



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas

Carrera de Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico

IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO DE UN SISTEMA PARA MICROGENERACIÓN EÓLICA

**Trabajo de grado presentado ante la Universidad Técnica del Norte previo a la
obtención del título de Ingeniero en Mantenimiento Eléctrico.**

Autor:

Carlos Javier Carlosama Imbaquingo

Director:

Ing. Ana Karina Cabrera Tobar, PhD.

Asesores:

Ing. Quinde Cuenca Isabel Marina, MSc.

Ing. Restrepo Zambrano José Alex PhD.

Ibarra, 2019



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO		
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1003774815	
APELLIDOS Y NOMBRES:	Carlosama Imbaquingo Carlos Javier	
DIRECCIÓN:	Av. Atahualpa Barrio Bellavista de Caranqui	
EMAIL:	carlosama.carlos76@gmail.com	
TELÉFONO FIJO:	650 – 675	TELÉFONO MÓVIL: 0995455826

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO DE UN SISTEMA PARA MICROGENERACIÓN EÓLICA
AUTOR (ES):	Carlosama Imbaquingo Carlos Javier
FECHA: DD/MM/AAAA	Febrero del 2019
PROGRAMA:	Pregrado
TITULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico
ASESOR /DIRECTOR:	PhD. Ana Cabrera

2. AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD

Yo, Carlos Javier Carlosama Imbaquingo, con cedula de identidad No. 1003774815 en calidad de autor y titular de los derechos Patrimoniales de la obra o trabajo de grado descrito anteriormente, hago entrega del ejemplar respectivo en forma de digital y autorizo a la Universidad Técnica del Norte, la publicación de la obra en el Repositorio Digital Institucional y uso del archivo digital en la Biblioteca de la Universidad con fines académicos, para ampliar la disponibilidad de materia y como apoyo a la educación, investigación y extensión en concordancia con la Ley de Educación Superior, Artículo 144.

3. CONSTANCIA

El autor manifiesta que la obra de la presente autorización es original y se la desarrolló sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad Técnica del Norte, en caso de reclamación por parte de terceros.



.....
Firma

Carlosama Imbaquingo Carlos Javier

Cédula: 1003774815

Ibarra, febrero 2019



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

**CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD
TÉCNICA DEL NORTE**

Yo, Carlos Javier Carlosama Imbaquingo, con cedula de identidad No. 100377481-5, manifiesto mi voluntad de ceder a la Universidad Técnica del Norte los derechos patrimoniales consagrados en la ley de propiedad intelectual del Ecuador, artículo 4,5 y 6 en calidad de autor del trabajo de grado denominado **“IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO DE UN SISTEMA PARA MICROGENERACIÓN EÓLICA”**. Que ha sido desarrollado para optar por el título de Ingeniero en Mantenimiento Eléctrico quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente. En mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes mencionada, aclarando que el trabajo aquí descrito es de mi autoría y que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional. En concordancia suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la biblioteca de la Universidad Técnica del Norte.

Firma

Carlosama Imbaquingo Carlos Javier

Cédula: 1003774815

Ibarra, febrero 2019



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO

Yo Ana Cabrera en calidad de Tutor del señor estudiante, Carlosama Imbaquingo Carlos Javier certifico que han cumplido con las normas establecidas en la elaboración del trabajo de investigación titulado: **“IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO DE UN SISTEMA PARA MICROGENERACIÓN EÓLICA.** Para la obtención del título de Ingeniero en Mantenimiento Eléctrico; aprobando la defensa, impresión y empastado.

PhD. Ana Cabrera

DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

DEDICATORIA

El presente trabajo de grado está dedicado a mis padres quienes con su amor, paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir mis objetivos, gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y valentía, por sus consejos, sus valores, y su motivación constante, los cuales me han permitido llegar a ser una persona de bien.

A mis hermanas, por su cariño, motivación y apoyo incondicional quienes estuvieron siempre durante todo este proceso, por estar conmigo en todo momento gracias.

A mi familia en general, porque con sus consejos y palabras de aliento hicieron de mí una mejor persona y de una u otra forma me acompañan en todos mis sueños y metas.

Carlos Carlosama



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi gratitud a Dios, quien con su bendición llena siempre mi vida guiándome por el camino del bien.

A mis padres por su apoyo incondicional.

A mis hermanas, por ser parte importante de mi vida y motivarme cada instante.

A la Universidad Técnica del Norte por brindarme la oportunidad de formarme como profesional, a cada uno de los docentes de la carrera que me brindaron sus conocimientos y su apoyo en el transcurso de mi formación académica.

Finalmente, un agradecimiento especial a la PhD. Ana Cabrera directora de este trabajo de grado.

Carlos Carlosama

Resumen

El presente trabajo detalla el diseño e implementación de un prototipo para microgeneración eólica, con la finalidad de fomentar el conocimiento técnico para que pueda ser implantado con el resto de sus componentes en el campo y sea económicamente accesible para los usuarios finales.

Está constituido de tres capítulos, de los cuales en el primer apartado se presenta el marco teórico que contiene información con respecto a las energías renovables, haciendo énfasis en la energía eólica y su aprovechamiento para generar electricidad. Además, se detalla los componentes de los sistemas de generación eólica y de manera especial el generador. Centrándose en el generador síncrono de imanes permanentes por ser el tipo de máquina eléctrica usada con mayor frecuencia en los pequeños sistemas de generación de electricidad.

En el segundo capítulo se detalla la metodología para el diseño y construcción del prototipo que comprende el generador y el sistema electrónico. Se orienta principalmente en el diseño y construcción del generador para microgeneración eólica considerando sus partes eléctricas y mecánicas para su construcción.

En el tercer capítulo se presenta los resultados del prototipo. Para ello se realizaron pruebas donde se comprobó el funcionamiento del generador a distintas velocidades. Después, se verificó el funcionamiento del sistema electrónico acoplado al generador.

Finalmente se detallan las conclusiones y recomendaciones obtenidas durante la elaboración del trabajo desarrollado.

Palabras clave: microgeneración, generador, sistema, eólico, aerogenerador, prototipo.

Abstract

This paper details the design and implementation of a prototype for wind microgeneration, with the aim of promoting technical knowledge so that it can be implanted with the rest of its components in the field and is economically accessible for End users.

It consists of three chapters, of which in the first section presents the theoretical framework that contains information regarding renewable energies, emphasizing wind energy and its use to generate electricity. In addition, it details the components of the wind generation systems and in a special way the generator. Focusing on the permanent magnet synchronous generator because it is the type of electric machine used most frequently in small electricity generation systems.

The second chapter details the methodology for the design and construction of the prototype comprising the generator and the electronic system. It is mainly oriented in the design and construction of the generator for wind microgeneration considering its electrical and mechanical parts for its construction.

The third chapter presents the results of the prototype. For this purpose, tests were carried out where the generator's operation was verified at different speeds. Afterwards, the electronic system was checked for operation coupled to the generator.

Finally, the conclusions and recommendations obtained during the elaboration of the developed work are detailed.

Keywords: microgeneration, generator, system, wind turbine, prototype.

Contenido

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE.....	II
CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE	IV
CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO	V
DEDICATORIA.....	VI
AGRADECIMIENTO	VII
RESUMEN	VIII
ABSTRACT.....	IX
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO 1 MARCO TEÓRICO

1.1	Energía renovable.....	4
1.1.1	Energía mareomotriz	4
1.1.2	Energía hidráulica.....	4
1.1.3	Energía eólica.....	5
1.1.4	Energía solar	6
1.1.5	Energía de la Biomasa.....	6
1.2	Ventajas e inconvenientes de las energías renovables.....	6
1.2.1	Ventajas.....	6
1.2.2	Desventajas.....	7
1.3	Aprovechamiento de la energía eólica y el viento para la producción de electricidad 7	
1.4	Potencial eólico en Ecuador.....	8
1.5	Potencia eólica	8
1.5.1	Potencia eólica disponible.....	8
1.5.2	Potencia eólica aprovechable	10
1.6	Conversión de la energía eólica.....	11
1.6.1	Clasificación de los aerogeneradores	11
1.6.2	Comparación entre los tipos de aerogeneradores.....	13
1.6.3	Componentes de un aerogenerador	14
1.6.4	Generador eléctrico	17
1.6.5	Sistema de orientación - control.....	22
1.6.6	Otros componentes de un sistema de generación eólica	24
1.7	Funcionamiento del aerogenerador en conjunto	26
1.8	Aplicaciones de los aerogeneradores de baja potencia	26

1.8.1	Instalaciones aisladas de la red eléctrica	27
1.8.2	Instalaciones conectadas a la red eléctrica.....	28
1.8.3	Energía eólica en el entorno urbano	28

CAPÍTULO 2

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO

2.1	Descripción del generador	30
2.2	Diseño del generador.....	31
2.2.1	Elección de los imanes	31
2.2.2	Cálculo de la densidad de flujo magnético	31
2.2.3	Determinación del número de revoluciones	34
2.2.4	Definición de polos y bobinas	35
2.2.5	Cálculo del voltaje promedio frente a la velocidad	37
2.2.6	Cálculo del voltaje en corriente continua.....	37
2.2.7	Numero de vueltas de bobina por fase.....	38
2.2.8	Sección del cable a usar.....	38
2.2.9	Distribución de las bobinas	40
2.2.10	Diseño de los discos para los rotores magnéticos	40
2.2.11	Distribución de los imanes	40
2.2.12	Ubicación de los imanes según su polaridad	41
2.3	Construcción del generador	41
2.3.1	Estructura	41
2.3.2	El buje.....	42
2.3.3	El eje	42
2.3.4	Rodamiento	43
2.3.5	Construcción de bobinas	43
2.3.6	Conexión de bobinas	44
2.3.7	Construcción final del estator.....	45
2.3.8	Construcción de los rotores magnéticos	46
2.3.9	Construcción final de los rotores magnéticos.....	48
2.3.10	Ensamble final del generador	50
2.4	Construcción del sistema electrónico del prototipo.....	50
2.4.1	Rectificador de corriente AC/DC	50
2.4.2	Controlador de carga	52
2.4.3	Presupuesto final para la implementación del prototipo	55

CAPÍTULO 3

RESULTADOS: PRUEBAS DEL PROTOTIPO

3.1	Pruebas del prototipo.....	56
-----	----------------------------	----

3.1.1	Pruebas de funcionamiento del generador (en vacío) tensión de línea y tensión de fase	56
3.1.2	Pruebas de funcionamiento del generador (con carga)	57
3.1.3	Prueba de funcionamiento del prototipo	59
3.2	Gráficas obtenidas	60
CONCLUSIONES		62
RECOMENDACIONES		63
REFERENCIAS		64
ANEXO A: CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS IMANES UTILIZADOS		67
ANEXO B: TABLA DE CONDUCTORES ESMALTADOS		68
ANEXO C: MANUAL DE USUARIO DEL CONTROLADOR DE CARGA		69
ANEXO D: PLANOS CONSTRUCTIVOS DEL GENERADOR		71
ANEXO E: MANUAL DE FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO		80
ANEXO F: MANUAL DE MANTENIMIENTO DEL PROTOTIPO		84
ANEXO G: MANUAL DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO		89

INDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1:	Esquema conceptual de un aerogenerador	11
Fig. 1.2:	Algunos tipos de aerogenerador de eje horizontal	12
Fig. 1.3:	Tipos de aerogeneradores de eje vertical: a) Savonius y b) Darrieus	13
Fig. 1.4 :	Componentes de un aerogenerador de eje horizontal	16
Fig. 1.5:	Tipos de generador de imanes permanentes	19
Fig. 2.1:	Estructura de un generador de flujo axial de imanes permanentes	31
Fig. 2.2 :	Tamaño de los imanes elegidos	31
Fig. 2.3:	Esquema representativo de variables para aplicar la fórmula densidad de flujo	32
Fig. 2.4:	Modelado de un imán permanente vista lateral	33
Fig. 2.5:	Modelado de la inducción magnética de un imán unido a una placa de acero (ASTM A36) vista lateral	33
Fig. 2.6:	Modelado de dos placas con imanes enfrentados vista lateral	34
Fig. 2.7:	Representación de las medidas de una bobina con núcleo de aire	39
Fig. 2.8 :	Disposición de bobinas alrededor de la "isla"	40
Fig. 2.9:	Estructura metálica	42
Fig. 2.10:	Cubo o manzana para utilizar como buje del generador	42
Fig. 2.11:	Eje para generador	43
Fig. 2.12:	Bobinadora manual	43
Fig. 2.13:	Bobina terminada	44
Fig. 2.14:	Diagrama de conexión de bobinas	44

Fig. 2.15: Conexión de bobinas.....	45
Fig. 2.16: Molde para fundir las bobinas.....	45
Fig. 2.17: Estator de generador fundido	46
Fig. 2.18: Disco cortado	46
Fig. 2.19: Disco siendo mecanizado en el torno	47
Fig. 2.20: Disco terminado	47
Fig. 2.21: Plantilla de posicionamiento para imanes.....	47
Fig. 2.22: Plantilla de posicionamiento acoplada al disco.....	48
Fig. 2.23: Distribución de imanes en disco	48
Fig. 2.24: Rotor magnético colocado en molde	49
Fig. 2.25: Capa de fibra de vidrio colocada sobre los imanes.....	49
Fig. 2.26: Rotor magnético fundido	49
Fig. 2.27: Esquema del sistema electrónico del prototipo.....	50
Fig. 2.28: Circuito rectificador trifásico	51
Fig. 2.29: Rectificador trifásico que se utilizará	52
Fig. 2.30: Controlador de carga.....	52
Fig. 2.31: Gabinete para la parte electrónica del prototipo	53
Fig. 3.1: Generador acoplado al motor	56
Fig. 3.2: Generador conectado a sus salidas carga resistiva.....	58
Fig. 3.3: Forma de onda del voltaje de 2 fases.....	59
Fig. 3.4: Gráfica de voltaje de fase a distintos valores de rpm.....	60
Fig. 3.5: Gráfica de voltaje de línea a distintos valores de rpm.....	61
Fig. 3.6: Gráfica de frecuencia eléctrica a distintos valores de rpm	61
Fig. 1: Prototipo del sistema para microgeneración eólica	80

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Proyectos eólicos del Ecuador en espera.....	8
Tabla 2.1: Tabla de especificaciones técnicas de los imanes seleccionados	32
Tabla 2.2: Determinación del número de par de polos	36
Tabla 2.3: Características del rectificador	51
Tabla 2.4: Características técnicas del controlador de carga	53
Tabla 2.5: Lista de materiales	53
Tabla 2.6: Presupuesto para la implementación del prototipo	55
Tabla 3.1: Datos experimentales del generador (en vacío)	57
Tabla 3.2: Datos del generador con carga resistiva en conexión estrella	58
Tabla 3.3: Datos experimentales del generador a la salida del rectificador (en vacío)	59

Introducción

La energía eólica es aquella que se genera a través de la fuerza del viento. Desde la antigüedad este tipo de energía ha sido utilizada por el hombre, en especial para la navegación y en los molinos de viento. (Domínguez, 2008). En los últimos años los aerogeneradores han tenido un despliegue a paso acelerado de manera que se han creado y optimizado diseños para turbinas y molinos de diferentes tamaños, a fin de aumentar su eficiencia y a la vez reducir costes de producción. (Muerza, 2006). Los modelos de pequeños aerogeneradores considerados para su aplicación en microgeneración de energía eólica han brindado la posibilidad de que esta tecnología pueda llegar con mayor frecuencia a los hogares y permita disminuir o eliminar la dependencia de las redes eléctricas habituales. (Ruiz & Salazar, 2016).

La microgeneración de energías renovables, como la energía eólica, se refiere a la generación de energía eléctrica en potencias menores a los 20 kW. (MIEM / DNETN, 2009). Esta energía generada es empleada generalmente para brindar abastecimiento eléctrico domiciliario o rural y permite incluir al usuario final en la ecuación energética, siendo ésta justamente una de las ventajas principales de estos sistemas. De todas las energías renovables, se podría decir que especialmente la eólica y la solar están disponibles para la población en general, ya que requieren de una relativa baja inversión para hacer uso de las mismas y convertirlas en energías aprovechables como la electricidad. El resto de las energías renovables está mayoritariamente disponible en grandes empresas e institutos de investigación con abundantes recursos técnicos y económicos. (Vercelli, 2012). Cabe mencionar que la microgeneración de energías renovables es de alta relevancia para uso comunitario o residencial principalmente en sectores rurales alejados de la red eléctrica convencional. (Equipo Eólico UAF, 2010).

Planteamiento del problema

En el mercado existen diferentes sistemas eólicos de microgeneración, no obstante, para los usuarios finales estos sistemas no son económicamente accesibles, requieren de mantenimiento periódico y generan ruido pues la mayoría emplean cajas de engranajes mecánicos. Sobre todo, cabe mencionar que el uso de estos sistemas comerciales no permite un empoderamiento tecnológico de los usuarios, hecho que no ocurriría de fomentarse y generarse el conocimiento técnico necesario para el diseño e implementación de sistemas de microgeneración eólica que sean de fácil construcción y mantenimiento.

Problema

¿Cómo diseñar y construir un sistema eólico de microgeneración, económico de fácil construcción y mantenimiento?

Justificación

Actualmente, en nuestro país existen sectores rurales alejados de la red de distribución de energía eléctrica convencional que no gozan del abastecimiento de este servicio. (Gomelsky, 2013) Refiere lo siguiente, en el Ecuador según la cobertura del servicio eléctrico es del 96.2% (96.1% red convencional y 0.1% fotovoltaica) en viviendas urbanas y del 88.2% en viviendas rurales (88.0% red y 0.2% fotovoltaica), lo que resulta en un agregado de 93.4% (93.2% red y 0.2% fotovoltaica) para el total de viviendas del país. Es así que las viviendas sin ningún tipo de servicio eléctrico representan el 2.2% del total en área urbana y el 10.5% de las viviendas rurales, lo cual resulta en un 5.2% para todo el país. Esto significa en términos absolutos que cerca de 196.000 viviendas no tienen electricidad en el país, donde 54.000 están en zonas urbanas y 142.000 en rurales.

Para dotar de servicio eléctrico en las viviendas faltantes antes mencionadas, el Ministerio de Energía Eléctrica Renovable (MEER) desde años anteriores ha impulsado el desarrollo de proyectos de microgeneración con energías renovables. (Gomelsky, 2013). No obstante, la mayoría de los sistemas de microgeneración instalados son solares fotovoltaicos en función de las adecuadas condiciones de irradiación solar de nuestro territorio. (Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, 2013). Sin embargo, estos sistemas dependen enteramente de las condiciones solares que no siempre son las adecuadas por lo que en los mismos se requiere diversificar y complementar la generación de energía eléctrica a través de otra fuente renovable de uso fácil y masivo como es la energía eólica a pequeña escala. Esto además potenciará un desarrollo sustentable y promoverá la autonomía energética en los consumidores.

Según lo comentado previamente es de alta relevancia que se diseñe e implementen en nuestro país sistemas de microgeneración eólica con el objetivo de dotar de suministro y autonomía energética a poblaciones alejadas de la red convencional, logrando así disminuir el porcentaje de la población que no cuenta con este servicio. Asimismo, se promoverá el empoderamiento tecnológico y la reducción de costos con respecto de sistemas comerciales.

Alcance

En este tema de titulación se pretende diseñar e implementar un prototipo de un sistema de microgeneración eólica que incluya el generador eléctrico y el sistema electrónico para el almacenamiento de energía. El generador eléctrico será de flujo axial de imanes permanentes con potencia nominal igual o mayor a 300 W, el cual se lo diseñará estudiando el funcionamiento de los sistemas de microgeneración eólica. El sistema electrónico contará con un sistema de rectificación de la corriente alterna del generador y un sistema de regulación y control de carga para el dispositivo de almacenamiento de energía. Se realizará el sistema considerando adecuados criterios de implementación técnica y viabilidad económica para su replicabilidad.

Viabilidad

La realización del presente proyecto de titulación es viable por cuanto se cuenta con un adecuado acceso a información, revistas y libros físicos, digitales y en línea. Cabe recalcar que se tendrá la dirección/apoyo de un tutor y acceso a laboratorios de la carrera. Además, para la implementación del sistema propuesto se requiere de un corto plazo (6 meses), de una inversión módica y del uso de equipos y herramientas mecánicas y eléctricas de fácil acceso.

Objetivo general

Diseñar e implementar un prototipo de un sistema para microgeneración eólica.

Objetivos específicos

1. Estudiar el funcionamiento de los sistemas de microgeneración eólica.
2. Diseñar e implementar el prototipo del generador eléctrico para microgeneración eólica.
3. Diseñar e implementar el sistema electrónico para el prototipo de generación.
4. Realizar pruebas de funcionamiento del sistema desarrollado.

CAPÍTULO 1

1 MARCO TEÓRICO

El siguiente capítulo tiene como finalidad presentar conocimientos básicos de las energías renovables; haciendo énfasis en la energía eólica y su aprovechamiento para generar electricidad a través de los aerogeneradores. También se detalla los componentes de los pequeños sistemas de generación eólica.

1.1 Energía renovable

Las energías renovables podrían definirse como aquellas fuentes de energía que provienen de recursos que tras ser utilizados se pueden regenerar. Son amigable con el medio ambiente, razón por la cual se proponen para reducir la contaminación y el agotamiento de los combustibles fósiles. (Fernando, 2015).

De manera general existen los siguientes tipos de energías renovables:

- Energía mareomotriz (mareas)
- Energía hidráulica (embalses)
- Energía eólica (viento)
- Energía solar (sol)
- Energía de la biomasa (vegetación)

1.1.1 Energía mareomotriz

Es también considerada una fuente renovable. Se produce por las fuerzas gravitacionales de la luna y el sol que provoca el movimiento de grandes cantidades de agua en océanos y mares que producen las mareas. Esta energía es aprovechada por turbinas que a su vez mueven a generadores los cuales están conectados a una central en tierra que es la encargada de distribuir a los usuarios finales. (Webmaster, 2012).

1.1.2 Energía hidráulica

Es una fuente renovable que proviene de la energía potencial del agua de las fuentes naturales hídricas. Se aprovecha empleando los recursos tal y como se encuentran en la naturaleza o se construyen represas con sus correspondientes obras civiles denominadas centrales hidroeléctricas que aprovechan la diferencia de desnivel entre dos puntos y el caudal de agua para generar electricidad. Justamente debido a la abundancia del recurso hídrico en nuestro país, las instalaciones de generación eléctrica más comunes hoy en día son las centrales hidroeléctricas. (Peláez et al., 2015).

1.1.3 Energía eólica

Es una fuente renovable que se obtiene a partir de la fuerza del viento. Puede ser transformada en otra forma de energía principalmente en electricidad. Cabe mencionar que es una de las fuentes renovables con mayor crecimiento en el mundo. (Minsiterio de Electricidad y Energía Renovable, 2013).

Según (Ecoticias, 2012), la energía eólica presenta las siguientes ventajas:

– **Ventajas de la Energía eólica**

- Es amigable con el medio ambiente ayudando así a frenar el agotamiento de combustibles fósiles y contribuyendo a evitar el cambio climático. Es además una fuente de energía inagotable y es considerada una tecnología de explotación plenamente desarrollada.
- Es una de las tecnologías más accesible desde el punto de vista económico teniendo la posibilidad de competir en productividad con otros tipos de energía convencionales.
- Puede ayudar a parar la contaminación ambiental y evitar el peligro de derrames de combustibles en el caso de su transporte, así como también reducir la emisión de gas CO2 en centrales térmicas.

Según (Larevista, 2012), la energía eólica presenta las siguientes desventajas:

– **Desventajas de la energía eólica**

- Para captar el viento, se construyen máquinas grandes, y por ende conlleva una alta inversión. Para un adecuado aprovechamiento de la energía eólica, en el caso de los enormes aerogeneradores de eje vertical emplean torres de gran altura. De igual forma el radio de sus álabes puede llegar a tener la veintena de metros de manera que implica una producción costosa.
- Desde el punto de vista estético origina un impacto visual negativo, en especial en el caso de los grandes aerogeneradores. Cabe mencionar que las instalaciones de microgeneración o de baja potencia casi no producen esta sensación visual debido a que no es necesario instalarlos a una gran altura.
- Generan ruido por el giro del rotor, en particular la mayoría de los generadores eólicos que emplean multiplicadores de velocidad.

1.1.4 Energía solar

Es una fuente renovable inagotable que se obtiene del aprovechamiento de la radiación electromagnética procedente del sol. Actualmente, el calor y la luz del sol pueden aprovecharse con la ayuda de diversos captadores como células fotovoltaicas, helióstatos o colectores térmicos, logrando transformarse en energía eléctrica o térmica. (Peláez et al., 2015).

1.1.5 Energía de la Biomasa

Es una fuente de energía renovable constituida por una variedad de recursos que es relativamente amplia, entre los que se encuentran residuos que pueden ser: agrícolas, forestales e industriales, subproductos biodegradables. En la actualidad se aprovecha básicamente para la obtención de calor en viviendas (cocinas, hornos, calderas) y a nivel industrial (hornos cerámicos, secaderos). Sólo una parte pequeña es utilizada en generación de electricidad. (Marín, 2006).

1.2 Ventajas e inconvenientes de las energías renovables.

Las energías renovables presentan ciertas ventajas y desventajas al momento de implementarlas, es así que de manera general a continuación se detalla algunas de ellas:

1.2.1 Ventajas

(López & Ageitos, 2007), señalan las siguientes ventajas de las energías renovables:

- Ventajas medioambientales: son fuentes de energía inagotables amigables con el medio ambiente que no producen emisiones de CO₂ ni de otros gases contaminantes a la atmósfera y no generan residuos de difícil tratamiento.
- Ventajas Estratégicas: son fuentes de energía autóctonas que se utilizan cerca del lugar donde se producen, lo que significaría evitar o reducir la dependencia energética.
- Ventajas Socioeconómicas: contribuyen contundentemente al equilibrio interterritorial ya que suelen instalarse en zonas rurales, así como también permiten el desarrollo de tecnologías propias.

1.2.2 Desventajas

(Costalago, 2014), manifiesta las siguientes desventajas de las energías renovables:

- Inestabilidad en el abastecimiento: casi todas las energías renovables requieren que las condiciones meteorológicas sean adecuadas, dado el caso que no sean las apropiadas, es difícil garantizar que la generación de energía se constante para abastecer a los usuarios.
- Incapacidad en la producción a gran escala: es complicado producirla en grandes cantidades, como es el caso de las centrales térmicas o nucleares resulta difícil pensar que se va a dotar del servicio eléctrico en un 100% mediante fuentes renovables. Seguro se tendrá que implantar nuevas plantas productoras a futuro para abastecer la creciente demanda.
- Inversión inicial alta: se requiere de inversiones altas con el fin de obtener energía proveniente de fuentes renovables ya que para que tenga éxito es necesario una investigación y planificación antes de implementarlas, lo cual implica un gran coste.
- Grandes espacios requeridos: en el caso de las plantas solares, parques eólicos para que puedan producir a gran escala, demandan grandes superficies para su construcción en algunos casos hasta se requiere que sea preparado el terreno.

1.3 Aprovechamiento de la energía eólica y el viento para la producción de electricidad

El viento se lo considera a toda masa de aire en movimiento que se produce por el calentamiento irregular de la superficie terrestre. (National Geographic, 2010). Entre el 1 y 2% de la energía procedente del sol se convierte en viento. Desde la antigüedad la fuerza del viento era utilizada para navegación, molinos y bombeo de agua. Con el pasar de los años, en el siglo XX descubren que se puede utilizar para la generación de electricidad a través de aerogeneradores. (Corporación Eléctrica del Ecuador, 2013).

Si se quiere producir energía eléctrica para verter a la red de distribución es necesario agrupar varios aerogeneradores, lo que se denomina parques eólicos. Si se desea suministrar electricidad a puntos de consumo aislados se utilizan equipos de pequeña potencia, en general de varias decenas de kilovatios (kW). (Marín, 2006).

1.4 Potencial eólico en Ecuador

En nuestro país se calcula un potencial de 1.671 MW, concentrados principalmente en la región Sierra, según el mapa eólico del Ecuador del Ministerio de Electricidad y Energía Renovable del Ecuador. Pese a la capacidad eólica existente, el desarrollo de proyectos ha sido lento y básicamente ha sido por iniciativas puntuales. Actualmente se cuenta con una potencia instalada de 20,8 MW, compartida en tres proyectos (Villonaco-Loja, San Cristóbal-Galápagos y Baltra-Galápagos), de los cuales el 76 % (Parque Eólico Villonaco) están integrados al Sistema Nacional Interconectado y el resto en las Islas Galápagos como sistemas eólicos aislados integrados a la generación diésel de las islas. No obstante, existen algunos proyectos en espera los cuales están por implementarse y que se presentan en la siguiente tabla. (Peláez et al., 2015) :

Tabla 1.1: Proyectos eólicos del Ecuador en espera

Nombre	Promotor	Potencia [MW]	Zona
Santa Cruz Project, [Galápagos Island]	ERGAL [UNDP]	3,4 MW	Galápagos
Salinas, [Ibarra]	Electroviento S.A.	10 MW	Andes
Las Chinchas, [Loja]	Proviento S.A.	10 MW	Valle Altura/Montanas
Huascachaca, [Azuay]	Elecaastro S.A. [Local Hydrogenation Company]	30 MW [50 MW]	Altura/Montanas
Membrillo [Loja]	ENERLOJA S.A.	45 MW	Altura/Montanas

Fuente: (Peláez et al., 2015)

Elaborado por: Autor

1.5 Potencia eólica

1.5.1 Potencia eólica disponible

Un aerogenerador obtiene su potencia de entrada convirtiendo la fuerza del viento en torque que actúa en las hélices del rotor. La cantidad de energía transferida al rotor por el viento depende de la densidad del aire, del área de barrido del rotor y de la velocidad del viento. (Salgado, 2009).

$$E = \frac{1}{2} mV^2 \quad (1.1)$$

Donde:

E = Energía cinética (J)

m = Masa de aire (kg)

V = Velocidad del viento (m/s)

De la fórmula anterior se puede apreciar que la energía cinética del viento depende de la densidad de aire, o sea de su masa por unidad de volumen. En otras palabras, cuanto “más pesado” sea el aire más energía recibirá el aerogenerador. (Salgado, 2009).

La energía cinética por unidad de volumen será:

$$e = \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (1.2)$$

Donde:

e = Energía cinética por unidad de volumen (J)

ρ = Densidad del aire (kg/m³)

V = Velocidad del viento (m/s)

El flujo de aire a través de una superficie es:

$$\phi = VA \quad (1.3)$$

Donde:

ϕ = Flujo de aire

V = Velocidad del viento (m/s)

A = Área de barrido del rotor (m²)

La energía que fluye por unidad de tiempo, o potencia eólica disponible en una sección de área A perpendicular a la corriente de aire con velocidad V será el flujo de energía cinética, es decir:

$$Pd = \frac{1}{2} \rho V^2 VA = \frac{1}{2} \rho V^3 A \quad (1.4)$$

Donde:

Pd = Potencia eólica disponible (W)

V = Velocidad del viento (m/s)

A = Área de barrido del rotor (m²)

Por consiguiente, la potencia disponible en las masas de aire en movimiento es directamente proporcional a la densidad, al área perpendicular enfrentada al rotor y al cubo de la velocidad. (Salgado, 2009).

1.5.2 Potencia eólica aprovechable

En el punto anterior se ha visto según la ecuación cuál es la energía contenida en una masa de aire en movimiento. Pero el cumplimiento de la ecuación de conservación de la masa hace que no toda esa potencia disponible en el aire pueda aprovecharse. Aparte de las características del viento, la potencia aprovechable depende también de las características de funcionamiento del aerogenerador. Se deberá considerar incluso las pérdidas mecánicas y la eficiencia eléctrica del generador. Estos factores se toman en cuenta por separado. (Salgado, 2009).

Es así que se define el coeficiente de potencia C_p de un aerogenerador como la fracción de potencia contenida en el viento incidente que es realmente capturada por el aerogenerador el mismo que se toma en cuenta para calcular la potencia aprovechable y es una medida de la eficiencia de la máquina. (Salgado, 2009).

$$C_p = \frac{P_a}{P_d} \quad (1.5)$$

Donde:

C_p = Coeficiente de potencia

P_a = Potencia eólica aprovechable (W)

P_d = Potencia eólica disponible (W)

Con el coeficiente de potencia " C_p " se podrá calcular la potencia aprovechable " P_a " mediante la ecuación:

$$P_a = \frac{1}{2} \rho V^3 A C_p \quad (1.6)$$

Donde:

P_a = Potencia aprovechable (W)

ρ = Densidad del aire (kg/m^3)

V = Velocidad del viento (m/s)

A = Área de barrido del rotor (m^2)

C_p = Constante de potencia

El valor del coeficiente de potencia nunca puede alcanzar el 100% respecto a la potencia incidente. El valor máximo fue determinado por Betz, en el año 1927 a partir de la aplicación de la ecuación de cantidad de movimiento. Betz, un investigador de la energía eólica, demostró que el máximo valor posible a obtener para el " C_p " es de $16/27$, es decir que solo puede convertirse menos del 59 % de la energía cinética en energía mecánica usando un aerogenerador. (Salgado, 2009).

1.6 Conversión de la energía eólica.

Para utilizar la fuerza disponible en el viento, se transforma la energía cinética en mecánica o eléctrica. Luego es captada por medio de los álabes, los cuales van acoplados a un rotor que giran según fluya el viento alrededor o contra ellos. Los álabes convierten la energía cinética del viento en energía mecánica. El rotor es conectado al eje de un motor y el par creado por el giro de los álabes, puede emprender trabajos mecánicos o producir energía eléctrica. (Guido, 2009). Estos elementos se los conoce como aerogeneradores.

Para que un aerogenerador se ponga en funcionamiento requiere de un valor mínimo del viento para vencer los rozamientos y comenzar a generar trabajo útil, este valor mínimo es denominado velocidad de conexión el cual, en caso de no ser producido, sería imposible arrancar un aerogenerador (el valor de la velocidad está comprendida entre 3-5m/s). A partir de este valor empezará a rotar convirtiendo la energía cinética en mecánica hasta que alcance la potencia nominal, generalmente la máxima que puede entregar. (Salgado, 2009).

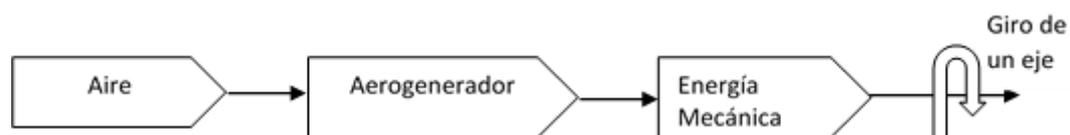


Fig. 1.1: Esquema conceptual de un aerogenerador

Fuente: Autor

1.6.1 Clasificación de los aerogeneradores

(Cuesta, Pérez, & Cabrera, 2008), refieren que de manera general los generadores eólicos se clasifican según la posición de su eje principal, existiendo dos tipos principales, los aerogeneradores de eje vertical y los de eje horizontal; a continuación, se profundizará cada uno de ellos:

a) Aerogeneradores de eje horizontal

- **Aerogeneradores lentos**

Son los que están constituidos por un número alto de álabes (multipalas) que cubren casi toda la superficie del rotor. Se caracterizan por tener un elevado par de arranque mediante el cual pueden ponerse en marcha incluso con velocidades de viento muy bajas. Su baja velocidad de rotación hace que sean poco útiles en la producción de electricidad, siendo su uso más frecuente para aplicaciones como el bombeo de agua.

- **Aerogeneradores rápidos**

En su mayoría emplean tres álabes y se utilizan en la producción de electricidad acoplados a un alternador. Tienen un par de arranque pequeño y requieren velocidades de viento del orden de 4 a 5 m/s para su puesta en marcha. Suelen utilizarse en una gama de potencias muy amplia, comprendida en modelos que van de 1 kW, usados en instalaciones autónomas de baja potencia, a modelos de gran potencia.

- **Aerogeneradores de velocidad intermedia**

Este tipo de aerogeneradores tienen de 3 a 6 álabes y sus beneficios están comprendidos entre los proporcionados por los dos casos anteriores. Son utilizados cuando las condiciones de viento no son muy favorables y en general son de pequeña potencia siendo adecuados en aplicaciones de microgeneración eléctrica. Se los utiliza principalmente en equipos autónomos para producción de electricidad.



Fig. 1.2: Algunos tipos de aerogenerador de eje horizontal

Fuente: (Moreno, 2012).

b) Aerogeneradores de eje vertical

- **Tipo Savonius**

Este tipo de aerogenerador posee la ventaja principal de trabajar con velocidades de viento muy bajas. Se constituye de dos semicírculos del mismo diámetro ubicados paralelamente al eje vertical de giro (Figura. 1.3 a). La fuerza del viento que actúa en las caras de los cilindros (cara cóncava y convexa) es distinta, logrando hacerlas girar alrededor del eje. También tiene buenas características aerodinámicas para el autoarranque y autorregulación. Se emplean en la producción autónoma de electricidad y bombeo de agua.

- **Tipo Darrieus**

Son constituidos por dos o tres palas de forma ovalada con perfil aerodinámico y tienen características similares a las de eje horizontal, presentando un par de arranque muy pequeño (Figura. 1.3 b). Su potencia es pequeña y si bien su aplicación es similar a los aerogeneradores rápidos de eje horizontal, están poco implantados.

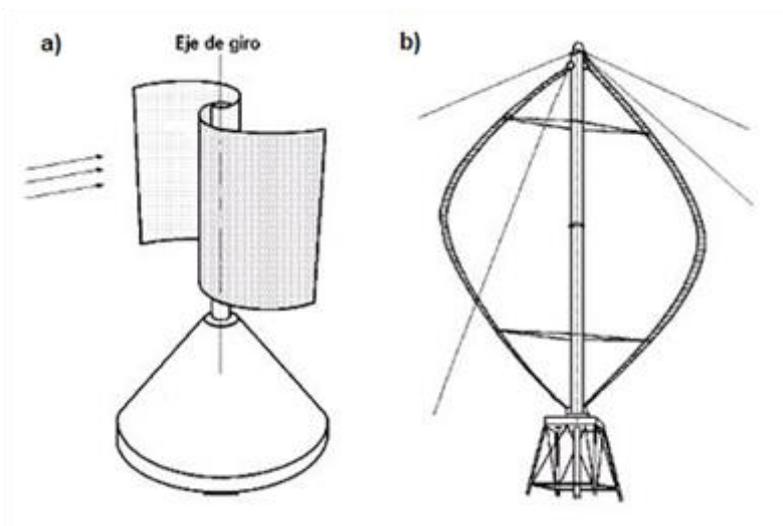


Fig. 1.3: Tipos de aerogeneradores de eje vertical: a) Savonius y b) Darrieus

Fuente: (Moreno, 2012)

1.6.2 Comparación entre los tipos de aerogeneradores

Los aerogeneradores de eje horizontal presentan ventajas con respecto a los de eje vertical y viceversa, que a continuación se puntualizan:

- **Ventajas de los aerogeneradores de eje horizontal versus los de eje vertical**

A continuación, se presentan las ventajas principales de los aerogeneradores de eje vertical frente a los de eje horizontal. (Morimitsu, 2015):

- Tienen un rendimiento más elevado que los de eje vertical.
 - Presentan mayores velocidades de giro (multiplicadores más sencillos).
 - Menor superficie de pala a igualdad de área barrida.
 - Se pueden instalar a mayor altura con la ayuda de torres donde la fuerza del viento es mayor.
- **Ventajas de los aerogeneradores de eje vertical versus los de eje horizontal.**
Las siguientes son las ventajas principales que tienen los aerogeneradores de eje vertical frente a los de eje horizontal. (Chiras, 2010):
 - Pueden ser ubicados encima del suelo evitando tener que poner grandes torres.
 - No requieren sistemas de orientación ya que están diseñados para captar la fuerza del viento de cualquier parte.
 - Pueden ser instalados en lugares donde las velocidades de viento sean bajas.
 - Su fabricación presenta bajo costo.

1.6.3 Componentes de un aerogenerador

Conceptualmente los aerogeneradores de bajo potencial eólico tienen una estructura similar a los grandes, con la diferencia en que cuyo diseño es más simple. Como en general, el aerogenerador más empleado es el de eje horizontal, a continuación se describen los componentes principales que lo constituyen (Figura 1.4).

- **El Rotor**

Es el mecanismo encargado de extraer la energía cinética del viento y transformarla en torque mecánico por medio de la rotación de los álabes, dado por la interacción aerodinámica de éstos con el viento. Generalmente en su mayoría los rotores están constituidos por tres álabes, aunque existen modelos con dos. (Peláez et al., 2015).

- **Álabes**

Los álabes se encargan de capturar la fuerza del viento para transmitir su potencia hacia el buje. En un aerogenerador moderno con más de 2MW cada álabe tiene una longitud cerca de los 40 metros y su diseño es muy similar al de las alas de un avión. (Salgado, 2009).

- **El buje**

Es el armazón donde se unen los álabes y a su vez se conectan al eje de rotación del aerogenerador. (Salgado, 2009).

- **El eje principal**

Está formado por un cojinete principal y el eje de rotación lento (10 a 20rpm), el cual gira con el buje del rotor. Este transfiere el torque mecánico a la multiplicadora y/o generador eléctrico; en algunos casos se encuentra integrado en la multiplicadora de manera que lo vuelve más compacto al aerogenerador. (Peláez et al., 2015).

- **Multiplicadora de velocidad**

Es un dispositivo empleado con el objetivo de elevar la velocidad de rotación del eje principal a una velocidad adecuada para la generación de electricidad. En algunos casos no se utiliza este mecanismo ya que se emplean generadores síncronos multipolares de bajas revoluciones por lo que no es necesario alcanzar elevadas velocidades. (Peláez et al., 2015).

- **Acoplamiento**

Es el que trasfiere el torque de alta velocidad desde la multiplicadora hacia el generador eléctrico. Usualmente es un acoplamiento de tipo flexible con el propósito de absorber las vibraciones y esfuerzos mecánicos. En este eje por lo general se ubica el freno de emergencia el cual es utilizado para operaciones de mantenimiento. (Peláez et al., 2015).

- **La góndola**

Es donde se encuentran los componentes clave del aerogenerador antes mencionados, a excepción del rotor (álabes y buje). (Salgado, 2009).

- **La torre**

Moratilla (2006), explica que la torre soporta todos los componentes del aerogenerador para tenerlo a una altura apropiada. Las torres pueden ser de varios tipos como los que se describen a continuación (Windpower, 2003):

- a) **Torres tubulares de acero:** se utilizan generalmente en los grandes aerogeneradores, son construidas en secciones de 20 a 30 metros y unidas en sus extremos con bridas con pernos “in situ”. Tienen forma de cono (con un diámetro creciente hacia la base), con la finalidad de aumentar su resistencia y al mismo tiempo ahorrar material. Se caracterizan por ser más seguras para el personal de mantenimiento ya que pueden usar una escalera interior para acceder a la parte superior de la turbina.
- b) **Torres de mástil tensado:** son torres delgadas sostenidas por cables tensores; se las emplea principalmente para los aerogeneradores pequeños. Tienen la ventaja de ahorro de peso, y por lo tanto del costo. Aunque las hace menos aptas para terrenos agrícolas por tener la dificultad de acceder a zonas alrededor de la torre.
- c) **Torres de celosía:** son construidas con perfiles metálicos de acero, tienen la ventaja de un bajo costo no obstante la desventaja de este tipo de torres es su aspecto visual, por lo que prácticamente han desaparecido en los grandes aerogeneradores modernos.
- d) **Torres híbridas:** Son aquellas torres que están construidas con diferentes combinaciones de las ya mencionadas.

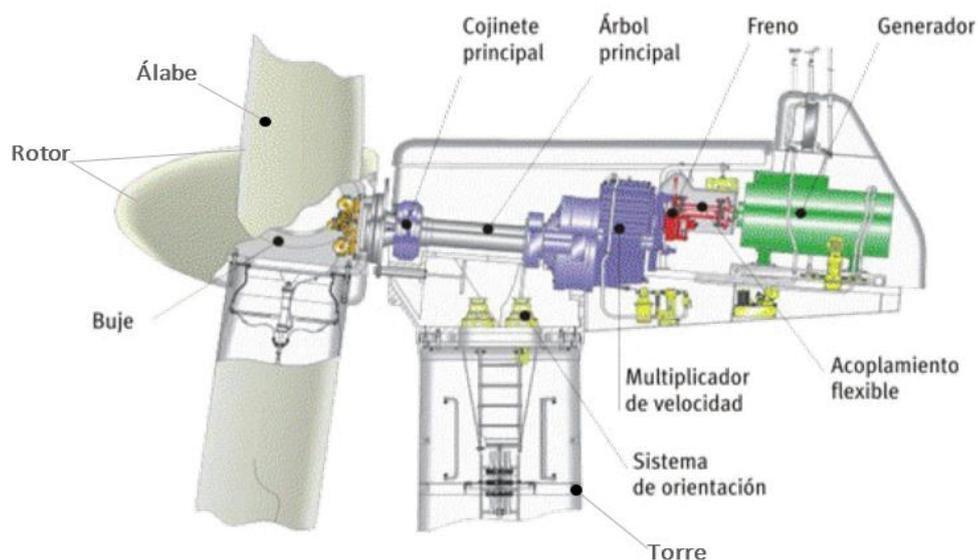


Fig. 1.4 : Componentes de un aerogenerador de eje horizontal

Fuente: (Figueredo, 2008)

También existen otros componentes como el generador eléctrico y el control que se describirán en detalle en las siguientes secciones.

1.6.4 Generador eléctrico

Según (Cuesta, Pérez, & Cabrera, 2008), el generador eléctrico es el encargado de convertir la energía mecánica de rotación en energía eléctrica que será entregada a la red o almacenada en baterías; estos generadores pueden ser:

- a) Generadores de corriente continua (dínamos)
- b) Generadores de corriente alterna
 - Síncronos (alternadores)
 - De polos constituidos por electroimanes alimentados por corriente continua
 - De polos constituidos por imanes fijos o permanentes
 - Asíncronos o de inducción
 - Jaula de ardilla
 - Rotor devanado

Los dínamos o generadores de corriente continua son máquinas eléctricas rotatorias sencillas que tienen la ventaja de no requerir sistemas especiales para almacenar la energía en baterías. Incluso generan electricidad a bajas velocidades de giro. No obstante, su uso cada vez es menor debido a que se han ido reemplazando por generadores de corriente alterna ya que tienen el inconveniente de que necesitan un mantenimiento periódico (cambio de escobillas, entre otros) aunque se debe tener en cuenta que son idóneos en aerogeneradores de muy pequeño tamaño (decenas de vatios). (Cuesta, Pérez, & Cabrera, 2008).

Dentro del grupo de generadores de corriente alterna se puede establecer los siguientes:

- **Generadores síncronos.** También llamados alternadores, se caracterizan por ser autoexcitados bien sea con corriente eléctrica continua inyectada en las bobinas del rotor mediante anillos colectores o escobillas convirtiéndolo en un imán permanente o a través de imanes permanentes.

Generalmente los generadores síncronos son trifásicos, disponen de tres devanados iguales en el estator, distribuidos de forma que queden desplazados entre sí 120°. Se denomina sincrónicos porque cuentan con la cualidad de que siempre coincide la velocidad de rotación del campo magnético del rotor con la del estator. En los generadores sincrónicos la velocidad de rotación del rotor que genera el campo magnético y la frecuencia de la señal eléctrica inducida están relacionadas a través de la ecuación. (RED RIGE-UTE):

$$f = \frac{P N}{60} \quad (1.7)$$

Donde:

f = Frecuencia eléctrica (Hz)

P = Número de pares de polos que generan el campo magnético

N = Numero de revoluciones por minuto que da el eje del rotor al generador (rpm)

Cabe mencionar que los generadores síncronos que existen son de velocidad variable, es decir suministran corrientes de frecuencia variables. De manera que, si se quiere conectar el generador a la red convencional directamente, es necesario emplear un variador de frecuencia entre el generador y la red. Este inconveniente se retribuye con una mayor eficiencia del aerogenerador y una mejor compatibilidad con la red. Principalmente, estos generadores se usan en máquinas que alimentan instalaciones autónomas, para iluminación, calefacción, entre otras. (Cuesta, Pérez, & Cabrera, 2008).

- **Generadores asíncronos o de inducción.** Se diferencia de los demás porque usa corriente de la red eléctrica para crear su campo magnético. Es decir, este tipo de generador no es capaz de operar sin la red. Aunque se utilizan sistemas electrónicos que pueden engañar a los generadores de inducción por medio de condensadores para cargar el campo magnético, logrando así que puedan ser utilizados en sistemas de potencias aislados. (Cuesta, Pérez, & Cabrera, 2008).

En síntesis, para las micro y miniturbinas eólicas el generador más utilizado que parece ser el modelo ideal, es el alternador de imanes permanentes. En los aerogeneradores de tamaño doméstico hay más diversidad. (Cuesta, Pérez, & Cabrera, 2008).

- Generador de imanes permanentes.** Es un tipo de máquina eléctrica usada con frecuencia para aplicaciones eólicas. Es actualmente el tipo de generador de elección en la mayoría de los pequeños generadores de turbinas eólicas de hasta 10kW, asimismo pueden ser usados en aerogeneradores más grandes. En estos generadores, los imanes permanentes producen el campo magnético, por tanto, no hay necesidad de devanados de campo o suministro de corriente de campo. La potencia se obtiene de una armadura inmóvil, de modo que no es necesario conmutador, anillos colectores o escobillas. En vista a su simple construcción, este generador es bastante resistente. El principio de funcionamiento es similar al de las máquinas síncronas. Habitualmente se los denomina generadores síncronos de imanes permanentes mediante las siglas PMSG. (Permanent Magnet Synchronous Generators). (Manwell, McGowan, & Rogers, 2009)

Su clasificación se da principalmente por la dirección del flujo magnético con respecto al eje de giro, estos son de tipo axial y radial.

a) Generador de flujo axial

En un generador de flujo axial los imanes se distribuyen en un disco de acero que gira alrededor de un eje perpendicular a este. De modo que el flujo generado por los imanes tiene una dirección paralela con respecto al eje de giro. (Navasquillo Hervás, s.f.).

b) Generador de flujo radial

En el generador de flujo radial los imanes se distribuyen sobre la superficie lateral de un cilindro que gira alrededor de su propio eje, es decir el flujo de los imanes es perpendicular al eje de giro. (Navasquillo Hervás, s.f.).

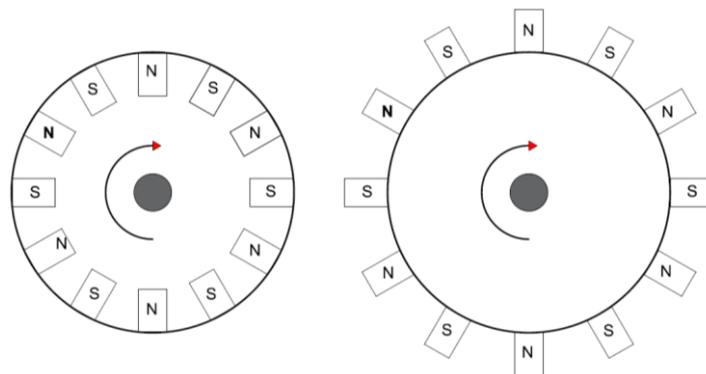


Fig. 1.5: Tipos de generador de imanes permanentes

Fuente: Autor

A continuación, se detalla conceptos relevantes para el generador de imanes permanentes.

- **Campo magnético**

El campo magnético es la región del espacio donde una carga eléctrica puntual en movimiento sufre los efectos de una fuerza que es perpendicular a su desplazamiento. El campo magnético en un punto se representa por un vector **B** llamado inducción magnética o densidad de flujo magnético y se puede visualizar por medio de líneas de inducción. Las líneas de inducción al estar muy cercanas entre sí, la magnitud de B es mayor y donde están muy separadas, la magnitud es menor. Las unidades de medida de la fuerza de campo magnético son en Gauss (G) o en Tesla (T). (Barco Ríos, Rojas Calderón, & Restrepo Parra, 2012).

- **Flujo magnético**

Representa la cantidad de líneas de inducción que atraviesa cualquier superficie.

- **Ley de Faraday – Lenz**

La ley de Faraday establece que si un flujo atraviesa una espira de alambre conductor, se inducirá en esta un voltaje directamente proporcional a la tasa de cambio del flujo con respecto al tiempo, y si el flujo pasa a través de una bobina que tiene *N* vueltas el voltaje inducido en toda la bobina está dado mediante la ecuación. (Chapman, 2005):

$$e_{ind} = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (1.8)$$

Donde:

e_{ind} = Voltaje inducido en la bobina

Φ = Flujo que atraviesa la bobina

N = Número de vueltas de alambre en la bobina

El signo negativo en la ecuación es una expresión de la ley de Lenz la cual establece que la dirección del voltaje inducido en la bobina es tal que, si los extremos de esta estuvieran en cortocircuito, se produciría en ella una corriente que generaría un flujo opuesto al flujo inicial. En vista de que el voltaje inducido se opone al cambio que lo origina es que se incluye el signo menos en la ecuación. (Chapman, 2005).

- **Imanes**

Un imán es un material u objeto que crea un campo magnético, este es invisible, pero tienen una fuerza que puede atraer o repeler otros imanes y materiales magnéticos. Sin importar la forma que tenga, tiene dos caras o extremos denominados polos donde la capacidad de atracción es mayor. Estos polos se denominan norte y sur, debido a que se predisponen a orientarse según los polos geográficos de la tierra, que es un imán gigantesco. (Cañamero, 2004).

A parte de la magnetita o imán natural existen algunos tipos de imanes fabricados con diferentes aleaciones:

- **Imanes cerámicos.** Conocidos como imanes de ferrita, son fabricados de un compuesto de óxido de hierro y carbonato de bario/estroncio. Presentan ventajas como alta resistencia a la corrosión y desmagnetización, su costo es bajo con respecto a otros imanes, por lo que se son los más utilizados hoy en día en aplicaciones como en megáfonos, microondas. Tienen la desventaja de ser frágiles y pueden romperse fácilmente. (MAGCRAFT, s.f.).
- **Imanes de alnico.** Elaborados de un compuesto de aluminio, níquel y cobalto con cantidades pequeñas de otros elementos. Tienen buena estabilidad térmica y a la desimanación, su fuerza de atracción es débil con respecto a los otros tipos de imanes. (MAGCRAFT, s.f.).
- **Imanes de samario cobalto.** Es un tipo de imán de tierras raras, presenta altas propiedades magnéticas, buena resistencia térmica llegando a soportar temperaturas de hasta 300 ° C, resistencia a la corrosión y oxidación. Este tipo de imanes tienen el inconveniente de una baja resistencia mecánica y un alto costo debido al material. (MAGCRAFT, s.f.).
- **Imanes de neodimio (NdFeB).** Es otro tipo de imán de tierras raras, considerado actualmente como el rey de los imanes por ser muy potentes. Sus propiedades son casi iguales a los imanes de samario cobalto, se diferencia en que se oxidan con facilidad y la resistencia térmica es inferior. (MAGCRAFT, s.f.).¹

¹ En el sitio web (Imanes123, 2006) se amplía la información de los imanes de neodimio (NdFeB) por su importancia en el presente trabajo de investigación.

- **Imanes flexibles.** Son fabricados a partir de un compuesto de partículas magnéticas (hierro y estroncio) en un elastómero (caucho, PVC, entre otros). La principal característica de estos imanes es su flexibilidad, por lo que tienen forma de rollos o planchas con la alternativa de que una cara del imán sea adhesiva siendo utilizados en publicidad, cierres para nevera, llaves codificadas, entre otras. (Cañamero, 2004).

1.6.5 Sistema de orientación - control

Es el que se encarga de ubicar constantemente el aerogenerador para que la dirección del viento siempre sea perpendicular al plano de rotación del rotor. Generalmente en los grandes aerogeneradores está constituido por motores eléctricos accionados por un sistema de control. (Peláez et al., 2015).

Según (Cuesta, Pérez, & Cabrera, 2008), el sistema de control es el encargado por un lado de limitar la velocidad por razones de seguridad y por otro lado optimizar el funcionamiento. De igual forma es necesario para mantener la velocidad de giro del rotor dentro de ciertos límites para obtener un alto rendimiento. En los pequeños aerogeneradores es necesario incorporar un componente denominado “cola”, el cual consiste en un auge y una veleta. Para conectarlo a la turbina se acopla el brazo a la veleta para luego acoplarla a la turbina. (Chiras, 2010). El sistema de control es diferente según el tamaño del aerogenerador; estos pueden ser:

- a) **Sistemas con ángulo de paso fijo y variación del área de captación “furling”:** Se basa principalmente en reducir el área de captación o área del rotor en posición perpendicular a la corriente de aire incidente cuando éste supera la velocidad a un valor crítico. El sistema de detección de la energía en exceso y el de actuación lo constituyen el mismo rotor y su vinculación a la torre a través de la góndola.

Para reducir la potencia lo que hace el rotor es oscilar lateralmente fuera del viento (alrededor de un eje vertical). En la práctica este tipo de control solo se usa en aerogeneradores muy pequeños (<5 kW), ya que se somete al rotor a fuerzas que varían constantemente y que a la larga pueden dañar toda la estructura, y en lugares aislados por la gran emisión de ruido acústico que producen.

b) Sistemas de ángulo de paso fijo por pérdida aerodinámica “stall regulation”. Es un sistema de control pasivo que reacciona con la velocidad del viento. En este sistema los álabes están acopladas al buje en un ángulo fijo. El perfil de los álabes es diseñado aerodinámicamente para garantizar que mientras incrementa la velocidad real del viento en la zona, el ángulo de ataque también aumente hasta llegar al punto donde empieza a perder sustentación. Las palas o álabes están ligeramente torsionadas a lo largo del eje longitudinal. Esto es así para asegurar que la pala pierda sustentación parcialmente, en lugar de hacerlo bruscamente, cuando la velocidad del viento llega a su valor crítico. La ventaja principal es que se evitan las partes móviles del rotor y un complejo sistema de control.

No obstante, aplicar este sistema representa un problema de diseño muy complejo en la dinámica estructural de toda la turbina, a fin de evitar las vibraciones generadas por la pérdida de sustentación. Aproximadamente las dos terceras partes de los aerogeneradores que actualmente se están instalando en todo el mundo son máquinas de regulación por pérdida aerodinámica.

c) Sistemas con ángulo de paso variable o “pitch regulation”. Este método consiste en que los álabes varían su ángulo de incidencia con respecto al viento. En este sistema se emplea un ordenador el cual comprueba varias veces por segundo la potencia generada. Cuando ésta alcanza un valor excesivo, el controlador envía una orden al dispositivo de cambio de ángulo de paso, que rápidamente hace girar los álabes del rotor ligeramente fuera del viento. Y de forma inversa, los álabes son vueltas hacia la dirección del viento cuando ésta disminuya de nuevo.

El diseño de aerogeneradores controlados por este tipo de sistema requiere una ingeniería muy desarrollada para asegurar que los álabes giren exactamente al ángulo deseado. El dispositivo de cambio de ángulo suele funcionar de forma hidráulica. Este tipo de sistemas es más habitual en aerogeneradores de gran potencia, así como también en turbinas eólicas que operan en paralelo con grupos electrógenos (sistemas mixtos eólicos-diésel).

d) Sistema de regulación activa por pérdida aerodinámica: Muchos de los grandes aerogeneradores (a partir de 1MW) están siendo construidos con este sistema. Conceptualmente, las máquinas de regulación activa por pérdida aerodinámica se parecen a las de regulación por cambio del ángulo de paso, de modo que ambos tienen los álabes que pueden girar. Para tener un momento de flexión (fuerza de giro) moderadamente alto a bajas velocidades del viento, este tipo de máquinas serán programadas para girar sus palas como las de regulación de cambio del ángulo de paso a bajas velocidades del viento. Aunque cuando la máquina llega a su potencia nominal, este tipo de máquinas tienen una gran diferencia con respecto a las máquinas reguladas por cambio del ángulo de paso: si el generador va a sobrecargarse la máquina aumentará el ángulo de paso de las palas para llevarlas hasta una posición de mayor pérdida de sustentación, y poder así consumir el exceso de energía del viento.

Una de las ventajas de este sistema es que se puede controlar de forma más precisa la producción de potencia a fin de evitar que al principio de una ráfaga de viento la potencia nominal sobrepase. Otra de las ventajas es que la máquina puede operar casi exactamente a la potencia eléctrica a altas velocidades de viento. El dispositivo de cambio del ángulo de paso suele funcionar mediante sistemas hidráulicos o motores eléctricos paso a paso.

1.6.6 Otros componentes de un sistema de generación eólica

(Cuesta, Pérez, & Cabrera, 2008), menciona que aparte de los componentes del aerogenerador vistos anteriormente, para poner en marcha un pequeño sistema de generación eólica se requiere de un equipo adicional constituido por los siguientes elementos:

- a) Sistemas de almacenamiento:** se lo emplea en sistemas que no se encuentran conectados a la red a fin de disponer de la energía en periodos de viento flojo o de calma para diferentes aplicaciones. Este sistema puede ser:
- **Baterías:** es el sistema más utilizado en la actualidad, para almacenar la electricidad generada por la turbina. Permite construir sistemas de baja potencia, adecuados para balizas, repetidores de señal, estaciones de adquisición de datos y puestos de socorro remotos. Tienen un rendimiento entre el 0% y 75%. No es adecuado para aerogeneradores grandes por su elevado coste y dificultades de mantenimiento.

- **Acumulación térmica:** se puede almacenar la energía extraída del viento para calentar agua, de forma directa a través de un freno hidráulico o por calentamiento de resistencias eléctricas tras la conversión a electricidad. El agua es almacenada y el beneficio energético posterior sería adecuado sólo si se requiere en forma calorífica.

b) Inversores: se utilizan para transformar la corriente continua (CC) generada por los generadores eólicos, paneles solares fotovoltaicos, acumuladores o baterías, entre otros, en corriente alterna (CA) para poder ser inyectada en la red eléctrica o usada en instalaciones eléctricas aisladas. Estos inversores pueden ser:

- **Inversores de onda sinusoidal:** utilizados en sistemas que no están conectados a la red eléctrica. Utilizan la corriente continua de un sistema de almacenamiento con baterías y producen una corriente alterna de onda sinusoidal parecida a la de la red, aunque no idéntica.
- **Inversores síncronos:** estos inversores emplean conmutadores RCS (Rectificador Controlado de Silicio) con controles analógicos con el objetivo de señalar cuando deben enviar pequeñas señales eléctricas a la red, ya que necesitan la presencia de la red eléctrica para su funcionamiento.
- **Inversores autoconmutados:** estos tienen la capacidad de producir electricidad compatible con la red usando su propio circuito interno, con controles IGBT (compuerta integrada con transistores bipolares) y digitales, optimizando considerablemente la fiabilidad y calidad de la potencia con respecto a los modelos sincronizados mediante la propia red. Estos inversores tienen la misma tecnología que los inversores de onda sinusoidal vistos anteriormente.

En los sistemas nuevos, cuando la demanda eléctrica excede al suministro y las baterías están cerca de la descarga total, el inversor toma potencia de la red de forma automática hasta que éstas resulten recargadas, asimismo, cuando hay un exceso de generación con respecto a la demanda y las baterías están totalmente cargadas, el inversor puede proporcionar el exceso de potencia a la red. Inclusive, si el sistema de potencia de la red falla, el inversor cambia a un sistema aislado con baterías automáticamente.

- c) Rectificadores y cargadores de baterías.** Los rectificadores son aquellos dispositivos electrónicos para convertir CA (corriente alterna) en CC (corriente continua). En caso de que el generador no disponga de una salida de la carga de la batería, un cargador es obligatorio. Existen algunos inversores que pueden actuar como cargadores de batería.(Cuesta, Pérez, & Cabrera, 2008).

1.7 Funcionamiento del aerogenerador en conjunto

(Solano, 2013), dice que para poner en funcionamiento un aerogenerador se debe ensamblar los componentes descritos anteriormente por lo que para una mejor comprensión se explicará este proceso en etapas:

1. La energía cinética captada por las aspas del aerogenerador hace que las mismas se muevan produciendo de esta manera la energía mecánica que será aprovechada (del rotor al acoplamiento del generador). En esta etapa el mecanismo de control que mediante el sistema de orientación (veleta) hace que el recurso eólico sea aprovechado de manera eficiente.
2. La energía mecánica captada por las aspas es convertida en energía eléctrica por el generador de imanes permanentes generando así corriente alterna y mediante un regulador de carga convierte la corriente alterna a continua además evita que el generador dañe el sistema de almacenamiento.
3. La energía producida por el generador eólico es almacenada en un acumulador (baterías de corriente directa) misma que se mantiene en ella. También se puede emplear un banco de baterías en conexión estrella-delta que permite mantener más energía almacenada.
4. Si se desea usar en instalaciones eléctricas aisladas o inyectar a la red se utiliza inversores para transformas la corriente continua (CC) a corriente alterna (CA).

1.8 Aplicaciones de los aerogeneradores de baja potencia

De manera general existen dos aplicaciones de la energía generada por aerogeneradores de baja potencia: instalaciones aisladas e instalaciones conectadas a la red eléctrica. (Cuesta, Pérez, & Cabrera, 2008).

1.8.1 Instalaciones aisladas de la red eléctrica

Los pequeños aerogeneradores pueden ser una fuente de abastecimiento de electricidad económico para sitios aislados. La aplicación más común de sistemas aislados es la electrificación de viviendas rurales, para lo cual existen diferentes configuraciones. (Cuesta, Pérez, & Cabrera, 2008).

- a) **Sistemas individuales:** Habitualmente, cuentan con un pequeño aerogenerador, una o más baterías para almacenar la energía generada y un regulador para controlar la carga y descarga de las baterías. Según la aplicación, pueden incluir un inversor para convertir la electricidad de corriente continua a alterna. Los aerogeneradores de baja potencia pueden ser empleados sin conectar a la red eléctrica en diferentes aplicaciones, generalmente para cargar baterías, proporcionando tanto corriente continua como alterna con la ayuda de inversores o rectificadores, con los modernos sistemas de control electrónicos pueden ser usados para poner en marcha bombas eléctricas directamente, sin emplear baterías así como también pueden ser empleados para la calefacción de viviendas, entre otros usos. (Cuesta, Pérez, & Cabrera, 2008).
- b) **Sistemas centralizados:** Son sistemas empleados cuando existen un grupo de viviendas próximas entre sí debido a la concentración de equipos y energía, ofreciendo ventajas desde los puntos de vista técnico y económico. Este tipo de sistema satisface la demanda energética de una comunidad con electricidad generada, almacenada y transformada en un “sistema eólico central” para luego ser distribuida a través de líneas eléctricas, hasta cada una de las viviendas. Un sistema eólico centralizado generalmente cuenta con más de una fuente de generación, para lograr mayor confiabilidad del sistema. (Cuesta, Pérez, & Cabrera, 2008).
- c) **Sistemas híbridos:** Son aquellos sistemas que usan una turbina eólica en combinación con otra fuente de generación: por ejemplo, paneles fotovoltaicos o un generador eléctrico a base de diésel, y una de las mayores ventajas que presentan con respecto a un sistema individual es que brindan una mayor seguridad para la generación de electricidad. (Cuesta, Pérez, & Cabrera, 2008).

La utilización de varias formas de generación de energía eléctrica aumenta la complejidad del sistema y exige la optimización del uso de cada una de las fuentes; en estos casos es necesario realizar un control de todas las fuentes a fin de que haya máxima eficiencia en la entrega de la energía para el usuario. Generalmente los sistemas híbridos se emplean en sistemas de medio y gran tamaño, destinados a atender a un número mayor de usuarios. (Rodríguez, Youssef, & Salgueirinho, 2011).

1.8.2 Instalaciones conectadas a la red eléctrica

Si la ley del sector eléctrico lo permite, se tendría la oportunidad de proporcionar energía a la red con pequeños sistemas eólicos. Lo que significaría que la energía requerida por el usuario sería proporcionada por el sistema eólico y por la red eléctrica. Si el aerogenerador produce energía eólica en exceso, se entrega el resto a la red eléctrica y, si genera menos energía de la requerida, se toma de la red. El almacenamiento de la electricidad es opcional, y en caso de que se implemente se requiere de dispositivos rectificadores de corriente alterna para la carga de las baterías e inversores de corriente continua. (Cuesta, Pérez, & Cabrera, 2008).

1.8.3 Energía eólica en el entorno urbano

En la actualidad se está generando una tendencia por introducir de la energía eólica en el medio urbano de manera que se están desarrollando un nuevo tipo de aerogeneradores llamados turbinas urbanas (TU). La apariencia de estas pequeñas turbinas permite integrarlas en el panorama urbano ya que pasan desapercibidas entre el paisaje y no ocupan terrenos de cultivo. (Figueroa, 2010).

Una de las características principales que presenta los aerogeneradores urbanos es la capacidad para acercar físicamente la producción de electricidad al usuario final, por lo que ofrece al consumidor la oportunidad de generar su propia electricidad. No obstante, esta tecnología aún no está muy desarrollada debido a que la investigación no le dedica, a las turbinas urbanas, los mismos recursos que a las grandes turbinas. Asimismo, los vientos del entorno urbano no son los mejores para obtener una gran eficiencia energética con aerogeneradores de eje horizontal, la velocidad media del viento en la ciudad es menor que en los sectores rurales; además no es constante, sino que cambia rápida y frecuentemente, del mismo modo que lo hace la dirección. Y, por otra parte, se debe tener en cuenta las turbulencias, que exigen a la turbina a girar a velocidades variables y a cambiar frecuentemente su orientación para seguir la dirección del viento. (Cuesta, Pérez, & Cabrera, 2008).

En este capítulo se ha abarcado de manera general conceptos que fundamentan el tema propuesto, se ha detallado el funcionamiento, componentes y aplicación de los sistemas de generación eólica, profundizando sobre los pequeños sistemas. También se ha hecho énfasis en un componente principal como lo es el generador eléctrico orientándose principalmente en el generador síncrono de imanes permanentes por ser el tipo de máquina eléctrica usada con mayor frecuencia en pequeños sistemas de generación de electricidad.

Es así que en el siguiente capítulo se detalla la metodología para construir un prototipo para microgeneración eólica que a futuro puede ser implementado por el usuario final con el resto de los componentes.

CAPÍTULO 2

2 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO

Este capítulo tiene como objetivo detallar el diseño de un generador para microgeneración eólica considerando sus partes mecánicas y sus partes eléctricas, luego se explica la construcción de este y los aspectos principales considerados para su elaboración.

2.1 Descripción del generador

El generador que se tiene previsto diseñar y construir es un generador síncrono trifásico de flujo axial el cual está constituido de dos partes principales:

Rotor. Constituido principalmente por imanes (rotores magnéticos) montados en discos de acero que giran sobre un cubo. Los imanes están colocados uno frente al otro, generando así un flujo magnético en el espacio entre ellos. Los polos son las caras más grandes de los imanes; los discos de acero detrás de ellos completan el “circuito” magnético entre los polos traseros de los imanes.

Estatore. Contiene bobinas de alambre de cobre del tipo núcleo de aire, donde se induce voltaje producto del flujo variable que produce el campo magnético de los imanes permanentes ubicados en el rotor frontal y posterior. Cada bobina producirá una tensión alterna CA cuando los polos magnéticos alternan sobre ella (norte, sur, norte, sur, etc.). El estator se encuentra en una base o estructura fija inmóvil.

El generador produce corriente alterna trifásica es decir que en el estator las bobinas están dispuestas en tres fases o tres grupos para hacer más eficiente el uso del espacio disponible entre los imanes y que la tensión rectificadora sea más suave.

El generador se muestra a continuación en la figura 2.1 desensamblado:

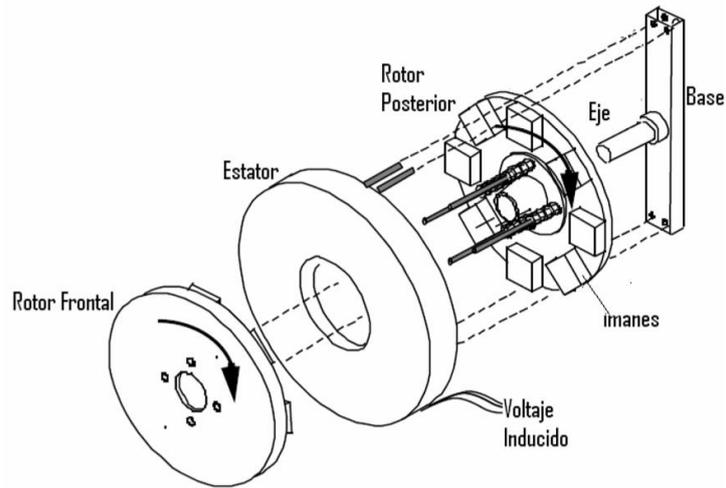


Fig. 2.1: Estructura de un generador de flujo axial de imanes permanentes

Fuente: (Baillarie Rosenmann, 2007)

2.2 Diseño del generador

2.2.1 Elección de los imanes

Para la construcción de los rotores magnéticos se han escogido imanes de neodimio de grado de magnetización N40 por razones económicas y tener una calidad intermedia de los tipos de imanes de grado “N” que se encuentran en oferta, los imanes son rectangulares con dimensiones de 46x30x10mm (Figura. 2.2). Características generales (Anexo A).

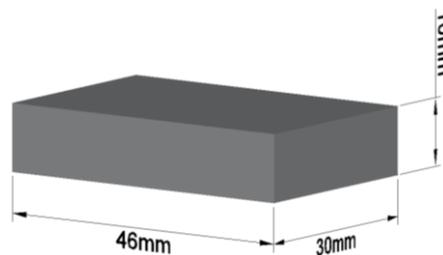


Fig. 2.2 : Tamaño de los imanes elegidos

Fuente: Autor

2.2.2 Cálculo de la densidad de flujo magnético

Para determinar la densidad de flujo magnético B del imán se utiliza la siguiente ecuación:

$$B = \frac{Br}{\pi} \left[\tan^{-1} \left(\frac{LW}{2z\sqrt{4z^2 + L^2 + W^2}} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{LW}{2(D+z)\sqrt{4(D+z)^2 + L^2 + W^2}} \right) \right] \quad (2.1)$$

Esta ecuación es aplicable solo para imanes rectangulares (Supermagnete, s.f.).

Donde:

B = Densidad de flujo magnético (T)

B_r = Campo remanente, independientemente de la geometría del imán

z = Distancia sobre el eje de simetría de una superficie polar

L = Longitud del cubo

W = Ancho del cubo

D = Altura del cubo

Se puede elegir cualquier unidad de longitud, siempre y cuando esta sea igual para todas las longitudes.

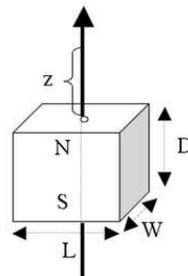


Fig. 2.3: Esquema representativo de variables para aplicar la fórmula densidad de flujo

Fuente: (Supermagnete, s.f.)

El valor de z será 11mm equivalente a la distancia media entre los imanes a la que estarán distanciados de cada rotor magnético; al utilizar imanes de grado N40 el valor de B_r se obtiene de las especificaciones técnicas dadas por el fabricante en la tabla 2.1:

Tabla 2.1: Tabla de especificaciones técnicas de los imanes seleccionados

Remanence B_r				Coercitive force bH_c				Intrinsic coercive force iH_c	
kGs		T		kOe		kA/m		kOe	kA/m
Nom.	Min.	Nom.	Min.	Nom.	Min.	Nom.	Min.	Nom.	Min.
12.9	12.6	1.29	1.26	11.0	10.5	876	836	≥ 12	≥ 955
Maximum energy product (BH)max				Working temperature					
MGOe		kJ/m		°C					
Nom.	Min.	Nom.	Min.						
40	38	318	303						

Fuente: (Magnetdealz, s.f.)

Elaborado por: Autor

Se utiliza el valor mínimo de B_r : 1,26 T, al considerar que perderá parte de su campo magnético al ser recubierto con resina de poliéster y una capa de tela de fibra de vidrio.

Reemplazando los datos en la ecuación (2.1) se tiene:

$$B = 0,14 \text{ T}$$

Para demostrar el resultado de densidad de flujo magnético o inducción magnética se realizó el modelado del imán en el programa FEMM (Finite Element Method Magnetics) considerando dimensiones, grado de magnetización y distancia de separación, como se indica en la figura 2.4.

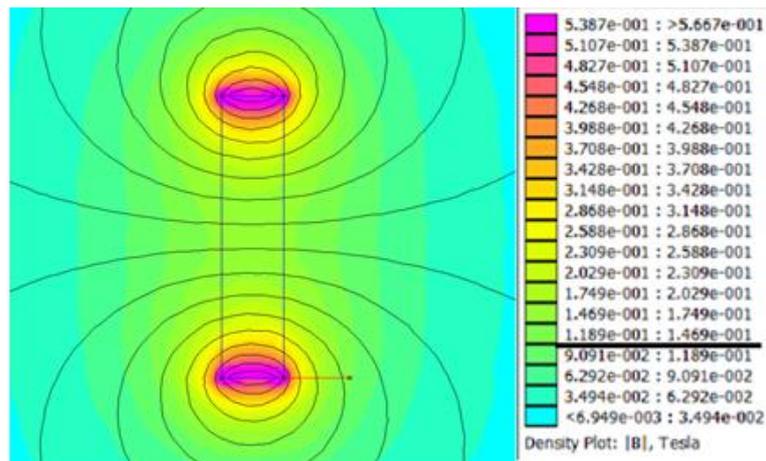


Fig. 2.4: Modelado de un imán permanente vista lateral

Fuente: Autor

En el modelado se tiene como resultado 0,146 que es aproximadamente igual al valor calculado.

Como los imanes se van a colocar sobre una placa de acero de bajo carbono ASTM A36 se realiza el modelado y se observa que el valor del flujo se duplica (0,27) por efecto de concentración y aislamiento magnético según se observa en el modelado (figura 2.5).

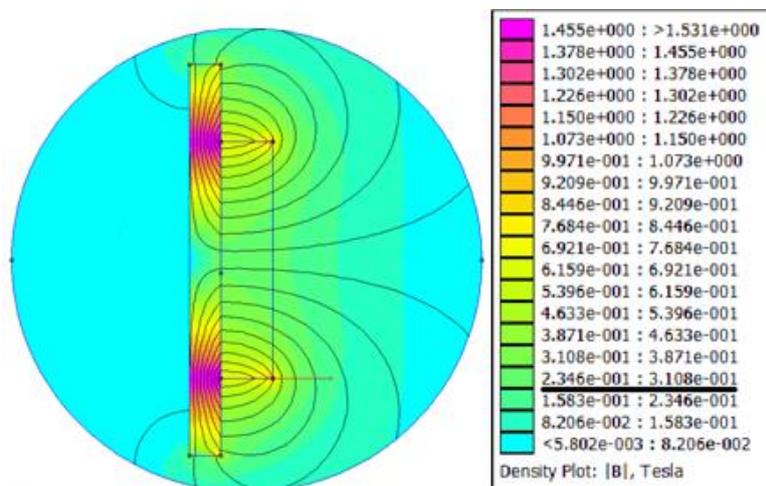


Fig. 2.5: Modelado de la inducción magnética de un imán unido a una placa de acero (ASTM A36) vista lateral

Fuente: Autor

Por último, se analiza el sistema de dos placas con imanes enfrentados (Figura. 2.6) por ser la forma en que irán acoplados.

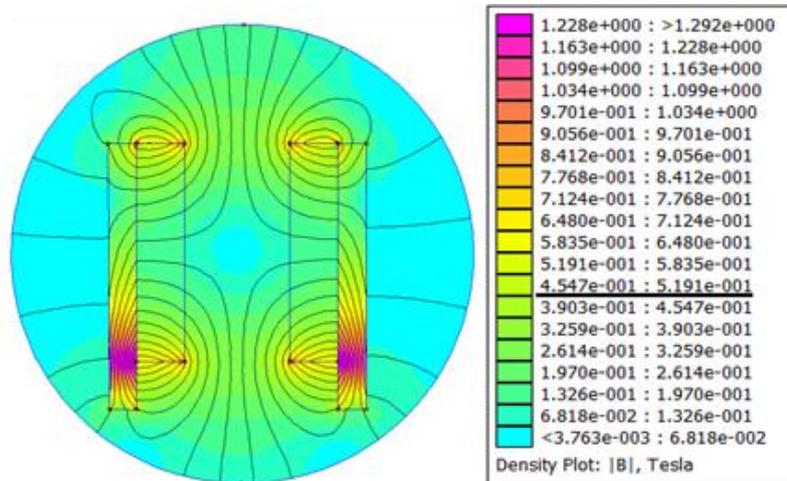


Fig. 2.6: Modelado de dos placas con imanes enfrentados vista lateral

Fuente: Autor

En el software se puede observar que el flujo entre los discos magnéticos es de 0.519 T, por lo que se utilizará este valor aproximado a su inmediato inferior (0,50 T) para los cálculos posteriores.

2.2.3 Determinación del número de revoluciones

Para conocer el número de revoluciones de un aerogenerador es necesario conocer un parámetro importante en el diseño de aerogeneradores que se conoce como la razón de velocidad de punta (λ) y es la relación entre la velocidad punta del perfil NACA y de la velocidad del viento real como se indica en la ecuación. (Piggott, 2009):

$$\lambda = \frac{wR}{V} \quad (2.2)$$

Donde:

λ : Razón de velocidad de punta "lambda" (se utilizará un valor recomendado de 7 para todos los cálculos). (Piggott, 2009)

w = Velocidad angular (rad/s)

R = Radio del álabe (m) (se utilizará 1,5 para todos los cálculos)

V = Velocidad del viento (m/s)

Para calcular la velocidad en rpm se emplea la ecuación 2.1, solo que se hace la transformación de rad/s a rpm.

Siendo N (rpm):

$$N = \frac{60\omega}{2\pi} \quad (2.3)$$

Se deja el número de revoluciones en función de las variables anteriores:

$$N = \frac{30\lambda V}{R\pi} \quad (2.4)$$

2.2.4 Definición de polos y bobinas

Como el generador que se pretende diseñar es síncrono trifásico, el número de polos que tendrá el generador se relaciona directamente con la frecuencia eléctrica del voltaje que se desea generar, mediante la ecuación 1.7:

$$f = \frac{P N}{60}$$

Despejando N se tiene:

$$N = \frac{60 f}{P}$$

Igualando las ecuaciones (1.7) y (2.4) se tiene:

$$\frac{60 f}{P} = \frac{30\lambda V}{R\pi}$$

Despejando la variable de par de polos " P " se tiene:

$$P = \frac{2 f R \pi}{\lambda V} \quad (2.5)$$

Utilizando la ecuación anterior, teniendo en cuenta los valores del radio del álabe, la razón de velocidad de punta " λ " mencionados anteriormente, el valor de la frecuencia se ha ido aumentando paulatinamente como máximo de 60 Hz por ser la que se dispone en la red eléctrica así como también el valor de la velocidad del viento se ha ido aumentando desde 1 m/s hasta 10m/s cabe destacar que con una velocidad desde 3m/s es adecuada para comenzar a producir energía hasta 10 m/s donde la turbina alcanza casi toda la potencia máxima teniendo la siguiente tabla:

Tabla 2.2: Determinación del número de par de polos

Velocidad 3m/s		Velocidad 4m/s		Velocidad 5m/s		Velocidad 6m/s	
Frecuencia (Hz)	Numero de par de polos	Frecuencia (Hz)	Numero de par de polos	Frecuencia (Hz)	Numero de par de polos	Frecuencia (Hz)	Numero de par de polos
10	4,49	10	3,37	10	2,69	10	2,24
20	8,98	20	6,73	20	5,39	20	4,49
30	13,46	30	10,10	30	8,08	30	6,73
40	17,95	40	13,46	40	10,77	40	8,98
50	22,44	50	16,83	50	13,46	50	11,22
60	26,93	60	20,20	60	16,16	60	13,46
Velocidad 7m/s		Velocidad 8m/s		Velocidad 9m/s		Velocidad 10m/s	
Frecuencia (Hz)	Numero de par de polos	Frecuencia (Hz)	Numero de par de polos	Frecuencia (Hz)	Numero de par de polos	Frecuencia (Hz)	Numero de par de polos
10	1,92	10	1,68	10	1,50	10	1,35
20	3,85	20	3,37	20	2,99	20	2,69
30	5,77	30	5,05	30	4,49	30	4,04
40	7,69	40	6,73	40	5,98	40	5,39
50	9,62	50	8,41	50	7,48	50	6,73
60	11,54	60	10,10	60	8,98	60	8,08

Fuente: Autor

Elaborado por: Autor

Según se puede observar en la tabla anterior a medida que aumenta la frecuencia más polos se necesitan, de igual forma si la velocidad del viento es baja se requiere mayor número de polos para llegar a la frecuencia requerida. Se ha elegido un número de 12 pares de polos; es decir 24 imanes con campo magnético permanente garantizando una distribución adecuada de los imanes. El valor de la frecuencia de funcionamiento del generador no debe ser demasiado alto debido a que en la rectificación de corriente se obtiene corriente directa que carece de frecuencia.

El número de bobinas óptimo a utilizar está directamente relacionado con el número de polos mediante la siguiente ecuación:

$$n_{coil} = \frac{3}{4} * P \quad (2.6)$$

Donde:

n_{coil} = Número total de bobinas

Por lo que en este caso al reemplazar $P = 12$, resulta el uso de 9 bobinas. Cabe destacar que el generador al ser una maquina trifásica constará de tres bobinas por fase.

2.2.5 Cálculo del voltaje promedio frente a la velocidad

El voltaje promedio depende de la velocidad de cambio del flujo magnético a través de la bobina. En cada revolución, este flujo cortará los cables dos veces: una vez que ingresa a una bobina y otra que sale. Entonces el voltaje de línea se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$V_{PROMEDIO} = 2 * \Phi * n * \frac{N}{60} \quad (2.7)$$

Donde:

V_L = Voltaje de línea

Φ = Flujo total.

n = Número de vueltas por grupo de bobinas en serie

El flujo total se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\Phi = A * B \quad (2.8)$$

Donde:

A = Área (m²)

Reemplazando las variables del flujo total, número de vueltas por grupo de bobinas en serie, y N la ecuación del voltaje promedio es:

$$V_{PROMEDIO} = A * B * n * \frac{N}{30} \quad (2.9)$$

2.2.6 Cálculo del voltaje en corriente continua

Para determinar el voltaje en corriente continua a la salida del rectificador se tiene la siguiente ecuación:

$$V_{CC} = 2,72 * A * B * n * \frac{N}{30} - 1,4 \quad (2.10)$$

Donde:

V_{CC} = Voltaje en corriente continua

Siendo 2,72 el factor que indica la combinación de las tres fases en los cables de salida para aumentar el voltaje promedio por un factor de raíz de 3 o 1,73, además el voltaje pico será más alto que el medio con un valor de 1,57 suponiendo una salida de onda sinusoidal el producto de los dos factores da como resultado el factor mostrado en el inicio de la ecuación ($2,72 = 1,73 \times 1,57$). Finalmente, el factor de 1,4 representa aproximadamente la caída de voltaje en los diodos del rectificador (Piggott, 2009).

2.2.7 Numero de vueltas de bobina por fase

Para encontrar el número de vueltas de bobina por fase requeridas para un determinado número de revoluciones, se necesita convertir la ecuación anterior de esta manera:

$$n = \frac{(V_{cc} + 1,4) * 11}{A * B * N} \quad (2.11)$$

$V_{cc} = 48$ (V) (Se define como el voltaje en corriente continua a generar)

$A = 0,0138$ m² (0,046 x 0,03)

$B = 0,50$ (T) (0,50)

$N = 300$ (rpm) (Se define como las rpm a las que girará el generador)

$n = (48 + 1,4) \times 11 / (0,0138 \times 0,50 \times 300) = 543,4 / 2,07 = 270$ vueltas

(Total por fase) = 90 vueltas por cada bobina

Remplazando con los datos anteriores en la ecuación (2.11) se tiene el número de vueltas en cada bobina.

2.2.8 Sección del cable a usar

Para determinar la sección del cable a usar se debe calcular el área de sección transversal que puede caber en la bobina por lo que se debe conocer las dimensiones de la bobina, las mismas que quedan determinadas por las medidas del imán, el tamaño y grosor del estator. También influye el “ancho de la diagonal de la bobina” que depende en gran medida del espaciado de los imanes y este está limitado por el tamaño de las bobinas que se ajustan una al lado de otra.

El área de sección transversal de cobre que puede caber en la bobina se puede calcular con la ecuación:

$$\emptyset_{coil} = \phi_{coil} * E_{coil} * 0,5 \quad (2.12)$$

Donde:

\emptyset_{coil} = Área de sección transversal de la bobina (mm²)

φ_{coil} = Diagonal de bobina (mm). (21mm)

E_{coil} = Espesor de bobina (mm). (14mm)

El factor 0,5 representa el espacio que puede llegar a existir entre las espiras y de qué tan apretadas se encuentren.

En la figura 2.7 se puede observar cuál es la diagonal de bobina y el espesor.

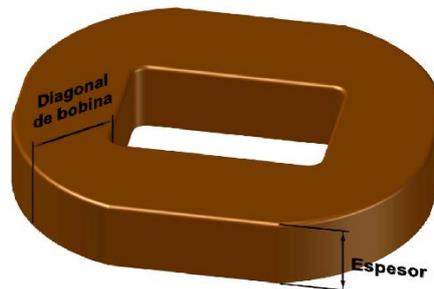


Fig. 2.7: Representación de las medidas de una bobina con núcleo de aire

Fuente: Autor

Una vez determinado el área transversal de la bobina se podrá determinar la sección del alambre mediante la siguiente ecuación:

$$\emptyset = \frac{\emptyset_{coil}}{n} \quad (2.13)$$

Donde:

\emptyset = Sección del alambre (mm²).

Para el generador cuyo estator tiene nueve bobinas con 90 vueltas cada una, se puede decir que el cobre disponible será

Milímetros cuadrados de cobre = $273 \times 0.5 / 90 = 1,63 \text{ mm}^2$

Como se puede observar el diámetro del conductor calculado es 1,63mm² por lo que se usará un cable 14 AWG el cual cumple con el diámetro de sección calculado (Anexo B).

2.2.9 Distribución de las bobinas

Como ya se determinó anteriormente se tiene nueve bobinas y quedan distribuidas por el agujero circular que debe quedar para el paso de los pernos de los rotores denominado “isla” que es un molde circular de madera (Figura. 2.8), el diámetro de la isla (D_{IS}) es de 150mm. (Piggott, 2009). El borde interior de las bobinas se ubica a 8mm del diámetro de la isla para rellenar con resina y fibra de vidrio picada, con esto se asegura el completo aislamiento de las bobinas y corrosión al estator terminado.



Fig. 2.8 : Disposición de bobinas alrededor de la “isla”

Fuente: Autor

2.2.10 Diseño de los discos para los rotores magnéticos

Para el dimensionamiento de los discos en milímetros se debe considerar el diámetro de la isla (D_{IS}), la diagonal de la bobina (φ_{coil}), la longitud del imán permanente (L_{IP}).

$$D_R = D_{IS} + \varphi_{coil} + L_{IP} + 16mm \quad (2.14)$$

Donde:

D_R = Diámetro del disco para los rotores magnéticos (mm)

L_{IP} = Longitud del imán permanente (mm)

Reemplazando los datos en la ecuación anterior da como resultado 300mm.

2.2.11 Distribución de los imanes

El diámetro interior para su distribución simétrica es la suma del diámetro de la isla, diagonal de bobina, distancia entre bobina e isla que es el espacio para rellenar con resina y asegurar el recubrimiento completo de las bobinas; esta distancia es de 16mm.

Por lo que el diámetro interno para ubicar los imanes permanentes (D_{IMP}) expresado en milímetros es:

$$D_{IMP} = D_{IS} + 2(\phi_{coil}) + 16 \quad (2.15)$$

Reemplazando los datos en la ecuación, el diámetro interno para ubicar los imanes es de 208mm.

2.2.12 Ubicación de los imanes según su polaridad

La ubicación de los imanes según su polaridad será de forma alternada (N – S – N...) en el primer disco marcar la polaridad del primer imán permanente para alternar en el segundo disco magnético tal como se indica en la figura 2.9. (Piggott, 2009).

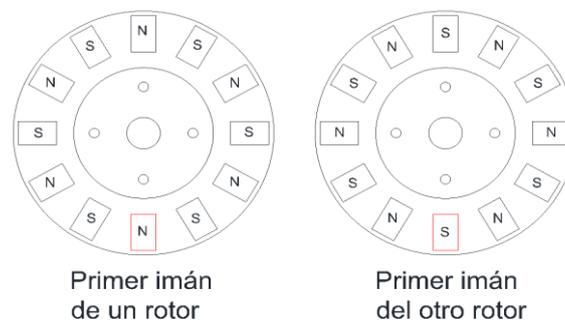


Fig. 2.9: Posición de imanes en discos

Fuente: Autor

2.3 Construcción del generador

2.3.1 Estructura

La estructura es la parte que soportará en si todas las partes del generador por lo que se construirá con ángulos de 50x50x6mm. Tendrá forma de “T”, en sus extremos se realizarán perforaciones para sujetar el estator (figura 2.9). (Piggott, 2009).



Fig. 2.9: Estructura metálica

Fuente: Autor

2.3.2 El buje

Para sostener el generador a la estructura de soporte y mantener el movimiento de rotación axial en los rotores magnéticos, se recomienda un buje o manzana de llanta trasera de un vehículo pequeño con cuatro pernos de sujeción. (Piggott, 2009). Por lo que se escogió la manzana o cubo de un vehículo marca Chevrolet Aveo Emotion.



Fig. 2.10: Cubo o manzana para utilizar como buje del generador

Fuente: Autor

Cabe mencionar que se debe tener en cuenta la dimensión del diámetro del cubo para el diámetro de la isla (D_{IS}) del estator.

2.3.3 El eje

El eje es un elemento importante del generador ya que sobre él va montado el buje con su debido rodamiento y sobre este los dos rotores, este soportará el peso de los discos magnéticos incluido el buje por lo que es recomendable usar un eje o punta de llanta trasera de un vehículo pequeño. (Piggott, 2009). Es así que se escogió el eje o punta para la manzana descrita en la parte anterior.



Fig. 2.11: Eje para generador

Fuente: Autor

2.3.4 Rodamiento

El rodamiento usado es de bolas con contacto angular, no fue necesario adquirirlo por separado debido a que viene incluido con el cubo.

2.3.5 Construcción de bobinas

El tipo de bobina que se construirán serán de núcleo de aire por lo que este quedará determinado por la dimensión de los imanes (46mm x 30 mm), con un espesor de 14mm, para esto se construirá una máquina bobinadora manual que puede ser de madera para evitar dañar el alambre esmaltado (figura 2.12). Tanto al empezar como al terminar de enrollar el alambre se dejará una longitud de 150 mm para su posterior conexión y sujetar con cinta la bobina terminada para evitar que pierda su forma una vez sea extraída de la bobinadora (figura 2.13). (Piggott, 2009).



Fig. 2.12: Bobinadora manual

Fuente: Autor



Fig. 2.13: Bobina terminada

Fuente: Autor

2.3.6 Conexión de bobinas

La conexión de las bobinas será en serie/estrella, como se tiene nueve bobinas el diagrama de conexión es como se muestra a continuación en la figura 2.14:

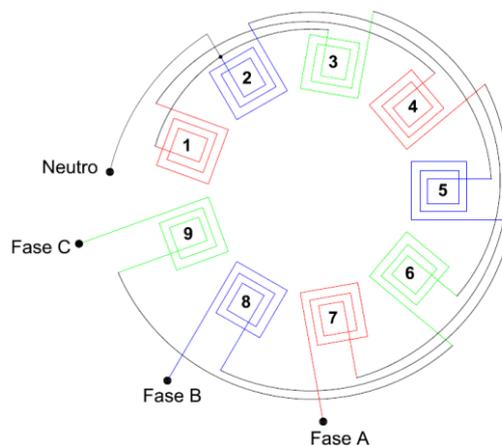


Fig. 2.14: Diagrama de conexión de bobinas

Fuente: Autor

El primer grupo de bobinas lo forma las bobinas 1,4 y 7 el segundo las bobinas 2, 5 y 8 y finalmente el tercer grupo será las bobinas 3, 6 y 9; los inicios de las bobinas 1,2 y 3 irán conectados entre sí, para formar el punto común del neutro y los terminales de las bobinas 7 8 y 9 serán las salidas de las tres fases A, B y C respectivamente. (Piggott, 2009). Cabe señalar que la salida del neutro se conectará para realizar las pruebas de funcionamiento.

Para aislar los puntos de conexión ente las bobinas se usarán espaguetis termo contraíbles y conductor flexible del mismo calibre AWG para los terminales (Figura. 2.15). (Piggott, 2009). Finalmente, al terminar de conectar las nueve bobinas es importante realizar la prueba de continuidad para verificar la conexión de las bobinas.

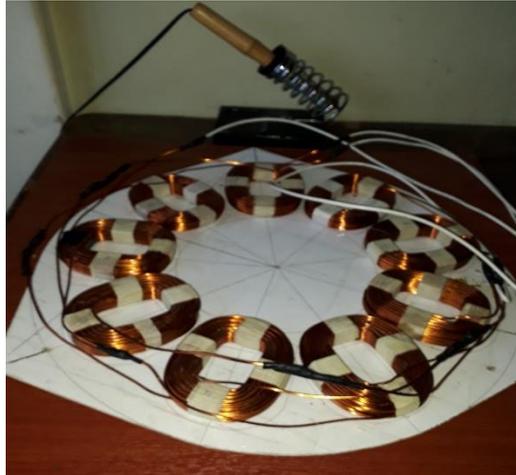


Fig. 2.15: Conexión de bobinas

Fuente: Autor

2.3.7 Construcción final del estator

Para construir el estator será necesario tener las bobinas previamente construidas y conectadas según el diagrama propuesto. Para obtener el estator final se fundirá con resina de poliéster y tela de fibra de vidrio picada para aumentar su resistencia sobre un molde de madera (MDF) previamente construido. (Piggott, 2009).



Fig. 2.16: Molde para fundir las bobinas

Fuente: Autor



Fig. 2.17: Estator de generador fundido

Fuente: Autor

2.3.8 Construcción de los rotores magnéticos

Los discos metálicos para construir los rotores magnéticos se obtendrán de una plancha tipo ASTM A36 de un espesor de 10mm. Los cortes se realizaron con la ayuda del pantógrafo; cabe señalar que el mecanizado consistió en desbastar los discos a 6mm por aspectos constructivos, y perforaciones. Este proceso fue realizado con la ayuda del torno, y taladro de presión.

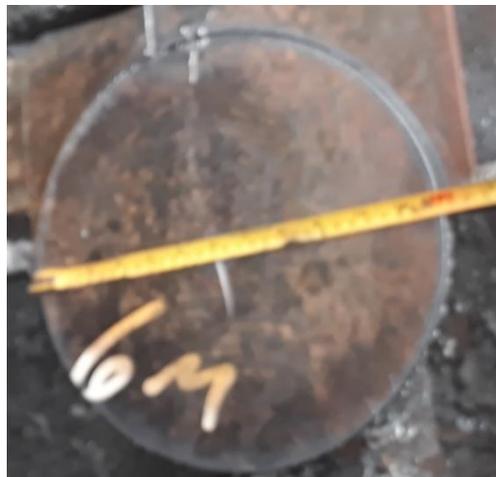


Fig. 2.18: Disco cortado

Fuente: Autor



Fig. 2.19: Disco siendo mecanizado en el torno

Fuente: Autor



Fig. 2.20: Disco terminado

Fuente: Autor

Para colocar los imanes permanentes de forma exacta se construyó un molde o plantilla de posicionamiento (Figura 2.21) teniendo en cuenta las dimensiones de los imanes, del disco y del diámetro interno para ubicar los imanes, se utilizó soldadura en frío para pegar los imanes.



Fig. 2.21: Plantilla de posicionamiento para imanes

Fuente: Autor



Fig. 2.22: Plantilla de posicionamiento acoplada al disco

Fuente: Autor



Fig. 2.23: Distribución de imanes en disco

Fuente: Autor

2.3.9 Construcción final de los rotores magnéticos

Para tener los rotores magnéticos se deberá tener colocados los imanes en cada uno de los discos previamente mecanizados para luego colocar en moldes de madera (MDF) (figura 2.24) y fundir con resina de poliéster y una capa de fibra de vidrio. Cabe mencionar que se cortó la tela de fibra de vidrio para colocar sobre los imanes dejando libre el orificio de la isla, esto se hace por seguridad para evitar que puedan despegarse al momento de girar los rotores. (Piggott, 2009).

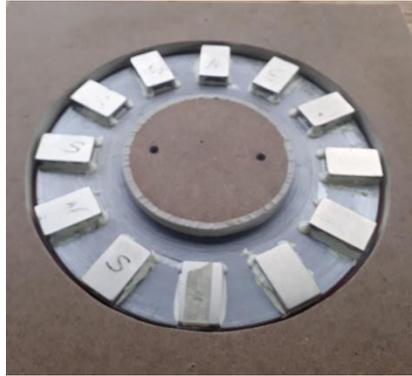


Fig. 2.24: Rotor magnético colocado en molde
Fuente: Autor



Fig. 2.25: Capa de fibra de vidrio colocada sobre los imanes
Fuente: Autor



Fig. 2.26: Rotor magnético fundido
Fuente: Autor

2.3.10 Ensamble final del generador

Para el ensamble final del generador se inició colocando el buje con su rodamiento en el eje para luego sujetarlo a la estructura. Posteriormente a través de espárragos, tuercas y arandelas se sujetó el estator a la estructura; los rotores magnéticos fueron sujetos al buje teniendo en cuenta la separación entre el estator y cada rotor magnético (entrehierro), para calibrar la separación entre los rotores magnéticos y el estator se utilizó pernos de elevación.

2.4 Construcción del sistema electrónico del prototipo

El sistema electrónico constará de la parte de rectificación trifásica (CA – CD) y control de carga debido a que el prototipo es para microgeneración y su aplicación principal es para almacenar energía en baterías para luego ser consumida, sin embargo para utilizar un controlador de carga que se encuentre en el mercado y el generador pueda operar a una velocidad mayor se colocará a la salida del generador tres transformadores monofásicos con relación de transformación 220V/110V o viceversa 300W, a fin de reducir la tensión. Cabe destacar que la conexión de los devanados secundarios de los transformadores será en delta. En la siguiente figura se explica la parte eléctrica-electrónica del prototipo.

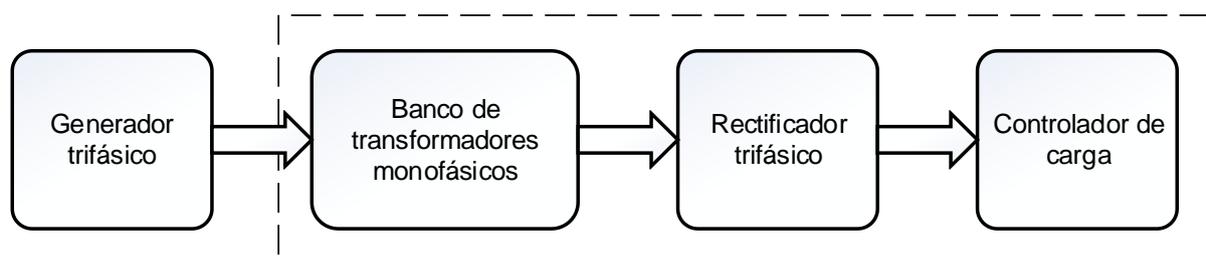


Fig. 2.27: Esquema del sistema electrónico del prototipo

Fuente: Autor

2.4.1 Rectificador de corriente AC/DC

Los rectificadores son dispositivos electrónicos usados para convertir CA (corriente alterna) en CC (corriente continua). El generador que se ha construido es de tipo sincrónico trifásico de flujo axial de imanes permanentes con conexión serie/estrella, por lo que para almacenar energía es necesario usar un rectificador trifásico que rectifique la salida del generador de CA a CC. Entonces el generador síncrono de corriente alterna al implementar un rectificador a la salida de sus devanados se transforma en un generador de corriente continua.

El tipo más simple de circuito rectificador utiliza un puente de diodos para convertir la CA generada por el generador en una fuente de CC fluctuante cuya amplitud está determinada por la velocidad de rotación del generador. El circuito rectificador para el generador implementado en el presente trabajo se muestra a continuación, en el que la salida trifásica del generador se rectifica a CC mediante un rectificador trifásico no controlado de puente completo de seis impulsos.

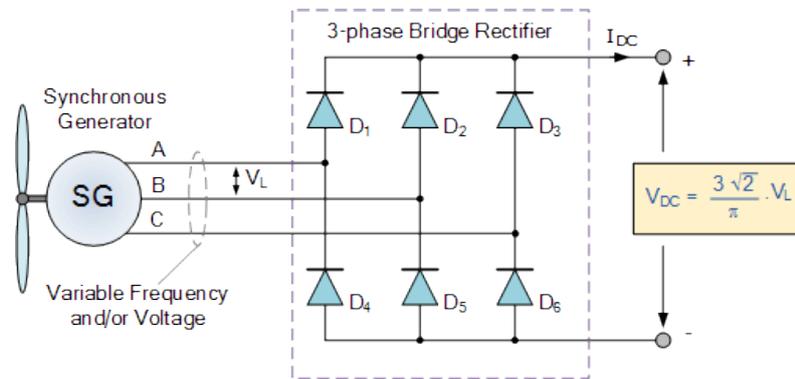


Fig. 2.28: Circuito rectificador trifásico

Fuente: (Alternative Energy Tutorials, s.f.)

Para seleccionar el rectificador es necesario conocer sus características de funcionamiento como la tensión y corriente que soporta. De tal manera que es importante especificar las características del rectificador que se va a utilizar en este trabajo.

Tabla 2.3: Características del rectificador

Rectificador trifásico	
Tipo	SQL50A/1000v
Amperios	50
Voltaje	1000
Dimensiones	Aprox. 60x32x12 mm
Tamaño terminales	13 x 6 mm
Diámetro de agujero de fijación	7mm

Fuente: (Powerinverter, s.f.)

Elaborado por: Autor

Para la conexión, tomar en cuenta los terminales del generador A, B, C y conectar en los tres pines de entrada, se recomienda realizar la conexión de una manera adecuada para evitar algún tipo de pérdidas. A la salida del rectificador se obtendrá corriente continua, para luego conectar al controlador de carga, en la figura 2.29 se tiene el rectificador que será utilizado en este trabajo.



Fig. 2.29: Rectificador trifásico que se utilizará

Fuente: Autor

2.4.2 Controlador de carga

Para poder cargar baterías es necesario agregar un controlador de carga después del rectificador, que se encarga de regular el voltaje de entrada a la batería, y carga que sea conectada directamente. También controla el estado de carga de las baterías mostrando en su pantalla. En la figura 2.30 se observa el controlador PWM (pulse-width modulation).



Fig. 2.30: Controlador de carga

Fuente: Autor

A continuación, se detalla los datos técnicos principales del controlador que se usará. En Anexo C se amplía información del manual de usuario.

Tabla 2.4: Características técnicas del controlador de carga

Controlador de carga PWM 20 A	
Tipo	KW1220
Amperios	20
Voltaje máximo de entrada	41V
Dimensiones	133mm x 70mm
USB output	5V/2A Max
Voltaje de salida batería	12V/24V auto ajustable
Voltaje flotante	13.7V (predeterminados, ajustable)
Parada de descarga	10.7V (predeterminados, ajustable)
Reconexión de descarga	12.6V (predeterminados, ajustable)
Temperatura de funcionamiento	-35 ~ + 60 C

Fuente: (YucoSolar Store , s.f.)

Elaborado por: Autor

Todos los componentes y conexiones de la parte electrónica del prototipo fueron instalados en un gabinete metálico. En la figura se puede observar la caja metálica con sus componentes.



Fig. 2.31: Gabinete para la parte electrónica del prototipo

Fuente: Autor

Detalle de materiales utilizados para la implementación del prototipo

En la siguiente tabla se detalla los materiales para la construcción del prototipo tanto la parte mecánica como eléctrica.

Tabla 2.5: Lista de materiales

Prototipo para microgeneración eólica			
ETAPA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	MEDIDAS
Construcción estructura	Ángulo de acero		50X50X6mm
	Imanes de neodimio	24	46X30X10mm
	Soldadura en frio	2	

Construcción de rotores magnéticos	Arandelas de acero (A36)	2	10mm de espesor, 310mm de diámetro
	Tuerca galvanizada	4	M12 o ½"
Construcción bobinas	Alambre esmaltado	7(libras)	#14 AWG
	Espaguetis termos contraíbles	1m	Sección #14 AWG
Fundición rotores y estator	Resina de poliéster	1	
	Catalizador	1	
	Talco chino	6 (libras) aprox.	
	Tela de fibra de vidrio	1	
	Moldes de madera MDF		Varias
	Tornillos para madera		Varias
Ensamble del generador	Punta (eje)	1	
	Rodamiento	1	
	Manzana o cubo (buje)	1	
	Espárrago galvanizado	2	1m x ½"
	Arandela plana galvanizada para esparrago de ½"	12	½"
	Tuerca galvanizada	24	M12 o ½"
	Tuerca para sujetar la punta (eje) a la estructura	4	M10
	Tuerca para sujetar la punta al cubo	1	
	Rodela plana para sujeción de	4	M10
Mesa de soporte	Perfiles y tubos estructurales	1	
Pintura	Esmalte anticorrosivo	1 litro	
Material eléctrico y electrónico para el prototipo			
Construcción	Conductor cableado THHN # 14 AWG para conexión bobinas y conexiones en armario de control	1	15m
	Estaño	1	2m
	Rectificador trifásico	1	
	Controlador de carga	1	
	Bornera 10 A	1	
	Canaleta ranurada	1	
	Bananas hembra	14	
	Bananas macho	12	
	Transformador monofásico 110/220 300W	3	
	Motor monofásico de velocidad variable para simular el movimiento.	1	
	Gabinete metálico		30x30x15 cm

Fuente: Autor

Elaborado por: Autor

2.4.3 Presupuesto final para la implementación del prototipo

Tabla 2.6: Presupuesto para la implementación del prototipo

Descripción	Costo \$
Construcción bobinas	75
Construcción generadora	250
Importación imanes	400
Construcción de bobinas	75
Parte electrónica	130
Construcción mesa de soporte	50
Motor monofásico	60
Total	1040

Fuente: Autor

Elaborado por: Autor

A continuación, se detalla las empresas donde se adquirió los componentes para la construcción del prototipo durante el período febrero 2018 – a febrero 2019:

- Dipac Manta S.A. sucursal Ibarra
- Autocentro y centro partes Flores (Tienda de repuestos de automóviles en Ibarra)
- Rulybandas Vásquez, Ibarra
- MagnetDealz.de, Alemania
- Novocentro, Ibarra
- Gama pernos, Ibarra
- Cerelectric, Ibarra
- Mundoelectrónico
- Electrotecnia 2 (Luis Rodríguez), Ibarra
- Electrónica Cecomin CIA. LTDA. (CECOMIN)
- Comercial Benavides, Azuay – Cuenca
- Zero Energy, Medellín – Antioquía
- Kywi, Ibarra

En esta sección se ha presentado el diseño y construcción del generador, como también la implementación de la parte electrónica para tener así finalmente el prototipo para microgeneración eólica.

CAPÍTULO 3

3 RESULTADOS: PRUEBAS DEL PROTOTIPO

En esta sección se realizará las pruebas de funcionamiento del prototipo, se comprobará el funcionamiento del generador, y luego en conjunto con el sistema electrónico, las mismas que se llevarán a cabo en el laboratorio.

3.1 Pruebas del prototipo

Para realizar la simulación del funcionamiento y obtener datos del prototipo se colocará en una mesa de soporte y se utilizará un motor de velocidad variable para proporcionar el movimiento al generador simulando la velocidad del viento acoplado a través de una banda como se observa en la figura 3.1. Previamente se colocó una polea en la parte frontal del rotor magnético.



Fig. 3.1: Generador acoplado al motor

Fuente: Autor

3.1.1 Pruebas de funcionamiento del generador (en vacío) tensión de línea y tensión de fase

Con esta prueba se podrá tener datos del voltaje de línea y voltaje de fase a diferentes rpm. Cabe mencionar que los valores de rpm se fueron variando de menor a mayor teniendo en cuenta el equivalente de velocidad del viento con las consideraciones del uso de aspas con una razón de velocidad de punta de 7 y una longitud de 1,5 m estos valores son los que mejores resultados proporcionan para generación eólica de baja potencia. (Piggott, 2009).

Los valores de rpm para las mediciones son las velocidades del motor que proporcionó el movimiento, las velocidades van desde 135 rpm hasta 445 rpm equivalentes a la velocidad del viento desde 3 hasta 10 m/s. Para esta prueba se utilizó un tacómetro digital a laser para comprobar las revoluciones, y multímetro digital. En la siguiente tabla se observa los datos obtenidos:

Tabla 3.1: Datos experimentales del generador (en vacío)

Velocidad del viento (m/s)	Velocidad (rpm)	Tensión línea-neutro (AC)	Tensión línea-línea (AC)
3	135	9,4	16,6
4	180	11,6	21,1
5	225	15,9	27,7
6	270	18,1	31,8
7	310	20,9	36,5
8	355	24,3	42,2
9	400	26,6	45,5
10	445	30,1	53

Fuente: Autor

Elaborado por: Autor

Con las mediciones realizadas en la tabla anterior se puede comprobar la constante de relación del voltaje de línea y voltaje de fase en conexión estrella del generador.

3.1.2 Pruebas de funcionamiento del generador (con carga)

Para esta prueba se utilizó un osciloscopio, tacómetro y un tablero con luces incandescentes en conexión estrella, para tomar datos de la tensión (L-N) de cada una de las fases del generador (figura 3.2). Con esta prueba se podrá tomar datos de las tres fases, la frecuencia, y la forma de onda.

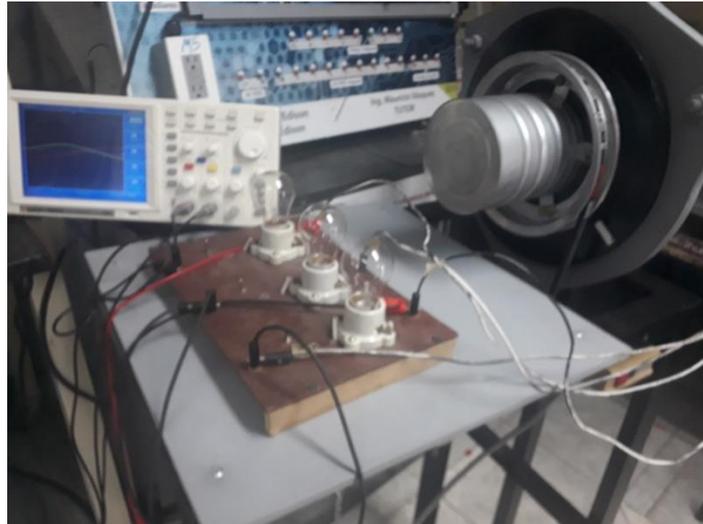


Fig. 3.2: Generador conectado a sus salidas carga resistiva

Fuente: Autor

Tabla 3.2: Datos del generador con carga resistiva en conexión estrella

Velocidad del viento (m/s)	Velocidad (rpm)	Tensión línea-neutro (AC) F1	Frec.	Tensión línea-neutro (AC) F2	Frec.	Tensión línea-neutro (AC) F3	Frec.
3	135	8,48	13,05	9,31	13,06	8,14	13,21
4	180	12,29	17,96	13,38	17,92	13,02	18,70
5	225	14,88	21,33	14,78	21,33	15,02	22,36
6	270	17,18	27,37	18,3	27,41	18,68	27,71
7	310	22,86	31,46	21,97	31,47	22,22	31,43
8	355	26,23	35,68	24,87	35,69	25,22	36,18
9	400	28,16	40,09	28,60	40,09	28,64	40,24
10	445	29,72	43,56	31,45	43,61	30,86	42,89

Fuente: Autor

Elaborado por: Autor

Los datos de la tabla anterior fueron tomados con el generador puesto carga resistiva a cada una de las fases en conexión estrella, la carga fue focos incandescentes de 15W de potencia y resistencia de 26 ohmios. Con los datos de la carga se puede también conocer la corriente que circula por cada fase.

En la figura 3.3 se puede observar la forma de onda generada de dos de las fases, la imagen del osciloscopio fue capturada cuando el generador estaba girando a 355 rpm aproximadamente.

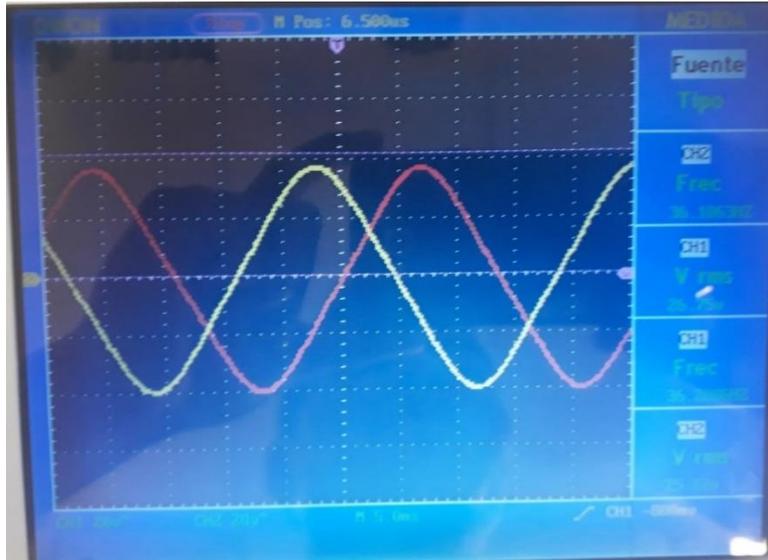


Fig. 3.3: Forma de onda del voltaje de 2 fases

Fuente: Autor

3.1.3 Prueba de funcionamiento del prototipo

Cabe señalar que esta prueba se realizará con el sistema electrónico, es decir que se obtendrá los datos de tensión DC a la salida del rectificador, con esto se podrá comprobar que el controlador de carga va a poder operar a las revoluciones establecidas (de 135rpm a 445rpm).

Tabla 3.3: Datos experimentales del generador a la salida del rectificador (en vacío)

Velocidad del viento (m/s)	Velocidad (rpm)	Tensión DC
3	135	8,748
4	180	11,15
5	225	14,2
6	270	16,92
7	310	19,44
8	355	23,34
9	400	25,61
10	445	29,72

Fuente: Autor

Elaborado por: Autor

3.2 Gráficas obtenidas

A continuación, se muestran las gráficas de los datos obtenidos en las pruebas de funcionamiento del prototipo:

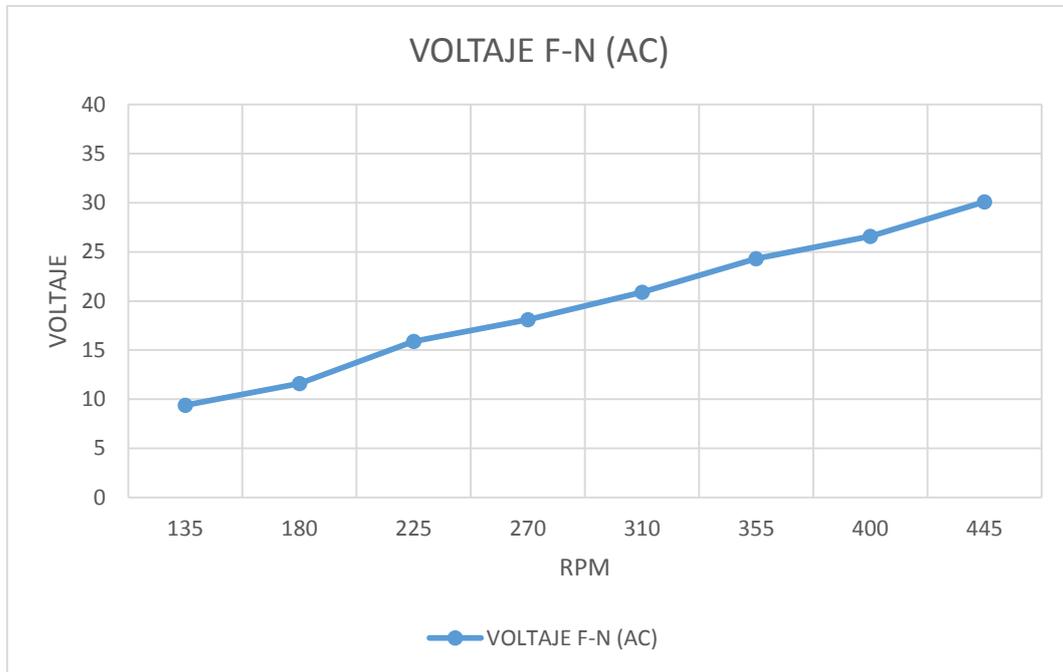


Fig. 3.4: Gráfica de voltaje de fase a distintos valores de rpm

Fuente: Autor

Según los datos tomados de la tabla 3.1 se puede observar en la figura 3.4 que el voltaje de fase es directamente proporcional a la velocidad, a medida que el generador aumente los rpm generará más tensión.

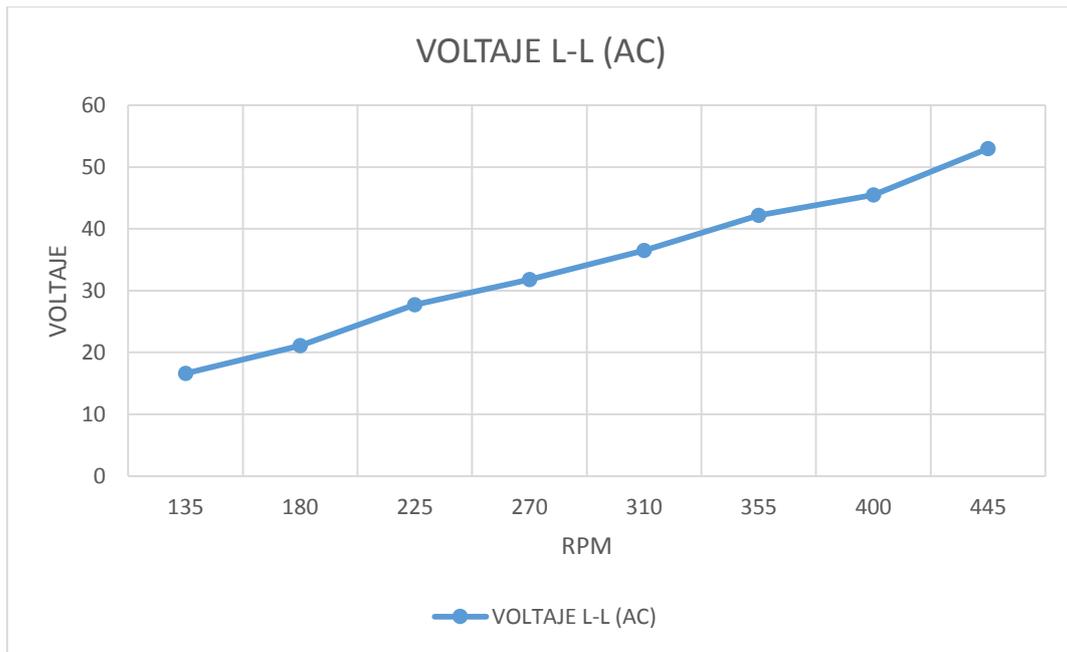


Fig. 3.5: Gráfica de voltaje de línea a distintos valores de rpm

Fuente: Autor

De igual manera según los datos de la tabla 3.1 se observa el comportamiento del voltaje de línea en la figura 3.5.

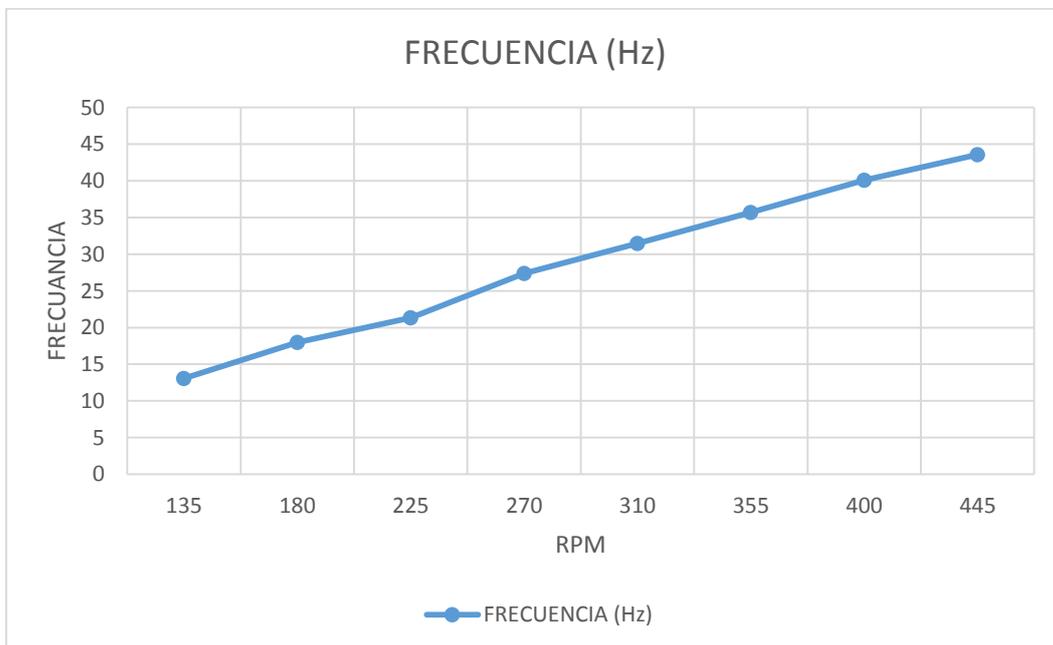


Fig. 3.6: Gráfica de frecuencia eléctrica a distintos valores de rpm

Fuente: Autor

En la figura 3.6 se observa que la frecuencia se comporta al igual que el voltaje de fase y de línea según las mediciones en la tabla 3.2, es decir que a medida que se aumenta las revoluciones la frecuencia también aumenta.

CONCLUSIONES

De acuerdo a la información recabada en el marco teórico se ha logrado comprender que para poner en marcha un pequeño sistema de generación eólica es necesario que tenga un equipo adicional en comparación con los grandes sistemas.

El generador que se implementó es del tipo síncrono trifásico de imanes permanentes de flujo axial, al ser considerando el más adecuado para su aplicación en pequeños sistemas de generación eólica ya que presenta ciertas características que lo hacen idóneo para este tipo de aplicación, sobre todo en la parte constructiva por la facilidad que tiene al momento de su ensamble final.

Para tener finalmente el prototipo para microgeneración eólica se implementó el equipo adicional o sistema electrónico. Este sistema consistió en un banco de transformadores monofásicos, un rectificador y controlador de carga a fin de poder usar la corriente en DC para dispositivos de almacenamiento de 12 o 24 Voltios y cargas como luces.

Durante las pruebas de funcionamiento el generador cumplió satisfactoriamente la prueba mecánica al girar acoplado al motor, no hubo rozamiento entre los rotores magnéticos y el estator, en las pruebas eléctricas se evidenció la forma de onda AC en cada fase con respecto a neutro y que la tensión y frecuencia varía proporcionalmente a la velocidad de rotación del generador.

En las mediciones eléctricas del sistema del prototipo se pudo obtener valores del voltaje de fase en corriente alterna de los terminales del generador (en vacío) desde 135rpm hasta 445 rpm se tuvo desde 9.4V hasta 30.1V respectivamente, así como también se comprobó con las mediciones del voltaje de línea la constante de relación entre los dos tipos de voltaje. También se tomó datos de la medición del voltaje en DC a la salida del rectificador, los valores mínimo y máximo fueron desde 8.7 V hasta 29.7 V a fin de poder usar un controlador de carga que soporte dicho voltaje máximo.

Al finalizar este trabajo se ha logrado implementar un prototipo para microgeneración eólica, de fácil construcción y mantenimiento sobre todo en el caso del generador. Además, que se fomenta el conocimiento técnico para que los usuarios finales puedan construir su propio sistema de generación eólica con el resto de los componentes.

RECOMENDACIONES

Una de las partes importantes para la construcción del generador son las placas metálicas que deben ser en lo posible planas por lo que es recomendable adquirir estas placas con un mayor espesor para luego ser mecanizadas y reducir al espesor deseado logrando así tener las placas planas, debido a que las planchas no vienen perfectamente planas de fábrica y durante el corte con el pantógrafo tienden a deformarse.

En la prueba de funcionamiento del generador para medir la tensión y frecuencia de cada fase con respecto a neutro se observó que la tensión es diferente en las tres fases, lo que quiere decir que se encuentra desbalanceado en una pequeña proporción, de modo que sería recomendable profundizar en esta parte para mejorar el diseño del generador.

Se debe tener precaución al momento de colocar las bobinas en el molde al momento de fundir el estator, así como también al colocar los imanes en los discos metálicos de forma que quede alineado el orificio de las bobinas con las dimensiones de los imanes.

Antes de instalar el controlador de carga al resto del sistema electrónico se debe tomar mediciones a la salida del rectificador para verificar que no sobrepase el valor máximo de tensión DC del dispositivo.

Para tener un mayor aprovechamiento de la energía producida por el generador sería conveniente usar un controlador de carga a 48 voltios que tenga las características de soportar un voltaje DC mayor en comparación con el usado en este trabajo.

REFERENCIAS

- Baillarie Rosenmann, P. (Agosto de 2007). Diseño de aerogeneradores con imanes permanentes para aplicaciones en electrificación rural. Universidad de Chile. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Electricista. Chile.
- Alternative Energy Tutorials. (s.f.). *Alternative Energy Tutorials*. Obtenido de Alternative Energy Tutorials: <http://www.alternative-energy-tutorials.com/wind-energy/synchronous-generator.html>
- Barco Ríos, H., Rojas Calderón, E., & Restrepo Parra, E. (2012). *FÍSICA :Principios de electricidad y magnetismo*. Manizales.
- Cañamero, A. (Febrero de 2004). *El Rincón de la Ciencia*. Obtenido de <http://rincondelaciencia.educa.madrid.org/Curiosid/rc-66/rc-66.html>
- Chapman, S. J. (2005). *Máquinas eléctricas*. México: MCGRAW-HILL / INTERAMERICANA DE MEXICO.
- Chiras, D. (2010). *Wind Power Basics: a green energy guide*. Canada: Gabriola Island.
- Corporación Eléctrica del Ecuador. (2013). *CELEC.EP*. Obtenido de <https://www.celec.gob.ec/gensur/index.php/contacto/direccion/2-uncategorised/47-que-es-la-energia-eolica>
- Costalago, I. B. (5 de Diciembre de 2014). *Energiasrenovablesinfo*. Obtenido de <http://www.energiasrenovablesinfo.com/general/ventajas-inconvenientes-energias-renovables/>
- Cuesta, M., Pérez, M., & Cabrera, J. (Junio de 2008). Aerogeneradores de potencia inferior a 100kW. España. Obtenido de DocSlide: <https://docslide.com.br/documents/aerogeneradores-potencia-inferior-a-100kw.html>
- Domínguez. (2008). Obtenido de <https://es.slideshare.net/Vicrew/energias-alternativas-3ra-edicin-jos-a-domnguez-gmezfreelibrosorg>
- Ecoticias. (8 de Febrero de 2012). *Ecoticias*. Obtenido de Ecoticias: <http://www.ecoticias.com/energias-renovables/61314/Energia-Eolica-fuerza-aire-renovables>
- Equipo Eólico UAF. (2010). Obtenido de http://www.cgc.uaf.edu/download/kellie/afwt_book_final.pdf
- ERNC, E. d. (Junio de 2012). *Evolución de Costos ERNC*. Obtenido de Evolución de Costos ERNC: http://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/alumno12/costosernc/D._Mare.html
- Fernando. (03 de Noviembre de 2015). *ERENOVABLES.COM*. Obtenido de ERENOVABLES.COM: <https://erenovable.com/energias-renovables/>
- Figueredo, C. M. (2008). Componentes de una turbina eólica de eje horizontal. *Cubasolar*. Obtenido de <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia36/HTML/Articulo03.htm>
- Figureo, C. M. (2010). *Energía eólica en zonas urbanas*. Obtenido de <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Energia/Energia51/HTML/Articulo02.htm>

- Gomelsky, R. (2013). Obtenido de http://www.se4all.org/sites/default/files/Peru_RAGA_ES_Released.pdf
- Guido, F. (27 de Enero de 2009). *Mailxmail*. Obtenido de Mailxmail: <http://www.mailxmail.com/curso-agua-energia-sinergia-hidroenergetica-1/energia-eolica-conversion-energia-viento>
- Imanes123. (2006). *IMANES123*. Obtenido de IMANES123: <https://www.imanes123.com/informacion-de-iman-es-neodimio/>
- Larevista. (9 de Septiembre de 2012). *Larevista*. Obtenido de Larevista: <http://www.larevista.ec/actualidad/doctor-tecno/energia-eolica>
- López, F. F., & Ageitos, J. M. (2007). Energías Renovables: ¿la energía del futuro? *Energías Renovables: ¿la energía del futuro?* España.
- MAGCRAFT. (s.f.). *MAGCRAFT*. Obtenido de MAGCRAFT: <https://www.magcraft.com/>
- Magnetdealz. (s.f.). *www.ebay.de*. Obtenido de www.ebay.de: https://www.ebay.de/itm/Neodym-Magnet-Quader-46x30x10mm-N40-28kg-Zugkraft-Hochleistungsmagnet-Magnetic/172866901582?_trkparms=aid%3D222007%26algo%3DSIM.MBE%26ao%3D2%26asc%3D49139%26meid%3D318a7383eeab4d9e848e0cfd9502030e%26pid%3D100005%26rk%3D11%26rkt%3D1
- Manwell, J., McGowan, J., & Rogers, A. (2009). *Wind Energy Explained*. United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd.
- Marín, C. E. (2006). *LAS ENERGÍAS RENOVABLES EN LA PRODUCCIÓN DE ELECTRICIDAD EN ESPAÑA*. Murcia.
- MIEM / DNETN. (2009). Obtenido de <http://www.energiaeolica.gub.uy/index.php?page=microgeneracion>
- Ministerio de Electricidad y Energía Renovable. (28 de Agosto de 2013). Obtenido de <http://www.energia.gob.ec/electrificacion-rural-con-energias-renovables/>
- Minsiterio de Electricidad y Energía Renovable. (2013). Obtenido de <http://www.energia.gob.ec/ministerio-de-electricidad-y-energia-renovable-presento-el-primer-atlas-eolico-del-ecuador/>
- Moratilla, S. Y. (Febrero de 2006). *La energía eólica*. Obtenido de La energía eólica: <https://www.researchgate.net/publication/28106419>
- Moreno, R. P. (30 de Julio de 2012). Aerogenerador de eje horizontal frente a aerogenerador de eje vertical. Características principales y ventajas de uno y otro. Obtenido de <http://energias-renovables-y-limpias.blogspot.com/2012/07/aerogenerador-de-eje-horizontal-o-vertical.html>
- Morimitsu, D. T. (2015). DISEÑO DE UN GENERADOR EÓLICO DE EJE VERTICAL DE BAJA POTENCIA. Pereira.
- Muerza, A. F. (10 de Noviembre de 2006). *Consumers.es*. Obtenido de http://www.consumer.es/web/es/medio_ambiente/energia_y_ciencia/2006/11/10/157155.php

- National Geographic. (5 de Septiembre de 2010). *nationalgeographic*. Obtenido de nationalgeographic: <http://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/el-poder-del-viento>
- Navasquillo Hervás, J. (s.f.). *Funcionamiento de un generador de imanes permanentes aplicando la expresión de Lorentz*. Obtenido de <https://www.uv.es/~navasqui/aero/Fungenper.pdf>
- Peláez et al. (2015). *Energías Renovables en Ecuador*. Cuenca.
- Piggott, H. (2009). *A Wind Turbine Recipe Book*.
- Powerinverter. (s.f.). *Powerinverter*. Obtenido de Powerinverter: http://powerinverter.cl/index.php?route=product/product&product_id=412
- RED RIGE-UTE. (s.f.). *Sistemas de generación eléctrica para aerogeneradores*. Montevideo, Uruguay.
- Rodríguez, P. R., Youssef, Y., & Salgueirinho, J. B. (2011). *Energía Eólica en Energías Renovables*. Unisul.
- Ruiz, & Salazar, &. (26 de Octubre de 2016). *Parque de Innovación Tecnológica*. Obtenido de <http://innovacion.uas.edu.mx/resurgimiento-de-la-energia-eolica-el-arte-de-convertir-aire-en-electricidad/>
- Salgado, J. F. (2009). *Tecnología de las Energías Renovables*. Madrid: MUNDI-PRENSA.
- Solano, J. L. (Agosto de 2013). *Los aerogeneradores y la factibilidad para la implementación en nuestro hogar*. Michoacan, México.
- Supermagnete. (s.f.). *www.supermagnete.es*. Obtenido de www.supermagnete.es: <https://www.supermagnete.es/faq/Como-se-calcula-la-densidad-de-flujo>
- Vercelli, A. (17 de Octubre de 2012). *Energías como Bienes Comunes*. Obtenido de <http://www.energias.bienescomunes.org/2012/10/17/que-es-la-microgeneracion-de-energias-renovables/>
- Webmaster. (4 de Julio de 2012). *El Blog de la Energía Sostenible*. Obtenido de El Blog de la Energía Sostenible: <https://www.blogenergiasostenible.com/que-es-energia-mareomotriz/>
- Windpower. (31 de Julio de 2003). *Windpower*. Obtenido de Windpower: <http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/tour/wtrb/tower.htm>
- YucoSolar Store . (s.f.). *aliexpress*. Obtenido de https://es.aliexpress.com/item/1pc-x-20A-Solar-Charge-Controller-PWM-12V-24V-LCD-Display-USB-5V-Solar-Panel-Charge/32785614666.html?aff_platform=aaf&cpt=1549371110107&sk=AYNZbMb&aff_trace_key=501cfa5a82144547a59cc6d4ef1d2be8-1549371110107-03266-AYNZbMb&te

Anexo A: Características generales de los imanes utilizados

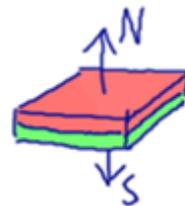


💡 Warum Neodym?

Neodym Magnete - genauer Neodym-Eisen-Bor (NdFeB) Magnete - sind **eine Klasse für sich!** Wer **professionelle Industriemagnete** dieser Art noch nicht erlebt hat, kann sich kaum vorstellen wie **stark** diese Magneten sind.

📄 Eigenschaften

- Magnetklasse: N40
- Abmessungen: 46 x 30 x 10 mm
- Zugkraft: 28,00 kg *
- Volumen: 13 cm³
- Beschichtung: NiCuNi
- Polarisation: axial (Pole auf den großen gegenüberliegenden Flächen)



🛒 Lieferumfang

- 10x - 46 x 30 x 10 mm Magnet

📄 Spezifikationen

Remanence Br		Coercive force bHc				Intrinsic coercive force iHc				Maximum energy product (BH)max				Working temperature		
kGs		T		kOe		kA/m		kOe		kA/m		MGOe		kJ/m		°C
Nom.	Min.	Nom.	Min.	Nom.	Min.	Nom.	Min.	Nom.	Min.	Nom.	Min.	Nom.	Min.	Nom.	Min.	
12.9	12.6	1.29	1.26	11.0	10.5	876	836	≥12		≥955		40	38	318	303	≤80

*Zugkräfte beziehen sich auf eine Stahlplatte, deren Abstand zum Magneten gegen Null geht.

Anexo B: Tabla de conductores esmaltados

1	2	3	4	5	6	7
10	2.588	5.26	-	46.8	3.23	15
11	2,305	4.17	-	32.1	4.07	12
12	2	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	1.5
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

1 - Numero AWG (American Wire Gauge)

5 - kg por kilometro

2 - Diámetro en milímetros

6 - Resistencia en ohmios por kilometro

3 - Sección en milímetros

7 - Capacidad de corriente en amperes

4 - Numero de espiras por centímetros

Anexo C: Manual de usuario del controlador de carga

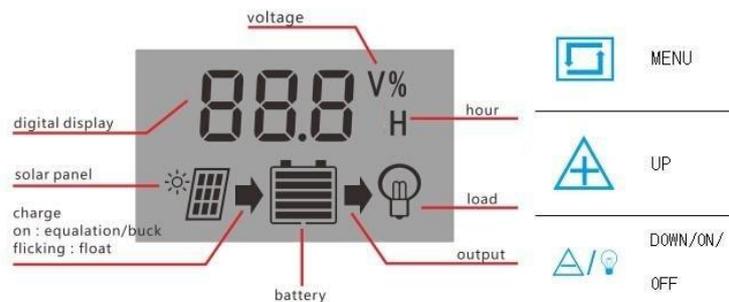
Instrucciones de seguridad

1. Asegúrese de que la batería tenga suficiente voltaje para que el controlador reconozca el tipo de batería antes de la primera instalación.
2. El cable de la batería debe ser lo más corto posible para minimizar la pérdida.
3. El regulador solo es adecuado para baterías de plomo ácido: ABIERTO, AGM, GEL. No es adecuado para hidruro de níquel metálico, iones de litio u otras baterías.
4. El regulador de carga solo es adecuado para regular módulos solares. Nunca conecte otra fuente de carga al regulador de carga.

Características del producto

1. Microcontrolador industrial integrado.
2. Pantalla LCD grande, todos los parámetros ajustables.
3. Gestión de carga PWM totalmente de 4 etapas.
4. Protección de cortocircuitos integrada, protección de circuito abierto, protección inversa, protección contra sobrecargas.
5. Doble protección de la corriente inversa mosfet, baja producción de calor.

Pantalla LCD/ teclas



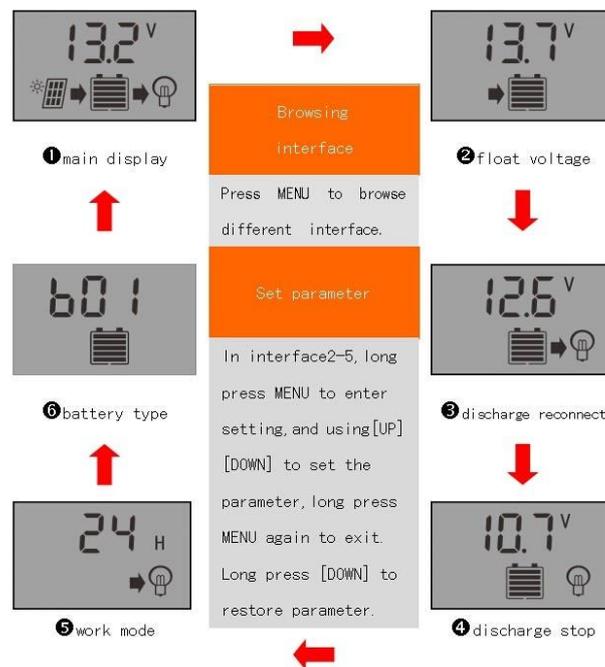
MENU: switch between different display, or to enter/exit setting by long press.

UP: press to increase value.

DOWN: press to decrease value.

Fuente: (YucoSolar Store , s.f.)

Ajuste de pantalla LCD



Fuente: (YucoSolar Store , s.f.)

Secuencia de conexión

1. Conecta la batería al regulador de carga-más y menos.
2. Conecta el módulo fotovoltaico al regulador-más y menos.
3. Conecta al consumidor al regulador de carga-más y menos.

Para la desconexión se lo realiza en secuencia inversa.

Equivocarse en la secuencia puede dañar el controlador de carga.

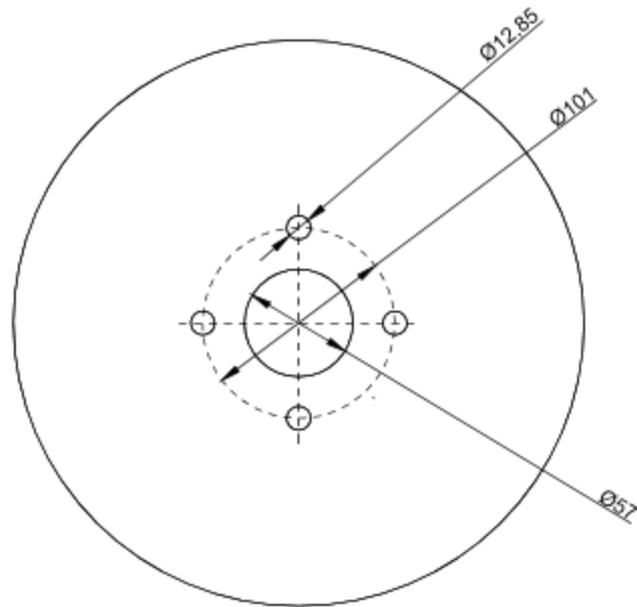
Datos técnicos

Controlador de carga PWM 20 A	
Tipo	KW1220
Amperios	20
Voltaje máximo de entrada	41V
Dimensiones	133mm x 70mm
USB output	5V/2A Max
Voltaje de salida batería	12V/24V auto ajustable
Voltaje flotante	13.7V (predeterminados, ajustable)
Parada de descarga	10.7V (predeterminados, ajustable)
Reconexión de descarga	12.6V (predeterminados, ajustable)
Temperatura de funcionamiento	-35 ~ + 60 C

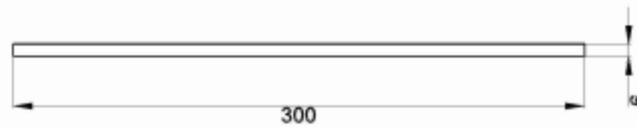
Fuente: (YucoSolar Store , s.f.)

Elaborado por: Autor

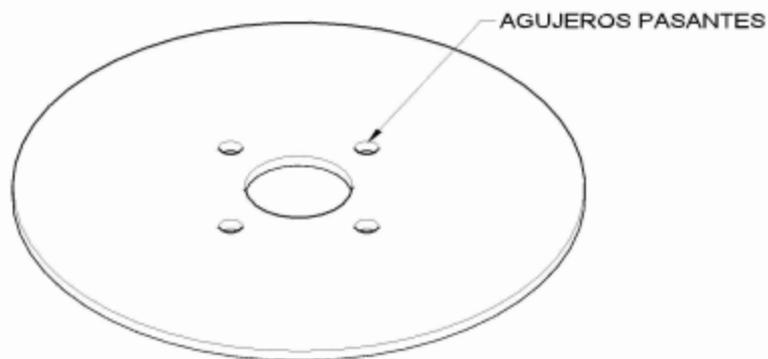
Anexo D: Planos constructivos del generador



VISTA SUPERIOR (1: 4)

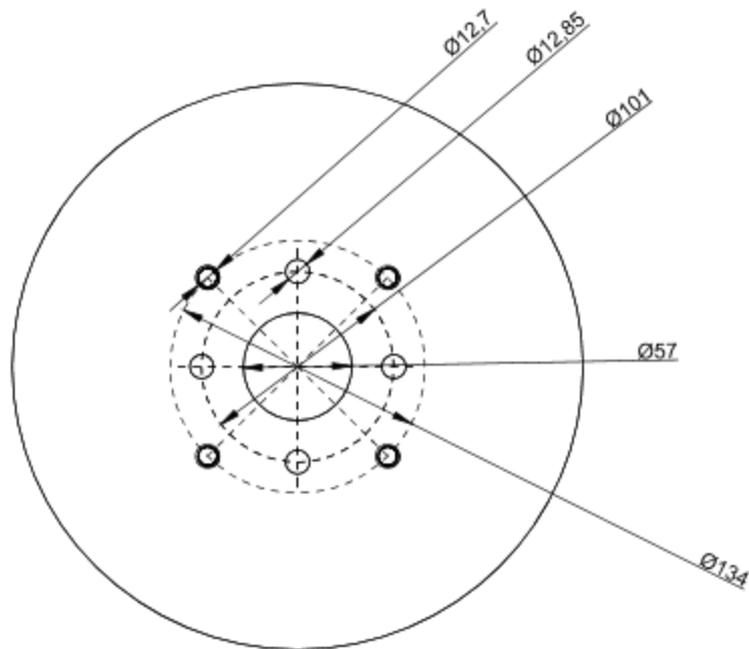


VISTA FRONTAL (1: 4)

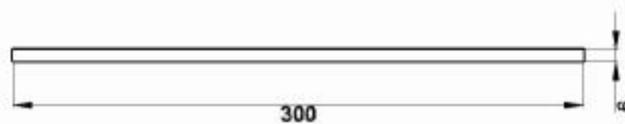


VISTA ISOMÉTRICA (1: 4)

REVISADO POR: PHD. ANA CABRERA	U.T.N ING. EN MANTENIMIENTO ELÉCTRICO	TÍTULO: PLACA CIRCULAR POSTERIOR
DIBUJADO POR: CARLOS JAVIER CARLOSAMA		MATERIAL: ASTM A36
		ESCALA: INDICADAS
		UNIDADES: MILÍMETROS
		Nº DE LÁMINA: LÁMINA 1 DE 8



VISTA SUPERIOR (1: 4)

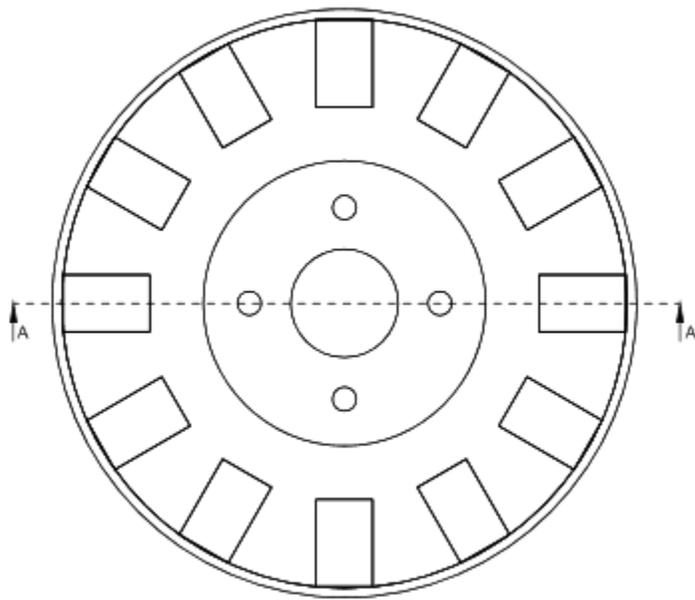


VISTA FRONTAL (1: 4)

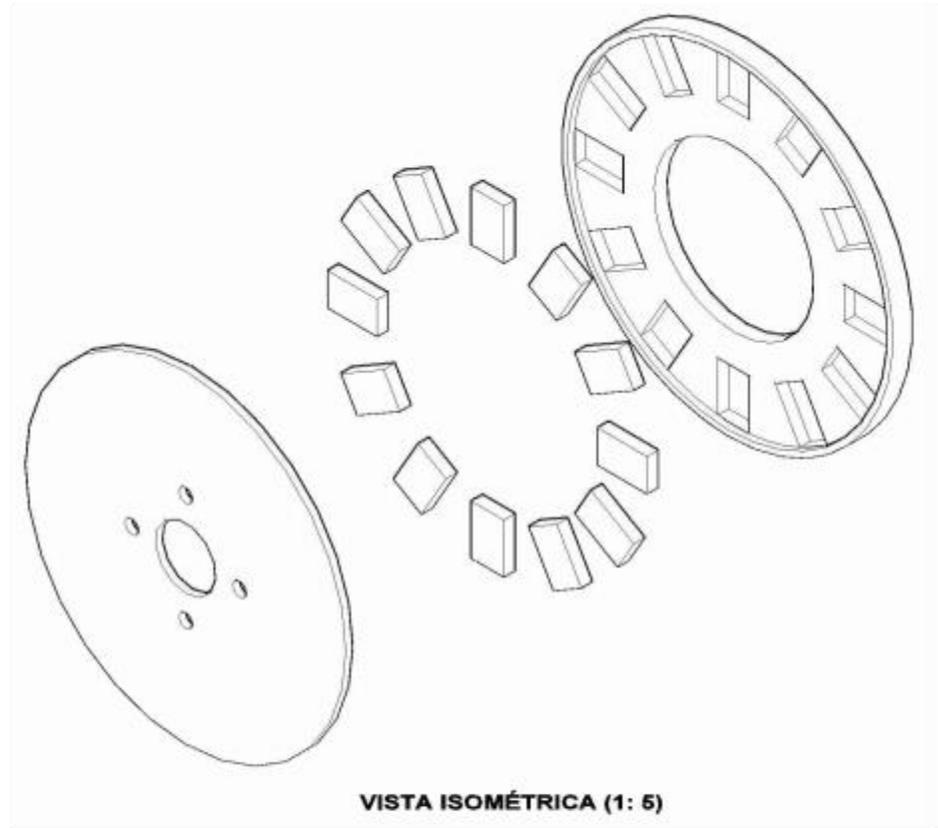


VISTA ISOMETRICA (1: 4)

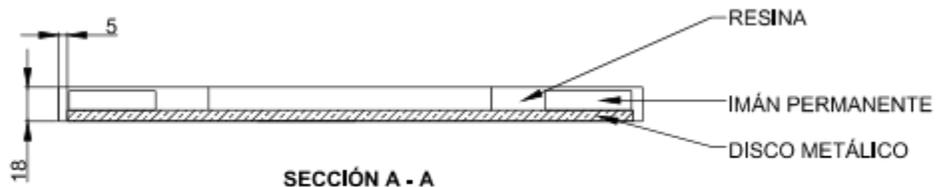
REVISADO POR: PHD. ANA CABRERA	U.T.N ING. EN MANTENIMIENTO ELÉCTRICO	TÍTULO: PLACA CIRCULAR FRONTAL	
DIBUJADO POR: CARLOS JAVIER CARLOSAMA		MATERIAL: ASTM A36	ESCALA: INDICADAS
		UNIDADES: MILÍMETROS	Nº DE LÁMINA: LÁMINA 2 DE 8



VISTA SUPERIOR (1: 4)

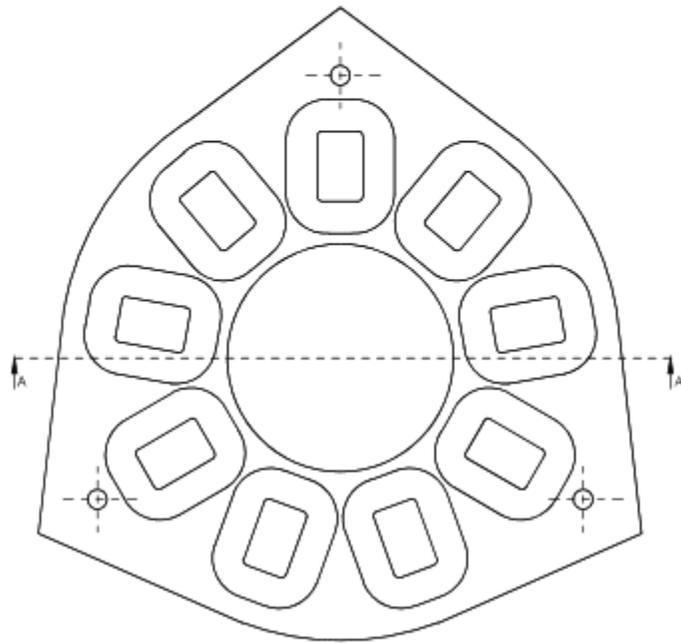


VISTA ISOMÉTRICA (1: 5)



SECCIÓN A - A
VISTA FRONTAL (1: 4)

REVISADO POR :	PHD. ANA CABRERA	U.T.N ING. EN MANTENIMIENTO ELÉCTRICO	TÍTULO :	SUB-ENSAMBLE ROTOR MAGNÉTICO		
DIBUJADO POR :	CARLOS JAVIER CARLOSAMA 74		MATERIAL :	VARIOS	ESCALA :	INDICADAS
			UNIDADES :	MILÍMETROS	Nº DE LÁMINA :	LÁMINA 3 DE 8



VISTA SUPERIOR (1: 5)

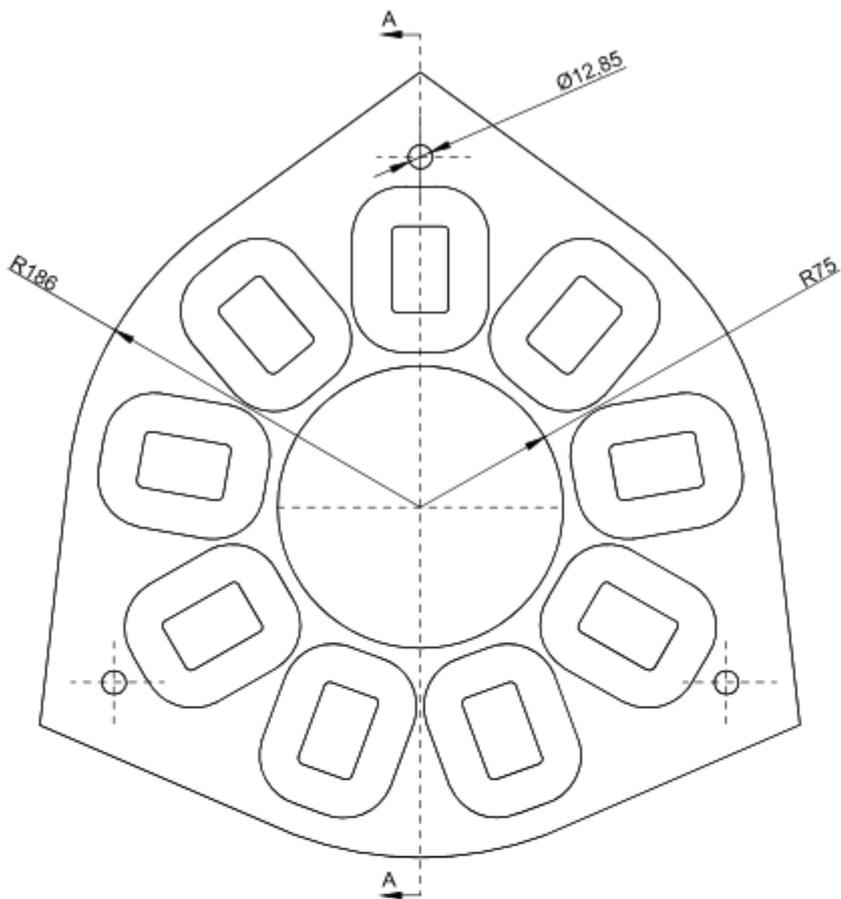


VISTA ISOMÉTRICA (1: 5)

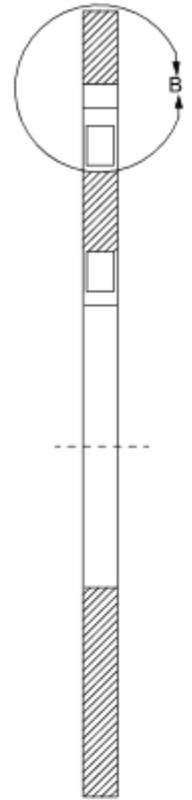


SECCIÓN A - A
VISTA FRONTAL (1:4)

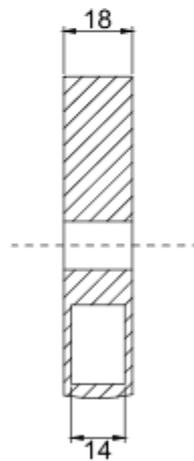
REVISADO POR : PHD. ANA CABRERA	U.T.N ING. EN MANTENIMIENTO ELÉCTRICO	TÍTULO : SUB-ENSAMBLE ESTATOR	
DIBUJADO POR : CARLOS JAVIER CARLOSAMA ⁷⁵		MATERIAL : VARIOS	ESCALA : INDICADAS
		UNIDADES : MILÍMETROS	Nº DE LÁMINA : LÁMINA 4 DE 8



VISTA SUPERIOR (1: 4)



SECCIÓN A - A
VISTA FRONTAL (1: 4)



DETALLE 'B' (1: 2)

REVISADO POR :

PHD, ANA CABRERA

DIBUJADO POR :

CARLOS JAVIER CARLOSAMA

U.T.N

ING. EN MANTENIMIENTO
ELÉCTRICO

TÍTULO :

FUNDICIÓN DE BOBINAS (ESTATOR)

MATERIAL :

VARIOS

ESCALA :

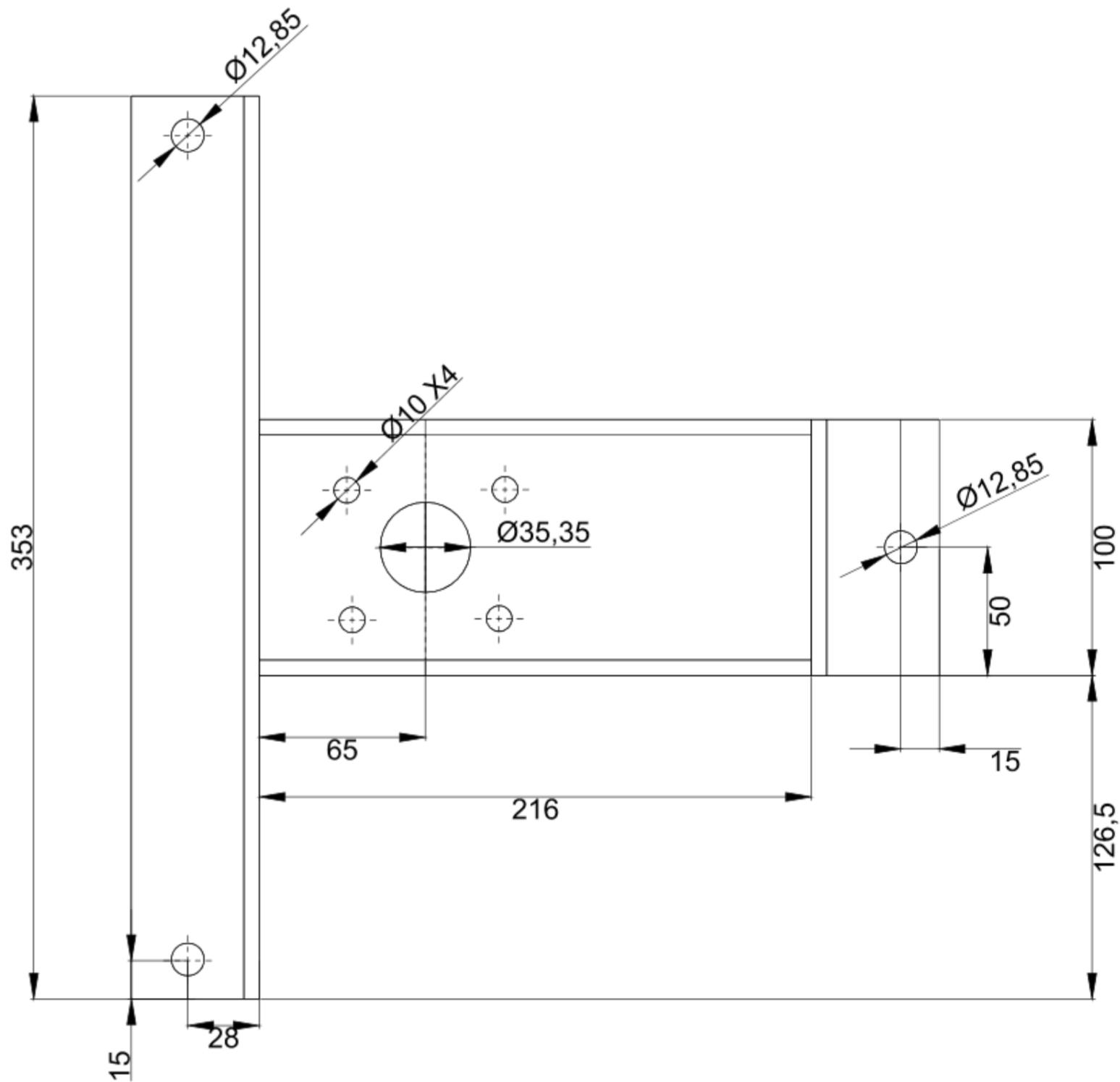
INDICADAS

UNIDADES :

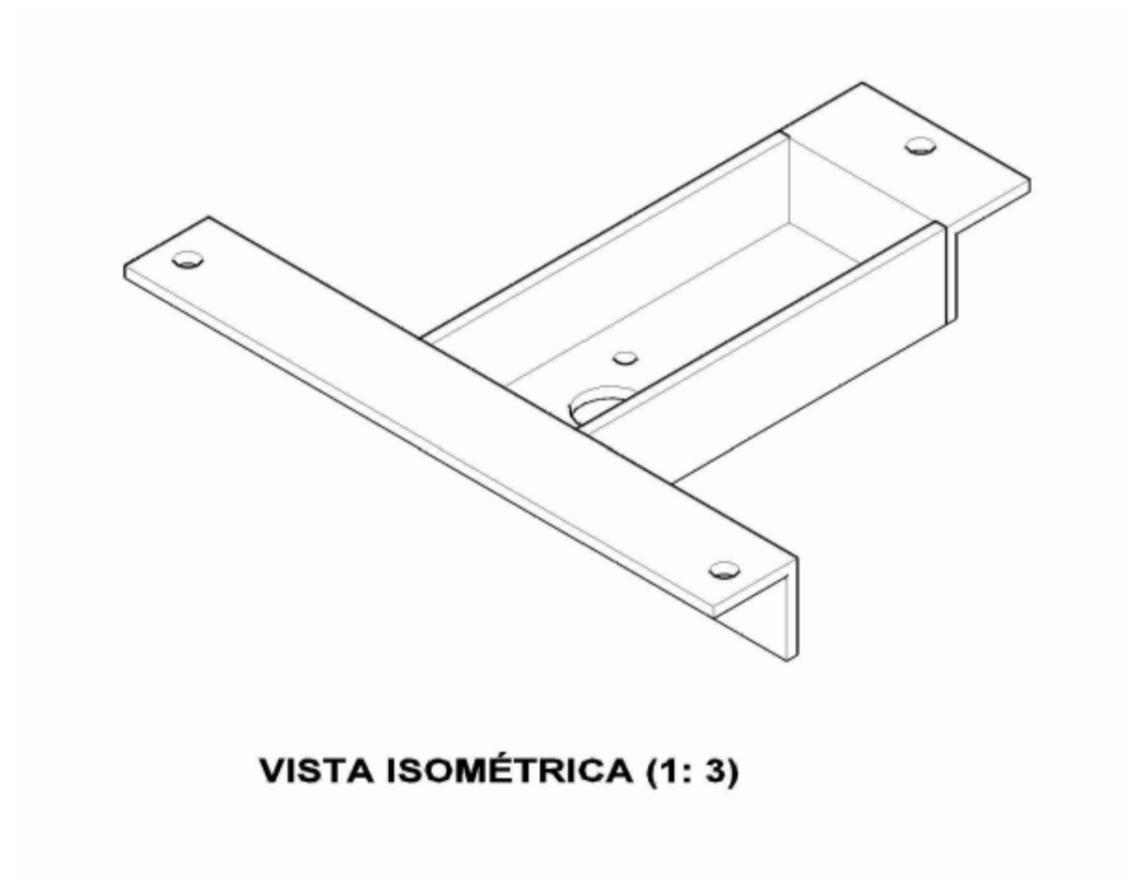
MILÍMETROS

Nº DE LÁMINA :

LÁMINA 5 DE 8

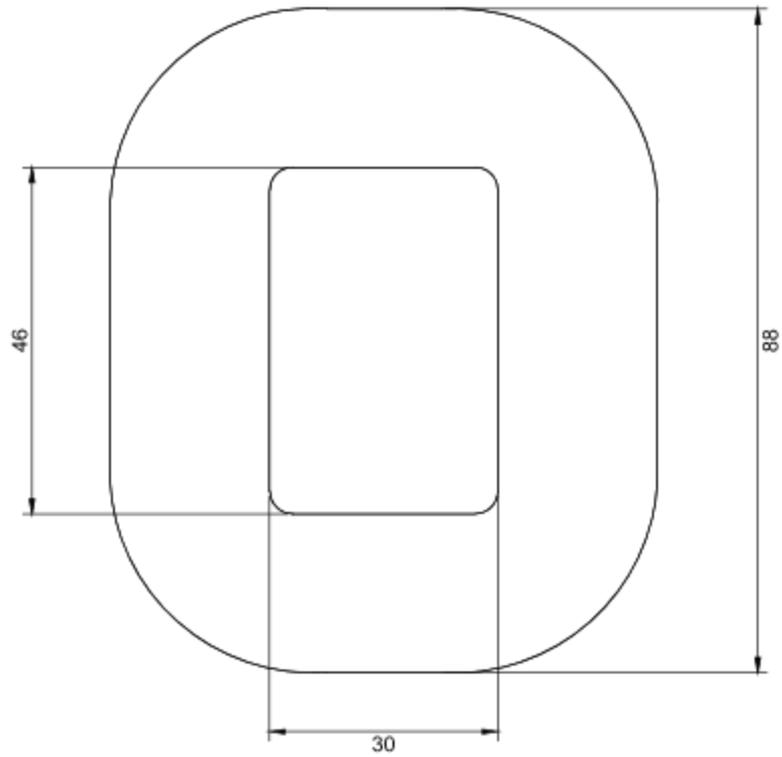


VISTA SUPERIOR (1: 2)

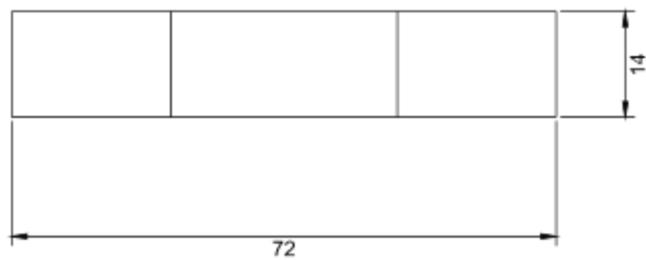


VISTA ISOMÉTRICA (1: 3)

REVISADO POR : PHD. ANA CABRERA	U.T.N ING. EN MANTENIMIENTO ELÉCTRICO	TÍTULO : ESTRUCTURA	
DIBUJADO POR : CARLOS JAVIER CARLOSAMA		MATERIAL : ASTM A36	ESCALA : INDICADAS
		UNIDADES : MILÍMETROS	Nº DE LÁMINA : LÁMINA 6 DE 8



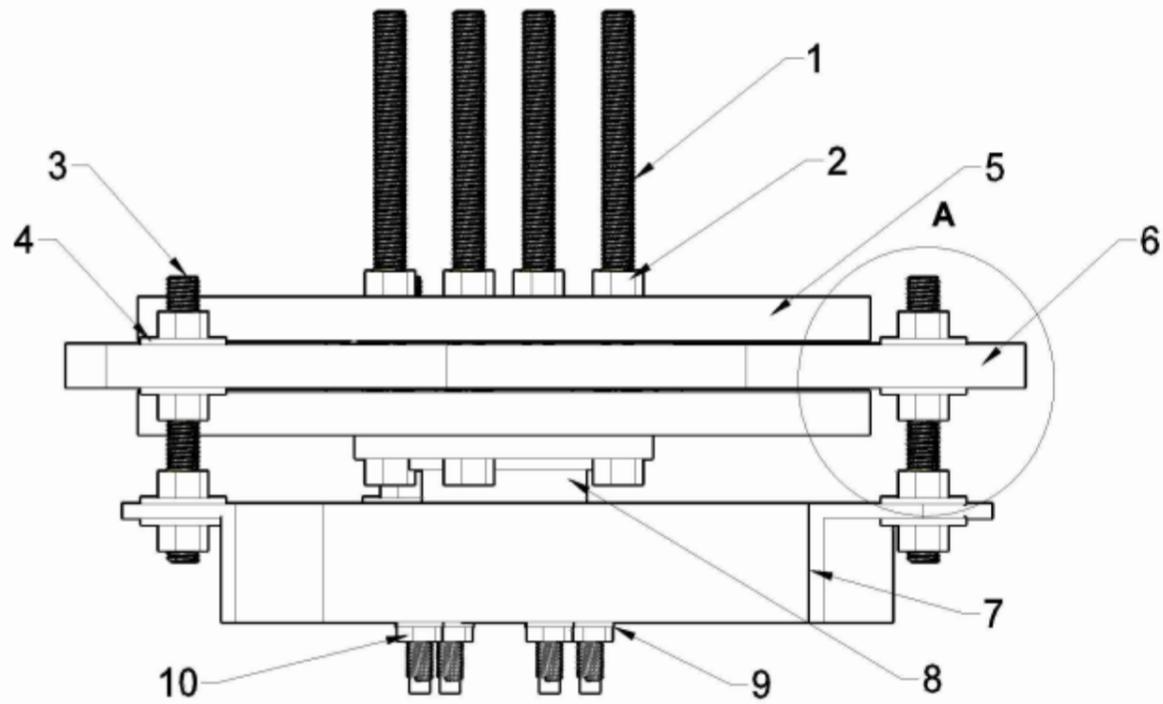
VISTA SUPERIOR (1:1)



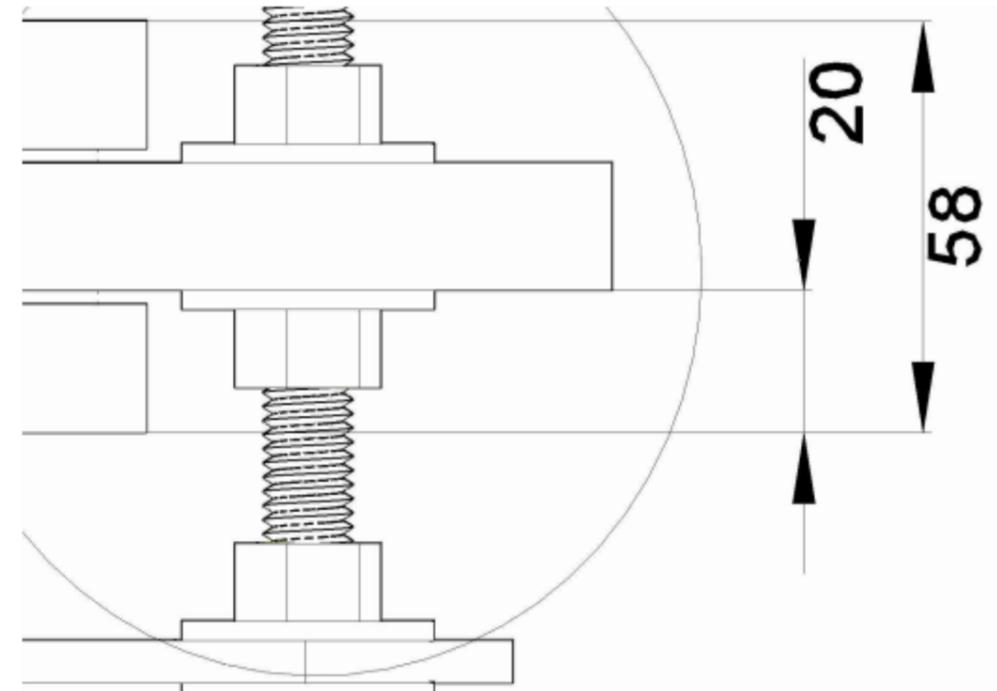
VISTA FRONTAL (1:1)

OBSERVACIÓN: TODAS LA BOBINAS TIENEN 90 ESPIRAS DE ALAMBRE DE COBRE ESMALTADO CALIBRE 14 AWG

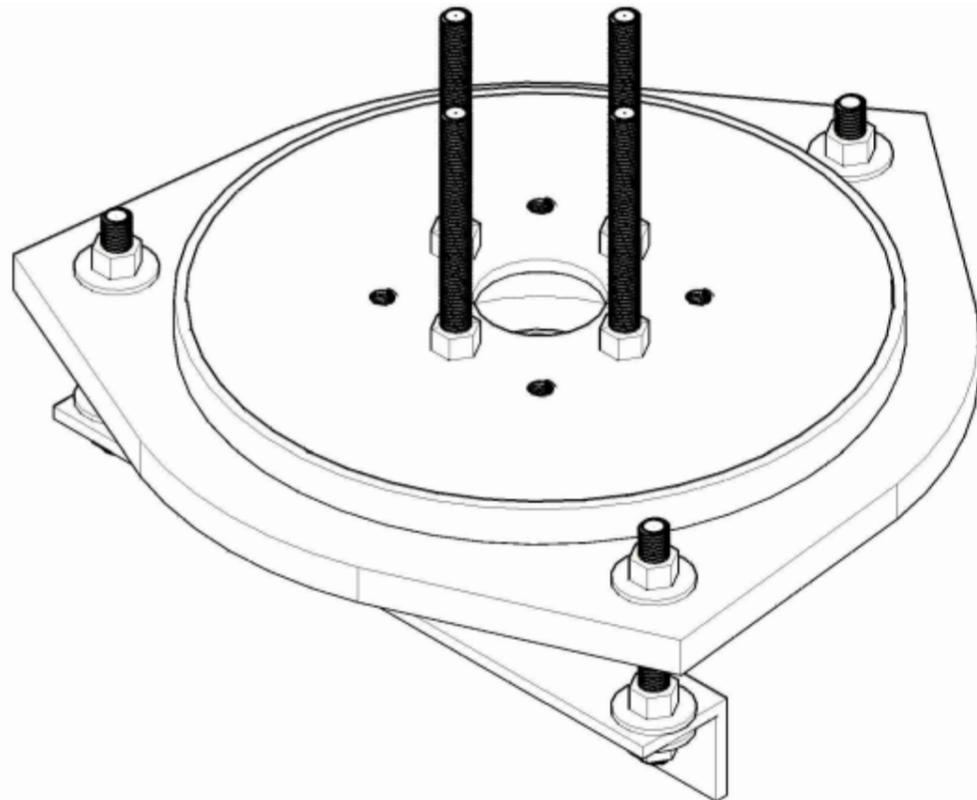
REVISADO POR :	U.T.N ING. EN MANTENIMIENTO ELÉCTRICO	TÍTULO :	
PHD. ANA CABRERA		BOBINA	
DIBUJADO POR :		MATERIAL :	ESCALA :
CARLOS JAVIER CARLOSAMA	UNIDADES :	COBRE	INDICADAS
		MILÍMETROS	Nº DE LÁMINA :
			LÁMINA 7 DE 8



VISTA FRONTAL (1 : 3)



DETALLE A (1 : 1)



VISTA ISOMÉTRICA (1: 3)

OBSERVACIÓN: SE UTILIZA EL CUBO Y PUNTA CON SU RESPECTIVO RODAMIENTO DE UN VEHÍCULO MARCA CHEVROLET AVEO EMOTION DE LA LLANTA TRASERA COMO EJE Y BUJE DEL GENERADOR.

ELEMENTO	DESCRIPCION	CTDAD
1	Espárrago 1/2 * (200mm)	4
2	Tuerca M12	28
3	Espárrago 1/2 * (120mm)	3
4	Arandela plana M12	12
5	Sub-ensamble rotor	2
6	Sub-ensamble estator	1
7	Estructura	1
8	Cubo (manzana)	1
9	Arandela plana M10	3
10	Tuerca M10	4

REVISADO POR : PHD. ANA CABRERA	U.T.N ING. EN MANTENIMIENTO ELÉCTRICO	TÍTULO : GENERADOR DE FLUJO AXIAL	
DIBUJADO POR : CARLOS JAVIER CARLOSAMA		MATERIAL : VARIOS	ESCALA : INDICADAS
		UNIDADES : MILÍMETROS	Nº DE LÁMINA : LÁMINA 8 DE 8

Anexo E: Manual de funcionamiento del prototipo

El presente manual de funcionamiento tiene como objetivo dar a conocer al estudiante el proceso para poner en marcha al prototipo y pueda realizar prácticas de mediciones en el módulo.



Fig. 1: Prototipo del sistema para microgeneración eólica

Fuente: Autor

Antes de poner en marcha el prototipo es importante inspeccionar ciertas partes del prototipo:

1. Antes de conectar el enchufe del motor verificar si hay tensión en el tomacorriente donde vaya a ser conectado. Si no enciende el motor revisar el breaker del circuito que alimenta a dicho tomacorriente.



Fig. 2: Tomacorriente para conectar enchufe del motor

Fuente: Autor

2. Conectar el motor a una fuente de alimentación y encenderlo presionando el botón (ON- color negro). Si no enciende el motor verificar los contactos de la botonera en la parte interna.

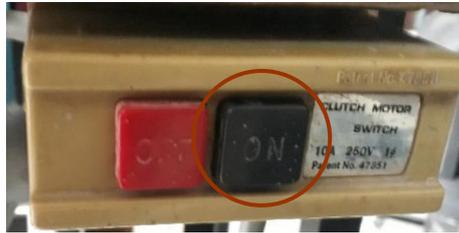


Fig. 3: Interruptor de encendido-apagado del motor

Fuente: Autor

3. Suspender el pedal del motor para ir presionando y aumentando las revoluciones. Si no empieza a girar el motor al presionar el pedal o se queda atascado verificar el resorte de la palanca de accionamiento y si es necesario reajustarlo.



Fig. 4: Pedal del motor

Fuente: Autor



Fig. 5: Palanca de accionamiento del motor

Fuente: Autor

- Para verificar los rpm del generador utilizar un tacómetro digital a láser sin contacto. El láser del tacómetro apuntar a la cinta reflectiva que se encuentra en el rotor frontal del generador.



Fig. 6: Cinta reflectiva
Fuente: Autor

Mediciones que se pueden realizar en el prototipo

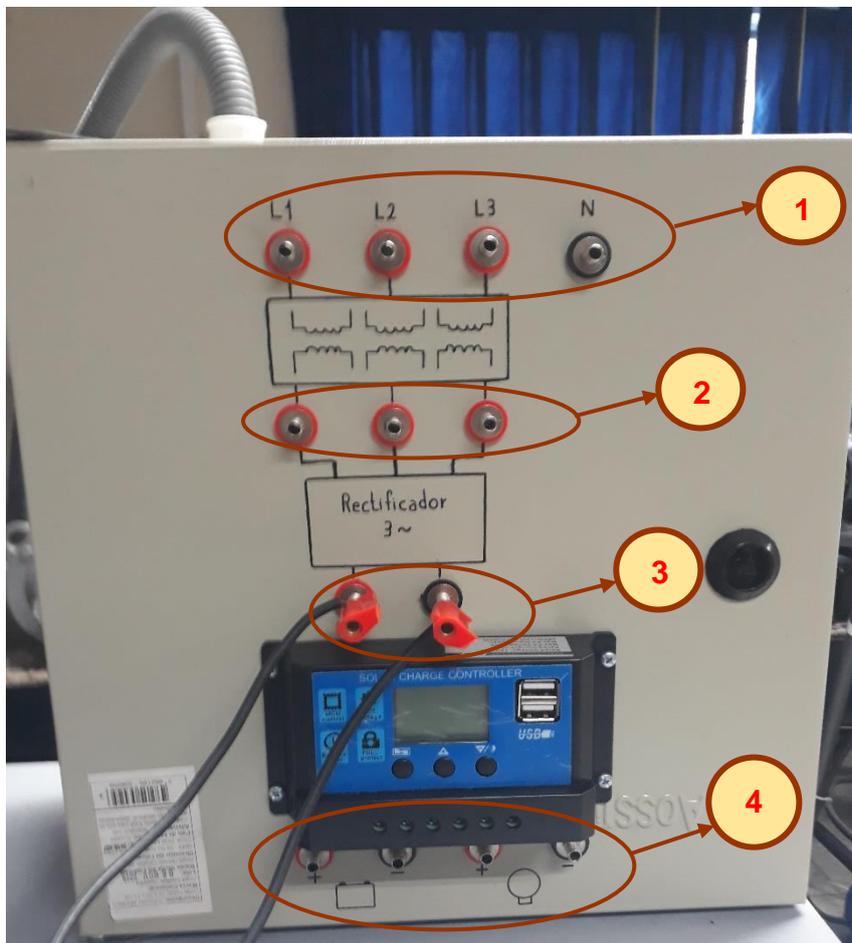


Fig. 7: Panel didáctico para mediciones
Fuente: Autor

- Si se desea tomar mediciones en corriente alterna a la salida del generador en la puerta del gabinete metálico se encuentran bornes de conexión donde se puede conectar los equipos de medición (multímetro, osciloscopio, cargas).

2. También se puede tomar datos en corriente alterna a la salida del banco de transformadores. Cabe destacar que el devanado secundario de los transformadores está en conexión delta, por lo que se puede cambiar su conexión si así lo requiere el estudiante.
3. De igual manera a la salida del rectificador trifásico, se tiene los bornes de conexión para medir la tensión rectificada que será la que ingrese al controlador de carga.
4. Finalmente se tiene bornes de conexión del controlador de carga para conectar una batería y carga. Si se quiere conectar una batería y carga al controlador se debe configurar el dispositivo según el manual de usuario del controlador.

Cabe señalar que las conexiones del sistema electrónico están en la parte interna de la caja metálica.



Fig. 8: Conexiones internas del gabinete metálico

Fuente: Autor

Nota: se debe tener la precaución que durante las pruebas y mediciones el generador no sobrepase los 445 rpm. Debido a que si excede de este valor puede llegar a generar una tensión en corriente continua que sobrepase el voltaje máximo de entrada del controlador de carga.

Anexo F: Manual de mantenimiento del prototipo

El presente manual de mantenimiento tiene como objetivo identificar los componentes del prototipo y conocer las actividades que se deben realizar, así como también con qué frecuencia realizarlas para conservar el buen funcionamiento de este.

A continuación, se describe las técnicas de mantenimiento:

- **Mantenimiento preventivo:** es el conjunto de tareas realizadas para reducir la frecuencia de averías.
- **Mantenimiento predictivo:** en el mantenimiento predictivo, se realiza haciendo un seguimiento del comportamiento de ciertas variables a fin de determinar tendencias de fallas.
- **Mantenimiento correctivo:** es el que se realiza cuando ya existe una falla, implica el cambio de algún componente para ser reparado.

ACTIVIDADES A REALIZAR PARA EJECUTAR EL MANTENIMIENTO AL PROTOTIPO

MANTENIMIENTO PREVENTIVO

Motor



Fig. 1: Motor

Fuente: Autor

- Verificar que el cable de conexión esté en buen estado.
- Revisar en interruptor de encendido y apagado.
- Comprobar que la ventilación sea adecuada.

Generador



Fig. 2: Generador

Fuente: Autor

- Verificar que estén ajustadas las tuercas y rodela.
- Limpiar el polvo en la superficie de los rotores magnético que enfrenta a las caras del estator. Suele adherirse partículas pequeñas que pueden reducir el campo magnético de los rotores.

Banda y polea de acoplamiento del generador al motor

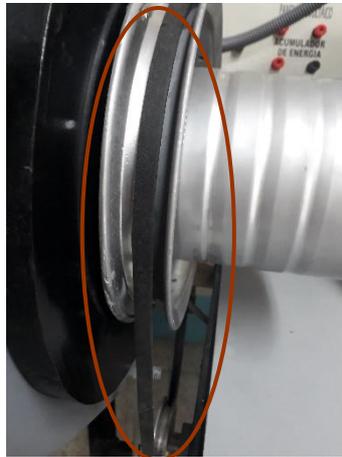


Fig. 3: Banda y polea de acoplamiento

Fuente: Autor

- Verificar que no se encuentre tan templada la banda.

Sistema electrónico



Fig. 4: Sistema electrónico

Fuente: Autor

- Revisar que las conexiones en las borneras de conexiones en la parte interior del gabinete metálico estén ajustadas para evitar pérdidas por efecto joule.
- Revisar que los terminales de conexión del rectificador estén apretados.
- Limpiar el polvo en la parte interna y externa del gabinete metálico.

Mantenimiento predictivo

Motor

- Escuchar si existe ruido, y posibles rozamientos al girar el motor.
- Comprobar que la temperatura sea la adecuada, que no se sobrecaliente.
- Retirar las tapas y quitar el polvo con aire a presión (puede ser usando un compresor).

Generador

- Comprobar si existe des alineamiento de los rotores magnéticos.
- Verificar la separación del estator entre cada rotor magnético.
- Reajustar las tuercas y rodajas que sujetan: la estructura la mesa de soporte, el estator.
- Medir continuidad en los terminales del generador.

Banda y polea de acoplamiento del generador al motor

- Revisar el desgaste de la banda.
- En caso de que este muy floja la banda de acople, ajustar el tornillo que regula la posición del motor.
- Revisar los pernos de sujeción de la polea al generador, que se encuentren apretados.

Sistema electrónico

- Reajustar los bornes de conexión (terminales banana hembra).
- Verificar las conexiones internas y reajustar tornillos de las borneras de conexiones.
- Medir continuidad en los devanados de los transformadores.

Mantenimiento correctivo

Motor

- En caso de que el motor pierda su fuerza o arranque lento. Revisar el condensador y si es necesario cambiarlo.
- En caso de que al presionar el pedal la barra de freno-embrague se queda atascada, lubricar el eje de esta unidad.
- En caso de escuchar rozamiento durante el funcionamiento, revisar los rodamientos y cambiarlos.
- En caso de que no arranque el motor, realizar la prueba de continuidad del devanado del estator, si no mide continuidad, rebobinar el devanado o cambiar el motor.

Generador

- En caso de que los rotores magnéticos estén girando desalineados revisar el cubo, eje y rodamiento, en caso de estar desgastado reemplazarlo.
- En caso de que el giro del rotor sea un poco lento extraer el rodamiento y engrasar de ser necesario; si está desgastado sus pistas se debe cambiar lo más pronto posible.

Banda y polea de acoplamiento del generador al motor

- En caso de que la banda este desgastada reemplazar por una nueva.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

CARRERA DE INGENIERÍA EN MANTENIMIENTO ELECTRICO – ELECTRICIDAD (CIMANELE – CIELE)



GUIA DE MANTENIMIENTO PARA EL MÓDULO DEL PROTOTIPO DEL SISTEMA DE MICROGENERACIÓN EÓLICA

Frecuencia de mantenimiento

Ítem	Equipo	Mensual	Fecha de ejecución	Semestral	Fecha de ejecución	Anual	Fecha de ejecución
1	Motor	<ul style="list-style-type: none"> Limpiar la carcasa. Mantenimiento preventivo. 	Últimos días de cada mes.	<ul style="list-style-type: none"> Destapar la carcasa para quitar el polvo. Mantenimiento predictivo. 	Al inicio de cada período académico.	<ul style="list-style-type: none"> Revisar las conexiones internas. Mantenimiento correctivo de ser el caso. 	Al inicio del mes de enero.
2	Generador	<ul style="list-style-type: none"> Limpiar el polvo de los rotores de la parte exterior. Reajustar las tuercas y arandelas de sujeción. 	Últimos días de cada mes.	<ul style="list-style-type: none"> Comprobar si existe desalineamiento de los rotores magnéticos. Verificar la separación del estator entre cada rotor magnético. 	Al inicio de cada período académico.	<ul style="list-style-type: none"> Realizar la prueba de continuidad en los terminales del estator. Mantenimiento correctivo de ser el caso. 	Al inicio del mes de enero.
3	Banda y polea de acoplamiento	<ul style="list-style-type: none"> Mantenimiento preventivo. 	Últimos días de cada mes.	<ul style="list-style-type: none"> Mantenimiento predictivo y preventivo. 	Al inicio de cada período académico.	<ul style="list-style-type: none"> Mantenimiento predictivo. De ser el caso mantenimiento correctivo. 	Al inicio del mes de enero.
4	Sistema electrónico	<ul style="list-style-type: none"> Mantenimiento preventivo. 	Últimos días de cada mes.	<ul style="list-style-type: none"> Mantenimiento preventivo y predictivo 	Al inicio de cada período académico.	<ul style="list-style-type: none"> Mantenimiento predictivo. Mantenimiento correctivo de ser el caso 	Al inicio del mes de enero.

Anexo G: Manual de prácticas de laboratorio

Práctica 1

1.1 Tema: Toma de mediciones en corriente alterna a la salida del generador

1.2 Objetivo general:

- Realizar mediciones en corriente alterna a la salida del generador.

1.3 Objetivos específicos:

- Tomar mediciones de tensión de línea y de fase a diferentes valores de rpm.
- Observar la forma de onda generada y ver sus características conforme varía los rpm del generador.

1.4 Introducción

Los generadores síncronos o alternadores trifásicos de imanes permanentes en los últimos años han tenido una aplicación creciente en pequeños sistemas de generación eólica, de tal manera que en el prototipo se tiene un generador de este tipo a fin de dar a conocer este tipo de máquina eléctrica.

En esta práctica se pretende tomar mediciones y observar forma de onda en corriente alterna, así como su comportamiento de generación de tensión alterna y frecuencia a diferentes valores de rpm.

1.5 Equipos y materiales

- Cables banana
- Multímetro
- Pinza amperimétrica
- Osciloscopio
- Tacómetro digital a láser sin contacto

1.6 Desarrollo

1. Conectar el equipo de medición (multímetro, osciloscopio) a los bornes de conexión (L1, L2, L3, N) del gabinete metálico.

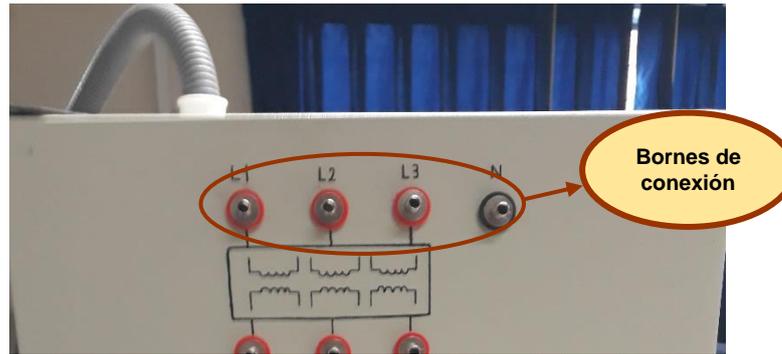


Fig. 1: Bornes de conexión de entrada del generador

Fuente: Autor

- Además, si se desea se puede conectar cargas en conexión estrella en los terminales del generador a fin de obtener mediciones de corriente de cada fase con respecto a neutro.

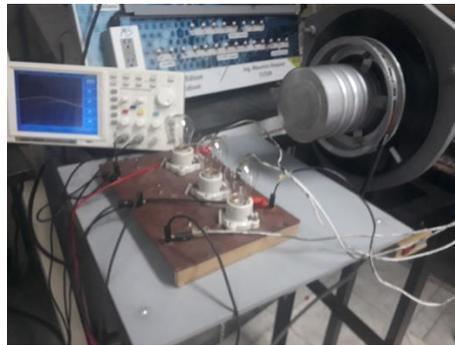


Fig. 2: Carga conectada a las alidas del generador

Fuente: Autor

- Poner en funcionamiento al prototipo según los pasos detallados en Anexo E.

Observación: Para observar la forma de onda con el osciloscopio es importante configurar los parámetros de medida del equipo. En caso de no obtener la forma de onda senoidal puede ser que este mal configurado sus parámetros.

Práctica 2

1.1 Tema: Toma de mediciones en corriente alterna a la salida del banco de transformadores monofásicos.

1.2 Objetivo general:

- Realizar mediciones en corriente alterna a la salida del banco de transformadores.

1.3 Objetivos específicos:

- Tomar mediciones de tensión de línea a diferentes valores de rpm.
- Observar la forma de onda senoidal.

1.4 Introducción

Los pequeños sistemas de generación eólica requieren de un sistema adicional para ponerlo en marcha, es así que en el prototipo se ha implementado este sistema adicional que inicia con un banco de transformadores monofásicos los cuales tienen la relación de transformación 110/220 300W o viceversa. Su objetivo en el sistema es reducir la tensión del generador en relación 2 a 1. En esta práctica se podrá tomar mediciones a la salida del banco de transformadores.

1.5 Equipos y materiales

- Cables banana
- Multímetro
- Pinza amperimétrica
- Osciloscopio
- Tacómetro digital a láser sin contacto.

1.6 Desarrollo

1. Conectar el equipo de medición (multímetro, osciloscopio) a los bornes de conexión del gabinete metálico.

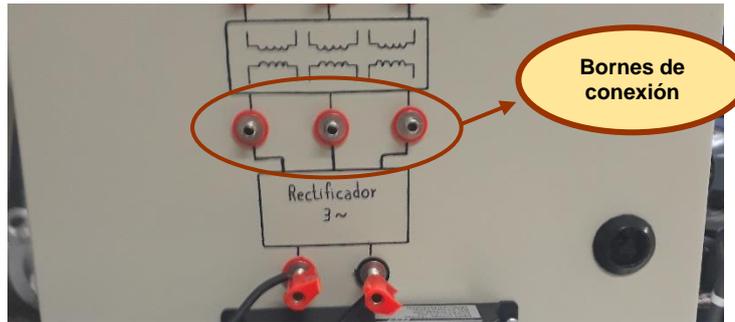


Fig. 1: Bornes de conexión a la salida del banco de transformadores

Fuente: Autor

2. Si se desea se puede conectar cargas en conexión estrella en los terminales del generador a fin de obtener mediciones de corriente de cada fase.
3. También se puede cambiar la forma de conexión de los devanados secundarios del grupo de transformadores (de delta a estrella) y realizar los pasos anteriores.
4. Poner en funcionamiento al prototipo según los pasos detallados en Anexo E.

Observación

- Para observar la forma de onda con el osciloscopio es importante configurar los parámetros de medida del equipo. En caso de no obtener la forma de onda senoidal puede ser que este mal configurado sus parámetros.
- Si se cambia la forma de conexión del grupo de transformadores en la parte interna del gabinete metálico, verificar que la tensión DC a la salida del rectificador no sobrepase su valor máximo de entrada al ir aumentando los rpm del generador y así poder establecer el valor máximo del rpm a las que puede girar el generador cambiando la conexión.

Práctica 3

1.1 Tema: Toma de mediciones en corriente continua a la salida del rectificador trifásico

1.2 Objetivo general:

- Realizar mediciones en corriente continua a la salida del rectificador trifásico.

1.3 Objetivos específicos:

- Tomar mediciones de tensión DC en los bornes del rectificador.
- Comprobar la forma de onda a la salida del rectificador trifásico.

1.4 Introducción

En los pequeños sistemas de generación eólica otro componente del sistema adicional es el rectificador, de manera que en el prototipo se tiene instalado un rectificador trifásico por las características del generador a continuación del banco de transformadores para así poder tener corriente continua que sea almacenada luego de pasar por un controlador de carga. En esta práctica se tomará mediciones a la salida del rectificador a fin de conocer la tensión de salida en DC que luego ingresará al controlador de carga.

1.5 Equipos y materiales

- Cables banana
- Multímetro
- Osciloscopio
- Tacómetro digital a láser sin contacto.

1.6 Desarrollo

1. Conectar el equipo de medición (multímetro, osciloscopio) a los bornes de conexión del gabinete metálico.



Fig. 1: Borne de conexión a la salida del rectificador trifásico

Fuente: Autor

2. Para iniciar con la práctica se debe poner en funcionamiento al prototipo. Según los pasos detallados en Anexo E.

Observación

- Para observar la forma de onda con el osciloscopio es importante configurar los parámetros de medida del equipo. En caso de no obtener la forma de onda senoidal puede ser que este mal configurado sus parámetros.

Práctica 4

1.1 Tema: conexión de batería y carga al controlador de carga del prototipo.

1.2 Objetivo general:

- Realizar la conexión de una batería o carga en los bornes del controlador de carga para verificar el funcionamiento en sí del prototipo.

1.3 Objetivos específicos:

- Tomar mediciones de tensión DC en los bornes del rectificador.
- Comprobar la forma de onda a la salida del rectificador trifásico.

1.4 Introducción

Un último componente de los pequeños sistemas de generación eólica es un controlador de carga por lo que en el prototipo se tiene uno de ellos conectado a la salida del rectificador. En esta práctica tiene como objetivo comprobar el funcionamiento en sí del prototipo.

1.5 Equipos y materiales

- Cables banana
- Multímetro
- Osciloscopio
- Tacómetro digital a láser sin contacto.
- Luces DC
- Batería 12V o 24V

1.7 Desarrollo

1. Para conectar la batería o carga del controlador revisar el manual de usuario para configurarlo en Anexo C.
2. Conectar el equipo de medición (multímetro, osciloscopio) a los bornes de conexión del gabinete metálico.

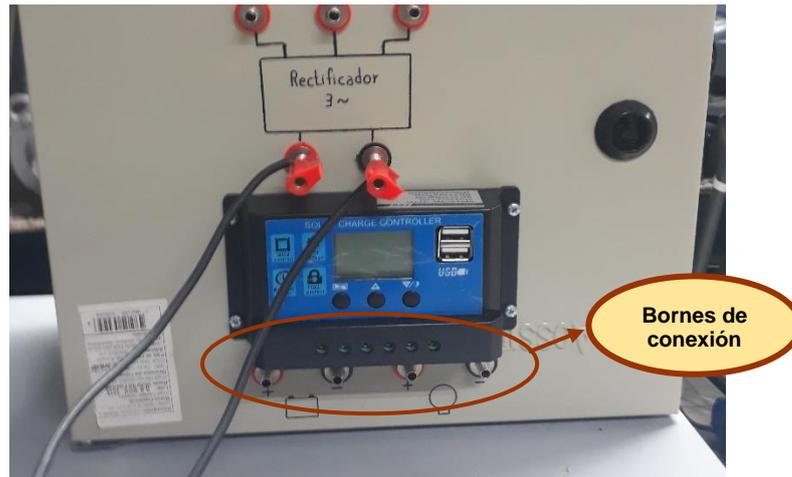


Fig. 1: Bornes de conexión del controlador de carga
Fuente: Autor

3. Poner en funcionamiento al prototipo según los pasos detallados en Anexo E.