



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Unidad Profesional Culhuacán
Academia de Titulación



**TURBINA EÓLICA DE CD Y CA BASADA EN UN SISTEMA
AUTOMÁTICO DE CARGA DE UN BANCO DE BATERÍAS**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
INGENIERO EN COMUNICACIONES Y ELECTRÓNICA
PRESENTA**

ALEJANDRO RODRÍGUEZ JIMÉNEZ

ASESORES:

M. EN C. EFRÉN PÉREZ CARMONA

M. EN C. OSVALDO LÓPEZ GARCÍA

AGRADECIMIENTOS

A mis padres

Quiero agradecerles por su apoyo y su gran esfuerzo para que nuestra familia pudiera salir adelante a pesar de tantas carencias lograron que sus hijos fueran personas de bien.

A mi madre

Gracias le doy a dios por ser tú mi Consuelo.

A mis hermanos

Teresa, Concepción, Enrique, Mayela, Virginia, Elena, Cristina, Irene, Alberto.

Agradezco todo el apoyo que me brindaron y que me siguen dando de manera incondicional y me siento afortunado de pertenecer a esta familia.

A Cristina

Con ella aprendí el verdadero significado de la vida y de lo que en realidad es importante, le agradezco el gran apoyo que siempre me brindo aún en los peores momentos de su vida y por las largas horas de espera e incertidumbre que pasamos juntos. Con ella aprendí la mejor lección de mi vida. Como me hubiera gustado que estuviera en estos momentos con nosotros.

A Alberto

Gracias por todo tu apoyo y comprensión, y una vez más por hacerme ver que la vida es un camino que podemos elegir.

A Carlos Humberto

Gracias por tu amistad y tu apoyo, gracias por abrirme las puertas de tu casa y dejarme conocer a tu familia y más que un amigo te considero como un hermano.

Al M. en C. José Efrén Pérez Carmona

Por su valiosa asesoría en este trabajo y por el gran apoyo que representa para mí, por sus consejos y por la dosis diaria de buen humor (risoterapia) y alegría.

Al M. en C. Osvaldo López García

Por su valiosa asesoría y su paciencia en la realización de este trabajo y por los valiosos consejos.

A Mis compañeros de trabajo

Agustina, Nadia, Danila, Ivónne, Imelda, Argelia, Mariano Arturo.

Agradezco todo el apoyo que me brindaron en estos años y por sus buenos deseos y comprensión, el camino es mejor con ustedes.

Al IPN

Por brindarme la oportunidad de ser doblemente politécnico, de trabajar y estudiar en esta gran institución.

Mi cuerpo se sumerge en vida

Y mi alma nada detrás de el

Mi corazón es mi brújula

Y el amor mi horizonte

Lacrimosa

La esperanza me ayudara a vivir los días sin ti

Y el amor me llevara cuando el dolor acabe con toda esperanza

Lacrimosa

ÍNDICE

	Pág.
Índice de figuras.....	4
Índice de anexos.....	6
Índice de ecuaciones	7
Índice de tablas.....	7
Introducción.....	8
Planteamiento del problema.....	9
Justificación.....	12
Objetivo general.....	17
Objetivos particulares.....	17
Capítulo 1: Estado del arte.....	18
1.0 Introducción.....	19
Capítulo 2: Marco teórico.....	22
2.0 Introducción.....	23
2.1. Principales componentes de un sistema eólico.....	23
2.2. Torre.....	24
2.3. Turbina eólica.....	25
2.3.1. Turbinas Eólicas de eje Horizontal (HAWT).....	26
2.3.2 Turbinas Eólicas de eje Vertical (VAWT).....	28
2.4. Rotor.....	29
2.5. Generadores.....	31
2.5.1 Tipos de generadores.....	31
2.5.1.1 Generador de inducción (IG).....	31
2.5.1.2 Generador de Inducción con Jaula de Ardilla (SCIG).....	32
2.5.1.3. Generador síncrono de imanes permanentes (PMSG).....	32
2.6. Baterías.....	33
2.6.1 Tipos de baterías.....	34
2.6.1.1. Baterías de plomo-ácido.....	34

2.6.1.2 Baterías de gel.....	34
2.6.1.3 Baterías de malla de fibra de vidrio absorbentes (AGM).....	34
2.6.1.4 Baterías de ciclo profundo.....	35
2.7. Control de turbinas eólicas.....	37
2.7.1. Control aerodinámico de la turbina.....	38
2.7.2 Control del sistema eléctrico.....	38
2.8. Potencia.....	39
2.9. Velocidad de giro de una turbina eólica.....	40
2.10. Control electrónico de los acumuladores.....	42
2.11 Inversor.....	46
Capítulo 3: Diseño e implementación.....	48
3.0 Introducción.....	49
3.1 Diagrama de bloques.....	49
3.2 Rotor del sistema eólico.....	51
3.3 Generador de imanes permanentes mabuchi rs-555sh.....	58
3.4 Acumulador recargable.....	58
3.5 Circuito controlador/inversor.....	59
3.6 Regulador de carga y descarga de la batería.....	62
3.7 Sistema eólico completo.....	63
Capítulo 4: Pruebas y resultados.....	65
4.1 Funcionamiento del inversor.....	66
4.2 Funcionamiento del regulador de acumulador.....	70
4.3 Cálculo del GAE.....	70
4.4 Cálculo de la potencia.....	72
4.5 Energía máxima.....	72
Conclusiones.....	75
Referencias bibliográficas.....	77
Referencias electrónicas.....	79
Anexo I.....	80
Anexo II.....	82

Índice de figuras

Figura 1. Capacidad instalada de energía eólica en México 2015.....	13
Figura 2.1 Torre de secciones estructurales.....	24
Figura 2.2 Turbina eólica.....	26
Figura 2.3 Clasificación de turbinas por número de palas.....	27
Figura 2.4 Turbinas a) barlovento y b) sotavento.....	28
Figura 2.5 Turbinas de eje vertical.....	28
Figura 2.6. Rotor de tres palas.....	29
Figura 2.7 Generador de inducción.....	32
Figura 2.8 Generador con jaula de ardilla.....	32
Figura 2.9 Generador síncrono de imán permanente.....	33
Figura 2.10 Batería de Plomo-ácido.....	34
Figura 2.11 Batería de gel.....	35
Figura 2.12 Batería AGM.....	35
Figura 2.13 Batería de ciclo profundo.....	36
Figura 2.14 Curva de potencia típica de una turbina.....	40
Figura 2.15 Velocidad u_0 de las puntas de las palas.....	41
Figura 2.16 Transformador con TAP central.....	47
Figura 3.1 Diagrama a bloques	50
Figura 3.2 Elaboración de álabes de la turbina.....	52
Figura 3.3 Pala de un aerogenerador de eje horizontal.....	52
Figura 3.4 Diseño tomado como base de las aspas.....	53
Figura 3.5 Estaciones de la pala.....	54
Figura 3.6 Vista frontal de las aspas.....	55
Figura 3.7 Rotor de 4 aspas.....	56
Figura 3.8 Rotor de 3 aspas.....	56
Figura 3.9 Batería de 12 V a 12 Ah recargable.....	58
Figura 3.10 Circuito inversor CD/AC... ..	59
Figura 3.11 Circuito impreso (PCB), a) En modo espejo para imprimir con la	

técnica de planchado, b) Circuito en tabla fenólica.....	60
Figura 3.12 Inversor en funcionamiento.....	60
Figura 3.13. Transformador a 240 Watts.....	61
Figura 3.14 Circuito con relevador.....	62
Figura 3.15 Circuito control de carga y descarga.....	63
Figura 3.16 Sistema eólico completo.....	64
Figura 4.1 Inversor con carga.....	66
Figura 4.2 Transistores TIP 3055 dañados.....	67
Figura 4.3 Voltaje de salida del inversor.....	68
Figura 4.4 Frecuencia obtenida a la salida del inversor.....	68
Figura 4.5 Calibración de carga máxima de la batería.....	69
Figura 4.6 Calibración de carga mínima de la batería.....	70
Figura 4.7 Relación entre potencia nominal y diámetro del rotor.....	71

Índice de anexos

	Pág.
Anexo I.....	80
Anexo II	82

Índice de ecuaciones

	Pág.
2.1 Cálculo del GAE.....	30
2.2 Cálculo de la potencia.....	39
2.3 Velocidad de giro de la turbina.....	40
2.4 Velocidad específica.....	41
3.1 Altura del buje.....	57
3.2 Potencia del transformador.....	61
4.1 Potencia del sistema.....	72
4.2 Energía máxima.....	72

Índice de Tablas

	Pág.
4.1 Otras mediciones importantes.....	74

INTRODUCCIÓN

Las fuentes de energía renovable o también llamadas energías verdes dentro de las cuales se encuentra la eólica son consideradas como alternativas en la generación de electricidad y contribuyen a evitar la producción de energía mediante la utilización de combustibles fósiles que son altamente contaminantes para el medio.

En las zonas rurales de nuestro país donde la red eléctrica no llega debido a diversas situaciones, por ejemplo, por ser sitios de difícil acceso o por presentar baja densidad de población que hace no rentable la inversión para proveer de dichas instalaciones a estas zonas se presenta una oportunidad para instalar pequeños sistemas eólicos que puedan satisfacer las necesidades básicas de una casa habitación en cuanto a iluminación o para el bombeo de agua potable.

La producción de energía eléctrica mediante un sistema eólico ha aumentado en los últimos años en nuestro país, ya que se dispone de este recurso principalmente en las costas, siendo los sitios con mayor disponibilidad de viento y en donde se han instalado grandes parques eólicos.

Otro aspecto importante es que la extracción de combustibles fósiles como el petróleo cada vez es menor en nuestro país y se debe tener en cuenta que este recurso algún día se terminara y se debe sustituir por otros que no contaminen el medio, esta labor se debe comenzar de inmediato para que cuando el petróleo se termine se tenga instalado en el país diversas alternativas que logren cubrir las necesidades de la población.

En el presente trabajo se propone la implementación de un prototipo de baja potencia para zonas rurales y montañosas donde el recurso eólico es importante y se puede obtener el mejor aprovechamiento y beneficio para los pobladores de esas zonas.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad la preocupación por frenar el deterioro del ambiente de nuestro planeta ha tomado mayor importancia. En la década de los ochenta se comenzó a difundir el problema del calentamiento global provocado por la utilización de combustibles no renovables como el carbón, los combustibles fósiles como el petróleo, que se emplea principalmente en la industria y en los automóviles, gas natural y uranio principalmente, ya que la utilización de dichos combustibles provoca el aumento de los llamados gases de efecto invernadero (GEI). Los principales GEI son: el bióxido de carbono (CO_2), el metano derivado de la actividad agrícola y de los vertederos, óxido nitroso utilizado para los fertilizantes, gases para la refrigeración y los procesos industriales, esto aunado a la pérdida de los bosques y las selvas tropicales (junto con las especies de insectos asociadas a las plantas) genera el aumento de los índices de CO_2 en el ambiente.

El nivel de dióxido de carbono en la atmósfera era de 285 partes por millón, en 1880, el año en que se inició el registro de temperatura del Instituto Goddard para Estudios Espaciales (Goddard Institute for Space Studies o GISS de la NASA). Para 1960, la concentración de dióxido de carbono atmosférico, medida por el Observatorio Mauna Loa de la NOAA (National Oceanographic and Atmospheric Administration o Administración Nacional Oceanográfica y Atmosférica), era de 315 partes por millón. En la actualidad, esas mediciones superan las 390 partes por millón [28].

El aumento de los GEI provoca el llamado calentamiento global debido a que estas moléculas retienen el calor, siendo el óxido nitroso el que más calor retiene, hasta 300 veces más que el CO_2 . Los clorofluorocarbonos son gases que también tienen una gran capacidad para retener el calor siendo miles de veces mayor que el CO_2 (los clorofluorocarbonos ya han sido prohibidos afortunadamente).

Debido a que las concentraciones de clorofluorocarbonos y ácido nítrico son menores en la atmósfera los científicos se han interesado más en el CO_2 que es el gas que se encuentra en mayor concentración en la atmósfera. El cambio climático

está asociado a este aumento de bióxido de carbono en la atmosfera de nuestro planeta.

La temperatura promedio en el año 2012 fue de alrededor de 14,6 grados Celsius (58,3 grados Fahrenheit), lo cual es 0,6 °C (1,0 °F) más caliente que la referencia que corresponde a mediados del siglo XX. Según el nuevo análisis, la temperatura global promedio ha aumentado 0,8 °C (1,4 °F) desde el año 1880 [28].

El calor no solo está derritiendo los glaciares y el hielo del mar, también está cambiando los patrones de precipitaciones, los huracanes y otras tormentas se presentaran con mayor fuerza y haciendo que los animales emigren [29].

Debido a toda esta problemática en las últimas décadas se ha dado a nivel mundial un proceso de transición hacia una mayor participación de las energías renovables, impulsado por una serie de factores, entre los cuales se encuentran: las preocupaciones de soberanía y de seguridad en el abasto de energía en países importadores de energía, sobre todo a partir de las crisis petroleras, y la cada vez mayor volatilidad de los precios de los combustibles; y las preocupaciones por los impactos ambientales de los sistemas energéticos: en particular la lluvia ácida y, en las últimas tres décadas, el cambio climático.

Este proceso de transición, impulsado por nuevas tecnologías a menores precios que son el resultado del desarrollo tecnológico e industrial, se ha acelerado desde finales de la década de los noventas en varios países del Mundo, entre los cuales resaltan Alemania, España, Dinamarca, Estados Unidos y Brasil. La capacidad eólica es un buen indicador de este rápido crecimiento. Mientras que en 1985, la capacidad mundial era de 1,020 Mega Watts (MW) (equivalentes a menos de la mitad de la central termoeléctrica de Tuxpan), para el 2008 rebasó los 120,000 MW (es decir, más del doble de la capacidad total de generación de electricidad en México).

Situación en México

La producción de energía eléctrica mediante un sistema eólico ha aumentado en los últimos años en nuestro país, ya que se dispone de este recurso principalmente en las costas, siendo los sitios con mayor disponibilidad de viento y en donde se han instalado grandes parques eólicos sobresaliendo los de Guerrero, Oaxaca y Baja California Sur.

Energía eólica

Las turbinas eólicas transforman la energía cinética del viento en energía mecánica, ya sea para mover directamente una máquina tal como una bomba de agua, o bien para impulsar un generador eléctrico.

Existen turbinas de muchos tamaños, desde unos 500 W, hasta más de 7 MW. Las de mayor tamaño están destinadas principalmente a granjas eólicas marinas. En el transcurso de las últimas dos décadas del siglo XX, la tecnología de las turbinas eólicas ha avanzado radicalmente y sus costos se han reducido hasta hacerse competitivos con las tecnologías convencionales en contextos geográficos favorables.

El costo de las turbinas eólicas es de aproximadamente US\$1,700 por KW. El costo de la electricidad generada depende de la velocidad del viento y de su distribución a lo largo del año. En condiciones óptimas, con costos de alrededor de 5 centavos de dólar por KWh, esta tecnología resulta competitiva con muchas de las tecnologías convencionales de generación de electricidad [3].

En este trabajo se propone la implementación de un prototipo de baja potencia para casa habitación en zonas rurales y montañosas donde el recurso eólico es importante y se puede obtener el mejor aprovechamiento y beneficio para los pobladores de esas zonas y de esta forma contribuir a disminuir las emisiones de GEI.

JUSTIFICACIÓN

En México existen en la actualidad 170 MW de capacidad eólica en operación, que se dividen en: 85 MW en los proyectos La Venta I y La Venta II operados por la CFE en el Istmo de Tehuantepec [2].

- a) 80 MW en el proyecto de autoabastecimiento Parques Ecológicos de México, que entró gradualmente en operación desde enero del 2009.
- b) 0.6 MW en una turbina de la CFE en Guerrero Negro, Baja California Sur.
- c) 2 MW en pequeños aerogeneradores en sitios aislados de la red.
- d) 3 MW en pequeñas aerobombas (turbinas eólicas que impulsan bombas hidráulicas).

La CFE licitó recientemente otros dos proyectos denominados La Venta III y Oaxaca I, cada uno con una capacidad de 101.5 MW. Estos se realizarán en la modalidad de Producción Independiente de Energía. Otros tres proyectos de CFE en la misma modalidad con una capacidad total de 304 MW están planeados para entrar en operación en el transcurso del 2010.

Por otro lado, están en proceso de construcción o de planeación un gran número de proyectos eólicos de autoabastecimiento y de exportación, ubicados principalmente en el Istmo de Tehuantepec, así como en La Rumorosa, en Baja California, Nuevo León y Tamaulipas.

El potencial eólico del país no ha sido evaluado de manera exhaustiva. Se han realizado, sin embargo, evaluaciones del recurso en regiones específicas. En particular el Laboratorio Nacional de Energías Renovables de los Estados Unidos ha coordinado la realización de mapas eólicos para Oaxaca, Baja California Sur, las costas de Yucatán y de Quintana Roo y las franjas fronterizas de los estados de Baja California, Sonora y Chihuahua [19].

Estos mapas se han realizado conjuntando información de estaciones meteorológicas con técnicas de prospección remota. En la siguiente figura se aprecian los parques eólicos instalados en la república mexicana hasta el 2015.



Figura 1. Capacidad instalada de energía eólica en México 2015.

[26] Tomado de Asociación Mexicana de Energía Eólica (amdee)

Como parte del proyecto “Plan de acción para eliminar barreras para el desarrollo de la generación eolieléctrica en México”, el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) ha instalado anemómetros en diversos puntos del país y ha encontrado potenciales significativos en varios de ellos, como Oaxaca, Baja California, Coahuila y Durango por mencionar algunos.

Las posibilidades de desarrollo de la energía eólica en el corto y en el mediano plazo en México dependen no sólo del potencial físico del recurso, sino también de la capacidad industrial y de la capacidad del sistema eléctrico para absorber la electricidad generada sin poner en riesgo la seguridad y la estabilidad del sistema.

Existe también potencial técnico y económico para el desarrollo de sistemas eólicos en aplicaciones fuera de la red eléctrica, tales como la generación de electricidad y el bombeo de agua por medio de aerobombas.

Los beneficios de las energías renovables

La experiencia internacional demuestra que las energías renovables producen diversos tipos de beneficios a los sistemas energéticos y a los países en su conjunto. Estos beneficios son tanto económicos, como sociales y ambientales.

Beneficios económicos en México

Muchas tecnologías de energías renovables, tales como los calentadores solares de agua o los sistemas de electrificación rural para comunidades aisladas, son las opciones más económicas para sus usuarios. Su uso les reporta, por tanto, importantes ahorros de manera directa.

Otras tecnologías de energías renovables, tales como la generación de electricidad a partir de energía eólica, pueden ser aparentemente más costosas que las tecnologías convencionales cuando se evalúan de manera aislada. Sin embargo, al analizar el sistema energético en su conjunto, y al tomar en cuenta no sólo los costos de la energía sino también los riesgos relacionados con la variabilidad de dichos costos, se observa que las energías renovables, gracias a sus riesgos pequeños o nulos, permiten en realidad, en muchos casos, reducir los costos del sistema.

También contribuye a que nuestro país dependa en menor grado de la importación de petróleo, como ha venido sucediendo desde los años setenta, de otros países y la reciente caída de los precios del hidrocarburo.

Otro aspecto importante que se debe analizar es que en el futuro los combustibles de origen fósil se terminarán y se debe implementar formas de sustituirlos desde ahora y no esperar a que se agoten para analizar e implementar la utilización de energías renovables.

Beneficios sociales

Un aspecto muy importante en la utilización de sistemas eólicos es el mayor acceso a servicios energéticos sustentables en áreas rurales. La provisión de energía es uno de los principales motores para el desarrollo rural, y las energías renovables son a menudo la mejor opción para proveer de servicios energéticos a comunidades rurales. En particular, la electrificación rural por energías renovables es, en muchos casos, una opción más rentable que las extensiones de la red eléctrica, para el 2.5% de las viviendas del país que no disponen de acceso a la energía eléctrica [15].

Las tecnologías de energías renovables son más intensivas en la utilización de mano de obra que las tecnologías energéticas convencionales. La experiencia internacional muestra que su fabricación y operación da lugar a la creación de una cadena local de valor, con creación de pequeñas empresas y de empleos. Se estima que en el mundo hay actualmente 2.3 millones de personas trabajando en la industria de las energías renovables [22].

Se estima que en México el desarrollo acelerado de las energías renovables, aunado con mecanismos de política industrial, podría conducir a la creación de al menos 100,000 empleos.

Asimismo, como sucede en otros países, se encuentra que muchos de los proyectos de energías renovables se ubican en áreas rurales y que impactan de forma positiva en el desarrollo del medio rural.

Estos impactos se dan sobre todo en forma de un mayor ingreso para los pobladores (a través de contratos de arrendamiento, empleos locales, o bien de la participación de los pobladores como socios de los proyectos). También pueden existir otros tipos de impactos en cuanto a la educación, la capacitación para el trabajo, el desarrollo de capacidades empresariales, etc.

En México el sector energía contribuye con el 61% de las emisiones de gases de efecto invernadero, y el país ocupa el lugar número 13 a nivel mundial en cuanto a sus emisiones de estos gases [8].

El aprovechamiento de las energías renovables, al desplazar el consumo de combustibles fósiles, constituye una de las principales estrategias de mitigación del cambio climático a nivel mundial. Debido a su alta vulnerabilidad ante el cambio climático, nuestro país tiene un interés particular para promover mecanismos globales de mitigación. El desarrollo de proyectos de energías renovables representa además para México una oportunidad importante de captar recursos internacionales de los mercados de bonos de carbono (el Mecanismo de desarrollo Limpio del Protocolo de Kioto y otros mercados como los voluntarios).

El sector energético produce emisiones de otros gases y partículas contaminantes, con efectos locales directos o indirectos en la salud de los pobladores y la conservación de la biodiversidad. Es, en particular, el caso del dióxido de azufre (SO₂), que reacciona en la atmósfera para transformarse en ácido sulfúrico, causante de la lluvia ácida, y también de las partículas suspendidas, causantes de daños a la salud. Las energías renovables permiten desplazar el consumo de combustibles fósiles y por ende reducir estos impactos [5].

El aprovechamiento de las energías renovables puede aumentar el valor económico que proporcionan las selvas y otras zonas ricas en biodiversidad, y con esto aumentar el interés de las poblaciones locales, dueños y poseedores del bosque para su conservación; al incrementar la generación de empleo local y la renta forestal. Esto sucede en particular para el caso de los sistemas hidroeléctricos (para cuyo adecuado funcionamiento es necesario asegurar la conservación de la vegetación y de los suelos en las cuencas).

En México más del 70% de la energía eléctrica producida por Comisión Federal de Electricidad proviene de combustibles fósiles, entre los que destacan el combustóleo, el carbón, el diésel y el gas natural. Es de particular importancia destacar que en México existen cerca de 80,000 pequeñas comunidades rurales de menos de 1,000 habitantes que carecen de energía eléctrica [11].

El sector Eléctrico Mexicano ha electrificado en los últimos años 30,000 comunidades rurales mediante sistemas tradicionales de distribución de energía eléctrica, consistentes en líneas y redes de distribución. Sin embargo, este gran esfuerzo no ha sido suficiente ya que en las 80,000 comunidades antes mencionadas que aún carecen de energía eléctrica, habitan cerca de seis millones de mexicanos. Estos pequeños poblados se localizan en las partes altas de las serranías, sus vías de acceso en la mayoría de los casos no permiten la entrada de vehículos automotores y además la ubicación geográfica de las casas dentro de la población es sumamente dispersa, lo cual dificulta y encarece las redes de distribución de energía eléctrica convencionales.

Objetivo general.

Desarrollo de un sistema basado en un sistema eólico de generación de energía de Corriente Directa (CD) en forma automática que regule la carga y descarga de un banco de baterías, con la finalidad de utilizar la energía eléctrica en una casa habitación sin acceso a la red eléctrica.

Objetivos particulares.

- Seleccionar de forma técnica una turbina, generador y baterías, para la generación de CD de uso doméstico.
- Implementar un circuito que permita regular la carga y descarga de la batería a fin de almacenar energía eléctrica para su posterior uso doméstico.
- Implementar un circuito inversor que transforme CD a CA.
- Adaptar el conjunto turbina-generador-batería para que produzca la máxima energía.

CAPÍTULO I

ESTADO DEL ARTE

1.0 INTRODUCCIÓN

El viento es una fuente de energía renovable segura, medio ambientalmente limpia y económica. El mundo tiene enormes recursos de energía del viento. Los recientes avances tecnológicos en turbinas eólicas de velocidad variable, en electrónica de potencia y en accionamientos de máquinas han hecho de la energía eólica una forma de energía competitiva, tanto como la energía obtenida de los combustibles fósiles. Actualmente, la tecnología eólica es la de mayor crecimiento en el mundo [6], [18].

La operación de una sola o unas pocas turbinas eólicas por consumidores privados o industriales fue el primer campo de aplicación que alcanzó estatus comercial.

Primeramente, en Dinamarca, donde la legislación, los subsidios públicos para la generación de energía del viento y la experiencia técnica en la construcción y operación de turbinas eólicas hicieron posible este desarrollo desde 1978. Desde la década de 1990, las turbinas eólicas en Alemania experimentan un crecimiento significativo [13].

Entre 1982 y 1985, los primeros grandes arreglos de turbinas eólicas fueron realizados en el Estado de California, con pequeñas unidades de potencia entre los 20 y los 100 KW. En Alemania la utilización de la energía eólica se ha basado, desde un principio, en la instalación de grandes y numerosas turbinas. Los parques eólicos de varios Mega Watts de salida ya forman parte de la matriz energética de numerosos países [13].

Se espera que en la próxima década el 25% de la capacidad instalada provendrá del viento [6]. Sin embargo, encontrar lugares para grandes parques no es fácil.

El control es diseñado para localizar, de alguna manera, el punto de máxima transferencia de potencia, para vientos livianos y después regulando la salida al llegar a potencia nominal. Para lograr lo anterior, se utilizan estructuras inteligentes que permitan ambos tipos de control. Principalmente sistemas programables como los microcontroladores (μC) y Procesadores de Señal Digitales (PSD).

La variable de control utilizada comúnmente es el ciclo de trabajo de algún convertidor de Corriente Directa (CD) a Corriente Alterna (CA) de potencia, ya sea para imponer un cierto voltaje en los terminales de estator del generador [7], [16], o mediante la excitación del circuito de rotor [10]. También se pueden encontrar estructuras que regulan mediante el ángulo de disparo de un puente rectificador a tiristores [4].

Se utiliza ampliamente la relación óptima de potencia contra velocidad de rotación, evitando así el uso de anemómetros. Algunos llegan a modelar el sistema eléctrico para obtener una relación óptima entre el voltaje CD y la velocidad de rotación [16]. La medición de la velocidad de rotación se realiza ya sea por tacómetro o por la medición de la frecuencia eléctrica de la señal de salida del generador.

Pequeños sistemas eólicos sin regulación eléctrica y directamente conectados a bancos de baterías son también utilizados. Estos sistemas en lazo abierto son diseñados especialmente para que el conjunto turbina-generador-batería produzca la máxima energía sin el uso de control retroalimentado.

Nuevos tipos de engranajes, como las cajas de cambios planetarias de varias etapas y de etapas helicoidales, están en desarrollo. Éstos, deberían traducirse en sistemas de alta eficiencia con potencias mecánicas altas ya que mayores valores de torque y velocidad de rotación implican conversiones electromecánicas más óptimas en los generadores de mayor velocidad.

El diseño y la fabricación de palas que incorporen avanzados materiales livianos como fibra de carbono y compuesto híbridos de carbono/vidrio están siendo investigados. Aunque más costosa que la fibra de vidrio utilizada comúnmente, la

fibra de carbono es mucho más fuerte y liviana. Las turbinas de varios MW han generalizado tanto el uso de torres de acero y concreto como el empleo de nuevos métodos de producción para reducir costos de fabricación y transporte.

Nuevos tipos de generadores, incluyendo configuraciones de múltiples polos y máquinas de alto voltaje, de reluctancia conmutada, de flujo axial y transversal se están desarrollando para reducir la masa y mejorar la eficiencia del generador. Para reducir costos y aumentar la eficiencia se están haciendo frecuentemente nuevas mejoras en la conversión de energía mediante componentes electrónicos de potencia.

En este contexto, se están estudiando nuevos dispositivos electrónicos de potencia para explorar la posibilidad de reemplazar el silicio por carburo de silicio. Éste último, tiene la ventaja de manejar voltajes y corrientes altas y soportar mayores temperaturas, lo que permitiría reducir el tamaño de los convertidores de potencia y hacerlos más competitivos. También se estudia el uso de componentes de media tensión para disminuir el costo de los sistemas de conversión en grandes turbinas eólicas, por ello, se están desarrollando diversas topologías de convertidores electrónicos de potencia, de varios Mega Watts, para proveer una conversión de potencia que sea eficiente en términos de costo que tengan alta confiabilidad y un estándar de calidad elevado [6].

Aspectos como el pronóstico de la velocidad del viento y consecuentemente la estimación de la cantidad de potencia aportada por las granjas eólicas, permitirá predecir con mayor precisión el valor de la electricidad producida por éstas. Lo cual, ayudará a la planificación, programación y coordinación de la generación con la demanda del sistema y consecuentemente, con los contratos de suministro de energía. Modelos precisos pueden asegurar el éxito de estos desarrollos y obtener el máximo provecho a mínimos riesgos.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

CAPÍTULO II.

2.0 INTRODUCCIÓN

La energía eólica puede transformarse a energía eléctrica mediante un generador eléctrico (aerogenerador), impulsado por la energía del viento, teniendo en consideración que este es un fenómeno que presenta muchas variaciones y que depende de las condiciones del terreno, la orografía, la altitud y el clima para que este se presente en mayor cantidad y a mayor velocidad.

Se calcula que entre el 1 y el 2 % de la energía del sol que incide sobre nuestro planeta se transforma en viento.

La generación del viento es sencilla. El sol calienta la tierra, y el aire frío que viene del mar, al pasar por la tierra se calienta. Como el aire caliente pesa menos, asciende, y según los obstáculos (montañas, colinas, barrancos) que se encuentre puede tener mayores o menores turbulencias.

Actualmente, la energía del viento se aprovecha para producir electricidad gratuita con los llamados aerogeneradores, los modernos “molinos de viento”.

Su principio de funcionamiento es muy sencillo; el viento mueve las palas de la hélice, que a su vez, a través de un sistema de engranajes, mueven un generador que produce electricidad.

La energía desarrollada por el viento es proporcional al cuadrado de su velocidad. Esto quiere decir que, si aumenta la velocidad del viento, la energía generada aumenta mucho más, por lo que se considera que el sistema eólico tiene un buen rendimiento en electricidad.

2.1. Principales componentes de un sistema eólico

Estos sistemas por lo general están compuestos por un rotor, un generador o alternador montado en una estructura, una cola (usualmente), una torre, el cableado,

y los componentes del “sistema de balance”: controladores, inversores y las baterías. A través del giro de los alabes la turbina convierte la energía cinética del viento en un movimiento rotatorio que acciona el generador.

2.2. Torre

Debido a que a mayores alturas el viento es más intenso, la turbina es montada en una torre como se muestra en la figura 2.1, por lo general a mayor altura se produce una mayor cantidad de energía. La torre también evita las turbulencias de aire que podrían existir cerca del piso, debido a obstrucciones como: colinas, algunas construcciones y árboles. Por regla general se recomienda instalar la turbina en una torre, en la cual la parte inferior del rotor esté a una altura de 30 pies (9 metros) de cualquier obstáculo que se encuentre a una distancia de 300 pies (90 metros) de la torre. Relativamente inversiones menores en una torre más alta pueden resultar en tasas más altas de generación de energía. Por ejemplo, la diferencia de instalar una turbina a 100 pies (30.4 m), en vez de 60 pies (18.2 m) puede incrementar la inversión en un 10% pero la generación de energía se puede incrementar hasta en un 25%.

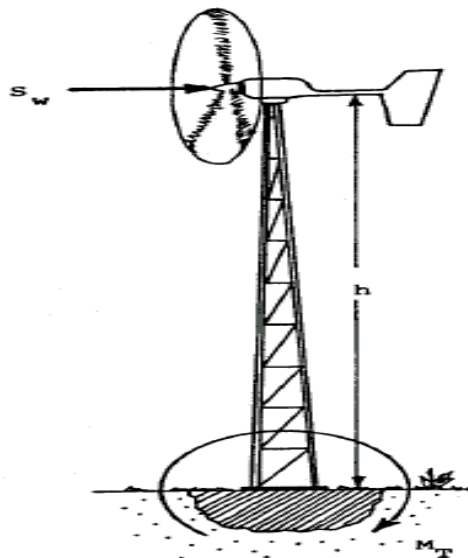


Figura 2.1. Torre de secciones estructurales.

Básicamente existen dos tipos de torre: las autoportantes (soporte libre) y las retenidas, siendo estas las de mayor uso para usos residenciales. Estas torres son las más baratas y pueden consistir de secciones estructurales o tubulares, dependiendo del diseño y los soportes para los cables de retenida. Sin embargo, el radio para sostener las retenidas debe ser la mitad o tres cuartos de la altura de la torre, por lo que se requiere tener suficiente espacio para fijarlas. Las torres abatibles son más caras, pero permiten poder llevar a cabo, en forma más fácil, el mantenimiento en turbinas pequeñas, de bajo peso, usualmente de 5 kW o menos.

Asimismo, las torres pueden ser retraídas durante condiciones climatológicas adversas, tales como huracanes. Las torres de aluminio están propensas a la fractura, por lo que deben evitarse.

El montaje de las turbinas sobre los techados no es recomendable, debido a que todas las turbinas vibran y transmiten ésta a la estructura donde están montadas.

Uno de los propósitos de la producción de electricidad es lograr que se transforme el giro lento de las paletas de una turbina, en un giro rápido para generar electricidad.

Las instalaciones de sistemas eólicos deben tener en cuenta las variaciones de la velocidad del viento:

- Variaciones diarias.
- Variaciones estacionales.
- Variaciones con referencia a la altura respecto al suelo.

La velocidad mínima para que sea rentable el funcionamiento de un sistema eólico es de 12 km/h.

La velocidad máxima para que sea rentable el funcionamiento de un sistema eólico es de 65 km/h.

2.3. Turbina eólica

Actualmente, la mayoría de las turbinas fabricadas son de eje horizontal como la de la figura 2.2, son de las llamadas “corriente viento arriba” y cuentan con dos o tres

alabes, los cuales por lo regular están fabricados con materiales compuestos, tales como fibra de vidrio.

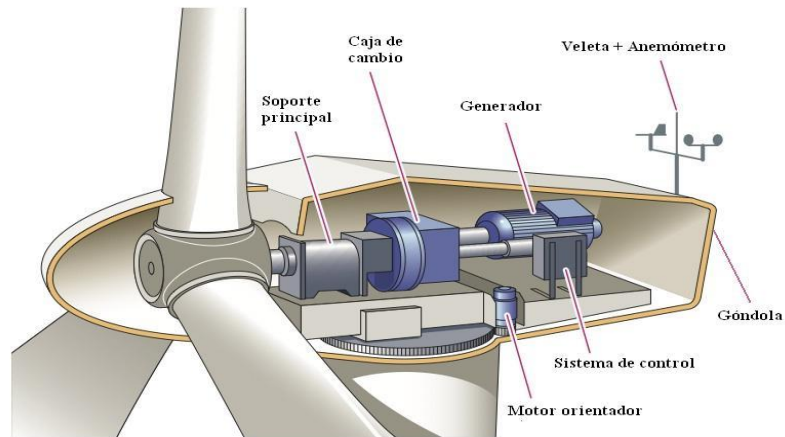


Figura 2.2 Turbina Eólica.

La cantidad de electricidad que una turbina puede generar, está determinada en una primera instancia, por el diámetro del rotor. Este parámetro define su “área de barrido” o la cantidad de viento que es interceptado por la turbina. La coraza de la turbina es la estructura en la cual el rotor, el generador y la cola se encuentran montados. La veleta ayuda a mantener a la turbina siempre de frente (perpendicular) al viento.

2.3.1. Turbinas Eólicas de Eje Horizontal (HAWT)

Este tipo de turbinas conocidas como HAWT (Horizontal Axis Wind Turbine), tiene su eje de rotación horizontal al suelo casi en paralelo a la dirección del viento tal como las hélices de los aviones y los antiguos molinos. La mayor parte de las turbinas eólicas caen en esta categoría. Las máquinas de eje horizontal tienen distintas ventajas, tales como una baja velocidad de arranque y un coeficiente de potencia que es alto [18]. Sin embargo, el generador y la caja de cambios de este tipo de turbina deben ubicarse en lo alto de la torre, lo que hace su diseño más complejo y costoso. Otra desventaja es su necesidad de una cola o un sistema de direccionamiento que oriente la turbina en el sentido del viento.

Dependiendo de la cantidad de palas las HAWT son clasificada en monopala, bipala o multipala como se puede ver en la figura 2.3. Las monopala son más baratas, pero para balancearla se debe colocar un contrapeso al lado opuesto. Las bipala también tienen este problema, la mayoría de las actuales turbinas son de tres palas debido a que la carga aerodinámica está más balanceada y es relativamente uniforme.

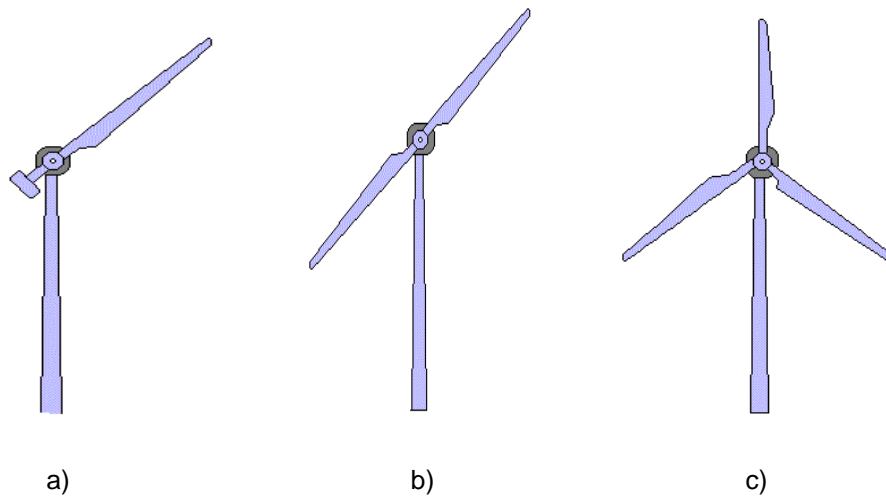
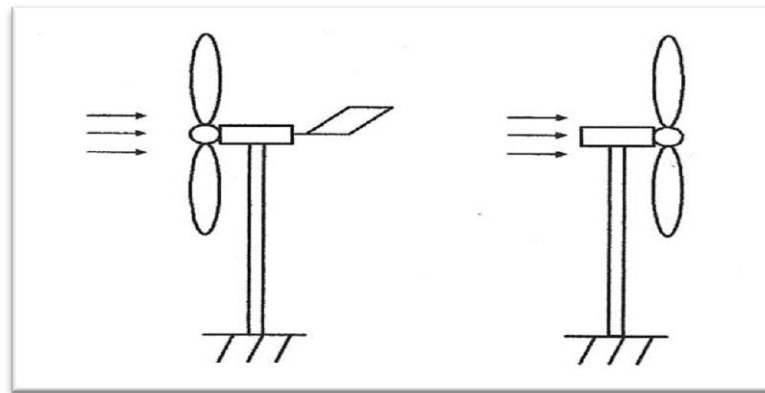


Figura 2.3. Clasificación de turbinas por número de palas.

a) Monopala, b) Bipala, c) Tripala

Según la dirección en que reciben el viento, las HAWT se clasifican como “a barlovento” (up-wind) o “a sotavento” (down-wind) como se aprecia en la figura 2.4. Las turbinas a barlovento requieren de un mecanismo de orientación del viento para mantener el rotor siempre frente al viento. Las turbinas a sotavento no requieren de orientación. La categoría más ampliamente prevaleciente es la HAWT a barlovento debido a que se puede aprovechar mejor el viento aumentando la altura de la torre, en algunos sitios con mucho viento al aumentar 10 metros la altura de la torre se incrementa en 30% la producción de energía.



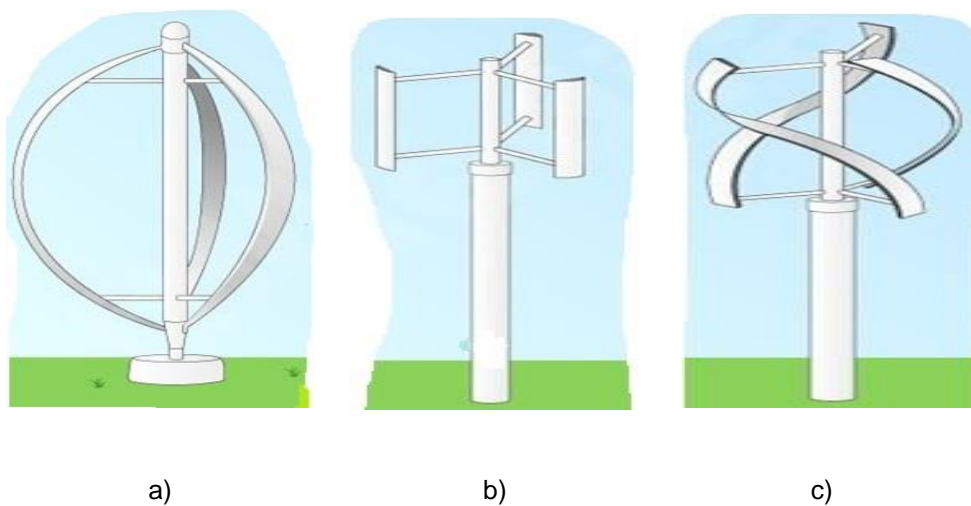
a)

b)

Figura 2.4 Turbinas; a) barlovento y b) sotavento.

2.3.2 Turbinas Eólicas de eje Vertical (VAWT)

El eje de rotación de una VAWT (Vertical Axis Wind Turbine) es vertical respecto del piso y perpendicular a la dirección del viento como se aprecia en la figura 2.5. Este tipo de turbinas pueden recibir vientos de todas direcciones por lo que no requieren dispositivos de orientación. El generador y la caja de cambios pueden estar a nivel de piso, lo que facilita el diseño de la torre y disminuye costos. Además que el mantenimiento del sistema es al nivel del piso.



a)

b)

c)

Figura 2.5 Turbinas de eje vertical con rotor: a) Darrieus, b) Darrieus H, c) Darrieus helicoidal

Una desventaja es que no arrancan por si solas. Para empujar y arrancar la turbina una vez detenida pueden requerirse mecanismos adicionales. La mayor parte de las VAWT trabajan a una baja razón de velocidad. El bajo rendimiento y la poca cantidad de viento que estas reciben al estar al nivel del suelo hacen que las VAWT estén en desventaja frente a las HAWT [9].

2.4. Rotor

La estructura mecánica básica de las actuales turbinas eólicas consta de un rotor que capta parte de la energía del viento y la transforma en energía rotatoria. Una caja de engranajes regularmente eleva la velocidad de rotación para adaptarla a la velocidad de un generador eléctrico que transforma esta energía mecánica en electricidad. Aunque hay varias formas de clasificar las turbinas eólicas, estas comúnmente son catalogadas en máquinas de eje horizontal y máquinas de eje vertical, basado en su eje de rotación.

El rotor está formado por el buje y las palas, como se observa en la figura 2.6, y es un componente muy importante en el desempeño de la turbina. Existen turbinas con rotor a barlovento, con tres palas, que son las más utilizadas, otras con rotor a sotavento que son las menos utilizadas, al igual que los rotores a dos palas.

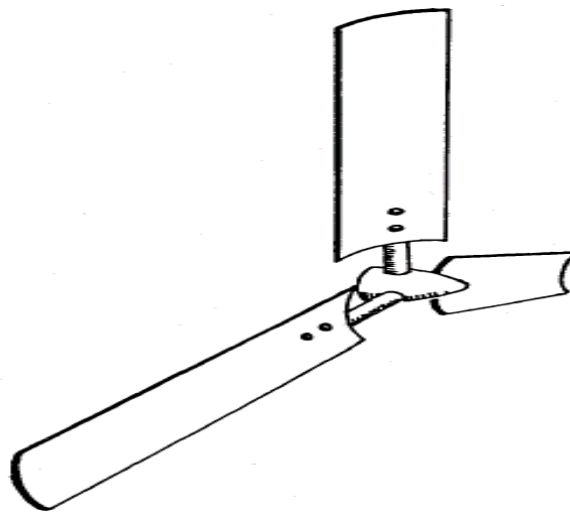


Figura 2.6. Rotor de tres palas.

El área de barrido, es un factor importante, porque el rotor es la parte de la turbina que captura la energía del viento. Por esto entre más grande sea este más energía se puede obtener. La densidad del aire varía ligeramente con la temperatura y la altitud. Las clasificaciones de turbinas se encuentran referidas a condiciones normalizadas de 59 °F (15 °C) y altitud al nivel medio del mar. Aunque el cálculo de la potencia eólica ilustra algunas características importantes, la mejor forma de medir el funcionamiento de una turbina es la Generación Anual de Energía (GAE). La diferencia entre potencia y energía, es que la primera es la razón a la cual la energía es consumida (kilowatts), mientras que la energía es la cantidad consumida (kilowatts-hora). Una estimación de la energía generada, kWh/año es la mejor forma de determinar si una turbina eólica y su torre en particular, generarán suficiente energía para cubrir las necesidades.

Para estimar la cantidad de energía que se puede obtener se debe evaluar este parámetro utilizando la curva característica de la turbina elegida, la velocidad promedio anual del viento en la localidad, la altura de la torre, y la distribución de frecuencia de velocidad del viento, el cual es una estimación del número de horas que el viento sopla a cada velocidad durante el año en promedio.

Para obtener una estimación preliminar del funcionamiento de una turbina eólica en particular, se puede usar la ecuación 2.1:

$$GAE = 0.01328 D^2 V^3 \quad (2.1)$$

Dónde:

GAE =Generación anual de energía

D=Diámetro del rotor, pies

V=Velocidad del viento promedio anual, millas por hora.

2.5. Generadores

Los generadores eléctricos son aparatos que convierten la energía mecánica en energía eléctrica. La energía mecánica, a su vez, se produce a partir de la energía química o nuclear con varios tipos de combustible, o se obtiene a partir de fuentes renovables como el viento o los saltos de agua. Las turbinas de vapor, los motores de combustión interna, las turbinas de combustión de gas, los motores eléctricos, las turbinas de agua y de viento son los métodos comunes que proporcionan energía mecánica para este tipo de dispositivos. Hay generadores eléctricos de todo tipo de tamaños, desde muy pequeños de unos pocos vatios de potencia de salida hasta centrales eléctricas de gran potencia que proporcionan gigavatios de potencia.

La aplicación más frecuente de las turbinas eólicas actuales es la generación de electricidad, para esto es indispensable la utilización de un generador eléctrico. Todo tipo de máquinas eléctricas pueden ser utilizadas para la generación de potencia eólica. Factores técnicos y económicos definen que tipo debe utilizarse en cada aplicación. Para pequeñas potencias (<20KW), la simplicidad y bajo costo de los Generadores Síncronos de Imán Permanente (PMSG) explican su extensa utilización.

2.5.1. Tipos de generadores.

2.5.1.1. Generador de inducción (IG)

Es utilizado en medianas y grandes turbinas debido a su robustez, simpleza mecánica y bajo precio. Su mayor desventaja es que requiere de corriente reactiva magnetizante en el estator en la figura 2.7 podemos observar un generador de inducción.



Figura 2.7 Generador de inducción.

2.5.1.2. Generador de Inducción con Jaula de Ardilla (SCIG)

El SCIG (Squirrel-Cage Induction Generation) presenta gran simplicidad, alta eficiencia y bajos requerimientos de mantenimiento [1]. La demanda de potencia reactiva es compensada generalmente con la conexión de condensadores en paralelo al generador por la inclusión de equipos electrónicos de potencia, en la figura 2.8 vemos un generador de jaula de ardilla.

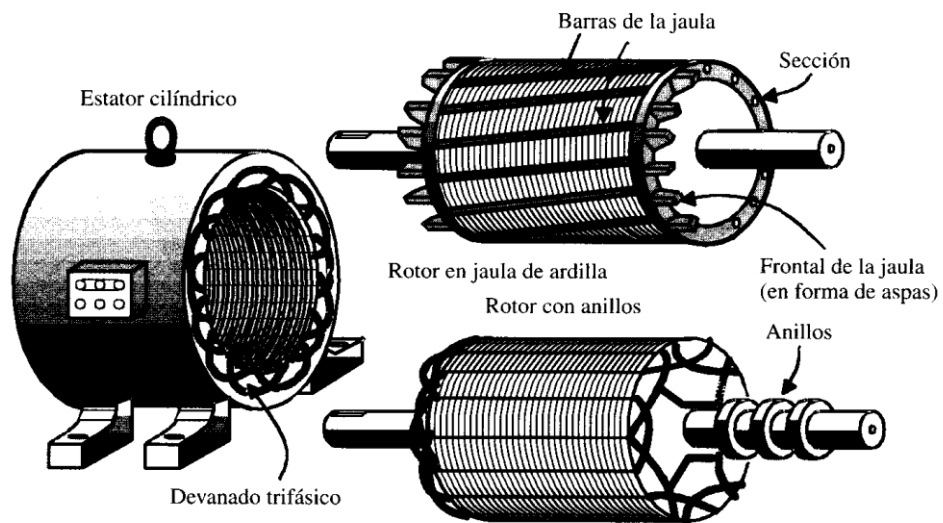


Figura 2.8 Generador con jaula de ardilla

2.5.1.3. Generador Síncrono de Imanes Permanentes (PMSG)

Este generador PMSG (Permanent Magnet Synchronous Generation) es auto-excitado lo que posibilita su operación a un alto nivel de potencia, con gran eficiencia, haciéndolo apropiado para su aplicación en sistemas de generación eólicos [1]. Para utilizarlo en pequeñas turbinas, su bajo costo y simplicidad hacen del PMSG el más ampliamente utilizado en la figura 2.9 se observa un generador de este tipo. Sin embargo, en aplicaciones que requieren mayor potencia, los imanes y la utilización de un convertidor estático capaz de manejar toda la potencia de generación lo hace menos competitivo.



Figura 2.9 Generador síncrono de imán permanente.

2.6. BATERÍAS

Los sistemas que no están conectados a la red de suministro, requieren el uso de baterías para almacenar la energía excedente generada, para usarla cuando no sople viento. Asimismo, requieren un controlador de carga para proteger a las baterías de una sobrecarga.

Durante la fase de diseño de una turbina eólica aislada es importante elegir la batería que va a formar el banco para el almacenamiento, a continuación, se enumeran las más utilizadas.

2.6.1 Tipos de Baterías

2.6.1.1. Batería de plomo-ácido

Las baterías de plomo son las más utilizadas para alimentar el sistema eléctrico de las motocicletas, automóviles y camiones, tienen un bajo costo, entregan corrientes muy altas, son fiables y de larga vida, sin embargo, no son convenientes para la descarga y carga continua por el fenómeno de la sulfatación y pueden ser peligrosas, se observa una batería de este tipo en la figura 2.10.



Figura 2.10 Acumulador de Plomo-ácido.

2.6.1.2. Batería de gel

Las baterías (acumulador) de gel, son igual que las baterías de plomo en la que el electrolito es líquido, pero no gelatinoso. También se les llama baterías sin mantenimiento, son adecuadas para los ciclos de descarga muy profunda, que duran tres veces más que las baterías de plomo-ácido, puede soportar un número muy alto de ciclos de carga-descarga, son más caras que las baterías de plomo-ácido y si se cargan mal pierden su vida útil rápidamente, un ejemplo de este tipo de baterías se aprecia en la figura 2.11.



Figura 2.11 Batería (Acumulador) de gel.

2.6.1.3. Batería de malla de fibra de vidrio absorbente (AGM)

Las baterías de fibra de vidrio absorbente o AGM (absorbed Glas Material) son compactas libres de cortocircuitos y muy resistentes a la tensión mecánica. Pude ser montada en cualquier posición, tienen una vida media de 10 años, no sufren las altas temperaturas y en caso de rotura la fuga de ácido es limitada, tienen altas corrientes de irrupción, baja auto descarga, mayor velocidad en la carga, su desventaja es que son más caras que las baterías de gel, en la figura 2.11 se aprecia una batería de este tipo



Figura 2.12 Batería (Acumulador) AGM.

2.6.1.4. Baterías de ciclo profundo

Las baterías (Acumuladores) de ciclo profundo tienen la capacidad de descargarse completamente cientos de veces, la diferencia entre estas baterías y las de los automóviles consiste en que la del automóvil está hecha para proveer una rápida cantidad de energía miles de veces en su tiempo de vida, mientras que solo

pueden descargarse completamente menos de 50 veces durante su vida y las de ciclo profundo pueden descargarse completamente cientos de veces.

Este tipo de baterías convierten la energía eléctrica en energía química. Esto se logra mediante un proceso electroquímico de oxidación/reducción. El proceso electroquímico es reversible permitiendo que se regrese al estado de corriente eléctrica cuando sea necesario.

Las baterías de ciclo profundo, como las usadas en los carros de golf, tienen la capacidad de descargarse y recargarse cientos de veces hasta en un 80% de su capacidad, lo cual las hace una buena opción para sistemas de energía renovable remotos, un ejemplo de este tipo de baterías se observa en la figura 2.12.



Figura 2.13 Batería (Acumulador) de ciclo profundo.

Para realizar la conexión entre las baterías primero se recomienda que todas sean iguales y que todas se enfrenten a la misma carga.

Las baterías pueden conectarse en serie o en paralelo, o en una combinación de ambas. Una conexión en serie implica el uso de un cable de batería para conectar la terminal positiva de una batería a la terminal negativa de otra. Una conexión en serie incrementa el voltaje, sumándose el voltaje de las baterías conectadas, pero la capacidad en ampere-horas no aumenta. Una conexión en paralelo involucra el uso de un cable de batería para conectar la terminal positiva de una batería con la terminal positiva de otra batería y un segundo cable de batería

para conectar la terminal negativa de una batería con la terminal negativa de otra batería. Una conexión en paralelo incrementa la capacidad en amperes-hora sumando las capacidades de las baterías conectadas, pero no se incrementa el voltaje. Para incrementar tanto el voltaje como la capacidad en amperes-hora, las baterías pueden conectarse en serie y en paralelo.

En las turbinas eólicas y paneles fotovoltaicos, mayor es la tensión de corriente continua para cargar las baterías y son menores las pérdidas de energía en los cables.

Las turbinas eólicas pequeñas generan energía eléctrica en corriente directa. En sistemas muy pequeños, las aplicaciones en corriente directa obtienen su energía directamente de la batería. Para hacer uso de aplicaciones normales en corriente alterna, se debe instalar un inversor para rectificar la corriente directa de las baterías a corriente alterna. Aunque este dispositivo disminuye ligeramente la eficiencia global del sistema, permite que la instalación eléctrica del hogar sea diseñada para sistemas de corriente alterna.

Por seguridad, las baterías deben ser instaladas en forma aislada de las áreas de convivencia y de equipos electrónicos debido a que contienen sustancias corrosivas o explosivas. Asimismo, las baterías de plomo-ácido requieren ser protegidas de temperaturas extremas.

2.7. Control de turbinas eólicas

El sistema comienza a generar cuando la velocidad del viento alcanza un umbral $V_{\text{cut-off}}$. Luego, la potencia se incrementa hasta que alcanza los valores nominales del viento (V_N) y de potencia (P_N). Este valor de viento depende del diseño del sistema y se elige normalmente entre 11 y 15 m/s. Entre la velocidad nominal y la de salida ($V_{\text{cut-off}}$), la turbina eólica produce la potencia nominal. Más allá de $V_{\text{cut-off}}$ la turbina no puede seguir produciendo por razones de seguridad. La potencia generada por la turbina debe ser regulada, al superar la velocidad de viento

nominal, pues la energía eólica para vientos superiores a ese nivel es mayor que la que puede soportar el sistema.

2.7.1. Control aerodinámico de la turbina.

Los métodos más comunes de regular la potencia son:

- a) El control del ángulo de la pala.

Este control es el más utilizado en medianas y grandes turbinas y consiste en realizar un ajuste en el ángulo de la incidencia del viento en las palas, lo que modifica el ángulo de ataque y la cantidad de potencia extraída por esta. Este control se realiza en concordancia con el valor medido de la velocidad del viento.

- b) El control del ángulo fijo de la pala.

Este control se lleva a cabo mediante el diseño adecuado del perfil de las palas. Cuando la velocidad del viento supera la velocidad nominal, el flujo de aire en el lado superior de la pala tiende a perder velocidad, lo que crea turbulencias, creando turbulencias, causando una pérdida de sustentación aerodinámica en la pala y con ello la disipación del exceso de potencia.

- c) El control activo del ángulo fijo.

Con este método las palas son orientadas para obtener el mejor aprovechamiento en vientos livianos, pero al alcanzar la velocidad nominal, las palas son orientadas del lado opuesto, obligando a entrar en la zona de pérdida de sustentación.

- d) El control de orientación.

Este método consiste en orientar a la turbina fuera de la dirección del viento para altas velocidades, conocido como control de orientación.

2.7.2 Control del sistema eléctrico.

Otra forma de regular la potencia producida es mediante el control de la velocidad de rotación de la turbina eólica.

El control es diseñado de alguna manera para encontrar el punto de máxima transferencia de potencia. Para lograr lo anterior se utilizan estructuras inteligentes principalmente sistemas programables como los microcontroladores y procesadores de señal digitales (DSP).

La variable de control utilizada comúnmente es el ciclo de trabajo de algún convertidor CD/CD de potencia, ya sea para imponer un cierto voltaje en las terminales del estator [7] o mediante la excitación del circuito de rotor [10]. También se pueden encontrar estructuras que regulan mediante el ángulo de disparo de un puente rectificador a tiristores. [4].

Pequeños sistemas eólicos sin regulación eléctrica y directamente conectados a bancos de baterías son también utilizados. Estos sistemas en lazo abierto son diseñados especialmente para que el conjunto turbina-generador-batería produzca la máxima energía sin el uso de control retroalimentado.

2.8. Potencia.

Otra forma de clasificar las turbinas es de acuerdo a la potencia como se aprecia en la figura 2.14, que en forma segura operan a cierta velocidad de viento, usualmente entre 24 mph (10.5 m/s) y 36 mph (16 m/s). La ecuación 2.2 ilustra los factores de importancia en el funcionamiento de una turbina eólica. Se tiene que resaltar que la velocidad del viento tiene un exponente a la tercera potencia. Esto significa que aun con un pequeño incremento de la velocidad del viento, la potencia disponible se incrementa en una forma mayor. Esta es una de las razones por las cuales, al incrementar la altura en la torre, se tiene acceso a mayores velocidades de viento. La potencia está dada por la ecuación 2.2.

$$P = 0.29 D^2 V_{ie}^3 \quad (2.2)$$

Dónde:

P = Potencia obtenida, W.

A = Área de barrido del rotor, $\pi \times D^2/4$ (D es el diámetro del rotor y $\pi=3.1416$)

V_{ie} = Velocidad del viento, m/s

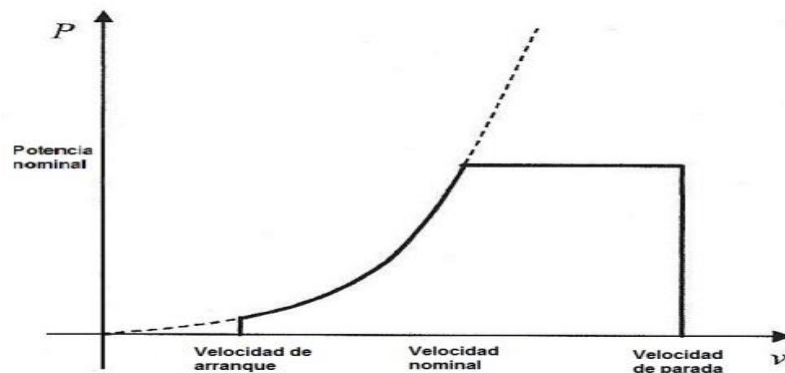


Figura 2.14 Curva de potencia típica de una turbina

2.9. Velocidad de giro de una turbina eólica.

La velocidad de giro de una turbina eólica se puede calcular con la ecuación

2.3:

$$n = (60 \cdot \text{TSR} \cdot v) / (\pi \cdot D) \quad (2.3)$$

Dónde:

n es el número de revoluciones por minuto [rpm]

TSR se llama velocidad específica. Este factor depende del tipo de eólica (rápida o

lenta). Puede tener un valor comprendido entre aprox. 0,9 y 14.
 v es la velocidad del viento en metros por segundo [m/s].
 D es el diámetro de la eólica en metros [m]

La velocidad específica (TSR) se define por la ecuación:

$$\text{TSR} = u_0/V_{ie} \quad (2.4)$$

Dónde:

u_0 es la velocidad (tangencial) de las puntas de las palas del rotor.

V_{ie} es la velocidad del viento, ambas expresadas en [m/s].

R es el radio del rotor.

En la figura 2.15 se observan estas condiciones.

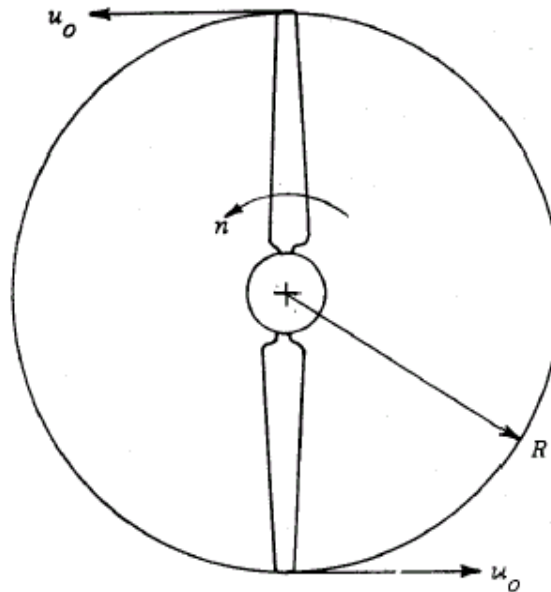


Figura 2.15 Velocidad u_0 de las puntas de las palas.

Reglas generales:

- A mayor diámetro, menor velocidad de giro

- Un mayor número de palas no aumenta necesariamente la velocidad de giro, pero sí el rendimiento de la turbina eólica.

Velocidades específicas (o TSR) para aerogeneradores horizontales:

a) Máquinas lentas

1. Tienen una velocidad específica entre 2 y 5.
2. Se caracterizan porque su velocidad de rotación es baja, por lo que tienen un gran número de palas (entre 12 y 14) que cubren casi toda la superficie del rotor.
3. Tienen un elevado par de arranque gracias al cual pueden ponerse en marcha incluso con velocidades de viento muy bajas.
4. Su velocidad de rotación hace que sean poco útiles para producir energía eléctrica por lo que se emplean fundamentalmente para el bombeo de agua.

b) Máquinas rápidas

1. Tienen una velocidad específica entre 8 y 10.
2. Su velocidad de rotación es elevada y el número de palas reducido (dos, tres o cuatro).
3. Su par de arranque es menor y necesitan que el viento tenga mayor velocidad para arrancarlas o bien disponer de algún medio auxiliar.
4. Son más ligeras, soportan menores esfuerzos y su conexión a la red eléctrica es más fácil.

2.10. CONTROL ELECTRÓNICO DE LOS ACUMULADORES

Los sistemas de potencia aislados que utilizan tecnología eólica y otras formas de energía renovable están emergiendo como opciones técnicamente confiables para suministro energético. Dichos sistemas son generalmente percibidos como más adecuados para la alimentación local de potencia en países en desarrollo, pero los desarrollos tecnológicos involucrados en éstos tienen un considerable potencial como elementos de generación distribuida para grandes redes de potencia del primer mundo. En el área de la electrificación rural existen, normalmente, dos

grandes métodos de suministro de energía: a) extensión de la red de potencia y b) uso de generadores diésel. En áreas remotas ambas opciones pueden ser excesivamente onerosas. Por lo cual, la inclusión de tecnologías renovables puede rebajar el costo de proveer de energía a dichas áreas, como consecuencia de la reducción de costos de operación actualizados. Los sistemas de potencia que utilizan múltiples fuentes de generación son mejor referidos como “sistemas de potencia híbridos”.

Estos pueden incorporar diferentes componentes como producción, almacenamiento, acondicionamiento de potencia y sistema de control para suministrar energía a una comunidad remota. La tecnología renovable puede conectarse ya sea a la barra CA o CD, según el tamaño y la configuración del sistema. Sistemas de potencia alimentando más de una casa o varios puntos normalmente suministran potencia AC, aunque algunas cargas pueden conectarse a la barra CD. Estos sistemas pueden suministrar desde unos pocos Kilowatt-hora (kWh) a varios Mega-Watt-hora (MWh) al día. Los sistemas que alimentan cargas pequeñas, del orden de algunos kWh al día, utilizan preferentemente solo la barra CD, mientras que para cargas más grandes se tiende a utilizar sistemas donde la barra CA es el punto de conexión principal. Recientes adelantos en los dominios de la electrónica de potencia y los sistemas de control, han permitido el desarrollo de dispositivos más pequeños conectados a la barra CA.

Cada dispositivo de producción CD incluye su propio convertidor de potencia con control integrado, lo que permite la coordinación de la producción. Cada configuración puede presentar variaciones considerables. En sistemas que se apoyan en una barra CD, el banco de baterías juega el rol de contenedor de potencia, suavizando las fluctuaciones de corto y largo plazo en el flujo de carga. La regulación es realizada casi por sí sola, basada en algunos parámetros específicos de la batería. Para sistemas CA la meta es lograr un balance de la producción energética, regulando el voltaje y la carga. Para lograr una señal eléctrica de voltaje y frecuencia estables, se utilizan diversas tecnologías avanzadas, que incluyen condensadores sincrónicos, mecanismos de almacenamiento, electrónica de

potencia y control. En algunos casos, pequeñas turbinas eólicas, tanto mecánicas como eléctricas de hasta 20 kW, son conectadas a los dispositivos de potencia (carga) directamente.

En zonas rurales en las cuales la red eléctrica no puede ser tendida debido a lo accidentado del terreno se han implementado sistemas híbridos de corriente directa para pequeñas comunidades. La mayor parte de estos sistemas tienen una estructura en la que la barra CD de la batería es el punto central de conexión. En general, pequeñas turbinas eólicas generan voltajes y corrientes CA de frecuencia variable que es rectificadas y aplicada a la barra CD. Luego, la energía es almacenada o reconvertida en CA (regulada) a través de un inversor para alimentar la carga.

El control de estos pequeños sistemas de potencia se realiza en función de la tensión de la batería. El generador eólico debe limitar su voltaje o desviar la potencia generada cuando la batería está completamente cargada y no puede aceptar más energía. El inversor y la carga deben desconectarse de manera de parar la descarga de la batería cuando el voltaje cae por debajo de un límite preconcebido. Ambas acciones implican un cuidadoso diseño del sistema, de manera de optimizar los recursos energéticos y obtener una cantidad mínima de energía no suministrada [17].

También se ha experimentado con sistemas híbridos CA en pequeñas comunidades, esta topología que utiliza componentes de generación CD o CA es viable dado los recientes avances en los convertidores y su control. Las distintas fuentes generadoras se conectan a la barra CA de distribución común a través de inversores dedicados. La ventaja primordial es la modularidad, pues permite la conexión o el reemplazo de módulos al necesitar energía adicional. Permite, además, la instalación de los componentes en cualquier lugar de la micro-red, lo que no es posible en el sistema con barra CD. Sin embargo, existen desventajas: su costo es elevado y necesita de tecnología sofisticada, lo que dificulta su aplicación en áreas remotas. Además, al almacenar la energía, ésta debe pasar desde el punto de generación a la barra CA y luego por el rectificador de la batería; eso implica que

en sistemas con cantidades importantes de almacenamiento, esta estructura tenga mayores pérdidas [17].

Se ha intentado el control de pequeños sistemas eólicos proponiendo y desarrollado mecanismos de control de potencia electrónico, que se basa en la inclusión de un devanado auxiliar, cuya función es conducir una corriente alterna controlada mediante interruptores electrónicos, en forma proporcional al exceso de frecuencia de rotación del generador.

El diseño se basa en un microcontrolador PIC, que se encarga de monitorear la frecuencia de la señal CA del generador, gracias a una etapa que acopla dicha señal a través de un transformador y luego digitalizada. El controlador puede “corregir” la frecuencia de rotación calculando la diferencia respecto del valor admisible para la operación segura del aerogenerador. Dicho control se basa en la corrección del tiempo de conducción del devanado auxiliar directamente proporcional al exceso de frecuencia en la señal CA del generador.

Como alternativa de parada de emergencia se ha realizado la adaptación de un freno de disco de bicicleta, cuyo control es ejercido por el controlador a través de un servomotor, de tal manera que se activa automáticamente al detectar situaciones críticas de operación del aerogenerador. Dichas situaciones críticas, incluyen el monitoreo de temperatura del estator, mediante la inclusión de un termistor en el devanado, que permite al microcontrolador determinar si existe un calentamiento excesivo que signifique riesgo de daño para los devanados. También la decisión de parada de emergencia, se activa como respuesta a un exceso de frecuencia, dado que en circunstancias extremas este valor es un indicador de una situación de operación crítica, originada por corrientes de viento fuerte o una operación en vacío.

Los resultados obtenidos en las pruebas en túnel de viento indican un efecto significativo en la curva de potencia en condiciones de control electrónico, en comparación de la curva obtenida con sólo control mecánico. En estas evaluaciones se ha observado una región plana de la curva de potencia entre los 7.9 m/s a 9 m/s, que corresponde a la curva “ideal” de potencia, y disminución del 25 % hasta los 12 m/s, en comparación con los valores obtenidos con el control mecánico [9].

En las pruebas de parada de emergencia, se realizaron pruebas a los 12 m/s, observándose que el mecanismo de freno detiene al aerogenerador en forma suave, sin efectos vibracionales significativos que representen algún riesgo para la estructura.

Por tanto, se ha logrado implementar un modelo de controlador electrónico que mejora la respuesta de la curva de potencia y toma decisiones en situaciones críticas para proteger el aerogenerador, mediante la parada de emergencia. Con funciones avanzadas, de control inteligente y alta flexibilidad, gracias a la incorporación de un microprograma, que permite configurar los diferentes parámetros de operación para adaptar la funcionalidad a diferentes modelos de aerogenerador [9].

2.11 INVERSOR

La necesidad de utilizar energía eléctrica en sitios alejados de las instalaciones de la red eléctrica pública es cada vez mayor y esta corriente se puede obtener de una batería sin embargo para utilizar aparatos electrodomésticos es indispensable que dicha corriente sea alterna y las baterías utilizan corriente continua es en esta situación cuando el inversor de corriente es de mucha utilidad para convertir la corriente directa de las baterías en corriente alterna para alimentar los aparatos electrodomésticos.

Un inversor es un convertidor estático de energía, que convierte la corriente continua (CD) en corriente alterna (CA), permitiendo alimentar una carga en su salida de corriente alterna, regulando la tensión y la frecuencia. Dicho de otro modo, un inversor transfiere potencia desde una fuente de corriente continua a una carga de corriente alterna.

Los inversores de potencia son utilizados en:

- a) Automóviles.
- b) Sistemas de alimentación ininterrumpida.
- c) Sistemas de corriente alterna que trabajan con una batería.

d) Energías alternativas (energía solar o eólica).

El inversor tiene como uno de sus componentes un transformador que tiene la capacidad de cambiar el nivel de voltaje y de corriente, mediante dos bobinas enrolladas alrededor de un centro común. El transformador solo puede conducir corriente alterna por lo que no se puede conectar una batería de corriente directa y esperar que salga el voltaje deseado del otro lado, es necesario convertir primero el voltaje CD en voltaje CA. Esto se logra conectando y desconectando la batería a gran velocidad para lograr obtener corriente alterna a la salida del transformador. El problema en este circuito es que no se pueden obtener semiciclos negativos, por esa razón aparece el transformador con TAP central o derivación central por la que llega la corriente positiva y el negativo es conmutado alternadamente hacia los extremos del transformador como se observa en la figura 2.16. Este sistema logra entregar a la salida una onda senoidal cuadrada completa con su semiciclo positivo y su semiciclo negativo. Ahora lo que se necesita es un dispositivo que realice el switcheo de forma automática y precisamente para ello se utilizan 2 transistores.

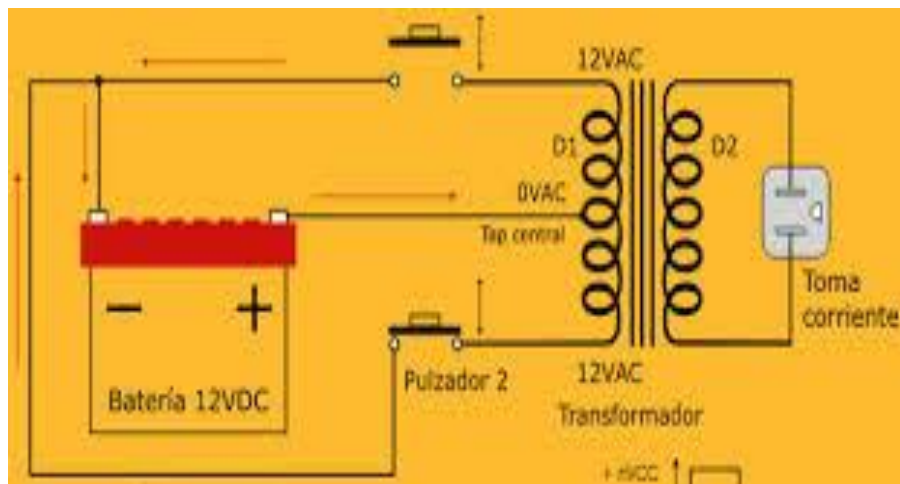


Figura 2.16 Transformador con TAP central

CAPÍTULO III

DISEÑO E

IMPLEMENTACIÓN DE LA

TURBINA EÓLICA

3.0 INTRODUCCIÓN

Para el inicio de este proyecto se debe encontrar los elementos que se utilizarán en la implementación del sistema eólico, es importante tener en consideración aspectos muy importantes para una realización y diseño adecuados del sistema, en primer lugar considerar la velocidad del viento, que sin este no se podría realizar este trabajo, el cual se origina debido al calentamiento de la superficie terrestre, mediante la ecuación de potencia se puede calcular la velocidad promedio anual de viento en el sitio donde se va a instalar.

Para la implementación del sistema eólico primero se consideró la viabilidad del viento como fuente de energía, se debe realizar un análisis para conocer sus características. Debido a que es un recurso variable y aleatorio se deben aplicar técnicas estadísticas para su análisis, en este proceso intervienen varios aspectos como la velocidad, dirección con su respectivo análisis estadístico, otros datos como temperatura, presión, humedad relativa, condiciones de turbulencia, factores de ráfaga, este tipo de mediciones representan una problemática debido a que se requiere realizar mediciones en tiempos que sean representativos y esto puede llevar varios años. Igualmente, importante es la consideración del terreno con los llamados efectos locales tales como la orografía, la rugosidad del terreno y obstáculos.

Debido a que este trabajo requiere que se lleve a cabo en poco tiempo estas consideraciones no se realizarán, solo mencionar que son importantes para decidir el sitio donde se colocara el sistema eólico.

3.1 DIAGRAMA DE BLOQUES

Una vez localizado el sitio en el cual se instalará el sistema, se seleccionó una turbina de eje horizontal debido a que son las que mejor rendimiento proporcionan

para este tipo de sistemas eólicos en comunidades rurales. El ensamble entre turbina y generador es una parte importante del diseño del sistema debido a que de este depende el adecuado funcionamiento del mismo. Los aspectos que se deben tener en cuenta para la turbina es el diseño, un diseño aerodinámico, el peso de las palas, que debe ser igual para proporcionar balance, que junto con el ángulo adecuado de separación entre las palas contribuye a que la turbina gire de forma uniforme y equilibrada evitando vibraciones que pueden ocasionar perdidas en el rendimiento del sistema.

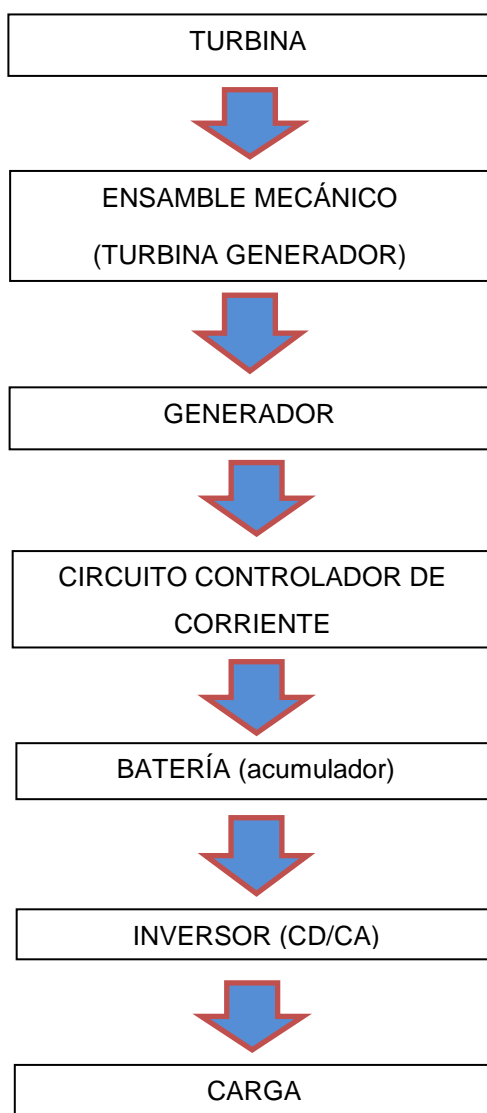


Figura 3.1 Diagrama de bloques

El diagrama a bloques indica los aspectos principales del diseño e implementación del sistema eólico, así como los aspectos más importantes para el buen funcionamiento del conjunto turbina-generador-batería (acumulador) -inversor-carga.

El ensamble mecánico entre la turbina y el generador es muy importante debido a que de este depende que la mayor cantidad de viento se pueda utilizar y convertir esta energía en energía eléctrica, así como el circuito de control que permite identificar cuando la batería está en su carga máxima y cuando está llegando a su descarga total, el circuito de control realiza la tarea de identificar el voltaje máximo de carga de la batería y desconectarla de la turbina para evitar que esta siga cargando y pueda sufrir daños graves. De la misma forma el circuito de control identifica cuando la batería está al 20 % de su carga total y conecta nuevamente la turbina para que esta siga alimentando a la batería y la descarga de esta no sea total ya que podría sufrir daños que acorten su vida útil.

3.2 ROTOR DEL SISTEMA EÓLICO

El diseño de los alabes o palas de los aerogeneradores se realiza buscando perfiles aerodinámicos de forma que las fuerzas de sustentación y de resistencia o arrastre sean adecuadas para que se optimice la extracción del viento y además se facilite la regulación y el control de la turbina eólica como se observa en la figura 3.2. El diseño de las palas depende del tipo de turbina que se requiera en este caso es una turbina a barlovento, es decir con el viento de frente al rotor, de eje horizontal dicha pala debe estar diseñada tomando en cuenta el borde de ataque y el borde de fuga del viento, como se muestra en la figura 3.3. El diseño de las palas utilizadas en este trabajo se implementó de un diseño ya existente y se observó su comportamiento haciendo algunos ajustes en las medidas de la cuerda, el diseño previo tenía 1.5 m de longitud en este caso como está hecho a escala se redujo a 35 cm conservando las proporciones, tomando la escala de 1:6, así como el redondeo



Figura 3.2 Elaboración de álabes de la turbina

de las puntas de las palas para ofrecer menos resistencia al aire en su movimiento de rotación (es la parte de la pala que más velocidad tangencial adquiere).

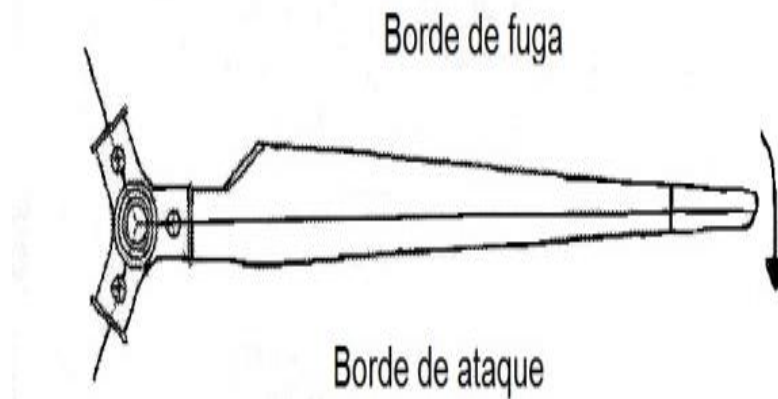


Figura 3.3 Pala de un aerogenerador de eje horizontal.

Se deben pesar las palas para comprobar que todas pesan lo mismo y de esa forma evitar una rotación dispar del rotor, además de evitar que vibre la turbina así mismo se verifico el ángulo de disposición de las aspas en el rotor siendo este 90° , ya que son 4 aspas entre 360° en el caso de la turbina de 3 aspas el ángulo debe ser de 120° .

Se tomó como base el diseño de la figura 3.4 para la construcción de las aspas del rotor conservando las proporciones de la longitud y el ancho del aspa y se lijo el borde de ataque del aspa tratando de que el grosor fuera de $1/3$ del grosor original, para pequeñas turbinas se recomienda que sea de menos de 5 cm, como se aprecia en la figura 3.4.

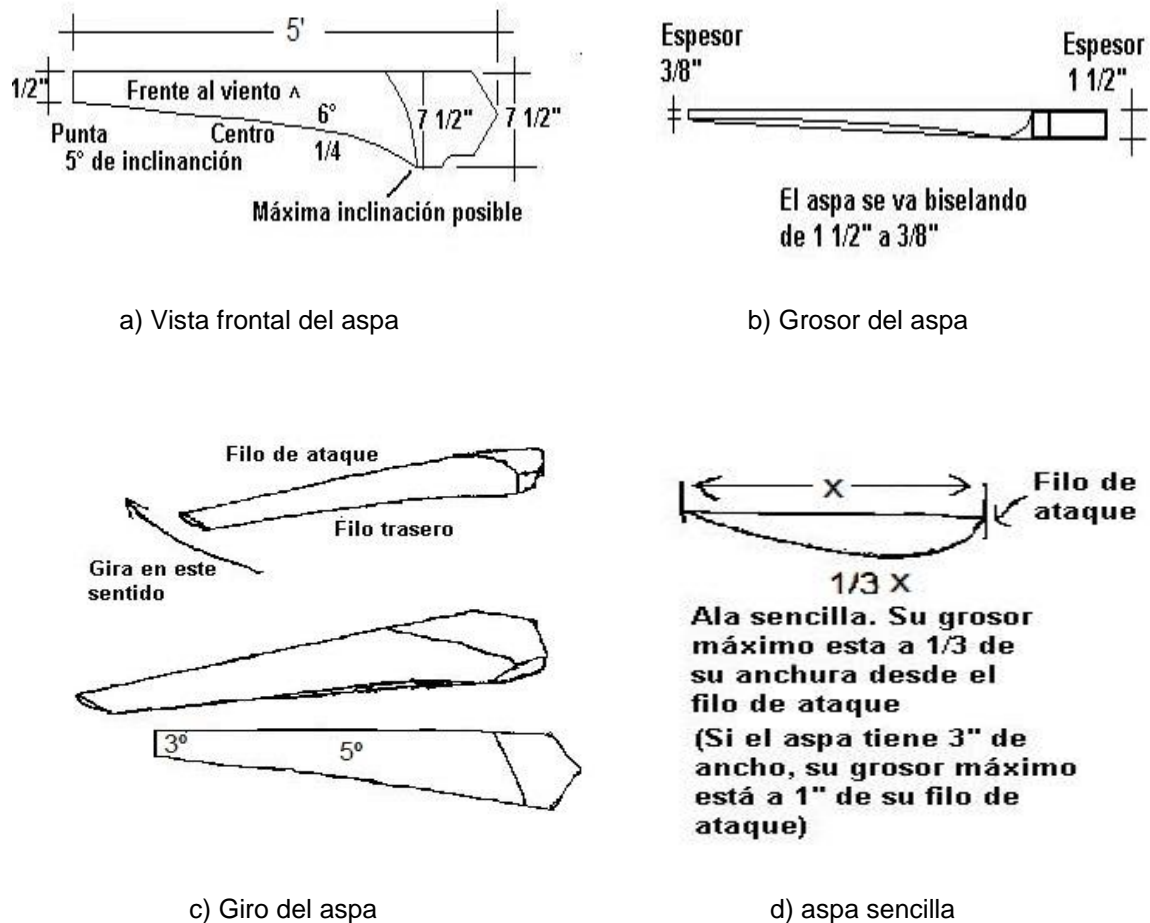


Figura 3.4 Diseño tomado como base de las aspas.

Al diseñar una pala se debe tener en cuenta la velocidad de giro de la punta la llamada velocidad específica de la turbina o Tip Speed Ratio (TSR), es la relación entre lo rápido que girara la punta de las aspas y la velocidad nominal del viento. Altos TSR significan más velocidad en el extremo de la pala con un par de arranque menor y la turbina tiene menos palas, bajos TSR inferiores a la unidad necesitan un

par de arranque mayor y presenta más aspas. Corresponden a turbinas destinadas al bombeo de agua y que se denominan máquinas lentas. Es bueno un TSR alto, pero no hasta el punto de que la máquina sea ruidosa y sometida a tensiones. Las aspas de los molinos de viento se construyen en madera, incluso ahora se siguen elaborando aspas para turbinas eólicas de madera, en este trabajo se utilizó tubería de cloruro de polivinilo o PVC, debido a que presenta buena resistencia al aire y además es flexible de forma que le permite acomodarse al tipo de viento que se presente.

A continuación, en la figura 3.5 se presenta la construcción de las aspas de una turbina eólica.

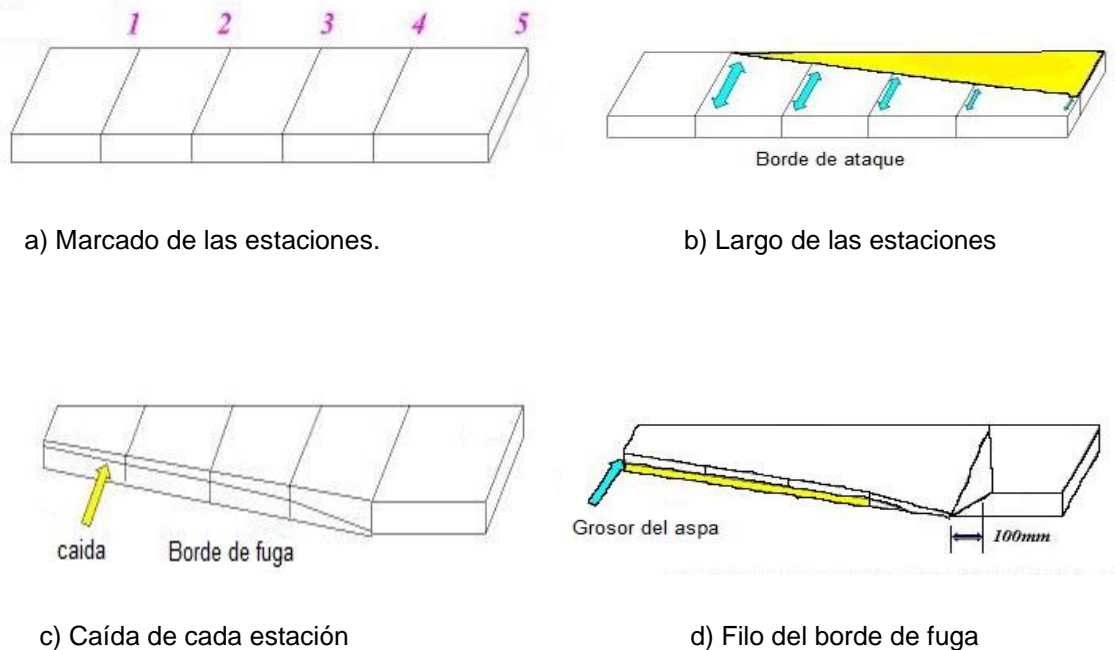


Figura 3.5. Estaciones de la pala

El primer paso es el marcado de las estaciones cuyas dimensiones se determinan tomando en cuenta el largo del aspa y se dividen en 5 estaciones dejando la primera estación un poco más larga que las demás, se determina el largo de las estaciones y

se procede a cortar en ángulo y por último se saca el “filo” al borde de ataque el cual ayuda a que la oposición del viento sea menor y el aspa adquiera mayor velocidad.

Se tomó la forma de las aspas de la figura 3.6 que se presenta a continuación.

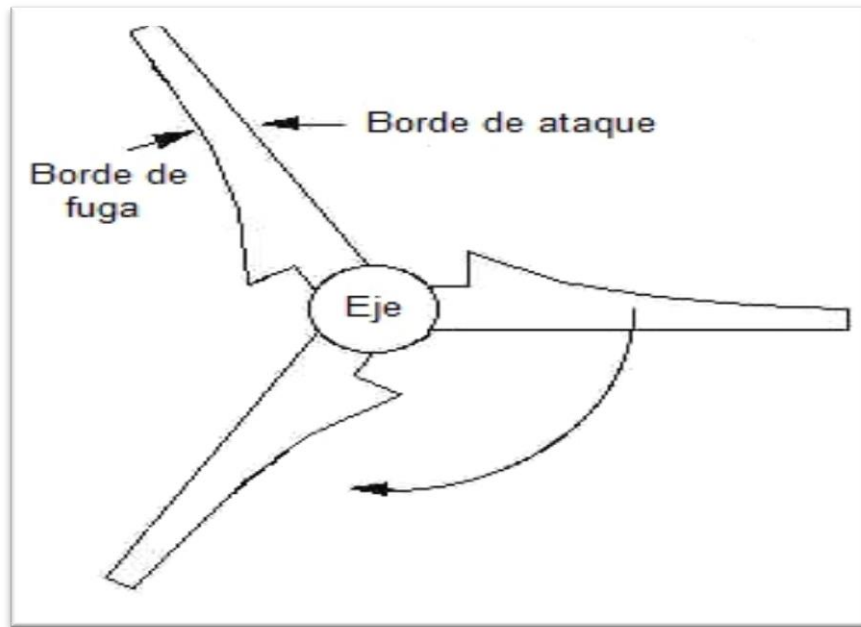


Figura 3.6 Vista frontal de las aspas.

Además, se realizó una modificación en el aspa del rotor de 4 palas dándole una pequeña curvatura debido a la circunferencia del tubo en el extremo derecho de la misma como se observa en la figura 3.6, para provocar que el giro del rotor sea en ese sentido debido a que cuando el buje del generador gira hacia la derecha es cuando se produce la corriente en el sentido contrario no produce corriente.

Las aspas se fijaron al rotor mediante tornillos y remaches el rotor es de PBC y tiene una longitud de 35 cm, dando una circunferencia total de 72 cm. Ya construido el rotor se acoplo al eje de rotación del pequeño generador como se observa en la figura 3.7.



Figura 3.7 Rotor de 4 aspas.

Otro aspecto a considerar es el número de palas que se implementa en el rotor, se tenía planificado que fueran tres palas pero al realizar las pruebas ya con el viento encontré que el rotor de 3 palas necesitaba más energía para iniciar el giro, un viento de alrededor de 4 a 5 m/s y que un rotor con 4 palas y un diseño distinto necesitaba menor cantidad de viento, alrededor de 3.4 a 4 m/s para iniciar el giro, debo resaltar que la intensidad luminosa lograda en el rotor de tres palas al conectar un LED (diodo emisor de luz) es mayor con el rotor con tres palas como el de la figura 3.8, debido a que el rotor es más ligero y logra una mayor velocidad de giro.



Figura 3.8 Rotor de 3 aspas.

¿Cómo se debe elegir la altura del buje con respecto al viento? conviene situar el rotor a la mayor altura posible ya que a mayor altura mayor velocidad del viento

además es más uniforme, también se logra disminuir la turbulencia que se produce cerca del suelo. La altura del buje suele ser de 0.5 a 1.5 m mayor que la altura de la torre, se puede construir de diferentes formas, utilizando distintos materiales como tubos y usando cables para dar estabilidad a la torre. La altura del buje se relaciona con el diámetro del rotor según la siguiente expresión:

$$h = X + 0.75D \quad (3.1)$$

Dónde:

h = altura del buje en metros.

X = varía su valor de 9m a 20m según las necesidades del sistema.

D = Diámetro del rotor en metros.

Como se presenta un prototipo la altura del buje se tomará de forma que se pueda demostrar su funcionamiento dentro de un espacio cerrado que se consideró de 160 a 180 cm de altura. La torre que se construyó es un tubo de hierro de $\frac{3}{4}$ de pulgada con una longitud de 90 cm que se fijó sobre una tabla de madera en la que se fijó la turbina.

Otro aspecto importante es el cálculo de la potencia nominal con respecto al diámetro del rotor. La potencia nominal del rotor de un aerogenerador sería directamente proporcional al cuadrado de su diámetro, si la velocidad del viento fuese la misma en toda el área del barrido del rotor.

3.3 GENERADOR DE IMANES PERMANENTES MABUCHI rs-555sh

La elección del tipo de generador se realizó con base en el criterio del tipo de sistema eólico que se requiere para producción de electricidad a pequeña escala en zonas no urbanas y para casa habitación y el generador adecuado para esta función es un generador de imanes permanentes los cuales se utilizan con rotores eólicos a

velocidad variable, también tienen la ventaja de que no se necesitan multiplicadores de velocidad.

El generador implementado para este trabajo es un generador pequeño síncrono de imanes permanentes tomado de una impresora de punto HP, es un generador Mabuchi RS-555SH con un rango de 9.6 a 30 volts, siendo el voltaje nominal de 21 volts y una salida aproximada de 3W a 65W y una corriente de 1.27 A como se puede ver en el anexo 1.

3.4 ACUMULADOR RECARGABLE

En la siguiente etapa se realizó la conexión de la batería con el circuito, se utilizó una batería de 12 V a 12 A con ácido del tipo recargable como la que se muestra en la figura 3.9, se debe mencionar que el manejo de este tipo de baterías se debe realizar utilizando guantes como lo recomienda el fabricante.



Figura 3.9 Batería (Acumulador) de 12 V y 12 A recargable.

3.5 CIRCUITO CONTROLADOR/INVERSOR

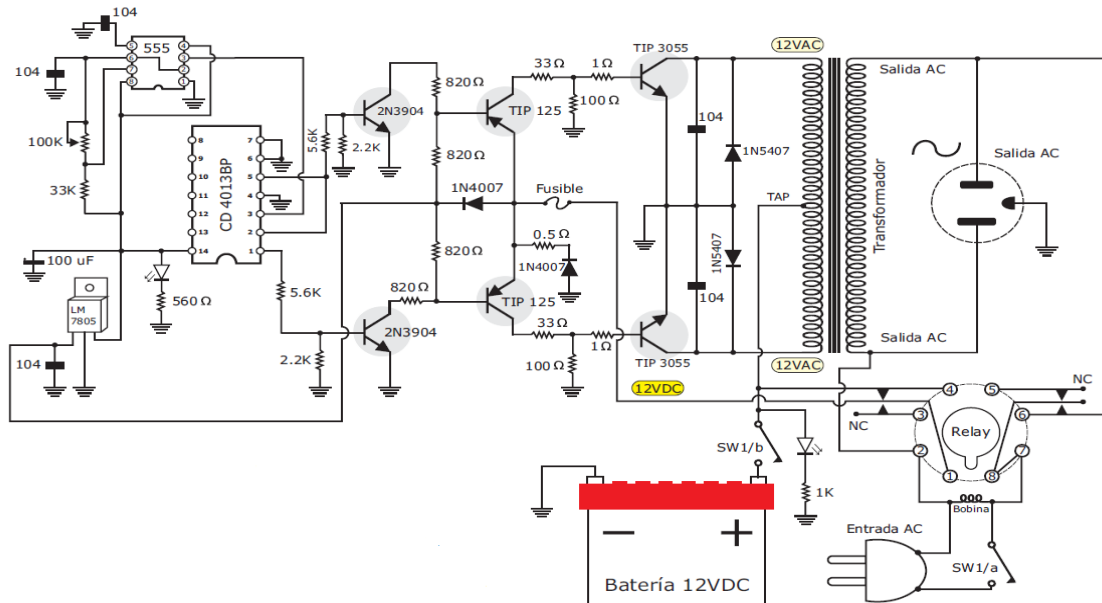
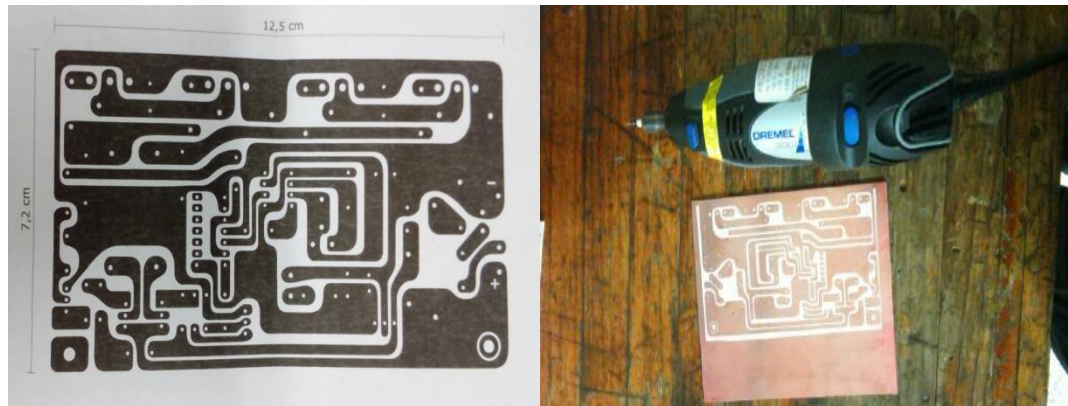


Figura 3.10 Circuito inversor CD/AC

En la figura 3.10 se muestra el circuito inversor que se utilizó para realizar la inversión de corriente continua proveniente de la batería en corriente alterna que después será utilizada para los aparatos electrodomésticos, en el esquema se observan los componentes del circuito. El funcionamiento del circuito inicia cuando del 555 se envía una corriente que excita al integrado CD 4013, que es un flip-flop doble, el 4013 genera una onda cuadrada que es recibida por los transistores 2N3904 los cuales a su vez envían una corriente a los TIP 125 que a su vez excitan la base de los transistores de potencia TIP 3055 que hacen oscilar los extremos del devanado primario del transformador y como el TAP central del transformador está conectado a tierra se convierte la corriente de directa a alterna para poder ser entregada al secundario y de ahí a los aparatos electrodomésticos.

Se implementó un inversor de CD a CA, el circuito fue elaborado con el método del planchado y en modo espejo como se aprecia en la figura 3.11.

Este circuito tiene la característica de cargar la batería mientras la turbina está trabajando y mediante un relevador se impide que la batería funcione, cuando la turbina no tiene el suficiente viento para trabajar, en ese momento el relevador



a)

b)

Figura 3.11. Circuito impreso (PCB), a) En modo espejo para imprimir con la técnica de Planchado, b) Circuito en tabla fenólica.

conecta la batería para que esta suministre energía a la carga en una casa habitación, en la figura 3.12 se muestra el circuito inversor funcionando.

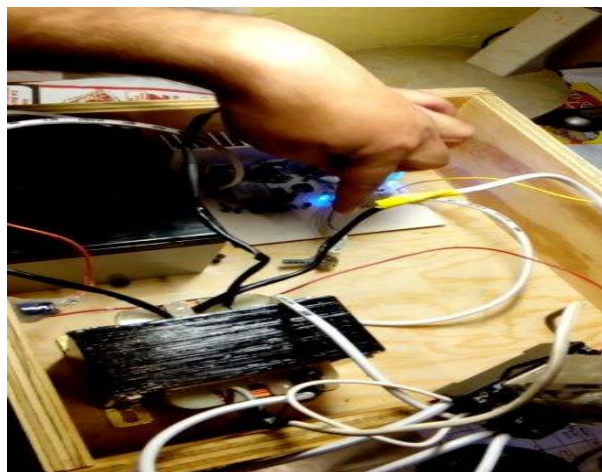


Figura 3.12 Inversor en funcionamiento.

Se utilizó un transformador que trabaja a 2 A en la entrada y entrega 10 A a la salida, la forma de construirlo es empleando un núcleo metálico y como su función es la de aumentar el voltaje y no reducirlo se construyen de forma inversa que los transformadores convencionales. Primero se elabora el devanado secundario que en este caso será el primario, el voltaje de entrada es de 12X12 V que equivale a 24 V con TAP central de acuerdo a la tabla AWG (ver anexo II). El devanado secundario se construyó para que entregara 110 V, con una salida de 240 W, es decir 12X12 V a 10 A, en la figura 3.13 se muestra el transformador. Se calculó con la ecuación 3.2 de la siguiente manera:

$$P = V \times I \quad (3.2)$$

Dónde:

$$V = 24 \text{ V}$$

$$I = 10 \text{ A}$$

$$P = (24 \text{ V}) \times (10 \text{ A}) = 240 \text{ W}$$



Figura 3.13 Transformador a 240 W.

Se utilizó un relevador de 120 V para la bobina de CD y 250 V CA a 10 A. El circuito con relevador se muestra en la figura 3.14.



Figura 3.14 Circuito con relevador.

3.6 REGULADOR DE CARGA Y DESCARGA DE LA BATERÍA

Los reguladores de carga son dispositivos electrónicos cuya función es proteger las baterías, de qué forma se realiza esta función, en primer lugar, se debe evitar que las baterías se descarguen a más del 20% de su capacidad (en algunos textos se recomienda que no sea de más del 10%), y con ello se acorte su vida útil y la otra es evitar que las baterías se sobrecarguen provocando sobrecalentamiento e incluso que exploten.

El funcionamiento es muy sencillo el regulador controla constantemente la tensión de la batería, cuando esta llega al máximo de su capacidad el regulador interrumpe el proceso de carga evitando daños, el circuito utilizado se muestra en la figura 3.15, donde se utiliza un relevador de automóvil.

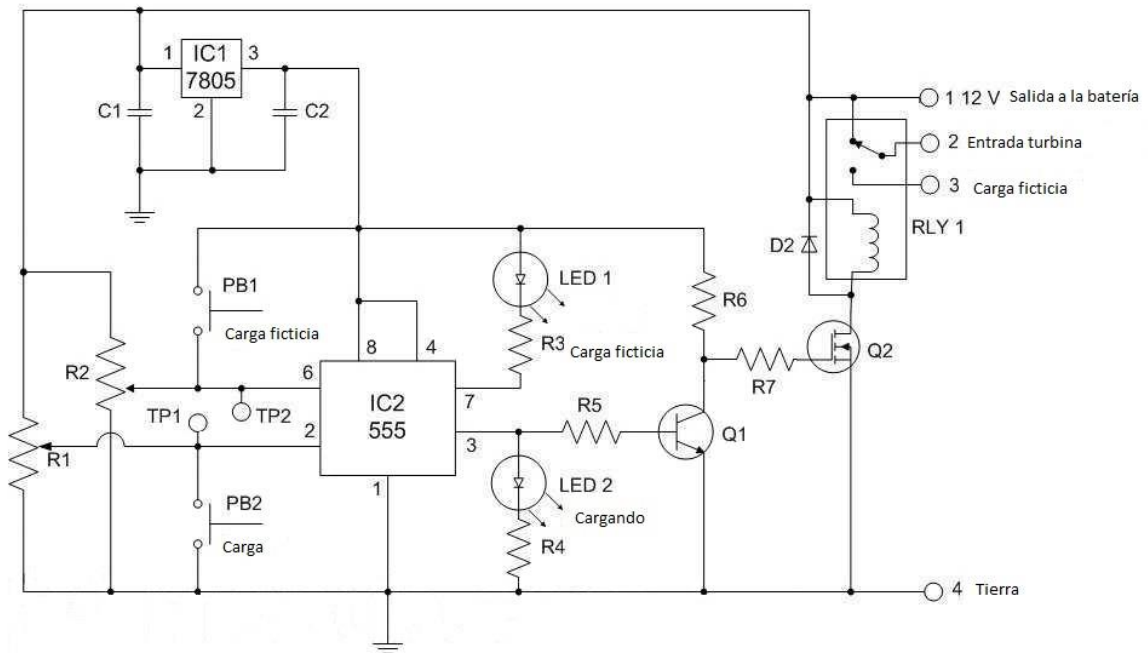


Figura 3.15 circuito control de carga y descarga.

En la etapa de descarga también se requiere el regulador para evitar que las baterías se queden sin energía y por lo general se fija una tensión del 20% de la carga total de la batería.

Los valores de tensión utilizados comúnmente para una batería de 12 V son de 14.9 V para la carga y de 11.9 V para la descarga, aunque en ocasiones se considera de 10.5 V en la descarga siendo este valor poco recomendado porque podría causar daños en la batería.

3.7 SISTEMA EÓLICO COMPLETO

En el último paso se realizó la conexión de la turbina con el circuito inversor para observar su funcionamiento y establecer cuál es la corriente y voltajes finales para el funcionamiento del sistema en su conjunto.

También se analiza la velocidad de arranque de la turbina, la velocidad en que se comienza a generar corriente eléctrica, la máxima velocidad que soportan las aspas, tiempo de carga y descarga de la batería (acumulador) y el funcionamiento adecuado del regulador de carga de la batería como se observa en la figura 3.16.

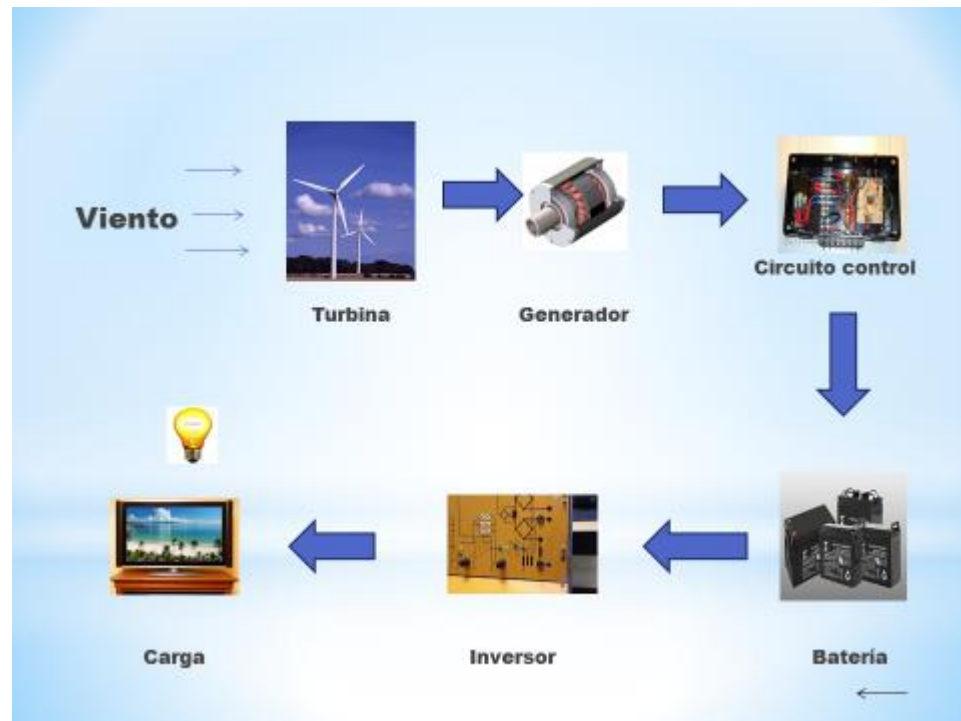


Figura 3.16 Sistema eólico completo

CAPÍTULO IV

PRUEBAS Y

RESULTADOS

4.1. Funcionamiento del inversor

En la figura 4.1 se muestra el conjunto de inversor y batería funcionando de forma adecuada, teniendo como carga un televisor de 19 pulgadas donde se observó que el funcionamiento fue el esperado y que el ajuste de la frecuencia a 60Hz se realizó de forma correcta.



Figura 4.1 Inversor con carga.

En las pruebas previas los transistores TIP 3055 se quemaron por un arco producido con el disipador de aluminio debido a que no se aislaron de forma adecuada quedando como se muestra en la figura 4.2.

Se tomaron mayores precauciones para su aislamiento y se sustituyeron por otros transistores nuevos solucionándose el problema.

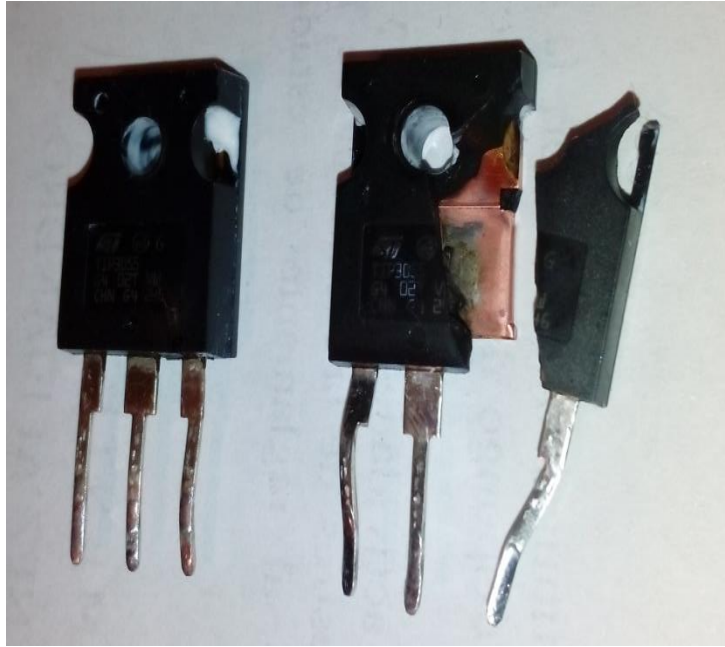


Figura 4.2 Transistores TIP 3055 dañados.

También se tuvieron problemas con el relevador del que se quemó la bobina y se procedió a sustituirlo por uno manual que a su vez fue sustituido por otro que realiza el relevo de forma automática.

Después de solucionar los problemas que se presentaron se procedió a medir con el multímetro la salida de voltaje siendo este de 129 volts, como se observa en la figura 4.3, que era el voltaje esperado. De la misma forma se midió la frecuencia de salida, esta se ajusto con un potenciómetro el cual sustituyo a un reostato que originalmente se iba a utilizar pero que no ofrecia los resultados esperados, esta medición es muy importante ya que los aparatos electrodomésticos en nuestro país funcionan a una frecuencia de 64 Hz como se aprecia en la figura 4.4 .

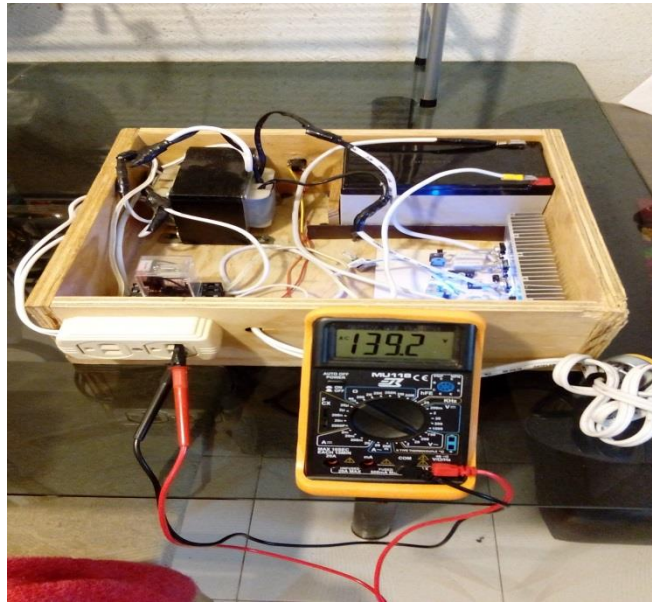


Figura 4.3 voltaje de salida del inversor.

Se verificó el funcionamiento del relevador cuando la producción de corriente por parte de la turbina no era suficiente y en ese momento el relevador cambiaba para que la batería entrara en funcionamiento, para estas pruebas se conecto el inversor a la red eléctrica y el funcionamiento fue el esperado.

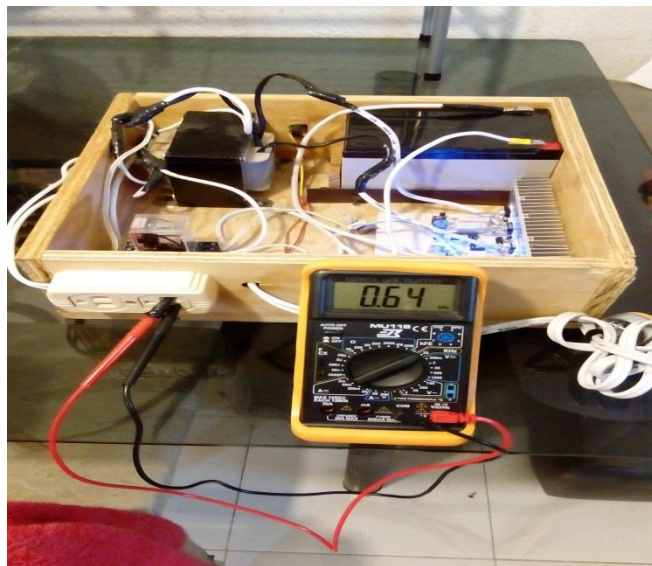


Figura 4.4 Frecuencia obtenida a la salida del inversor.

La turbina a escala no produce la corriente necesaria para encender los aparatos electrodomésticos o un foco pequeño. Los cálculos se realizaron con la turbina a escala y después se dará un valor aproximado ya con el aumento en las proporciones conforme a la razón de la escala trabajada.

4.2 FUNCIONAMIENTO DEL REGULADOR DEL ACUMULADOR

Para el adecuado funcionamiento del regulador se calibró la carga máxima en 14.9 V. Para ello se ajustó el voltaje mediante una resistencia variable, en este paso se presentaron algunos problemas, el procedimiento consistió en elevar el voltaje mediante una fuente externa a 14.9 V y con una de las resistencias variables se ajustó el voltaje en un punto de prueba en 3.33 V, como se observa en la figura 4.5, con el propósito de que cuando la carga de la batería llegue al voltaje máximo el relevador desvie la corriente generada hacia una carga ficticia y con ello se impide que la batería se dañe.

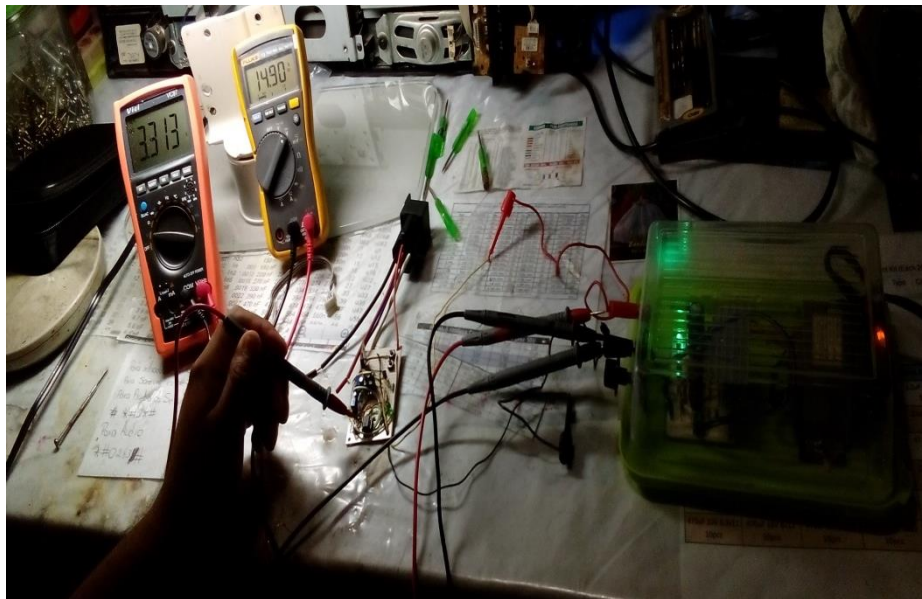


Figura 4.5 Calibración de carga máxima de la batería

Para la carga mínima se procedio de la misma forma que para la carga máxima. Se fijo la carga mínima de la batería en 11.9 V y se ajusto con una resistencia variable en un punto de prueba dejando el voltaje en 1.67 V, como se observa en la figura 4.6.

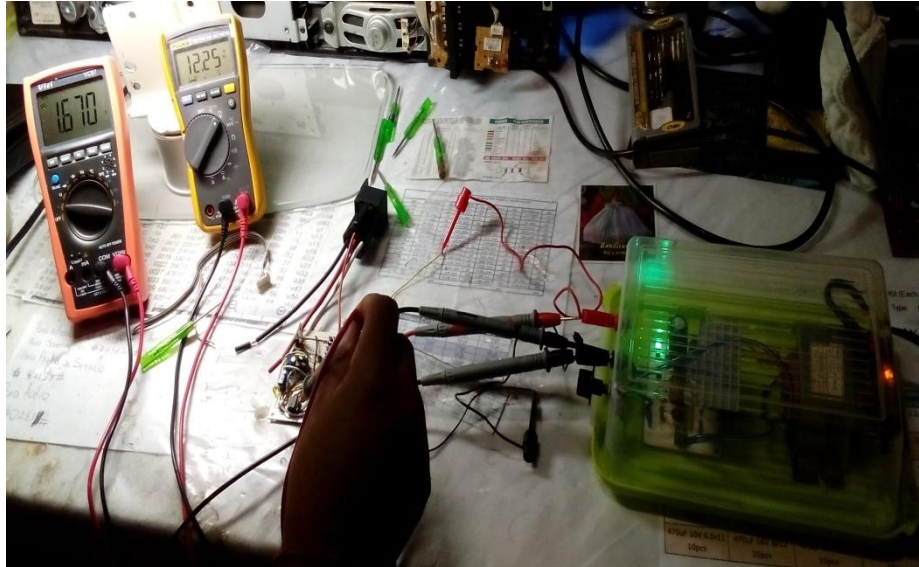


Figura 4.6 Calibración de carga mínima de la batería.

Después de realizar este procedimiento encuentre que no resultaban los voltajes deseados y tuve que realizar el ajuste por ensayo y error hasta que quedo muy aproximado el voltaje a las cargas máxima y mínima antes mencionadas, además de realizar un aumento progresivo en el voltaje desde la carga mínima hasta la máxima comprobando que el relevador realizaba su función de forma aceptable

4.3 Cálculo del GAE

El GAE que se puede obtener de un sistema eólico de este tipo se calcula de la siguiente forma:

Si tenemos un promedio anual de 12m/s de viento y el diámetro del rotor es de 0.72 m se realizan las conversiones a millas por hora para el viento y pies para el diámetro del rotor quedando asi:

$$12 \text{ m/s} = 26.84 \text{ mph}$$

$$0.72 \text{ m} = 2.3622 \text{ pies}$$

$$\text{GAE} = 0.01328 D^2 V^3$$

Sustituyendo tenemos

$$\text{GAE} = (0.01328)(2.3622 \text{ pies}^2)(29.84 \text{ mph}^3)$$

$$\text{GAE} = 1.97\text{K Wh}$$

Otro aspecto importante es la relación entre la potencia nominal y el diámetro del rotor, este aspecto se ilustra mejor en la figura 4.7, donde se representa esta relación para distintos tamaños de rotor.

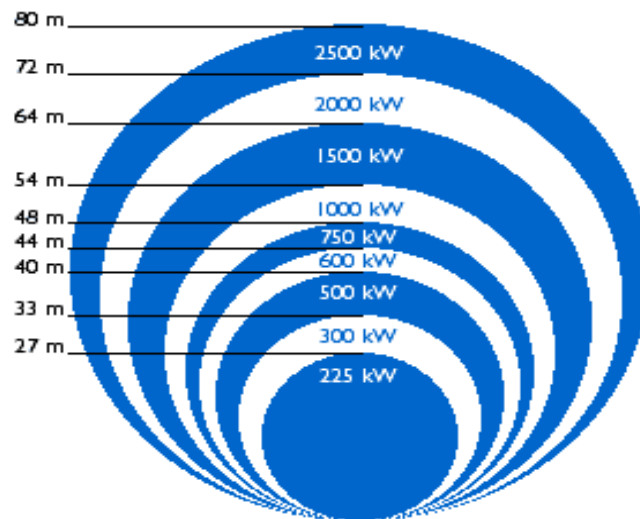


Figura 4.7 relación entre potencia nominal y diámetro del rotor.

4.4 Cálculo de la potencia

Para obtener la potencia disponible del sistema se deben realizar los siguientes cálculos:

$$P = 0.29 D^2 V_{ie}^3 \quad (4.1)$$

Sustituimos los siguientes valores

$$D = 0.72 \text{ m}$$

$$V_{ie} = 8 \text{ m/s}$$

$$P = (0.29) (0.72 \text{ m})^2 (8 \text{ m/s})^3$$

$$P = 76.97 \text{ W}$$

Para un diámetro de rotor mayor, de 4 m tenemos:

$$P = 2375.68 \text{ W}$$

Y para una velocidad del viento de 8 m/s y un rotor de 4 m tenemos:

$$P = 2.375 \text{ KW}$$

4.5 Energía máxima

La máxima energía que podemos obtener se calcula de la siguiente forma:

$$E_{\max} = P T \quad (4.2)$$

Donde :

E_{\max} = Energía máxima.

P = potencia.

T = tiempo durante el cual el viento sopla a determinada velocidad.

Para el rotor del prototipo y teniendo en cuenta la potencia obtenida y tiempo de duracion en que sopla el viento a 8 m/s de 45 minutos, el valor de la energía máxima se obtiene de la siguiente forma:

Sustituyendo los valores obtenidos tenemos:

$$P = 2.375 \text{ KW}$$

$$T = 0.45 \text{ H}$$

$$E_{\max} = (2.375 \text{ KW}) (0.45 \text{ h}) = 1.068 \text{ KWh}$$

El valor obtenido es para un rotor ideal en el cual no se tienen perdidas.

Otras mediciones importantes para la implementacion del aerogenerador es conocer la disponibilidad de viento en el lugar donde se quiere instalar el sistema, ademas se debe conocer las velocidades de arranque, de produccion de energia, velocidad nominal y velocidad de parada de la turbina eólica, tambien son importantes los tiempos de carga y descarga de las baterias para saber de cuanto tiempo de energía electrica podemos disponer.

Las mediciones de la velocidad del viento se realizaron con un anemómetro digital portatil.

Los tiempos de carga se realizarón utilizando una batería de 12 V 12Ah con un voltaje de entrada de 117 V y los tiempos de descarga se realizaron con la misma batería teniendo como carga una radiograbadora y dos focos de 30 W y 13 W respectivamente obteniendo los resultados que se muestran en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 Otras medidas importantes

Velocidad del viento	
De arranque	3.5 m/s
De generacion de energía eléctrica	4.7 m/s
Potencia nominal	8.5 m/s
Características eléctricas	
Voltaje en el generador	6 V
Corriente en el generador a 8.5 m/s	0.3 A
Tiempos de carga y descarga	
Tiempo de carga de la batería	13.36 V al inicio
	14.5 V 11 horas después
Tiempo de descarga	12.3 V al inicio
	11.5 V 2 horas después

CONCLUSIONES

Para obtener el mejor rendimiento de un aerogenerador se debe considerar el recurso más importante que es la disponibilidad del viento teniendo como parámetro la velocidad del mismo que deberá ser en promedio de 4.5 m/s a 5 m/s para poder generar electricidad, además de la altura de la torre que se recomienda sea de más de 9 m.

La instalación de aerogeneradores en lugares alejados de la red eléctrica es una buena opción para satisfacer las necesidades básicas, como la iluminación, de una casa habitación y si se combina con el reciclaje de materiales para su construcción esto disminuye la inversión inicial.

La selección técnica de los elementos debe realizarse de acuerdo a las necesidades que requiere una casa habitación, y el lugar donde se decida instalar el aerogenerador, teniendo en cuenta que se pueden cambiar algunos elementos para aumentar la capacidad de producción del sistema, como la dimensión de las aspas y el generador de imanes permanentes por otro de mayor generación de corriente y así alimentar un mayor número de aparatos electrodomésticos.

El circuito inversor se realizó de forma adecuada y su funcionamiento fue el esperado obteniéndose los parámetros de funcionamiento previstos para utilizarlo en aparatos electrodomésticos.

El circuito de carga y descarga es un factor importante por ello se debe tener cuidado al momento de calibrar los voltajes de carga y descarga de las baterías debido a que no se deben descargar más del 20 %, esto previniendo que no se tenga disponibilidad de viento durante la noche y las baterías no se encuentren a su capacidad total con lo que no se dispondría de la energía necesaria para las necesidades más elementales como la iluminación.

Para obtener un mejor rendimiento en el aprovechamiento de los recursos disponibles y satisfacer las necesidades de una casa habitación se puede implementar un sistema híbrido, es decir, un sistema eólico y un sistema fotovoltaico, de esta forma cuando la disponibilidad de aire no sea la adecuada los paneles solares cubrirían el requerimiento de energía y al contrario cuando la disponibilidad de energía solar no sea suficiente el sistema eólico complementaría el gasto energético.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- [1] Ackermann, T. (2005). Wind Power in Power Systems, John Wiley&Sons, England.
- [2] Balance Nacional de Energía (2007).
- [3] Banco Mundial, (2008). Study of Equipment Prices in the Power Sector.
- [4] Borowy, B.S. and Salameh, Z.M. (1997). "Dynamic Response of a Stand-Alone Wind Conversion System with Battery Energy Storage to a Wind Gust", IEEE Trans. on Energy Conversion, 12(1) 73-78.
- [5] CEPAL y CEMARNAT, (2004). Evaluación de las externalidades ambientales de la generación termoeléctrica en México.
- [6] Chen, Z. and Blaabjerg, F. (2006). "Wind Energy- The world's Fastest Growing Energy Source", IEEE Power Electronics Society Newsletter, 3, 15-18.
- [7] De Broe, A.M., Drouillet, S. and V. Gevorgian, (1999). "A Peak Power Tracker for Small Wind Turbines in Battery Charging Applications", IEEE Trans. on Energy Conversion, 14(4), 1630-1635.
- [8] ENACC (Estrategia Nacional de Cambio Climático), (2007), Comisión intersecretarial del Cambio Climático.
- [9] Energy Source", IEEE Power Electronics Society Newsletter, 3, 15-18. García Roque, F. (2013). II Simposio Internacional de Energía Eólica de Pequeña Escala: "Aportes en el desarrollo energético para América Latina"/ Jean Velásquez. — Lima: Soluciones Prácticas; p.73: il.
- [10] Ermis, M., Ertan, H.B., Akpinar, E. and Ulgut, F. (1992). "Autonomous wind energy conversion system with a simple controller for maximum power transfer", IEE Proceedings-B, 139(5), 421- 428.

- [11] Gutiérrez Vera, Jorge. (2001). Energía renovable en el siglo XXI. Monterrey, México: Senado de la república.
- [12] GWEC (Global Wind Energy Council), (2009). "US an China in race to the top of global wind industry". (Boletín de prensa, 2 de febrero del 2009).
- [13] Hau, E. (2006). Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics, Springer, Germany.
- [14] IEA, 2008. Key World Energy Statistics (2008).
- [15] INEGI, (2008). II Censo de población y vivienda 2005. Resultados definitivos. Tabulados básicos.
- [16] Knight A.M. and Peters, G.E. (2005). "Simple Wind Energy Controller for an Expanded Operating Range", IEEE Trans. on Energy Conversion, 20(2), 459-466.
- [17] López, M., Vannier, J., Sadarnac, D. (2007). "Sistemas de conversión de energía eólica de control y diseño". Artículo invitado. Temuco, Chile.
- [18] Mathew, S. (2006). Wind Energy: Fundamentals, Resources Analysis and Economics, Springer, Germany.
- [19] NREL (National Renewable Energy Laboratory), (2009). Mapas eólicos.
- [20] Savant jr, C. J. "Diseño electrónico, circuitos y sistemas". (1992). ADDISON-WESLWY IBEROAMERICANA, segunda edición. pp 24-27.
- [21] Villarrubia Lopez, Miguel." Ingeniería de la Energía Eólica". (2013). Alfaomega, primera edición. pp 126-143.
- [22] Worldwatch Institute, (2008). Green Jobs: Towards decent work in a sustainable, low-carbon world. Informe preparado para el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.
- [23]http://apps2.eere.energy.gov/wind/windexchange/pdfs/small_wind/small_wind_guide_spanish.pdf.

REFERENCIA ELECTRÓNICA

[24] WWW.compucanjes.com/manuales.

[25] [WWW. Todoproductividad.blogspot.mx](http://WWW.Todoproductividad.blogspot.mx).

[26] WWW.amdee.org

[27] Comohacer.eu

[28] <http://ciencia.nasa.gov>

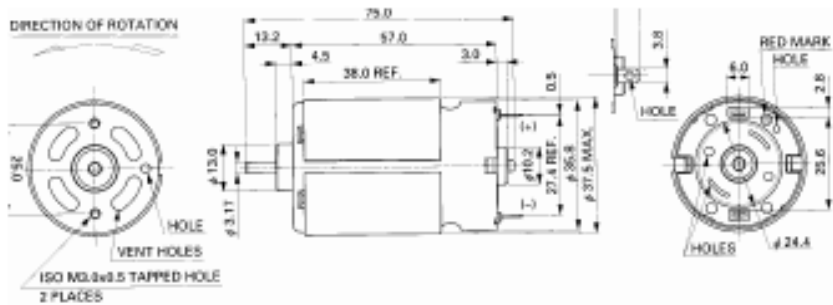
[29] <http://nationalgeographic.es>

ANEXO I

GENERADOR DE IMANES PERMANENTES

MABUCHI BRUSHED DC MOTOR MODEL RS-555SH

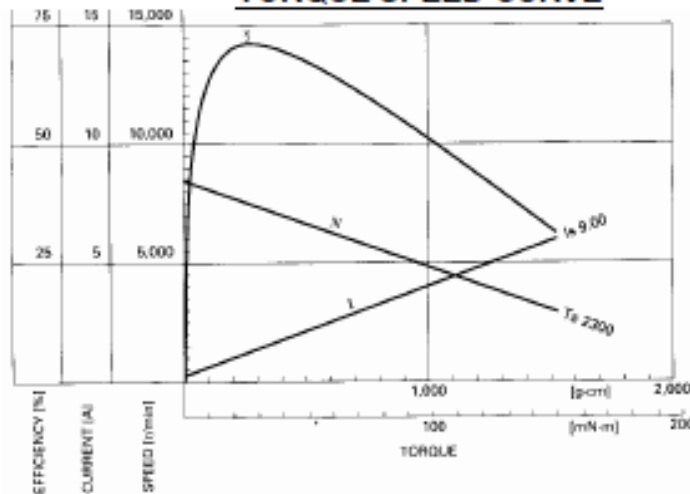
- Round, carbon brushed dc motor
- Incorporating an anisotropic magnet
- Output approximately 3.0W-65W
- Suitable for various applications including office equipment and automotive products
- Weight approximately 215g



MODEL	VOLTAGE		NO LOAD		AT MAXIMUM EFFICIENCY				STALL			
	OPERATING RANGE	NOMINAL	SPEED	CURRENT	SPEED	CURRENT	TORQUE	OUTPUT	TORQUE	CURRENT		
			R/MIN	A	R/min	A	g.cm	mNm	W	g.cm	mNm	A
RS-555SH	9.6-30	24V CONSTANT	8500	0.18	7400	1.27	185	27.9	21.6	2300	225	9.0

*Performance and dimension characteristics are average values

TORQUE SPEED CURVE



ANEXO II

CALIBRE AMERICANO PARA CONDUCTORES (AWG)

Número AWG	Diámetro (mm)	Sección (mm ²)	Número espiras por cm.	Kg. por Km.	Resistencia (Ohm/Km.)	Capacidad (A)
0000	11,86	107,2			0,158	319
000	10,40	85,3			0,197	240
00	9,226	67,43			0,252	190
0	8,252	53,48			0,317	150
1	7,348	42,41		375	1,40	120
2	6,544	33,63		295	1,50	96
3	5,827	26,67		237	1,63	78
4	5,189	21,15		188	0,80	60
5	4,621	16,77		149	1,01	48
6	4,115	13,30		118	1,27	38
7	3,665	10,55		94	1,70	30
8	3,264	8,36		74	2,03	24
9	2,906	6,63		58,9	2,56	19
10	2,588	5,26		46,8	3,23	15
11	2,305	4,17		32,1	4,07	12
12	2,053	3,31		29,4	5,13	9,5
13	1,828	2,63		23,3	6,49	7,5
14	1,628	2,08	5,6	18,5	8,17	6,0
15	1,450	1,65	6,4	14,7	10,3	4,8
16	1,291	1,31	7,2	11,6	12,9	3,7
17	1,150	1,04	8,4	9,26	16,34	3,2
18	1,024	0,82	9,2	7,3	20,73	2,5
19	0,9116	0,65	10,2	5,79	26,15	2,0
20	0,8118	0,52	11,6	4,61	32,69	1,6
21	0,7230	0,41	12,8	3,64	41,46	1,2
22	0,6438	0,33	14,4	2,89	51,5	0,92
23	0,5733	0,26	16,0	2,29	56,4	0,73
24	0,5106	0,20	18,0	1,82	85,0	0,58
25	0,4547	0,16	20,0	1,44	106,2	0,46
26	0,4049	0,13	22,8	1,14	130,7	0,37
27	0,3606	0,10	25,6	0,91	170,0	0,29
28	0,3211	0,08	28,4	0,72	212,5	0,23
29	0,2859	0,064	32,4	0,57	265,6	0,18
30	0,2546	0,051	35,6	0,45	333,3	0,15
31	0,2268	0,040	39,8	0,36	425,0	0,11
32	0,2019	0,032	44,5	0,28	531,2	0,09
33	0,1798	0,0254	56,0	0,23	669,3	0,072
34	0,1601	0,0201	56,0	0,18	845,8	0,057
35	0,1426	0,0159	62,3	0,14	1069,0	0,045
36	0,1270	0,0127	69,0	0,10	1338,0	0,036
37	0,1131	0,0100	78,0	0,089	1700,0	0,028
38	0,1007	0,0079	82,3	0,070	2152,0	0,022
39	0,0897	0,0063	97,5	0,056	2696,0	0,017
40	0,0799	0,0050	111,0	0,044	3400,0	0,014
41	0,0711	0,0040	126,8	0,035	4250,0	0,011
42	0,0633	0,0032	138,9	0,028	5312,0	0,009
43	0,0564	0,0025	156,4	0,022	6800,0	0,007
44	0,0503	0,0020	169,7	0,018	8500,0	0,005