

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE



Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas
Carrera de Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico

**CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE GENERADOR EÓLICO DE BAJA
POTENCIA CON EJE VERTICAL EN EL EDIFICIO DE LA CARRERA DE
ELECTRICIDAD DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

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

Autor:

Freddy Leandro Potosí Tana

Director:

MSc. Jhonny Javier Barzola Iza

Ibarra – Ecuador

2021



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

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

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:	0402034912		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Potosí Tana Freddy Leandro		
DIRECCIÓN:	San Gabriel, El Capulí		
EMAIL:	flpotosit@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:		TELÉFONO MOVIL:	0994259924

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO	CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE GENERADOR EÓLICO DE BAJA POTENCIA CON EJE VERTICAL EN EL EDIFICIO DE LA CARRERA DE ELECTRICIDAD DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
AUTOR(ES)	Potosí Tana Freddy Leandro
FECHA:	30/09/2021
SOLO PARA TRABAJO DE GRADO	
PROGRAMA	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TITULO POR EL QUE OPTA	Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico
ASESOR/DIRECTOR	Ing. Jhonny Barzola MSc.

CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto 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 el titular los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 30 días del mes de septiembre del 2021

EL AUTOR:



.....

Freddy Leandro Potosí Tana



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE GRADO

Yo, Barzola Iza Jhonny Javier en calidad de tutor del señor, Potosí Tana Freddy Leandro, certifico que ha cumplido con las normas establecidas en la elaboración del trabajo de investigación titulado: **“CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE GENERADOR EÓLICO DE BAJA POTENCIA CON EJE VERTICAL EN EL EDIFICIO DE LA CARRERA DE ELECTRICIDAD DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE”**. Para la obtención del título de Ingeniero en Mantenimiento Eléctrico; aprobando la defensa, impresión y empastado.

.....
Msc. Jhonny Javier Barzola Iza
DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

DEDICATORIA

“Aquel que duda y no investiga, se torna no sólo infeliz, sino también injusto”.

Blaise Pascal

A Dios, que siempre me ayudó, consoló y protegió en los momentos más difíciles de mi formación profesional, brindándome sabiduría y fortaleza.

A mi persona, por demostrarme que la superación sí es posible y que los obstáculos se superan con responsabilidad y perseverancia. Además, comprobé que los límites no existen y con dedicación se pueden vencer y alcanzar grandes metas.

A mis padres y hermanos, la principal fuente de inspiración y esfuerzo, quienes hicieron posible el sueño “Un título de tercer nivel”. En especial a mi hermano Fabricio Potosí, que me apoyó, confió y depositó toda su confianza en mí durante toda mi formación universitaria.

Freddy Potosí

AGRADECIMIENTO

Gracias prestigiosa Universidad Técnica del Norte por abrirme tus puertas y brindarme la posibilidad de haber iniciado como estudiante y salir como un exitoso profesional.

A Dios, por ser la principal fuente de inspiración de mi vida, quien siempre me escuchó y atendió en los momentos más difíciles. Por llenarme de alegría, salud y rodearme de cosas positivas que me hicieron llegar muy lejos.

A los docentes de la Carrera Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico por aportar sus conocimientos en cada asignatura impartida durante mi carrera profesional.

A mi asesor MSc. Jhonny Barzola docente de la Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas, por la guía, conocimiento y tiempo brindados en la elaboración del presente trabajo de grado.

A mis padres y hermanos por el apoyo incondicional brindado desde el inicio hasta la culminación de mis estudios.

A mis amigos y compañeros de clase por su amistad, ayuda y anécdotas vividas en el transcurso de la carrera universitaria.

Freddy Potosí

TABLA DE CONTENIDO

IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA.....	II
CONSTANCIAS.....	III
CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE GRADO.....	IV
DEDICATORIA.....	V
AGRADECIMIENTO.....	VI
TABLA DE CONTENIDO.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IX
ÍNDICE DE TABLAS.....	XI
RESUMEN.....	XII
ABSTRACT.....	XIII
INTRODUCCIÓN.....	XIV
A1. Contextualización.....	XIV
A2. Planteamiento del problema.....	XVI
A3. Formulación del problema.....	XVI
A4. Justificación.....	XVI
A5. Alcance del trabajo.....	XVII
A6. Objetivo general.....	XVII
A7. Objetivos específicos.....	XVII
CAPÍTULO 1.....	1
1 Tecnologías de generación eólica.....	1
1.1 Aerogeneración.....	1
1.1.1 Energía Eólica.....	1
1.1.2 Potencial Eólico.....	2
1.1.3 Energía eólica a pequeña escala.....	3
1.2 Tipos de Aerogeneradores.....	3
1.2.1 Aerogeneradores de eje horizontal.....	3
1.2.2 Funcionamiento de un aerogenerador de eje horizontal.....	6
1.2.3 Aerogeneradores de eje vertical.....	7
1.2.4 Comparación de los dos tipos de aerogeneradores de eje vertical.....	9
1.3 Comparativa entre tipos de aerogeneradores.....	11
1.3.1 Aerogenerador de eje horizontal frente al aerogenerador de eje vertical.....	11
1.3.2 Aerogenerador de eje vertical frente al aerogenerador de eje horizontal.....	11
1.3.3 Respecto al tipo de turbina eólica.....	12

1.4	Aerogeneradores de eje vertical comerciales.....	13
1.5	Proceso de generación de electricidad en un aerogenerador	14
1.6	Generador eléctrico	15
1.6.1	Generador síncrono	16
1.6.2	Generador asíncrono	16
1.6.3	Comparativa generador asíncrono y síncrono de imanes permanentes.....	17
1.6.4	Generador de imanes permanentes.....	19
1.7	Resumen de capítulo	22
CAPÍTULO 2.....		23
2	Características eléctricas del generador eólico	23
2.1	Introducción	23
2.2	Lugar de estudio	23
2.3	Metodología	24
2.4	Análisis del aerogenerador existente	24
2.4.1	Recurso eólico disponible en el campus universitario	25
2.4.2	Potencia extraíble de la turbina eólica	26
2.5	Aspectos eléctricos del generador síncrono de flujo axial	27
2.5.1	Configuración geométrica del generador	28
2.5.2	Análisis de las características de imanes permanentes	30
2.5.3	Análisis de la velocidad de operación del generador.....	33
2.5.4	Polos y frecuencia del generador.....	35
2.5.5	Frecuencia y velocidad del viento del generador	37
2.5.6	Voltaje de salida en relación con la velocidad	38
2.5.7	Voltaje de salida en corriente continua.....	39
2.5.8	Pérdidas en el generador.....	39
2.5.9	Eficiencia del generador	40
2.6	Recomendaciones de diseño para el generador de flujo axial	42
CAPÍTULO 3.....		43
3	CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DE GENERADOR EÓLICO	43
3.1	Introducción	43
3.2	Determinación de parámetros del generador de flujo axial.....	43
3.2.1	Cálculo de la densidad de flujo máximo	44
3.2.2	Cálculo del número de polos y bobinas.....	44
3.2.3	Cálculo del número de espiras.....	44
3.2.4	Cálculo de la sección del conductor	45

3.2.5	Distribución del bobinado.....	47
3.2.6	Distribución de los imanes en los discos de acero	48
3.2.7	Parámetros finales del prototipo.....	50
3.3	Selección de componentes	51
3.4	Construcción de generador de flujo axial con eje vertical.....	51
3.4.1	Dimensiones de la turbina.....	52
3.4.2	Estructura	52
3.4.3	Buje y Rodamiento	53
3.4.4	Construcción del estator	54
3.4.5	Construcciones de los rotores.....	56
3.4.6	Ensamblaje final del generador.....	58
3.4.7	Implementación del prototipo	59
3.5	Presupuesto del proyecto	61
3.6	Pruebas de caracterización del prototipo	61
3.6.1	Pruebas en vacío	62
3.6.2	Pruebas con carga.....	63
3.6.3	Forma de onda	68
CONCLUSIONES		71
RECOMENDACIONES		72
REFERENCIAS		73
ANEXOS.....		79
ANEXO A: Características del aerogenerador existente		79
ANEXO B: Tabla de conductores de cobre desnudo		81
ANEXO C: Pruebas de generación.....		82
ANEXO D: Programa de mantenimiento del generador		85

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.	Origen del Viento	2
Fig. 2.	Aeroturbina lenta.....	4
Fig. 3.	Aeroturbinas rápidas: a) monopala, b) bipala, c) tripala.....	5
Fig. 4.	Aerogeneradores de eje vertical: a) Darrieus y b) Savonius	8
Fig. 5.	Partes principales de un aerogenerador de eje vertical	9

Fig. 6. Coeficiente de potencia respecto a la velocidad específica del viento	13
Fig. 7. Proceso de generación de electricidad en un generador	15
Fig. 8. Generador síncrono	16
Fig. 9. Generador asíncrono	17
Fig. 10. Generador de imanes permanentes	19
Fig. 11. Generador de flujo radial, vista frontal y transversal	20
Fig. 12. Generador de flujo axial, vista frontal y lateral	20
Fig. 13. Ubicación física para el estudio la implementación del proyecto	23
Fig. 14. Recurso eólico disponible.....	25
Fig. 15. Generación y señal de generación	28
Fig. 16. Distribución de imanes y partes del rotor.....	28
Fig. 17. Rotor y estator de generador flujo axial	29
Fig. 18. Densidad de flujo magnético del imán N52	31
Fig. 19. Densidad de flujo magnético vs. distancia.....	32
Fig. 20. Densidad magnética de dos imanes enfrentados sobre láminas de acero	33
Fig. 21. Medidas de la bobina a emplear en el diseño.....	46
Fig. 22. Colocación de bobinas	48
Fig. 23. Dimensiones de los discos rotores	49
Fig. 24. Orientación y distribución de imanes.....	49
Fig. 25. Perfil y medidas de la turbina	52
Fig. 26. Base de la estructura en acero.....	53
Fig. 27. Manzana usada como rodamiento del generador.....	53
Fig. 28. Bobinadora manual y bobina.....	54
Fig. 29. Conexión de bobinas.....	55
Fig. 30. Soldado de las bobinas	55
Fig. 31. Fases de construcción del estator	56
Fig. 32. Medidas de los rotores	57
Fig. 33. Construcción del rotor	57
Fig. 34. Rotores terminados	58
Fig. 35. Ensamblaje final de aerogenerador	59

Fig. 36. Base de hormigón para el aerogenerador	59
Fig. 37. Instalación del generador eólico	60
Fig. 38. Instalación de regulador de carga eólico	60
Fig. 39. Prueba de generación en vacío.....	62
Fig. 40. Carga resistiva conectada en el generador	63
Fig. 41. Voltaje a diferentes resistencias	64
Fig. 42. Corriente a diferentes resistencias	65
Fig. 43. Potencia a diferentes resistencias	66
Fig. 44. Eficiencia del generador	67
Fig. 45. Forma de onda de la señal.....	68
Fig. 46. Forma de onda de un generador comercial	69
Fig. 47. Armónicos de la señal voltaje.....	70

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.1. Potencia a pequeña escala.....	3
TABLA 1.2. Componentes del aerogenerador de eje horizontal.....	5
TABLA 1.3. Aerogenerador Darrieus y Savonius	9
TABLA 1.4. Aerogeneradores de eje vertical comerciales.....	14
TABLA 1.5. Comparación generador asíncrono y síncrono de imanes permanentes.....	17
TABLA 2.1. Potencia del aerogenerador	27
TABLA 2.2. Características del imán a analizar	30
TABLA 2.3. Velocidad del viento de m/s a rpm	35
TABLA 2.4. Número de polos en función de la frecuencia y velocidad del viento.....	36
TABLA 2.5. Velocidad del viento y frecuencia	37
TABLA 3.1. Parámetros técnicos del aerogenerador	50
TABLA 3.2. Componentes empleados para la construcción.....	51
TABLA 3.3. Presupuesto para la implementación del prototipo de generador eólico.....	61

RESUMEN

El aprovechamiento de las energías renovables altamente abundantes, inagotables y no contaminantes, surge en respuesta para disminuir el uso excesivo de combustibles fósiles altamente contaminantes. En un aerogenerador de eje vertical de baja potencia, el generador eléctrico que en su mayoría emplea es de imanes permanentes de flujo axial, por varias razones: simplicidad de diseño, construcción y generación suficiente que ofrece a bajas velocidades, sin embargo, su funcionamiento se ve limitado por la disponibilidad del recurso eólico que no siempre es constante, siendo necesario estudiar permanentemente sus características eléctricas de funcionamiento para el mejoramiento de su rendimiento. En este proyecto de investigación se diseñó y construyó un prototipo de generador eólico de baja potencia, específicamente un generador de flujo axial, con la finalidad de realizar pruebas de caracterización y evaluar su funcionamiento. El diseño parte de considerar la disponibilidad de recurso eólico que relaciona la cantidad de revoluciones, el análisis de las características magnéticas de los imanes, útiles para determinar la geometría del generador, cantidad de polos, bobinas, conductor para el bobinado, voltaje de salida y pérdidas eléctricas. En la etapa de pruebas de caracterización se realizaron pruebas sin carga y con carga resistiva, con la finalidad de observar el comportamiento de voltaje, corriente y potencia generada en función de la velocidad de rotación medida en revoluciones por minuto, obteniendo con carga elevada mayor voltaje, menor corriente y potencia reducida; en cambio, a poca carga, se obtiene mayor corriente, menor voltaje y potencia más elevada. En cuanto a la eficiencia, el generador presenta menos pérdidas con carga resistiva elevada, las cuales las logra superar. Finalmente, se demuestra que, con los datos obtenidos, el prototipo construido si entrega corrientes y voltajes aceptables para la generación a pequeña escala, con el recurso eólico disponible y las características eléctricas de diseño establecidas.

Palabras clave: energía eólica, generador eólico de baja potencia, eje vertical, flujo axial, imanes permanentes.

ABSTRACT

The use of highly abundant, inexhaustible and non-polluting renewable energies arises in response to reduce the excessive use of highly polluting fossil fuels. In a low power vertical axis wind turbine, the electrical generator that is mostly used is the axial flux permanent magnet generator for several reasons: simplicity of design, construction and sufficient generation at low speeds, however, its operation is limited by the availability of the wind resource that is not always constant, being necessary to permanently study its electrical characteristics of operation to improve its performance. In this research project, a low power wind generator prototype was designed and built, specifically an axial flow generator, in order to perform characterization tests and evaluate its performance. The design starts from considering the availability of wind resource that relates the amount of revolutions, the analysis of the magnetic characteristics of the magnets, useful to determine the geometry of the generator, number of poles, coils, winding conductor, output voltage and electrical losses. In the characterization test stage, tests were performed without load and with resistive load, in order to observe the behavior of voltage, current and power generated as a function of the rotation speed measured in revolutions per minute, obtaining with high load higher voltage, lower current and reduced power; on the other hand, with low load, higher current, lower voltage and higher power are obtained. In terms of efficiency, the generator presents less losses with high resistive load, which it manages to overcome. Finally, it is verified that, with the data obtained, the prototype built does deliver acceptable currents and voltages for small-scale generation, with the available wind resource and the established electrical design characteristics.

Keywords: wind power, low power wind generator, vertical axis, axial flux, permanent magnets.

INTRODUCCIÓN

A1. Contextualización

Actualmente, como lo menciona Tobías Salas & Rubio Jiménez (2017), existen altos niveles de contaminación a escala mundial, ocasionada por la actividad humana con procesos industriales que hacen uso de combustibles fósiles. La producción de energía con turbinas eólicas a pequeña escala, en un inicio es costosa, pero es una fuente confiable de energía si se dimensiona y usa en las condiciones adecuadas, además, genera gran desarrollo socioeconómico en países en vías de desarrollo (Tummala et al., 2016). Los sistemas de energía renovable no siempre brindan un abastecimiento constante de energía, ya que de esto depende su ubicación, velocidad y área del viento (Guillot & Vilorio, 2015). En ocasiones, se instala un aerogenerador en lugares con condiciones de viento no tan favorables, en este sentido surge la necesidad de analizar un aerogenerador que opere bajo estas condiciones, proporcionando un nivel de potencia razonable (Granados & Gonzáles, 2015).

La generación de electricidad a partir de la energía del viento es compleja, además, requiere de tecnología actualizada, inversión de tiempo y dinero en todas las fases: diseño, construcción, operación y mantenimiento (Cueva, 2015). El uso de sistemas eólicos pequeños, por lo general se emplean para suplir las necesidades en zonas rurales y disminuir la tarifa de consumo (Icaza et al., 2018). Para poder extraer la mayor cantidad de energía a partir de la energía cinética viento, es necesario considerar las características del generador eólico y las condiciones ambientales del lugar de la instalación (Antezana, 2014).

En cuanto a los generadores eólicos, encargados de producir electricidad han sufrido modificaciones de acuerdo al tipo de sistema de aerogeneración. Dependiendo de su potencia nominal se clasifican en micro turbinas, pequeños y grandes aerogeneradores. Las micro turbinas cuya potencia no es mayor a 3 kW; se emplean por pequeños consumidores produciendo electricidad y almacenándola en un banco de baterías. En este caso, el generador eléctrico usado es de imanes permanentes, el cual se acciona directamente con el movimiento de la turbina, eliminando el uso de cajas multiplicadoras de velocidad (Cueva, 2015).

La energía eólica se ha venido desarrollando año tras año con una tecnología cada vez más sólida. Según el informe realizado por GWEC (2019), muestra que la capacidad de energía eólica instalada a nivel mundial en el año 2019 fue de más de 651 GW, donde China y Estados Unidos constituyen más del 60 % de los mercados eólicos en el mundo. En Latinoamérica su uso es limitado y eso que cuenta con velocidades de viento promedio de 11 m/s, parámetro para la generación y auto-sostenibilidad (Palacio, 2017). La barrera que impide la explotación de la energía eólica es el factor económico que a su vez se relaciona con la complejidad estructural, diseño e implementación.

Los aerogeneradores de eje vertical presentan estructuras más simples basando su funcionamiento en el arrastre de las secciones expuestas al viento, para mayor rendimiento se opta por modificar su aerodinámica, que a su vez implica una mayor complejidad estructural (Mendoza, 2017). Estas tecnologías presentan inconvenientes por la aleatoriedad del viento, que en ocasiones puede ser fuerte, débil o de corta duración. Este tipo de inconvenientes hace más complejo el proceso de conversión de energía, ya que el generador necesita que la velocidad de giro del rotor sea constante, pero al estar relacionada con la velocidad del viento es difícil de conseguir (Apata & Oyedokun, 2017). Las máquinas encargadas de la producción de electricidad a partir de la energía del viento son los generadores de corriente continua y alterna. Los de corriente continua presentan el problema de ser complejos y poco eficientes, por esta razón resulta más conveniente generar continua con máquinas alternas (Rodríguez & León, 2016). En el ámbito eólico, hoy en día se tiende a utilizar alternadores de múltiples imanes, gracias al descubrimiento de estos materiales que presentan la propiedad de poseer un gran campo magnético, haciendo posible reemplazar a los electroimanes y reducir la complejidad estructural (Zhou et al., 2015).

En Ecuador la producción de electricidad en su mayoría se enfoca en la generación hidráulica la cual es contaminante, además, el país posee otras alternativas como la solar y eólica que no son aprovechadas por la falta de estudio de los entornos donde podrían ser utilizadas (Agallardo et al., 2019). Un estudio realizado recientemente en el Campus de la Universidad Técnica del Norte, determinó el recurso eólico existente, el cual varía de 2 m/s a 9 m/s (Melo Paillacho, 2019). Esto hace posible la implementación de pequeños sistemas de aerogeneración, por lo general son de eje vertical debido a que trabajan con bajas velocidades de viento.

A2. Planteamiento del problema

Los sistemas de micro generación eólica, así como otros sistemas se usan para cubrir las necesidades energéticas del lugar donde se instalan, principalmente en hogares en donde la red eléctrica no llega o en establecimientos que desean disminuir sus gastos por consumo energético. En los sistemas de generación eólica, el generador es la parte principal encargada de transformar la energía mecánica en eléctrica. Las características de funcionamiento del generador eléctrico dependen de la disponibilidad de recurso eólico, en este sentido es necesario el estudio permanente de las características de funcionamiento, tanto mecánicas como eléctricas de estos elementos para el mejoramiento de su rendimiento en función de las condiciones ambientales, es decir, del recurso eólico disponible. Las exigencias climáticas y otros factores, hacen que la conversión energética se complique, ya que el generador necesita que algunas variables sean constantes como la velocidad de giro del rotor que depende directamente de la velocidad del viento. Para solucionar este inconveniente se hacen modificaciones en el diseño, haciendo más compleja la generación.

A3. Formulación del problema

¿Cómo analizar las características eléctricas de funcionamiento del aerogenerador existente en el edificio de la Carrera de Electricidad de la Universidad Técnica del Norte para la construcción de un nuevo prototipo?

A4. Justificación

El presente trabajo estará enfocado en la construcción de un prototipo de generador eólico con eje vertical en el edificio de la Carrera de Electricidad de la Universidad Técnica del Norte, ya que al ser el generador una parte importante en un sistema de aerogeneración, es relevante conocer su funcionamiento con el propósito determinar su comportamiento frente a cambios constantes del recurso eólico. Para la construcción del prototipo se emplearán materiales que poseen un gran poder magnético como es el caso de los imanes que hacen posible que los generadores sean más pequeños y eviten el uso de componentes mecánicos. Además, con la posterior caracterización del prototipo se aportará de nuevos conocimientos, los cuales serán de gran ayuda para comprender sus parámetros de funcionamiento y, además, servirá de base para nuevos diseños de generadores eólicos.

A5. Alcance del trabajo

El presente trabajo de grado está basado en una investigación de carácter tecnológico y práctico en donde se realizará la construcción de un prototipo de generador eólico de baja potencia con eje vertical en el edificio de la Carrera de Electricidad. El diseño de la turbina eólica se realizará con base al aerogenerador eólico existente. El pequeño aerogenerador eólico será de eje vertical y el generador eléctrico a elaborarse será un generador de flujo axial de imanes permanentes. Una vez construido el prototipo de generador eólico se realizará una caracterización del mismo.

A6. Objetivo general

Construir un prototipo de generador eólico de baja potencia con eje vertical, para la realización de estudios de caracterización de funcionamiento eléctrico, mediante el análisis de un aerogenerador existente en la Carrera de Electricidad de la Universidad Técnica del Norte.

A7. Objetivos específicos

- Realizar una descripción y comparativa de las tecnologías de generación eólica.
- Analizar las características eléctricas de funcionamiento del aerogenerador eólico de la Carrera de Electricidad.
- Construir el prototipo de generador eólico de baja potencia con eje vertical.

CAPÍTULO 1

1 Tecnologías de generación eólica

El presente capítulo tiene como finalidad describir las tecnologías de generación eólica más conocidos como aerogeneradores, empezando por conceptos generales de los parámetros que influyen en la aerogeneración. Además, se describen las topologías existentes respecto a su geometría, componentes y sus aspectos más importantes. Cada tecnología de generación tiene características favorables y desfavorables motivo por el cual se compara una con otra. Finalmente, se profundiza en los tipos de generadores eléctricos empleados en los sistemas de aerogeneración detallando sus ventajas y desventajas para cada caso, centrándose en la parte final en el generador de imanes permanentes siendo el propósito del presente proyecto.

1.1 Aerogeneración

Con el pasar del tiempo la tasa de contaminación ha ido en incremento debiéndose principalmente a la actividad humana, cada vez con exigencias más altas de energía. Para la mayoría de procesos se emplean combustibles de origen fósil que presentan las desventajas de contaminar el medio y agotarse, lo que lleva a poner la mira en fuentes renovables. La aerogeneración consiste en aprovechar la fuerza del viento, convertirla en energía mecánica y finalmente transformarla en electricidad, apta para el consumo humano. Dentro de las ventajas de este proceso de generación se tiene los niveles bajos de contaminación y cambios en la matriz energética en vista de ser energía limpia e inagotable (Lastra et al., 2019).

1.1.1 Energía Eólica

La energía eólica es aquella que proviene del movimiento de las masas de aire, que a su vez son generadas por el calentamiento solar desigual en la superficie terrestre (Fig. 1). Durante el día cuando existe mayor cantidad de radiación solar, las masas de aire se calientan y se elevan dejando un espacio que es ocupado por el aire frío, este intercambio da como resultado el origen del viento (CELEC EP, 2019).



Fig. 1. Origen del Viento
Fuente: (CELEC EP, 2019)

A este tipo de energía se le da distintos usos, el más importante como medio de obtención de energía eléctrica de manera limpia. Las tecnologías usadas para la producción de electricidad son los aerogeneradores tanto de eje vertical como horizontal (Azevedo et al., 2017).

1.1.2 Potencial Eólico

El potencial eólico se lo conoce como la magnitud o cantidad del recurso energético entregado por el viento en una zona o lugar que determinado. El conocimiento del potencial eólico es de gran relevancia, ya que permite determinar la capacidad instalable y viabilidad de proyectos de aerogeneración (Mendoza, 2017).

- **Parámetros para conocer el potencial eólico**

Para determinar el potencial eólico en una zona específica es necesario la realización de un registro donde se detalle el lugar, extensión superficial y características topográficas, para de esta forma tener una idea de la capacidad instalable (Jaramillo et al., 2018).

Los parámetros básicos son: velocidad y dirección del viento, además, se suman la temperatura y presión del aire, todos contribuyen a la determinación del potencial eólico (Díaz, 2018). Los parámetros antes mencionados son medidos a una altura apropiada con equipos de medición que guardan los datos para una posterior manipulación de los mismos.

1.1.3 Energía eólica a pequeña escala

Se entiende por micro generación la producción de energía eléctrica a pequeña escala haciendo uso de fuentes renovables como sol y viento. Los niveles de potencia que manejan estos sistemas son reducidos en comparación a los de mayor capacidad que se conectan a la red y su producción se limita hasta los 100 kW (Cárdenas, 2019). En la TABLA 1.1 se muestran los niveles de potencia a pequeña escala.

TABLA 1.1. Potencia a pequeña escala

Tipo	Área de barrido [m ²]	Potencia [kW]
Pico	4,9	P < 1
Micro	40	1 < P < 7
Mini	300	P < 100

Fuente: (Cárdenas, 2019)

Elaborado: Autor

Como se pudo apreciar, los niveles de potencia a pequeña escala son ideales para satisfacer las necesidades energéticas personales, además, la potencia generada aumenta acorde con el área de barrido del aerogenerador.

1.2 Tipos de Aerogeneradores

Los aerogeneradores captan la energía del viento a través de sus palas y por medio de elementos mecánicos es transmitida al rotor del generador eléctrico. Existen dos tipos de aerogeneradores que se diferencian por su potencia, tipo de generador eléctrico que emplean y la disposición del eje de rotación (Hurtado, 2018).

1.2.1 Aerogeneradores de eje horizontal

Los aerogeneradores de eje horizontal se caracterizan por tener el eje del rotor en posición horizontal, además, su dirección de giro es paralela a la energía cinética del viento, entre otras características este tipo de máquinas poseen mecanismos de orientación y autoarranque (Tobías & Rubio, 2017). Dentro de esta categoría por el tipo de turbina se clasifican en aeroturbinas lentas y rápidas.

- **Las aeroturbinas lentas**

Poseen un número elevado de palas que varía de 6 a 24 (Fig. 2). Las desventajas que presentan este tipo de aeroturbinas son: su elevado par de arranque y velocidad de giro reducida. La velocidad máxima que pueden girar es a la velocidad del viento, debido a ello es que su principal aplicación sea para sistemas de bombeo de agua y no para generación (Structuralia, 2018).



Fig. 2. Aeroturbina lenta
Fuente: (San Román, 2013)

El lugar de ubicación de este tipo de turbina es elevado y por su limitada velocidad posee un coeficiente de potencia bajo con velocidad punta máxima igual a 1, caracterizándola como una turbina poco eficiente para generar electricidad.

- **Las aeroturbinas rápidas**

Presentan una velocidad de giro más elevada que las anteriormente mencionadas y par de arranque pequeño, su velocidad máxima está en los márgenes de 6 a 14 veces la velocidad del viento. Esta característica hace que se usen con mayor frecuencia para la generación de electricidad, además, los elementos mecánicos empleados son de menor tamaño y coste (Pérez, 2017). En la Fig. 3 se muestran los tres tipos de turbinas rápidas: monopala, bipala y tripala.

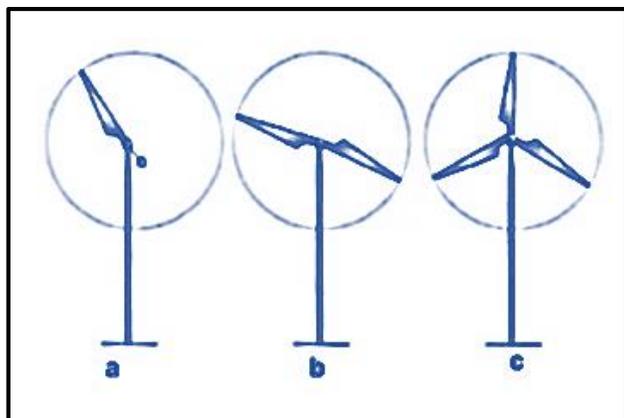


Fig. 3. Aeroturbinas rápidas: a) monopala, b) bipala, c) tripala
Fuente: (Martín, 2015)

De los tres tipos de turbinas antes indicadas la más utilizada es la tripala, debido a que ofrece una mayor estabilidad, emite la menor cantidad de ruido y sobre todo la que mayor rendimiento energético ofrece (Pérez, 2017).

- **Componentes del aerogenerador eje horizontal**

Los aerogeneradores de eje horizontal independientemente de la potencia que generen, el principio de funcionamiento es el mismo. En la TABLA 1.2 se describen varios de sus componentes.

TABLA 1.2. Componentes del aerogenerador de eje horizontal

COMPONENTE	FUNCIÓN	FUENTE
Torre	Encargada de soportar a todos los elementos del aerogenerador, entre más alejada este del piso la velocidad del viento es mayor.	(Hernández, 2016)
Góndola	En su interior contiene el multiplicador y generador eléctrico, entre los componentes más importantes	(Cazes, 2017)
El rotor	Parte del aerogenerador compuesta por palas y buje.	(Luque, 2017)
Buje	Conecta las palas al eje de transmisión o sistema de rotación.	(Cazes, 2017)
Palas	Su función es captar la energía del viento.	(Riverón, 2017)

Mecanismo de orientación	Consiste de una veleta para determinar la dirección del viento.	(Hernández, 2016)
Anemómetro	Equipo encargado de determinar la velocidad del viento.	(Riverón, 2017)
Generador eléctrico	Encargado de la conversión de la energía mecánica en eléctrica, generando corriente alterna.	(Luque, 2017)
Multiplicador	Se encarga de aumentar la velocidad de giro del eje que está conectado al generador.	(Cazes, 2017)

Elaborado: Autor

Todos los componentes antes mencionados son importantes para el buen funcionamiento de un aerogenerador de eje horizontal, si varía el tamaño de la máquina el diseño también lo hará, pero se seguirá usando los mismos componentes. Este tipo de sistemas vienen a ser más complejos en cuanto a diseño, construcción e implementación, de acuerdo a su tamaño. En cuanto a generación y potencia, esta tecnología es la más apropiada.

1.2.2 Funcionamiento de un aerogenerador de eje horizontal

Los aerogeneradores producen electricidad haciendo uso de la energía cinética del viento, la potencia de entrada resulta de convertir la fuerza proporcionada por el recurso eólico en un par que actúa en el rotor. La energía que recibe el rotor depende de; velocidad del viento, la geométrica de las palas que a su vez implica el área de barrido y la densidad del aire (Riverón, 2017).

- Densidad de aire

La energía cinética del viento que se transfiere al rotor depende de la densidad del aire, el valor de la densidad cambia respecto a la presión atmosférica y temperatura (Jijón et al., 2018).

- Área de barrido

Se relaciona principalmente con la forma que poseen los álabes, cuanto más grande es el diámetro mayor es la cantidad de energía cinética, por lo tanto, la energía que absorbe el rotor también lo será (Urcelay, 2019).

- **Velocidad del viento**

Es fundamental para que el aerogenerador pueda producir electricidad, mientras mayor sea la velocidad del viento mayor será la producción de energía. La captación de la energía del viento se realiza por medio de las palas del rotor, el cual está acoplado al generador eléctrico (EOLICCAT, 2020).

1.2.3 Aerogeneradores de eje vertical

El aerogenerador de eje vertical de acuerdo a Tobías y Rubio (2017), se caracteriza en que el eje del rotor se encuentra ubicado en posición vertical, es decir, perpendicular al suelo. Entre sus características más relevantes se identifica que no necesita de un sistema de orientación para captar la energía del viento y todos sus implementos se encuentran a nivel del suelo, desde su generador eléctrico hasta los sistemas de control (Kumar et al., 2018). Los aerogeneradores de eje vertical comprenden dos grandes grupos: Darrieus y Savonius.

- **Aerogenerador Darrieus**

Este tipo de aerogenerador posee dos o tres álabes rectos o curvos montados en un eje vertical, como se indica en la Fig. 4 a. Se lo conoce como aerogenerador rápido por su elevada velocidad de rotación, además, su par de arranque es pequeño y la potencia que genera esta en los rangos de 5 kW a 4000 kW. Por otra parte, funciona con velocidades de viento superior a 2 m/s, no pueden arrancar por sí solo y necesita de un dispositivo adicional de arranque (Luque, 2017).

- **Aerogenerador Savonius**

Posee una turbina eólica en forma de "S" con una parte cóncava que provoca el par de giro y convexa que se opone al mismo, como se aprecia en la Fig. 4 b. Se caracteriza por empezar a girar con bajas velocidades de viento debido a la resistencia que ofrece su rotor, es por ello que se los conoce como aerogeneradores lentos. Los rangos de potencia se encuentran entre 0.1 kW a 5 kW (Cárdenas, 2019). El inconveniente que presenta este aerogenerador es la sobrepresión del aire en las zonas cóncavas al no ser expulsado rápidamente afectando a su rendimiento (Hurtado, 2018).

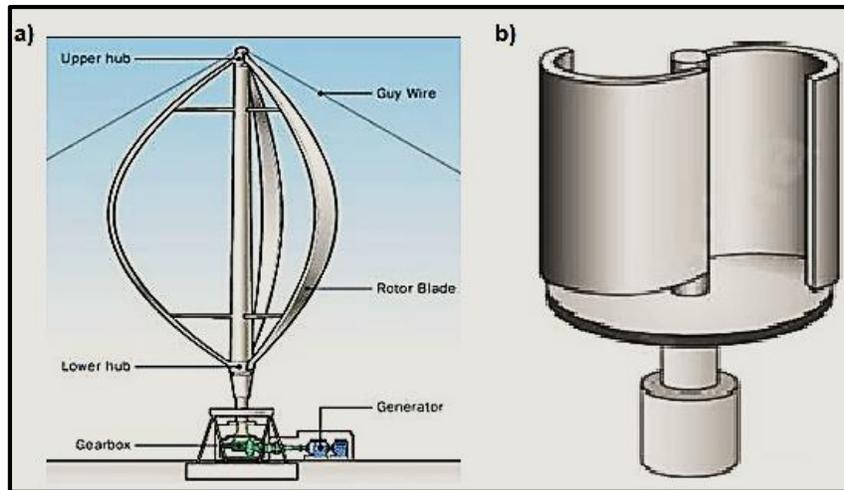


Fig. 4. Aerogeneradores de eje vertical: a) Darrieus y b) Savonius

Fuente:(Pico et al., 2018)

El aerogenerador Darrieus es más grande en estructura, pero presenta problemas de arranque y requiere de elementos adicionales para su retención. En cambio, el aerogenerador Savonius, tiene un tamaño más reducido, gira a bajas velocidades y no posee problemas de arranque.

- **Componentes principales de un aerogenerador de eje vertical**

Un aerogenerador de eje vertical es empleado para generar pequeñas potencias con los siguientes componentes (Hurtado, 2018):

- **Aspas:** son las encargadas de captar la energía cinética de viento y transferirla al eje del rotor en forma de energía mecánica.
- **Eje Giratorio:** aquella parte encargada de transferir la energía mecánica y lugar de ubicación del sistema de rodamientos.
- **Transmisión y Generación:** una vez que el eje del generador recibe la energía mecánica transferida por parte del rotor, se obtiene energía eléctrica destinada al almacenamiento en baterías o conectarse directamente a la red de ser el caso.

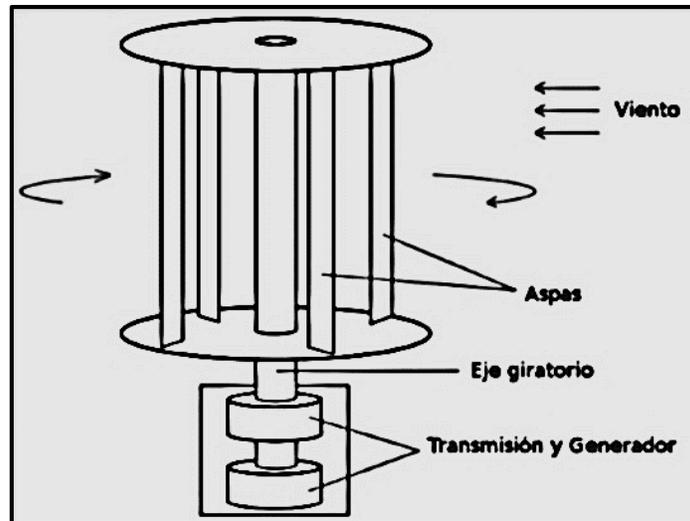


Fig. 5. Partes principales de un aerogenerador de eje vertical
 Fuente: (Hurtado, 2018)

La cantidad de componentes que emplea esta tecnología es menor en comparación al aerogenerador de eje horizontal. Además, se ve reducida la inversión, complejidad en diseño e implementación, lo que lo hace ideal para aplicaciones de baja potencia.

1.2.4 Comparación de los dos tipos de aerogeneradores de eje vertical

En la TABLA 1.3 se detallan las diferencias y similitudes del aerogenerador Darrieus y Savonius.

TABLA 1.3. Aerogenerador Darrieus y Savonius

CARACTERÍSTICAS	SAVOUNIUS	DARRIEUS
Perfil de la turbina o álabes.	Es simple, representada por dos caras de cilindro.	Es complejo, además, posee varias configuraciones.
Sistema de autoarranque.	Posee buenas características para el autoarranque a bajas velocidades.	Necesita de un dispositivo adicional para el autoarranque (motor).

Sistema de orientación y torre.	No necesita, ya que puede arrancar en cualquier dirección a niveles bajos.	No emplea sistema de orientación y en vez de torre emplea cables de retención.
Estructura de retención (cables).	No es necesario por su tamaño reducido.	Si necesita, dado que las dimensiones de la turbina son mayores.
Rendimiento y velocidad de giro.	Debido a la geometría de sus álabes, su velocidad y rendimiento es reducido.	Presenta un mayor rendimiento y velocidad de giro que el aerogenerador Savonius, en ocasiones se puede comparar con un aerogenerador de eje horizontal.
Sistema de direccionamiento de los álabes.	No es necesario, debido a la disposición de sus álabes que pueden arrancar en cualquier dirección.	No es necesario, por lo general estos sistemas se usan en aerogeneradores de eje horizontal.
Coefficiente de potencia.	Cp 0,3-0,5.	Cp 0,49.
Rangos de potencia.	0,1-5 kW.	4-5 MW.

Fuente: (Funes, 2020; Tobías & Rubio, 2017)

Elaborado: Autor

Ambos tipos de aerogeneradores poseen características similares, su elección depende del tipo de uso que se le vaya a dar, por ejemplo, para el ámbito domiciliario resulta más conveniente un aerogenerador Savonius principalmente por sus dimensiones y espacio de instalación. Por otra parte, el aerogenerador Darrieus con dimensiones más elevadas ofrece mejores características de generación y rendimiento.

1.3 Comparativa entre tipos de aerogeneradores

Tanto los aerogeneradores de eje vertical como horizontal presentan características sobresalientes del uno sobre el otro, las cuales se mencionan a continuación.

1.3.1 Aerogenerador de eje horizontal frente al aerogenerador de eje vertical

Este tipo de tecnología posee características que la favorecen frente a la tecnología de eje vertical, las cuales se detallan a continuación: (Saavedra, 2019; Song et al., 2018).

- ❖ Posee la capacidad de autoarranque, a diferencia de algunos modelos de eje vertical que necesitan sistemas de puesta en marcha.
- ❖ Dispone de un mecanismo de orientación, lo cual es útil para cambiar de ubicación al rotor de la turbina.
- ❖ La eficiencia energética es mayor y por la geometría de sus álabes alcanza mayores velocidades de giro, lo que lo lleva a necesitar cajas de multiplicación de velocidad con menor relación.
- ❖ Por su estructura elevada aprovecha en mayor cantidad la energía cinética del viento.
- ❖ Puede controlar la velocidad del rotor y proteger la máquina frente a condiciones bruscas de viento.
- ❖ Dispone de un control de la energía de salida en relación a la velocidad del rotor.
- ❖ Cuenta con un control de velocidad del rotor dependiendo de la necesidad.
- ❖ Posee de control de ángulo de paso.

En cuanto a generación eléctrica, el aerogenerador de eje horizontal es el ideal, ya que al poseer una tecnología más avanzada en equipos y estructura su rendimiento, eficiencia y nivel de generación está muy por encima que el aerogenerador de eje vertical.

1.3.2 Aerogenerador de eje vertical frente al aerogenerador de eje horizontal

Los aerogeneradores de eje vertical poseen características que los hacen sobresalir sobre los de eje horizontal (Kumar et al., 2018; Mendoza, 2017).

- ❖ Todos sus componentes tren de potencia, generador eléctrico y equipos adicionales se ubican a nivel del suelo, lo que evita gastos y complejidad en el diseño.

- ❖ Pueden operar con vientos en cualquier dirección y no necesitan de un sistema de orientación. Además, pueden operar a alturas pequeñas, esta última es útil para programas de mantenimiento.
- ❖ Es capaz de arrancar con bajas velocidades de viento, además, de que se adapta a corrientes de viento en cualquier dirección
- ❖ El ruido aerodinámico es menor y el coeficiente de potencia máximo lo alcanza a menores velocidades en comparación con el aerogenerador de eje horizontal.
- ❖ La velocidad angular que alcanza es reducida, lo cual beneficia a que los problemas de vibración se minimicen.
- ❖ En el aspecto económico las máquinas de eje vertical tienen un costo menor frente a las de eje horizontal, relacionada principalmente con su estructura e implementación.
- ❖ Para cuestiones de aplicaciones urbanas el aerogenerador de eje vertical se adapta mejor debido a su tamaño, espacio de instalación y menor emisión de ruidos.

De acuerdo a lo mencionado, el aerogenerador de eje vertical es ideal para uso personal compensando una parte de la energía de consumo. La energía generada al ser pequeña no se destina a conectarse a la red sino a una batería, lo que viene a ser una desventaja al incrementarse el costo del sistema. Por otra parte, en cuestiones de contaminación visual, emisión de ruidos, espacio y estética, el aerogenerador de eje vertical es mejor.

1.3.3 Respecto al tipo de turbina eólica

Este elemento es una parte importante en un aerogenerador cualquiera que sea su tipo. Son las encargadas de captar toda la energía cinética del viento y transformarla en energía mecánica. En la Fig. 6 se muestra el coeficiente de potencia de los aerogeneradores respecto a la turbina eólica que emplean.

El mayor coeficiente de potencia lo alcanzan las turbinas con dimensiones elevadas como es el caso de aerogeneradores de eje horizontal, por el contrario, el aerogenerador de eje vertical se encuentra en la posición más baja con dimensiones más reducidas y funcionamiento basado en el arrastre. Este parámetro es el determinante para identificar la capacidad de generación que poseen las tecnologías de aerogeneración.

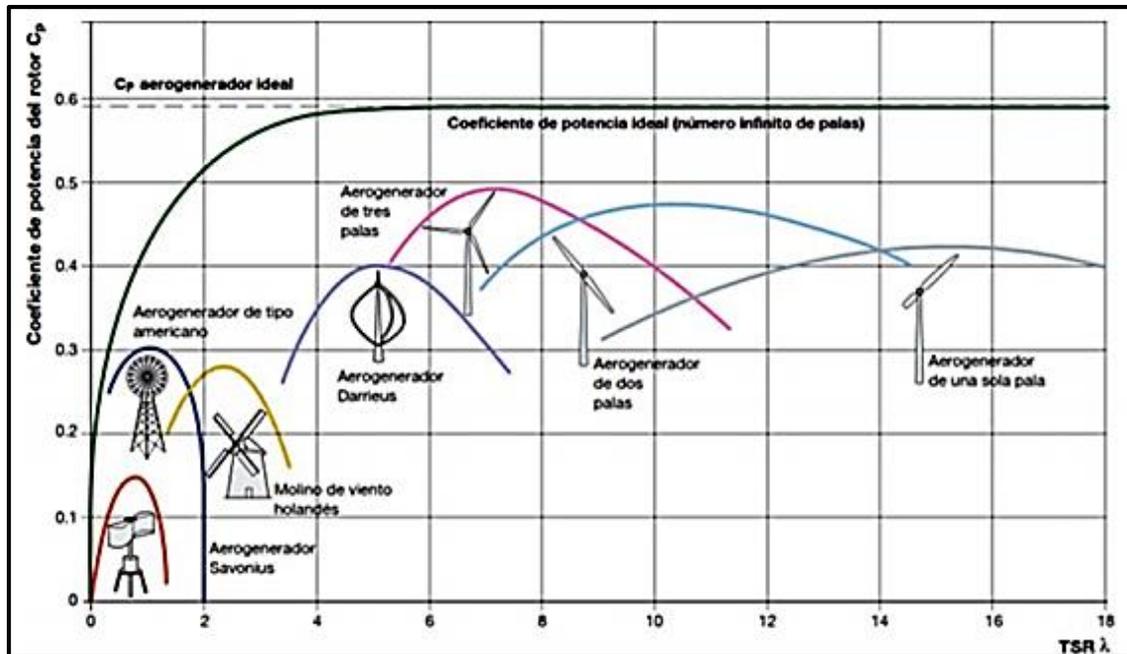


Fig. 6. Coeficiente de potencia respecto a la velocidad específica del viento

Fuente: (Urcelay, 2019)

La ley de Betz establece que no es posible hacer uso de toda la energía eólica, sino solo de una parte de ella, es así que se estableció que la máxima potencia extraíble es del 59.3%. Es por ello que, todas las turbinas eólicas se ubican por debajo de este límite, el coeficiente de potencia se obtiene del cociente entre la potencia extraíble y la potencia del viento, el cual no será mayor a 0,593 (Hurtado, 2018). Como se puede observar los aerogeneradores de eje horizontal poseen una mayor eficiencia respecto a los de eje vertical, puesto que su velocidad de giro es mayor, siendo el más eficiente el de tres palas. En cuanto a los aerogeneradores de eje vertical, poseen una menor eficiencia, ya que basan su funcionamiento en el arrastre y el coeficiente de potencia máximo lo alcanzan a menores velocidades de viento, pero en consecuencia, el torque de arranque es elevando (Diago Vidal, 2019).

1.4 Aerogeneradores de eje vertical comerciales

En la mayoría de los casos el diseño y fabricación de este tipo de máquinas se rige bajo normas internacionales y propias de cada país. En la TABLA 1.4 se indican distintos tipos de aerogeneradores de baja potencia con sus características más relevantes.

TABLA 1.4. Aerogeneradores de eje vertical comerciales

MARCA	CARACTERÍSTICAS	NORMA	FABRICANTE
EOLO	-Generador trifásico: 12/24/48 V. -Potencia: 890/1660/2200 W. -Puesta en marcha: 5,8/7,3/8,9 m/s. -Número de álabes: 3.	-EN 61000-6-1 -EN 61000-3-2 -EN 61000-3-3 -EN 61000-6-3	MAKEMU'SRL (MAKEMU, 2014)
			
KLIUX	-Potencia nominal: 1800 W. -Generador síncrono trifásico de imanes permanentes 12/24/48 V. - Número de álabes: 9. -Puesta en marcha: 3,5 m/s.	-CE -ISO 9001 -ISO 61400-2 -ISO 14001. -IEC 61400.	KLIUS ENERGIES (Kliux Energies, 2013)
			
ATLAS	-Potencia: 750 W. -Generado trifásico de imanes permanentes. -Velocidad de rotación: 4 m/s. -Número de álabes: 6. -Voltaje: 12/100 V.	-IEC 61400-2. -EN 61000-6-1. -EN 61000-6-3. -NEC.	TESUP (TESUP, 2021)
			

Elaborado: Autor

Los aerogeneradores comerciales indicados, en su mayoría cumplen normas internacionales que controlan su diseño, calidad y seguridad para la manipulación del usuario. En cuanto al generador eléctrico, en su mayoría es de imanes permanentes con tres salidas, el cual puede empezar a generar con vientos de partida bajos, lo que es propio de generadores de eje vertical basados en el arrastre.

1.5 Proceso de generación de electricidad en un aerogenerador

El aerogenerador de eje vertical y horizontal comparten el mismo principio de generación. En primer lugar, la energía cinética del viento interactúa de manera directa sobre los álabes del rotor haciendo que empiece a girar, dándose así el primer proceso de conversión de energía cinética a mecánica. Al estar las palas unidas a un mismo eje, el rotor del generador inicia su movimiento produciendo por primera vez una corriente en el bobinado de cobre y a su vez una

fuerza electromotriz. Dependiendo del tipo de generador, la energía se destina a baterías de almacenamiento o en algunos casos se conecta a la red (Pérez, 2017). La generación con distintos generadores se aprecia en la Fig. 7.

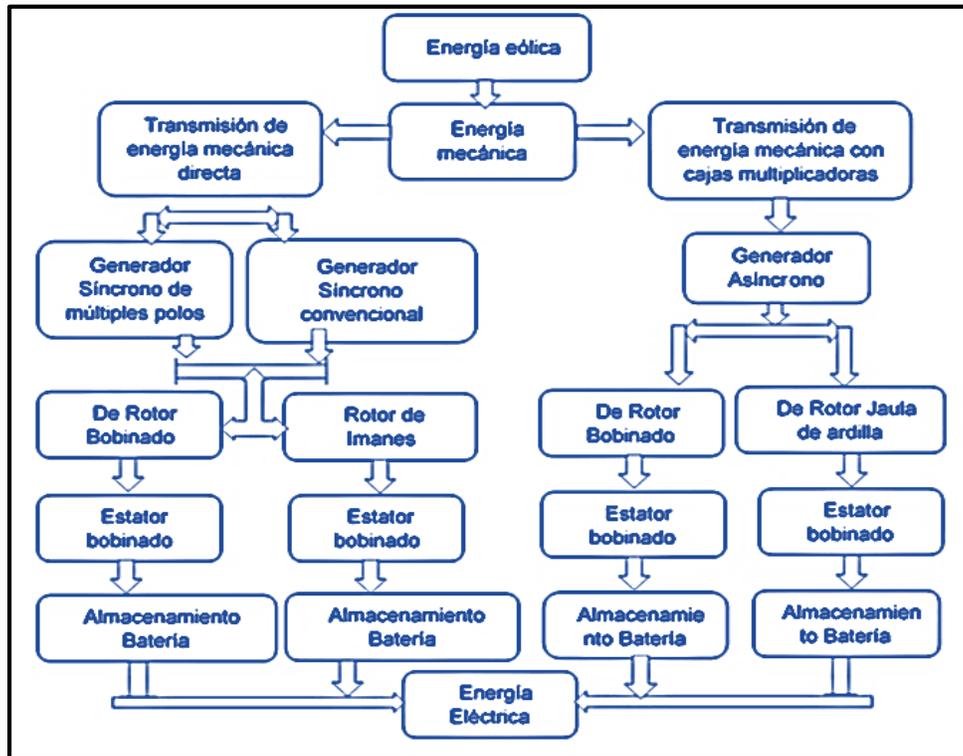


Fig. 7. Proceso de generación de electricidad en un generador
Fuente: (Cueva, 2015)

Los generadores más empleados en la aerogeneración son los asíncronos y síncronos, capaces de trabajar con velocidades de viento variables. Con un generador síncrono multipolar se elimina el uso de la caja multiplicadora y con un rotor de imanes permanentes, además, de prescindir de engranajes se descarta la necesidad de proporcionar corriente de excitación. En cuanto a los generadores asíncronos, tienden a emplearse para aplicaciones de alta potencia donde la energía generada puede conectarse directamente a la red (Urcelay, 2019).

1.6 Generador eléctrico

Los generadores eléctricos empleados en sistemas de aerogeneración se clasifican en dos tipos: corriente continua y corriente alterna. Por lo general resulta más conveniente elegir máquinas de corriente alterna, ya que presentan las características de generar tensiones más elevadas, requerir de menor mantenimiento y ofrecer mayor disponibilidad que los generadores

de corriente continua. Dependiendo de la turbina y control, los generadores pueden conectarse directamente a la red o por medio de convertidores de frecuencia (Yero, 2016).

1.6.1 Generador síncrono

En un generador síncrono, el devanado rotor se alimenta con una fuente de corriente continua para generar un campo magnético, cuando el eje del rotor gira el campo también lo hace induciendo a su vez voltaje en los devanados del estator. La igualdad entre la velocidad angular con el campo magnético se conoce como sincronismo (García, 2020; Yero, 2016). En la Fig. 8 se indican sus componentes internos.

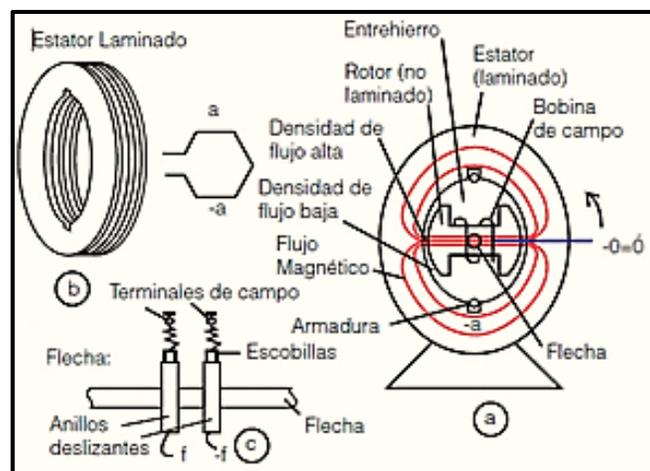


Fig. 8. Generador síncrono

Fuente: (Cueva, 2015)

En el ámbito eólico existen dos opciones para conectarse a la red: hacerlo directamente y por medio de una etapa de rectificación e inversión. El problema de los generadores síncronos que se conectan directamente a la red, es la desigualdad entre la frecuencia y la velocidad de giro, lo que conlleva a esfuerzos mecánicos y oscilaciones de la potencia eléctrica generada (Vesperinas, 2020).

1.6.2 Generador asíncrono

Los generadores asíncronos empleados en aerogeneradores tienen la cualidad de poseer la frecuencia constante y velocidad de giro del rotor variable (Fig. 9). Esto permite que exista mayor flexibilidad en el conjunto de la máquina reduciendo los esfuerzos en el eje, ya que convierte en energía cinética una parte de los cambios imprevistos de la velocidad del viento.

De acuerdo a su rotor, el más empleado el de jaula de ardilla, puesto que no requiere de elementos adicionales como las escobillas y necesita de menor mantenimiento (Cazes, 2017; García, 2020).

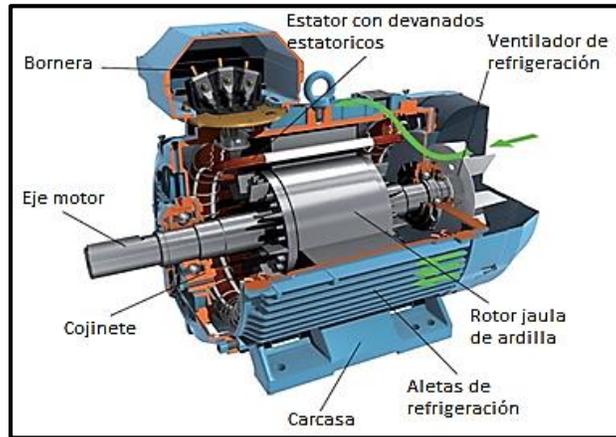


Fig. 9. Generador asíncrono
Fuente: (Comercialmendez, 2020)

Las configuraciones empleadas para conectar la energía eléctrica producida por un generador asíncrono a la red, es mediante cicloconvertidores con el generador doblemente alimentado y a través de la rectificación e inversión (Yero, 2016).

1.6.3 Comparativa generador asíncrono y síncrono de imanes permanentes

En la mayoría de casos la producción de energía eléctrica se realiza con la ayuda de generadores trifásicos de corriente alterna que pueden ser síncronos y asíncronos, las cualidades que favorecen y desfavorecen a cada máquina se muestra en la TABLA 1.5.

TABLA 1.5. Comparación generador asíncrono y síncrono de imanes permanentes

Generador Asíncrono	Generador Síncrono de Imanes Permanentes
Es robusto, simplicidad, bajo precio y bajo mantenimiento.	No necesita de energía reactiva magnetizante, ya que el campo es creado empleando imanes permanentes.

VENTAJAS

Funciona con velocidad fija o variable, conjuntamente con el sistema de engranajes. Gracias a su autoexcitación posee alta eficiencia y elevado factor de potencia.

Las características eléctricas pueden ser controladas desde el exterior, lo que permite magnetizar al rotor o estator. Puede trabajar en condiciones de viento inestable y no requiere el uso de un sistema de engranajes.

DESVENTAJAS No puede generar su propio campo magnético, por lo tanto, emplea una fuente externa para excitar al estator. La complejidad y precio es mayor comparado con un generador asíncrono.

Es sensible a las fluctuaciones de viento, además, se producen transitorios que pueden afectar a la estabilidad de la red. Los imanes que se emplean tiene un costo elevado.

Emplea un sistema de engranajes para que pueda funcionar a distintos tipos de velocidad, lo que aumenta su complejidad. En lugares con temperatura elevada, es necesario un sistema de refrigeración para que los imanes no pierdan sus propiedades magnéticas.

Fuente: (García, 2020; Yero, 2016)

Elaborado: Autor

Un generador de imanes permanentes, es más simple de diseñar y construir. Esta máquina operara a bajas revoluciones sin necesidad de emplear fuentes externas. Por otra parte, el generador asíncrono empleado para la generación a gran potencia por su robustez y habilidad de poder acoplarse a la red. En cambio, el generador de imanes permanentes se utiliza en aplicaciones de baja potencia, además, no necesita de sistemas de enfriamiento y multiplicadores de velocidad

1.6.4 Generador de imanes permanentes

Un generador de imanes permanentes o también llamado Permanent Magnet Generator (PMG), sustituye el bobinado de excitación del rotor tradicional por un sistema de imanes permanentes cuya función es suministrar un campo de excitación constante (Fig. 10). Además, esta máquina posee un tamaño reducido y puede arrancar con bajas velocidades de viento minimizando de esta forma las pérdidas por conversión (Vesperinas, 2020). En cuanto a la magnitud de la tensión, depende de la cantidad y tipo de imanes, bobinado y número de revoluciones. La forma de onda de la señal se asemeja a una senoide que varía de acuerdo a la forma constructiva del rotor, disposición de los imanes y el estator (Lastra et al., 2019).

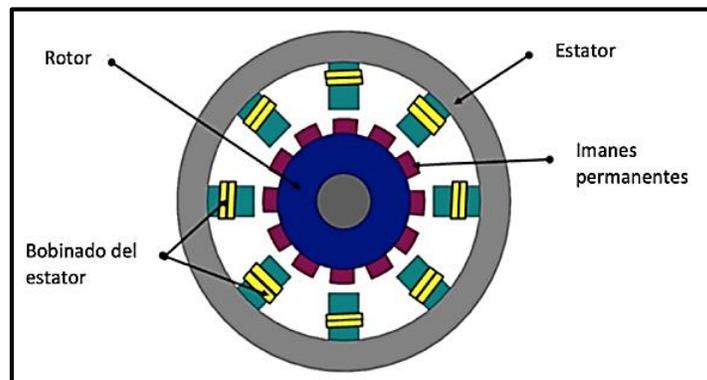


Fig. 10. Generador de imanes permanentes

Fuente: (Vesperinas, 2020)

En un generador síncrono la tensión se regula mediante la excitación al devanado inductor, en el caso de un PMG el campo de excitación es constante y no se puede controlar, lo que ocasiona caídas de voltaje cuando al generador se le aplica carga (Urcelay, 2019).

- **Generador de flujo Radial**

En esta máquina los imanes se ubican en la parte lateral o caras del cilindro que giran alrededor de su propio eje (Fig. 11). Se llaman generadores de flujo radial debido a que el campo magnético generado por los imanes en el rotor está en dirección perpendicular al eje de giro. Los aspectos a considerarse en la construcción de este tipo de generador son: la estructura del estator como sus ranuras y del rotor en donde se colocan los imanes (Rodríguez & León, 2016).

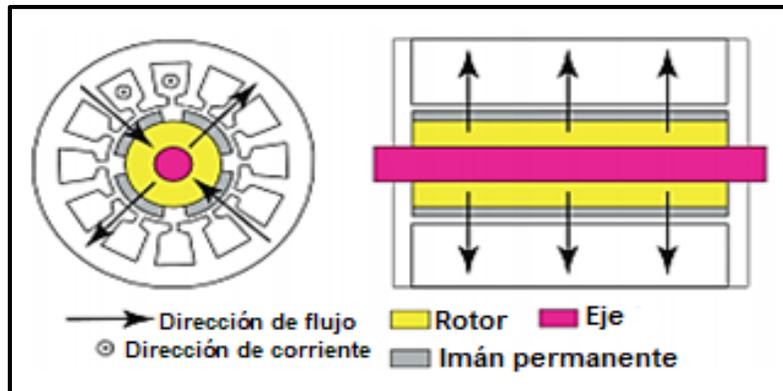


Fig. 11. Generador de flujo radial, vista frontal y transversal

Fuente: (Yancha, 2019)

Como se puede observar, los imanes se colocan sobre un cilindro, el cual puede ser o no ranurado de forma superficial o embutida. Para una mayor potencia, basta con aumentar la longitud axial de la máquina.

- **Generador de flujo axial**

Como lo menciona Rodríguez & León (2016), en este tipo de generador la ubicación de los imanes se realiza sobre la superficie de un disco de hierro cuya dirección de giro es perpendicular al eje (Fig. 12). En este caso, el campo magnético que producen los imanes tiene dirección paralela al eje de giro. La ventaja que presenta este tipo de generador es su tamaño reducido frente a un torque dado. En cuanto al rotor, los polos se ubican de forma alternada y las bobinas deben coincidir con la superficie de los mismos (Lastra et al., 2019).

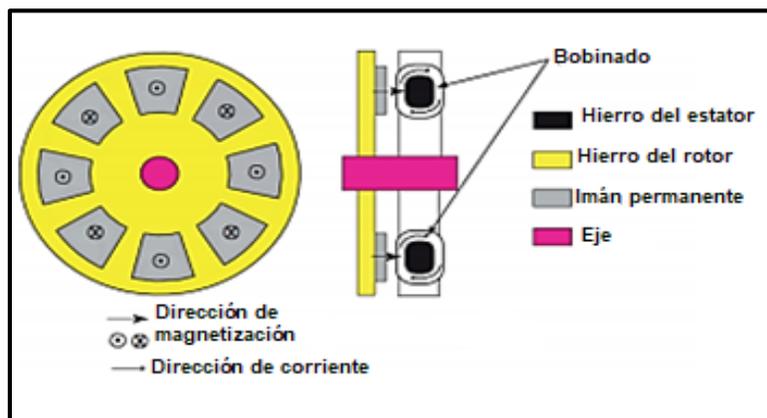


Fig. 12. Generador de flujo axial, vista frontal y lateral

Fuente: (Yancha, 2019)

Para obtener un mayor rendimiento en un generador de flujo axial, el estator debe ubicarse entre dos rotores o un rotor entre dos estatores, en ambos casos la densidad de flujo es mayor (Yancha, 2019).

- **Componentes principales de generador flujo axial**

A continuación, se detallan los componentes básicos de este tipo de generador:

- ❖ **Rotor**

Es la parte móvil de la máquina con un eje que pasa por el centro del estator y por medio de su movimiento es el encargado de producir el campo magnético giratorio (Rodríguez & León, 2016). Generalmente consta de uno o dos discos de hierro donde se alojan los imanes, lo más favorable es emplear dos discos enfrentados, ya que la densidad magnética aumenta aproximadamente cuatro veces la densidad de un solo polo.

- ❖ **Estator**

Es la parte fija de la máquina y lugar donde se ubican las bobinas del inducido, además, en el estator circulará toda la energía eléctrica generada. Para mayor facilidad y economía, se emplea un estator interno sin ranuras y sin núcleo, puesto que presenta mayor densidad magnética para el bobinado, menor peso y volumen (Carrillo et al., 2018).

- ❖ **Imanes**

Existen imanes de distintos materiales producto de combinaciones de tierras raras y materiales químicos, los más útiles para este tipo de aplicaciones son de neodimio con aleaciones de hierro y boro, ya que poseen un alto grado de magnetización, no se oxidan y trabajan a temperaturas elevadas (Lastra et al., 2019).

- ❖ **Bobinas**

Existen dos tipos de bobinas: fijas y variables. Dentro de las bobinas fijas se encuentran aquellas con núcleo de aire y sólido con núcleo de hierro. Por otra parte, las bobinas variables consisten en variar su inductancia por medio del desplazamiento del núcleo. El conexionado varía de acuerdo con la aplicación que se le vaya a dar. (Carrillo et al., 2018)

- **Principio de funcionamiento del generador de imanes permanentes**

Como se mencionó con anterioridad, en el estator se ubica todo el bobinado del generador y en sus terminales se obtiene el voltaje inducido en el mismo. Dependiendo del número de bobinas y su forma de conexión, se pueden obtener señales monofásicas, bifásicas y trifásicas, cabe mencionar que en el devanado del estator se acumula todo el campo magnético (Rodríguez & León, 2016). Por otra parte, en el rotor se alojan todos los imanes encargados de producir el campo magnético constante de tal forma que cuando el rotor gire, el campo magnético también lo hará induciendo una fuerza electromotriz en el bobinado de la máquina. Este hecho lo determina la Ley de Faraday, la cual menciona que frente a una variación de flujo o campo magnético se origina en cada espira de la bobina una fuerza electromotriz que al final se sumará, puesto que están en serie (Chapman, 2012).

1.7 Resumen de capítulo

El uso de aerogeneradores de eje horizontal como vertical está limitado por las condiciones geográficas y ambientales del lugar de instalación, puesto que si no existe suficiente disponibilidad de recurso eólico cualquier tecnología es inadecuada. Aunque la energía que entrega un aerogenerador de eje vertical es baja, es útil para aplicaciones autónomas con menores exigencias de potencia. Las razones de no poder entregar mayor cantidad de energía se deben a las dimensiones, perfil y ubicación de la turbina, las cuales pueden modificarse para un mayor aprovechamiento del recurso, pero como consecuencia los costos y dificultad de instalación aumentan. En cuanto al tipo generador que adopte esta tecnología debe ser de velocidad variable, ya que el giro por la disponibilidad del viento no permanece constante, por lo tanto, el generador síncrono de imanes permanentes es el que mejor se adapta a estas condiciones, además, no requiere de elementos adicionales para su funcionamiento y puede arrancar en cualquier dirección a bajas velocidades.

CAPÍTULO 2

2 Características eléctricas del generador eólico

2.1 Introducción

En el campus de la Universidad Técnica del Norte se ha demostrado la existencia del suficiente recurso eólico, apto para proyectos de micro generación. Además, considerando que existen diferentes topologías para la aerogeneración, es necesario prestar atención en las más pequeñas como el caso de aerogeneradores de eje vertical considerados muchas veces poco eficientes y no aptos para la generación.

El presente capítulo tiene como finalidad detallar los aspectos analizados en el ámbito eléctrico del generador empleado en un aerogenerador de eje vertical, que en su mayoría es un generador de flujo axial con imanes permanentes para luego ser considerados en un futuro diseño. Para ello, se toma como referencia el aerogenerador existente en el edificio de la carrera de Electricidad considerando sus características eléctricas, dimensiones y tipo de turbina, recurso eólico disponible y lugar de ubicación.

2.2 Lugar de estudio

El entorno físico para la determinación de los aspectos eléctricos del aerogenerador de eje vertical e implementación del prototipo se realizó en el edificio de la Carrera de Ingeniería en Electricidad de la Universidad Técnica del Norte de la ciudad de Ibarra, Provincia de Imbabura.



Fig. 13. Ubicación física para el estudio la implementación del proyecto

Fuente: Autor

2.3 Metodología

Con anterioridad se realizó una búsqueda bibliográfica, la cual permitió conocer sobre las tecnologías de generación eólica, específicamente el aerogenerador de eje vertical y generador síncrono de imanes permanentes.

Para el análisis de las características eléctricas de funcionamiento se realiza una interpretación del aerogenerador existente, empezando por los aspectos eléctricos de generación, es decir, la identificación de la velocidad del viento con la cual la generación es útil y aprovechable, el tipo de generador que emplea, así como la señal que entrega y forma constructiva, la turbina eólica utilizada, principalmente lo referente a su forma y dimensiones y el recurso eólico disponible, el cual es el determinante para el diseño y dimensionamiento de los elementos del generador eólico.

Conocidos los aspectos del aerogenerador como punto de partida lo siguiente es; investigar las características eléctricas que intervienen en el diseño de este tipo de máquina para la elaboración de un generador de flujo axial con imanes permanentes con características propias. Se inicia con el análisis de las características magnéticas de los imanes a emplear utilizando el método de elementos finitos, lo cual permite determinar la geometría del generador, número de bobinas y espiras, voltaje de salida y pérdidas eléctricas. Por otra parte, considerando el recurso eólico disponible en combinación con las características de la turbina eólica se determina la velocidad de operación del generador al igual que cantidad de polos necesarios.

Con la ayuda de modelos matemáticos se explican los aspectos más relevantes de las características eléctricas de diseño y funcionamiento. Finalmente, se dan recomendaciones a tener presente para un posterior diseño de este tipo de máquina.

2.4 Análisis del aerogenerador existente

En el edificio de la Carrera de Electricidad existe un aerogenerador de eje vertical, el cual posee una turbina que por su geometría y velocidad de rotación tiene bajo coeficiente de potencia no mayor a 2 y velocidad punta menor a 1, razón por la cual la potencia a entregar es baja. En el Anexo A literal b se muestra la relación entre las revoluciones y potencia capaz de entregar a distintas velocidades de viento.

En su trabajo Melo Paillacho (2019), muestra las características eléctricas que presenta el aerogenerador una vez puesto en funcionamiento con el recurso eólico disponible, en el Anexo A literal c y d se indican las gráficas de voltaje, corriente y potencia para cada caso. El voltaje útil oscila entre 14,87 V y 15,23 V respectivamente con corrientes de 5,59 A y 6,12 A. En cuanto a la potencia como es de esperarse no alcanza la potencia nominal quedándose en el margen de 84,29 W y 91,53 W equivalente al 50 % y 60%, la causa principal de no poder entregar más potencia útil se debe a la velocidad del viento, dado que se encuentra en los rangos de 5 m/s y 6 m/s. Estos resultados dan a entender que si bien el recurso eólico oscila entre 2 m/s y 9 m/s y el generador pueda arrancar con velocidades inferiores, la energía útil se obtiene a partir de los 5 m/s.

El generador eléctrico que emplea el aerogenerador es de imanes permanentes con topología y estructura interna desconocidos, pero por la energía que suministra y tamaño de la máquina se deduce que emplea un número de polos y bobinado son bajos, esta es la razón por la cual es capaz de entregar energía útil para el almacenamiento a partir de los 5 m/s.

2.4.1 Recurso eólico disponible en el campus universitario

El estudio realizado por Melo Paillacho (2019), muestra la existencia del recurso eólico disponible en el campus de la Universidad Técnica del Norte, el cual varía de 2 m/s a 9 m/s y es útil para el aprovechamiento con aerogeneradores de baja potencia. Los distintos valores del recurso se indican en la Fig. 14.

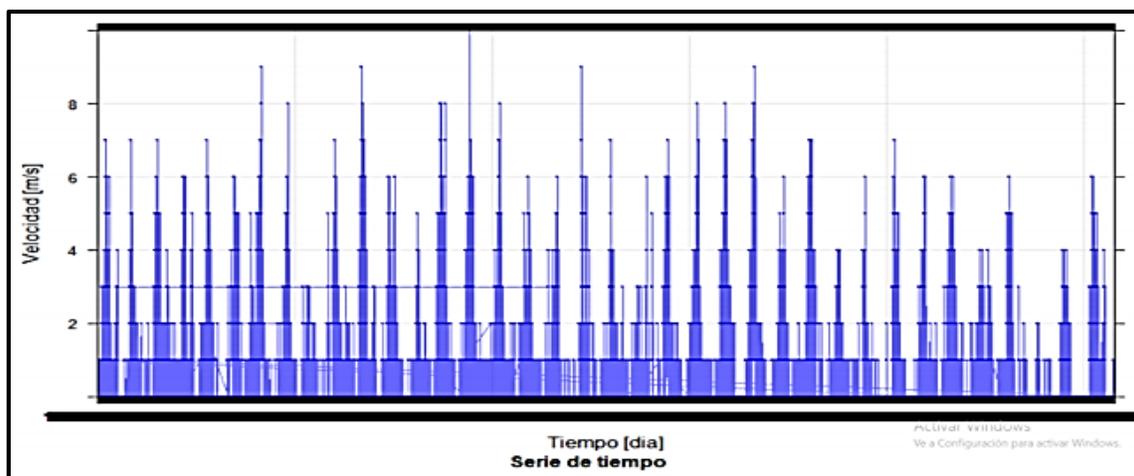


Fig. 14. Recurso eólico disponible
Fuente: (Melo Paillacho, 2019)

Con base en el recurso eólico disponible, se pueden estimar parámetros adicionales para el diseño de un generador eléctrico como la velocidad de operación y la energía máxima extraíble por la turbina eólica en distintas condiciones de viento. Además, se observa que el recurso es aleatorio y tiene mayor continuidad a partir de los 4 m/s.

2.4.2 Potencia extraíble de la turbina eólica

En la turbina de un aerogenerador de eje vertical, el eje y los álabes se ubican de forma perpendicular a la velocidad del viento, lo que hace posible que esta tecnología sea omnidireccional y capte la energía del viento en cualquier dirección. En el siguiente análisis se estudió la turbina eólica existente con la finalidad de conocer la potencia mecánica extraíble con el recurso eólico existente en el campus considerando que pertenece a la familia Savonius.

Dado que el tamaño de la turbina es reducido, la potencia mecánica también lo será, además, su magnitud dependerá directamente de las condiciones ambientales y dimensiones de la turbina. Con ayuda de la ecuación (2.1) se determina la potencia mecánica (Candia, 2012).

$$P_{mec} = C_p * \frac{1}{2} * \rho * A * V^3 \quad (2.1)$$

Donde:

P_{mec} : Potencia mecánica capaz de suministrar el generador (W).

C_p : Coeficiente de potencia (0,193) para turbina tipo Savonius.

ρ : Densidad del aire (0,7 kg/m³) por estar ubicado en la región Sierra.

A : Área de barrido de la turbina ($\pi * r^2$).

V^3 : Velocidad del viento (m/s).

r : Radio de la turbina (m).

El aerogenerador de eje vertical al basar su funcionamiento en arrastre y no en empuje posee un coeficiente de potencia y velocidad punta bajos.

De acuerdo a Saavedra & Alejos (2019), el coeficiente de potencia máximo (C_p) de un aerogenerador tipo Savonius es 0,193 y la velocidad punta máxima (λ) 0,75 aproximadamente, parámetros que se pueden corroborar en la Fig. 6.

En la TABLA 2.1 se muestran los valores de potencia estimados a distintas velocidades de viento.

TABLA 2.1. Potencia del aerogenerador

Velocidad del viento	Potencia
[m/s]	[W]
2	0,42
3	1,43
4	3,40
5	6,63
6	11,45
7	18,20
8	27,16
9	38,67

Elaborado: Autor

Fuente: Autor

Los valores muestran que la turbina puede entregar potencia útil con velocidades de viento reducido. Las cantidades calculadas son tentativas, puesto que dependiendo del tipo de turbina pueden variar valores como el radio, coeficiente de potencia y velocidad punta. Dicha potencia, además, guarda relación con las condiciones ambientales y geográficas del lugar de ubicación. Para obtener una mayor potencia mecánica la solución es aumentar el área de barrido, la cual guarda relación con el diámetro de la turbina.

2.5 Aspectos eléctricos del generador síncrono de flujo axial

El principio de funcionamiento de este generador se basa en un conjunto de imanes permanentes establecidos en el rotor o estator, proporcionando un campo magnético constante que interactúa con el bobinado del generador y produce un flujo magnético variante en el tiempo como se aprecia en la Fig. 15 (Herrera et al., 2013).

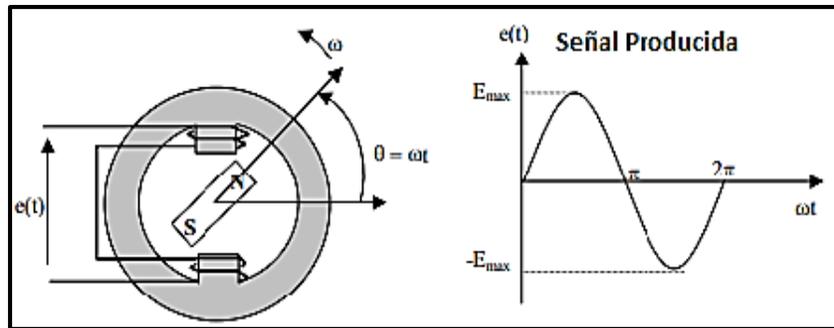


Fig. 15. Generación y señal de generación
Fuente: (Vargas et al., 2007)

Como se puede observar, el imán gira a una determinada velocidad angular y a medida en que lo hace el flujo varía de un valor máximo a un mínimo. Cuando interactúa directamente con el bobinado se produce la mayor cantidad de tensión en los terminales y conforme pasa la magnitud disminuye, este cambio da como resultado una señal sinusoidal variante en el tiempo (Vargas et al., 2007).

2.5.1 Configuración geométrica del generador

Existen diferentes configuraciones para el diseño de este tipo de generadores: un estator y un rotor, un estator y dos rotores y un rotor y dos estatores (Lastra et al., 2019). En este caso se consideró la segunda configuración, ya que es la más usada y ofrece mayores prestaciones. En el generador de flujo axial, los imanes permanentes se orientan de forma perpendicular al eje y se distribuyen simétricamente en los discos del rotor alternando su polaridad N-S, N-S, N-S. Cada par de imanes tiene como finalidad interactuar con una bobina o grupo de bobinas. En la Fig. 16 se indica la distribución de los polos en el rotor.

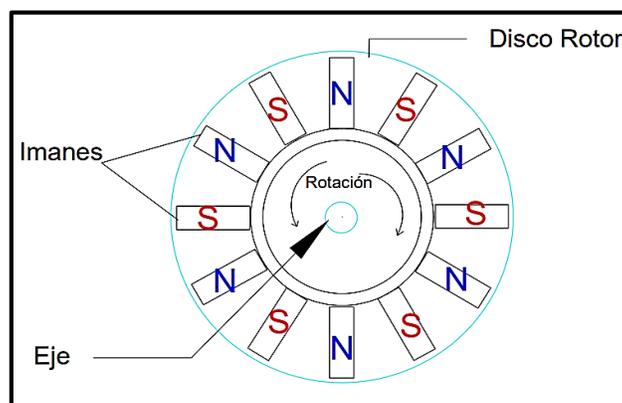


Fig. 16. Distribución de imanes y partes del rotor
Fuente: Autor

En cuanto a las bobinas, se distribuyen en el estator de acuerdo al tipo de generador a construir ya sea monofásico o trifásico y del espacio disponible (Fig. 17). Para el diseño de las mismas es necesario considerar la cantidad de polos, el tipo de imán con su grado de magnetización, forma y densidad de flujo magnético capaz de brindar.

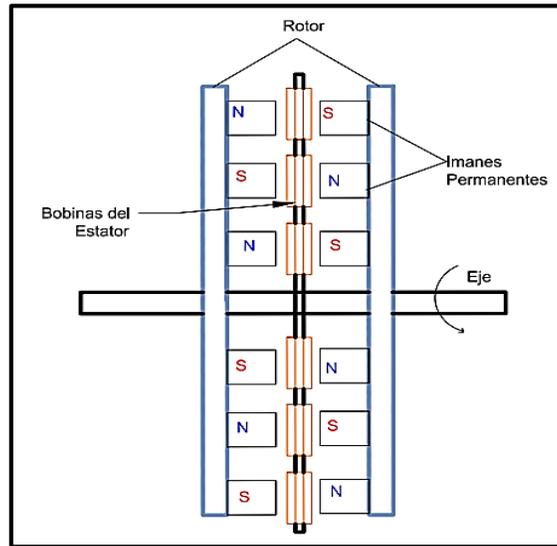


Fig. 17. Rotor y estator de generador flujo axial

Fuente: Autor

En un generador monofásico el número de bobinas y pares de polos es el mismo, además, la conexión de las mismas será en serie para que las tensiones se sumen, tal como se indica en la Fig. 17 y ecuación (2.2) (Navasquillo, 2015). En el caso de un generador trifásico, el número de bobinas y su forma de conexión cambia, ya que debe seguir la regla de 3 bobinas por 4 pares de polos como lo indica la ecuación (2.3). (Carrillo et al., 2018)

$$N_B = N_P \quad (2.2)$$

$$N_B = \frac{3}{4} N_P \quad (2.3)$$

Donde:

N_B : Número de bobinas.

N_P : Número de pares de polos.

De las ecuaciones (2.2) y (2.3) se deduce que para la misma cantidad de polos, el generador trifásico emplea un menor número de bobinas y el voltaje por fase es menor en comparación con uno monofásico.

2.5.2 Análisis de las características de imanes permanentes

Estos elementos son el componente principal para la generación, puesto que sin ellos no existiría un campo magnético que interactúe con el bobinado del estator. Dependiendo de la forma de fabricación y material del que estén hechos, varía la energía magnética capaz de producir voltaje y potencia en el generador (Herrera et al., 2013). Todos los análisis se realizaron en imanes de neodimio tipo bloque con las especificaciones de la TABLA 2.2.

TABLA 2.2. Características del imán a analizar

CARACTERÍSTICA	VALOR
Dimensiones	60x20x10 mm
Magnetización	Axial
Grado	Neodimio N52
Peso	100 gr
Temperatura	80° C
Fuerza de atracción	+ - 44,4 Kg
Br Max	14.200-14.800 Gauss
Remanencia Br (T)	1,42-1,45

Fuente:(Centro Magnético, 2016; Imamagnets, 2018)

Elaborado: Autor

Con las especificaciones ya indicadas, se analiza la energía que el imán de neodimio N52 es capaz de entregar por sí solo y con elementos conductores adicionales.

- **Estimación de la densidad de flujo magnético**

Con el cálculo de la densidad magnética se estiman aspectos adicionales del generador como: la energía capaz de producir y características de bobinado. Para su estimación se emplea la ecuación (2.4), para imanes rectangulares (Imamagnets, 2018).

$$B = \frac{Br}{\pi} \left[\tan^{-1} \left(\frac{WL}{2z\sqrt{4z^2 + L^2 + W^2}} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{WL}{2(D+z)\sqrt{4(D+z)^2 + L^2 + W^2}} \right) \right] \quad (2.4)$$

Donde:

B: Densidad de flujo magnético (T).

Z: Distancia dada en el eje de simetría de una superficie polar (mm).

Br: Campo de remanencia (T).

L: Largo del imán (mm).

D: Espesor del imán (mm).

W: Ancho del imán (mm).

El valor de z, es la mitad de la distancia de separación de los discos del rotor. De acuerdo a Carrillo et al., (2018), el valor promedio debe es de 10.5 mm. Reemplazando los valores de la TABLA 2.2 en la ecuación (2.4), el valor de la densidad de flujo magnético es de B=0,15 T.

Para verificar si lo calculado es correcto se recalcula la densidad de magnética en el software FEMM (Finite Element Method Magnetics), el cual permite simular el comportamiento magnético basando el cálculo en elementos finitos, el resultado se muestra en la Fig. 18.

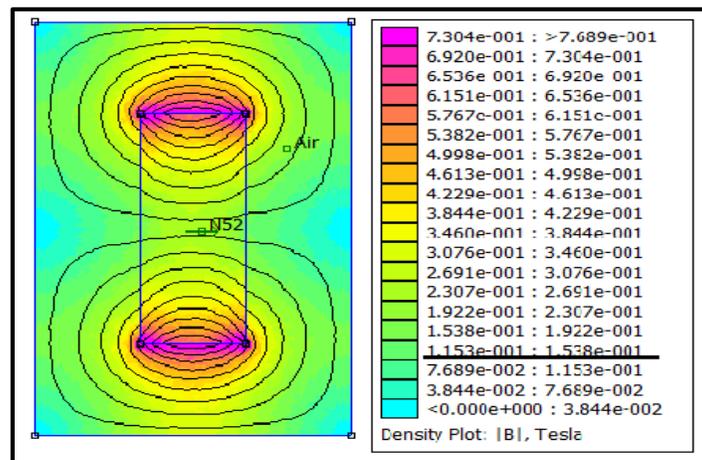


Fig. 18. Densidad de flujo magnético del imán N52

Fuente: Autor

En la simulación se obtuvo un valor de densidad magnética igual a 0.153 T, el cual es un valor muy cercano al calculado con anterioridad. Además, se observa que la energía capaz de suministrar un solo polo representado por la superficie superior del imán es baja y varía con la distancia.

- **Densidad de flujo magnético y distancia de separación**

En este apartado se analiza lo que sucede con la densidad de flujo magnético en función con la distancia de separación. Empleando los resultados obtenidos en la simulación en FEEM de la Fig. 18 se obtiene la gráfica de la Fig. 19.

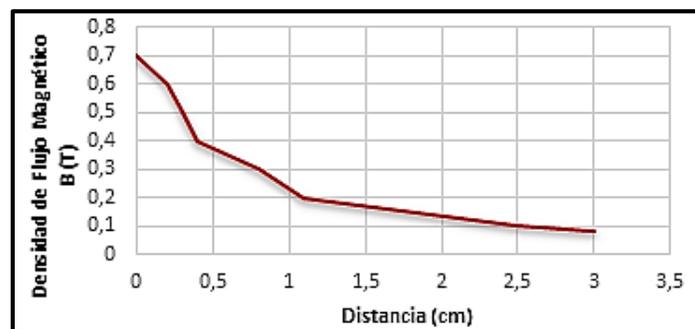


Fig. 19. Densidad de flujo magnético vs. distancia

Fuente: Autor

En este caso, el imán de neodimio N52 alcanza una densidad de flujo magnético máxima de 0.7 T a una distancia igual a cero, pero la densidad de flujo disminuye exponencialmente a medida que se separa de la superficie superior del imán. Esto es ocasionado debido a que las líneas de flujo salen del material magnético y pierden propiedades magnéticas al viajar a través del vacío, el cual tiene una permeabilidad relativa igual a 1 (Herrera et al., 2013). Para cuestiones de diseño es importante considerar la separación entre el material magnético con el elemento a interactuar.

- **Densidad de flujo magnético de dos imanes enfrentados entre sí**

En este caso, la simulación se realiza de manera más real, empleado la configuración de doble rotor, cada cual con su disco de imanes. En primer lugar, los imanes deben ir colocados en materiales magnéticos como el acero, puesto que estos tipos de componentes ayudan a aumentar la densidad de flujo magnético del imán y a proyectar las líneas de flujo en un solo sentido como se muestra en la Fig. 20.

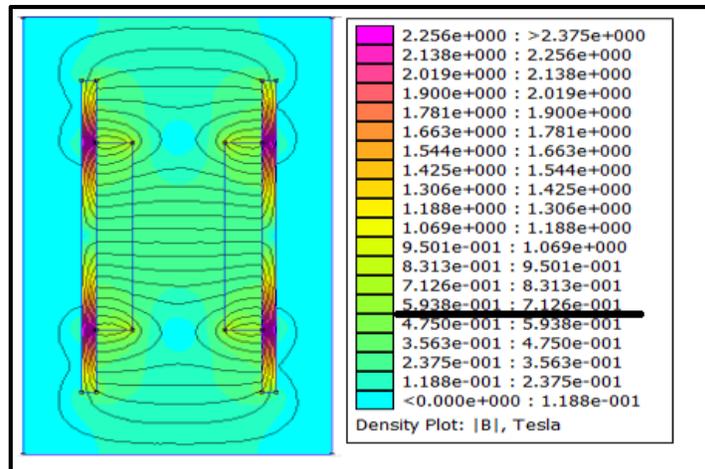


Fig. 20. Densidad magnética de dos imanes enfrentados sobre láminas de acero

Fuente: Autor

En la simulación, se colocaron dos imanes cada uno montado en una lámina de acero de bajo carbono de 4 mm separado uno del otro a 25 mm, que es la distancia promedio de separación, puesto que en el centro se encuentra el estator. Como resultado se obtiene una densidad de flujo igual a 0.5938 T, la cual es aproximadamente 4 veces la densidad de flujo de un imán en el vacío.

Esta configuración es la que mejor se adapta para la construcción de un generador de flujo axial, ya que aprovecha en mayor cantidad las propiedades magnéticas de los imanes, además, el hecho de emplear materiales conductores se evita la dispersión innecesaria de las líneas de flujo.

2.5.3 Análisis de la velocidad de operación del generador

Un aspecto a considerarse en el generador de flujo axial es la velocidad de rotación del rotor acorde a la velocidad del viento y geometría de los álabes (Wannakarn et al., 2011). Para su estimación se emplea la ecuación (2.5), que considera aspectos adicionales relacionados con la turbina eólica (Pico et al., 2018). En este caso, se consideró la turbina ubicada en el campus de la Universidad Técnica del Norte, la cual es tipo Thorus descendiente de la familia Savonius. En el Anexo A literal A se muestran las características del aerogenerador, dimensiones y parámetros de funcionamiento.

$$\lambda = \frac{(w * r)}{v} \quad (2.5)$$

Donde:

λ : Relación de velocidad punta (TRD).

w: Velocidad angular medida en (rad/s).

v: Velocidad del viento medida en (m/s).

r: Radio de las palas del aerogenerador (m).

Para transformar las unidades de la velocidad angular; rad/s a rpm, se emplea la ecuación (2.6), donde N esta expresada en rpm (Vargas et al., 2007).

$$N = \frac{30}{\pi} * w \quad (2.6)$$

Reemplazando la ecuación (2.5) en (2.6) se obtiene la ecuación (2.7), con la cual se determina la velocidad del rotor en función de la velocidad del viento (Medina, 2016). De esta forma, es posible determinar a cuantas revoluciones gira con el recuro eólico y viceversa.

$$N = \frac{30 * \lambda * v}{\pi * r} \quad (2.7)$$

Con los datos del recuro eólico indicados en la Fig. 14, aplicando la ecuación (2.7) y considerando los valores de la turbina ya descritos con el radio indicado en el Anexo A literal A (0,5 m), se obtiene la TABLA 2.3, la cual muestra la relación entre la velocidad del viento en m/s y revoluciones por minuto.

TABLA 2.3. Velocidad del viento de m/s a rpm

Velocidad del viento [m/s]	Velocidad angular [Rpm]
2	29
3	43
4	58
5	72
6	86
7	101
8	115
9	129

Fuente: Autor

Elaborado: Autor

Los resultados muestran la velocidad en revoluciones por minuto que el rotor del generador da, en función de la velocidad de viento. La relevancia de conocer estos valores radica en su uso para el diseño de una máquina que pueda operar bajo estas condiciones.

2.5.4 Polos y frecuencia del generador

Una vez conocida la relación entre la velocidad del viento y rotación del generador, el siguiente paso consiste en vincular a la expresión con la cantidad de polos y frecuencia a suministrar. Al tratarse de un generador síncrono la cantidad de polos influye directamente en la frecuencia que es capaz de suministrar. Con la ecuación (2.8) se obtiene la velocidad de rotación de un generador síncrono en rpm (Chapman, 2012).

$$N(\text{rpm}) = \frac{f * 60}{P} \quad (2.8)$$

Donde:

N : Representa a las revoluciones por minuto (rpm).

f : Frecuencia (Hz).

P : Cantidad de pares de polos.

Igualando las ecuaciones (2.7) y (2.8) es posible determinar: la frecuencia y el número de pares de polos para determinadas velocidades del viento, lo que da como resultado la ecuación (2.9). (Medina, 2016)

$$P = \frac{f * 2 * \pi * r}{\lambda * v} \quad (2.9)$$

Reemplazando los valores de velocidad del viento indicados en la Fig. 14, radio de la turbina igual a 0,5 m y velocidad punta 0,75 en la ecuación (2.9) se obtiene la TABLA 2.4, la cual considera valores de frecuencia fijos.

TABLA 2.4. Número de polos en función de la frecuencia y velocidad del viento

Velocidad 2 m/s			Velocidad 3 m/s			Velocidad 4 m/s			Velocidad 5 m/s		
Frecuencia [Hz]	# Polos	Par-									
10	20,94		10	13,96		10	10,47		10	8,37	
20	41,88		20	27,92		20	20,94		20	16,75	
30	62,83		30	41,88		30	31,41		30	25,13	
40	83,77		40	55,85		40	41,88		40	33,51	
50	104,71		50	69,81		50	52,35		50	41,88	
60	125,66		60	83,77		60	62,83		60	50,26	
Velocidad 6 m/s			Velocidad 7 m/s			Velocidad 8 m/s			Velocidad 9 m/s		
Frecuencia [Hz]	# Polos	Par-									
10	6,98		10	5,98		10	5,23		10	4,65	
20	13,96		20	11,96		20	10,47		20	9,30	
30	20,94		30	17,95		30	15,70		30	13,96	
40	27,92		40	23,93		40	20,94		40	18,61	
50	34,90		50	29,91		50	26,17		50	23,27	
60	41,88		60	35,90		60	31,41		60	27,92	

Fuente: Autor

Elaborado: Autor

Los resultados indican que el generador de eje vertical con radio reducido, es capaz de funcionar bajo condiciones de viento reducidas.

Por otra parte, mientras más baja sea la velocidad del viento, el número de polos que necesita el generador es mayor, en cambio, con una mayor disponibilidad del recurso eólico, la cantidad de polos disminuye. En el caso de la frecuencia, si se desea obtener un valor elevado, la solución es aumentar el número de polos y viceversa, pero este parámetro es importante en el caso de requerir integrar el generador directamente a la red, caso contrario, si la energía se destina a almacenarse en baterías este parámetro no es relevante, ya que pasa por etapas de rectificación e inversión.

2.5.5 Frecuencia y velocidad del viento del generador

Partiendo de la TABLA 2.4 se analiza la frecuencia mínima y máxima capaz de alcanzar el generador a velocidades de arranque de 2 m/s y 4 m/s, con una cantidad de 20 y 8 pares de polos respectivamente. Despejando la frecuencia de la ecuación (2.9) se obtiene la (2.10). (Medina, 2016)

$$f = \frac{P * \lambda * v}{2 * r * \pi} \quad (2.10)$$

Reemplazando nuevamente los parámetros ya conocidos y con las cantidades de pares de polos establecidas, se obtiene la TABLA 2.5.

TABLA 2.5. Velocidad del viento y frecuencia

Velocidad del viento [m/s]	20 pares de polos Frecuencia [Hz]	8 pares de polos Frecuencia [Hz]
2	9,54	3,81
3	14,32	5,72
4	19,09	7,63
5	23,87	9,54
6	28,64	13,36
7	33,42	17,18
8	38,19	19,09
9	42,97	21,48

Fuente: Autor
Elaborado: Autor

Los resultados obtenidos muestran, la frecuencia capaz de proporcionar una máquina de 20 y 8 polos. Comparando ambos casos, la primera máquina necesita menor velocidad de arranque y entrega frecuencias más elevadas, en cambio, en el segundo caso sucede todo lo contrario.

2.5.6 Voltaje de salida en relación con la velocidad

El generador necesita de una cierta cantidad de revoluciones para empezar a generar energía, para determinar dicha velocidad es necesario conocer el voltaje a generar en función de la velocidad en rpm.

Se conoce también que el voltaje inducido en el bobinado depende del cambio de flujo magnético proporcionado por las caras superiores de los imanes, al inicio y salida de cada bobina. El voltaje promedio está por debajo del voltaje pico y valor RMS, su estimación se realiza utilizando la ecuación (2.11). (Piggott, 2014)

$$V_{promedio\ de\ salida} = 2 * \Phi * n * \frac{N}{60} \quad (2.11)$$

Donde:

Φ (flujo total): $A * B$ (Wb).

n: Número de espiras por bobina por el total de las bobinas conectadas en serie.

A: Sumatoria de las áreas de los pares de imanes (m²).

B: Densidad de flujo (T).

N: Número de revoluciones (rpm).

Simplificando la expresión (2.11), el voltaje de salida queda de la siguiente manera:

$$V_{promedio\ de\ salida} = A * B * n * \frac{N}{30} \quad (2.12)$$

Como menciona Piggott (2014), si señal de salida es sinusoidal, el valor pico se obtiene al multiplicar el voltaje promedio por un factor de 1,57.

2.5.7 Voltaje de salida en corriente continua

La ecuación (2.12) es útil únicamente para calcular el voltaje promedio en corriente alterna y no en continua. El voltaje en corriente continua se determina con la ecuación (2.13), en la cual considera la existencia de pérdidas en la etapa de rectificación que ocasionan la disminución del valor pico, el valor de voltaje perdido es de 1,4 V (Carrillo et al., 2018).

$$V_{DC} = (A * B * n * \frac{N}{30} * 1,57) - 1,4 \quad (2.13)$$

Con la ecuación (2.13) es posible calcular el número de espiras necesarias para todo el bobinado del generador, considerando que el voltaje a entregar es en corriente continua y el conexionado se encuentra en serie.

2.5.8 Pérdidas en el generador

Como toda máquina eléctrica, el generador presenta pérdidas que afectan su generación, entre ellas se encuentran: por histéresis magnética, en el hierro y cobre. Un estator sin elementos ferromagnéticos no sufre de pérdidas por histéresis ni en el hierro (Murillo, 2012).

Existen pérdidas adicionales que se producen en el proceso de conversión de corriente alterna a directa y mecánicas producto de los componentes mecánicos rotativos.

- **Pérdidas en el bobinado**

Para el cálculo de las pérdidas por efecto Joule basta con emplear la ecuación (2.14), considerando la resistencia de los devanados y corriente en los mismos (Chapman, 2012). El valor de potencia perdida está en función de la resistencia de los devanados, lo cual influye directamente en su magnitud.

$$P_B = I^2 * R \quad (2.14)$$

Donde:

P_B : Pérdidas en el bobinado (W).

I^2 : Corriente que circula por los devanados (A).

R : Resistencia de los devanados ($R_{20^\circ C} * l_{bobina}$) (Ω).

- **Pérdidas por rectificación**

En el proceso de rectificación, el método más empleado es usar puentes rectificadores de onda completa para cada fase, que tiene como desventaja una caída de voltaje de 1.4 V (Carrillo et al., 2018).

$$P_R = I * V \quad (2.15)$$

Donde:

P_R : Pérdidas por rectificación (W).

V : Caída de tensión (V).

Finalmente, las pérdidas eléctricas totales (P_E), se obtienen de la sumatoria de todas las pérdidas, como se indica en la ecuación (2.16). (Medina, 2016)

$$P_E = P_B + P_R \quad (2.16)$$

Mientras mayores sean las pérdidas en la máquina, la eficiencia de la máquina es la más afectada, entregando a su salida una potencia reducida.

2.5.9 Eficiencia del generador

Como toda máquina eléctrica, el generador no es capaz entregar la totalidad de la energía de entrada a la salida, puesto que en su conversión se producen pérdidas, las cuales están asociadas con su construcción física y componentes internos. La ecuación (2.17) expresa en porcentaje la eficiencia del generador (Chapman, 2012).

$$\eta = \frac{P_{sal}}{P_{ent}} * 100\% \quad (2.17)$$

La potencia real de salida se obtiene restando a la potencia de entrada todas las pérdidas que presenta el generador. Entonces, la eficiencia queda expresado con la ecuación (2.18). (Carrillo et al., 2018)

$$\eta = \frac{P_{ent} - P_E}{P_{ent}} * 100\% = \frac{P_{sal}}{P_{sal} + P_E} * 100\% \quad (2.18)$$

Donde:

η : Eficiencia (%).

P_{sal} : Potencia de salida (W).

P_{ent} : Potencia de entrada (W).

Por ejemplo, un generador de 200 W a 24 V tiene una corriente de 8,33 A con resistencia en los devanados de 2 ohms, la potencia perdida en el cableado sería 138 W, lo que llevaría necesariamente a elevar la potencia de entrada a 338 W. De esta manera la eficiencia será del 59 % en el peor caso.

Ahora, con un generador de 40 W a 24 V la corriente será de 2 A, además, considerando el mismo valor de resistencia de 2 ohms, la potencia perdida tendrá un valor de 8 W, para lo cual la potencia en la entrada deberá subir a 48 W, con ello la eficiencia toma un valor del 83,33 %.

De esta forma se deduce que un generador de menor potencia es más eficiente que uno de potencia superior, además, ofrece mejores características para trabajar frente a vientos bajos e irregulares. Por otra parte, para superar las pérdidas la máquina tendrá que aumentar su velocidad angular, lo cual es difícil de conseguir por la disponibilidad del viento y en el caso de lograrlo conlleva a sobreesfuerzos mecánicos.

2.6 Recomendaciones de diseño para el generador de flujo axial

De las características analizadas anteriormente se dan las siguientes recomendaciones:

- En lo referente a la turbina del aerogenerador se demostró que si es capaz de operar bajo las condiciones del recurso eólico disponible, no siendo necesario aumentar su tamaño, puesto que si lo hace el par de arranque también lo hará y se necesitará una mayor velocidad de viento.
- El tipo de imán a emplear influye en los demás parámetros de la máquina, ya que es el responsable de producir todo el campo magnético que fluirá a través del bobinado, por esta razón es recomendable emplear imanes con alto grado de magnetización y con forma cúbica, puesto que existirá una mayor superficie que provea el campo.
- En cuanto a la cantidad de polos a utilizar, depende la velocidad del viento y del uso que se le vaya a dar a la energía generada, si se destina a almacenarse a una batería, la frecuencia no es relevante y el número de polos necesarios no tiene que ser necesariamente elevado. Por otra parte, con un mayor número de polos se obtiene mayor energía a los bornes y el generador podrá arrancar con menor velocidad de viento.
- Como se analizó el aerogenerador existente empieza a entregar energía útil a partir de los 5 m/s, lo cual es un punto de partida para el diseño. De acuerdo a lo estudiado, para ésta velocidad y a una frecuencia de 10 Hz, es suficiente una cantidad de aproximadamente 8 pares de polos.
- La geometría del generador influye en la cantidad de energía capaz de entregar. En este caso, se demostró que un rotor con dos discos de imanes enfrentados, brinda mayores beneficios con una densidad magnética elevada, lo que da como resultado una mayor fuerza electromotriz inducida en las espiras del bobinado.
- La eficiencia de la máquina está ligada con las características constructivas de la maquia, especialmente con la resistencia del bobinado. Es por ello que no es recomendable emplear conductores demasiado delgados, ya que el valor de resistencia es mayor, en cambio, los conductores de mayor calibre presentan menos oposición a la circulación de corriente.

CAPÍTULO 3

3 CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DE GENERADOR EÓLICO

3.1 Introducción

Con las características eléctricas de diseño analizadas, considerando el tipo turbina eólica y generador eléctrico flujo axial, propósito del presente trabajo, permitieron conocer los principales aspectos a tomarse en cuenta para el diseño del prototipo.

Analizado el tipo de turbina eólica a usar en el prototipo, configuración del generador eléctrico y energía capaz de proporcionar el imán permanente, lo siguiente es determinar los parámetros del generador iniciando por el número de polos, bobinas, cantidad de espiras y conductor. Para el dimensionamiento de cada aspecto se toma en cuenta el recurso eólico, densidad magnética y aspectos constructivos propios de este tipo de generadores.

Una vez calculados los parámetros de diseño, se desarrolla la construcción del prototipo, iniciando por su conexionado, distribución de los elementos en el rotor y estator, aspectos constructivos de sus partes y ensamblaje final.

En la etapa de caracterización del prototipo, las pruebas se desarrollan en diferentes condiciones: con el generador sin carga y con carga, a distintos valores de resistencias. El propósito es verificar el comportamiento de los parámetros voltaje, corriente y potencia del prototipo, en función de la velocidad de rotación medida en revoluciones por minuto. Cada parámetro se mide punto a punto en intervalos de 2 m/s a 14 m/s, equivalente de 29 a 200 revoluciones por minuto.

3.2 Determinación de parámetros del generador de flujo axial

De todas las configuraciones posibles para el diseño de este tipo de generadores, se optó por un generador monofásico de un estator y doble disco de rotor, ya que, al estar los imanes enfrentados entre sí, la densidad magnética es mayor. Además, el voltaje por fase a entregar es mayor.

3.2.1 Cálculo de la densidad de flujo máximo

A partir de densidad de flujo máximo (T), se determina la cantidad de voltaje que, el generador es capaz de entregar, al igual que otros parámetros como el número de espiras por bobina. Para el cálculo de la densidad de flujo máxima se empleó el software FEEM con dos imanes N52 montados en láminas de acero de 4 mm de espesor y separados entre sí a una distancia de 2,5 cm (Fig. 20).

Se tiene como resultado una densidad de flujo máximo igual a 0.5938 (T). Además, es la mayor cantidad de energía capaz de brindar una configuración de imanes enfrentados.

3.2.2 Cálculo del número de polos y bobinas

De lo analizado en la TABLA 2.4, que relaciona en número de pares de polos necesarios para determinadas velocidades del viento y frecuencias, se estableció que con una cantidad de 8 pares de polos, el generador puede entregar energía útil a partir de los 4 m/s, además, la distribución de los mismos en el rotor es simétrica con un tamaño de la máquina reducido.

Se optó por diseñar un generador monofásico, dado que al tener un número igual para pares de polos y bobinas como lo muestra la ecuación (2.2), el voltaje generado por fase es mayor, a diferencia de la configuración trifásica, que emplea menor número de bobinas por pares de polos, ecuación (2.3).

$N_p = 8$ pares de polos.

$N_B = 8$ bobinas.

3.2.3 Cálculo del número de espiras

El número de espiras y calibre del conductor se escogieron de acuerdo al espacio disponible en el estator. Además, considerando que mientras más espiras existan, el voltaje generado se elevará, el generador cargará a la batería, el torque de la turbina aumentará y la velocidad de rotación se limitará, en cambio, con pocas espiras para el voltaje deseado, las aspas tienden a sobrepasar su velocidad para poder generar el voltaje suficiente.

El número de espiras por bobina se determina colocando a la ecuación (2.13) de la siguiente forma:

$$n = \frac{(V_{DC} + 1.4) * 19,1}{A * B * N} \quad (3.1)$$

Sustituyendo en la ecuación (3.1), el voltaje de 24 V como la tensión de la batería a alimentar, las dimensiones del imán indicados en la TABLA 2.2, la densidad de campo magnético calculada, la velocidad de rotación igual a 58 rpm, valor tomado de la TABLA 2.3 con una velocidad de viento de 4 m/s, se obtiene la cantidad de espiras por fase.

$$V_{DC} = 24 \text{ V.}$$

$$A = 60 \text{ mm} * 20 \text{ mm} = 0,0012 \text{ m}^2 * 8 = 0,0096 \text{ m}^2.$$

$$B = 0.5938 \text{ T.}$$

$$N = 58 \text{ rpm.}$$

$$n = \frac{(24 + 1.4) * 19,1}{0,0096 * 0,5938 * 58} = 1467,32 \text{ espiras totales en la fase}$$

$$\text{Total espiras por bobina} = \frac{1467,32}{8} = 183,41 \approx 184 \text{ espiras}$$

El resultado obtenido se aproxima a 184 espiras por bobina. Para verificar si el resultado se encuentra dentro del margen correcto, se recalcula el voltaje DC obteniendo un valor de 24,04 V, valor similar al voltaje usado inicialmente para el cálculo.

3.2.4 Cálculo de la sección del conductor

El calibre del conductor se escogió considerando la cantidad de espiras por bobina y el espacio disponible, el cual depende del tamaño y grosor del estator. El tamaño de la bobina varía con las dimensiones del imán y de la separación que tendrán los mismos.

El área de la sección transversal en la cual va a encajar la bobina de calcula con la ecuación (3.2). (Piggott, 2014)

$$A_{bobina} = D_{bobina} * E_{bobina} * f_e \quad (3.2)$$

Donde:

A_{bobina} : Área de la sección transversal (mm²).

D_{bobina} : Diagonal de la bobina (mm).

E_{bobina} : Espesor o ancho de la bobina (mm).

f_e : Factor de espacio entre espiras.

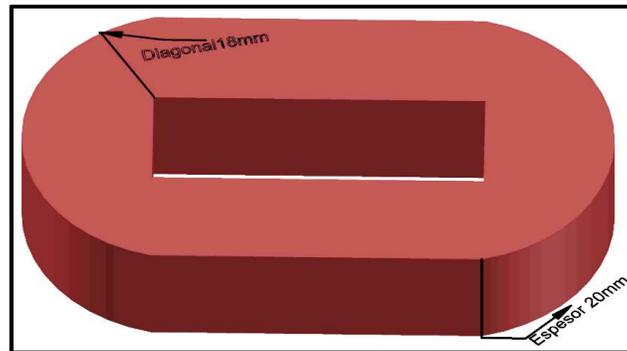


Fig. 21. Medidas de la bobina a emplear en el diseño

Fuente: Autor

El factor de espacio es una estimación del porcentaje del espacio entre las espiras, el cual es común entre 0,55 y 0,6, esto depende de que tan apretadas estén.

Para el cálculo del área de la sección transversal, se consideró un valor de 20 mm para el espesor de la bobina, ya que la distancia de separación entre imanes para el cálculo de la densidad magnética se fijó en 25 mm, espacio en el cual debe encajar el estator (Fig. 21). La diagonal de la bobina toma el valor de 18 mm, puesto que, si toma un valor más elevado, la bobina ocupará más espacio y la distancia de separación entre imanes aumentará. Finalmente, el factor de espacio se fija en 0,5, debido a que la fabricación de las bobinas se realizará de manera manual. De esta manera, el área de la sección transversal da como resultado un valor de 180 mm².

Una vez conocida el área de la sección transversal, se determina la sección del conductor con la ecuación (3.3). (Piggott, 2014)

$$A_{conductor} = \frac{A_{bobina}}{n} \quad (3.3)$$

Donde:

$A_{conductor}$: Sección transversal del conductor (mm²).

A_{bobina} : Área de la sección transversal (mm²).

n : Número de espiras por bobina.

El número de espiras calculado es de 184 espiras, el área del conductor será:

$$A_{conductor} = \frac{360 * 0.5}{184} = 0,97 \text{ mm}^2$$

El área del conductor calculada es 0.97 mm², analizando los valores en la tabla de conductores (Anexo B), el cable inmediato superior es 16 AWG con una sección de 1,30 mm², con el cual el área de la bobina aumenta a 240 mm², lo que obliga necesariamente a aumentar el tamaño de la misma. Debido a ello, se seleccionó el conductor inmediato inferior 18 AWG con área de 0,824 mm².

La longitud total del devanado se determinó en función de las medidas del imán y el número total de espiras calculadas, lo que da como resultado 318 metros de bobinado. Con la longitud del devanado y la resistencia a 20 °C de la tabla de conductores, la resistencia total del estator es de 6,65 ohms.

3.2.5 Distribución del bobinado

Para distribuir las bobinas del estator, se deja en la parte central un espacio vacío que permita el paso de los tornillos de los discos del rotor. Para ello, se emplea un trozo de madera en forma circular llamado “isla” (Fig. 22).

El diámetro de la isla (D_{IS}) es de 85 mm, espacio suficiente capaz de permitir el paso de componentes mecánicos adicionales para el ensamblaje del generador.



Fig. 22. Colocación de bobinas

Fuente: Autor

Las bobinas se distribuyen a 45 grados y se colocan a 5 mm de la isla, dejando el espacio suficiente para que la resina entre por todos los espacios y cubra el bobinado.

3.2.6 Distribución de los imanes en los discos de acero

Los imanes del rotor se distribuyen de manera simétrica en los discos de acero. Para determinar el diámetro externo de los discos, se toma como referencia el diámetro de la isla y la diagonal de las bobinas (D_{bobina}), empleando la ecuación (3.4). (Carrillo et al., 2018)

$$D_R = D_{IS} + 2 * D_{bobina} + 2 * L_{IP} + 2 \quad (3.4)$$

Donde:

D_R : Diámetro exterior del disco rotor (mm).

L_{IP} : Longitud del imán permanente (mm).

D_{IS} : Diámetro de la isla (mm).

Reemplazando los valores de la TABLA 2.2 y Fig. 21, el diámetro externo calculado es de 243 mm. Sumando el espacio para la resina y fibra de vidrio para su recubrimiento, el diámetro total es igual a 250 mm (Fig. 23).

El diámetro interno (D_{RI}), con el cual se realiza la distribución simétrica se determina con la expresión (3.5). (Medina, 2016)

$$D_{RI} = D_{IS} + 2 * D_{bobina} + 2 \quad (3.5)$$

Sustituyendo el valor del diámetro de la isla y diagonal de la bobina indicada en la Fig. 21, el diámetro interno calculado es de 123 mm como lo muestra la Fig. 23, a partir de ello, se realiza la distribución de los imanes desplazados uno del otro a 45 grados.

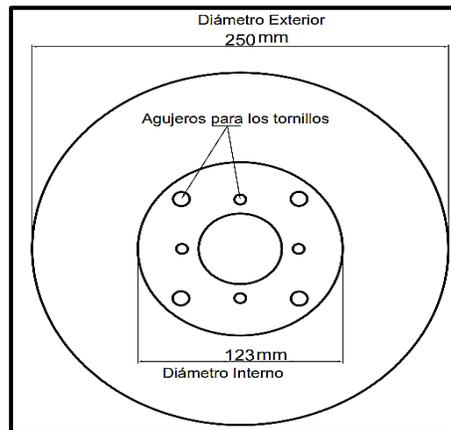


Fig. 23. Dimensiones de los discos rotores
Fuente: Autor

El diámetro interno se relaciona con el espacio que permite el paso de los tornillos de sujeción, en cambio, el diámetro externo con las medidas imán y tamaño de la bobina.

Una vez definidas las dimensiones de los discos, lo siguiente es determinar el orden de distribución de los imanes, los cuales se colocan con polos alternados. El primero disco tiene el orden (N-S, N-S, N-S) y el segundo (S-N, S-N, S-N) como se indica en la Fig. 24.

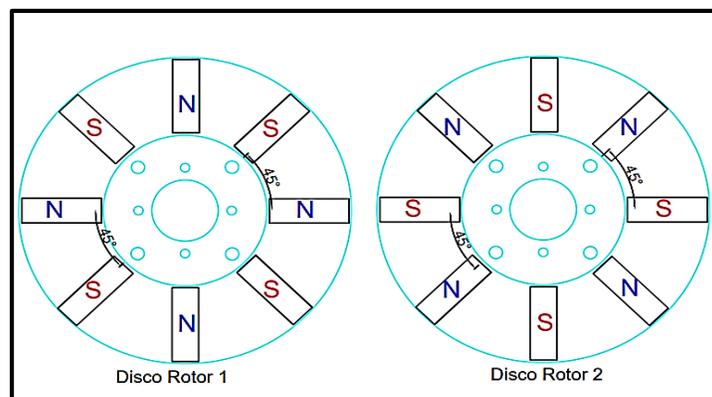


Fig. 24. Orientación y distribución de imanes
Fuente: Autor

En ambos discos rotores, los imanes se colocan enfrentados entre sí y con polos opuestos para que exista flujo de densidad magnética e interactúe con el bobinado.

3.2.7 Parámetros finales del prototipo

Una vez analizados y determinados los aspectos eléctricos del generador de flujo axial y considerando los recursos disponibles que se ajusten a la realización del presente proyecto, el prototipo tendrá las características indicadas en la TABLA 3.1.

TABLA 3.1. Parámetros técnicos del aerogenerador

PARÁMETROS	VALOR
Generador eléctrico	Flujo axial
Voltaje	24 V
Número de fases	1
Número de polos	8
Número de bobinas	8
Configuración	Un estator y doble rotor
Estator	1 estator fijo
Rotor	Doble disco de imanes móviles
Turbina eólica	Turbina Thorus
Velocidad de viento para su operación	2-9 m/s
Velocidad mínima / máxima de operación	29- 129 rpm

Fuente: Autor

Elaborado: Autor

Con las características eléctricas de diseño ya definidas, lo siguiente es realizar la construcción del prototipo para que opere bajo las condiciones especificadas. Además, cada parte del generador debe acoplarse al tamaño disponible dentro de la turbina eólica.

3.3 Selección de componentes

En la TABLA 3.2 se detalla: el tipo, cantidad y dimensiones de los elementos para la construcción del prototipo:

TABLA 3.2. Componentes empleados para la construcción

MATERIAL	CANTIDAD	DIMENSIONES
Imanes de Neodimio N52	16	60x20x10 mm
Alambre esmaltado	6 lb	18 AWG
Discos de acero	2	250 mm de diámetro
Estructura de soporte del generador	1	175 mm de altura
Rodamiento	1 (manzana de vehículo)	
Resina y fibra de vidrio	4 kg	
Pernos y tuercas galvanizadas.	30	4 x 6 x 1/2"
Turbina eólica.	1	1 x 1 m
Regulador de carga eólico	1	MPPT 30 A

Fuente: Autor

Elaborado: Autor

Los componentes mecánicos antes indicados como: estructuras, discos, rodamiento, pernos y tuercas, varían de acuerdo a las necesidades constructivas y de acople del generador eléctrico con la turbina eólica. Algunos parámetros pueden sufrir ligeros cambios en sus dimensiones en relación con el espacio disponible.

3.4 Construcción de generador de flujo axial con eje vertical

A continuación, se detalla todo lo referente a la construcción del prototipo, indicando su forma constructiva, estructura y elementos adicionales para el acople del generador con la turbina eólica. Se inicia detallando las dimensiones de la turbina, fabricación del estator y rotor.

3.4.1 Dimensiones de la turbina

La turbina empleada para poner en funcionamiento el generador construido, es una turbina tipo Thorus, en la cual se realizaron modificaciones mecánicas que se adapten a las características y dimensiones del generador eléctrico construido. La turbina cuenta con ocho direccionadores de viento y cinco álabes distribuidos simétricamente. La base superior e inferior son octogonales, cada lado mide 40 cm, el alto y ancho aproximado de toda la turbina es de 100 cm. Los direccionadores tienen 90 cm de largo y 24 cm de ancho a una inclinación de 30 grados de la base. Los álabes poseen una altura de 87 cm con un ancho aproximado de 27 cm. Adicionalmente, para aumentar la altura de la turbina se agregan 4 patas de 25 cm de alto. En la Fig. 25 se muestra el perfil y medidas de la turbina.

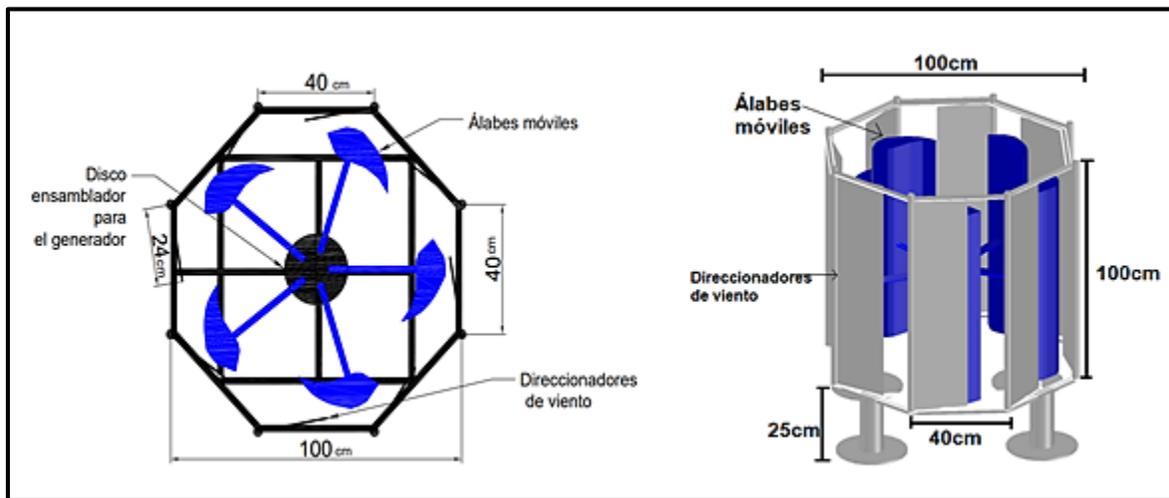


Fig. 25. Perfil y medidas de la turbina

Fuente: Autor

Las medidas de la turbina se ajustan con las dimensiones del generador construido, en el caso de existir rozamiento de los álabes con la estructura, se deben recortar las dimensiones de los brazos que sostienen a los mismos.

3.4.2 Estructura

La estructura interna tiene como finalidad de sostener a todos los componentes mecánicos y eléctricos del generador, para ello se construyó una base de 175 mm de alto fabricada en acero de 6 mm de espesor (Fig. 26).



Fig. 26. Base de la estructura en acero

Fuente: Autor

Los tornillos perpendiculares a la base sirven de soporte para la sujeción del estator, en cambio, el tornillo en la parte central se utiliza como eje para el rodamiento. Los demás orificios en la estructura son de utilidad para la instalación.

3.4.3 Buje y Rodamiento

Al ser el elemento que gira con la acción del viento y álabes, debe ser suave para la rotación y robusto para soportar el peso vertical del rotor, aspas y elementos adicionales. Siguiendo con la recomendación antes mencionada, se optó por escoger una manzana delantera de vehículo Nissan Patrol como se indica en la Fig. 27.



Fig. 27. Manzana usada como rodamiento del generador

Fuente: Autor

Los pernos que posee la misma se emplean para sujetar el primer disco rotor del generador, por tal motivo los agujeros se realizaron a las mismas medidas de separación a 40 mm y 75 mm, estando dentro del diámetro interior del disco rotor (D_{RI}).

3.4.4 Construcción del estator

Su construcción inicia con la elaboración de las bobinas, distribución y conexiónado. En la etapa final se realiza la fundición en resina de poliéster y fibra de vidrio, se pulen fallas y se pinta para cubrir las fallas. Cada proceso se detalla más adelante.

- **Elaboración de las Bobinas**

Para la construcción de las mismas se realiza una bobinadora manual, la cual en su centro posee un molde con las dimensiones del imán, que tiene como función dejar el espacio en las bobinas de núcleo de aire y con un espesor de 20 mm. La bobinadora y bobina construidas se muestran en la Fig. 28.

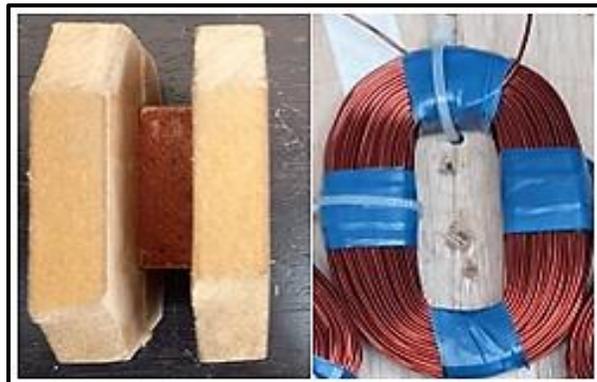


Fig. 28. Bobinadora manual y bobina
Fuente: Autor

El material de la bobinadora es madera, la cual no daña el esmaltado del conductor. En los terminales del inicio y final de cada bobina se deja una longitud de 200 mm para realizar las conexiones entre las mismas, además, se sujetan con cinta aislante para evitar que se deformen.

- **Conexión de las bobinas**

Existen dos formas de conexión: serie y paralelo. En la conexión serie, el final de la primera bobina se conecta con el inicio de la siguiente dando como resultado que el voltaje de cada bobina se suma, en cambio, en paralelo los inicios y finales se conectan entre sí,

permitiendo llevar el doble de corriente con un conductor más delgado. En este caso, se emplea la conexión serie para tener mayor voltaje en los terminales del generador, el diagrama de conexión se indica en la Fig. 29.

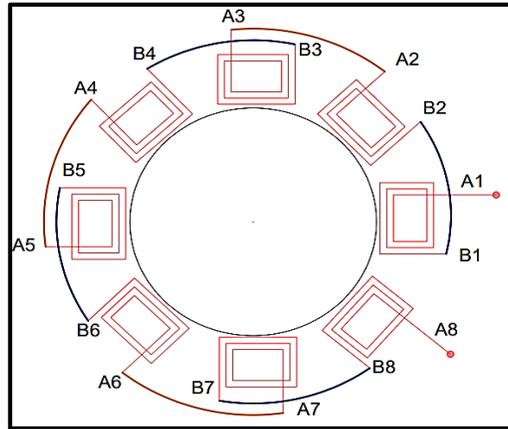


Fig. 29. Conexión de bobinas

Fuente: Autor

La conexión física de las bobinas se realiza siguiendo la conexión indicada en la Fig. 29. Todas las bobinas se colocan en el mismo sentido de enrollamiento (izquierda). El inicio de la primera (A1) y última bobina (A8), son los terminales del estator donde se realizarán las mediciones. La conexión toma el siguiente orden: B1-B2, A2-A3, B3-B4, A4-A5, B5-B6, A6-A7, B7-B8.

Se retira el esmalte de los terminales para poder soldar, luego se aíslan los puntos de conexión usando espaguetis de un calibre superior al conductor, los cuales son flexibles y fáciles de manipular como se indica en la Fig. 30.

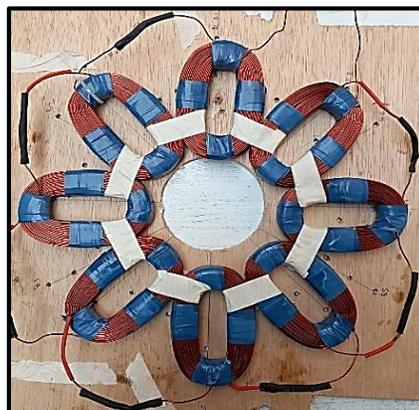


Fig. 30. Soldado de las bobinas

Fuente: Autor

Terminada su conexión se verifica el orden y continuidad en los terminales. Adicionalmente, se sujeta el bobinado con cinta aislante para evitar que se mueva.

- **Estator terminado**

Terminado el trabajo de conexión, el trabajo final consiste en fundir las bobinas en resina de poliéster con fibra de vidrio, con una capa fina de 2 mm en la cara superior e inferior protegiendo de esta forma el bobinado. Siguiéndola recomendación de Piggott (2014), se realizó un molde de madera para colocar el bobinado a profundidad de 28 mm como se observa en la Fig. 31.a.



Fig. 31. Fases de construcción del estator

Fuente: Autor

La Fig. 31.b indica la distribución de las bobinas, la cual fue simétricamente a 45 grados una de la otra, luego se vertió la mezcla evitando dañar los terminales del estator. Una vez terminada la fundición se pulen fallas y se pinta, los terminales se aíslan para evitar que se maltraten y se señalan para identificar el inicio y final del bobinado como se indica en la Fig. 31.c.

3.4.5 Construcciones de los rotores

Los discos usados para la colocación de los imanes son de acero dulce, debido a que son conductores y mejoran las características magnéticas. En ningún caso, se debe emplear materiales como madera, aluminio o acero inoxidable. Los discos tienen como misión cerrar el circuito magnético de las caras posteriores de los imanes y evitar la dispersión de las líneas de flujo. Como ya se mencionó, el diámetro externo del disco rotor (D_R) es 250 mm, en su centro posee un orificio de 50 mm que permita el paso del eje, los agujeros a sus extremos se usan

para atornillar los demás elementos. El grosor de cada disco se dejó en 4 mm, el cual brinda buenas propiedades y no es muy pesado. Las partes y dimensiones que posee cada disco del rotor se indica en la Fig. 32.

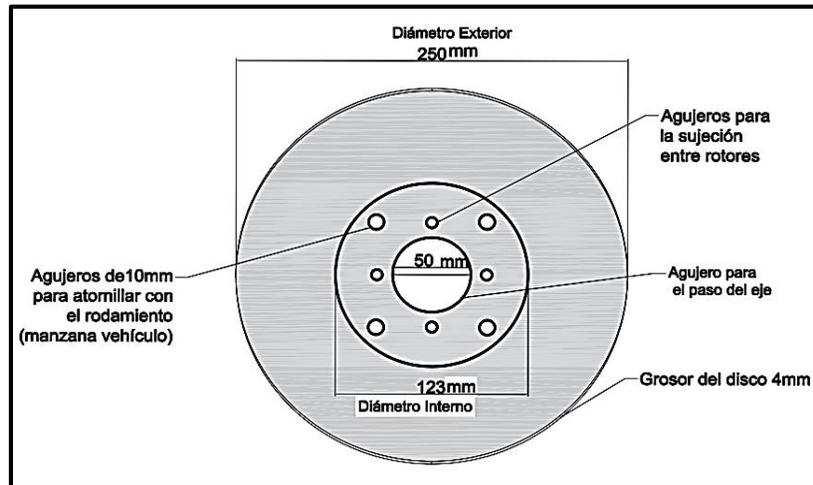


Fig. 32. Medidas de los rotores
Fuente: Autor

Con el disco recortado y pulido, lo siguiente es colocar los imanes y pegarlos con una pega especial para evitar que salgan despedidos por la rotación. Para una distribución simétrica, se desarrolló una platilla respetando el diámetro interno (D_{RI}), externo (D_R) y dimensiones del imán como se muestra en la Fig. 33.a.

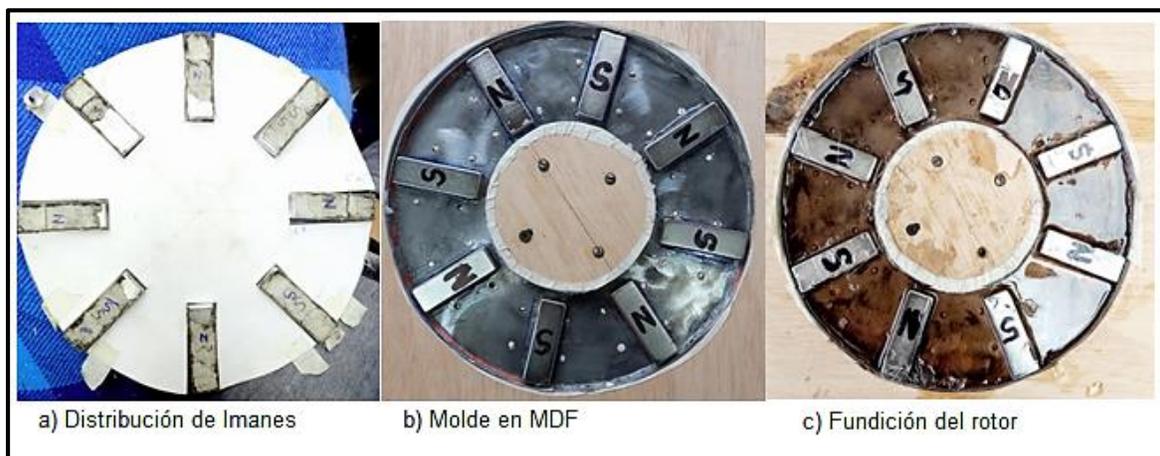


Fig. 33. Construcción del rotor
Fuente: Autor

Al igual que en el estator, se realizó un molde en madera MDF con una profundidad 20 mm para sumergir cada disco como se observa en la Fig. 33.b.

Una vez pegados y distribuidos los imanes, el siguiente paso es cubrir cada disco con una capa de 4 mm de espesor con la mezcla de resina de poliéster con fibra de vidrio, evitando aumentar el peso en los discos rotores. Además, cada imán debe estar cubierto por una capa fina para evitar la corrosión en los mismos (Fig. 33.c). Finalmente, se pulen fallas y se pintan para que el nivel de protección aumente como se observa en la Fig. 34.

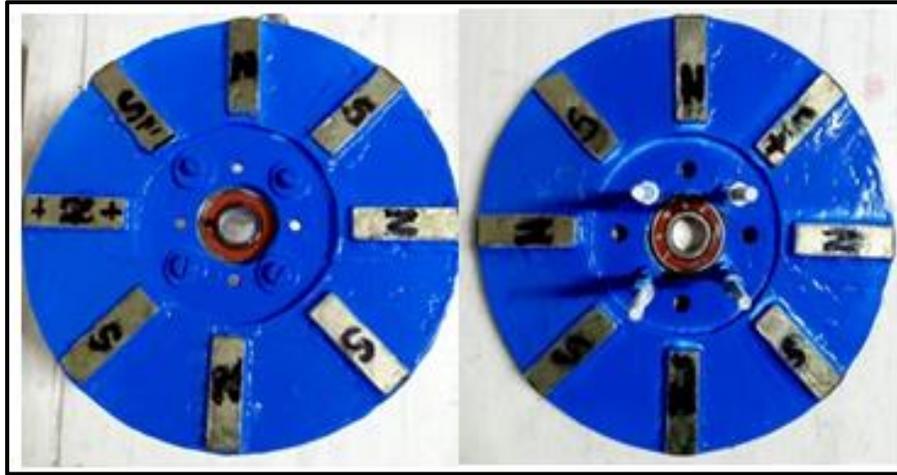


Fig. 34. Rotores terminados

Fuente: Autor

De este modo concluye la fase de construcción del rotor, además, como se puede observar, cada disco posee pernos de sujeción para el acople con el rodamiento.

3.4.6 Ensamblaje final del generador

El ensamblaje del prototipo de generador eólico, se inicia atornillando la estructura interna de acero con la estructura de la turbina, en la misma se acopla el rodamiento. Una vez sujeto el rodamiento, se ensambla el primer disco rotor seguido del estator, el cual se sujeta con los tornillos propios de la estructura interna de acero.

Se verifica que no exista rozamiento del rotor con en el estator, y luego se procede ajustar y calibrar la distancia entre discos de imanes y el estator tratando que estén lo más cercano, pero sin toparlo directamente. En el segundo disco de imanes se sujetan tornillos con un disco adicional, el cual se empleará para sujetar a los cinco álabes y elementos protectores (Fig. 35).



Fig. 35. Ensamblaje final de aerogenerador

Fuente: Autor

En el ensamblaje final quedan aberturas, las cuales son perjudiciales permitiendo el ingreso de agua y polvo, por este motivo en la parte superior se colocó una tapa y recubrimiento. De igual forma, se verifica que los álabes estén simétricamente distribuidos y no rocen en la estructura.

3.4.7 Implementación del prototipo

Para su implementación en el edificio de la Carrera de Electricidad, el primer paso fue realizar una base rectangular de hormigón de 70 cm² con una altura de 60 cm. La finalidad es obtener una mayor altitud a nivel del suelo para captar más viento como se muestra en la Fig. 36.



Fig. 36. Base de hormigón para el aerogenerador

Fuente: Autor

Adicional a la base construida, se emplea una estructura extra con la finalidad de sostener en ella la turbina y generador construidos.

- **Instalación de generador eólico**

Con la base construida, lo siguiente es instalar el generador eléctrico conjuntamente con la turbina eólica. Adicionalmente, se dejan libres los terminales del generador para la conexión del cableado que irá al regulador de carga eólico (Fig. 37).



Fig. 37. Instalación del generador eólico

Fuente: Autor

Una vez instalado se verifica que todos los elementos estén sujetos y asilados para evitar que exista golpes y corrosión. Además, los álabes se ubican acorde a la dirección con mayor presencia de recurso eólico.

- **Instalación del regulador eólico**

Para poder entregar la energía generada a la batería, es necesaria rectificarla y controlarla, para ello se emplea el regulador de carga eólico MPPT 30 A indicado en la Fig. 38.

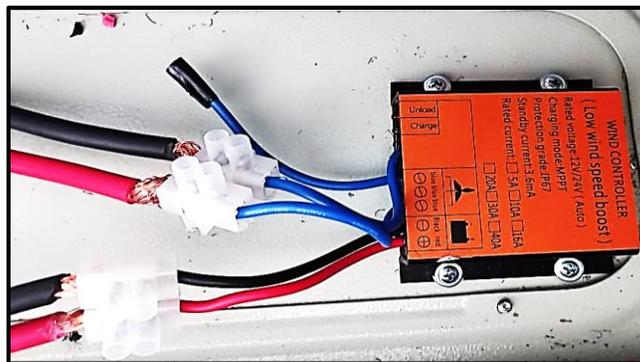


Fig. 38. Instalación de regulador de carga eólico

Fuente: Autor

El regulador posee tres terminales de los cuales se empleó dos de ellos, debido a que el generador construido es monofásico. A la salida del controlador de carga se conectan los terminales a la batería siguiendo el esquema de conexión.

3.5 Presupuesto del proyecto

El presupuesto de los componentes empleados para la realización del prototipo de generador eólico conjuntamente con la implementación final se muestran en la TABLA 3.3.

TABLA 3.3. Presupuesto para la implementación del prototipo de generador eólico

ITEM	COMPONENTE	CANTIDAD	PRECIO	PRECIO
			UNITARIO	TOTAL
			(USD)	(USD)
1	Turbina eólica	1	340	340
2	Imanes de neodimio N52	16	20	320
3	Rodamiento, manzana Nissan Patrol	1	30	30
4	Estructura de soporte del generador 175 mm de alto	1	70	70
5	Libras de cable 18 AWG para bobinado	6	10	60
6	Resina y fibra de vidrio kg	4	10	40
7	Regulador de carga eólico MPPT 30 A	1	100	100
8	Cable aislado 6 AWG	40	2,42	130
VALOR TOTAL (USD)				1100

Fuente: Autor

Elaborado: Autor

3.6 Pruebas de caracterización del prototipo

En este apartado se muestran las pruebas realizadas al generador de flujo axial de imanes permanentes, con la finalidad de observar y demostrar el comportamiento de voltaje, corriente, potencia y eficiencia en función de la velocidad angular (rpm). Las pruebas realizadas se desarrollaron en condiciones de carga y sin carga.

3.6.1 Pruebas en vacío

En las pruebas en vacío se registraron los datos a distintas velocidades de viento medidas en revoluciones por minuto, midiendo directamente en los terminales del generador. La toma de muestras se realizó registrando los valores de voltaje punto a punto en intervalos de 7 rpm hasta 200 rpm con la finalidad de obtener una mejor apreciación de los cambios en las señales. Los resultados obtenidos se indican en la Fig. 39.

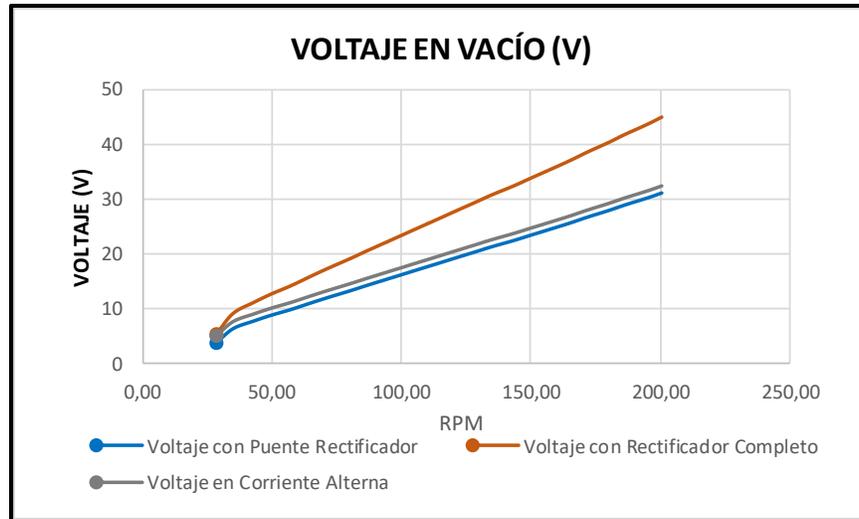


Fig. 39. Prueba de generación en vacío

Fuente: Autor

En este apartado se consideraron tres aspectos para el registro de datos la señal: corriente alterna, rectificada con el puente de diodos KBPC050 06 W y puente rectificador con condensador de 330 uF 100 V.

Los resultados indican que la diferencia entre el voltaje en corriente alterna y rectificado con el puente de diodos es de 1,61 V, el cual es un valor del voltaje promedio obtenido de las mediciones realizadas. Tomando en consideración que el voltaje perdido en un puente rectificador es 1,4 V, si existe relación entre el valor teórico y valor medido.

En el caso del voltaje rectificado empleando un condensador a la salida del puente de diodos, se obtienen mayores niveles de tensión continua, esto se debe a que el condensador se carga hasta alcanzar la tensión pico de la señal alterna. Teóricamente la magnitud de la tensión utilizando un condensador, se obtiene de multiplicar el voltaje rectificado por un factor de 1,42 V, en este caso el factor multiplicador fue de 1,45 V siendo un valor similar al valor teórico.

Como conclusión final, es más recomendable emplear el rectificador completo ya que ofrece mejores características en cuanto a la magnitud de voltaje. Los valores registrados en cada caso se muestran en el Anexo C literal A.

En cuanto al comportamiento de las señales, todas siguen el mismo principio. En un inicio tienen un comportamiento cuadrático hasta los 6V, 7V, 9 V respectivamente, luego su crecimiento es de forma lineal.

3.6.2 Pruebas con carga

Para la realización de estas pruebas se empleó como carga resistiva focos incandescentes de 110 W, cada cual con resistencia de 12,4 ohms. Se consideró un aumento de carga hasta 4 focos conectados en paralelo a la salida del generador, tomando registro punto a punto de voltaje y corriente en función de la velocidad angular (Fig. 40).



Fig. 40. Carga resistiva conectada en el generador

Fuente: Autor

El aumento de carga se hace de manera progresiva a fin de verificar los cambios que presenta en generador a medida que se aumenta o disminuye la carga resistiva. Las mediciones de voltaje se realizan con un multímetro en los terminales del generador y la velocidad de rotación del rotor se mide en rpm con ayuda de un tacómetro digital.

❖ Voltaje

El voltaje fue medido en función de las revoluciones por minuto, ya que éste parámetro juega un rol fundamental en la generación, puesto que mientras mayor es la velocidad de rotación mayor es el voltaje que entrega el generador, esto se demuestra en la Fig. 41.

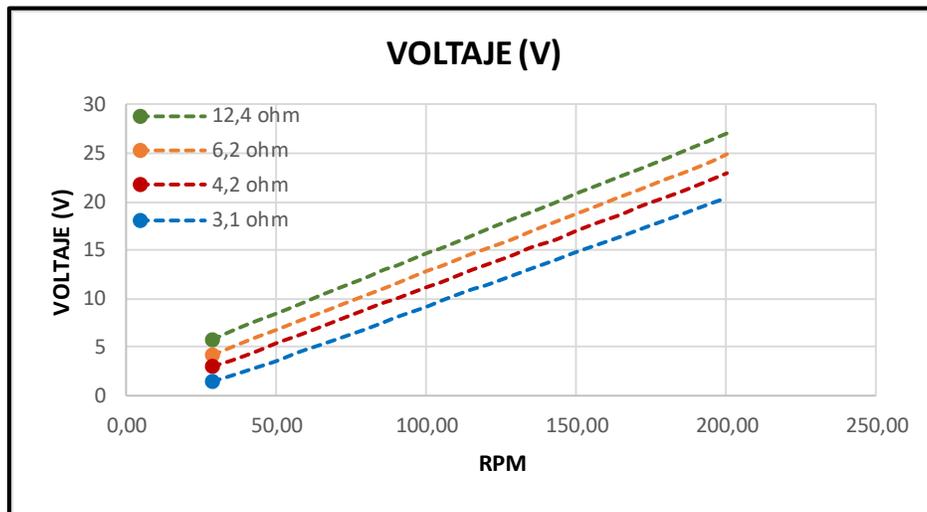


Fig. 41. Voltaje a diferentes resistencias
Fuente: Autor

Los resultados indican que, para a una resistencia elevada el voltaje generado es mayor, y conforme el valor de la resistencia disminuye el voltaje también lo hace, siguiendo de esta forma lo que establece la ley de ohm. En este caso, los valores más altos de voltaje se obtuvieron con la resistencia de 12,4 Ω con un voltaje mínimo de 5,8 V y máximo de 27 V. Por otra parte, los valores más bajos de voltaje se alcanzaron con la resistencia de 3,1 Ω partiendo de un voltaje mínimo igual a 1,5 V hasta el valor máximo 20,4 V. Las resistencias de 6,2 Ω y 4,2 Ω , tienen el mismo comportamiento lineal que las dos antes mencionadas. La diferencia entre las señales medidas es de aproximadamente 1,7 V. Los valores medidos para cada resistencia en específico se muestran en el Anexo C literal B.

También, estas pruebas indican que el generador necesita menos torque a mayor resistencia, lo que hace posible que el rotor gire con mayor facilidad para alcanzar la velocidad angular requerida. Sucede lo contrario conforme aumenta la carga resistiva en paralelo, si bien el valor de la resistencia disminuye, pero el rotor necesita de más torque para su movimiento limitando la velocidad de giro, esto se ve reflejado en los datos obtenidos.

❖ Corriente

Las mediciones de corriente se realizaron en función de la velocidad de rotación, registrando los cambios de corriente para cada valor de resistencia, los resultados obtenidos se muestran en la Fig. 42.

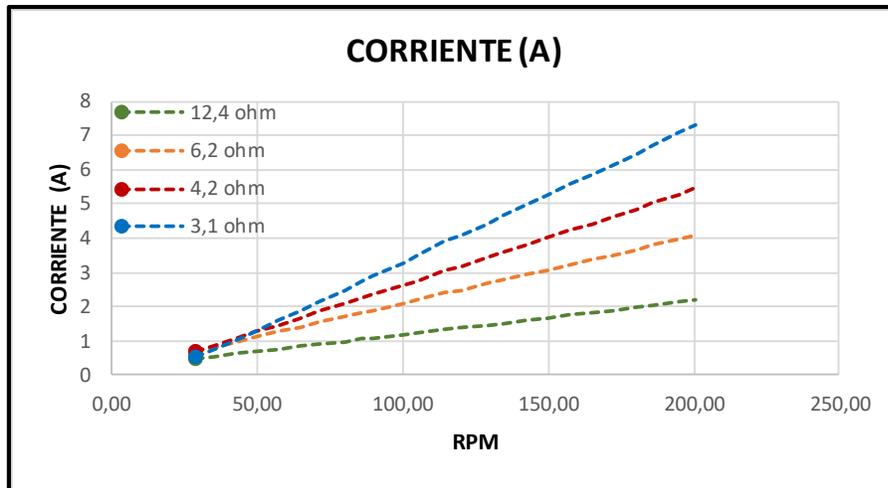


Fig. 42. Corriente a diferentes resistencias

Fuente: Autor

En este caso, los resultados muestran que se obtiene mayor intensidad de corriente con valores de resistencia bajos y menor intensidad con valores de resistencia elevados a diferencia de lo que sucede con el voltaje. La mayor intensidad de corriente se obtuvo con la resistencia de 3,1 Ω con un valor mínimo de 0,54 A y máximo de 7,29 A con su mayor velocidad angular, los cambios entre las cuatro señales se evidencian a partir de 50 rpm. Los valores más bajos de corriente se obtuvieron con la resistencia de 12,4 Ω con una corriente de 0,47 A hasta 2,18 A. Para las resistencias de 6,2 Ω y 4,2 Ω siguen un comportamiento lineal igual a las otras resistencias. La diferencia entre señales no es constante y aumenta conforme lo hace la velocidad angular, el valor mínimo con el que difieren es de 0,2 A y cuando alcanza la mayor velocidad angular la diferencia es de 2,1 A. Los datos muestreados se indican en el Anexo C literal C.

Al existir una mayor resistencia a la corriente le es más difícil su circulación a través de ella, lo que origina magnitudes bajas, en cambio, con una menor resistencia donde le es más fácil circular y se producen cantidades más elevadas cumpliendo de esta forma lo que establece la ley de Ohm.

❖ Potencia

Igual que los casos anteriores, se gráfica la potencia con los distintos valores de resistencia en función de las revoluciones del generador relacionando la corriente y voltaje medidos (Fig. 43).

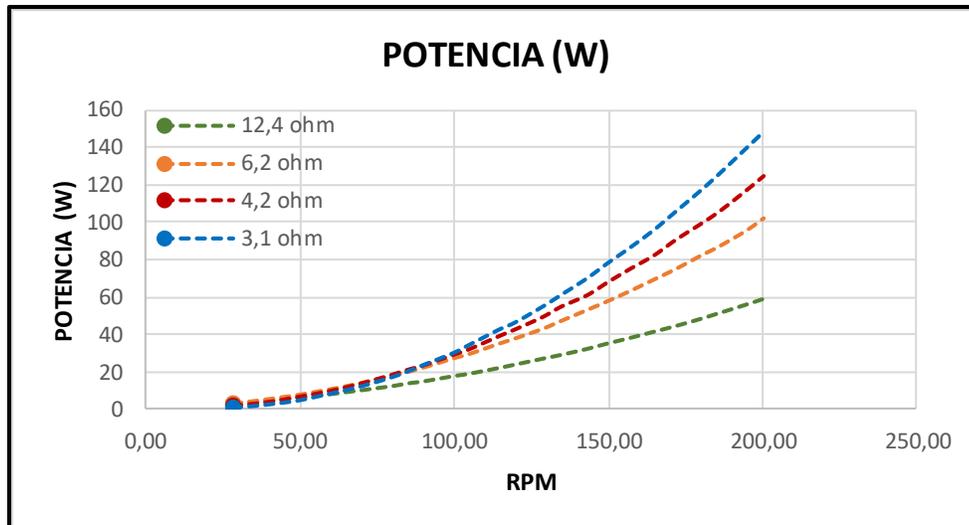


Fig. 43. Potencia a diferentes resistencias

Fuente: Autor

El comportamiento de la potencia guarda relación con los parámetros de voltaje y corriente indicados en la Fig. 41 y Fig. 42, los cuales son directamente proporcionales. En un inicio con las resistencias de 6,2 Ω y 4,2 Ω se obtienen mayores niveles de potencia por debajo de 86 rpm, a partir de ello, la mayor potencia entregada por el generador se obtiene con el valor más bajo de resistencia 3, 1 Ω con magnitudes desde los 0,81 W hasta 148, 63 W con la mayor velocidad angular de 200 rpm. La menor potencia se produce con la resistencia de 12,4 Ω alcanzando una potencia máxima igual a 58,79 W, debido a que los valores más bajos de corriente se obtienen con esta resistencia. Independientemente del valor que tome la resistencia, siguen el mismo comportamiento creciendo de forma cuadrática. Los datos adquiridos se indican en el Anexo C literal D.

La Fig. 43 también indica que la potencia del generador puede elevarse más debido al comportamiento que presentan las señales, pero por las características constructivas y de diseño, la corriente máxima capaz de soportar el generador es de 8,1 A con una potencia de 194,4 W.

❖ Eficiencia

La eficiencia guarda relación con las pérdidas que presenta el generador cuando entra en funcionamiento. Para su estimación se emplean las ecuaciones (2.14), (2.15) y (2.18). El valor de resistencia escogido para el estudio de la eficiencia es 12,4 Ω , puesto que genera la corriente suficiente para vencer la resistencia del conductor y regulador de carga eólico, además, se

obtiene un voltaje aceptable con velocidades de viento comunes para la generación a pequeña escala. En la Fig. 44 se observa la eficiencia del generador construido.

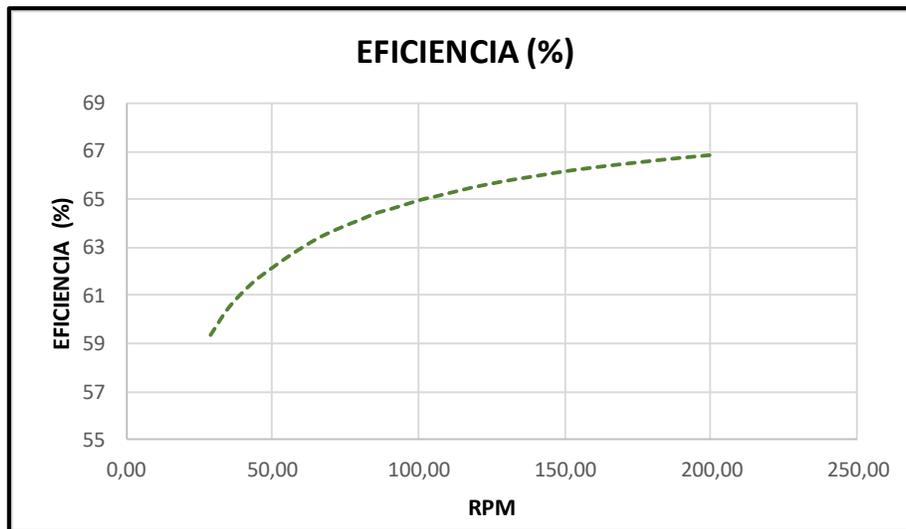


Fig. 44. Eficiencia del generador
Fuente: Autor

La eficiencia del generador construido se ve afectada principalmente por las pérdidas en el conductor, ya que, al estar las bobinas conectadas en serie, las resistencias por bobina se suman dando como resultado una resistencia elevada, en este caso el valor de la resistencia del bobinado es de 6.65Ω . Por otra parte, las pérdidas por rectificación son menores al emplearse el regular MPPT, el cual es altamente eficiente perdiéndose una pequeña parte de la potencia generada.

Las pérdidas totales oscilan de un valor mínimo igual $1,86 \text{ W}$ hasta $29,13 \text{ W}$, estos valores van creciendo conforme aumenta la velocidad de rotación del generador. En cuanto a la eficiencia se obtuvo $59,35 \%$ a la velocidad más baja de rotación 29 rpm y $66,87 \%$ cuando alcanza su velocidad angular máxima de 200 rpm . La solución para mejorar la eficiencia del generador es disminuir la resistencia del bobinado, lo cual se logra aumentando el calibre del conductor usado en las bobinas, presentándose como desventaja una disminución de voltaje capaz de entregar. Las muestras medidas se indican en el Anexo C literal E.

Estas características deben ser consideradas para la selección del tipo de generador, pues si se requiere de voltajes y corrientes elevadas con una eficiencia razonable, el generador monofásico es el indicado al ser capaz de brindar suficiente generación a velocidades de viento reducidas.

3.6.3 Forma de onda

Las mediciones de la señal de voltaje se realizaron con la ayuda del osciloscopio digital Hantek6022BE con el objetivo de verificar la calidad de energía entregada por el generador y a su vez analizar la forma de onda generada. La señal obtenida se observa en la Fig. 45 .

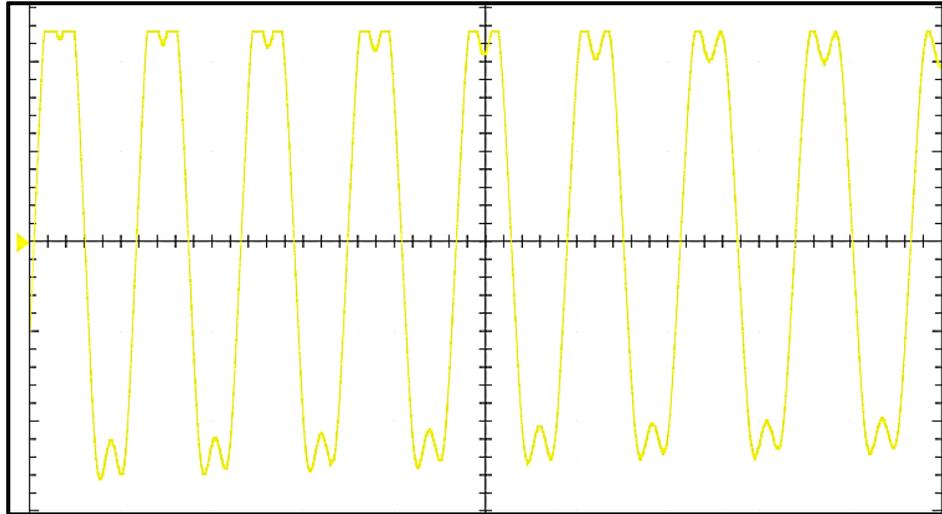


Fig. 45. Forma de onda de la señal

Fuente: Autor

La forma de onda obtenida con el generador conectado a la batería y en vacío, posee el mismo comportamiento.

Como se puede observar la forma de onda que entrega el generador no es puramente sinusoidal, además, tiene contenido armónico. Las presencias de armónicos en la señal se originan por los aspectos constructivos del generador como es el bobinado y distribución de los polos. Precisamente la cantidad de polos y la manera en que están distribuidos influye en la forma de onda. En este caso, al tener los imanes separados en el mismo disco aun distancia de 2,8 centímetros se origina un espacio hueco lo que por un instante provoca cambios en la intensidad de flujo magnético que interactúa con en el bobinado. Por otra parte, el bobinado al ser elaborado de forma manual, circulan corrientes parásitas, ya que las espiras no están lo suficientemente apretadas y poseen un factor de espaciamiento bajo.

❖ Forma de onda de un generador comercial

La señal indicada en la Fig. 46 fue obtenida del aerogenerador existente en la Carrera de Electricidad, el cual es fabricado de forma industrial.

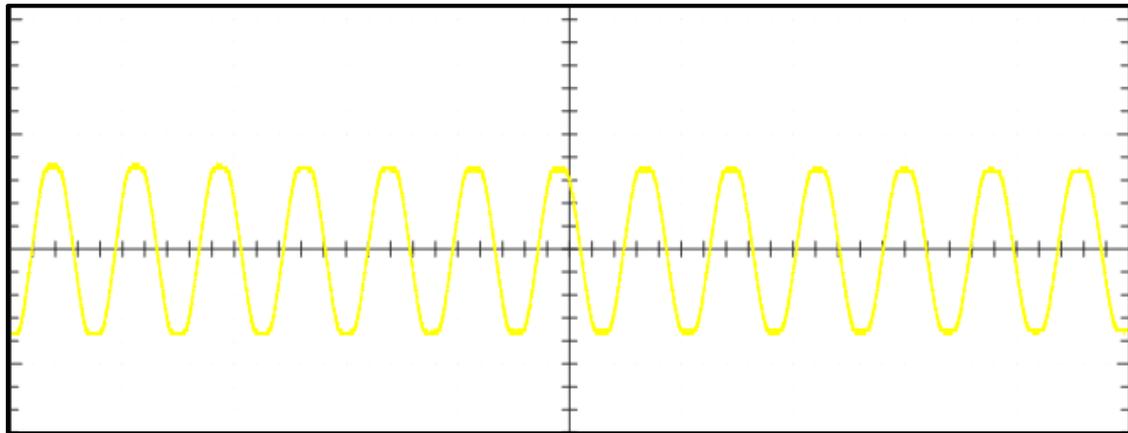


Fig. 46. Forma de onda de un generador comercial

Fuente: Autor

Comparando la forma de onda del generador de fabricación industrial con el artesanal, se observa que la señal en este caso es completamente senoidal y no posee contenido armónico. La razón de presentar una mejor calidad de onda es la forma en que está construido el estator y rotor. El estator tiene un factor de espaciado elevado eliminando así la presencia de corrientes parásitas y en el rotor puede que se empleen imanes permanentes de un distinto grado de magnetización y forma, además, que la distribución de los polos sea distinta.

❖ Armónico de la señal

Con los datos obtenidos de la Fig. 45 se analizó el tipo de armónico presente en la señal. Se debe considerar que los armónicos aparecen únicamente en corriente alterna siendo múltiplos impares de la frecuencia fundamental. Este hecho afectaría la calidad de energía en el caso de que el generador se conectase directamente a la red, pero como la energía se destina a almacenarse en una batería, la señal se rectifica por medio del regulador de carga eólico quedando minimizados estos problemas. Sin embargo, se procede a determinar el componente armónico presente en el generador como se muestra en la Fig. 47. Los datos muestreados se llevaron a Matlab y luego aplicando el análisis de Fourier se determinó el componente armónico.

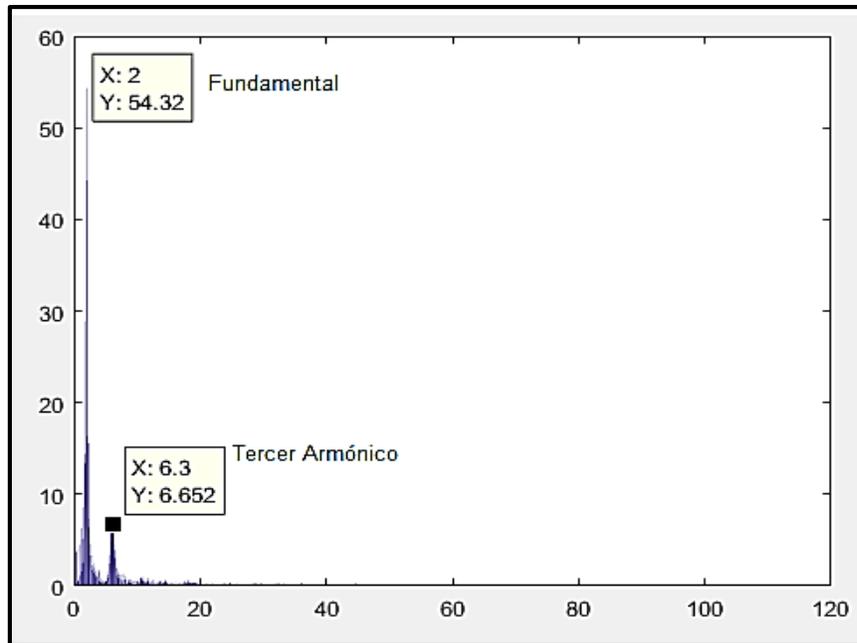


Fig. 47. Armónicos de la señal voltaje

Fuente: Autor

Como se puede observar el generador construido tiene presencia del tercer armónico teniendo tres veces la frecuencia de la forma de onda fundamental. En este caso, la frecuencia fundamental es de 2 Hz y el tercer armónico de 6 Hz, cumpliéndose de esta forma con lo mencionado anteriormente.

La presencia de este componente armónico ocasiona problemas adicionales que afectan al funcionamiento del generador como; la dificultad para arrancar y la producción de ruidos y vibraciones mecánicas; factores que deben ser considerados para el diseño de este tipo de generadores eléctricos.

CONCLUSIONES

- ❖ El estudio realizado sobre las tecnologías de generación eólica permitió conocer, que para su implementación es necesario tener conocimiento de las condiciones geográficas y ambientales, puesto que sin ellas a cualquier tecnología se limita su funcionamiento. Para aplicaciones de baja potencia, el aerogenerador de eje vertical es el que mejor se adapta y es capaz de funcionar en condiciones de viento limitado, además, el emplear un generador eléctrico de flujo axial capaz de arrancar en cualquier dirección y empezar a generar a bajas velocidades, lo convierte en el generador que mejores prestaciones brinda para la generación a pequeña escala.
- ❖ Las características eléctricas de diseño se seleccionaron considerando; la disponibilidad de recurso eólico, a partir de ello se estima con que velocidad es posible empezar a generar, en este caso se demostró que la generación útil se obtiene a partir de los 4 m/s, aunque el generador arranca con velocidades menores. El tipo de turbina eólica, geometría del generador que en este caso fue un generador monofásico, ya que entrega un mayor nivel de tensión al emplear elevado número de bobinas y finalmente, el tipo de imanes permanentes encargados de proveer el campo magnético capaz de producir energía eléctrica en los terminales del generador.
- ❖ Las pruebas realizadas al prototipo a distintos niveles de carga, muestran que el generador es capaz de operar con el recurso eólico disponible, el cual está relacionado con la velocidad angular, entregando voltajes que llegan hasta los 25 V y con corrientes que alcanzan los 7 A, cualidades que hacen al generador apto para aplicaciones de energía eólica. Además, la eficiencia alcanza valores por encima del 59 %, superando las pérdidas propias de la máquina y de elementos adicionales para el almacenamiento.
- ❖ En cuanto a la calidad de energía, a pesar de tener la presencia del tercer armónico en la señal, no presenta inconvenientes, ya que, al pasar por una etapa de rectificación con ayuda del regulador de carga eólico, este problema queda minimizado.

RECOMENDACIONES

- ❖ Continuar con el estudio de las diferentes tecnologías empleadas para la generación eólica a baja potencia con sistemas aislados de la red, con la finalidad de conocer los limitantes que presentan para su funcionamiento en diferentes condiciones ambientales, al igual que el generador eléctrico que emplean, que en su mayoría es de flujo axial, pero con topologías diferentes, que sean más eficientes y puedan empezar a generar a menores velocidades de viento.
- ❖ Optar por diseñar un generador de flujo axial con características eléctricas diferentes, es decir un generador con un mayor número de fases y un rotor que emplee una mayor cantidad de polos, con imanes permanentes de geometría diferente y de mayor grado de magnetización. Además, que pueda generar mayor voltaje y corriente empleando el mismo tipo de turbina eólica.
- ❖ Realizar mejoras en las cualidades del generador a fin de elevar la eficiencia y reducir las pérdidas que se presentan durante la generación, especialmente en el bobinado, lugar donde existe mayor cantidad de potencia perdida, debido a su elevada resistencia. De igual forma, al mejorar las cualidades constructivas, la calidad de energía mejoraría significativamente, reduciéndose la presencia de armónicos causantes de vibraciones y problemas de arranque.

REFERENCIAS

- Agallardo, C., Cardoso, D., Caiza, L., & Otero, S. (2019). Implementación de un generador eólico de eje vertical Savónico para la generación de energía Eléctrica de 120V. *Universidad, Ciencia y Tecnología*, 23, 55–64.
- Antezana, J. (2014). *Diseño y Construcción de un Prototipo de Generador Eólico de Eje Vertical*. Univesidad de Chile.
- Apata, O., & Oyedokun, D. T. O. (2017). Wind turbine generators: Conventional and emerging technologies. *Proceedings - 2017 IEEE PES-IAS PowerAfrica Conference: Harnessing Energy, Information and Communications Technology (ICT) for Affordable Electrification of Africa, PowerAfrica 2017*, 606–611. <https://doi.org/10.1109/PowerAfrica.2017.7991295>
- Azevedo, J. P. M. de, Nascimento, R. S. do, & Schram, I. B. (2017). Wind Energy and Environmental Impacts : a Review of Study. *Uningá*, 51(1), 101–106.
- Candia, R. (2012). *Metodología para cálculo de curva de potencia de turbina eólica de eje vertical (Tesis de maestría)* [Pontificia Universidad Católica de Chile]. <https://repositorio.uc.cl/bitstream/handle/11534/2863/579668.pdf?sequence=1>
- Cárdenas, M. (2019). *Estudio técnico económico de la energía solar fotovoltaica y mini eólica a pequeña escala (Trabajo de grado)*. Universidad de Cuenca.
- Carrillo, M., Claudio, C., & Mayorga, A. (2018). Caracterización de un generador de flujo axial para aplicaciones en energía eólica. *Ingenius*, 19, 19–28. <https://doi.org/10.17163/ings.n19.2018.02>
- Cazes, R. (2017). *Implementación de modelado matemático y simulación de un controlador para un sistema de generación eólica de velocidad variable con un generador síncrono de imanes permanentes (Tesis de maestría)*. Universidad de Pamplona.
- CELEC EP. (2019). *¿Qué es la Energía Eólica?* Corporación Eléctrica Ecuatoriana. <https://www.celec.gob.ec/gensur/index.php/contacto/direccion/2-uncategorised/47-que-es-laenergia-eolica>
- CENTELSA. (2007). *Catálogo de productos- Cables de Energía y Telecomunicaciones S.A.*
- Centro Magnético. (2016). *Centro Magnético | Imán e imanes magnéticos en Centro Magnético.*

Gran variedad y modelos. <https://centromagnetico.com/iman-es-iman-iman-es-magneticos-iman-es-de-neodimio-iman-es-de-ferrita/>

- Chapman, S. J. (2012). *Máquinas Eléctricas* (P. E. Roig Vázquez (ed.); 5a ed). McGraw-Hill.
- Comercialmendez. (2020). *Las diferencias entre generadores asíncronos y generadores síncronos*. <https://www.comercialmendez.es/las-diferencias-entre-generadores-asincronos-y-generadores-sincronos/>
- Cueva, L. (2015). *Diseño Y Construcción De Un Generador Eólico De Eje Vertical Tipo Savonius Para Producir 20 Watts (Trabajo de grado)*. Escuela Politécnica Nacional.
- Diago Vidal, C. (2019). *Diseño de un aerogenerador Savonius para uso doméstico (Trabajo de grado)*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Díaz, S. (2018). *Análisis de la influencia de parámetros meteorológicos y funcionales en la estimación de la potencia eólica mediante el empleo de técnicas de Machine Learning (Tesis doctoral)*. Universidad de las Palmas de Gran Canaria.
- EOLICCAT. (2020). *Energía eólica y economía circular: el reto del reciclaje - EOLICCAT*. <http://eoliccat.net/energia-eolica-y-economia-circular-el-reto-del-reciclaje/?lang=es>
- Funes, S. (2020). *Caracterización De Una Turbina Mareométrica De Eje Vertical (Tesis de maestría)* [Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos y de Ingeniería de Minas]. <https://repositorio.upct.es/handle/10317/8437>
- García, D. (2020). *Estudio de Técnicas de Control Grid-Forming para Aerogeneradores Marinos (Tesis de maestría)*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Granados, L., & Gonzáles, A. (2015). Desarrollo de un aerogenerador superconductor para bajas velocidades. *Jóvenes de La Ciencia*, 1(1), 277–282. [file:///C:/Users/Dell/Documents/NOVENO semestre/ing ambiental/637-2004-3-PB.pdf](file:///C:/Users/Dell/Documents/NOVENO%20semestre/ing%20ambiental/637-2004-3-PB.pdf)
- Guillot, J., & Vilorio, A. (2015). Estudio Sobre El Abastecimiento Constante De Energía Eólica. *Investigación e Innovación En Ingenierías*, 2(3), 32–37. <https://doi.org/10.17081/invinno>
- GWEC. (2019). *Global Wind Report 2019 | Consejo Global de Energía Eólica*. GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. <https://gwec.net/global-wind-report-2019/>
- Hernández, J. (2016). Mejoras En Las Prestaciones De Aerogeneradores Síncronos De Velocidad Variable Frente a Los Huecos De Tensión. *RIEMAT*, 1(1), 44–48.

<https://doi.org/10.33936/riemat.v1i1.208>

Herrera, L., Alarcón, J., & Rivas, E. (2013). Axial Flux Generator Design By Using the Finite Elements Method. *Redes de Ingeniería*, 4(2), 6–15. <https://doi.org/https://doi.org/10.14483/2248762X.5920>

Hurtado, R. (2018). *Metodología de selección de materiales para los álabes de un aerogenerador de eje horizontal (Trabajo de grado)*. Universidad Central “ Marta Abreu” de las Villas.

Icaza, D., Pulla, S., & Icaza, F. (2018). Modeling, Simulation and Construction of a Wind Turbine with Chain Multiplication System, Destined to Rural Areas of the Canton Cuenca -Ecuador. *2018 7th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, 1240–1246. <https://doi.org/10.1109/ICRERA.2018.8566739>

Imamagnets. (2018). *Imanes de Neodimio - Imanes Permanentes - IMA*. <https://www.imamagnets.com/iman-es-de-neodimio/>

Jaramillo, R., Reta, M., & De la torre, J. (2018). Estudio estadístico del potencial eólico del Cerro de la Virgen en Zacatecas, México. *Pistas Educativas*, No. 108, 35(108), 527–542.

Jijón, D., Constante, J., Villacreses, G., & Guerrero, T. (2018). Estimación del rendimiento de aerogeneradores de 2 MW en el Ecuador: Potencial Eolo-Eléctrico. *Revista Técnica “Energía,”* 15(1), 62–69. <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v15.n1.2018.324>

Kliux Energies. (2013). *Sistema Híbrido Eólico - Solar Fotovoltaico Ficha de especificaciones de producto*. www.kliux.com www.facebook.com/KliuxEnergies

Kumar, R., Raahemifar, K., & Fung, A. S. (2018). A critical review of vertical axis wind turbines for urban applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 89(February), 281–291. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.033>

Lastra, N., Catuogno, G., & Tapida, J. (2019). Diseño Y Construcción de un Generador de Flujo Axial con Imanes Permanentes para Aplicaciones Eólicas. *Revista Facultad de Ingeniería*, 7, 2–7.

Luque, M. (2017). *Diseño, construcción y control de un aerogenerador de equipo de prácticas de bajo coste (Trabajo de grado)*. Universidad de Sevilla.

MAKEMU. (2014). *Generador eólico EOLO 1KW / 2KW / 3KW - Makemu*. <https://www.makemu.it/prodotto/wind-generator-eolo/?lang=en>

- Martín, C. (2015). *Análisis de la fiabilidad y disponibilidad de los aerogeneradores (Trabajo de grado)*. Universidad de Valladolid.
- Medina, C. (2016). *Carcaterización de un generador de flujo axial para aplicaciones en energía eólica (Trabajo de grado)* [Universidad Técnica de Ambato]. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jplph.2009.07.006><http://dx.doi.org/10.1016/j.neps.2015.06.001><https://www.abebooks.com/Trease-Evans-Pharmacognosy-13th-Edition-William/14174467122/bd>
- Melo Paillacho, C. A. (2019). *Implementación de un sistema de microgeneracion eólica con integracion a la red eléctrica en el edificio de la Carrea e Electricidad en la Universidad Técnica del Norte (Trabajo de grado)*. Universidad Técnica del Norte.
- Mendoza, N. (2017). *Diseño De Un Generador Éolico De Eje Vertical Tipo Darrieus Helicoidal De 3 Kw (Tesis de maestría)*. Instituto Tecnológico de Pachuca.
- Murillo, J. (2012). *Diseño de un alternador de flujo axial con imanes permanentes (Trabajo de grado)*. Escuela Universitaria De Ingeniería Técnica Industrial.
- Navasquillo, J. (2015). *Fuerza electromotriz inducida en una bobina de un generador de flujo axial*. Universidad de Valencia.
- Palacio, C. (2017). *Modelo de integración de la Gestión de Procesos de Negocio (BPM) y la Gestión del Ciclo de vida del Producto (PLM) en el diseño de pequeños aerogeneradores (SWT)*. Universidad EAFIT.
- Pérez, P. (2017). *Estudio causal de rotura de un cable de retención de puntas de palas de los aerogeneradores Modelo S50-750 del parque eólico Gibara 2 (Trabajo de grado)*. Universidad de Holguín.
- Pico, G., Pico, R., & Mendoza, D. (2018). Turbinas Hidrocinéticas De Eje Vertical Helicoidal. *Revista Científico*, 14(1), 1–13.
- Piggott, H. (2014). *A Wind Turbine Recipe Book: The Axial Flux Windmill Plans* (Scoraig Wind Electric (ed.)).
- Riverón, R. (2017). *Evaluación numérica transitoria del efecto del viento sobre el rotor de un aerogenerador horizontal (Trabajo de grado)*. Universidad de Holguín.
- Rodríguez, M., & León, M. (2016). *Análisis y aplicación de un generador de imanes permanentes*

- para un sistema de energía eólica (Trabajo de grado)*. Universidad Politécnica Salesiana.
- Saavedra, A. (2019). *Optimización de la geometría de un aerogenerador de eje vertical tipo Savonius (Trabajo de grado)*. Universidad de las Américas Puebla.
- Saavedra, A., & Alejos, R. (2019). Diseño de la geometría de un aerogenerador de eje vertical tipo Savonius. *Memorias Del Xxv Congreso Internacional Anual De La Somim*, 1–11. http://somim.org.mx/memorias/memorias2019/articulos/A1_101.pdf
- San Román, Á. L. (2013). *Diseño de un aerogenerador para uso particular (Trabajo de grado)*. Universidad Carlos III de Madrid.
- Song, D., Fan, X., Yang, J., Liu, A., Chen, S., & Joo, Y. H. (2018). Power extraction efficiency optimization of horizontal-axis wind turbines through optimizing control parameters of yaw control systems using an intelligent method. *Applied Energy*, 224(January), 267–279. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.114>
- Structuralia. (2018). *Aerogeneradores de eje vertical y horizontal: tipos, ventajas e inconvenientes*. <https://blog.structuralia.com/aerogeneradores-de-eje-vertical-y-horizontal-tipos-ventajas-e-inconvenientes>
- TESUP. (2021). *WIND POWER NOW AT YOUR DOORSTEP (Index 04 (ed.))*. Atlas 2.0.
- Tobías, A., & Rubio, C. (2017). Estado Del Arte De Aerogeneradores De Eje Horizontal Y Vertical. *Jóvenes En La Ciencia*, 3(2), 1996–1970.
- Tummala, A., Velamati, R. K., Sinha, D. K., Indrajaya, V., & Krishna, V. H. (2016). A review on small scale wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 1351–1371. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.027>
- Urcelay, M. (2019). *Diseño de un aerogenerador domestico (Trabajo de grado)*. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Vargas, L., Romo, J., & Del Valle, Y. (2007). *Apuntes ELC42, Conversión electromecánica de la energía (2° ed)*. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Chile.
- Vesperinas, V. (2020). *Modelización y Control de un Aerogenerador de Velocidad Variable (Trabajo de grado)*. Universidad Plitécnica de Cataluña.
- Wannakarn, P., Tanmaneeprasert, T., Rugthaicharoencheep, N., & Nedphograw, S. (2011). Design and construction of axial flux permanent magnet generator for wind turbine generated

DC voltage at rated power 1500 W. *DRPT 2011 - 2011 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*, 2, 763–766. <https://doi.org/10.1109/DRPT.2011.5993994>

Yancha, M. (2019). *Diseño y Construcción de un Generador de Flujo radial de Imanes Permanentes de Neodimio con Polos Salientes en el Rotor (Trabajo de grado)*. Universidad Técnica de Ambato.

Yero, D. (2016). *Simulación de un generador eólico asincrónico (Trabajo de grado)* [Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas]. <http://dspace.uclv.edu.cu/handle/123456789/6441>

Zhou, D., Blaabjerg, F., Franke, T., Tonnes, M., & Lau, M. (2015). Comparison of Wind Power Converter Reliability with Low-Speed and Medium-Speed Permanent-Magnet Synchronous Generators. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(10), 6575–6584. <https://doi.org/10.1109/TIE.2015.2447502>

ANEXOS

ANEXO A: Características del aerogenerador existente

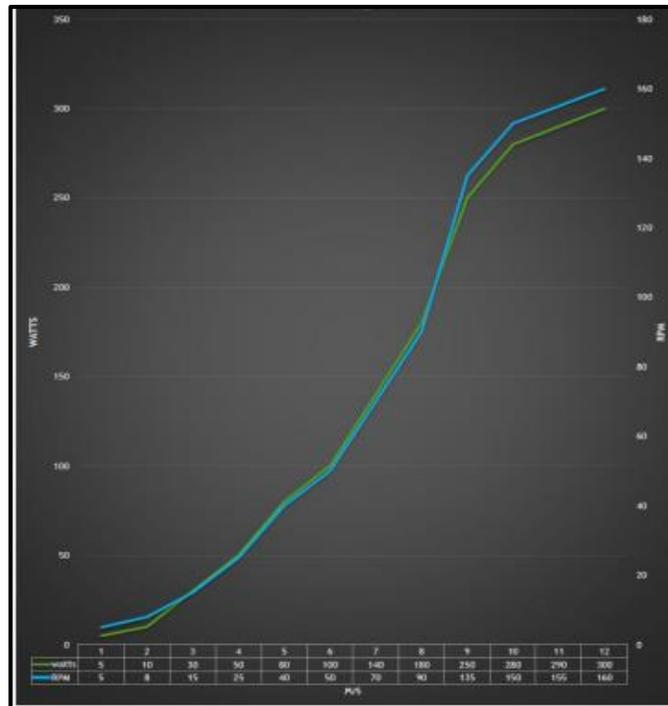
A. Datos de Aerogenerador

CARACTERÍSTICAS DEL AEROGENERADOR EXISTENTE	
Generador	Imanes permanentes tensión 24 V
Potencia	240 W
Radio de álabes	0,5 m
Dimensiones de la Turbina	1 x 1 m
Rpm Nominal	180
Tipo de turbina	Thorus-Savonius (arrastre)
Dirección de giro respecto al viento	Omnidireccional
Velocidad de operación	2 m/s – 9 m/s

Fuente:(Melo Paillacho, 2019)

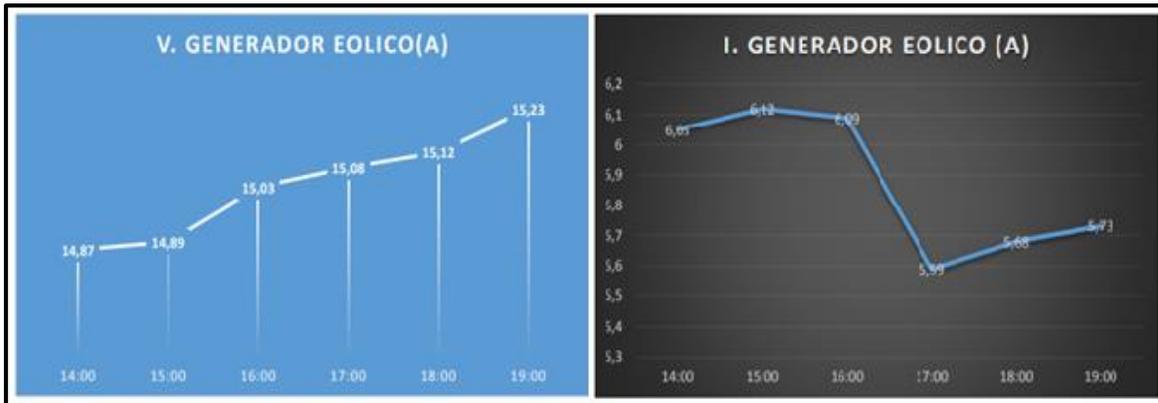
Elaborado: Autor

B. Curva de potencia del aerogenerador



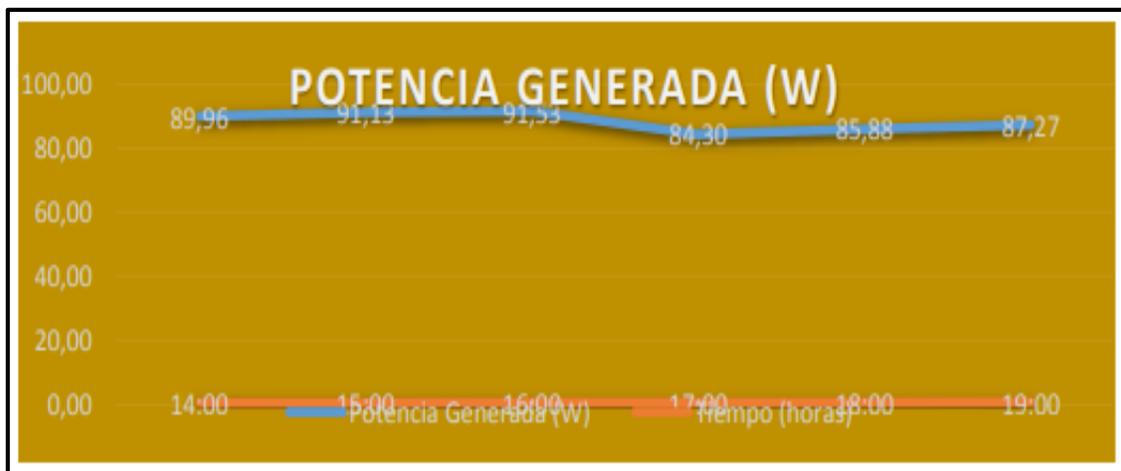
Fuente:(Melo Paillacho, 2019)

C. Voltaje y corriente del generador



Fuente:(Melo Paillacho, 2019)

D. Potencia del generador



Fuente:(Melo Paillacho, 2019)

ANEXO B: Tabla de conductores de cobre desnudo

CALIBRE AWG	ALAMBRE DESNUDO		CAPA DOBLE		PESO TOTAL APROX (kg/km)	MÁXIMA TENSIÓN DE EMBOBINADO ¹ (kg)	RESISTENCIA ELÉCTRICA DC a 20°C ² (ohm/km)	DENSIDAD DE CORRIENTE ³ (A)
	DIÁMETRO NOMINAL (mm)	ÁREA (mm ²)	MÍNIMO INCREMENTO (mm)	MÁXIMO DIÁMETRO (mm)				
8	3,26	8,37	0,084	3,383	75,1	50,0	2,06	83
9	2,91	6,63	0,081	3,020	59,6	39,7	2,60	65
10	2,59	5,26	0,079	2,695	47,3	31,5	3,28	52
11	2,30	4,17	0,076	2,408	37,5	24,9	4,14	41
12	2,05	3,31	0,074	2,151	29,8	19,8	5,21	33
13	1,83	2,63	0,071	1,923	23,7	15,7	6,56	26
14	1,63	2,08	0,069	1,732	18,8	12,4	8,28	21
15	1,45	1,65	0,076	1,547	15,0	9,87	10,4	16
16	1,29	1,31	0,074	1,384	11,9	7,82	13,2	13
17	1,15	1,04	0,071	1,240	9,44	6,22	16,6	10
18	1,02	0,824	0,066	1,110	7,48	4,92	20,9	8,1
19	0,912	0,653	0,064	0,993	5,95	3,91	26,4	6,4
20	0,813	0,519	0,058	0,892	4,73	3,10	33,2	5,1
21	0,724	0,412	0,056	0,798	3,76	2,46	41,9	4,1
22	0,643	0,325	0,053	0,714	2,97	1,94	53,1	3,2
23	0,574	0,259	0,051	0,643	2,38	1,55	66,6	2,6
24	0,511	0,205	0,048	0,577	1,88	1,23	84,1	2,0
25	0,455	0,163	0,046	0,516	1,50	0,972	106	1,6
26	0,404	0,128	0,043	0,462	1,18	0,767	134	1,3
27	0,361	0,102	0,041	0,417	0,946	0,612	168	1,0
28	0,320	0,0804	0,041	0,373	0,748	0,481	214	0,79
29	0,287	0,0647	0,038	0,338	0,603	0,387	267	0,64
30	0,254	0,0507	0,036	0,302	0,474	0,303	340	0,50
31	0,226	0,0401	0,033	0,274	0,377	0,240	430	0,40
32	0,203	0,0324	0,030	0,249	0,305	0,194	533	0,32
33	0,180	0,0254	0,028	0,224	0,241	0,152	678	0,25
34	0,160	0,0201	0,025	0,198	0,190	0,120	857	0,20
35	0,142	0,0158	0,023	0,178	0,150	0,0947	1089	0,16
36	0,127	0,0127	0,020	0,160	0,120	0,0758	1361	0,13
37	0,114	0,0102	0,020	0,145	0,0970	0,0610	1689	0,10
38	0,102	0,00817	0,018	0,130	0,0770	0,0489	2110	0,080
39	0,0890	0,00622	0,015	0,114	0,0590	0,0372	2771	0,061
40	0,0790	0,00490	0,015	0,102	0,0460	0,0293	3517	0,048

Fuente: (CENTELSA, 2007)

ANEXO C: Pruebas de generación

A. Voltaje generado en vacío

GENERACION DE VOLTAJE EN VACÍO					
Velocidad del viento [m/s]	Velocidad angular [rpm]	Frecuencia [Hz]	VOLTAJE [DC]		VOLTAJE [AC]
			Puente rectificador	Rectificador-condensador	Voltaje
2	29	3,81	3,70	5,37	5,00
3	43	5,72	7,70	11,17	9,00
4	58	7,63	9,80	14,21	11,10
5	72	9,54	12,00	17,40	13,30
6	86	11,45	14,10	20,45	15,40
7	100	13,36	16,20	23,49	17,50
8	115	15,27	18,30	26,54	19,60
9	129	17,18	20,40	29,58	21,70
10	143	19,09	22,40	32,48	23,70
11	158	21,00	24,50	35,53	25,80
12	172	22,91	26,70	38,72	28,00
13	186	24,82	28,90	41,91	30,20
14	200	26,73	31,10	45,10	32,40

Fuente: Autor

B. Voltaje generado con carga

GENERACIÓN DE VOLTAJE CON CARGA (V)						
Velocidad del viento [m/s]	Velocidad angular [rpm]	Frecuencia [HZ]	VOLTAJE (AC)			
			R= 12,4 ohm	R= 6,2 ohm	R= 4,2 ohm	R= 3,1 ohm
2	29	3,81	5,8	4,2	2,9	1,5
3	43	5,72	7,7	6	4,4	2,9
4	58	7,63	9,4	7,7	6,1	4,5
5	72	9,54	11,2	9,4	7,8	6
6	86	11,45	13	11,1	9,5	7,6
7	101	13,36	14,7	12,9	11,1	9,2
8	115	15,27	16,4	14,6	12,8	10,9
9	129	17,18	18,2	16,2	14,4	12,4
10	143	19,09	19,9	18	16	14
11	158	21,00	21,7	19,7	17,8	15,6
12	172	22,91	23,4	21,4	19,5	17,2
13	186	24,82	25,2	23,1	21,1	18,8
14	200	26,73	27	25	22,9	20,4

Fuente: Autor

C. Corriente generada con carga

GENERACIÓN DE CORRIENTE CON CARGA (A)						
Velocidad del viento [m/s]	Velocidad angular [rpm]	Frecuencia [HZ]	CORRIENTE (AC)			
			R= 12,4 ohm	R= 6,2 ohm	R= 4,2 ohm	R= 3,1 ohm
2	29	3,81	0,47	0,69	0,69	0,54
3	43	5,72	0,62	0,98	1,05	1,04
4	58	7,63	0,76	1,26	1,45	1,61
5	72	9,54	0,90	1,54	1,86	2,14
6	86	11,45	1,05	1,82	2,26	2,71
7	101	13,36	1,19	2,11	2,64	3,29
8	115	15,27	1,32	2,39	3,05	3,89
9	129	17,18	1,47	2,66	3,43	4,43
10	143	19,09	1,60	2,95	3,81	5,00
11	158	21,00	1,75	3,23	4,24	5,57
12	172	22,91	1,89	3,51	4,64	6,14
13	186	24,82	2,03	3,79	5,02	6,71
14	200	26,73	2,18	4,10	5,45	7,29

Fuente: Autor

D. Potencia generada con carga

POTENCIA GENERADA CON CARGA (W)						
Velocidad del viento [m/s]	Velocidad angular [rpm]	Frecuencia [HZ]	POTENCIA (AC)			
			R= 12,4 ohm	R= 6,2 ohm	R= 4,2 ohm	R= 3,1 ohm
2	29	3,81	2,71	2,89	2,00	0,80
3	43	5,72	4,78	5,90	4,61	3,00
4	58	7,63	7,13	9,72	8,86	7,23
5	72	9,54	10,12	14,49	14,49	12,86
6	86	11,45	13,63	20,20	21,49	20,63
7	101	13,36	17,43	27,28	29,34	30,23
8	115	15,27	21,69	34,94	39,01	42,43
9	129	17,18	26,71	43,02	49,37	54,91
10	143	19,09	31,94	53,11	60,95	70,00
11	158	21,00	37,98	63,62	75,44	86,91
12	172	22,91	44,16	75,08	90,54	105,66
13	186	24,82	51,21	87,48	106,00	126,23
14	200	26,73	58,79	102,46	124,86	148,63

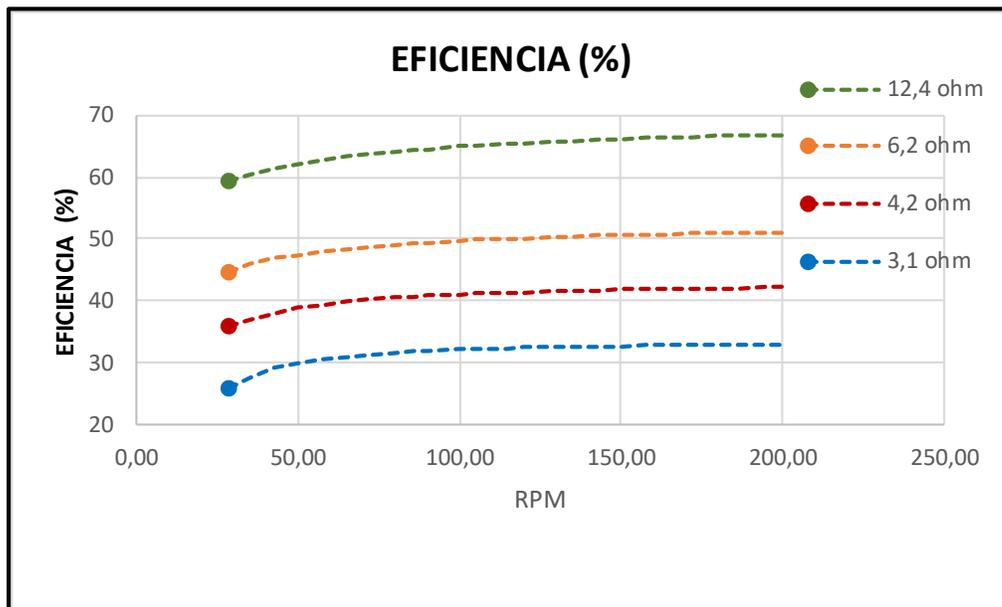
Fuente: Autor

E. Eficiencia del generador

EFICIENCIA DEL GENERADOR (%)						
Velocidad del viento [m/s]	Velocidad angular [rpm]	Frecuencia [HZ]	POTENCIA (AC)			
			R= 12,4 ohm	R= 6,2 ohm	R= 4,2 ohm	R= 3,1 ohm
2	29	3,81	59,35	44,74	35,81	25,66
3	43	5,72	61,52	46,84	38,06	29,01
4	58	7,63	62,79	48,00	39,39	30,53
5	72	9,54	63,75	48,77	40,18	31,27
6	86	11,45	64,46	49,32	40,70	31,76
7	101	13,36	64,99	49,75	41,06	32,09
8	115	15,27	65,41	50,06	41,34	32,33
9	129	17,18	65,77	50,30	41,55	32,50
10	143	19,09	66,05	50,52	41,72	32,63
11	158	21,00	66,31	50,69	41,87	32,74
12	172	22,91	66,52	50,84	41,99	32,83
13	186	24,82	66,71	50,96	42,09	32,91
14	200	26,73	66,87	51,08	42,18	32,97

Fuente: Autor

F. Curvas de eficiencia



Fuente: Autor

ANEXO D: Programa de mantenimiento del generador

Se deben desarrollar actividades periódicas para el mantenimiento preventivo del prototipo, a fin de evitar paradas innecesarias. El programa de mantenimiento se muestra a continuación:

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE 			
GUÍA DE MANTENIMIENTO			
FRECUENCIA DE MANTENIMIENTO DEL PROTOTIPO DE GENERADOR EÓLICO			
EQUIPO	ACTIVIDAD	FRECUECIA	FECHA DE EJECUCIÓN
Regulador eólico MPPT 30 A.	Verificar que este encendida la luz verde (indicativo que la batería se está cargando).	Diario	Al inicio de las jornadas académicas
Estator	Verificar que no exista corrosión en los terminales del estator.	Mensual	Ultimo día de cada mes
Rotor	Revisión del estado de pintura y cubierta de los imanes.	Mensual	Ultimo día de cada mes
Rodamiento	Escuchar ruidos y vibraciones.	Diario	Al inicio de las jornadas académicas
Rodamiento	Lubricación de sus partes.	Semestral	Al inicio de cada periódico académico

Turbina eólica	<p>Revisar que la parte fija todos los componentes se encuentren ajustados.</p> <p>Los álabes deben estar libres de suciedad en sus interiores.</p>	Semestral	Al inicio de cada periódico académico
Tapas protectoras	<p>Al ser las encargadas de cubrir la entrada de agua polvo.</p> <p>Revisar que se encuentren bien colocadas y ajustadas con el generador.</p>	Semestral	Al inicio de cada periódico académico

Fuente: Autor

Elaborado: Autor

Las actividades antes mencionadas tienen como finalidad garantizar la vida útil del prototipo una vez que entre en operación. Además, tomar medidas correctivas frente a daños propios y ajenos a la máquina, evita la parada innecesaria y gastos en su reparación.