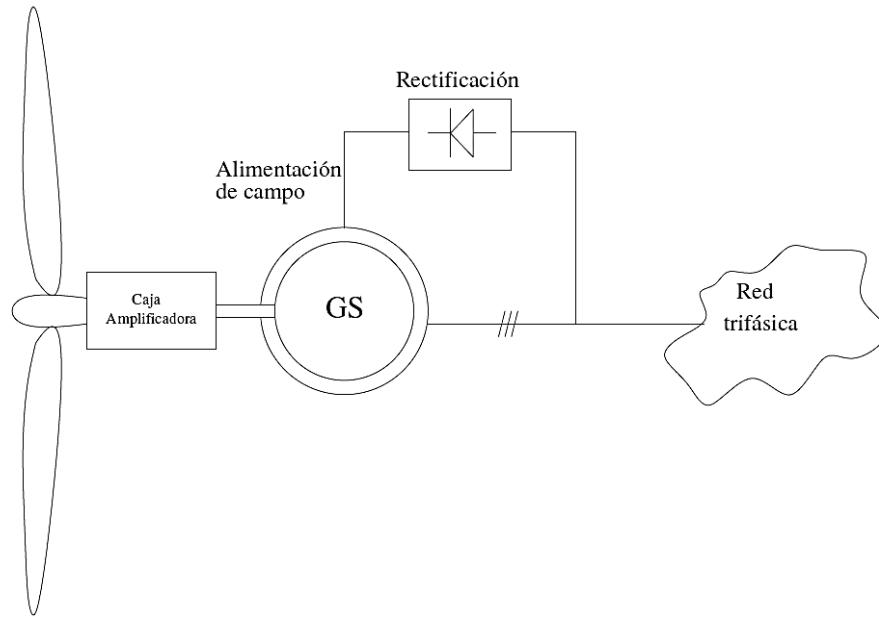


Figura 12. Generador síncrono conectado directamente a la red alterna.

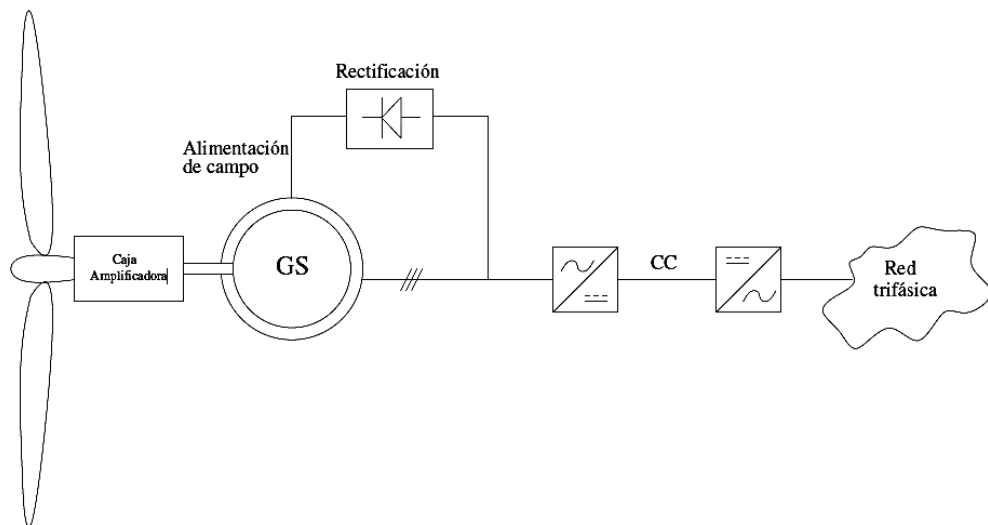


Figura 13. Generador síncrono con etapa de rectificación e inversión.

La diferencia, entre los esquemas ilustrados anteriormente, radica en la forma en que se maneja el generador para que aporte su energía manteniendo la sincronización. En el caso de la figura 12, el sincronismo dependerá de la velocidad del rotor del generador, como define la ecuación 2, el cual puede ser ajustado con medidas aerodinámicas,

(cambio de ángulo de ataque en las aspas) y/o con una caja amplificadora de razón variable.

En el segundo caso (figura 13) no es muy importante la velocidad de giro del generador ya que la frecuencia de la señal de voltaje resultante no influirá, pues sufrirá una rectificación mediante un puente rectificador trifásico para obtener una señal continua. Posteriormente se generan nuevamente las tres fases alternas desfasadas en 120° , típicas de los sistemas trifásicos, con la frecuencia de 50 o 60[Hz] y el sincronismo perfecto con el sistema interconectado.

Esto gracias a un inversor capaz de entregar la frecuencia adecuada y el nivel de voltaje necesario. De esta manera se puede evitar un control bastante complejo como el de la velocidad de giro del aerogenerador la cual está sujeta a una fuente motriz aleatoria como lo es el viento. Como mencionado anteriormente, diseñar un alternador de múltiples polos puede otorgar la posibilidad de eliminar la caja amplificadora de RPM llevando la velocidad de operación de la máquina a la velocidad de rotación de las aspas (ver figura 14). Esto permite mejorar la eficiencia ya que se eliminan componentes con pérdidas asociadas. El control de la frecuencia y del nivel de voltaje puede ser efectuado únicamente con electrónica de potencia (rectificación e inversión) o en conjunto al control del ángulo de ataque de las aspas.

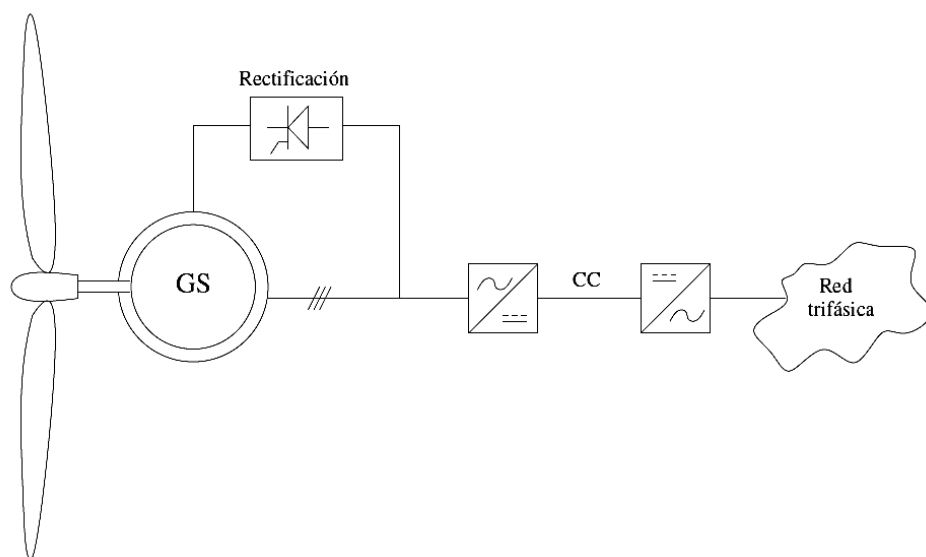


Figura 14. Generador sincrónico de múltiples polos con etapa de rectificación e inversión.

Considerando la ecuación 2 y una velocidad rotacional de las aspas de 10[RPM] (valido para ENERCON-112) se determina que para obtener una frecuencia de 60[HZ] se necesitan 300 pares de polos.

Generadores asincrónicos.- Se basan en el fenómeno de campo magnético rotatorio resultante, al alimentar los embobinados de estator con voltajes sinusoidales trifásicos desfasados en 120º entre sí. Se definen asincrónicos porque la velocidad del rotor no es la del sincronismo impuesto por la red. La máquina más popular es claramente el motor de inducción de jaula de ardilla, el que conectado a la red puede operar como generador. Generalmente estas máquinas se utilizan como motores trifásicos y no como generadores.

Generadores de inducción.- Estas máquinas se utilizan como generadores al estar conectados a la red trifásica manejando el deslizamiento. No necesitan control, salvo el manejo de la potencia mecánica y por su estructura de rotor de jaula de ardilla no tienen Escobillas conectadas, lo cual los exenta de las mantenciones típicas que tienen las máquinas eléctricas de rotor bobinado. También se utiliza un cicloconvertor (ver figura 15) en la salida que permite bajar el nivel de voltaje generado adaptándolo al nivel de la red.

Existe otra familia de máquinas de inducción que sí utilizan embobinado de rotor, el cual puede estar en cortocircuito, para operar como jaula de ardilla. La ventaja de tener embobinados de rotor es la posibilidad de controlar la magnitud de la corriente que circula por ellos y así modificar el deslizamiento favorablemente.

Algunos grandes aerogeneradores utilizan la técnica de modificación de deslizamiento y las soluciones para lograr esto se muestran en los esquemas 16 y 17.

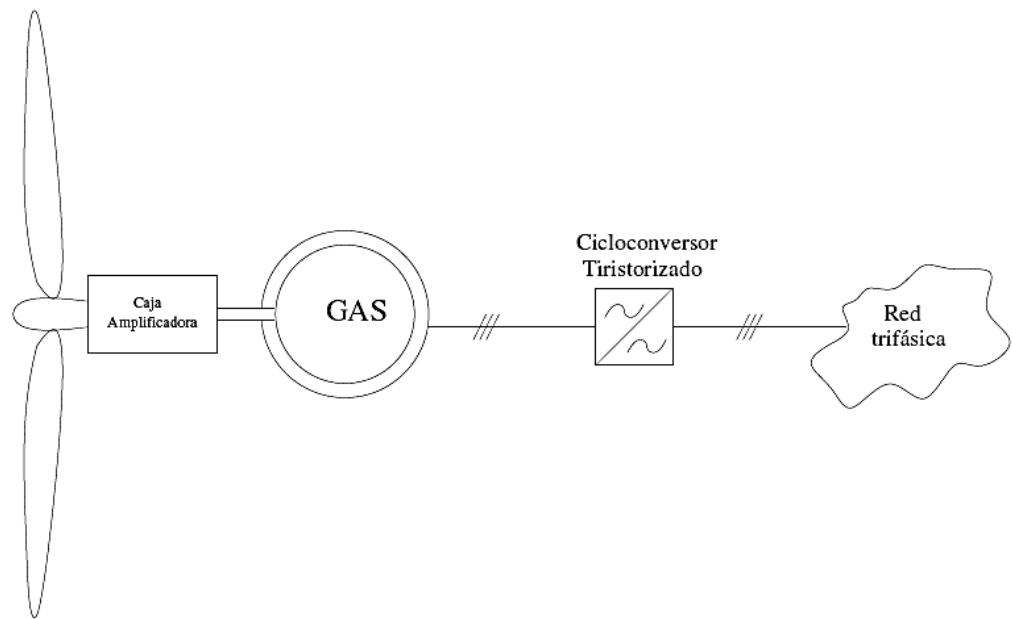


Figura 15. Generador asincrónico conectado directamente a la red alterna mediante cicloconversor.

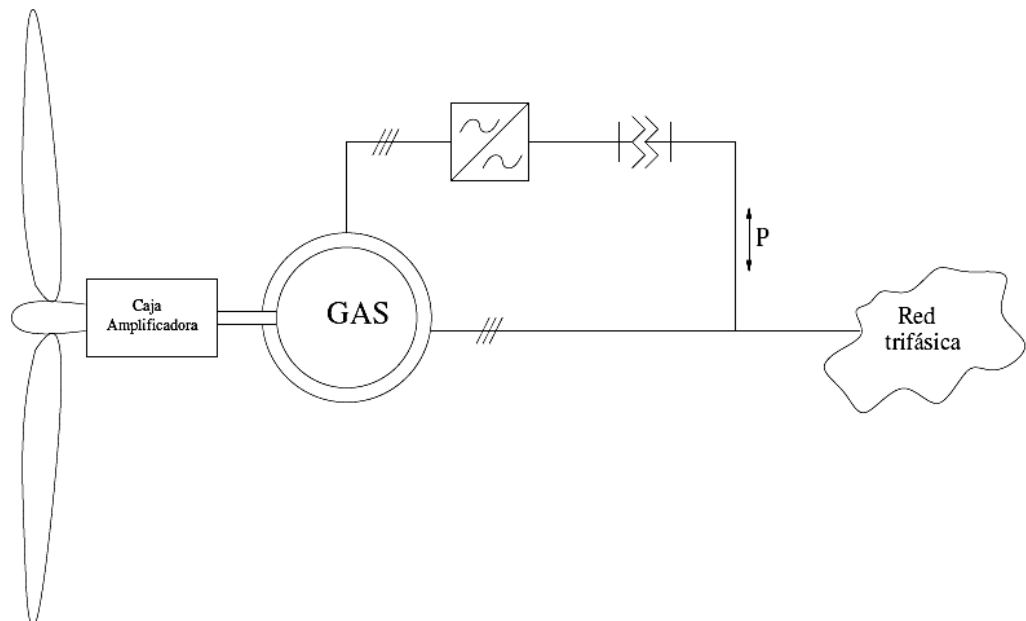


Figura 16. Generador asincrónico conectado directamente a la red alterna doblemente alimentado.

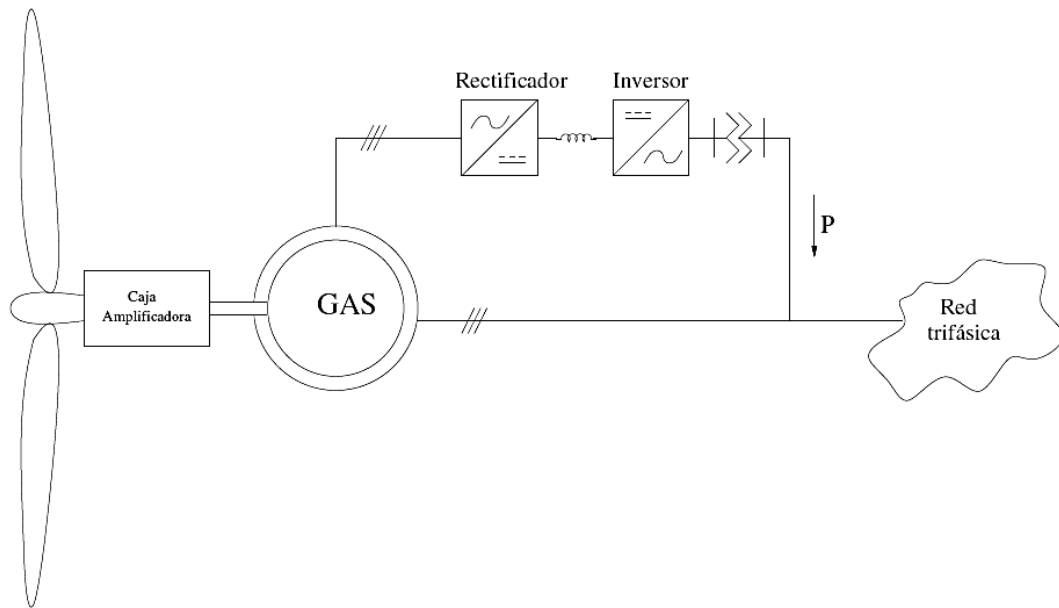


Figura 17. Generador asincrónico con etapa de rectificación e inversión.

3.4. La tecnología LED

3.4.1. Generalidades

En corriente continua (CC), todos los diodos emiten cierta cantidad de radiación cuando los pares electrón-hueco se recombinan; es decir, cuando los electrones caen desde la banda de conducción (de mayor energía) a la banda de valencia (de menor energía), emitiendo fotones en el proceso. Indudablemente, por ende, su color, dependerá de la altura de la banda prohibida (diferencias de energía entre las bandas de conducción y valencia), es decir, de los materiales empleados (Tabla 2). Los diodos convencionales, de silicio o germanio, emiten radiación infrarroja muy alejada del espectro visible. Sin embargo, con materiales especiales pueden conseguirse longitudes de onda visibles. Los ledes e IRED, además tienen geometrías especiales para evitar que la radiación emitida sea reabsorbida por el material circundante del propio diodo, lo que sucede en los convencionales.

Tabla 2: Compuestos utilizados en la construcción de ledes

Compuesto	Color	Long. de onda
Arseniuro de galio (GaAs)	Infrarrojo	940 nm
Arseniuro de galio y aluminio (AlGaAs)	Rojo e infrarrojo	890 nm
Arseniuro fosfuro de galio (GaAsP)	Rojo, anaranjado y amarillo	630 nm
Fosfuro de galio (GaP)	Verde	555 nm
Nitruro de galio (GaN)	Verde	525 nm
Seleniuro de zinc (ZnSe)	Azul	
Nitruro de galio e indio (InGaN)	Azul	450 nm
Carburo de silicio (SiC)	Azul	480 nm
Diamante (C)	Ultravioleta	
Silicio (Si)	En desarrollo	

Los primeros diodos construidos fueron los diodos infrarrojos y de color rojo, permitiendo el desarrollo tecnológico posterior la construcción de diodos para longitudes de onda cada vez menores. En particular, los diodos azules fueron desarrollados a finales de los años noventa por ShujiNakamura, añadiéndose a los rojos y verdes desarrollados con anterioridad, lo que permitió —por combinación de los mismos— la obtención de luz blanca. El diodo de seleniuro de zinc puede emitir también luz blanca si se mezcla la luz azul que emite con la roja y verde creada por fotoluminiscencia. La más reciente innovación en el ámbito de la tecnología led son los diodos ultravioleta, que se han empleado con éxito en la producción de luz blanca para iluminar materiales fluorescentes.

Tanto los diodos azules como los ultravioletas son caros respecto de los más comunes (rojo, verde, amarillo e infrarrojo), siendo por ello menos empleados en las aplicaciones comerciales.

Los ledes comerciales típicos están diseñados para potencias del orden de los 30 a 60 mW. En torno a 1999 se introdujeron en el mercado diodos capaces de trabajar con potencias de 1 vatio para uso continuo; estos diodos tienen matrices semiconductoras de dimensiones mucho mayores para poder soportar tales potencias e incorporan aletas metálicas para disipar el calor (véase convección) generado por efecto Joule.

Hoy en día, se están desarrollando y empezando a comercializar ledes con prestaciones muy superiores a las de hace unos años y con un futuro prometedor en diversos campos,

incluso en aplicaciones generales de iluminación. Como ejemplo, se puede destacar que Nichia Corporation ha desarrollado ledes de luz blanca con una eficiencia luminosa de 150 lm/W, utilizando para ello una corriente de polarización directa de 20 miliamperios (mA). Esta eficiencia, comparada con otras fuentes de luz en términos de rendimiento sólo, es aproximadamente 1,7 veces superior a la de la lámpara fluorescente con prestaciones de color altas (90 lm/W) y aproximadamente 11,5 veces la de una lámpara incandescente (13 lm/W). Su eficiencia es incluso más alta que la de la lámpara de vapor de sodio de alta presión (132 lm/W), que está considerada como una de las fuentes de luz más eficientes.

El comienzo del siglo XXI ha visto aparecer los diodos OLED (ledes orgánicos), fabricados con materiales polímeros orgánicos semiconductores. Aunque la eficiencia lograda con estos dispositivos está lejos de la de los diodos inorgánicos, su fabricación promete ser considerablemente más barata que la de aquellos, siendo además posible depositar gran cantidad de diodos sobre cualquier superficie empleando técnicas de pintado para crear pantallas en color.

El OLED (Organic Light-Emitting Diode: 'diodo orgánico de emisión de luz') es un diodo basado en una capa electroluminiscente que está formada por una película de componentes orgánicos, y que reaccionan a una determinada estimulación eléctrica, generando y emitiendo luz por sí mismos.

No se puede hablar realmente de una tecnología OLED, sino más bien de tecnologías basadas en OLED, ya que son varias las que hay, dependiendo del soporte y finalidad a la que vayan destinados.

Su aplicación es realmente amplia, mucho más que, en el caso que nos ocupa (su aplicación en el mundo de la informática), cualquier otra tecnología existente. Pero además, las tecnologías basadas en OLED no solo tienen una aplicación puramente como pantallas reproductoras de imagen, sino que su horizonte se amplía al campo de la iluminación, privacidad y otros múltiples usos que se le pueda dar.

Las ventajas de esta nueva tecnología son enormes, pero también tiene una serie de inconvenientes, aunque la mayoría de estos son totalmente circunstanciales, y desaparecerán en unos casos conforme se siga investigando en este campo y en otros conforme vaya aumentando su uso y producción.

Una solución tecnológica que pretende aprovechar las ventajas de la eficiencia alta de los ledes típicos (hechos con materiales inorgánicos principalmente) y los costes

menores de los OLED (derivados del uso de materiales orgánicos) son los Sistemas de Iluminación Híbridos (Orgánicos/Inorgánicos) basados en diodos emisores de luz. Dos ejemplos de este tipo de solución tecnológica los está intentado comercializar la empresa Cyberlux con los nombres de Hybrid White Light (HWL) (Luz Blanca Híbrida) y HybridMulti-color Light (HML) (Luz Multicolor Híbrida), cuyo resultado, puede producir sistemas de iluminación mucho más eficientes y con un coste menor que los actuales.

3.4.2. Aplicaciones

Los diodos infrarrojos (IRED) se emplean desde mediados del siglo XX en mandos a distancia de televisores, habiéndose generalizado su uso en otros electrodomésticos como equipos de aire acondicionado, equipos de música, etc., y en general para aplicaciones de control remoto, así como en dispositivos detectores, además de ser utilizados para transmitir datos entre dispositivos electrónicos como en redes de computadoras y dispositivos como teléfonos móviles, computadoras de mano, aunque esta tecnología de transmisión de datos ha dado paso al bluetooth en los últimos años, quedando casi obsoleta.

Los ledes se emplean con profusión en todo tipo de indicadores de estado (encendido/apagado) en dispositivos de señalización (de tránsito, de emergencia, etc.) y en paneles informativos (el mayor del mundo, del NASDAQ, tiene 36,6 metros de altura y está en Times Square, Manhattan). También se emplean en el alumbrado de pantallas de cristal líquido de teléfonos móviles, calculadoras, agendas electrónicas, etc., así como en bicicletas y usos similares. Existen además impresoras con ledes.

El uso de ledes en el ámbito de la iluminación (incluyendo la señalización de tráfico) es moderado y es previsible que se incremente en el futuro, ya que sus prestaciones son superiores a las de la lámpara incandescente y la lámpara fluorescente, desde diversos puntos de vista. La iluminación con ledes presenta indudables ventajas: fiabilidad, mayor eficiencia energética, mayor resistencia a las vibraciones, mejor visión ante diversas circunstancias de iluminación, menor disipación de energía, menor riesgo para el medio ambiente, capacidad para operar de forma intermitente de modo continuo, respuesta rápida, etc. Asimismo, con ledes se pueden producir luces de diferentes colores con un rendimiento luminoso elevado, a diferencia de muchas de las lámparas utilizadas hasta ahora, que tienen filtros para lograr un efecto similar (lo que supone una

reducción de su eficiencia energética). Cabe destacar también que diversas pruebas realizadas por importantes empresas y organismos han concluido que el ahorro energético varía entre un 70% y 80% respecto a la iluminación tradicional que se utiliza hasta ahora. Todo ello pone de manifiesto las numerosas ventajas que los ledes ofrecen en relación al alumbrado público.

Los ledes de Luz Blanca son uno de los desarrollos más recientes y pueden considerarse como un intento muy bien fundamentado para sustituir las bombillas actuales (lámparas incandescentes) por dispositivos mucho más ventajosos. En la actualidad se dispone de tecnología que consume el 92% menos que las bombillas incandescentes de uso doméstico común y un 30% menos que la mayoría de las lámparas fluorescentes; además, estos ledes pueden durar hasta 20 años y suponer un 200% menos de costes totales de propiedad si se comparan con las bombillas o tubos fluorescentes convencionales. Estas características convierten a los ledes de Luz Blanca en una alternativa muy prometedora para la iluminación.

También se utilizan en la emisión de señales de luz que se transmiten a través de fibra óptica. Sin embargo esta aplicación está en desuso ya que actualmente se opta por tecnología láser que focaliza más las señales de luz y permite un mayor alcance de la misma utilizando el mismo cable. Sin embargo en los inicios de la fibra óptica eran usados por su escaso coste, ya que suponían una gran ventaja frente al coaxial (aun sin focalizar la emisión de luz).

Pantalla de ledes: pantalla muy brillante, formada por filas de ledes verdes, azules y rojos, ordenados según la arquitectura RGB, controlados individualmente para formar imágenes vivas, muy brillantes, con un altísimo nivel de contraste, entre sus principales ventajas, frente a otras pantallas encontramos: buen soporte de color, brillo extremadamente alto, lo que le da la capacidad ser completamente visible bajo la luz del sol, es increíblemente resistente a impactos.

3.4.3. Conexión

Para conectar ledes de modo que iluminen de forma continua, deben estar polarizados directamente (Figura 18), es decir, con el polo positivo de la fuente de alimentación conectada al ánodo y el polo negativo conectado al cátodo. Además, la fuente de

alimentación debe suministrarle una tensión o diferencia de potencial superior a su tensión umbral. Por otro lado, se debe garantizar que la corriente que circula por ellos no exceda los límites admisibles, lo que dañaría irreversiblemente al led. (Esto se puede hacer de manera sencilla con una resistencia R en serie con los ledes

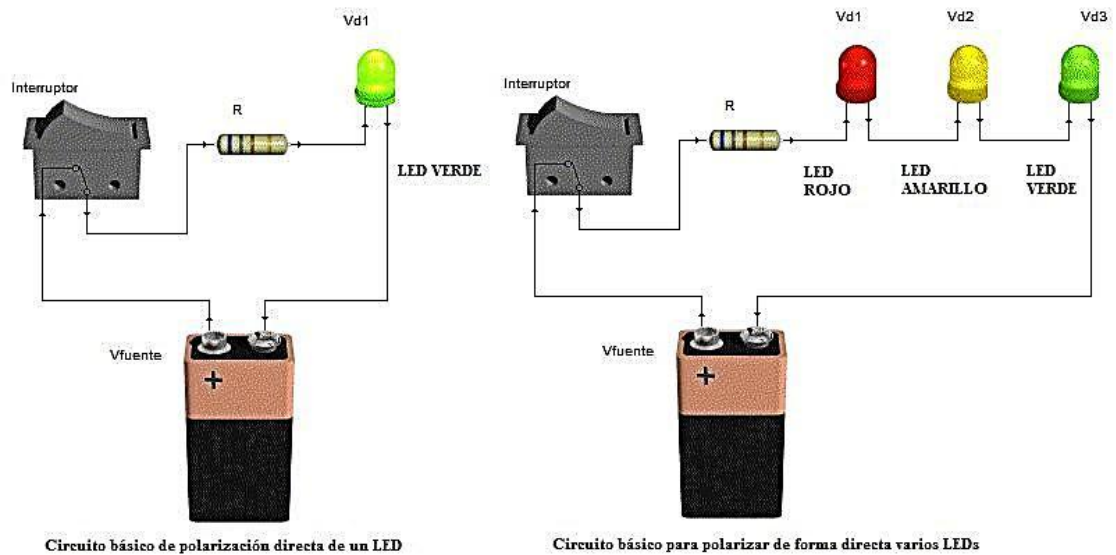


Figura 18: Circuito básico de polarización de ledes

La diferencia de potencial V_d varía de acuerdo a las especificaciones relacionadas con el color y la potencia soportada.

En términos generales, pueden considerarse de forma aproximada los siguientes valores de diferencia de potencial:

- Rojo = 1,8 a 2,2 volt.
- Anaranjado = 2,1 a 2,2 volt.
- Amarillo = 2,1 a 2,4 volt.
- Verde = 2 a 3,5 volt.
- Azul = 3,5 a 3,8 volt.
- Blanco = 3,6 volt.
-

Luego mediante la ley de Ohm, puede calcularse la resistencia R adecuada para la tensión de la fuente V_{fuente} que utilizemos:

$$R = \frac{V_{fuente} - (V_{d1} + V_{d2} + \dots)}{I} \quad (3)$$

El término I , en la fórmula, se refiere al valor de corriente para la intensidad luminosa que necesitamos. Lo común es de 10 mA para ledes de baja luminosidad y 20 mA para ledes de alta luminosidad; un valor superior puede inhabilitar el led o reducir de manera considerable su tiempo de vida.

Otros ledes de una mayor capacidad de corriente conocidos como ledes de potencia (1 W, 3 W, 5 W, etc.), pueden ser usados a 150 mA, 350 mA, 750 mA o incluso a 1000 mA dependiendo de las características opto-eléctricas dadas por el fabricante.

Cabe recordar que también pueden conectarse varios en serie, sumándose las diferencias de potencial en cada uno. También se pueden hacer configuraciones en paralelo, aunque este tipo de configuraciones no son muy recomendadas para diseños de circuitos con ledes eficientes.

3.4.4. Tecnología en iluminación LED

El LED como elemento de iluminación, ya sea de uso general, decorativo ó monumental, cuenta con las siguientes ventajas:

- Ahorro energético: debido a su bajo consumo
- Alta eficiencia: el 95% de su energía es convertida en luz y solo un 5% en calor
- Larga duración: desde 15.000 a 100.000 horas de vida útil
- Mayor brillo: debido a que la luz no se concentra en un solo punto
- Bajos costos de mantenimiento: debido a su larga duración y bajo consumo
- Alto rendimiento luminoso: 140 lm/W
- Flexibilidad de diseños (Figura 19): para aplicaciones domésticas, arquitectónicas, comerciales, monumentales, etc
- Elección de colores: debido a sus características RGB que permiten obtener una gama de 16,7 millones de colores
- Posibilidad de obtener tonalidades de luz blancas: desde cálidas hasta frías
- Fácil integración en ambientes arquitectónicos: debido a su pequeño tamaño



Figura 19: Modelos de luminarias LED

Con un tamaño de pocos milímetros los LED ofrecen grandes ventajas y son una alternativa a las lámparas convencionales. Los nuevos "diodos" convierten la corriente eléctrica directamente en luz. Emiten una luz de color e iluminan en rojo, naranja, amarillo, verde o azul. La luz blanca se produce con un LED especial y poseen mucha flexibilidad

4. MATERIALES Y METODOS

4.1. Introducción

A continuación se presentará una metodología que se sustenta en cálculos establecidos para diseñar aerogeneradores de eje vertical, así como también se presentaran criterios de ingeniería fundamentados en libros y en proyectos eólicos antes realizados en Latinoamérica

Como se ha establecido en los objetivos, este trabajo de tesis está encaminado a diseñar y construir un aerogenerador para alimentar una luminaria LED, y que el mismo pueda operar en las condiciones de viento establecidas para el sector donde se encuentra ubicada el AEIRNNR de la Universidad Nacional de Loja, por lo tanto se decidió llevar a cabo este proyecto de tesis de manera investigativa y practica con el fin de poder garantizar un diseño simple funcional y eficiente.

Este trabajo de tesis fue realizado mediante un estudio Teórico – Bibliográfico, el cual permitió establecer un marco teórico conceptual, mediante la revisión de normas técnicas, manuales de instalación, catálogos y modelos que nos permitieron conocer criterios para el diseño mecánico, eléctrico y electrónico de un aerogenerador para alimentación de luminarias LED

Así nos basamos en los métodos científico, deductivo e inductivo, mismos que nos permitieron una mejor comprensión del problema de investigación.

Una vez recogida y sistematizada la información, se debe analizar los criterios ingenieriles extraídos de trabajos antes realizados para de esta manera poder formar un criterio propio que mejore el funcionamiento del sistema tomando en cuenta las condiciones climáticas externas y la aplicación final para la que se va a diseñar. Finalmente el criterio formado nos ha llevado al diseño y construcción de un aerogenerador de eje vertical de tipo savonius con una carcasa de toberas cuyo objetivo es el de aumentar la velocidad del viento por la reducción de áreas al final de cada tobera, finalmente este generador alimentara a una luminaria LED y todo el sistema será autónomo, es decir sin ninguna conexión a la red.

Tomando en cuenta la baja velocidad del viento existente en el área y la aplicación para la que se requiere en iluminación, se ha decidido dimensionar y diseñar una aeroturbina capaz de generar una potencia mínima de 30 W, asegurando así que el dimensionamiento del rotor abastezca el consumo de dos luminarias LED de 10W cada una.

4.2. Rotor

4.2.1. Tipo de rotor

Para el rotor del presente proyecto se ha elegido una turbina eólica tipo savonius, este gira sobre un eje vertical, logra su movimiento rotacional gracias a la fuerza de empuje que el viento ejerce sobre sus palas, y como se mencionó en la sección 1.3.3, entre otras características de simplicidad constructiva, estos aerogeneradores operan sin importar la dirección del viento al cual son sometidos. La estructura del rotor se puede apreciar en la figura 20.

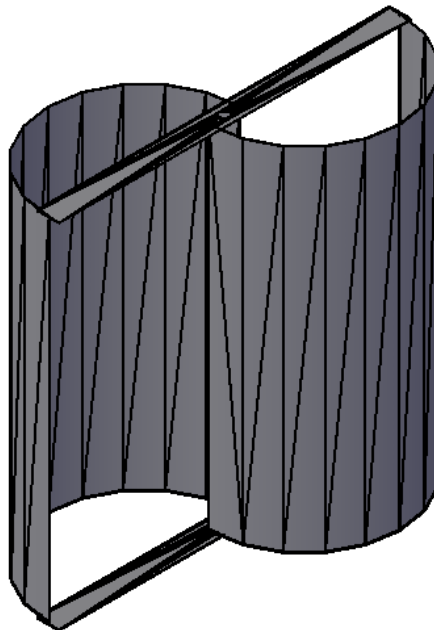


Figura 20. Rotor tipo savonius

4.2.2. Material de las palas del rotor

Las palas son las responsables de lograr la fuerza de arrastre del rotor, su forma simple de dos palas, un cóncavo y un convexo, nos permite asegurarle el menor peso posible ya que de esta manera la fuerza del viento necesaria para vencer el momento de inercia

sería menor. Para cumplir esta condición se ha decidido utilizar láminas de acero inoxidable de 0.5mm de espesor con una estructura simple de acero de transmisión para asegurar su forma, de esta manera le damos rigidez con un bajo peso y sobre todo la seguridad que el material inoxidable soportara cualquier estado climático.

4.2.3. Ley de Betz.

La ley de Betz es una teoría acerca de la máxima energía posible que se derivan de un "motor de viento hidráulico", o una turbina de viento. Décadas antes de la llegada de la turbina eólica moderna de tres palas que genera electricidad, la ley de Betz fue desarrollado en 1919 por el físico alemán Albert Betz. De acuerdo con la ley de Betz, una turbina no puede capturar más de 59,3 por ciento de la energía cinética en viento. El ideal o teórica máxima de eficiencia n_{max} (también llamado coeficiente de potencia) de una turbina eólica es la relación entre la potencia máxima obtenida del viento a la potencia total disponible en el viento. El factor 0,593 se conoce como coeficiente de Betz (por el nombre del hombre que la deriva). Es la máxima fracción de la potencia en una corriente de viento que se puede extraer.

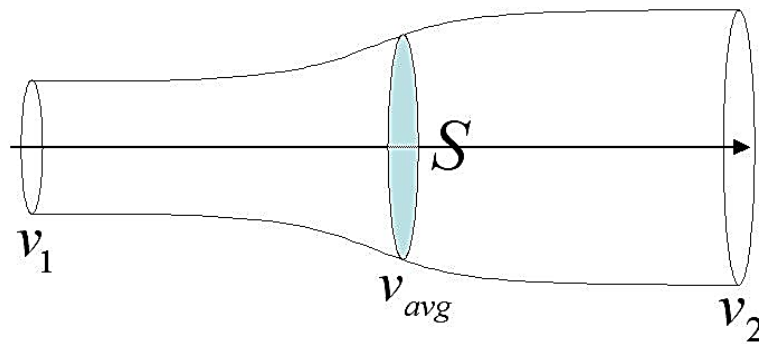


Figura 21. Esquemática del flujo de fluidos a través de un actuador en forma de disco.

Consideremos el flujo de aire indicado en la figura 21 que atraviesa un área A barrida por un rotor. Dado que las variaciones de presión y temperatura son pequeñas, supondremos que el aire se comporta como un fluido incompresible (densidad constante) por lo que la ecuación de continuidad se expresa:

$$\dot{m} = \rho \cdot A_1 \cdot v_1 = \rho \cdot S \cdot v = \rho \cdot A_2 \cdot v_2 \quad (4)$$

Donde v_1 es la velocidad en la parte frontal del rotor y v_2 es la velocidad de la corriente abajo del rotor, y v es la velocidad a la que el dispositivo de transmisión hidráulica. ρ es la densidad del fluido, y el área de la turbina está dada por S . La fuerza ejercida por el viento por el rotor se puede escribir como

$$F = m \cdot a = m \cdot \frac{dv}{dt} = \dot{m} \cdot \Delta v = \rho \cdot S \cdot v \cdot (v_1 - v_2) \quad (5)$$

El trabajo realizado por la fuerza se puede escribir de forma incremental como

$$dE = F \cdot dx \quad (6)$$

Y la potencia (tipo de trabajo realizado) del viento es

$$P = \frac{dE}{dt} = F \cdot \frac{dx}{dt} = F \cdot v \quad (7)$$

Ahora la sustitución de la fuerza F de la ecuación (5), calculada anteriormente en la ecuación (7) dará la potencia extraída del viento:

$$P = \rho \cdot S \cdot v^2 \cdot (v_1 - v_2) \quad (8)$$

Sin embargo, la potencia se puede calcular de otra manera, mediante el uso de la energía cinética. Aplicando la ecuación de conservación de energía para el rendimiento de control de volumen

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad (9)$$

Mirando hacia atrás en la ecuación (4) de continuidad, en sustitución de la ecuación (9) del flujo de masa se obtiene la siguiente

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad (10)$$

Ambas expresiones de poder son totalmente válidas, una fue derivada al examinar el trabajo hecho incremental y el otro por la conservación de la energía. La equiparación de los rendimientos de estas dos expresiones

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v \cdot (v_1^2 - v_2^2) = \rho \cdot S \cdot v^2 \cdot (v_1 - v_2) \quad (11)$$

El examen de las dos expresiones equiparar los rendimientos de un resultado interesante, sobre todo

$$\frac{1}{2} \cdot (v_1^2 - v_2^2) = \frac{1}{2} \cdot (v_1 - v_2) \cdot (v_1 + v_2) = v \cdot (v_1 - v_2) \quad (12)$$

o

$$v = \frac{1}{2} \cdot (v_1 + v_2) \quad (13)$$

Por lo tanto, la velocidad del viento en el rotor puede ser tomado como el promedio de las velocidades de subida y bajada. Este suele ser el más argumentado en contra de parte de la ley de Betz, pero como se puede ver en la derivación anterior, es de hecho correcta.

Volviendo a la ecuación (9) para potencia basado en la energía cinética:

$$\dot{E} = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot (v_1^2 - v_2^2)$$

$$\dot{E} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v \cdot (v_1^2 - v_2^2)$$

$$\dot{E} = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot S \cdot (v_1 + v_2) \cdot (v_1^2 - v_2^2)$$

$$\dot{E} = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot S \cdot v_1^3 \cdot \left(1 - \frac{v_2}{v_1}\right)^2 + \frac{v_2}{v_1} - \frac{v_2}{v_1}^3 \quad (14)$$

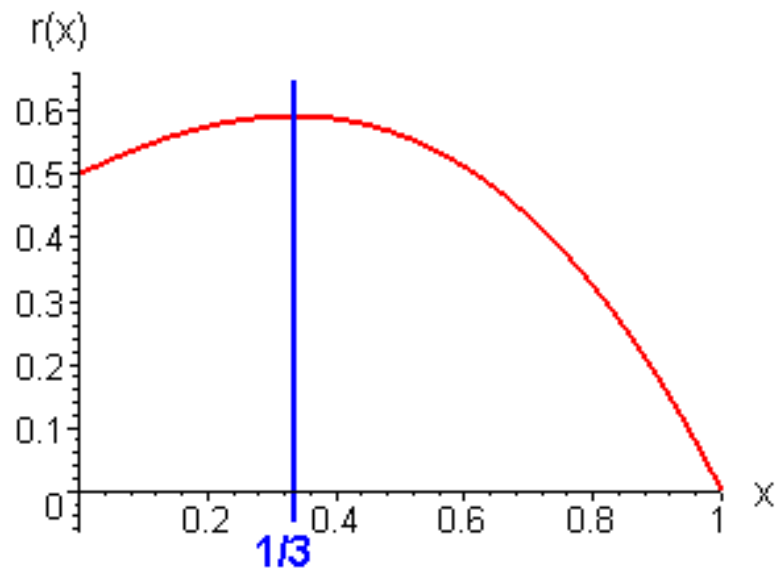


Figura 22. Curva de eficiencia de Betz

En la figura 22 el eje horizontal refleja la relación de v_2 / v_1 , y el eje vertical es el coeficiente de potencia C_p .

Por la diferenciación (a través de la cuidadosa aplicación de la regla de la cadena) \dot{E} con respecto a v_2 / v_1 para una velocidad de fluido dado v_1 y un área determinada S se encuentra el valor *máximo* o *mínimo* para \dot{E} . El resultado es que \dot{E} alcanza el valor máximo cuando $v_2 / v_1 = 1/3$

Al sustituir este valor en los resultados:

$$P_{max} = \frac{16}{27} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v_1^3 \quad (15)$$

El ritmo de trabajo puede obtener de un cilindro de fluido con la cruz S área de la sección y la velocidad v_1 es la siguiente:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v_1^3 \cdot C_p \quad (16)$$

El coeficiente de potencia $C_p = P / P_{viento}$ tiene un valor máximo de: $C = 16/27 = P_{max} = 0.593$ (o 59,3%, sin embargo, los coeficientes de rendimiento se expresa generalmente como un decimal, no un porcentaje).

Las pérdidas del rotor son las pérdidas de energía más importantes, por ejemplo, los molinos de viento. Es, por lo tanto importante reducir estas pérdidas tanto como sea posible. Hoy en día los rotores modernos alcanzan los valores de C_p en el rango de 0,4 a 0,5, que es de 70 a 80% del máximo posible en teoría.

4.2.4. Análisis de la potencia en el viento (P_v)

Para poder encontrar la potencia que nos entrega el viento debemos considerar su energía cinética ya que el viento es una masa en movimiento, así tenemos:

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot v^2 \quad (17)$$

Dónde:

v = velocidad del viento

\dot{m} = masa del aire barrida

La masa del aire se puede calcular de la siguiente forma:

$$\dot{m} = \rho \cdot A \cdot v \quad (18)$$

Dónde:

ρ = densidad del aire

A = área barrida por el rotor

Así finalmente definimos la potencia de una masa de aire que se desplaza con una determinada velocidad por unidad de área:

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (19)$$

4.2.5. Análisis de la potencia en el rotor

Como se analizó anteriormente en la ley de betz no es posible aprovechar toda la energía disponible en el viento ya que esta energía disminuye cuando el viento entra en el rotor, para ello como se observa en la figura 22 existe un coeficiente de potencia que depende de la relación de velocidades de entrada y salida del rotor eólico. Luego de tener claro este coeficiente, se debe considerar que no todos los rotores son iguales de tal manera que los coeficientes de potencia aprovechable del viento serán distintos según el tipo y geometría del rotor. En la figura 23 se puede analizar los coeficientes de

potencia de los rotores según su geometría y según el tipo de recepción del viento, que puede ser por arrastre diferencial o por empuje ascensional.

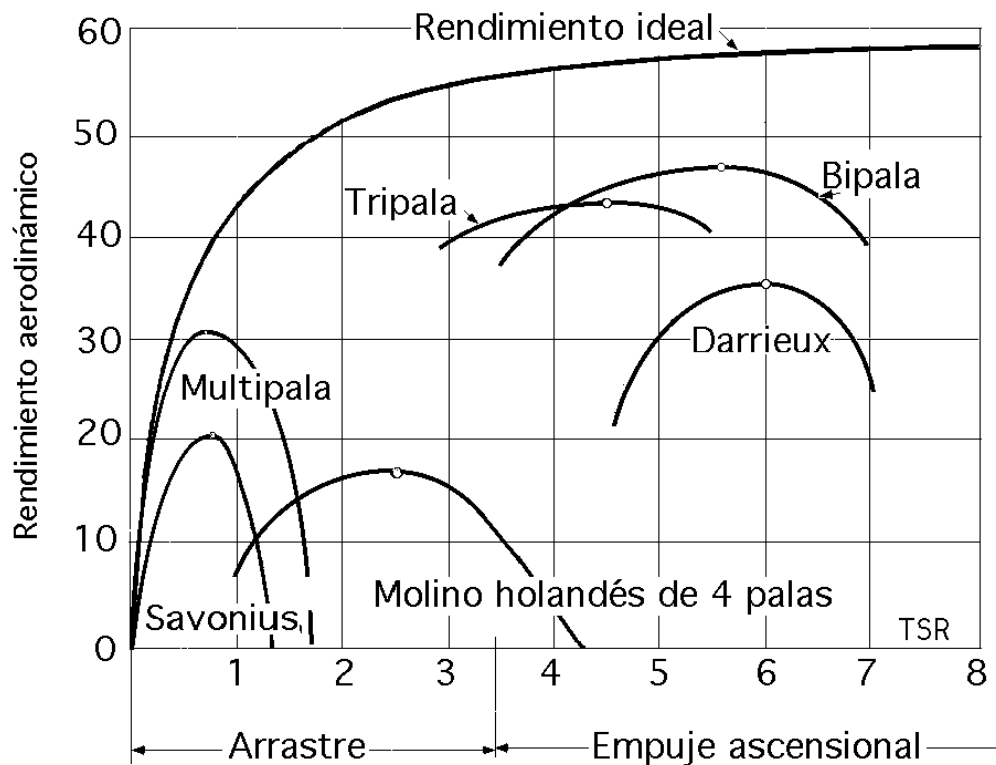


Figura 23. Curvas de C_p – TSR

Ahora sabemos los coeficientes de potencia que podemos obtener de los diferentes tipos de rotor y específicamente en el rotor savonius, pero hasta aquí no se puede escoger un coeficiente exacto sin antes considerar ciertas condiciones características del tipo de rotor que utilizaremos.

Empezaremos resaltando que el rotor savonius es una turbina de viento de arrastre diferencial, que quiere decir que la fuerza que el viento ejerce sobre el rotor genera fuerzas de empuje y de frenado por lo tanto la diferencia de estas fuerzas es la que hace girar al rotor, o también se puede decir que este rotor se basa en la diferente fuerza aerodinámica que ejerce un flujo de aire sobre objetos de distinta forma. La fuerza aerodinámica (F) que ejerce una corriente de aire sobre un objeto viene dada por la expresión:

$$F = C \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^2 \right) \quad (20)$$

Dónde:

C = coeficiente aerodinámico (depende de la geometría del objeto)

P = densidad del aire,

A = área de la sección transversal que presenta el objeto al flujo de aire o area de barrido

v = velocidad relativa del aire respecto al objeto.

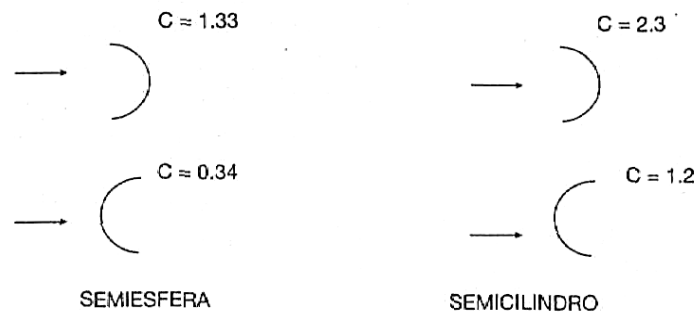


Figura 24. Valores de coeficiente aerodinámico de resistencia (C) para una semiesfera y un semicilindro.

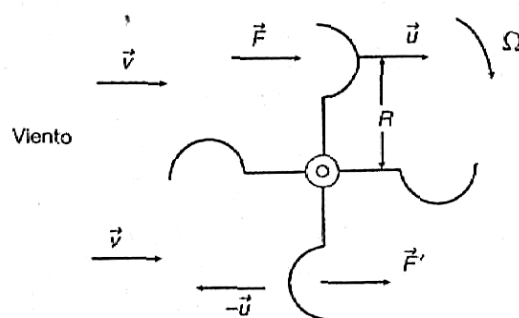


Figura 25. Acción del viento sobre un rotor de arrastre diferencial

En la figura 24 se muestran valores del coeficiente aerodinámico C correspondientes a la semiesfera y al semicilindro.

Si se concibe un rotor formado por un conjunto de alabes en forma de cazoletas semiesféricas o semicilíndricas colocadas en la forma que se indica en la figura 25, la acción del viento origina fuerzas distintas en las partes cóncava y convexa de estas cazoletas, lo que da lugar a un par que provoca el giro del rotor. Debido a que la fuerza que origina el par es la diferencia entre las fuerzas aerodinámicas que experimentan las

partes cóncava y convexa de los alabes o paletas del rotor, este tipo de máquina recibe el nombre de eólica de arrastre diferencial.

Se puede elaborar una teoría aproximada, basada en el esquema de la figura 25 a partir del siguiente razonamiento:

Si el rotor gira con velocidad de rotación Ω , y el centro de los alabes está a una distancia R del centro de giro, la velocidad lineal de las cazoletas será: $u = \Omega R$. Si el viento presenta una velocidad absoluta (v), su velocidad relativa respecto a la cazoleta superior (se aleja del viento) será: $v - u$, mientras que respecto a la cazoleta opuesta que ocupa la posición inferior (se acerca al viento) será: $v + u$. Así, aparecen dos fuerzas F y F' , de dirección y sentidos iguales pero de diferente módulo, que actuando sobre las cazoletas opuestas simétricamente originan un par de fuerzas que provoca el giro del rotor {figura 25). Las distintas fuerzas F y F' se calculan según:

$$F = C \frac{1}{2} \rho A (v - u)^2 \quad ; \quad F' = C' \frac{1}{2} \rho A (v + u)^2 \quad (21)$$

La potencia P desarrollada por el flujo de viento sobre el rotor será el producto de la fuerza neta (diferencia de ambas fuerzas) por la velocidad lineal (u) de las paletas y vendrá dada por:

$$P = F - F' \quad u = \frac{1}{2} \rho A u [C v - u^2 - C'(v + u)^2] \quad (22)$$

El valor de la potencia P se hace máximo para una velocidad lineal (u_m) de las cazoletas, obtenida derivando la expresión anterior e igualando a cero. Este valor es:

$$u_m = v \frac{2a - \sqrt{4a^2 - 3b^2}}{3b} \quad \text{con} \quad a = C + C' \quad ; \quad b = C - C' \quad (23)$$

- Para cazoletas en forma de semiesferas:

$$C = 1.33 \quad ; \quad C' = 0.34 \quad \rightarrow \quad a = 1.67 \quad ; \quad b = 0.99 \quad \rightarrow \quad u_m = 0.16 v$$

$$\text{Siendo la potencia máxima: } P_m = 0.077 \left[\frac{1}{2} \rho A v^3 \right]$$

- Para cazoletas en forma de semicilindros:

$$C = 2.3 \quad ; \quad C' = 1.2 \quad \rightarrow \quad a = 3.5 \quad ; \quad b = 1.1 \quad \rightarrow \quad u_m = 0.08 v$$

Siendo la potencia máxima: $P_m = 0.074 \left[\frac{1}{2} \rho A v^3 \right]$

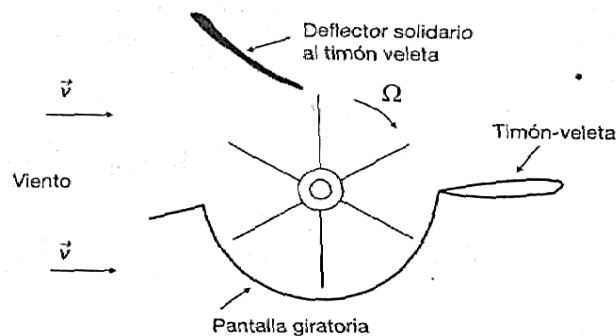


Figura 26. Rotor de arrastre diferencial provisto con una pantalla giratoria que impide la acción del viento sobre los alabes situados en la parte inferior de la figura

Los coeficientes de potencia para estas geometrías son muy similares. En la práctica es preferible la semicilíndrica pues, a igualdad de radio, la cazoleta presenta un área frontal mayor que la semiesférica y además es de más fácil construcción.

Para eliminar el efecto nocivo de la fuerza F' que actúa sobre el alabe o cazoleta inferior (que se mueve en sentido opuesto a la velocidad del viento), se puede incorporar al rotor una pantalla orientable por medio de un timón-veleta, junto con un sistema de deflectores adecuado que facilite la canalización del flujo de aire sobre las palas activas, según se muestra en la figura 26.

En estas condiciones, la fuerza F' se anula y la velocidad u_m para la que se obtiene potencia máxima se determina a través de la ecuación (23), en donde $a=b$, con lo cual se obtiene $u_m = \frac{v}{3}$ y el valor de la potencia máxima se calcula a partir de la ecuación (22):

$$P_m = C \times \frac{4}{27} \times \left[\frac{1}{2} \rho A v^3 \right]$$

- Si las palas del rotor son semiesferas, se tiene:

$$C = 1.33 \rightarrow P_m = 0.197 \left[\frac{1}{2} \rho A v^3 \right]$$

- Si las palas del rotor son semicilindros, se tiene:

$$C = 2.3 \rightarrow P_m = 0.341 \left[\frac{1}{2} \rho A v^3 \right]$$

Con este antecedente de cálculo, para el caso específico de nuestra aeroturbina la potencia para el rotor savonius con apantallamiento de viento quedara expresada por la siguiente ecuación:

$$P_a = C x \frac{4}{27} x \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad \rightarrow \quad C_p = C \cdot \frac{4}{27}$$

$$P_a = C_p \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (24)$$

4.2.6. Análisis de la potencia de generación mecánica y eléctrica (η)

Para este análisis se estima un rendimiento mecánico (η_m) del 90%, se considera para ello perdidas de energía por roce que se producen en los descansos y acoplamientos, así también se asume un rendimiento eléctrico (η_e) de 90% ya que en la actualidad existen generadores con eficiencias cercanas al 95%. Para nuestro rotor y por cuestiones de diseño consideraremos un rendimiento total (η) de 90%.

$$\eta_t = 0.9$$

De tal forma, la potencia total emitida por el aerogenerador será calculada por la siguiente expresión:

$$P_t = \eta_t \cdot C_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (25)$$

4.2.7. Dimensionamiento del rotor

Como se habló anteriormente, el rotor que se utilizara será de tipo savonius, por lo tanto la determinación del área de barrido se desprenderá del cálculo para el área de barrido de los aerogeneradores de eje horizontal.

En una turbina eólica independientemente de que tipo sea, el cálculo para potencia será el mismo y se calculara con la ecuación (25), entonces para dimensionar el rotor empezaremos despejando el área de barrido de esta ecuación obteniendo la siguiente expresión:

$$A = \frac{2 \cdot P_t}{\rho \cdot v^3 \cdot C_p \cdot \eta_t} \quad (26)$$

Una vez obtenido todos los valores de las variables de la ecuación (26) obtenemos el área de barrido del rotor a utilizar, ahora como se puede observar en la misma ecuación el valor del área de barrido no depende de π , por este motivo se puede considerar que el valor de esta área será igual al producto de la base por la altura del área de barrido de un generador de eje vertical.

Ahora con el propósito de obtener simetría en el dimensionamiento podemos considerar que la base será igual a la altura del rotor (Figura 27), así se tiene:

$$\begin{aligned} A &= b \cdot h . \\ h &= b = \bar{A} \end{aligned} \quad (27)$$

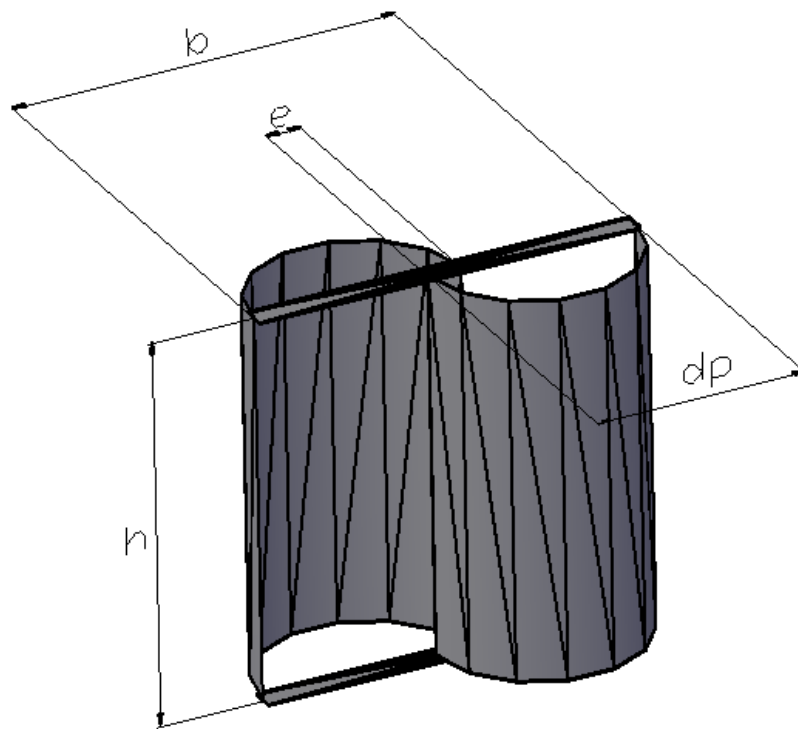


Figura 27. Esquema de dimensiones en el rotor savonius

Luego de encontrar las dimensiones de base y altura del rotor, se debe calcular el diámetro de la pala (dp), y la abertura entre palas (e), ilustradas en la figura 27, estas variables se las obtiene con la siguiente expresión:

$$b = dp - \frac{e}{2} \cdot 2 \quad \rightarrow \quad e = \frac{dp}{6} \quad (28)$$

4.2.8. Carcasa de toberas

La carcasa de toberas tiene un papel muy importante en el sistema de generación ya que esta cumple con dos fundamentales funciones, la primera es la de incrementar la velocidad del viento, y la segunda es la de direccionar el flujo de viento de tal manera que la fuerza eólica impacte en la parte útil del rotor eliminando así fuerzas de frenado y aumentando la eficiencia del mismo.

Como se muestra en la figura 28 se ha diseñado una carcasa de toberas de ocho entradas las mismas que están simétricamente separadas a 45° permitiendo así la captación del viento en cualquier dirección, sin limitar el volumen de entrada al aumentar las toberas, y sin limitar la acción por direccionamiento del viento al disminuir las mismas. Así mismo todas las curvas de la carcasa están dimensionadas con el mismo radio, de esta forma se asegura una mejor función aerodinámica del sistema.

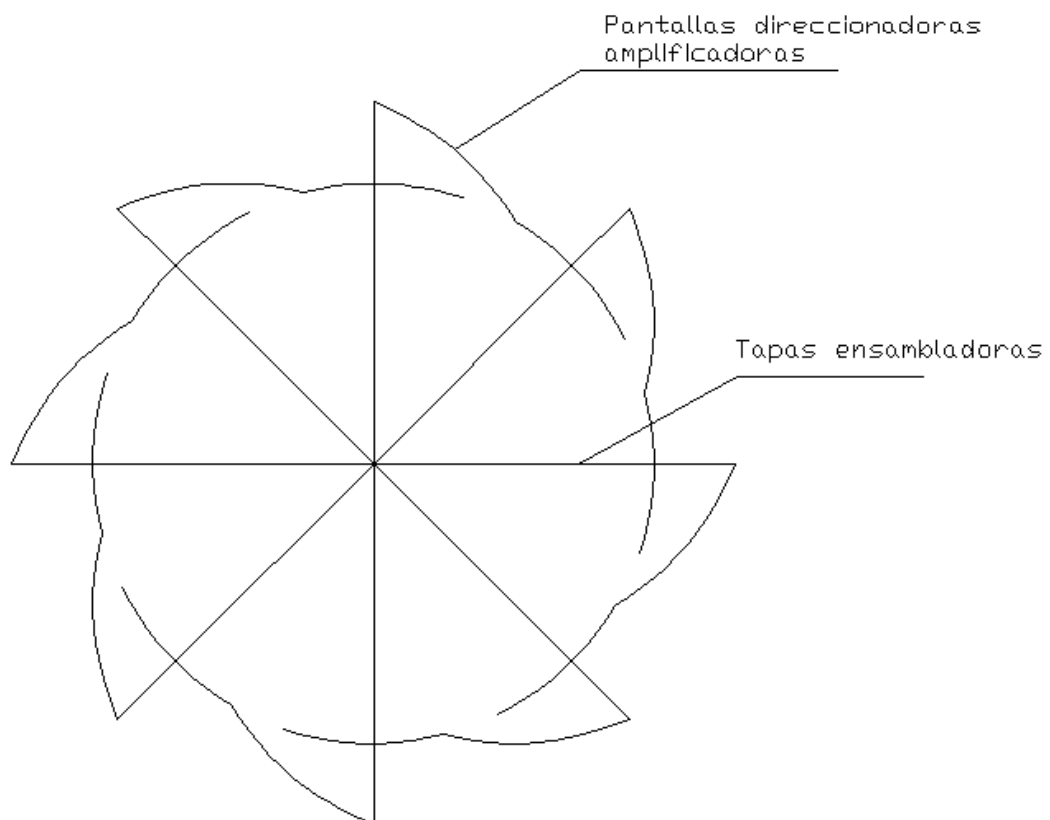


Figura 28. Carcasa de toberas

La carcasa de toberas tiene dos tapas, una fija y otra empernada, lo que la hace desarmable para un mejor mantenimiento, también hay que mencionar que el conjunto de toberas permanecerá fijo por lo tanto no afectará en el par necesario para vencer la

inercia del rotor como lo haría si las toberas giraran con el rotor en conjunto, esta es una característica importante ya que le debemos asegurar el menor peso posible al rotor del sistema, esta misma condición nos permite ahorrar en la construcción de la estructura de la carcasa, ya que su peso no representaría un problema podemos construirla de planchas de tol negro de 1mm , con una estructura para mantener su forma de pletina de acero de transmisión de 1 ½” x 3/16”, y para las tapas utilizaremos TEE de 3/4” x 1/8”

El dimensionamiento de la carcasa parte del dimensionamiento del rotor una vez obtenido el diámetro exterior del rotor savonius elegimos el diámetro interior de la carcasa de toberas y con este mismo radio se diseña todas las curvas de las toberas obteniendo así simetría y aerodinamismo. Luego de obtener las curvas de entrada de las toberas, podemos obtener un promedio de área de entrada, utilizando la ecuación (30), y suponiendo una dirección específica de acción del viento como lo ilustra la figura 29

$$\text{Promedio de entradas } (at) = \frac{a1+a2+a3}{3} \quad (29)$$

$$\text{Promedio de area de entrada } Ae = at \cdot h \quad (30)$$

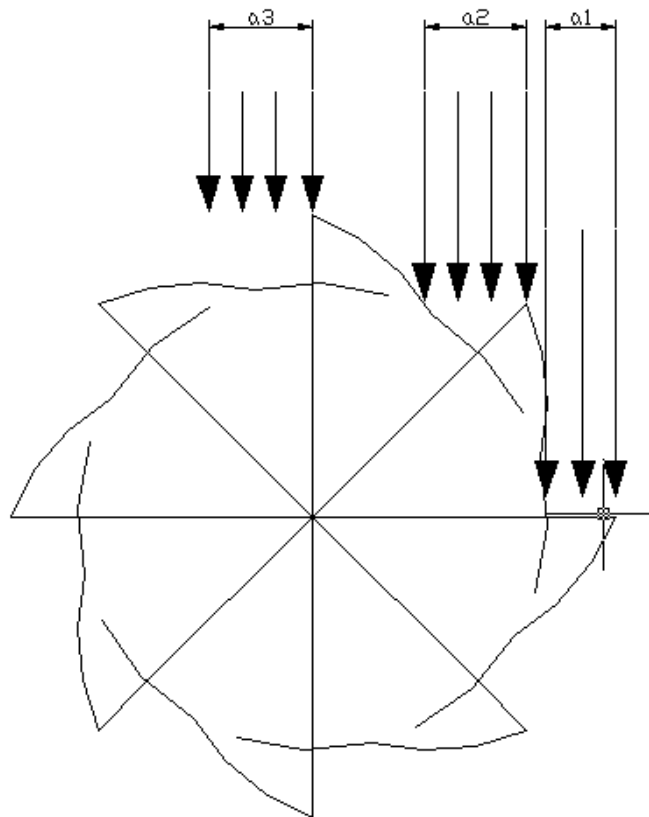


Figura 29. Determinación de un promedio de área de entrada para una dirección determinada de viento

Una vez determinada el área de entrada de admisión de viento se procede a calcular el área de salida de la tobera, como se muestra en la figura 30, y que se podrá determinar empleando la ecuación de continuidad la misma q se expresa de la siguiente forma:

$$m_1 = m_2$$

$$\rho_e \cdot A_e \cdot v_e = \rho_s \cdot A_s \cdot v_s \quad (31)$$

Dónde:

ρ = densidad del aire

A_e, A_s = área de entrada y salida respectivamente

v_e, v_s = velocidad de entrada y salida respectivamente

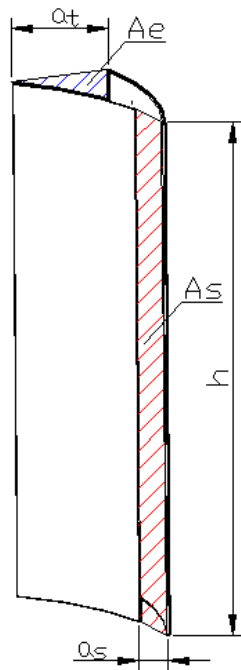


Figura 30. Tobera

A partir de la ecuación (31) se despeja el área de salida obteniendo la siguiente expresión:

$$A_s = \frac{\rho_e \cdot A_e \cdot v_e}{\rho_s \cdot v_s} \quad (32)$$

Finalmente una vez obtenida el área de salida, y como lo muestra la figura 30, la altura h es la misma en los dos extremos de la tobera, simplemente aplicamos la ecuación (30)

y despejamos la variable de la abertura para la salida de la tobera, obteniendo lo siguiente:

$$as = \frac{As}{h} \quad (33)$$

4.2.9. Análisis de fuerzas en el rotor.

Velocidad angular del rotor. (Ω)

Para la determinación de la velocidad angular debemos utilizar la ecuación (34).

$$\Omega = \frac{u}{R} \quad (34)$$

Dónde:

u = velocidad lineal de las cazoletas

R = distancia del centro de giro a la periferia de la cazoleta.

Para encontrar la velocidad lineal de las cazoletas debemos aplicar la ecuación (23)

$$u = v \frac{2a - \sqrt{4a^2 - 3b^2}}{3b} \quad \rightarrow \quad a = b = C = 2.3 \quad (\text{Para cazoletas en forma de semicilindro con apantallamiento})$$

Determinación del valor TSR (λ) y número de revoluciones del rotor (rpm)

La relación de velocidad específica o periférica TSR, Tip- Speed-Ratio, es un término que sustituye al número de revoluciones por minuto n del rotor; sirve para comparar el funcionamiento de máquinas eólicas diferentes, por lo que también se le suele denominar velocidad específica. El TSR indica que la periferia de la pala circula a una velocidad TSR veces mayor que la velocidad del viento v y es la relación entre la velocidad periférica de la pala $u = R\Omega$ (la del punto más exterior sobre la misma a partir del eje de rotación, como lo muestra la figura 31), y la velocidad del viento v , en la forma:

$$\lambda = \frac{u}{v} = \frac{\Omega R}{v} = \frac{2\pi n R}{60v} \quad (35)$$

Dónde:

u = velocidad lineal del extremo de la pala del rotor del generador (m/s)

Ω = velocidad de rotación de las palas del rotor (rad/s)

n = velocidad de rotación de las palas (rpm)

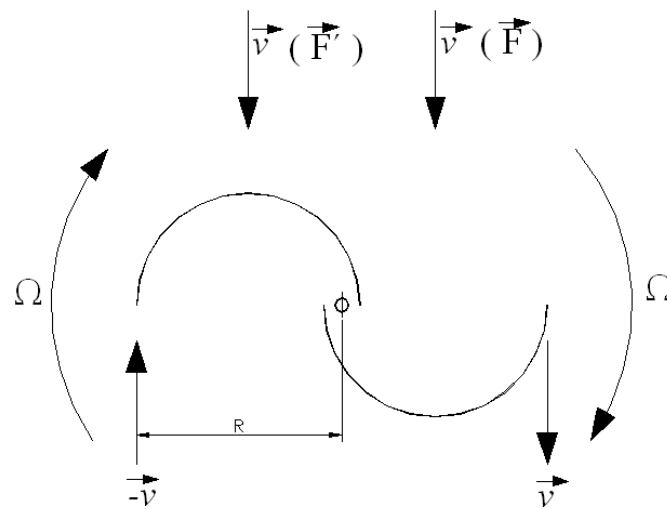


Figura 31. Esquema de fuerzas y velocidades

Una vez obtenida la velocidad específica (λ) se puede calcular las revoluciones por minuto despejando la variable n de la ecuación (35)

Fuerza ascensional y de arrastre (Kg)

Para el caso específico del rotor savonius, la fuerza ascensional (F_{asc}) empuja lateralmente al rotor mientras que la fuerza de arrastre (F_{arr}) lo empuja hacia abajo, como lo muestra la figura 32, la aparición de estas fuerzas se debe al efecto Magnus y se expresan en (Kg) en la forma:

$$F_{asc} = 1,08 \cdot C_y \cdot \rho \cdot A \cdot v^2 \quad (36)$$

$$F_{arr} = 1,08 \cdot C_x \cdot \rho \cdot A \cdot v^2 \quad (37)$$

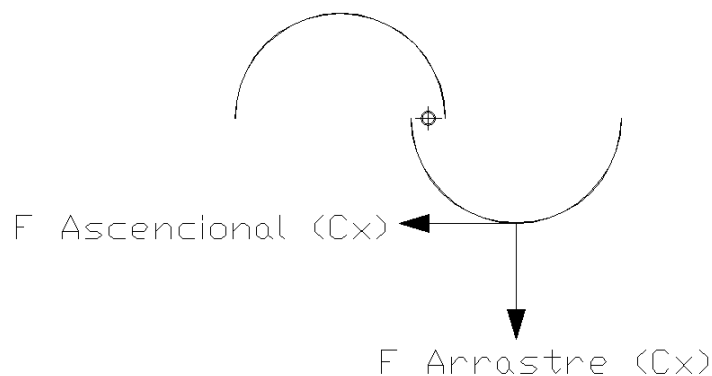


Figura 32. Esquema de intervención de fuerzas en las palas del rotor

Los coeficientes $C_y - C_x$ se los obtiene en función del TSR a partir de la figura 33.

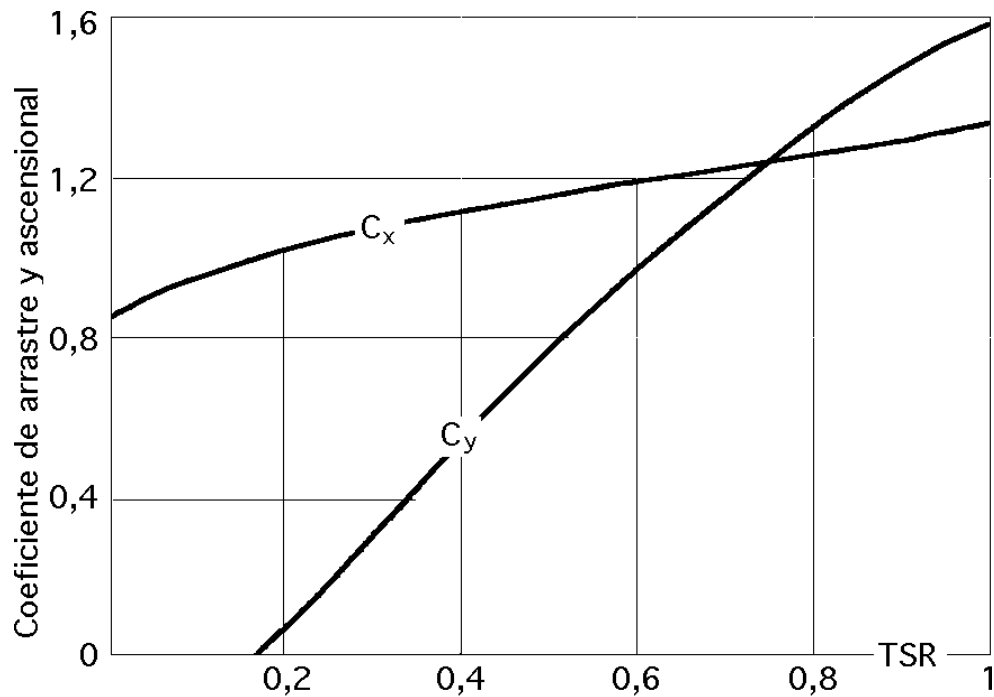


Figura 33. Coeficientes $C_x - C_y$ del rotor savonius en función del TSR.

De las fuerzas F_{asc} y F_{arr} obtenemos la fuerza total según la forma:

$$F_t = \sqrt{F_{asc}^2 + F_{arr}^2} \quad (38)$$

Determinación del torque (Kgf.m)

Para el cálculo del torque producido debemos referirnos a la ecuación:

$$F_{arr} = \frac{2 \cdot T}{r} \quad (39)$$

De donde despejamos el torque T, obteniendo:

$$T = \frac{F_{arr} \cdot r}{2} \quad (40)$$

4.3. Altura de la torre.

Aparentemente, mientras mayor altura tiene la torre, tanto más ventajosa es, debido a que genera mayor potencia. Pero uno de los factores determinantes es el costo de la

torre; una torre alta deberá ser robusta para soportar mayores momentos de volteo producidos por la fuerza axial sobre el rotor, y por vibraciones del sistema.

Según Hutte (Manual del Ingeniero), es recomendable tener en cuenta el tamaño del rotor para dimensionar la altura de la torre y señala como valores adecuados los siguientes:

Pequeñas instalaciones 4.20 m.

Medianas instalaciones 10.60 m.

Grandes instalaciones 40.40 m.

4.4. Emplazamiento

El lugar de emplazamiento para el aerogenerador será en el AEIRNNR de la Universidad Nacional de Loja, en una área verde junto al bloque uno, donde el monitoreo de la velocidad del viento según la estación meteorológica “La Argelia”, nos da una velocidad promedio de 2.5 m/s para este sector

4.5. Datos eólicos.

Mediante consulta de datos climáticos se establecerá y presentara un registro eólico obtenido en los últimos años y se obtendrá al final un promedio de velocidad eólica que permita establecer un dato aproximado de los vientos en el lugar de emplazamiento.

4.6. Simulación de datos

Por medio de graficas se observara la simulación obtenida a partir de los datos eólicos extraídos de los cálculos teóricos, donde se podrá observar la circulación y acción del viento en el rotor savonius cubierto por la carcasa de toberas.

4.7. Elección de la luminaria LED.

Para una correcta elección de luminarias, debemos tener en cuenta las recomendaciones de la Comisión Internacional de Alumbrado (CIE), número ciento quince (115) que se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Normas generales para la redacción de proyectos de alumbrado exterior

Tipo de vía o área	Zona	Iluminancia media en servicio (lux)		Coeficiente de uniformidad media mínimo	Tipo y altura de soportes
		Mínima	Máxima		
Calzadas de autopistas, autovías, vías arteriales radiales y de circunvalación	Tramos	25	35	0,5	Báculos o columnas (10-18 m)
	Enlaces	35	45	0,5	Báculos o columnas (12-30 m)
Calzadas de ejes de Distrito	Tramos	25	35	0,4	Báculos o columnas (10-12 m)
	Intersecciones	30	40	0,4	Báculos o columnas (12-18 m)
Calzadas de calles colectoras de Barrio	Tramos	20	25	0,4	Báculos o columnas (9-10 m)
	Intersecciones	20	30	0,4	Báculos o columnas (10-12 m)
Calzadas de calles locales residenciales		15	25	0,3	Báculos o columnas (8-9 m) o candelabros
Calzadas de calles comerciales		25	30	0,3	Definir en proyecto (altura máxima 12 m)
Aceras y zonas peatonales	Centros históricos y vías comerciales	15	Estudio específico	Estudio específico	Definir en proyecto Recomendados candelabros
	Vías principales	15	20	0,3	Definir en proyecto necesidad y tipo
	Vías locales	10	15	0,2	Definir en proyecto necesidad y tipo
Aparcamientos en superficie		15	20	0,3	Definir en proyecto Recomendados báculos o columnas (8-18 m)
Parques y jardines	Paseos	7	10	-	Columnas (4-6 m)
	Plazas y zonas estanciales	7	15	0,2	Columnas (4-10 m) o candelabros
	Focos de especial interés	-	30	-	Definir en proyecto

4.8. Dimensionamiento de equipos eléctricos

Para poder seleccionar correctamente los equipos eléctricos debemos tener en cuenta el análisis de la carga descrita anteriormente, y se lo realiza en base al tiempo de consumo por día.

El dimensionamiento comprende:

- **Generador**

Este generador como se mencionó anteriormente debe ser de imanes permanentes y se lo elige tomando en cuenta la capacidad de generación de la turbina eólica, también es importante la elección del generador un poco sobredimensionado a los cálculos, para así poder aprovechar las ráfagas de viento de velocidades mayores pero sin descuidar la eficiencia del mismo ya que a mayor capacidad de generación el generador requiere de más torque de accionamiento

- **Baterías**

Para el dimensionamiento de estas se debe tomar en cuenta tres días de autonomía (da), que son los recomendados en el supuesto caso que no se obtenga brisas y por ende la no generación de energía. Para la aeroturbina de tipo savonius se ha decidido utilizar baterías de 12V de ciclo profundo de descarga que es el más usado en estos proyectos.

Entonces la energía entregada E_e será:

$$E_e = D_a \cdot \text{Consumo día} \quad (41)$$

Luego calculamos la energía almacenada para una profundidad de descarga (PD) de las baterías del 50%, debido a que no se debe permitir una descarga inferior ya que la vida útil de las baterías disminuiría, la energía almacenada (E_a) será:

$$E_a = \frac{E_e}{PD} \quad (42)$$

Por ultimo podemos obtener la carga total (S_t) que está dada por:

$$S_t = \frac{E_a}{V} \quad (43)$$

Dónde:

E = Energía almacenada

V = Voltaje de la batería

- **Inversor**

Este equipo es seleccionado en base a la potencia total de la carga que la batería alimentaran

- **Controlador de carga y banco de resistencias**

El controlador de carga generalmente se elige según la gama de opciones en el mercado tomando en cuenta la capacidad de las baterías, y así mismo el banco de resistencia se elige según el controlador de carga ya que este último cumple la función de descargar excesos de energía para protección del controlador

5. RESULTADOS

5.1. Datos teóricos

5.1.1. Dimensionamiento del rotor.

Para empezar el diseño debemos definir el tipo de rotor con el que se trabajará, para este caso diseñaremos para una turbina eólica de tipo savonius accionada por arrastre diferencial con carcasa amplificadora de vientos y a su vez con direccionadores que actuarán como apantallamiento de vientos de frenado.

Empezaremos calculando la velocidad lineal (u_m) de las cazoletas, a partir de la ecuación (23), tomando en cuenta el apantallamiento del rotor, y el coeficiente aerodinámico C obtenido de la figura 24 para cazoletas en forma de semicilindro.

$$u_m = v \frac{2a - \sqrt{4a^2 - 3b^2}}{3b} \rightarrow a = b = C = 2.3$$

$$u_m = v \frac{2(2.3) - \sqrt{4(2.3)^2 - 3(2.3)^2}}{3(2.3)}$$

$$u_m = v/3$$

A partir de la ecuación (22), reemplazamos el valor de la velocidad lineal y se iguala a cero el coeficiente C'

$$P = F - F' \quad u = \frac{1}{2} \rho A u [C v - u^2 - C'(v + u)^2]$$

$$P = \frac{1}{2} \rho A v/3 [C v - v/3^2 - 0]$$

$$P = C \times \frac{4}{27} \times \left[\frac{1}{2} \rho A v^3 \right]$$

Según la ecuación (24), si las palas del rotor son semicilindros se tiene un coeficiente aerodinámico $C = 2.3$, por lo tanto se puede calcular el coeficiente de potencia para nuestro rotor C_p :

$$C_p = 2.3 \cdot \frac{4}{27} = 0.341$$

$$P = 0.341 \left[\frac{1}{2} \rho A v^3 \right]$$

Como se mencionó anteriormente la potencia mínima a alcanzar será de 30W, la velocidad amplificada para el accionamiento del rotor será de 6 m/s, y el rendimiento

mecánico y eléctrico será del 90%. Con estos datos y según la ecuación (26) se puede obtener el área de barrido

$$A = \frac{2 \cdot P_t}{\rho \cdot v^3 \cdot C_p \cdot \eta_t}$$

$$A = \frac{2 \cdot 30W}{1.225 \frac{Kg}{m^3} \cdot (6m/s)^3 \cdot 0.341 \cdot (0.9)}$$

$$A = 0.7 m^2$$

Una vez obtenida el área se aplica la ecuación (27) para dimensionar la base y altura del rotor

$$A = b \cdot h$$

$$h = b = \sqrt{A}$$

$$h = b = \sqrt{0.7 m^2}$$

$$h = b = 0.83 m$$

Según la ecuación (28) se calcula el diámetro y abertura e entre palas:

$$b = dp - \frac{e}{2} \cdot 2 \quad \rightarrow \quad e = \frac{dp}{6}$$

$$b = 2dp - e$$

$$b = 2dp - \frac{dp}{6}$$

$$dp = \frac{b}{11/6} = \frac{83cm}{11/6} = 45.2 cm$$

$$e = \frac{dp}{6} = \frac{45.2cm}{6} = 7.5cm$$

5.1.2. Dimensionamiento de carcasa de toberas

Para dimensionar la carcasa de toberas debemos iniciar determinando la velocidad promedio del viento para el sitio de emplazamiento la cual mediante un análisis a los datos eólicos presentados más adelante en la tabla 4, se pudo determinar una velocidad media inicial $v_1 = 2.5 m/s$, así mismo debemos definir la velocidad de salida necesaria,

esta es la velocidad de viento que impactara con el rotor, para este caso necesitaremos una velocidad amplificada de salida $v_2 = 6 \text{ m/s}$

Luego se debe obtener un promedio de área de entrada, utilizando la ecuación (29) y (30), suponiendo una dirección específica de acción del viento como lo ilustra la figura 29

$$\text{Promedio de entradas } (at) = \frac{a_1+a_2+a_3}{3}$$

$$\text{Promedio de entradas } at = \frac{18.81\text{cm}+25.28\text{cm}+23.94\text{cm}}{3} = 20.34\text{cm}$$

$$\text{Promedio de area de entrada } Ae = at \cdot h$$

$$\text{Promedio de area de entrada } Ae = 20.34\text{cm} \times 83\text{cm} = 1688.22 \text{ cm}^2$$

Luego encontramos el área de salida con la ecuación (32):

$$As = \frac{\rho_e \cdot Ae \cdot ve}{\rho_s \cdot vs} = \frac{Ae \cdot ve}{vs}$$

$$As = \frac{1688.22 \text{ cm}^2 \times 250\text{cm/s}}{600\text{cm/s}} = 703.42\text{cm}^2$$

Aplicamos la ecuación (33) para obtener la abertura de salida en la tobera a_s :

$$as = \frac{As}{h}$$

$$as = \frac{703.42\text{cm}^2}{81 \text{ cm}}$$

$$as = 8.68\text{cm}$$

5.1.3. Cálculo de fuerzas en el rotor.

- **Velocidad angular del rotor. (Ω)**

Para la determinación de la velocidad angular debemos iniciar encontrando la velocidad lineal de las palas aplicando la ecuación (23)

$$u = v \frac{2a - \sqrt{4a^2 - 3b^2}}{3b} \rightarrow a = b = C = 2.3$$

$$u = v/3$$

$$u = \frac{6m/s}{3}$$

$$u = 2m/s$$

Luego utilizaremos la ecuación 34 para calcular la velocidad angular

$$\Omega = \frac{u}{R}$$

$$\Omega = \frac{2m/s}{0.415m}$$

$$\Omega = 4.81 \text{ rad/s}$$

- **Cálculo del valor TSR (λ) y número de revoluciones del rotor (rpm)**

Para el cálculo del TSR o velocidad específica emplearemos la ecuación (35):

$$\lambda = \frac{u}{v} = \frac{\Omega R}{v} = \frac{2\pi n R}{60v}$$

$$\lambda = \frac{2m/s}{6m/s}$$

$$\lambda = 0.333$$

Ahora de la misma ecuación (35), despejamos la variable n para el cálculo de la revoluciones del rotor

$$\lambda = \frac{2\pi n R}{60v}$$

$$n = \frac{\lambda \cdot 60 \cdot v}{2 \cdot \pi \cdot R}$$

$$n = \frac{0.333 \times 60 \times 6m/s}{2 \times \pi \times 0.415m}$$

$$n = 46 \text{ rpm}$$

- **Calculo de la fuerza ascensional y de arrastre (Kg)**

Primeramente se deben escoger los coeficientes C_y y C_x según la gráfica 33.

$$Cx = 1.1$$

$$Cy = 0.3$$

Mediante la ecuación (36), calculamos la fuerza ascensional:

$$Fasc = 1,08 \cdot Cy \cdot \rho \cdot A \cdot v^2$$

$$Fasc = 1,08 \times 0.3 \times (1.225) \times (0.7) \times (6)^2$$

$$Fasc = 10Kg$$

A partir de la ecuación (37), se calcula la fuerza de arrastre

$$Farr = 1,08 \cdot Cx \cdot \rho \cdot A \cdot v^2$$

$$Farr = 1,08 \times 1.1 \times (1.225) \times (0.7) \times (6)^2$$

$$Farr = 36.67 Kg$$

De las fuerzas Fass y Farr obtenemos la fuerza total según la ecuación (38)

$$Ft = \sqrt{Fasc^2 + Farr^2}$$

$$Ft = \sqrt{(10Kg)^2 + (36.67Kg)^2}$$

$$Ft = 38Kg$$

- **Calculo del torque (N.m)**

Para el cálculo del torque producido debemos referirnos a la ecuación (40):

$$T = \frac{Farr \cdot r}{2}$$

$$T = \frac{36.67Kg \times 0.415m}{2}$$

$$T = 7.6 Kgf \cdot m$$

$$T = 74.56 N \cdot m$$

5.1.4. Altura de la torre

Para definir la altura de la torre tomaremos en cuenta el criterio establecido por Hutte, el cual establece alturas de torres según el tamaño del rotor, para nuestro caso lo consideraremos como una “pequeña instalación” para generación, por lo tanto la altura de la torre deberá ser de 4.2 m

5.1.5. Emplazamiento

Para la ubicación del generador se pidió la donación de una torre ya existente en el área de energía cerca del bloque 1 y el cual cumple con las condiciones para ubicarse en el al generador (El plano del sitio de emplazamiento se muestra en el anexo 10.5). Para la comprobación de estas condiciones se analizó primeramente la altura de la torre la cual es de 7.6 m, esta altura no representa un problema mayor ya que si bien se especificó que se necesita una altura de 4.2m, el aumento de altura para el generador aumentaría su eficiencia.

La segunda condición que se analizo es la cimentación de la torre y para esto se debe apoyarse en la ecuación (20), donde utilizaremos la misma expresión omitiendo el coeficiente “C” ya que analizaremos la fuerza máxima que ejerce el viento sobre cualquier superficie y no la fuerza que es aprovechada por las palas del rotor. El diagrama de los momentos intervinientes en el emplazamiento se puede apreciar en el anexo 10.6.

$$F = C \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot w^2 \right)$$

$$F = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot w^2 \cdot Cs$$

$$F = \frac{1}{2} \times 1.225 \times 0.9 \times 1.08 \times 5^2 \times 2$$

$$F = 29.76 \text{ N}$$

$$T_1 = F \times d$$

$$T_1 = 29.76 \times 8.41$$

$$T_1 = 250.34 \text{ Nm}$$

Este resultado obtenido T_1 es el momento que se efectúa en la torre al golpear el viento sobre el generador con la máxima velocidad de viento según estadísticas, ahora se deberá comprobar si el volumen y peso de la cimentación existente podrá soportar al generador y evitar que este se voltee. Para esta comprobación se deberá obtener primeramente el volumen de la cimentación existente el cual como se puede observar en el anexo 10.6, se tiene un volumen de 1 m^3 lo que corresponde a un peso equivalente de 2000Kg el mismo que para efecto de cálculos se lo debe transformar a Newton, obteniendo así 19620 N.

Luego de obtener el peso de la cimentación podemos calcular el momento o torque necesario para voltearlo y compararlo con el momento o torque que se crea en la torre por la acción del viento en el generador

$$T_A = W \times d$$

$$T_A = 19620 \times 0.7$$

$$T_A = 13734 \text{ Nm}$$

$$T_A \gg T_1$$

Como se puede observar en el resultado anterior el momento a vencer de la cimentación es mucho mayor que el momento de la torre por acción del viento en el generador

5.1.6. Datos eólicos

A continuación se presentara un registro eólico obtenido en los últimos años por el INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología), donde se mostrará las velocidades de los vientos en un promedio por año desde el año 2000 hasta el año 2010.

Tabla 4. Datos eólicos del sector La Argelia periodo 2000 – 2010 (INAMHI)

Velocidad Media (m/s) La Argelia Periodo 2000 - 2010			
MES	VELOCIDAD MEDIA m/s	TEMPERATURA °C	DIRECCION DOMINANTE
Enero	1,6	16,3	N-NW-NE
Febrero	1,6	16,5	N-NW-NE
Marzo	1,3	16,3	N-NW-NE
Abril	1,4	16,5	N-NW-NE
Mayo	1,9	16,3	N-NW-NE
Junio	3,2	15,5	N-NW-NE
Julio	2,8	15,4	N-NW-NE
Agosto	3,7	15,6	N-NW-NE
Septiembre	2,3	16,3	N-NW-NE
Octubre	1,6	16,8	N-NW-NE
Noviembre	1,3	16,5	N-NW-NE
Diciembre	1,3	16,7	N-NW-NE

En la tabla 4 se puede observar que la mayor velocidad promedio de los últimos años se las obtiene en el mes de agosto con 3,7 m/s y la menor en marzo, noviembre y

diciembre con 1,3 m/s. Para efecto de cálculos se ha decidido sacar un promedio de estos dos datos máximo y mínimo para obtener un valor nominal de velocidad de viento. Por lo tanto si consideramos una velocidad máxima de 3.7 y una mínima de 1.3, la velocidad promedio que se utilizara para efectuar los cálculos será de 2.5 m/s

5.1.7. Simulación de datos

A continuación se presentara las gráficas de simulación obtenida a partir de los datos eólicos extraídos de los cálculos teóricos, para la presente simulación se utilizó el programa AUTO-CAD para dibujar el rotor con la carcasa, luego se delimito y condicionó en el programa GAMBIT, para luego simular en el programa FLUENT.

Para la ejecución de la simulación se tuvo que partir de datos característicos del aire en el medio de emplazamiento, los mismos que son:

- Viscosidad dinámica del aire (μ)

$$\mu = 1.8 \times 10^{-5} \frac{Kg}{m \cdot s}$$

- Viscosidad cinemática (viscosidad absoluta) (γ)

$$\gamma = 1.47 \times 10^{-5} \frac{m^2}{s}$$

- Presión en la ciudad de Loja (P)

$$P = 76544.465 Pa$$

- Altura de la ciudad de Loja (h)

$$h = 2060 msnm$$

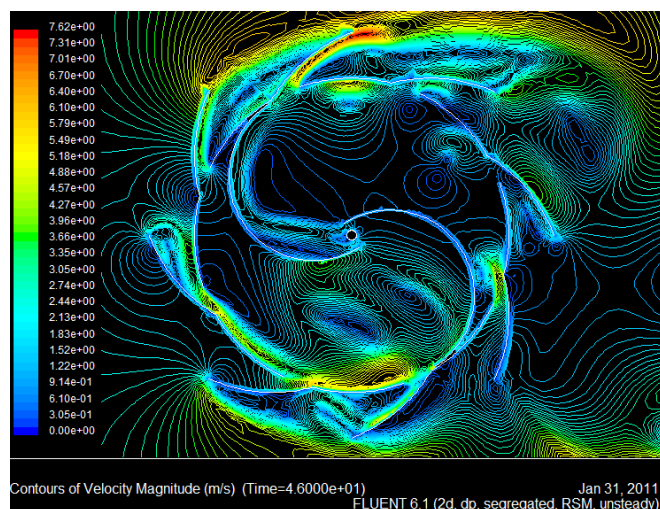


Figura 34. Primera Simulación en FUENT

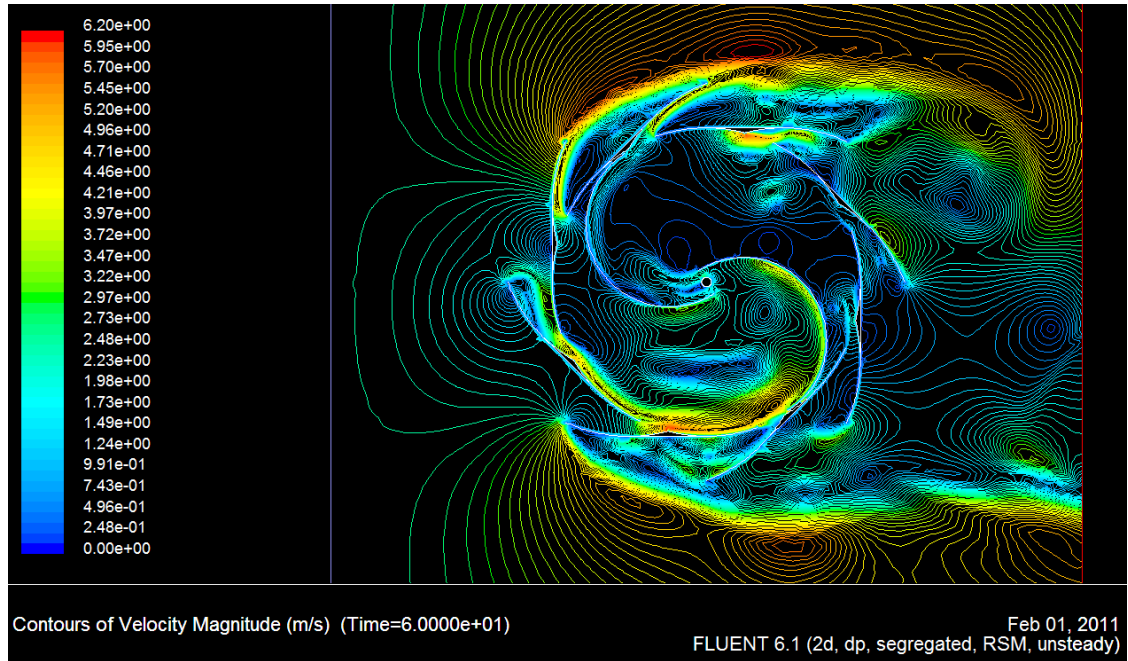


Figura 35. Segunda simulación, con alisado de aristas que impiden el paso del viento

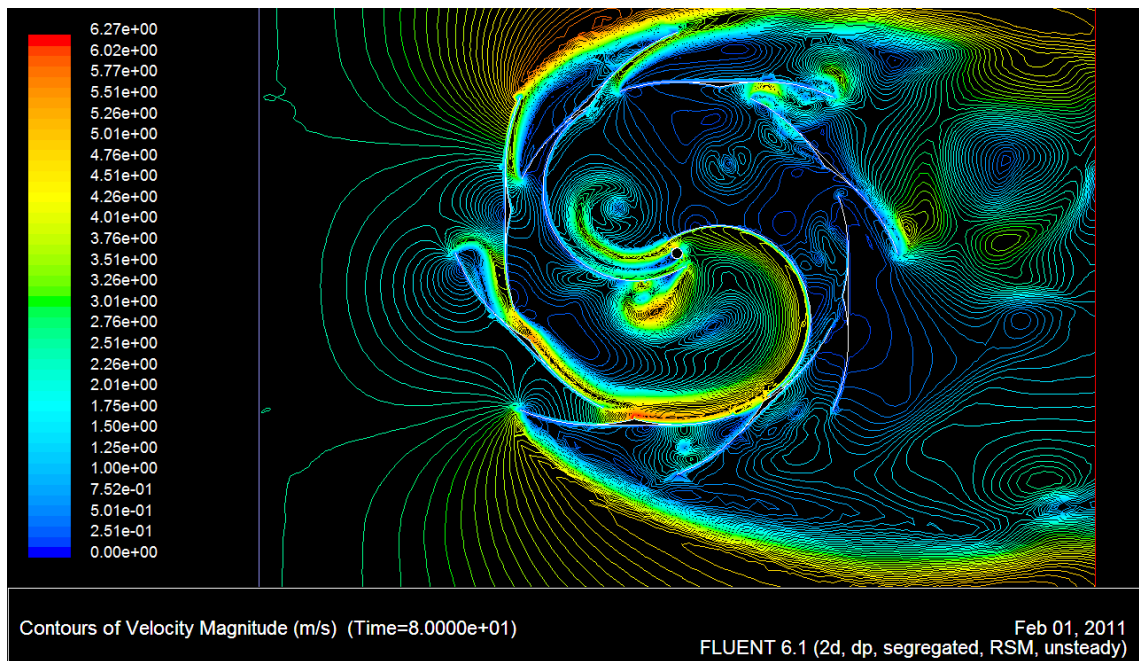


Figura 36. Efecto de recirculación del viento

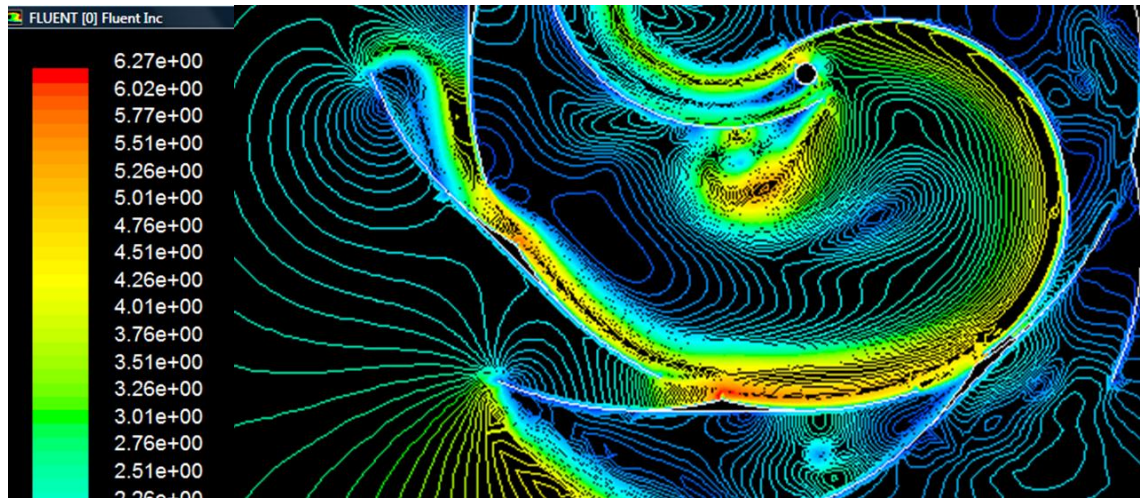


Figura 37. Acercamiento de detalle de velocidades

5.1.8. Elección de la luminaria LED.

Según la tabla 3, se deberá iluminar una plaza o zona estancial para un porque o jardín, con una iluminancia mínima de 7 lux y máxima de 15 lux,

Para satisfacer la iluminancia descrita anteriormente para el presente trabajo de tesis se ha elegido una luminaria LED existente en el mercado, la misma que se muestra en la figura 38 y presenta los siguientes datos:



Figura 38. Luminaria LED BBE Modelo SP80B

Datos técnicos:

Fabricante: Bang-Bell Electronics Co., Ltd. (BBE)

Nombre y número del modelo: LED light bulb SP80B

Potencia de consumo: 10 W

Voltaje de trabajo: 12/24 V dc ; 100-240 V ac, 50/60 Hz

Tiempo de vida aproximado: >50,000 horas

Dimensión: 80 x 179mm

Base: E27 / E26 / E17 / E14 / E12 / GU10

Certificación: CIE

Angulo de luminiscencia: 120°

Lumens: 500 en blanco puro, 450 en blanco calido

Lente de lámpara: Acrílico

Copa radiador de lámpara: Aluminio

Altura de instalación: según grafica de intensidad de iluminación requerida figura 39

A continuación en la gráfica 39 se muestra la intensidad de iluminación a diferentes alturas de la luminaria LED SP80B.

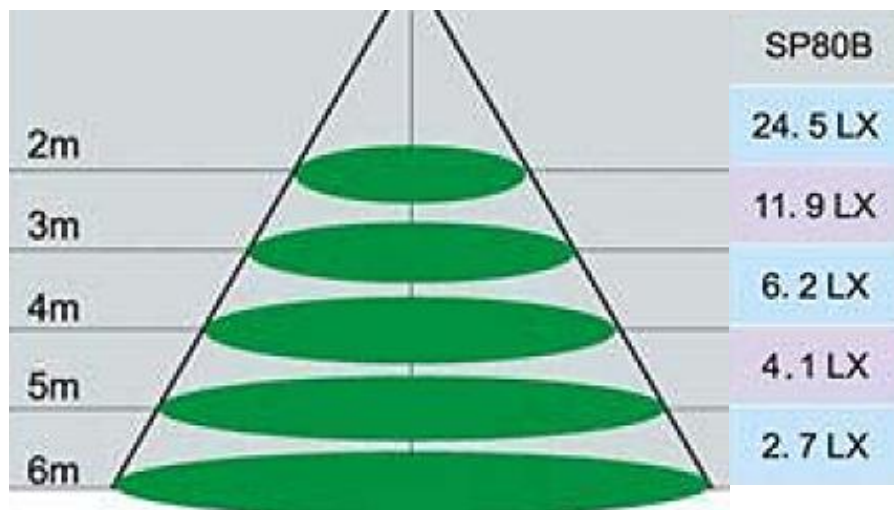


Figura 39. Intensidad de iluminación a diferentes alturas para luminaria LED SP80B

Como se puede observar en la figura 39, se puede instalar la luminaria a 3m del suelo, así se obtendrá una iluminancia de 11.9 lux el cual está dentro del rango especificado como necesario para iluminación de plazas, zonas estanciales, parques o jardines descrito en norma CIE de la tabla 3.

En la figura 40 se puede apreciar la distribución de intensidad de iluminación en el suelo cuando la luminaria se encuentra a 3m del suelo con 120° de ángulo de luminiscencia

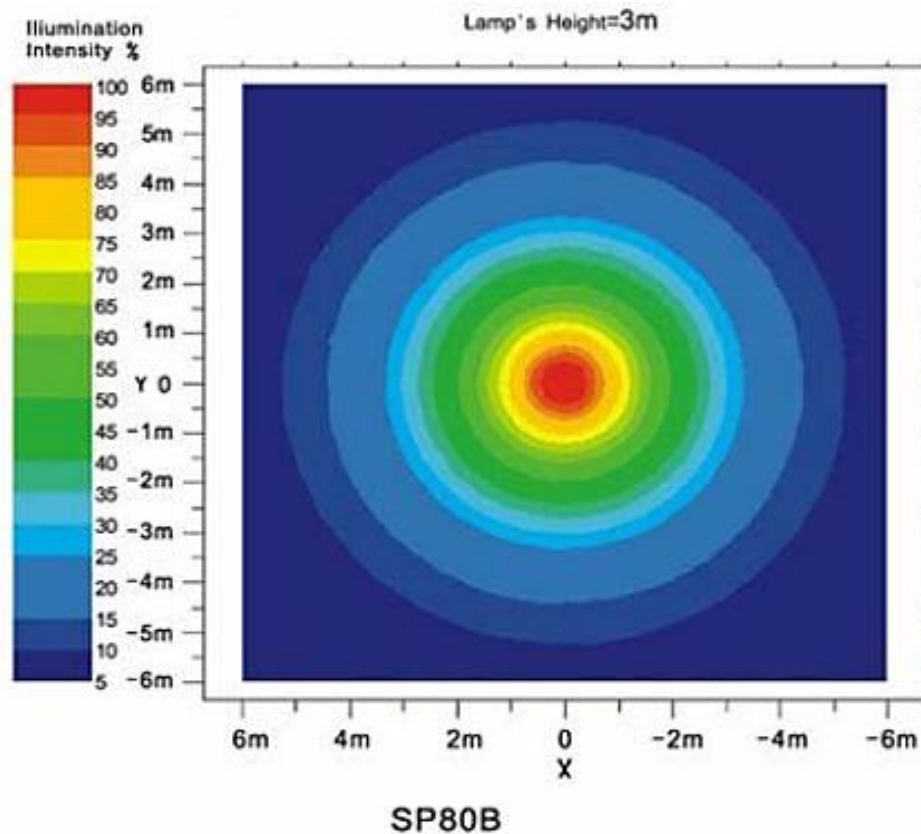


Figura 40. Distribución de intensidad de iluminación en el suelo, cuando la luminaria LED SP80B se encuentra a 3m de altura

5.1.9. Dimensionamiento de equipos eléctricos

- **Generador**

Se ha escogido un generador de imanes permanentes existente en el mercado de procedencia china, el cual tiene como datos característicos lo siguiente:

Marca: Exmork

Tipo: trifásico con imanes permanentes

Potencia nominal: 500W

Potencia máxima: 700W

Voltaje de salida: 12V

Rotación a potencia nominal: 300rpm

Tipo de carga: Voltaje constante, banco de batería de acuerdo a régimen de trabajo nominal

Par de arranque: 0.15 N.m

Par de accionamiento: 8.6 N.m

Temperatura: 40°C

Peso aproximado: 11Kg

Accionamiento: por controlador (empieza a generar con el 50% de la carga de la batería)

Rotación de generación: Genera a todas las revoluciones, la gráfica de potencias en función de las revoluciones se presenta en la figura 41

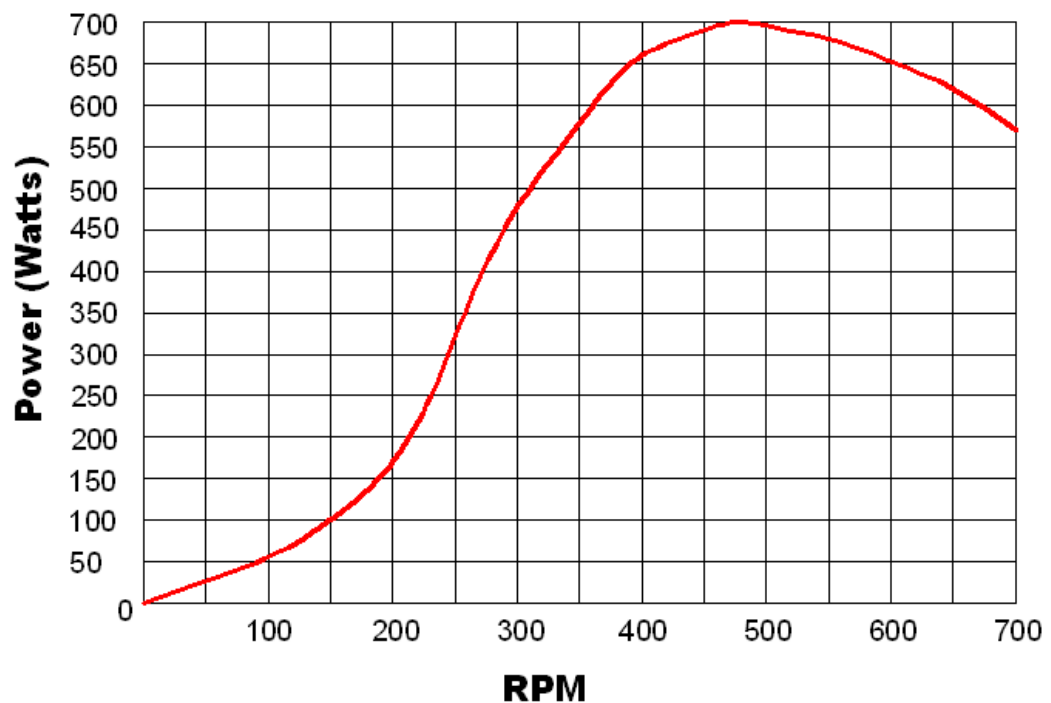


Figura 41. Potencias en función de las revoluciones del eje del generador. (Fuente: PROVIENTO)

- **Baterías**

Como se mencionó anteriormente la potencia de las luminarias son de 10 W cada una lo que en términos de consumo en un día de funcionamiento que son 12 horas tomando en cuenta que, por efecto de un interruptor con fotocelda automáticamente las luminarias se encienden a las 6 de la tarde y se apagan a las 6 de la mañana, representa un consumo de 240 Wh/día, por las dos luminarias.

Para este caso se ha elegido trabajar con un valor recomendable de 3 días de autonomía, lo que significa que las luminarias pueden funcionar hasta tres días sin que funcione el sistema de generación eólico. Según la ecuación (41) tenemos:

$$Ee = Da \cdot \text{Consumo día}$$

$$Ee = 3 \text{ dias} \times 0.24 \text{ KWh/día}$$

$$Ee = 0.72 \text{ KWh}$$

Reemplazando en la ecuación (42) obtenemos la energía almacenada.

$$Ea = \frac{Ee}{PD}$$

$$Ea = \frac{0.72 \text{ KWh}}{0.5}$$

$$Ea = 1.44 \text{ KWh}$$

Por último se obtiene la carga total a partir de la ecuación (43), tomando en cuenta que es batería es de 12 V.

$$St = \frac{Ea}{V}$$

$$St = \frac{1.44 \text{ KWh}}{12 \text{ V}} = \frac{1440 \text{ Wh}}{12 \text{ V}}$$

$$St = 120 \text{ Ah}$$

Como se mencionó anteriormente las baterías a utilizar serán de 12V de ciclo profundo, por lo tanto se necesita una batería de 12V – 120Ah, o un banco de dos baterías de 12V – 60Ah conectadas en serie para lograr la carga obtenida anteriormente para tres días de autonomía

A más de saber cuántos días de autonomía se tiene debemos saber en qué tiempo se cargara la batería con el generador eólico, para esto debemos empezar obteniendo la potencia por hora producida por el generador. Como se había explicado antes el generador está diseñado para producir mínimo 30 W lo que significa que por el sistema circula una intensidad mínima de 2.5A para la batería de 12V.

Se conoce que la batería tiene una carga para entregar de 120 Ah lo que significa que si se conecta una carga que consuma 120 A, la batería se descargara en una hora, y asimismo se necesita que circule una corriente de 120A en el sistema de generación para que esta se cargue en una hora, pero como se mencionó anteriormente el sistema de generación entra en funcionamiento con el 50% de la carga de la batería, por lo tanto tendrá que circular 60Ah para que la batería se cargue totalmente en una hora. Ahora, haciendo una relación, si por el sistema de generación circula una intensidad mínima de 2.5 Ah, significa que se necesita de 25 horas para que la batería se cargue totalmente en su funcionamiento de generación mínima.

Este resultado nos dice que se necesita de 25 horas de generación las cuales se disminuyen cuando el viento suba de velocidad.

- **Inversor, controlador y banco de resistencias**

Para este caso el inversor, controlador y banco de resistencias vienen en un solo equipo predeterminado para trabajar en conjunto con el generador antes mencionado, Este inversor controlador realiza dos funciones, primero efectúa el trabajo de convertir la corriente alterna que produce el generador en corriente continua constante de 12 V, y segundo realiza el trabajo de controlar o censar el nivel de carga de la batería de tal manera que al llegar al 50% del nivel de carga de esta el controlador automáticamente se acciona y entra en proceso de carga hasta que la batería se vuelva a cargar, cuando la batería está cargada se desactiva el proceso de carga y espera hasta que esta se vuelva a descargar para luego repetir el proceso nuevamente. Mientras tanto cuando el sistema de carga esta desactivado, la corriente que sigue produciendo el generador eólico es desviada a un banco de resistencia en donde esta energía de exceso es descargada o disipada en él. El inversor-controlador es de marca EXMORK del tipo PWM, híbrido

con un controlador para energía solar de 200W, y eólico de 500W de capacidad. Este generador se puede apreciar en la figura 42



Figura 42. Equipo inversor controlador y banco de resistencia marca EXMORK

5.2. Datos experimentales

Una vez efectuados los cálculos y la simulación de velocidades del viento, se procedió a construir la aeroturbina para luego someterla a las pruebas de verificación correspondientes,

- **Prueba 1.**

El primer tipo de rotor que se analizará es el de tipo savonius con cazoletas construidas en acero inoxidable, el mismo que se ha introducido en la carcasa de toberas diseñada para la amplificación y direccionamiento de los vientos. Este rotor es el primero en probarse y está construido de acuerdo a los datos de dimensionamiento obtenido en los cálculos, las dimensiones y planos más detallados se encuentran especificados el anexo 10.1, el mismo que se muestra en la figura 43.



Figura 43. Rotor savonius de acero inoxidable con carcasa de toberas.

De esta prueba se obtuvo los siguientes datos:

Revoluciones: 47 rpm

Velocidad de entrada a la tobera: 2.5 m/s

Velocidad de salida de las toberas: 6.2 m/s

Velocidad de arranque: 2 m/s

Potencia aproximada producida: 30 W

Peso del rotor: 27Kg

- **Prueba 2.**

La segunda prueba se la realizó utilizando un rotor de tipo savonius construido en fibra de vidrio con las mismas medidas obtenidas en los cálculos de dimensionamiento, y utilizando la misma carcasa de toberas para amplificación y direccionamiento de los vientos, tal como lo muestra la figura 44.



Figura 44. Rotor savonius construido en fibra de vidrio cubierto por la carcasa de toberas.

De esta prueba se obtuvo los siguientes resultados:

Revoluciones: 55 rpm

Velocidad de entrada a la tobera: 2.5 m/s

Velocidad de salida de las toberas: 6.2 m/s

Velocidad de arranque: 1.6 m/s

Potencia aproximada producida: 35 W

Peso del rotor: 6 Kg

- **Prueba 3.**

Esta prueba se la realizó utilizando el rotor tipo savonius construido con fibra de vidrio, así como también se sometió a la misma prueba el mismo tipo de rotor construido en acero inoxidable, ambos rotores sin la carcasa de toberas aplicando una velocidad del viento de 6m/s, igual a la velocidad de amplificación, como se muestra en la figura 45.



Figura 45. Rotor savonius de acero inoxidable y de fibra de vidrio sin carcasa de toberas

De esta prueba se obtuvieron los siguientes datos:

Revoluciones S. inox.: 56 rpm

Revoluciones S. fibra.: 68 rpm

Velocidad del viento libre direccionado: 6 m/s

Velocidad de arranque S. inox.: 2.6 m/s

Velocidad de arranque S. Fibra.: 2 m/s

Potencia aproximada producida S. inox.: 35 W

Potencia aproximada producida S. Fibra.: 40 W

Peso del rotor S. inox.: 27 Kg

Peso del rotor S. fibra.: 6 Kg

- **Prueba 4.**

Esta prueba se la realizo para el rotor tipo savonius de fibra de vidrio, utilizando la carcasa de toberas a la cual se le elimino cuatro direccionadores para aumento de volumen de aire, quedándose con los cuatro restantes y se sometió a prueba como lo muestra la figura 46.



Figura 46. Proceso de corte de direccionadores de la carcasa de toberas.

De esta prueba se obtuvo los siguientes resultados:

Revoluciones: 43rpm

Velocidad de entrada a la tobera: 2.5 m/s

Velocidad de salida de las toberas: 6.2 m/s

Velocidad de arranque: 1.8 m/s

Potencia aproximada producida: 28 W

Peso del rotor: 6 Kg

- **Prueba 5.**

La presente prueba se la realizo con el rotor de tipo savonius de fibra de vidrio, utilizando la carcasa de toberas con prolongaciones de entrada de aire para mayor admisión de volumen, como se muestra en la figura 47.



Figura 47. Rotor savonius de fibra de vidrio con prolongaciones de entrada en la tobera.

Con esta prueba se obtuvo los siguientes datos

Revoluciones: 4 a 9 rpm

Velocidad de entrada a la tobera: 2.5 m/s

Velocidad de salida de las toberas: 1 a 1.5m/s

Velocidad de arranque: ---

Potencia aproximada producida: ---

Peso del rotor: 6 Kg

- **Prueba 6.**

Esta prueba se la realizo con el rotor de tipo savonius de fibra de vidrio, utilizando la carcasa de toberas con prolongaciones de entrada de aire y con aumento de área de salida de la tobera para mayor admisión y salida de volumen de aire, y así eliminar limitaciones de entrada y turbulencias, como se muestra en la figura 48.



Figura 48. Rotor savonius de fibra de vidrio con aumento de área de entrada y de salida en la tobera

Con esta prueba se obtuvo los siguientes datos

Revoluciones: 8 a 10 rpm

Velocidad de entrada a la tobera: 2.5 m/s

Velocidad de salida de las toberas: 2 a 2.5m/s

Velocidad de arranque: ---

Potencia aproximada producida: ---

Peso del rotor: 6 Kg

- **Prueba 7.**

Para la presente prueba se realizó un nuevo rotor de eje vertical. Utilizando mitades de tubo PVC de 4" se construyó un rotor multipala de cuatro cazoletas, también se utilizó

la carcasa de toberas amplificadoras y direccionadoras de viento y se los sometió a prueba. El rotor multipala de cuatro cazoletas se muestra en la figura 49.



Figura 49. Rotor multipala de cuatro cazoletas

Con esta prueba se obtuvo los siguientes datos

Revoluciones: 54 rpm

Velocidad de entrada a la tobera: 2.5 m/s

Velocidad de salida de las toberas: 6.2m/s

Velocidad de arranque: 1.2 m/s

Potencia aproximada producida: 35 W

Peso del rotor: 4.5 Kg

- **Prueba 8.**

Esta prueba se realizó para el rotor savonius de fibra de vidrio y para el rotor multipala de cuatro y ocho cazoletas que se le adicionaron al rotor para someterse a prueba, también se ha utilizado la carcasa de toberas con aumento de área en la salida de la tobera, como se muestra en la figura 50.



Figura 50. Carcasa con aumento de área de salida en las toberas, y rotor multipala de ocho cazoletas

De esta prueba se obtuvieron los siguientes datos:

Revoluciones S. Fibra.: 48 rpm

Revoluciones M. 4 Cazoletas.: 60 rpm

Revoluciones M. 8 Cazoletas.: 79 rpm

Velocidad del viento: 2.5 m/s

Velocidad de arranque S. Fibra.: 1.8 m/s

Velocidad de arranque M. 4 Cazoletas.: 1.4 m/s

Velocidad de arranque M. 8 Cazoletas.: 1.6 m/s

Potencia aproximada producida S. Fibra.: 30 W

Potencia aproximada producida M. 4 Cazoletas.: 38 W

Potencia aproximada producida M. 8 Cazoletas.: 45 W

Peso del rotor S. Fibra.: 6 Kg

Peso del rotor M. 4 Cazoletas.: 4.5 Kg

Peso del rotor M. 8 Cazoletas.: 6 Kg

- **Prueba 9.**

Esta prueba se realizó para el rotor savonius de fibra de vidrio y para el rotor multipala de cuatro y ocho cazoletas, y se sometió a prueba en conjunto con la carcasa de toberas a la cual se le aumento aún más el área en la salida de la tobera, como se muestra en la figura 51.



Figura 51. Aumento de área de admisión de aire quedando únicamente el sistema de direccionamiento de viento.

De esta prueba se obtuvieron los siguientes datos:

Revoluciones S. Fibra.: 43 rpm

Revoluciones M. 4 Cazoletas.: 80 rpm

Revoluciones M. 8 Cazoletas.: 99 rpm (figura 52)

Velocidad del viento: 2.5 m/s

Velocidad de arranque S. Fibra.: 1.8 m/s

Velocidad de arranque M. 4 Cazoletas.: 1.4 m/s

Velocidad de arranque M. 8 Cazoletas.: 1.6 m/s

Potencia aproximada producida S. Fibra.: 28 W

Potencia aproximada producida M. 4 Cazoletas.: 45 W

Potencia aproximada producida M. 8 Cazoletas.: 50 W

Peso del rotor S. Fibra.: 6 Kg

Peso del rotor M. 4 Cazoletas.: 4.5 Kg

Peso del rotor M. 8 Cazoletas.: 6 Kg



Figura 52. Máximas revoluciones obtenidas con el rotor multipala de ocho cazoletas y carcasa de direccionadores con gran área de admisión de viento.

- **Prueba 10.**

Esta última prueba se la realizo como comprobación del rotor multipala de ocho cazoletas, donde se lo expuso libre al viento sin la carcasa de direccionadores, como se muestra en la figura 53.



Figura 53. Prueba de rotor multipala de ocho cazoletas sin carcasa de direccionadores

De esta prueba se obtuvieron los siguientes datos:

Revoluciones: 42 rpm (figura 53)

Velocidad del viento: 2.5 m/s

Velocidad de arranque: 2 m/s

Potencia aproximada producida: 28 W

Peso del rotor: 6 Kg

5.3. Comparación de datos

A continuación se presentará una comparación de los datos obtenidos, tanto teóricos como experimentales, esta comparación se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Comparación de datos teóricos y experimentales.

	Revoluciones (RPM)	Potencia (W)	V arranque (m/s)	Peso (Kg)
Cálculos teóricos	46 rpm	30 W		
Savonius de acero inoxidable, con carcasa de toberas amplificadoras	47 rpm	30 W	2 m/s	27 Kg
Savonius de fibra de vidrio, con carcasa de toberas amplificadoras	55 rpm	35 W	1.6 m/s	6 Kg
Savonius de acero inoxidable solo a 6m/s	56 rpm	35 W	2.6 m/s	27 Kg
Savonius de fibra de vidrio solo a 6m/s	68 rpm	40 W	2 m/s	6 Kg
Savonius de fibra de vidrio, con carcasa de cuatro direccionadores	43 rpm	28 W	1.8 m/s	6 Kg
Savonius de fibra de vidrio, con carcasa de toberas con prolongaciones de entrada de aire	4 a 9 rpm	-----	-----	6 Kg

Savonius de fibra de vidrio, con carcasa de toberas con prolongaciones de entrada de aire y con aumento de área de salida de la tobera.	8 a 10 rpm	-----	-----	6 Kg
Multipala de 4 cazoletas con carcasa de toberas amplificadoras y direccionadoras	54 rpm	35 W	1.2 m/s	4.5 Kg
Savonius de fibra de vidrio y carcasa de toberas con aumento de área de salida	48 rpm	30 W	1.8 m/s	6 Kg
Multipala de 4 cazoletas y carcasa de toberas con aumento de área de salida	60 rpm	38 W	1.4 m/s	4.5 Kg
Multipala de 8 cazoletas y carcasa de toberas con aumento de área de salida	79 rpm	45 W	1.6 m/s	6 Kg
Savonius de fibra de vidrio y carcasa de toberas con aumento mayor de área de salida (direccionadores)	43 rpm	28 W	1.8 m/s	6 Kg
Multipala de 4 cazoletas y carcasa de toberas con aumento mayor de área de salida (direccionadores)	80 rpm	45 W	1.4 m/s	4.5 Kg
Multipala de 8 cazoletas y carcasa de toberas con aumento mayor de área de salida (direccionadores)	99 rpm	50 W	1.6 m/s	6 Kg
Multipala de 8 cazoletas solo	42 rpm	28 W	2 m/s	6 Kg

5.4. Montaje

Como se describió anteriormente la mejor opción resultó ser el rotor multipala de ocho cazoletas en conjunto con la carcasa de direccionadores, los mismos que se ilustran en la figura 52.

Como es lógico se tuvo que rediseñar los planos, los cuales varían a los planos anteriores de diseño teórico únicamente en la construcción del rotor multipala de ocho cazoletas y en el aumento de áreas de admisión en la carcasa de direccionadores, estos nuevos planos se ilustran en el anexo 10.2.

Una vez elegido la mejor opción de diseño para la aeroturbina se efectuó su montaje, el cual empezó con pintar las piezas con un fondo de pintura anticorrosiva, y como pintura final se utilizó esmalte brillante, un vez secada la pintura se procedió a armar el rotor fijando al eje las barras roscadas con pernos y a estas se emperaron las ocho cazoletas obteniendo finalmente el rotor como se muestra en la figura 54.



Figura 54. Rotor de ocho cazoletas armado

Luego de armar el rotor se procede a introducirlo en la carcasa de direccionadores, para esto se debe previamente ubicar y fijar el rodamiento de cilindros cónicos y la chumacera en los extremos de la carcasa para así luego poder introducir el rotor y

apretar todos los pernos de la carcasa de direccionadores, tal como se muestra en la figura 55



Figura 55. Carcasa de direccionadores armada en conjunto con el rotor.

El generador debe fijarse a la carcasa de direccionadores en su base, para esto se debe empernar el generador a la carcasa del generador la misma que cumple la función de base para el mismo y para mantenerse fija a la carcasa de direccionadores y así acoplarse al eje del rotor, lo anteriormente explicado se muestra en la figura 56.



Figura 56. Carcasa de generador y generador armado y fijado a la base de la carcasa de direccionadores.

Para el acoplamiento del generador al eje se debe armar la brida de transmisión y esta fijarla y empernarla al eje del generador y al del rotor para que se pueda efectuar la transmisión de giro, tal como se muestra en la figura 57.



Figura 57. Brida de transmisión armada y fijada al eje del generador y del rotor.

Luego de armar toda la turbina en conjunto con el generador se procede a montarlo en la torre, la cual como se explicó anteriormente es una torre ya existente en el área de energía cerca del bloque 1, para esto se necesitó de una grúa la cual realizó el trabajo de elevar la turbina y generador para luego ser ubicada y empernada a la torre como se muestra en la figura 58.



Figura 58. Montaje de la turbina y generador en la torre.

Una vez montado el aerogenerador en la torre se procede a armar el sistema eléctrico el cual incluye el generador, inversor-controlador, banco de resistencias, batería y luminaria LED, para esto se debe seguir el diagrama de conexión eléctrica ilustrada en la figura 59.

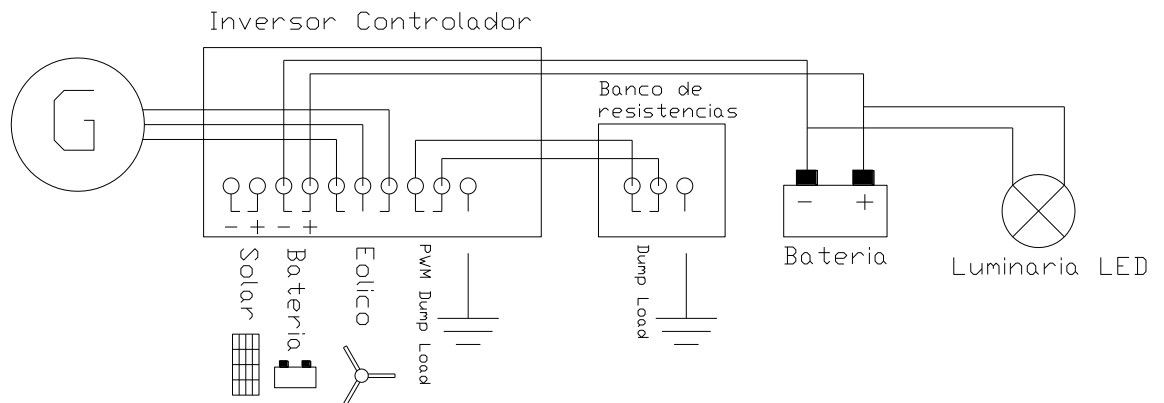


Figura 59. Diagrama eléctrico de generación.

Como es lógico las luminarias LED no pueden permanecer encendidas todo el tiempo, se las debe utilizar solo en la noche, y para esto se debió instalar un interruptor con fotocelda el cual cumple la función de encender las luminarias cuando exista ausencia de luz y apagarlas cuando la luz solar vuelva a aparecer, ofreciendo así un ahorro energético al utilizar las luminarias únicamente cuando es necesario, este interruptor automático se lo puede apreciar en la figura 60.



Figura 60. Interruptor automático con fotocelda

En lo que respecta a la luminaria LED, se ha decidido para su montaje, utilizar un protector tipo campana el cual aislara las luminarias de la intemperie protegiéndolas y por ende alargando su tiempo de vida como se muestra en la figura 61.



Figura 61.Luminarias y protecciones

5.5. Evaluación económica.

A continuación se presenta un presupuesto económico en el que se detalla el costo de los materiales y de la mano de obra que se utilizaría en la construcción del aerogenerador.

Cant.	MATERIALES	V/Unit.	V.Total
1	Tool negro 1mm	35,00	35,00
1	Pletina 1 1/2" x 3/16"	9,00	9,00
2	Tee 3/4" x 1/8"	7,40	14,80
2	Tubo PVC de 4"	12,90	25,80
1	Eje de crilón de 30mm de diametro x 1m	28,00	28,00
4	Barras de tornillo de 3/8" x 2m	4,00	16,00
80	Tuercas 3/8" con arandelas planas y de presión	0,20	16,00
4	Pernos 1/4" x 2 1/2" con tuerca y arandela plana	0,30	1,20
2	Pernos 1/2" x 2 1/2" con tuerca y arandela plana y de presión	0,55	1,10
1	Chumacera de pared de para eje de 1"	6,00	6,00
1	Rodamiento de rodillos conicos con camisa para eje de 1"	20,00	20,00
1	Brida de acero de transmisión	21,00	21,00
1	Prisionero 3/16" x 1"	0,25	0,25
16	Pernos 3/16" x 1" con tuerca y arandela plana y de presión	0,25	4,00
1	Equipo generador, inversor-controlador y banco de resistencias EXMORK, 500W	500,00	500,00
2	Luminarias LED 10W	50,00	100,00
2	Protecciones para luminarias tipo campana	21,00	42,00
1	Interruptor con fotocelda	8,00	8,00
20	metros de cable electrico AWG 14	0,35	7,00
1	Bateria 12V - 120Ah	140,00	140,00
1	Funda de electrodos	16,00	16,00
1	Galon de pintura anticorrosiva	11,70	11,70
1	Galon de diluyente	6,40	6,40
1	cinta aislante	0,50	0,50
	Imprevistos 5%		51,49
	Sub-total Materiales:		1.081,24
	MANO DE OBRA:		
1	Trabajo y dirección Técnica 2 semanas	300,00	300,00
	Imprevistos 5%		15,00
	Sub-total Mano de Obra		315,00
	COSTO TOTAL DE LA OBRA:		1.396,24
	Utilidad de la obra (5% del costo)		69,81
	COSTO FINAL DE LA OBRA		1.466,05

6. DISCUSIÓN

En el proceso de investigación ingenieril existen muchos caminos inexplorados, y la única manera de descubrirlos es con la práctica del ensayo y error.

A continuación se podrá analizar los resultados obtenidos en la presente investigación. Empezaremos analizando el diseño inicial el cual está basado en el funcionamiento de un rotor de eje vertical de tipo savonius el mismo que ha sido muy descuidado científicamente en los últimos años ya que las aeroturbinas predominantes siempre han sido las de eje horizontal, pero estas tienen un alto costo de construcción por sus complicados sistemas aerodinámicos y de direccionamiento. Con este antecedente se puede decir que es importante investigar nuevas formas de microgeneración que resulte más accesible económicamente y con un diseño simple para facilitar su construcción.

El presente diseño trata de mejorar la eficiencia del rotor savonius, como se mencionó anteriormente en el marco teórico estos rotores funcionan muy bien con vientos de baja velocidad y el presente diseño adiciona al rotor un sistema de amplificación y direccionamiento de vientos lo cual resulta muy beneficioso para lugares en los que predominen los vientos de baja velocidad, característica que lo hace aplicable para cualquier sitio.

Los resultados obtenidos teóricamente y por simulación son prometedores, los cuales muestran datos de viento direccionado y amplificado a un valor de 6 m/s, estos resultados se los sometió a comprobación con la experimentación, la cual se la realizó en el taller mecánico de la Universidad Nacional de Loja, para este fin se utilizó una turbina de viento calibrada a 2.5 m/s para la realización de las pruebas.

Como se pudo observar anteriormente en la prueba 1 se sometió a experimentación el rotor de tipo savonius construido en acero inoxidable utilizando la carcasa de toberas amplificadoras, y se obtuvo 47 rpm a una potencia de 30 W según la curva de potencias del generador utilizado (figura 41), para esto se necesitó una velocidad de arranque de 2m/s para accionar el rotor de 27 Kg de peso.

Esta prueba nos da resultados casi exactos con los cálculos teóricos y simulación, sin embargo, la intención de mejorar los resultados y por consecuencia la eficiencia del

rotor nos llevó a buscar formas para hacerlo. La primera idea para mejorar la eficiencia fue reducir el peso del rotor, y esto se lo logro construyendo nuevamente el rotor pero esta vez elaborado en fibra de vidrio, así se obtuvo la prueba 2 en donde se sometió a experimentación el rotor savonius de fibra de vidrio utilizando la carcasa de toberas amplificadoras, esta prueba nos dio resultados de 55 rpm que dio una potencia aproximada de 35 W a una velocidad de arranque de 1.6 y con un peso de rotor de 6 Kg. Como se pudo observar el peso del rotor influye mucho, aunque disminuye el torque del rotor, se gana velocidad de giro y como se mencionó anteriormente para generación se necesita velocidad más que el torque.

Ahora existe una duda, ¿se estará aprovechando todo el potencial eólico de la turbina savonius con la carcasa de toberas?, esta duda nos dio lugar para la tercera experimentación donde se sometió a prueba el rotor de tipo savonius libre sin la carcasa de toberas y simulando un viento de 6m/s para comprobar si con la misma velocidad de viento se obtiene las mismas revoluciones por minuto antes obtenidas. Los resultados confirmaron las dudas, ya que nos dio resultados de giro de 56 rpm para el savonius de acero inoxidable y 68 rpm para el de fibra de vidrio, lo que significaba una potencia obtenida de 35 W y 40W a una velocidad de arranque de 2.6m/s y 1.8m/s respectivamente. Esta prueba nos deja claro que, en primer lugar el rotor savonius construido en fibra de vidrio es más eficiente para generación que el rotor construido en acero inoxidable por su menor peso; y, en segundo lugar el rotor savonius no está ofreciendo su mayor potencial ya que la carcasa de toberas estaría limitando el paso de volumen de aire.

Este antecedente nos deja con la tarea de optimizar el funcionamiento de la carcasa de toberas, lo primero que se trató fue de agrandar el área de admisión de aire y para esto se removió de la carcasa cuatro direccionadores quedándose con los cuatro restantes y se lo sometió a la cuarta prueba en conjunto con el rotor savonius de fibra de vidrio. A diferencia de la prueba 3 esta prueba se tenía que realizar a una velocidad de viento de 2.5m/s, los datos resultantes fueron de 43 rpm que significaba una potencia de 28 W con una velocidad de arranque de 1.8m/s, los resultados son claros las revoluciones bajaron ya que el sistema de amplificación no funciono para esa geometría de carcasa la cual quedo como bloqueador solamente, pero no era viable ya que el sistema de bloqueo de esta geometría no funcionaba en todas las direcciones de viento asique este sistema quedo descartado.

Aun se tiene la tarea de optimizar el funcionamiento de la carcasa de toberas, esto nos lleva a la prueba 5 donde se pretende agrandar el área de admisión de las toberas, para esto primeramente se volvió a soldar los direccionadores que se removieron antes y luego se les adiciono prolongaciones a las toberas para así aumentar el volumen de aire en la admisión, esta prueba nos dio resultados inesperados ya que el rotor apenas giraba consiguiendo de 4 a 9 rpm. Este resultado se dio porque aunque se prolongó las entradas de aire aún la salida de la tobera seguía siendo pequeña y se creaban turbulencias por el aglomeramiento del viento acelerado, sumado a esto, el ángulo de las prolongaciones también generaban turbulencias que no permitían el paso del viento a la cámara del rotor.

Luego de esta prueba se realizó la prueba 6 que consistía en dejar las prolongaciones que se adiciono en la prueba anterior, y además agrandar el área de salida de las toberas. Los resultados de esta prueba fueron similares a la anterior, aun se generaba turbulencias que impedían el paso del aire a la cámara, y al no tener resultados satisfactorios esta prueba también se descartó.

Para la prueba 7 se realizó una variante del rotor, se construyó un rotor de eje vertical multipala de cuatro cazoletas utilizando mitades de tubo PVC y se lo sometió a prueba en conjunto con la carcasa de toberas amplificadoras y direccionadoras, los resultados fueron mejores, al parecer, el viento que circula a través del área de salida de las toberas de la carcasa era mejor aprovechado por el rotor multipala que, a más de tener más cazoletas, el área de acción de cada cazoleta que era menor que el área de acción del savonius, permitía un mejor aprovechamiento del volumen de viento admitido a la cámara obteniendo así los siguientes resultados: 54 rpm, con una potencia aproximada de 35 W a 1.8m/s y con un peso de 4.5 Kg, aún más liviano que el savonius de fibra de vidrio.

Pese a los mejores resultados del rotor multipala ante el savonius se pudo observar que aún había limitación del paso de volumen de aire, esto se pudo comprobar porque al poner la mano sobre la cazoleta se podía sentir mayor concentración de la aceleración del viento en las paredes de la carcasa más que en el área de acción de las cazoletas del rotor.

Para la siguiente prueba 8 se realizó otra variante en el rotor multipala anterior, al cual se le adiciono cuatro cazoletas más obteniendo así un rotor multipala de ocho cazoletas, entonces así se probaron 3 tipos de rotores en esta prueba en conjunto con la carcasa de

toberas a la cual también se la modifico aumentándole el área de salida de aire de las toberas. La intención de esta prueba era comprobar que, si al aumentar las cazoletas del rotor se podría obtener un mejor aprovechamiento del volumen de aire que entra a la cámara, al ser menor el tiempo que transcurría entre cazoletas para que pueda esta ser empujada por el volumen de aire admitido. Los resultados de esta prueba fueron de una velocidad de 48 rpm para el savonius de fibra de vidrio, 60 rpm para el multipala de cuatro cazoletas, y 79 rpm para el multipala de ocho cazoletas; con una potencia de 30W, 38W, y 45 W, a una velocidad de arranque de 1.8, 1.4, y 1.6, y con un peso de 6Kg, 4.5Kg, y 6Kg respectivamente.

Para la prueba 9 se intenta mejorar la eficiencia de la carcasa para esto se aumenta el área de salida de las toberas, aún más que en la prueba anterior, la intención es de obtener un mayor volumen de aire en la cámara de la carcasa, ante esto debemos estar conscientes que al aumentar el área de salida de las toberas disminuimos el efecto de amplificación de velocidad del viento quedándose así únicamente con un sistema de direccionamiento de aire lo cual también es perjudicial porque como vimos en la prueba 4 al aumentar el área el rotor savonius la velocidad no se amplificó y por consiguiente se obtuvo menor revoluciones. Aunque esta prueba es diferente a la 4, ya que los direccionadores están simétricamente ubicados para facilitar la aerodinámica de la carcasa, se espera un mejor rendimiento para el rotor multipala. Los resultados de esta prueba fueron de una velocidad de 43 rpm para el savonius de fibra de vidrio, 80 rpm para el multipala de cuatro cazoletas, y 99 rpm para el multipala de ocho cazoletas; con una potencia de 28W, 45W, y 50 W, a una velocidad de arranque de 1.8, 1.4, y 1.6, y con un peso de 6Kg, 4.5Kg, y 6Kg respectivamente.

Hasta aquí podemos estar seguros que hemos encontrado una mejor eficiencia en el rotor multipala ante el savonius, tomando en consideración que tiene las mismas medidas de diámetro o base (b) y altura (h), y por consiguiente la misma área de barrido, cabe recalcar que no se está diciendo que el rotor multipala será siempre mejor que el savonius, en esta investigación los resultados obtenidos obedecen a una secuencia de pruebas para rotores que utilicen sistemas mecánicos amplificadores que encierren al rotor, y en el cual se analiza la mejor opción para el aprovechamiento del volumen que emita o que pueda ser emitido por la carcasa.

La última prueba que se realizo fue de comprobación para esto se sometió a prueba el rotor de eje vertical multipala de ocho cazoletas, el cual obtuvo los mejores resultados

según la comparación, se probó este rotor ante un viento de 2.5 m/s solo y sin la carcasa de direccionadores y se obtuvo una velocidad de 42 rpm con una potencia de 28 W, y con una velocidad de arranque de 2m/s. Esto nos comprueba que la carcasa de toberas aumenta la eficiencia del rotor multipala, pero en cambio limita el volumen de viento para el rotor savonius, pero, al obtener mejores resultados con el rotor multipala de ocho cazoletas con carcasa de direccionadores que con el rotor savonius de fibra de vidrio con carcasa de amplificadores y direccionadores, se decidió cambiar el diseño original por el del rotor multipala de ocho cazoletas con carcasa de direccionadores, cabe mencionar que no se necesitaría de nuevos cálculos ya que el dimensionamiento del rotor es el mismo, solo cambia la forma del rotor que se lo puede apreciar en la figura 55, y los planos constructivos se los muestra en el anexo 10.2.

Por ultimo al conectar el sistema eléctrico – electrónico, para la alimentación de las luminarias LED, debemos tomar en cuenta los días de autonomía, por lo que la elección de una batería de 120 Ah nos ofrece un funcionamiento sin brisas de 3 días, el cual representa un tiempo prudente para esperar que la batería se vuelva a cargar, ya que el tiempo máximo que se puede esperar hasta que se cargue es de 1 día con la velocidad mínima de viento, como es lógico este tiempo disminuye cuando la velocidad del viento aumente.

7. CONCLUSIONES

En la presente investigación se concluyó lo siguiente:

- Que los rotores de eje vertical como el savonius y multipalas pueden ofrecer una gran eficiencia a un bajo costo para microgeneraciones en lugares que predominen los vientos de baja velocidad, haciéndolos accesibles y útiles en cualquier aplicación en la que se quiera obtener ahorro de energía con una pequeña inversión.
- Los resultados de cálculos teóricos o de diseño pueden optimizarse, y ser más pequeño el dimensionamiento siempre y cuando se le garantice un sistema adecuado de aprovechamiento del aire
- Que el rotor de tipo savonius destinada a generación debe ser lo más liviano posible, por esta razón el rotor savonius de fibra de vidrio resulto ser más eficiente que el rotor savonius de acero inoxidable.
- El sistema de amplificación y direccionamiento no resulto ser una buena idea para ser utilizada con el rotor savonius, ya que este necesita de un gran volumen de aire para ser accionado con toda su eficiencia y la carcasa limitaba el paso de volumen de aire concentrándolo en áreas más pequeñas que la del área de accionamiento del rotor savonius
- El rotor de eje vertical multipala de cuatro y ocho cazoletas resulta ser más eficiente que el rotor savonius en funcionamiento con la carcasa de toberas ya que el volumen de aire que impacta en las palas del rotor tarda menos tiempo entre cazoleta y cazoleta en los rotores multipala que en el rotor savonius que tiene únicamente dos cazoletas
- Mientras se aumenta el área de salida de las toberas de la carcasa, se disminuye las revoluciones del rotor savonius pero aumenta las revoluciones en los rotores multipala, siendo estos más eficientes en situaciones en las que se usen direccionadores o apantallamientos en forma de carcasa ya que el volumen de

aire es direccionado a la parte útil de las cazoletas en los rotores multipala, y en cambio en los rotores savonius el volumen de aire para accionamiento del mismo es bloqueado por la carcasa.

- Se pudo encontrar un rotor de eje vertical que supere la eficiencia obtenida en los cálculos del diseño original utilizando las mismas medidas de dimensionamiento, y por lo tanto la misma área de barrido.
- Que mientras se siga experimentando con tecnología LED se pueden obtener diseños cada vez más pequeños en el dimensionamiento y por consiguiente menor inversión en su construcción
- El ahorro energético en nuestra sociedad inicia en la búsqueda de nuevas tecnologías y formas de energías limpias y esto se lo consigue en el insistente labor de la práctica del ensayo y error.

8. RECOMENDACIONES

Con la elaboración del presente trabajo de tesis se recomienda lo siguiente:

- No tomar los resultados de diseño teórico como una guía exacta de cómo se comportara el rotor ante el viento, ya que este es impredecible y puede variar los resultados
- Se recomienda usar materiales livianos para mejorar la eficiencia del rotor siempre y cuando este sea destinado a generación.
- Se recomienda el uso adecuado de rodamientos, ya que la utilización de rodamientos cónicos en el eje del rotor disminuye las pérdidas mecánicas por fricción, así como también se recomienda engrasar los mismos para su mantenimiento.
- Utilizar pinturas que sean brillantes y vistosas para disminuir las probabilidades de accidentes con aves.
- Manejar con cuidado los bornes del generador estos al unirse crean un pequeño cortocircuito, frenándose así mismo cuando este está girando.
- En el momento de la conexión del sistema eléctrico procurar ubicar un interruptor de desconexión de todo el sistema, como precaución aunque en el mismo equipo del controlador existe un fusible de protección.
- Ubicar el equipo controlador – inversor, banco de resistencias y batería en un lugar aislado de la intemperie, aunque son diseñados para trabajar en el exterior, el aislamiento aumentará su protección y por lo tanto su tiempo de vida.
- Utilizar protecciones tipo campana, o similares para las luminarias LED, de esta forma se las protege de la lluvia y del sol.
- Utilizar fotoceldas como interruptor para encendido y apagado de las luminarias LED, es una manera automática y eficiente para ahorro de energía

- Ubicar la torre en un sitio propicio donde la trayectoria del viento no sea bloqueada, de esta manera se asegurara que el viento llegue por todas las direcciones al generador, aumentando así la eficiencia del sistema.
- Usar este trabajo de tesis para futuras investigaciones sobre tipos de materiales más resistentes o eficientes para el rotor y carcasa de toberas.
- Complementar esta investigación investigando nuevas geometrías de direccionadores o amplificadores más eficientes que permitan amplificar el viento con un correcto direccionamiento y con un pequeño tamaño.
- Para futuras investigaciones, determinar las variables intervinientes en el rotor multipala que le permitieron ser más eficiente que el rotor savonius en funcionamiento con la carcasa de direccionadores.
- Incentivar a los estudiantes a la investigación con energías limpias, ya que estas nuevas tecnologías serán unos de los pilares fundamentales de la nueva era energética

9. BIBLIOGRAFÍA.

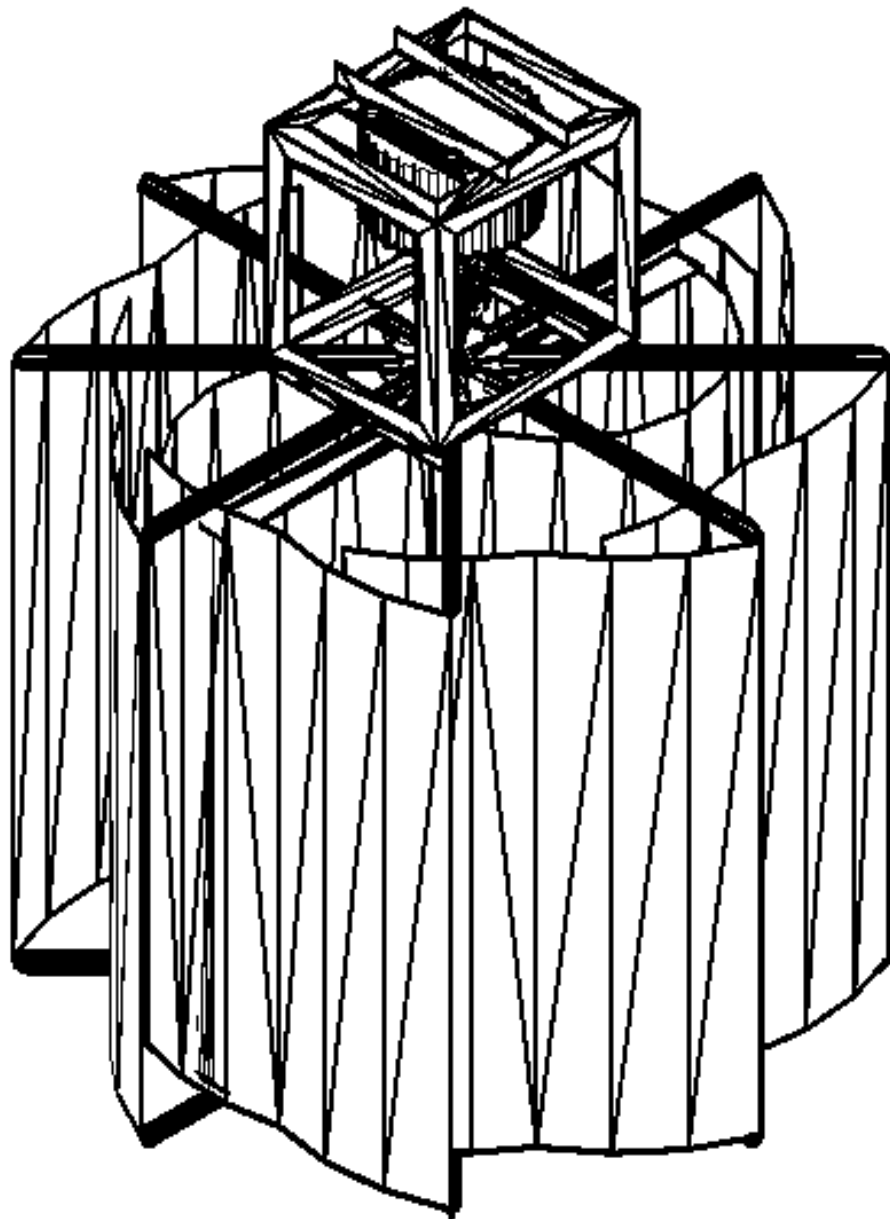
- CATER. Energías Renovables; Mejoramiento y Racionalización de Utilización de la Energía. Loja. EC. 1987. (pág. 180).
- CINER. Segundas Jornadas de actualización en Energías Renovables. La Paz. BO. 1997. (pág. 180).
- RODEN, M. *Diseño Electronico*. Wilmington. US. 1992. (pág. 880).
- VILLARRUBIA, M. Energía Eólica. CEAC. Barcelona. ES. 2004. (pag. 323)
- *CECU*. (s.f.). Recuperado el 15 de Septiembre de 2010, de <http://www.cecucolombiana.org/campanas/medio%20ambiente/res&rue/htm/dossier/1%20eolica.htm>
- *conae*. (s.f.). Recuperado el 12 de Septiembre de 2010, de <http://www.conae.gob.mx/work/sites/CONAE/resources/LocalContent/7067/1/microeolica.pdf>
- *Juncoop*. (s.f.). Recuperado el 15 de Septiembre de 2010, de <http://www.juncoop.com/htm/mainhelp.htm>
- *wikipedia*. (s.f.). Recuperado el 10 de Septiembre de 2010, de http://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_e%C3%B3lica
- *wikipedia*. (s.f.). Recuperado el 12 de Septiembre de 2010, de <http://es.wikipedia.org/wiki/Aerogenerador>
- (s.f.). Recuperado el 15 de Septiembre de 2010, de Talentfactory: <http://www.talentfactory.dk/es/tour/design/horver.htm>

10. ANEXOS.

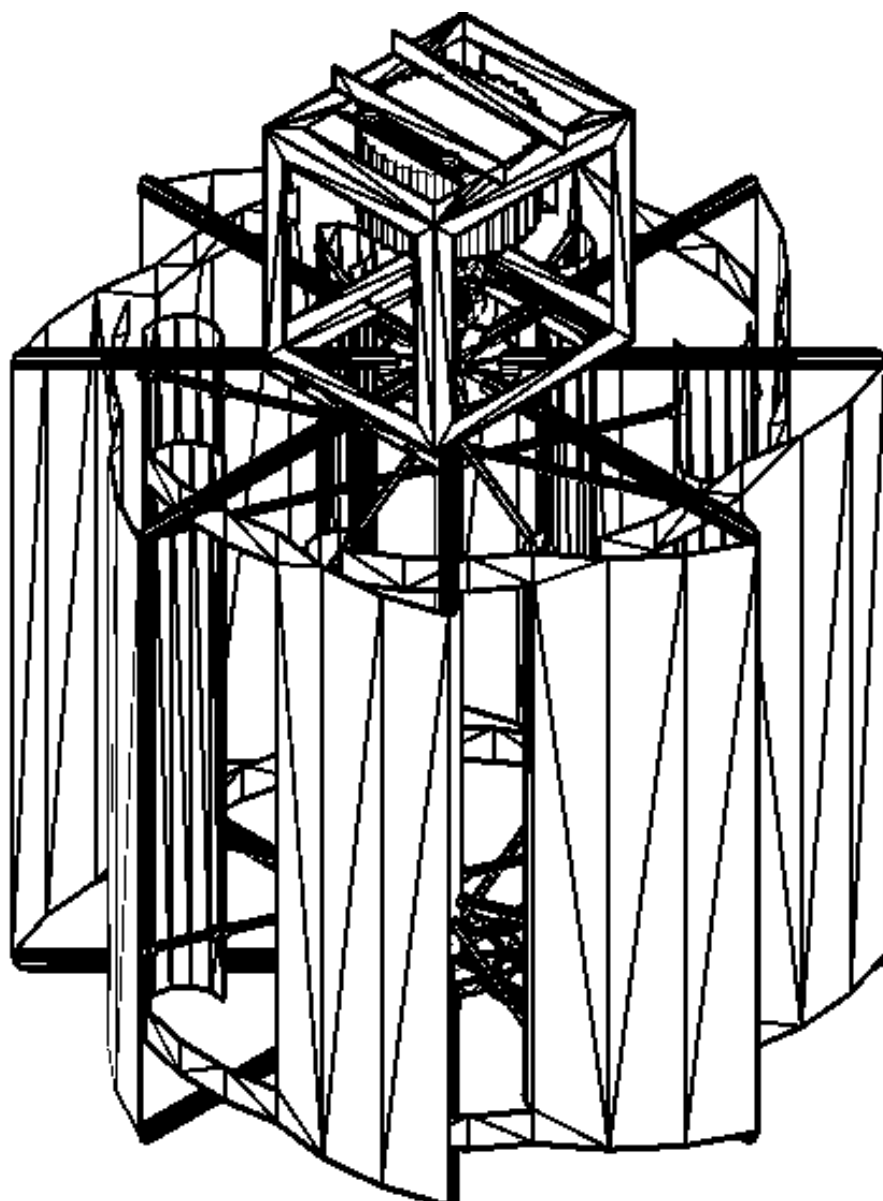
10.1. Planos Constructivos de acuerdo a los datos teóricos

10.2. Planos Constructivos de los datos experimentales

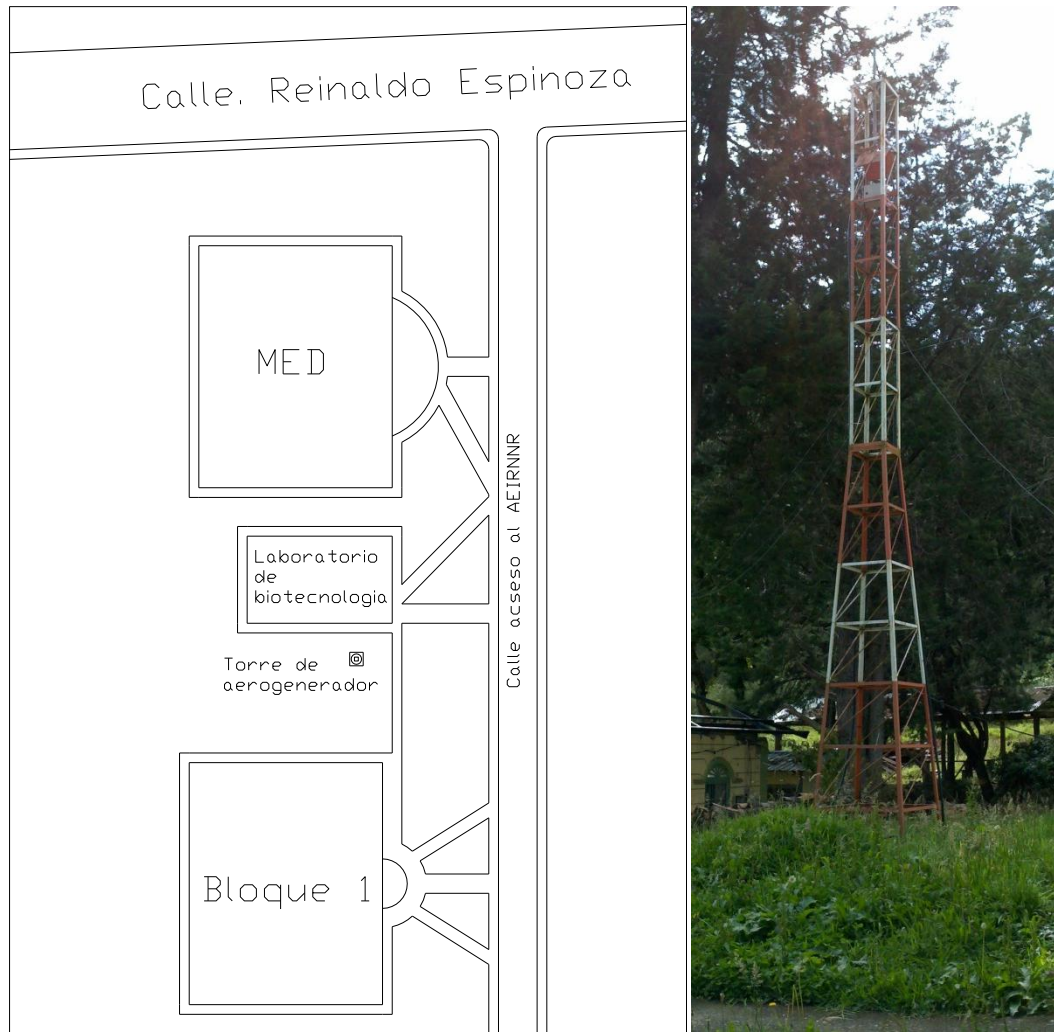
10.3. Conjunto 3D de turbina Savonius.



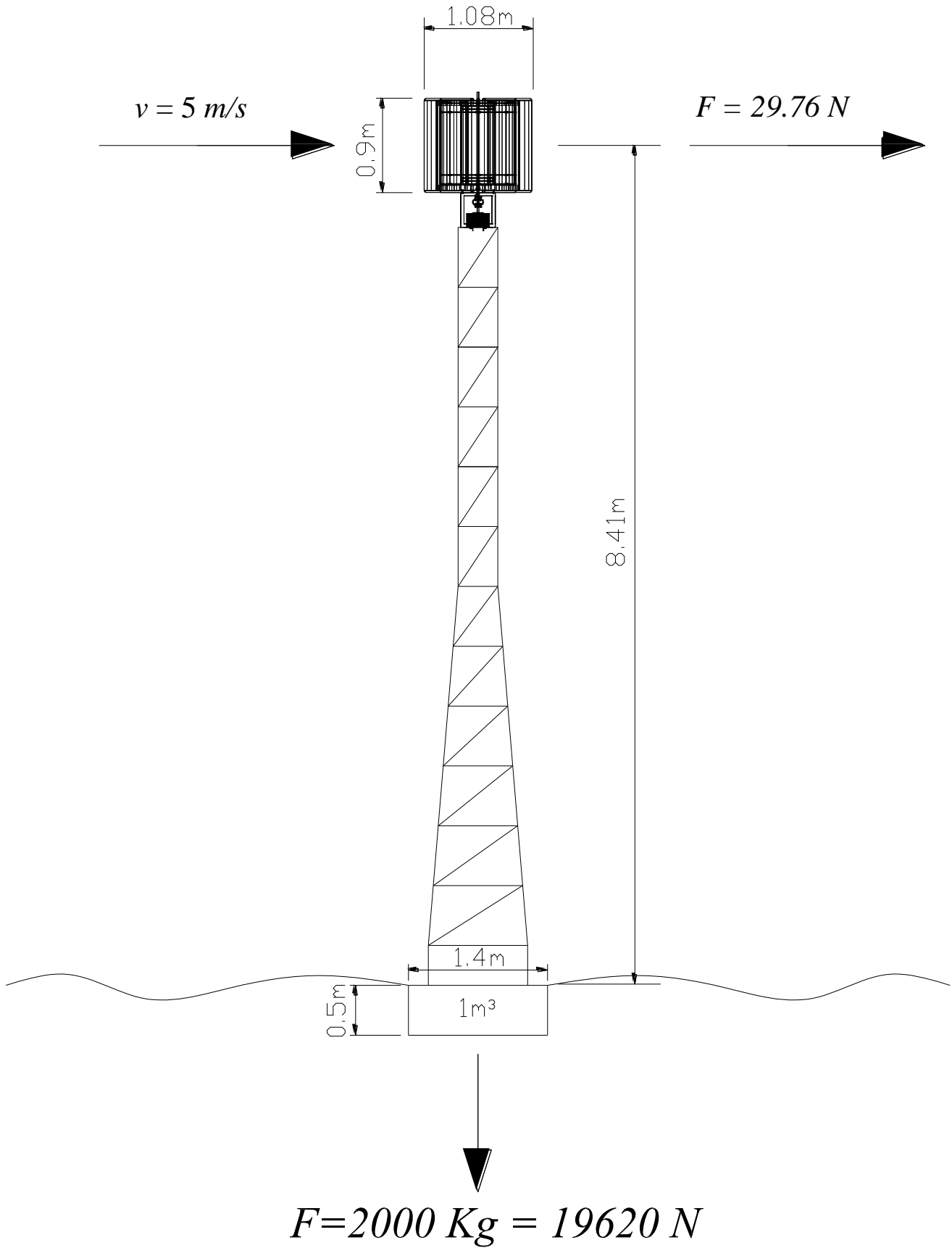
10.4. Conjunto 3D de turbina multipala



10.5.Sitio de emplazamiento



10.6. Fuerzas intervinientes en la cimentación



10.7. Fotografías del aerogenerador en funcionamiento



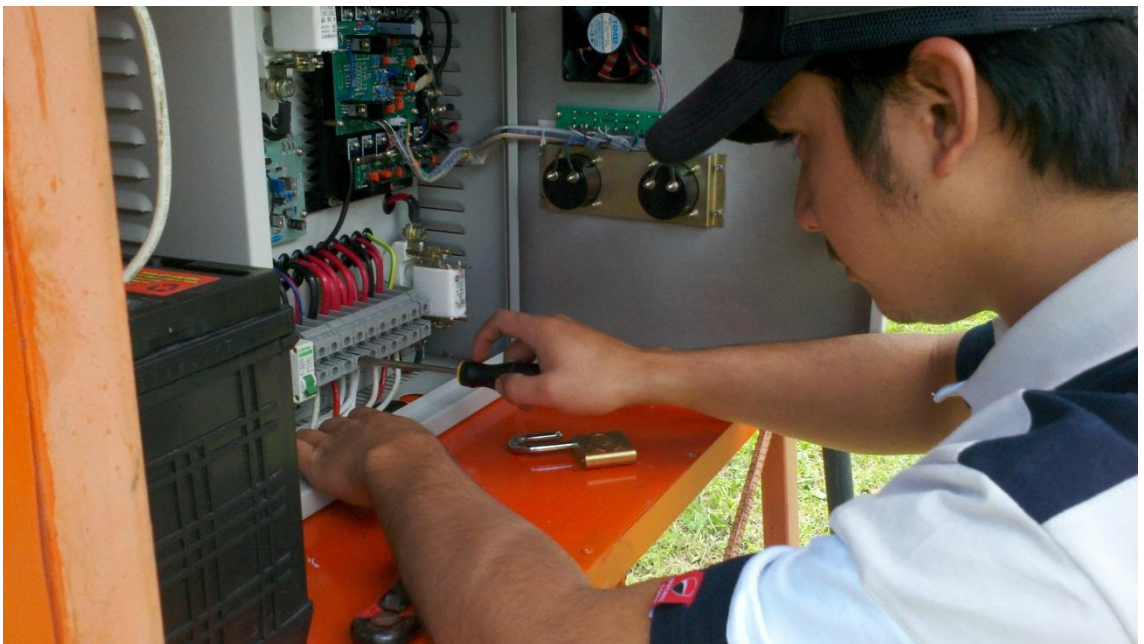
Fotografía 1. Instalación del aerogenerador en la torre



Fotografía 2. Montaje de luminarias y construcción de la caja para el sistema de control



Fotografía 3. Equipo de control



Fotografía 4. Instalación del sistema de control



Fotografía 5. Instalación del sistema de encendido automático



Fotografía 6. Funcionamiento del sistema en la noche.