



**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA, INDUSTRIA Y**

**ARQUITECTURA**

**CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, MODALIDAD PROYECTO TÉCNICO**

**TÍTULO:**

“SIMULACIÓN DE AEROGENERADOR MEDIANTE LA  
IMPLEMENTACIÓN DE DINAMÓMETRO DE CUATRO CUADRANTES  
EN LABORATORIO DE ELECTRICIDAD”.

**AUTORES:**

PALMA RODRÍGUEZ LEONARDO DAVID

VERA PARRALES RICHARD ANDRÉS

**ASESOR ACADÉMICO:**

Dr. FERNANDO VLADIMIR JARAMILLO GARCÍA

MANTA -MANABÍ- ECUADOR

2024

### **Certificación del tutor**

En calidad de docente tutor de la Facultad de Ingeniería, Industria y Arquitectura de la Universidad Laica "Eloy Alfaro" de Manabí, certifico:

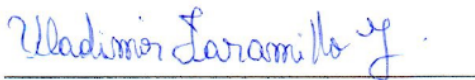
Haber dirigido y revisado el trabajo de titulación bajo la modalidad de proyecto técnico, bajo la autoría de los estudiantes Palma Rodríguez Leonardo David y Vera PARRALES Richard Andrés legalmente matriculados en la carrera de Ingeniería Eléctrica, cuyo tema de proyecto es "Simulación de aerogenerador mediante la implementación de dinamómetro de cuatro cuadrantes en laboratorio de electricidad".

El presente proyecto ha sido desarrollado de acuerdo con los lineamientos internos de la modalidad en mención y en apego al cumplimiento de los requisitos exigidos por el Reglamento de Régimen Académico, por tal motivo CERTIFICO, que el mencionado proyecto reúne los méritos académicos, científicos y formales, suficientes para ser sometido a la evaluación del tribunal de titulación que designe la autoridad competente.

Particular que certifico para los fines consiguientes, salvo disposición de Ley en contrario.

Manta, 21 de Agosto de 2024.

Lo certifico,



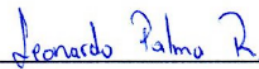
Ing. Vladimir Jaramillo García, PhD.

**Docente Tutor**


## AUTORÍA DEL PROYECTO TÉCNICO

Quienes suscribimos, Palma Rodríguez Leonardo David, con cedula de identidad N° 1316287034 y Vera PARRALES Richard Andrés, con cedula de identidad N° 1316361136, egresados de la Carrera de Ingeniería Eléctrica de la “Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí”, declaramos que el presente proyecto de titulación es de autoría nuestra, el contenido, resultados y conclusiones obtenidos son de estricta responsabilidad de los autores, teniendo como respaldo citas bibliográficas necesarias para el desarrollo del proyecto, respetando el derecho intelectual de cada autor citado. El patrimonio intelectual de este proyecto de titulación corresponderá a la Universidad Laica “Eloy Alfaro” de Manabí.

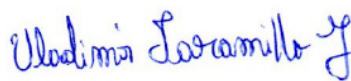
Manta, 21 de Agosto de 2024

  
\_\_\_\_\_  
Palma Rodríguez Leonardo David

**Autor**

  
\_\_\_\_\_  
Vera PARRALES Richard Andrés

**Autor**

  
\_\_\_\_\_

Ing. Vladimir Jaramillo García, PhD.

**Docente Tutor**

## **Dedicatoria**

En primer lugar, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a Dios, cuya guía y fortaleza me han acompañado a lo largo de este arduo camino. Sin Su infinita misericordia y bendiciones, este logro no habría sido posible.

A mi familia, les dedico este trabajo con todo mi amor y gratitud. A mis padres, que, con su amor incondicional, esfuerzo y sacrificio, me han brindado el apoyo necesario para alcanzar mis metas. Gracias por ser mi fuente constante de inspiración y por enseñarme el valor del esfuerzo y la perseverancia. A mis hermanos, por su compañía y aliento en los momentos de dificultad. Su apoyo ha sido fundamental para seguir adelante.

A mis abuelos, cuya sabiduría y ejemplo de vida me han guiado desde siempre. Sus palabras de aliento y oraciones han sido un pilar en este viaje.

A todos mis amigos y colegas, gracias por estar a mi lado y por compartir esta aventura académica. Su amistad y colaboración han sido invaluable.

Finalmente, agradezco a todos los profesores y mentores que, con su paciencia y conocimientos, me han guiado en mi formación académica y profesional. Su dedicación ha sido esencial para el desarrollo de este trabajo.

A todos ustedes, gracias de corazón.

Palma Rodriguez Leonardo David

## **Dedicatoria**

Deseo dedicar este proyecto de titulación a mis padres, Richard Vera y Karina Parrales que me han apoyado en todo momento sin importar lo difícil que una situación pareciera y por haberme enseñado desde casa los valores de la gratitud, perseverancia y responsabilidad, ya que estos me han permitido llegar a este punto tan importante en mi formación profesional, a mis hermanos Andrea, Marcos y Justin, porque a pesar de haber sido un camino largo y difícil, han estado conmigo a mi lado incondicionalmente, a mi abuela Mariana Pachay y a mi tía Vanesa Parrales que han estado presentes en cada paso que avanzo en la vida, a todos mis familiares y amigos que creyeron en mi capacidad de terminar la formación profesional de una carrera tan interesante pero a la vez retadora.

Por último agradezco a mis colegas de clase, esos amigos de aula que sin importar lo difícil que cada semestre fuera, siempre estaban dispuestos a ayudar y brindar perspectivas distintas para resolver los diversos retos presentados a lo largo de la carrera.

Vera Parrales Richard Andrés

## **Agradecimiento**

Presentamos nuestro mayor agradecimiento hacia nuestro tutor de tesis, el Dr. Fernando Vladimir Jaramillo García, el cual nos brindó su guía para el desarrollo de este proyecto, siendo sus pautas aquellas que permitieron el alcance de nuestros objetivos propuestos. A lo largo de este proceso de titulación siempre estuvo dispuesto a resolver dudas que se presentaron, así como proporcionar nuevas formas de mejorar aquello que se planteó en un inicio. Expresamos nuestra gratitud por aquellos valiosos conocimientos adquiridos en la elaboración de este proyecto bajo su tutela que nos permitieron tener una perspectiva más amplia de la carrera.

Adicionalmente, queremos agradecer a nuestras familias y demás seres queridos por ser un pilar a lo largo de nuestras vidas y la razón que nos impulsó a formarnos académicamente; los consejos, experiencias y apoyo incondicional recibidos son sin lugar a duda el motor de nuestra dedicación y el impulso necesario para llegar cada vez más lejos.

Palma Rodríguez Leonardo David y Vera Parrales Richard Andrés

## **Resumen**

A lo largo de la historia, la generación de energía eléctrica ha sido crucial para el avance de la sociedad. Actualmente existe un creciente interés por fuentes de energía más limpias y sostenibles debido a preocupaciones ambientales y la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, dentro de esta categoría se encuentra la energía eólica como fuente de energía renovable que aprovecha el viento para la generación de electricidad a través de turbinas eólicas. La simulación de aerogeneradores en laboratorios de electricidad se proyecta como una herramienta didáctica que permite la investigación del aprovechamiento de la energía eólica con fines de generación eléctrica. El objetivo principal de este estudio es desarrollar una simulación de un aerogenerador en el laboratorio de electricidad mediante la implementación de un dinamómetro de cuatro cuadrantes, utilizando una metodología de investigación cuantitativa que permita caracterizar su comportamiento. Para realizar mediciones y analizar su comportamiento se utilizó la función de emulador de aerogenerador del dinamómetro de cuatro cuadrantes en conjunto con otros módulos. Los resultados de esta implementación indican que la simulación de aerogeneradores en laboratorios de electricidad replica el comportamiento de aerogeneradores reales bajo diversas condiciones meteorológicas. Se establecieron relaciones cuantitativas entre la velocidad y densidad del viento con la potencia generada, proporcionando datos claves para el entendimiento y funcionamiento de estos sistemas. Al proporcionar conocimientos prácticos, este estudio permite formar profesionales en el uso del viento para la generación de electricidad.

### **Palabras clave**

dinamómetro, energía, simulación, viento

## **Abstract**

Throughout history, the generation of electrical energy has been crucial for the advancement of society. Currently there is a growing interest in cleaner and more sustainable energy sources due to environmental concerns and the need to reduce greenhouse gas emissions. Within this category is wind energy as a renewable energy source that uses the wind for electricity generation. generation of electricity through wind turbines. The simulation of wind turbines in electricity laboratories is projected as a teaching tool that allows research into the use of wind energy for electrical generation purposes. The main objective of this study is to develop a simulation of a wind turbine in the electricity laboratory by implementing a four-quadrant dynamometer, using a quantitative research methodology that would allow its behavior to be characterized. To make measurements and analyze its behavior, the wind turbine emulator function of the four-quadrant dynamometer was used in conjunction with other modules. The results of this implementation indicate that the simulation of wind turbines in electricity laboratories replicates the behavior of real wind turbines under various meteorological conditions. Quantitative relationships were established between the speed and density of the wind with the power generated, providing key data for the understanding and operation of these systems. By providing practical knowledge, this study allows training professionals in the use of wind for the generation of electricity.

### **Keyword**

dynamometer, energy, simulation, wind

# Índice

Resumen.....	VII
Abstract .....	VIII
Introducción .....	1
Capítulo I: El Problema .....	8
1.1. Antecedentes .....	8
1.2. Problemática.....	9
1.3. Justificación.....	9
1.4. Propuesta .....	10
1.5. Árbol de Problemas .....	11
1.6. Árbol de Objetivos .....	12
1.7. Objeto del proyecto .....	13
1.8. Campo de Acción .....	13
1.9. Hipótesis.....	13
1.10. Objetivos .....	13
1.11. Objetivo General .....	13
1.12. Objetivos Específicos.....	13
1.13. Variables.....	14
1.14. Tareas del proyecto .....	14
Capítulo II: Marco Teórico .....	16
2.    Energía eólica.....	16
2.1. Aerogeneradores.....	16

2.1.1.	Principio de funcionamiento .....	17
2.2.	Tipos de aerogeneradores.....	18
2.2.1.	Aerogenerador de eje horizontal.....	20
2.2.2.	Aerogeneradores con Rotor a Barlovento.....	22
2.2.3.	Aerogeneradores con Rotor a Sotavento.....	22
2.2.4.	Comparación entre los aerogeneradores de dos aspas y de tres aspas....	23
2.2.5.	Aerogeneradores de Dos Aspas: .....	23
2.2.6.	Aerogeneradores de Tres Aspas: .....	24
2.3.	Modelos Genéricos para Aerogeneradores .....	25
2.4.	Parámetros principales de un aerogenerador.....	28
2.4.1.	Componentes de un aerogenerador (Sistema).....	29
2.4.2.	Relaciones De Velocidad Y Potencia .....	32
2.4.3.	Límite de Betz.....	34
2.4.4.	Ecuación de continuidad – Limite de Betz .....	35
2.4.5.	Distribución de Weibull.....	36
2.4.6.	Rosa de los vientos.....	38
2.5.	Dinamómetro/fuente de alimentación de cuatro cuadrantes .....	40
2.5.1.	Emulador de aerogenerador .....	41
2.5.2.	LVSIM-EMS-SORTWARE .....	42
Capítulo III: Diseño del Proyecto .....		43
3.	Metodología .....	43

3.1. Descripción del módulo Dinamómetro/fuente de alimentación de cuatro cuadrantes.....	44
3.1.1. Conjunto de funciones – Parámetros de función .....	44
3.1.2. Especificaciones técnicas.....	51
3.2. Selección de Instrumentos y Equipos.....	53
3.2.1. Modulo Dinamómetro/fuente de alimentación de cuatro cuadrantes .....	53
3.2.2. Módulo Fuente de Alimentación (LabVolt) .....	53
3.2.3. Módulo de Carga Resistiva (LabVolt).....	54
3.2.5. Pinza Amperimétrica .....	56
3.2.6. Multímetro .....	57
3.2.7. Conectores.....	57
3.3. Procedimiento de las practicas .....	58
3.3.1. Practica 1: Producción eólica de energía mecánica en aerogenerador ...	58
3.3.2. Practica 2: Eficiencia de un aerogenerador.....	63
3.3.3. Practica 3: Aerogenerador con voltaje de salida constante.....	67
3.3.4. Practica 4: Aerogenerador con excitación variable bajo diversas velocidades del viento.....	73
3.3.5. Practica 5: Curvas características de un aerogenerador.....	79
3.3.6. Practica 6: Producción eléctrica de aerogenerador bajo condiciones meteorológicas reales del sitio minas de Huascachaca.....	92
3.3.7. Practica 7: Regulación de potencia en aerogenerador haciendo uso del pitch control bajo condiciones meteorológicas reales del sitio Villonaco.....	98

Capítulo IV: Discusión de los Resultados .....	106
4. Conclusiones .....	106
5. Recursos .....	107
5.1. Recursos humanos .....	107
5.2. Recursos institucionales .....	107
5.3. Recursos materiales y económicos.....	108
Cronograma.....	109
Referencias bibliográficas.....	111
Anexos .....	121

## Índice de Figuras

<b>Figura 1.</b> <i>Partes de un aerogenerador de eje horizontal</i> .....	17
<b>Figura 2.</b> <i>Sustentación y arrastre por el viento sobre palas de aerogenerador</i> .....	18
<b>Figura 3.</b> <i>a) Aerogenerador de eje horizontal. b) Aerogenerador de eje vertical tipo Darrieus.</i> .....	19
<b>Figura 4.</b> <i>Coeficiente de potencia en función de la velocidad específica para distintos tipos de aerogeneradores.</i> .....	20
<b>Figura 5.</b> <i>Aerogenerador de eje horizontal</i> .....	21
<b>Figura 6.</b> <i>Disposiciones típicas del buje de un aerogenerador</i> .....	22
<b>Figura 7.</b> <i>Aerogenerador de eje horizontal de dos aspas</i> .....	24
<b>Figura 8.</b> <i>Aerogenerador de eje horizontal de tres aspas</i> .....	25
<b>Figura 9.</b> <i>Aerogenerador tipo 1</i> .....	26
<b>Figura 10.</b> <i>Aerogenerador tipo 2</i> .....	26
<b>Figura 11.</b> <i>Aerogenerador tipo 3</i> .....	27
<b>Figura 12.</b> <i>Aerogenerador tipo 4</i> .....	28
<b>Figura 13.</b> <i>Curva de potencia de un aerogenerador</i> .....	28
<b>Figura 14.</b> <i>Detalles de la góndola de un aerogenerador</i> .....	31
<b>Figura 15.</b> <i>Curvas de par en una turbina eólica versus velocidad del rotor con dos velocidades de viento distintas.</i> .....	33
<b>Figura 16.</b> <i>Curvas de potencia en una turbina eólica versus velocidad del rotor con dos velocidades de viento distintas.</i> .....	34
<b>Figura 17.</b> <i>Distribución Weibull del sitio Parque Eólico Villonaco (Loja)</i> .....	38
<b>Figura 18.</b> <i>Dirección de los vientos</i> .....	39
<b>Figura 19.</b> <i>Rosa de los vientos del Parque Eólico Villonaco (Loja)</i> .....	40

<b>Figura 20.</b> <i>Dinamómetro/Fuente de Alimentación de Cuatro Cuadrantes Modelo 8960-F</i> .....	41
<b>Figura 21.</b> <i>Tipo de aerogenerador (1,15m, 3 alabes)</i> .....	45
<b>Figura 22.</b> <i>Tipo de aerogenerador - 1,15 m, 3 álabes con caja de engranajes</i> . ....	47
<b>Figura 23.</b> <i>Tipo de aerogenerador - 0,72 m, 3 álabes con bloqueo pasivo</i> . ....	48
<b>Figura 24.</b> <i>Ángulo de paso de las aspas de la turbina</i> .....	49
<b>Figura 25.</b> <i>Tipo de aerogenerador - 1,15 m, 3 aspas con caja de engranajes y control de paso</i> .....	50
<b>Figura 26.</b> <i>Energía eléctrica que recibe la red por parte del dinamómetro</i> .....	51
<b>Figura 27.</b> <i>Dinamómetro/Fuente de Alimentación de Cuatro Cuadrantes Modelo 8960-F con emulador de aerogenerador</i> .....	53
<b>Figura 28.</b> <i>Modulo fuente de alimentación variable</i> .....	54
<b>Figura 29.</b> <i>Módulo de Carga Resistiva (LabVolt)</i> .....	55
<b>Figura 30.</b> <i>Motor/Alternador síncrono</i> .....	56
<b>Figura 31.</b> <i>Pinza amperimétrica</i> .....	56
<b>Figura 32.</b> <i>Multímetro true rms</i> .....	57
<b>Figura 33.</b> <i>Conectores bananas para pruebas</i> .....	58
<b>Figura 34.</b> <i>Producción de energía mecánica mensual promedio del sitio Urdaneta</i>	62
<b>Figura 35.</b> <i>Eficiencia vs velocidad del viento</i> .....	65
<b>Figura 36.</b> <i>Comparación entre potencia mecánica y eléctrica para distintas velocidades de viento</i> .....	66
<b>Figura 37.</b> <i>Curvas velocidad de rotación del aerogenerador y voltaje del circuito de excitación en vacío</i> .....	70
<b>Figura 38.</b> <i>Curvas velocidad de rotación del aerogenerador y voltaje del circuito de excitación con carga de 300 ohms</i> .....	71

<b>Figura 39.</b> <i>Curvas velocidad de rotación del aerogenerador y par en el rotor del aerogenerador con carga de 300 ohm .....</i>	<i>72</i>
<b>Figura 40.</b> <i>Potencias generadas por el aerogenerador con diferentes excitaciones.</i>	<i>78</i>
<b>Figura 41.</b> <i>Curvas de potencia mecánica vs velocidad del rotor en aerogenerador para diferentes velocidades del viento .....</i>	<i>87</i>
<b>Figura 42.</b> <i>Curvas de potencia eléctrica vs velocidad de rotación del generador síncrono para diferentes velocidades del viento .....</i>	<i>88</i>
<b>Figura 43.</b> <i>Curvas del coeficiente de potencia (Cp) vs tip speed ratio (<math>\lambda</math>) para diferentes velocidades del viento .....</i>	<i>89</i>
<b>Figura 44.</b> <i>Curvas de eficiencia total del proceso de conversión de energía eólica a eléctrica vs resistencia de la carga para distintas velocidades del viento</i>	<i>90</i>
<b>Figura 45.</b> <i>Gráfico de producción eléctrica promedio mensual del sitio minas de Huasachaca .....</i>	<i>96</i>
<b>Figura 46.</b> <i>Producción de energía eléctrica mensual acumulada del sitio minas de Huasachaca. ....</i>	<i>97</i>
<b>Figura 47.</b> <i>Curva regulación de potencia mecánica entregada por aerogenerador haciendo uso del pitch control .....</i>	<i>104</i>

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1.</b> <i>Funciones de la turbina 1.15m, 3 álabes.</i> .....	44
<b>Tabla 2.</b> <i>Funciones de la turbina 1,15 m, 3 álabes con caja de engranajes.</i> .....	46
<b>Tabla 3.</b> <i>Funciones de la turbina 0,72 m, 3 álabes con bloqueo pasivo.</i> .....	47
<b>Tabla 4.</b> <i>Funciones de la turbina 1,15 m, 3 aspas con caja de engranajes y control de paso</i> .....	48
<b>Tabla 5.</b> <i>Especificaciones técnicas de dinamómetro de cuatro cuadrantes</i> .....	51
<b>Tabla 6.</b> <i>Condiciones del viento en el sitio Urdaneta (Provincia de Los Ríos)</i> .....	59
<b>Tabla 7.</b> <i>Producción eólica promedio de energía mecánica en vacío del sitio Urdaneta</i> .....	61
<b>Tabla 8.</b> <i>Eficiencia en proceso de conversión de energía mecánica en turbina eólica.</i> .....	65
<b>Tabla 9.</b> <i>Regulación del voltaje de salida del aerogenerador en vacío</i> .....	70
<b>Tabla 10.</b> <i>Regulación del voltaje de salida del aerogenerador con una carga de 300 ohms</i>	71
<b>Tabla 11.</b> <i>Excitación máxima y resistencia de 200 ohm con diferentes velocidades del viento</i> .....	76
<b>Tabla 12.</b> <i>Excitación media y resistencia de 200 ohm para diferentes velocidades del viento</i> .....	76
<b>Tabla 13.</b> <i>Excitación mínima y resistencia de 200 ohm para diferentes velocidades del viento</i> .....	77
<b>Tabla 14.</b> <i>Diferencia en porciento entre las potencias generadas por el aerogenerador en los casos de excitación máxima, media y mínima.</i> .....	77
<b>Tabla 15.</b> <i>Datos simulados y calculados para graficar curva característica de aerogenerador con velocidad del viento de 4 m/s.</i> .....	82
<b>Tabla 16.</b> <i>Datos simulados y calculados para graficar curva característica de aerogenerador con velocidad del viento de 5 m/s.</i> .....	82

<b>Tabla 17.</b> <i>Datos simulados y calculados para graficar curva característica de aerogenerador con velocidad del viento de 6 m/s.....</i>	83
<b>Tabla 18.</b> <i>Datos simulados y calculados para graficar curva característica de aerogenerador con velocidad del viento de 7 m/s.....</i>	83
<b>Tabla 19.</b> <i>Datos simulados y calculados para graficar curva característica de aerogenerador con velocidad del viento de 8 m/s.....</i>	84
<b>Tabla 20.</b> <i>Datos simulados y calculados para graficar curva característica de aerogenerador con velocidad del viento de 9 m/s.....</i>	84
<b>Tabla 21.</b> <i>Datos simulados y calculados para graficar curva característica de aerogenerador con velocidad del viento de 10 m/s.....</i>	85
<b>Tabla 22.</b> <i>Datos simulados y calculados para graficar curva característica de aerogenerador con velocidad del viento de 11 m/s.....</i>	85
<b>Tabla 23.</b> <i>Datos simulados y calculados para graficar curva característica de aerogenerador con velocidad del viento de 12 m/s.....</i>	86
<b>Tabla 24.</b> <i>Producción eléctrica promedio mensual del sitio minas de Huascachaca .....</i>	94
<b>Tabla 25.</b> <i>Producción eléctrica anual del sitio minas de Huascachaca .....</i>	95
<b>Tabla 26.</b> <i>Producción de energía eléctrica con ángulo de paso de aerogenerador en 30% .....</i>	102
<b>Tabla 27.</b> <i>Producción de energía eléctrica con ángulo de paso de aerogenerador en 25% .....</i>	102
<b>Tabla 28.</b> <i>Relación entre las variaciones de potencia obtenidas con ángulos de pitch control de 30 y 25° .....</i>	103
<b>Tabla 29.</b> <i>Recursos humanos .....</i>	107
<b>Tabla 30.</b> <i>Recursos institucionales.....</i>	107
<b>Tabla 31.</b> <i>Recursos materiales y económicos .....</i>	108

<b>Tabla 32.</b> <i>Cronograma Etapa 1</i> .....	109
<b>Tabla 33.</b> <i>Cronograma Etapa 2</i> .....	110

## **Introducción**

El emulador de aerogenerador es un conjunto software-módulo didáctico que permite a estudiantes de la carrera de ingeniería eléctrica de la ULEAM estudiar los parámetros característicos del funcionamiento de una turbina eólica, siendo una herramienta didáctica de laboratorio novedosa debido a que es posible ingresar las condiciones deseadas del viento, el tipo de turbina eólica a emular y visualizar la respuesta mediante medidores integrados en el software y módulo, esto sumado a la robustez que presenta, da como resultado un entorno seguro y práctico para el aprendizaje del aprovechamiento del recurso eólico.

A lo largo de la historia se han utilizado combustibles fósiles para generación eléctrica, específicamente un 60% en el año 2023 (Energy Institute, 2024), como lo indica (Damilola Ilesanmi & Tewari, 2022) de todos los combustibles fósiles consumidos en la historia, la mayoría se ha utilizado en los últimos cincuenta años trayendo consigo que el desarrollo económico y social sigan creciendo, pero a costa de un impacto ambiental que posiblemente sea irreversible. La extracción y combustión de los recursos no renovables como carbón, petróleo y gas natural produce gases como el dióxido de carbono, metano y óxidos de nitrógeno, estos gases son los principales causantes del efecto invernadero (Peszko et al., 2020)

Las energías renovables surgen como una idea de aprovechar los recursos que siempre han estado rodeándonos, pero nunca han sido utilizados, estos son producidos de fuentes naturales, son reabastecidos a un ritmo mayor al que son consumidos y su aprovechamiento produce menos emisiones que la quema de combustibles fósiles convencionales (Mills, 2023). Su explotación supone una reducción significativa en la emisión de gases de efecto invernadero. En Europa el uso en el 2021 de energías renovables para producción de energía eléctrica fue del 21.8% y la meta es de 32% para el 2030 (Eurostat, 2023).

El Consejo de la Unión Europea en su decisión (UE) 2016/1841 del 5 de octubre de 2016 adopta el acuerdo de París, el cual tiene como meta limitar el incremento en la temperatura global promedio a 1.5 grados en comparación a niveles preindustriales para el año 2030 y lograr que la economía fluya consistentemente mientras se busca un equilibrio entre las emisiones y la recuperación progresiva del clima en la tierra (Naciones Unidas [ONU], 2015). Limitar la variación de la temperatura de los últimos años que ha traído nuevas condiciones climáticas supone un compromiso y esfuerzo mundial nunca visto (Ahonen et al., 2021).

Este modelo europeo surge como una referencia en el uso de las energías renovables en la matriz energética para países con un gran potencial de aprovechamiento de éstas. En Ecuador el uso de energías renovables compone el 71.14% del total de tipos de energía utilizados en la producción de electricidad, donde la participación de energía hidráulica supone el 69.48%, eólica 0.59%, fotovoltaica 0.11%, biomasa 0.86% y biogás 0.10%, respectivamente en año móvil con corte a abril 2024 (Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables [ARCERNNR], 2024).

Ecuador presenta un grado importante de experiencia y utilización de energías renovables, aunque la mayor parte de esta participación corresponde al recurso hidráulico. Sin embargo, se anticipa un aumento en el uso de otras fuentes renovables en el futuro (Barragán-Escandón et al., 2022). Dado que la energía hidráulica es el principal recurso empleado en la generación de electricidad en Ecuador, surgen desafíos vinculados a la dependencia de esta fuente y a las condiciones que pueden afectar la producción de electricidad. Según Chakrabarti & Halder (2022), la producción de electricidad en instalaciones hidráulicas está sujeta a factores como la precipitación y los períodos de sequía anuales.

Ante la posibilidad de estos eventos, Ecuador debe estar preparado para satisfacer la demanda eléctrica mediante el empleo de otras fuentes renovables de energía. Dado que la energía eólica ocupa el tercer lugar entre los recursos renovables utilizados en el país en la

actualidad, este recurso podría tener una participación importante en la matriz energética nacional a futuro. Su aprovechamiento mediante tecnologías modernas y más eficientes podría diversificar la matriz energética ecuatoriana y fortalecerla ante condiciones adversas que afecten el suministro principal de energía primaria que para el caso actual es hidráulica.

La energía eólica, que corresponde a la energía cinética contenida en el viento, se genera cuando el viento hace rotar las aspas de una turbina, las cuales están acopladas al eje de un generador eléctrico. Existen diversas características que varían según las condiciones del viento y que, por lo tanto, afectan la producción eléctrica (Vargas et al., 2020). Este tipo de tecnología no produce ningún contaminante que pudiese ser expulsado al medio natural.

Las turbinas presentan una curva de rendimiento que depende de varios factores, como los materiales que las componen, sus características tecnológicas y constructivas, y sus dimensiones. Además, el rendimiento está influenciado por las condiciones del viento, especialmente la velocidad del viento y la densidad del aire que circula a través de ellas.(Schaffarczyk, 2020). Por lo cual es recomendable monitorear el viento durante un periodo lo suficientemente extenso en un año para determinar el tipo de turbina a utilizar (Cruz et al., 2020).

Por lo anterior expuesto se suelen realizar estudios previos de las condiciones del viento en el sitio donde se requiera implementar un generador eólico. Tales estudios permiten escoger un tipo de turbina adecuado en base a sus curvas características; esto puede llegar a ser difícil en regiones donde se carecen de datos del viento, ya que no es posible escoger un solo tipo de aerogenerador para varios sitios (Rio & Luna, 2019). Por lo tanto, podemos determinar que la elección de la turbina eólica depende de las condiciones del viento a lo largo del año, siendo el monitoreo la herramienta que proporciona los datos a utilizar (Cubillo Sagues et al., 2020).

Los autores Kunjumuhammed et al. (2019) recalcan los beneficios de la simulación de sistemas de energías renovables debido a que su integración en un sistema establecido y

estandarizado puede tener impacto en la operación de redes interconectadas, esto permite conocer los límites y parámetros para una mayor flexibilidad en la implementación y proyección de la generación futura. El aprendizaje en laboratorio según Auer & May (2020) es importante debido a que docentes pueden proveer a los estudiantes con experiencias prácticas, así como aplicar el conocimiento adquirido bajo circunstancias reales y permite dotarlos con la capacidad de responder ante problemas cotidianos de la profesión, desarrollando experticia práctica que sea de utilidad a futuro.

Por otra parte, las desventajas que existen al no utilizar un laboratorio que simule las características del elemento estudiado son varias, una de ellas, según los autores Dori et al. (2023), es la frustración del alumno por no poder implementar lo aprendido en clases debido al uso de un video explicativo que muchas veces carece de calidad o de un excesivo movimiento debido al cambio de ángulo de la cámara. Esto supone un gran desafío para los estudiantes debido a que esta falta de práctica puede llevar a que no sepan como implementar lo aprendido.

Por lo que, un equipo que integra la simulación de energía eólica con la interacción de estudiantes en laboratorio es un electrodinamómetro, éste cuenta con unidades apropiadas de control, puede operar como dispositivo de absorción o dinamómetro universal pudiendo ser motor o generador según se requiera, el mismo hace uso de un motor eléctrico interno gobernado por un controlador que permite la simulación de varias características (Tong, 2022). Una de estas características principales de simulación es la de turbinas eólicas y su comportamiento ante diversas condiciones de viento que permiten mejorar las posibilidades de entrenamiento (FESTO, 2023).

Estos dinamómetros presentan una alta precisión en la simulación de parámetros, tal como lo indica Bennett (2020), debido a que evitan complicaciones al estar dentro de un entorno controlado. Este entorno controlado puede llegar a ser el laboratorio de la carrera de Ingeniería Eléctrica, debido a que cuentan con condiciones controladas y seguras para la

operación del dinamómetro. Sin embargo, este laboratorio no cuenta con un módulo de simulación de energía eólica, afectando el perfil de egreso del estudiante de la carrera de electricidad. Esta carencia impide conocer los fundamentos de la extracción hasta la utilización de la energía del viento de forma adecuada y eficiente, así como de las nuevas tecnologías de aprovechamiento de energía para recursos renovables.

Como lo indica Mahjoub et al. (2023) simulaciones como estas permiten validar experimentalmente en entorno de laboratorio modelos equivalentes. Razón por la cual el enfoque de esta implementación es novedoso, ya que permite la comprobación de la tecnología que aprovecha la energía eólica sin tener que esperar condiciones ideales del viento, ni gastar recursos económicos en implementar sistemas físicos, pudiendo hacerlo mediante el uso del software del dinamómetro. Por lo tanto, se puede concluir que, debido a la inexistencia del módulo o equipo similar en el laboratorio de electricidad, no se pueden simular los parámetros característicos de una turbina eólica para la generación de energía eléctrica.

Es importante realizar la delimitación del presente documento, siendo esta únicamente la simulación en laboratorio de curvas características de la turbina eólica y generación eléctrica, junto con su respectivo análisis en diversas condiciones de viento a las que el sistema pudiera llegar a estar expuesto.

El capítulo 1 estará enfocado al planteamiento del problema de la investigación, para esto es necesario conocer los antecedentes que llevaron al uso de la energía eólica como fuente para generar electricidad. Adicionalmente se indica la justificación de la implementación del dinamómetro de cuatro cuadrantes para simulador de un aerogenerador como una herramienta clave para el estudio en laboratorio del aprovechamiento del recurso eólico con fines de generación eléctrica. Posteriormente, se presenta la propuesta, detallando las acciones a realizar y el propósito de la implementación. La problemática de esta investigación surge de los conocimientos adquiridos sobre energías renovables y de una visita al laboratorio de potencia

de la carrera de Electricidad, donde se identificó la falta de equipos que simularan una turbina eólica, el componente esencial para aprovechar el viento en la generación de electricidad. En el presente capítulo también se indica el objeto de la investigación, campo de acción al cual está enfocado y la hipótesis, en conjunto con los objetivos planteados para cumplir adecuadamente el desarrollo de la investigación.

Para entender el proceso de aprovechamiento de la energía eólica con el fin de generar electricidad, es necesario conocer los fundamentos y modelos matemáticos detrás de estos, los cuales se detallan en el capítulo 2. En el capítulo 2 se explica a detalle la energía que posee el viento, la capacidad que tiene el aerogenerador de aprovecharla, los componentes que lo forman y el comportamiento que tiene al momento de generar electricidad.

En el capítulo 3 se explica el diseño del proyecto, comenzando por la metodología empleada en el presente trabajo de investigación, para luego explicar las características físicas que tiene el dinamómetro de cuatro cuadrantes y las funciones que el emulador de aerogenerador posee. Después de esto, se indica a detalle los objetivos, resultados y puntos claves de las prácticas realizadas que permitan un mejor entendimiento de cada una.

El capítulo 4 contiene las conclusiones. Después de este apartado se encuentran los recursos necesarios para el desarrollo de esta tesis, adicionando el tema del cronograma con las fechas de cada actividad realizada durante el desarrollo de la tesis, referencias bibliográficas y los anexos donde se encuentran las prácticas en un formato definido que facilita su comprensión.

Para concluir el presente documento tiene como objetivo general:

“Desarrollar la simulación de un aerogenerador mediante la implementación de dinamómetro de cuatro cuadrantes en laboratorio de la carrera de electricidad”

Para lograr este objetivo se cumplirán con tres etapas las cuales se detallan a continuación:

Evaluar las configuraciones del dinamómetro de cuatro cuadrantes para simular con precisión la generación de un aerogenerador real ante diversas cargas y sus curvas características de operación. Esto según Mohanty & Stelson (2022) logra que los resultados experimentales tengan precisión para estados estables y transitorios.

Componer un conjunto de casos de estudio que permitan calcular y visualizar el comportamiento, potencia generada y eficiencia de aerogeneradores con distintos tipos de turbinas en función de condiciones meteorológicas reales de diferentes velocidades y densidades del viento. Como indica Kutt et al. (2020) estos sistemas a menudo requieren de un enfoque novedoso para el aprovechamiento de la energía mecánica proporcionada por la turbina, lo cual se puede realizar mediante un conjunto de experimentos.

Elaborar un manual del laboratorio que complemente el simulador de aerogenerador, ofreciendo fundamentación e instrucciones detalladas para la realización de prácticas. Estas prácticas y las mostradas por Schröder (2020), permiten monitorear y modelar la respuesta, cargas a conectarse y detalles de implementación basados en las condiciones del viento del sitio, estos aspectos son claves en estudio de la energía eólica por parte de alumnos y docentes, permitiendo un aprendizaje teórico – práctico más cercano a los sistemas reales.

## Capítulo I: El Problema

### 1.1. Antecedentes

La generación de energía eléctrica ha sido un componente esencial para el progreso de la sociedad a lo largo de la historia. Sin embargo, en gran parte del mundo, esta energía ha sido obtenida a partir de fuentes de energía primaria, tales como los combustibles fósiles, que, mediante procesos de conversión, se transforman en energía eléctrica (Vargas et al., 2020). Durante el transcurso del siglo XX, se evidenció un notable incremento en el consumo de recursos no renovables (García y Martínez, 2021).

El cambio en el clima de la tierra y la necesidad de disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero son la causa de que una gran cantidad de países se comprometan en acuerdos como el de París para disminuir la temperatura global e impulsar un cambio en la matriz eléctrica hacia fuentes de energía renovables (Europea, 2023). A partir de este contexto es posible considerar a las energías renovables como una alternativa a las fuentes no renovables, ya que estas permiten aprovechar recursos naturales ya disponibles de forma natural con un impacto mucho menor que el de fuentes no renovables.

A nivel local, se destaca la incorporación de energías renovables en la matriz energética. En particular, la energía hidráulica ha desempeñado un papel significativo en la generación eléctrica del país. No obstante, la alta dependencia de este recurso plantea cuestionamientos sobre la seguridad energética, dado que la producción hidroeléctrica está sujeta a las variaciones climáticas, como las precipitaciones y los períodos de sequía anuales (Naranjo-Silva, 2024). Ante escenarios donde estas condiciones climáticas adversas afecten la producción hidroeléctrica, es urgente contar con fuentes de energía alternativas y sostenibles.

La energía eólica, como la tercera fuente renovable más empleada en Ecuador, podría desempeñar un papel clave en la diversificación de la matriz energética y en la preparación para condiciones climáticas desfavorables que puedan afectar la producción hidroeléctrica (Armijo et al., 2023). Esta forma de energía aprovecha la energía cinética del viento para generar electricidad y, a diferencia de los recursos hidroeléctricos no está limitada por las mismas condiciones climáticas, adicionalmente ya se tienen proyectos de una considerable capacidad como los parques eólicos Villonaco y minas de Huascachaca con 16,5 y 50 MW de capacidad instalada (Ministerio de Energía y Minas, 2023).

## **1.2. Problemática**

El laboratorio de la carrera de Ingeniería eléctrica de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí (ULEAM) posee varios módulos que permiten cubrir las necesidades de formación académica de ingenieros eléctricos. Sin embargo, con el interés de tener un aprendizaje más cercano a la práctica en el área de energías renovables, es necesaria la adquisición de un equipo que permita el trabajo en conjunto con los módulos ya existentes en el laboratorio. Tal que, permita, comprender la tecnología utilizada en el aprovechamiento de la energía eólica que es la segunda fuente de energía renovable utilizada en el Ecuador.

## **1.3. Justificación**

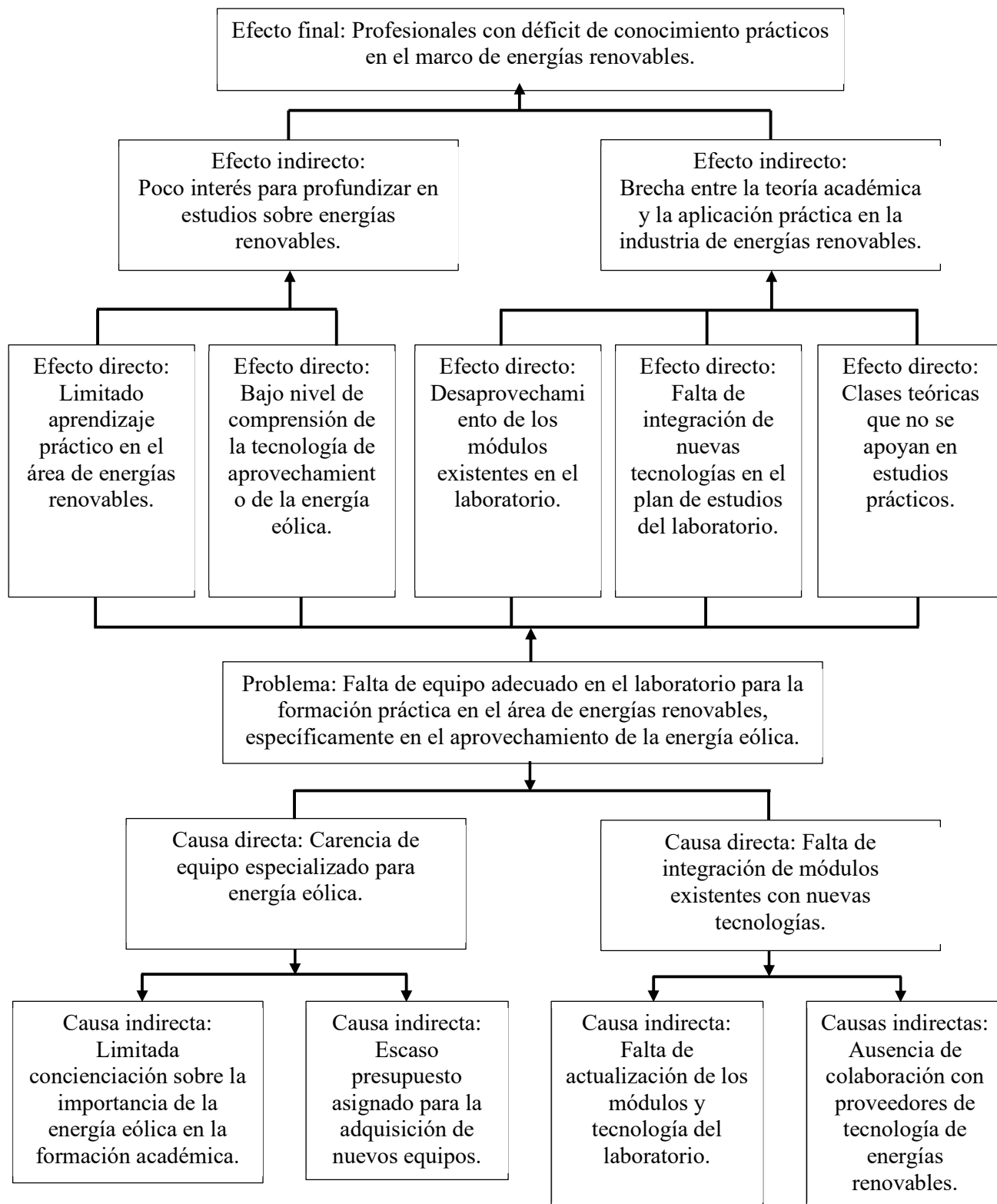
Este proyecto técnico aborda una problemática real en el contexto de la generación de energía eólica, permitiendo la realización de simulaciones precisas de generadores eólicos y la recopilación de datos cruciales para su operación. Su novedad radica en la implementación de un dinamómetro de cuatro cuadrantes específicamente diseñado para el estudio de aerogeneradores, lo que supone una contribución única en el ámbito de formación académica. En un momento en el que la transición hacia fuentes de energía renovable y sostenible es crucial para abordar el cambio climático, este trabajo de titulación tiene una relevancia aún mayor al capacitar a futuros profesionales en el campo de la energía eólica, lo que contribuye

directamente a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y promueve fuentes de energía limpias en Ecuador. Además, la implementación de un dinamómetro de cuatro cuadrantes en el laboratorio de electricidad representa un avance tecnológico con potencial para impulsar la investigación y el desarrollo en el ámbito de la energía eólica a nivel local, incentivando la obtención de conocimiento e implementaciones tecnológicas en el ámbito nacional.

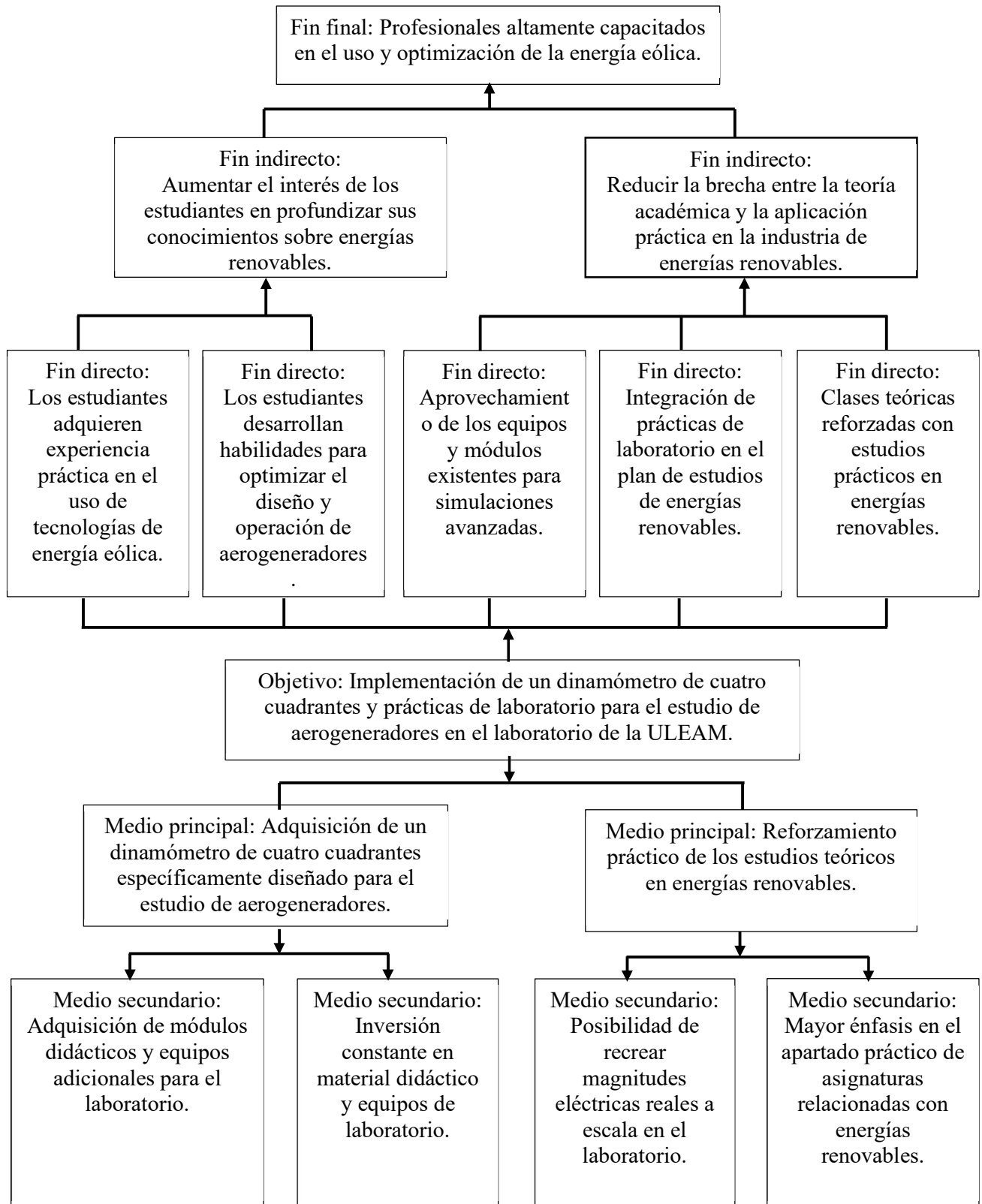
#### **1.4. Propuesta**

El presente trabajo de titulación realizado en la modalidad de proyecto técnico se proyecta como una solución ante la problemática previamente detallada, este ofrece nuevas herramientas para el desarrollo en el aspecto académico y profesional. Esto es importante para el desarrollo académico de la carrera de electricidad al adicionar una tecnología de última generación para la simulación de energía eólica, beneficiando directamente a estudiantes y profesionales al proporcionar la oportunidad de adquirir conocimientos y habilidades a través de poner en práctica los conocimientos y generar experimentación en el campo de la energía eólica.

### 1.5. Árbol de Problemas



## 1.6. Árbol de Objetivos



### **1.7. Objeto del proyecto**

Realización de prácticas mediante dinamómetro de cuatro cuadrantes con función emulador de aerogenerador, con el fin de comprender el aprovechamiento de la energía eólica por medio de la utilización de dicho módulo.

### **1.8. Campo de Acción**

Facultad de Ingeniería, Industria y Arquitectura de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí.

### **1.9. Hipótesis**

Si se realiza la implementación un dinamómetro de cuatro cuadrantes en el laboratorio de electricidad se comprobará la simulación de un aerogenerador bajo condiciones de viento específicas.

### **1.10. Objetivos**

#### **1.11. Objetivo General**

Desarrollar la simulación de un aerogenerador mediante la implementación de dinamómetro de cuatro cuadrantes en laboratorio de la carrera de Electricidad.

#### **1.12. Objetivos Específicos**

- Evaluar las configuraciones del dinamómetro de cuatro cuadrantes para simular con precisión la generación de un aerogenerador real ante diversas cargas y sus curvas características de operación.
- Componer un conjunto de casos de estudio que permitan calcular y visualizar el comportamiento, potencia generada y eficiencia de aerogeneradores con distintos tipos de turbinas en función de condiciones meteorológicas reales de diferentes velocidades y densidades del viento.
- Elaborar un manual del laboratorio que complemente el simulador de aerogenerador, ofreciendo fundamentación e instrucciones detalladas para la realización de prácticas.

### **1.13. Variables**

- Independientes: Implementación de dinamómetro de cuatro cuadrantes.
- Dependiente: Simulación de aerogenerador.

### **1.14. Tareas del proyecto**

#### 1. Investigación y Revisión del Estado del Arte:

Tarea 1: Investigación sobre aerogeneradores y dinamómetros de cuatro cuadrantes.

Propósito: Conocer las tecnologías y principios necesarios para el desarrollo del proyecto

#### 2. Planificación y Diseño del Proyecto:

Tarea 2: Planificación y diseño de prácticas en el simulador de aerogenerador.

Propósito: Definir cómo se realizará la simulación y qué prácticas se implementarán.

#### 3. Desarrollo e Implementación:

Tarea 3: Desarrollo de prácticas y toma de datos para la evaluación del aerogenerador.

Propósito: Construir y poner en marcha el sistema para la simulación del aerogenerador.

#### 4. Pruebas y Validación:

Tarea 4: Análisis de datos e identificación de las relaciones entre parámetros.

Propósito: Evaluar el desempeño del sistema y verificar si cumple con los objetivos.

## 5. Documentación y Conclusiones:

Tarea 5: Conclusiones sobre la configuración utilizada del dinamómetro de cuatro cuadrantes para simular la generación de un aerogenerador real.

Tarea 6: Conclusiones sobre el comportamiento, potencia generada y eficiencia de aerogeneradores con distintos tipos de turbina en función de condiciones meteorológicas.

Propósito: Extraer y documentar las lecciones aprendidas y los resultados del proyecto.

## 6. Desarrollo de Material Didáctico:

Tarea 7: Elaboración del manual de laboratorio del simulador de aerogenerador con fundamentos e instrucciones detalladas.

Propósito: Crear un recurso educativo para el uso y comprensión del simulador.

## 7. Revisión y Presentación:

Tarea 8: Revisión por parte del tutor y edición de la tesis.

Tarea 9: Presentación y defensa de la tesis.

Propósito: Finalizar el documento y preparar la presentación para la defensa del proyecto.

## **Capítulo II: Marco Teórico**

### **2. Energía eólica**

De acuerdo con (GEOGRAPHIC, 2022), la energía eólica ofrece una opción sostenible en la búsqueda de energías renovables, debido a que el viento es una fuente limpia que no produce contaminación del aire ni del agua. Dado que el viento está disponible de manera natural, los costes de operación son casi cero. La generación efectiva de electricidad a través de la energía eólica juega un papel importante en la promoción del desarrollo sostenible. Esta fuente de energía, su carencia de emisiones dañinas para el medio ambiente y la salud humana, en contraposición a sustancias tóxicas y contaminantes del aire presentes en otras formas de generación energética (Amjith & Bavanish, 2022).

#### **2.1. Aerogeneradores**

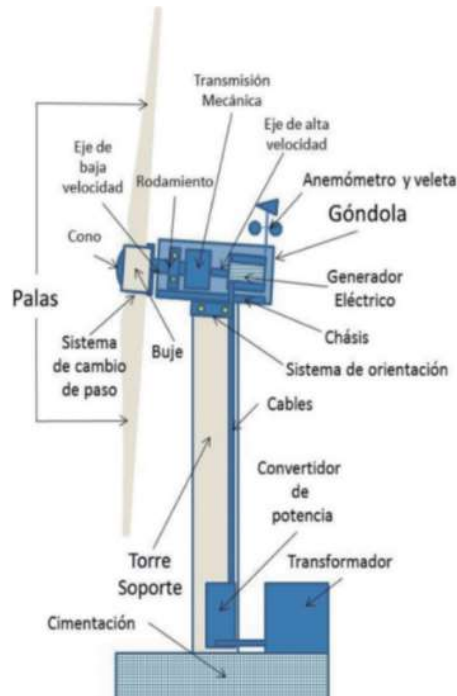
La energía eólica, se deriva de la energía cinética del viento, que impulsa las palas de los aerogeneradores, convirtiéndola en energía eléctrica mediante el funcionamiento de una turbina, este proceso inicia con el direccionamiento óptimo del aerogenerador para obtener el mejor aprovechamiento de energía eólica, haciendo uso de dispositivos tales como la veleta y el anemómetro, y girando sobre su eje central. (Earnest & Rachel, 2019).

Posteriormente, el viento hace girar las palas que se conectan a un rotor que está compuesto de imanes permanentes que evitan el uso de grandes cajas multiplicadoras, esta energía cinética mueve el rotor causando una variación del campo magnético donde a su vez induce voltaje en las bobinas del estator que la convierte en energía eléctrica que es conducida por el interior de la torre hasta su base, luego sigue por la subestación para que eleve su tensión y continúe hasta la red eléctrica para su posterior distribución (Roga et al., 2022).

Existen dos configuraciones principales para el diseño de turbinas eólicas: la de eje horizontal Figura 1 y la de eje vertical. Sin embargo, la mayoría de las turbinas eólicas modernas utilizan un diseño de eje horizontal. Exceptuando el rotor, la mayoría de los otros

componentes son iguales en ambos diseños, con algunas diferencias en sus ubicaciones (Patel & Beik, 2021).

**Figura 1.**  
*Partes de un aerogenerador de eje horizontal*



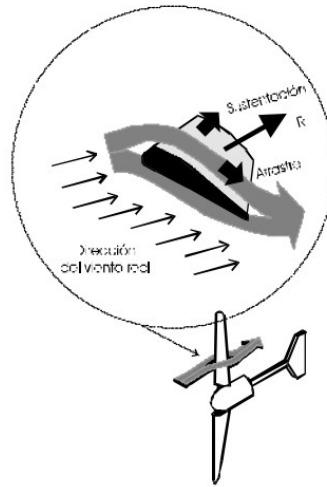
Tomado de Tecnología y sostenibilidad de la energía eólica. Preguntas y respuestas (p.8), por San Miguel Alfaro, G., Regueiro Ferreira, R., Gómez Catasús, J., & Gomez Villarino, M. T, 2023, Ediciones Mundi-Prensa.

### **2.1.1. Principio de funcionamiento**

Los aerogeneradores son dispositivos que transforman la energía cinética del viento en energía mecánica, existen dos tipos principales como: eje horizontal y de eje vertical, cabe recalcar que ambos operan bajo el mismo principio (Solano et al., 2021). Por lo que, el viento impulsa las palas de rotor, generando movimiento gracias a principios aerodinámicos similares a los del vuelo de los aviones, este movimiento se basa en la diferencia de presiones creada cuando el aire fluye sobre las superficies de las palas, resultando en una fuerza de sustentación y una fuerza de arrastre, tal como se muestra en la figura 2, la mayoría de las turbinas modernas utilizan la fuerza de sustentación para maximizar la eficiencia y potencia. (Gielen et al., 2019)

## Figura 2.

*Sustentación y arrastre por el viento sobre palas de aerogenerador*



Tomado de Fuerzas de sustentación y arrastre. Luque, M. (2017).

Por otra parte, el perfil y el ángulo de las palas son diseñadas para optimizar esta fuerza de sustentación; cuando el rotor está en movimiento, las palas experimentan un viento aparente, que es la combinación del viento real y el generado por el movimiento de las palas. De tal manera que, el viento varía a lo largo de la pala, lo que requiere diseños específicos para grandes turbinas, mientras que las más pequeñas suelen tener palas de sección constantes por razones de costo y simplicidad (Sánchez-Orgaz et al., 2022).

Este funcionamiento depende de la velocidad del viento, por lo que, si el viento no alcanza la velocidad mínima de puesta en marcha, el aerogenerador no puede comenzar a operar; una vez superada esta velocidad, la potencia generada aumenta debido a la velocidad del viento hasta llegar a su potencia nominal. Al tener velocidades mayores existen algunos mecanismos que entran en regulación para evitar daños y la turbina continúa operando hasta que este alcance la velocidad de corte, momento que se detiene por seguridad (Xu et al., 2020).

## 2.2. Tipos de aerogeneradores

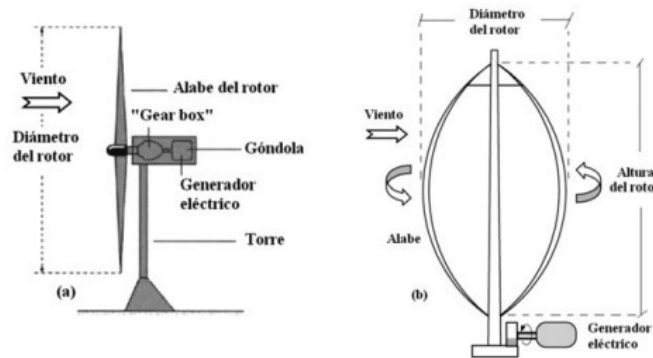
De acuerdo con (Zhang et al., 2022) los aerogeneradores se pueden clasificar de acuerdo con varios criterios, aquellos en base a la fuerza de arrastre, tienen una velocidad

específica pequeña y un elevado par de arranque, en este grupo se incluye aerogeneradores de eje vertical y de eje horizontal. Por otra parte, los que se basan en la fuerza de sustentación, tienen una velocidad específica mayor, un par de arranque menor y una mayor producción de energía por unidad de área barrida por el rotor (estas se destinan para producción eléctrica) (Gao et al., 2022).

Respecto a la disposición de su eje de giro, en el eje horizontal su eje de rotación es paralelo a la dirección del viento (ver figura 3). Cabe mencionar que este es el tipo de turbina más común utilizado para la producción de energía; en el eje vertical su eje de rotación es perpendicular a la dirección del viento.

**Figura 3.**

*a) Aerogenerador de eje horizontal. b) Aerogenerador de eje vertical tipo Darrieus.*



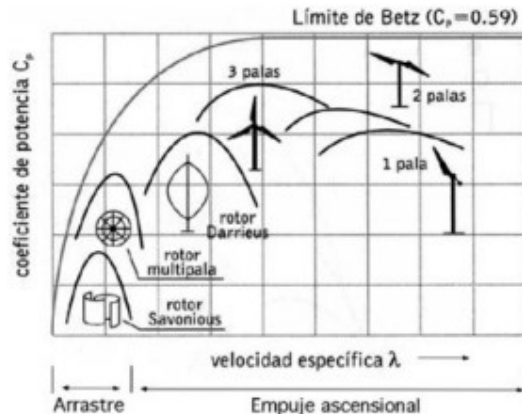
Tomado de Ingeniería de la energía eólica, Miguel Villarrubia Lopez (2013)

Además, los aerogeneradores de eje horizontal presentan ventajas como tener un mayor coeficiente de potencia ( $C_p$ ), también una mayor capacidad de barrer aéreas mayores, en consecuencia el aumento de potencia y la ventaja de aprovechar el incremento de la velocidad del viento, en cambio los de eje vertical presentan ventajas más relevante como la de poseer una simetría vertical, por lo tanto, no necesitan de sistemas de orientación, cuentan con una mejor accesibilidad, lo que facilita las tareas de mantenimiento, y no requieren mecanismos para cambiar el paso (Burton et al., 2021).

En general los aerogeneradores de eje horizontal presentan un coeficiente de potencia mayor que los de eje vertical, por lo que, son las más usadas para producción de electricidad, como se lo puede apreciar en la figura 4.

**Figura 4.**

*Coeficiente de potencia en función de la velocidad específica para distintos tipos de aerogeneradores.*



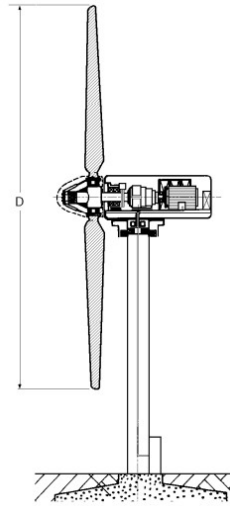
Tomado de Ingeniería de la energía eólica, Miguel Villarrubia Lopez (2013)

### **2.2.1. Aerogenerador de eje horizontal**

Desde los primeros diseños de aerogeneradores destinados al uso comercial hasta los modelos actuales, ha habido un incremento continuo en la potencia de las turbinas, con rotores más grandes y torres más altas, y una reducción progresiva en el costo de generación por kWh (López & Delfín, 2021).

Los aerogeneradores de eje horizontal (figura 5) se clasifican según su velocidad de giro y el número de palas del rotor, aspectos que están estrechamente relacionados, en rápidos y lentos.

**Figura 5.**  
*Aerogenerador de eje horizontal*



Tomado de Departamento De Ingeniería Eléctrica Y Energética Universidad De Cantabria -  
Energía Eólica - Pedro Fernández Díez – 2019.

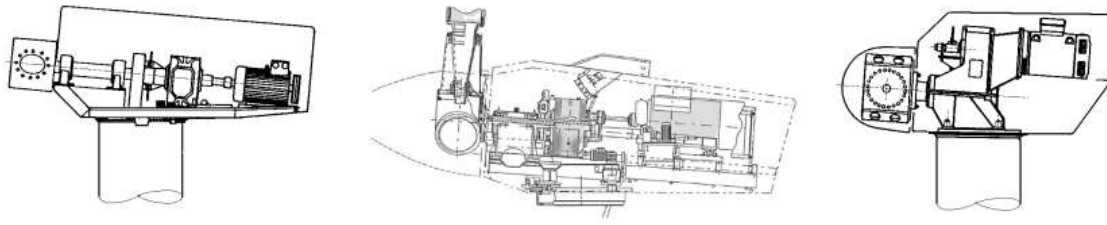
En los aerogeneradores de eje horizontal rápidos, el rotor está compuesto por una hélice de 2 o más palas (Vedovelli et al., 2022). Los perfiles utilizados en estas palas son similares al perfil del ala de un avión, estos perfiles se seleccionan considerando el número de revoluciones por minuto que se desea alcanzar, y se definen de acuerdo con la forma de la estructura en relación con sus líneas medianas o cuerdas a diferentes distancias del eje de giro, su espesor en relación con la longitud características de la cuerda y la simetría o no de las palas, entre otros factores (Gómez González, 2022).

La forma de la pala depende de la potencia deseada y de su velocidad de rotación, eligiéndose perfiles que no generen grandes tensiones en los extremos de las palas debido a la fuerza centrífuga, asegurando que el número máximo de revoluciones por minuto ( $n_{\text{máx}}$ ) no exceda la relación ( $n_{\text{máx}} \times D = 2000$ ), donde  $D$  es el diámetro de la hélice en metros (Quaschnig & Eppel, 2020).

Para los aerogeneradores destinados a la producción de energía eléctrica, el número de palas puede ser de 2 o 3, ya que la potencia generada depende únicamente de la superficie

barrida por la hélice, y no del número de palas. En la figura 6, se observa que los ejes del aerogenerador y del alternador pueden estar alineados o no. Los primeros diseños, que eran de potencias pequeñas y velocidad fija, utilizaban generadores de inducción conectados directamente a la red (David Pérez, 2023).

**Figura 6.**  
*Disposiciones típicas del buje de un aerogenerador*



Tomado de Departamento De Ingeniería Eléctrica Y Energética Universidad De Cantabria - Energía Eólica - Pedro Fernández Díez – 2019.

### **2.2.2. Aerogeneradores con Rotor a Barlovento**

En los aerogeneradores con rotor a barlovento, las aspas están orientadas hacia el viento. En este diseño, el viento impacta directamente en las aspas antes de llegar a la torre. La mayoría de los aerogeneradores modernos utilizan este diseño debido a su operación más uniforme y su capacidad para generar mayor potencia eléctrica, resultando en una mayor producción de energía (Introducción a la energía eólica. Guía del profesor, 86353-12, 2012).

La principal desventaja de los aerogeneradores con rotor a barlovento es la necesidad de un mecanismo de orientación, que permite el ajuste automático de la orientación acimutal de la góndola para mantener las aspas siempre enfrentadas al viento. Este mecanismo es necesario porque el viento tiende a desviar las aspas hacia el lado opuesto (sotavento).

### **2.2.3. Aerogeneradores con Rotor a Sotavento**

En los aerogeneradores con rotor a sotavento, las aspas están ubicadas detrás de la torre. En este caso, el viento impacta en las aspas después de haber pasado por la torre. La ventaja principal de este diseño es que no requiere un mecanismo de orientación, ya que los

aerogeneradores tienden a alinearse naturalmente con la dirección del viento (*Introducción a la energía eólica. Guía del profesor, 86353-12, 2012*).

Sin embargo, una desventaja significativa de los aerogeneradores con rotor a sotavento es la interrupción del flujo de viento por parte de la torre, conocida como sombra de la torre. Esta interrupción reduce el flujo de aire cuando las aspas pasan por detrás de la torre, disminuyendo instantáneamente la potencia generada en cada rotación. Además, la sombra de la torre provoca flexión en las aspas, lo que genera turbulencias, ruido y fatiga del material.

#### **2.2.4. Comparación entre los aerogeneradores de dos aspas y de tres aspas**

En la actualidad, la mayoría de los aerogeneradores europeos modernos poseen un rotor de tres aspas, mientras que en Estados Unidos prevalecen las unidades con un rotor de dos aspas. Teóricamente, la potencia generada aumenta con el número de aspas; sin embargo, en la práctica, este incremento no es significativo más allá de tres aspas (Nicolini, 2020).

#### **2.2.5. Aerogeneradores de Dos Aspas:**

Los aerogeneradores de dos aspas (figura 7), son generalmente más económicos que los de tres aspas debido a que requieren menos material para su construcción, lo que los hace más ligeros y fáciles de instalar. Además, pueden operar a mayores velocidades de rotación antes de que su desempeño sea afectado por la turbulencia. No obstante, el diseño de estos aerogeneradores es más desafiante debido a las altas cargas dinámicas que deben soportar. También pueden presentar problemas de estabilidad, ya que cuando un aspa se encuentra en el punto máximo del círculo de rotación, recibiendo la mayor potencia del viento, la otra aspa pasa frente o detrás de la torre, lo que puede alterar el flujo de aire (*WIND TURBINE TECHNOLOGY, 2021*).

**Figura 7.**

*Aerogenerador de eje horizontal de dos aspas*



Tomado de ARCHIEXPO by VirtualExpo Group, Aerogenerador doméstico de eje horizontal DALIFANT, 2024.

**2.2.6. Aerogeneradores de Tres Aspas:**

Los aerogeneradores de tres aspas (figura 8) pueden generar niveles comparables de potencia con velocidades del viento más bajas debido a su mayor área expuesta al viento. Su operación es más uniforme y estable en comparación con las unidades de dos aspas, y son menos susceptibles a efectos negativos causados por la presencia de la torre o variaciones en la velocidad del viento. Sin embargo, los aerogeneradores de tres aspas son generalmente más pesados, más costosos y difíciles de instalar (Okedu, 2023).

## **Figura 8.**

*Aerogenerador de eje horizontal de tres aspas*



Tomado de CELEP EP – Central Eolica Villonaco, 2024.

### **2.3. Modelos Genéricos para Aerogeneradores**

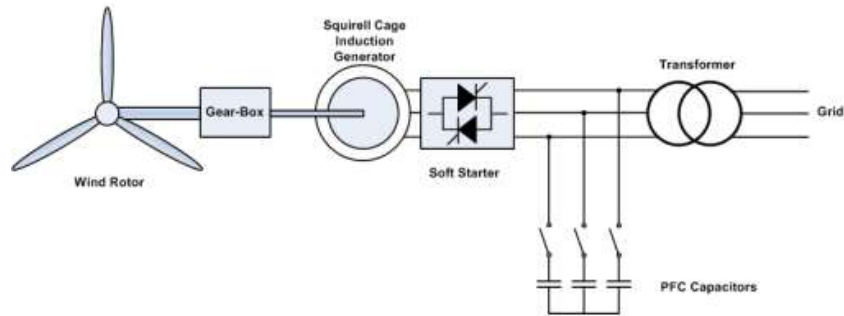
En la actualidad, las tecnologías más vendidas e instaladas en el mercado actual son las unidades de Tipo 3 y Tipo 4. Todos los principales proveedores de equipos ofrecen una o ambas de estas tecnologías (Energy U. D., 2023). No obstante, hay una cantidad considerable de unidades de Tipo 1 y Tipo 2 en operación a nivel mundial, lo que hace que su modelado siga siendo relevante. Además, algunos proveedores continúan suministrando turbinas Tipo 1 y Tipo 2.

Los aerogeneradores desarrollados por el Grupo de Trabajo de Modelado y Validación de WECC y el Grupo de Trabajo 27 del Comité Técnico de la IEC se han creado para evaluar el impacto en la estabilidad de grandes conjuntos de aerogeneradores interconectados a la red a través de un único punto (ETAP, 2023).

- **Tipo 1**

La máquina está controlada mediante un sistema de regulación de paso y opera un generador de inducción con rotor en jaula de ardilla, el cual está conectado directamente a la red eléctrica, como se lo puede observar en la figura 9. El modelo genérico comprende un modelo del generador, un modelo del tren de transmisión y un controlador de paso (Abo-Khalil & Sayed, 2021).

**Figura 9.**  
*Aerogenerador tipo 1*

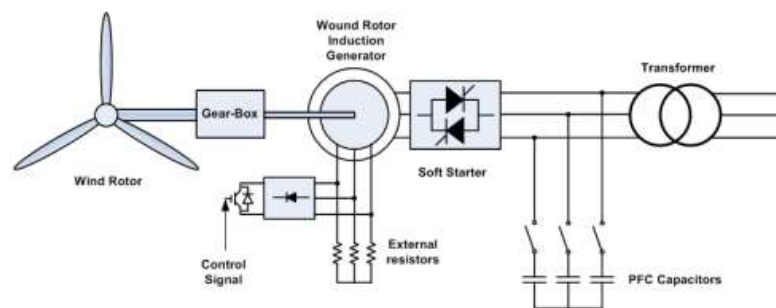


Tomado de Researchgate Integrating Renewable Energy into the Transmission and Distribution System of the U. S. Virgin Islands, 2011.

- **Tipo 2**

La máquina opera con deslizamiento variable, utilizando un generador de inducción con rotor bobinado, cuyo devanado del rotor está conectado externamente a través de anillos deslizantes y cepillos. Una resistencia externa del rotor se modula electrónicamente para influir en las características dinámicas de torque y velocidad de la máquina (Nasir, 2022). El modelo genérico abarca el modelo del generador, el controlador de resistencia externa, el modelo del tren de transmisión y el controlador de paso. Como se indica en la figura 10:

**Figura 10.**  
*Aerogenerador tipo 2*

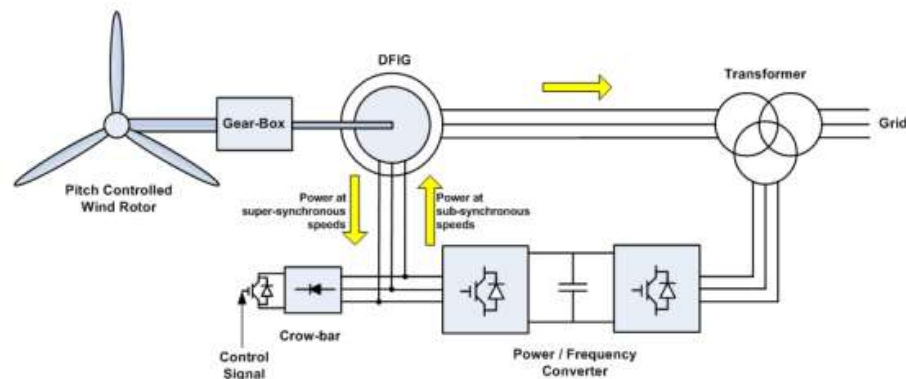


Tomado de Researchgate Integrating Renewable Energy into the Transmission and Distribution System of the U. S. Virgin Islands, 2011.

- **Tipo 3**

La máquina es un generador de inducción doblemente alimentado (DFIG) o de conversión parcial. La turbina se regula por paso y utiliza un generador de inducción con rotor bobinado, que incluye un convertidor de alimentación AC/DC/AC conectado entre los terminales del rotor y la red eléctrica, como se observa en la figura 11. El devanado del estator del generador está conectado directamente a la red (González et al., 2022). El convertidor de potencia en el circuito del rotor permite controlar de manera independiente el torque y el flujo del generador, ofreciendo un control rápido de la potencia activa y reactiva a lo largo de un amplio rango de velocidades del generador.

**Figura 11.**  
*Aerogenerador tipo 3*

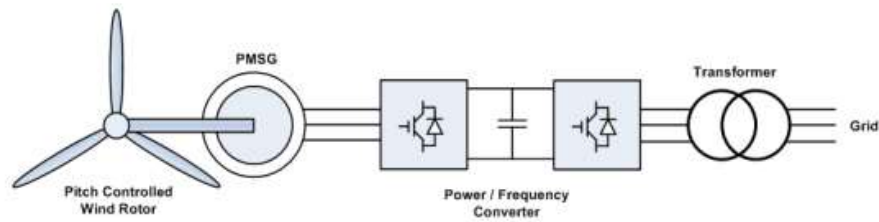


Tomado de Researchgate Integrating Renewable Energy into the Transmission and Distribution System of the U. S. Virgin Islands, 2011.

- **Tipo 4**

La turbina se regula mediante un paso y dispone de un convertidor de potencia AC/DC/AC que procesa la totalidad de la potencia generada. El generador, que puede ser de inducción o síncrono, se beneficia del convertidor de potencia, el cual permite un control independiente de las corrientes de cuadratura y del eje directo en la interfaz con la red, tal como se lo puede visualizar en la figura 12. Esto posibilita un control rápido de la potencia activa y reactiva a lo largo de un amplio rango de velocidades del generador (Okedu & Barghash, 2021).

**Figura 12.**  
*Aerogenerador tipo 4*

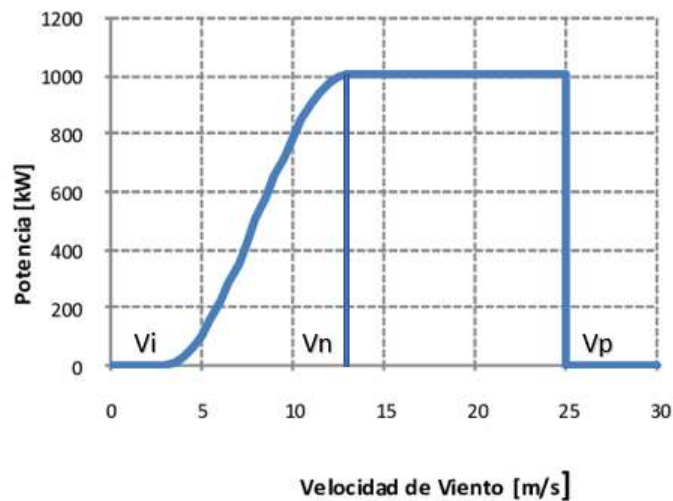


Tomado de Researchgate Integrating Renewable Energy into the Transmission and Distribution System of the U. S. Virgin Islands, 2011.

#### 2.4. Parámetros principales de un aerogenerador

Para un generador eólico comercial la curva de potencia podría ser representada por el gráfico de la figura 13:

**Figura 13.**  
*Curva de potencia de un aerogenerador*



Tomado de ResearchGate - Curva de Potencia del Generador Eólico - Evaluación de Inversiones en Generación Eólica en Argentina - Rommel P. Aguilar – 2010.

Se puede observar que hay una velocidad crítica,  $V_i$ , a partir de la cual el generador empieza a generar potencia, aunque inicialmente esta es muy baja. La velocidad máxima está marcada por la línea  $V_n$ , donde se alcanza la potencia nominal  $P_n$ . Finalmente, se identifica

una velocidad  $V_p$ , en la que el generador se detiene automáticamente por razones de seguridad (Francisco & Bruno Villena, 2024).

#### **2.4.1. Componentes de un aerogenerador (Sistema)**

El sistema de energía eólica consta de una o más unidades de turbinas eólicas que operan eléctricamente en paralelo. Cada turbina está compuesta por los siguientes elementos básicos:

- Estructura de la torre
- Rotor con dos o tres palas unidas al buje
- Eje con engranaje mecánico
- Generador eléctrico
- Mecanismo de guiñada, como la paleta trasera
- Sensores y sistema de control

Debido al gran momento de inercia del rotor, los desafíos de diseño incluyen el arranque, el control de la velocidad durante la generación de energía y la parada de la turbina cuando sea necesario (Patel & Beik, 2021). Para detener la turbina en situaciones de emergencia o durante el mantenimiento de rutina, se utilizan frenos de corriente parásita u otros tipos de frenos (Gallo Jaramillo et al., 2022). En un parque eólico moderno, cada turbina debe contar con su propio sistema de control para proporcionar funciones operativas y de seguridad desde una ubicación remota. Además, debe incluir uno o más de los siguientes componentes adicionales, como también se lo puede apreciar en la figura 14:

- Anemómetros, que miden la velocidad del viento y envían los datos al controlador.
- Varios sensores para monitorear y regular diversos parámetros mecánicos y eléctricos. Una turbina de 1 MW puede tener varios cientos de sensores.

- Controlador de pérdida, que arranca la máquina a velocidades de viento entre 8 y 15 mph y la apaga entre 50 y 70 mph para proteger las aspas de tensiones excesivas y el generador de sobrecalentarse.
- Electrónica de potencia para convertir y acondicionar la energía de acuerdo con los estándares requeridos.
- Electrónica de control, que generalmente incluye una computadora.
- Batería para mejorar la disponibilidad de carga en una planta aislada.
- Enlace de transmisión para conectar la planta a la red del área.

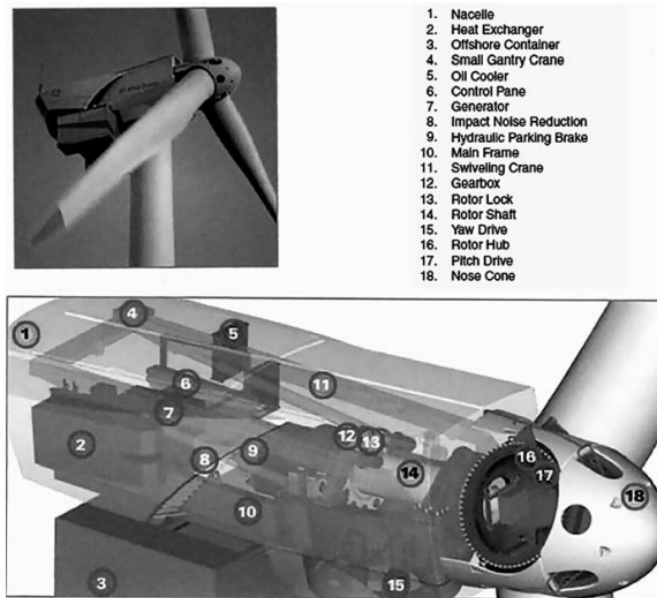
Algunos términos y terminología comunes en la industria de la energía eólica son:

- Eje de baja velocidad: el rotor hace girar el eje de baja velocidad entre 30 y 60 revoluciones por minuto (rpm).
- Eje de alta velocidad: impulsa el generador mediante un engranaje que incrementa la velocidad.
- Freno: un freno de disco que detiene el rotor en caso de emergencia. Puede ser aplicado en mecánica, eléctrica o hidráulicamente.
- Caja de cambios: conecta el eje de baja velocidad con el eje de alta velocidad y aumenta la velocidad de la turbina de 30-60 rpm a las 1200-1800 rpm requeridas por la mayoría de los generadores para producir electricidad eficientemente. Debido a que la caja de cambios es costosa y pesada, los ingenieros están explorando generadores de transmisión directa de baja velocidad que no necesitan caja de cambios.
- Generador: generalmente un generador de inducción disponible en el mercado que produce alimentación de CA de 50 o 60 Hz.
- Góndola: el rotor se conecta a la góndola, que se encuentra en la parte superior de la torre e incluye una caja de cambios, ejes de baja y alta velocidad,

generador, controlador y un freno. Una cubierta protege los componentes internos de la góndola, y algunas son lo suficientemente grandes como para que los técnicos puedan trabajar dentro de ellas.

- Paso: las palas se giran o inclinan fuera del viento para evitar que el rotor gire en vientos con velocidades demasiado altas o bajas para producir electricidad.
- Contra el viento y a favor del viento: una turbina contra el viento opera de cara al viento, frente a la torre, mientras que una turbina a favor del viento opera de espaldas al viento, detrás de la torre.
- Veleta: mide la dirección del viento y se comunica con el motor de guiñada para orientar adecuadamente la turbina respecto al viento.
- Impulsión de guiñada: mantiene la turbina orientada contra el viento cuando cambia la dirección del viento. Un motor de guiñada impulsa el accionamiento de guiñada. Las turbinas a favor del viento no requieren un accionamiento de guiñada, ya que el viento orienta el rotor de forma natural.

**Figura 14.**  
*Detalles de la góndola de un aerogenerador*



Tomado Wind and Solar Power Systems - Design, Analysis, and Operation - Mukund R. Patel and Omid Beik. 2021.

#### 2.4.2. Relaciones De Velocidad Y Potencia

La energía cinética del aire en movimiento es aprovechada para la generación de energía eléctrica mediante aerogeneradores. En base a (Patel & Beik, 2021), la energía cinética de una masa de aire  $m$  que se desplaza con una velocidad  $V$  se calcula con la fórmula:

$$Energia\ cinetica = \frac{1}{2}mV^2 \quad (1)$$

La potencia del aire en movimiento, que es la tasa de flujo de esta energía cinética por segundo, se expresa en vatios como:

$$potencia = \frac{1}{2}(flujo\ masico\ por\ segundo)V^2 \quad (2)$$

El caudal volumétrico es el área barrida por las palas del rotor ( $m^2$ ) multiplicado por la velocidad del aire ( $m/s$ ) es  $A * V$ , el caudal másico del aire en kilogramos por segundo es  $\rho * A * V$ , y la potencia mecánica que llega con el viento está dada por lo siguiente en vatios:

$$P = \frac{1}{2}(\rho AV)V^2 = \frac{1}{2}\rho AV^3 \quad (3)$$

Donde:

$P$  = potencia del viento circulante (vatios)

$\rho$  = densidad del aire  $\left(\frac{Kg}{m^3}\right)$

$A$  = área barrida por las palas del rotor ( $m^2$ )

$V$  = velocidad del viento  $\left(\frac{m}{s}\right)$

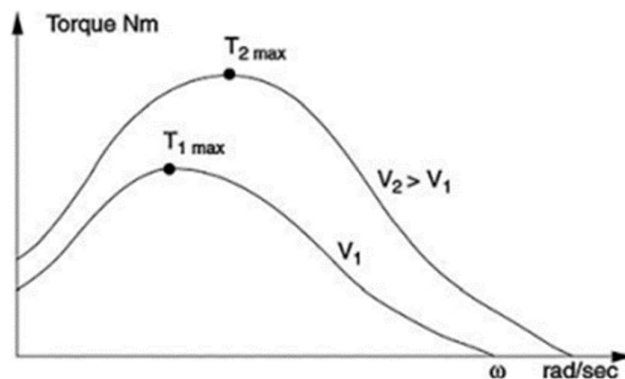
La relación entre el par de una turbina eólica y la velocidad del rotor, como se muestra en la figura 15, muestra como algunos factores afectan a la generación, por lo que, a bajas velocidades del rotor, el par es bajo, pero aumenta hasta un punto máximo antes de disminuir nuevamente a altas velocidades. Esta relación cambia con la velocidad del viento (figura 16),

lo que implica que la turbina debe ajustar continuamente su velocidad para mantener la generación de energía cercana al máximo posible (González Hernández, 2018).

La relación de velocidad de punta del aerogenerador (TSR), es crucial, ya que afecta la eficiencia del rotor ( $C_p$ ). La TSR óptima varía según el diseño aerodinámico de la turbina. Las turbinas diseñadas para operar a TSR más altas son más eficientes, pero también están sometidas a mayores tensiones mecánicas y tienen menor par de arranque. Por lo que, para mantener la TSR óptima y maximizar la eficiencia, las turbinas eólicas deben poder variar su velocidad de rotación (Becerra et al., 2020). Esto se logra mediante sistemas de control de velocidad variable, conocido como el Pitch Control, que ajustan la velocidad del rotor y el ángulo de las palas para adaptarse a las condiciones del viento. Este ajuste continuo permite que la turbina opere eficientemente y genere la máxima potencia posible.

**Figura 15.**

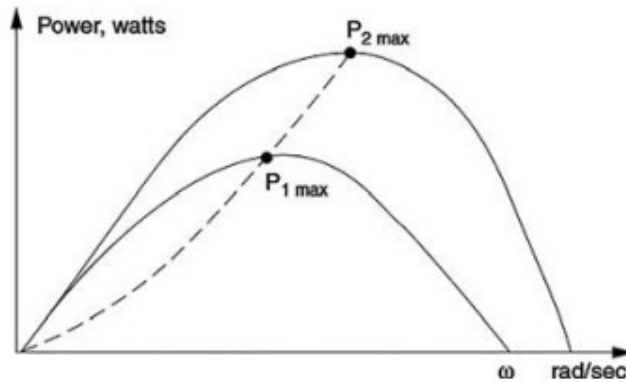
*Curvas de par en una turbina eólica versus velocidad del rotor con dos velocidades de viento distintas.*



Tomado Wind and Solar Power Systems - Design, Analysis, and Operation - Mukund R. Patel and Omid Beik. 2021.

**Figura 16.**

*Curvas de potencia en una turbina eólica versus velocidad del rotor con dos velocidades de viento distintas.*



Tomado Wind and Solar Power Systems - Design, Analysis, and Operation - Mukund R.

Patel and Omid Beik. 2021.

### **2.4.3. Límite de Betz**

Nombrado al igual que su descubridor Alberto Betz, nos indica la máxima potencia que un rotor de un aerogenerador puede aprovechar, este valor es del 59,3%, en la realidad los rotores no llegan a un porcentaje tan alto de aprovechamiento, se debe considerar la eficiencia del tren de potencia y eficiencia del generador eléctrico para encontrar su porcentaje de aprovechamiento (Andrade et al., 2020)

Gracias al avance en el diseño aerodinámico y estructural de las palas, se han alcanzado niveles de eficiencia muy altos, aproximadamente del 50%, que se acercan al límite teórico de Betz. Este avance ha mejorado significativamente el rendimiento global de conversión de energía mecánica captada por el rotor de la turbina a energía eléctrica (Hernandez & Lizarazo, 2023). Este rendimiento incluye las pérdidas por fricción mecánica en las transmisiones y las pérdidas en el generador eléctrico. En condiciones óptimas de rendimiento máximo, un gran aerogenerador puede convertir aproximadamente el 45% de la energía cinética del viento que impacta en el rotor de la turbina en energía eléctrica, alcanzando un rendimiento máximo de alrededor del 95% (Martos, 2023).

#### 2.4.4. Ecuación de continuidad – Limite de Betz

La ecuación de continuidad es fundamental en la dinámica de fluidos y se expresa como:

$$vA = v_1A_1 = v_2A_2 \quad (4)$$

Esto quiere decir que en  $A_1$  se tiene una potencia  $P_1$  en  $A_2$  se tiene una potencia  $P_2$ , de lo cual se deduce que en A se tiene una potencia P que viene dada por:

$$P = P_1 - P_2 \quad (5)$$

$$P = \frac{1}{2}\rho A_1 V_1^3 - \frac{1}{2}\rho A_2 V_2^3 \quad (6)$$

Que también se puede escribir por agrupación de factores como:

$$P = \frac{1}{2}\rho(A_1 V_1)V_1^2 - \frac{1}{2}\rho(A_2 V_2)V_2^2 \quad (7)$$

Justo en las palas, aplicando la ecuación de continuidad:

$$vA = v_1A_1 = v_2A_2 \quad (8)$$

Que al remplazar en la ecuación (7) y sacando factor común se tiene:

$$P = \frac{1}{2}\rho A v (V_1^2 - V_2^2) \quad (9)$$

Definiremos a v como la velocidad en la turbina, por tanto, como el promedio de la velocidad  $v_1$  y  $v_2$ , es así como:

$$P = \frac{1}{2}\rho A \left(\frac{v_1 + v_2}{2}\right)(V_1^2 - V_2^2) \quad (10)$$

Si consideramos que  $a = \frac{v_1}{v_2}$ , entonces  $v_2 = a * v_1$ ; que sustituido en la ecuación 4, queda:

$$P = \frac{1}{2}\rho A (v_1 + a * v_1)(V_1^2 - a^2 V_1^2) \quad (11)$$

Simplificando y agrupando términos:

$$P = \frac{1}{2} \rho A v_1^2 \frac{1}{2} (1 + a)(1 - a^2) \quad (12)$$

Llamando

$$C_p = \frac{1}{2} (1 + a)(1 - a^2) \quad (13)$$

La expresión de la potencia generada en el aerogenerador, en función de la velocidad del viento:

$$P = \frac{1}{2} \rho A C_p v_1^3 \quad (14)$$

Si llevamos a una gráfica la ecuación de  $C_p$  en función de  $a$ , sabiendo que solo puede variar en el intervalo  $[0,1]$  ( $v_2 < v_1$ )

#### **2.4.5. Distribución de Weibull**

La distribución Weibull es un análisis estadístico adecuado de los datos eólicos el cual es crucial para la evaluación del recurso eólico. La elección de la función de distribución de la velocidad del viento afecta el cálculo de la energía eólica disponible o el rendimiento de la turbina en ubicaciones seleccionadas, impactando significativamente en la rentabilidad de la inversión (Perez Montes et al., 2022).

La distribución de frecuencias de la velocidad del viento se representa mediante varias funciones de densidad de probabilidad, tales como la función gamma, la función beta, la función logarítmica, la función log-normal, y las distribuciones de Rayleigh y Weibull. Analizando la literatura y las normas internacionales, se observa que la distribución de Weibull de dos parámetros es el modelo matemático más común y ampliamente utilizado para estimar la energía eólica disponible en aplicaciones prácticas de ingeniería (Paul, 2024).

La evaluación detallada y precisa del potencial eólico de un sitio requiere el procesamiento estadístico de los datos medidos de la velocidad del viento. Generalmente, la variación en las velocidades del viento depende de factores como la geografía, ubicación, condiciones climáticas, paisaje y perfil de la superficie (Calvache & Lincango, 2024). Además,

la elección de la función de distribución del modelo depende de si los datos medidos son discretos o continuos, simétricos o asimétricos, y si los datos son asimétricos, entonces si están sesgados positiva o negativamente (Shoaib et al., 2017). Por lo tanto, la estimación de la energía eólica disponible en un sitio propuesto para la instalación de una turbina eólica es uno de los pasos preliminares en la planificación de un proyecto de energía eólica.

La función de distribución de probabilidad continua (ecuación 5), escrita por Weibull en 1951, del cual método se centró solo para energía eólica, esto por su flexibilidad, en cuanto a los parámetros que determinan las características del viento y la zona, ajustándose a los datos obtenidos experimentalmente (Corte et al., 2015).

$$f(v) = \frac{K}{C} \left(\frac{v}{C}\right)^{k-1} \exp - \left[\frac{V_{prom}}{C}\right]^k \quad (15)$$

Donde el parámetro de forma “K” no tiene unidades y se puede obtener de la siguiente manera (ecuación 6):

$$k = \left(\frac{\sigma}{V_{prom}}\right)^{-1.086} \quad (16)$$

En este caso sigma ( $\sigma$ ) es la desviación estándar obtenida a partir de la gráfica de la velocidad con respecto al tiempo. Para el factor de escala, las unidades son las mismas de la velocidad que para este caso es en m/s y está dada así (ecuación 7):

$$C = \frac{V_{prom}}{y \left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (17)$$

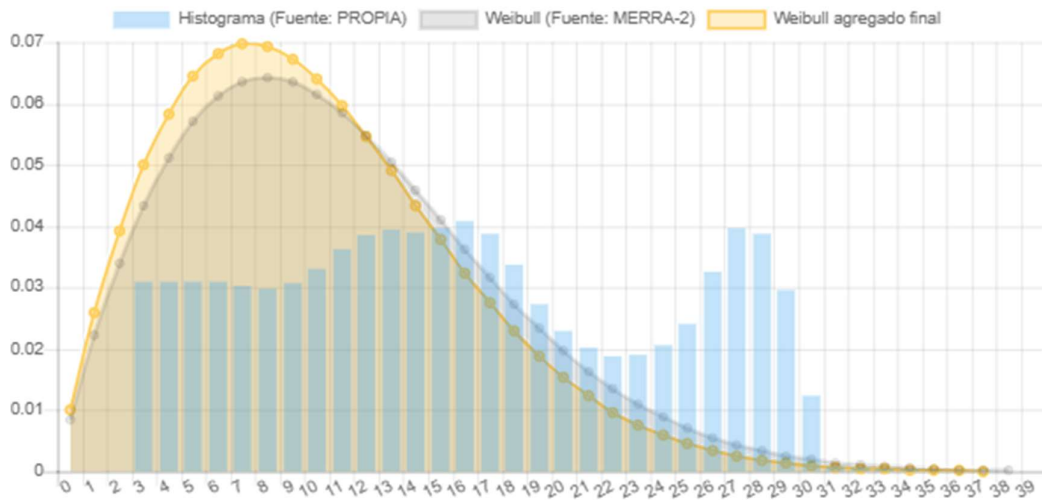
A partir de los valores de los parámetros de forma y de escala se sustituyen en la ecuación (1) y se logra conocer la distribución ajustada a la información del recurso eólico en la zona.

Para caracterizar los datos y distribuir la velocidad del viento, empleamos la reconocida distribución de Weibull, siendo esta una de sus aplicaciones más destacadas y confiables. La función de Weibull es altamente recomendada por la norma internacional IEC 61400-12 como

la función de ajuste más fiable para aproximar los datos medidos de la velocidad del viento (Shoaib et al., 2017).

La figura 17, muestra un histograma de los valores de velocidad de viento en m/s más constantes de la zona en la que se encuentra el parque eólico Villonaco, mostrando por cada velocidad de viento los valores Weibull y las medias de Weibull. Representación gráfica de cómo se reparte el historial de vientos. Tomando como referencia la zona del Parque Eólico Villonaco con coordenadas (Latitud: -4.080000 - Longitud: -79.150000), los siguientes datos fueron obtenidos de (Enair, 2024).

**Figura 17.**  
*Distribución Weibull del sitio Parque Eólico Villonaco (Loja)*



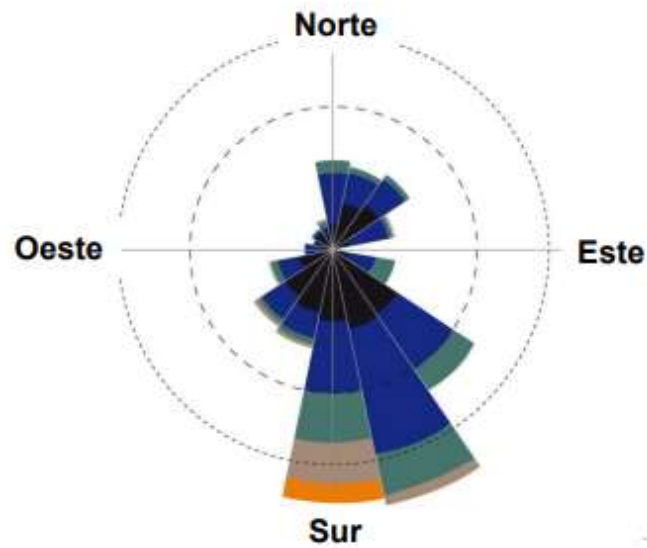
Tomado de RyseEnergy Atlas Eólico y Solar Mundial – Enair, 2024.

#### **2.4.6. Rosa de los vientos**

La distribución de las direcciones del viento es importante para el emplazamiento de las turbinas eólicas en un parque eólico. La rosa de los vientos muestra la probabilidad de un viento procedente de un determinado sector (Aragón-Moreno et al., 2019). La rosa de los vientos nos permite representar simultáneamente la relación que existe entre estas dos características que componen el viento. Es un diagrama circular en el que se dibujan 4, 8 o 16 rumbos o direcciones: Los cuatro cardinales (N, S, E, W), los cuatro laterales (NE, SE, SW,

NW) y los ocho colaterales (NNE, ENE, ESE, SSE, SSW, WSW, WNW, NNW). (Lenschak, 2022)

**Figura 18.**  
*Dirección de los vientos*

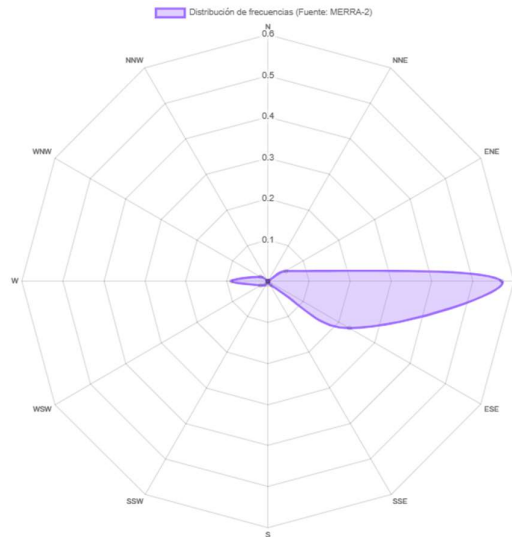


Tomado de Global Atlas de IRENA - Técnicas de planificación espacial de la energía eólica (2022)

En la figura 18, tomando como referencia la figura 17, la rosa de los vientos de dicha zona nos permite conocer los vientos predominantes, por lo que, es necesaria conocerla para

instalar los equipos manteniendo libre de obstáculos el sector predominante de vientos, como se observa en la figura 19.

**Figura 19.**  
*Rosa de los vientos del Parque Eólico Villonaco (Loja)*



Tomado de RyseEnergy Atlas Eólico y Solar Mundial – Enair, 2024.

## 2.5. Dinamómetro/fuente de alimentación de cuatro cuadrantes

El Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes es un periférico USB altamente versátil diseñado para ser utilizado en los sistemas de entrenamiento en tecnología de energía eléctrica. Dispone de dos modos de funcionamiento: Dinamómetro y Fuente de Alimentación. (Festo, 2023)

En el modo Dinamómetro, la unidad se convierte en un dinamómetro de cuatro cuadrantes que puede funcionar como un freno completamente configurable (es decir, una carga mecánica) o como un motor completamente configurable (es decir, un accionamiento de motor). En el modo Fuente de Alimentación, la unidad se convierte en una fuente de alimentación de cuatro cuadrantes que puede actuar como una fuente de voltaje de corriente continua, una fuente de corriente continua, una fuente de alimentación de corriente alterna, etc.

El Modelo 8960-F incluye el Dinamómetro/Fuente de Alimentación de Cuatro Cuadrantes, cuenta con los siguientes conjuntos de funciones activados:

- Funciones Estándar (Control Manual), Modelo 8968-1
- Funciones Estándar (Control Basado en Computadora), Modelo 8968-2
- Emulador de Turbina, Modelo 8968-3
- Cargador de Batería de Plomo-Ácido, Modelo 8968-4
- Emulador de Panel Solar, Modelo 8968-6.

**Figura 20.**

*Dinamómetro/Fuente de Alimentación de Cuatro Cuadrantes Modelo 8960-F*



Tomado de LabVolt Series by Festo Didactic—Four-Quadrant Dynamometer/Power Supply (8960-F0) [Figura], por FESTO, 2023, Labvolt Festo

[https://labvolt.festo.com/solutions/6\\_power\\_energy/50-8960](https://labvolt.festo.com/solutions/6_power_energy/50-8960)

F0\_four\_quadrant\_dynamometer\_power\_supply)

### **2.5.1. Emulador de aerogenerador**

Esta función hace que el motor de imán permanente de corriente continua del Dinamómetro/Fuente de Alimentación de Cuatro Cuadrantes reproduzca fielmente el efecto del viento en el rotor de paletas de un aerogenerador a pequeña escala. La característica de torque-velocidad en el eje de la máquina acoplada al Dinamómetro/Fuente de Alimentación de Cuatro Cuadrantes es la misma que se obtiene cuando el viento sopla a cierta velocidad en el rotor del aerogenerador real. El usuario tiene control sobre la velocidad del viento y la densidad del aire.

### ***2.5.2. LVSIM-EMS-SORTWARE***

LVSIM-EMS es un software de simulación de sistemas electromecánicos que permite realizar actividades prácticas relacionadas con la energía eléctrica y las máquinas. Es una aplicación basada en el navegador web que se puede instalar localmente en una computadora con Windows o bien instalado desde el mismo dinamómetro. El software recrea un laboratorio tridimensional en pantalla de computadora, lo que permite instalar un sistema de entrenamiento EMS utilizando un ratón.

LVSIM-EMS incluye varios módulos, como un módulo en blanco de tamaño completo, un módulo en blanco de medio tamaño, un motor/generador de corriente continua, un motor de corriente continua de imán permanente y un motor de inducción de cuatro polos tipo jaula de ardilla. El software se puede utilizar para estudiar la compensación del factor de potencia, entre otros temas.

## Capítulo III: Diseño del Proyecto

### 3. Metodología

Se hará uso de una metodología mixta, ya que esta utiliza métodos cuantitativos y cuasi cualitativos, permitiéndonos la recopilación y análisis de datos numéricos de las curvas características de la turbina. Las practicas se harán en el laboratorio de la carrera de electricidad y se utilizará un dinamómetro de cuatro cuadrantes, específicamente el modelo (8960-F0) con la función de emulador de Turbinas Eólicas Pequeñas mediante el software LVDAC-EMS.

También se dispondrá de un motor/alternador sincrónico de 4 polos que dispone el laboratorio para su acople mediante una correa dentada al módulo de dinamómetro, esto con la premisa de medir los parámetros eléctricos generados por la turbina y contrastarlos con los datos mecánicos obtenidos en el software de simulación de turbina eólica , este nos permitirá obtener los datos necesarios para completar los objetivos planteados al hacer uso de prácticas planteadas por los fabricantes del equipo y propias para simular las condiciones de viento.

El simulador utilizará una máquina de corriente continua con imán permanente para emular con precisión cómo el viento afecta al rotor de una turbina eólica a pequeña escala. La relación entre el par y la velocidad en el eje de la máquina, cuando está conectada al Dinamómetro/Fuente de Alimentación de Cuatro Cuadrantes, es idéntica a la que se experimentaría cuando el viento sopla a una velocidad específica sobre el rotor de una turbina eólica real, luego se registraran estos datos. Se tiene la capacidad de controlar tanto la velocidad del viento como la densidad del aire, razón por la cual se hará lo mismo para varias condiciones de viento que se puedan presentar.

El módulo también proporcionará datos sobre la velocidad, el par, la potencia mecánica y la energía en el eje del generador de turbina eólica. El propósito principal del Emulador de turbinas eólicas pequeñas es permitir el análisis de la operación del generador de turbina eólica sin verse afectado por las condiciones climáticas (no es necesario depender del viento), esto es

útil para el estudio de las curvas características de un aerogenerador real para diferentes velocidades del viento bajo diversas cargas conectadas en un entorno de laboratorio.

Es importante realizar la delimitación del presente documento, siendo esta únicamente la simulación en laboratorio de curvas características de la turbina y generación eléctrica, junto con su respectivo análisis en diversas condiciones de viento a las que el sistema pudiera llegar a estar expuesto

### 3.1. Descripción del módulo Dinamómetro/fuente de alimentación de cuatro cuadrantes

El Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes es diseñado para su uso en sistemas de entrenamiento en tecnología de energía eléctrica, especialmente en energías renovables. Este dispositivo cuenta con dos modos de operación: Dinamómetro y Fuente de Alimentación. (Festo, 2023)

#### 3.1.1. Conjunto de funciones – Parámetros de función

##### 3.1.1.1. Tipo de aerogenerador - 1,15m, 3 álabes

**Tabla 1.**

*Funciones de la turbina 1.15m, 3 álabes.*

Control del viento	Deslizador o Entrada de comando del modulo
Velocidad del viendo (m/s)	12
Densidad del aire	1.225
Relación de la polea	24:32 (acoplamiento por correa de distribución)
Tipo de termistor	Ninguno
Estado	Detenido o Marcha

**Control del viento:** Selecciona el modo de control de la velocidad del viento en el aerogenerador emulado. La opción Deslizador permite el control manual dicha velocidad utilizando el deslizador Velocidad del viento (m/s) de esta ventana. La opción Entrada de comando DIN./FA 4C permite regular la velocidad del viento utilizando una señal de control

aplicada a la Entrada de comando en panel frontal del Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes.

**Velocidad del viento:** Define la velocidad del viento que incide sobre el aerogenerador emulado. La velocidad del viento se puede ajustar introduciendo el valor deseado o utilizando la barra deslizante Velocidad del viento en esta ventana. El intervalo de entrada de este parámetro es de 3,0 m/s a 12,0 m/s.

**Densidad del aire:** Define la densidad del aire del viento que incide sobre el aerogenerador emulado. El intervalo de entrada de este parámetro es de 1.120 kg/m<sup>3</sup> a 1,440 kg/m<sup>3</sup>.

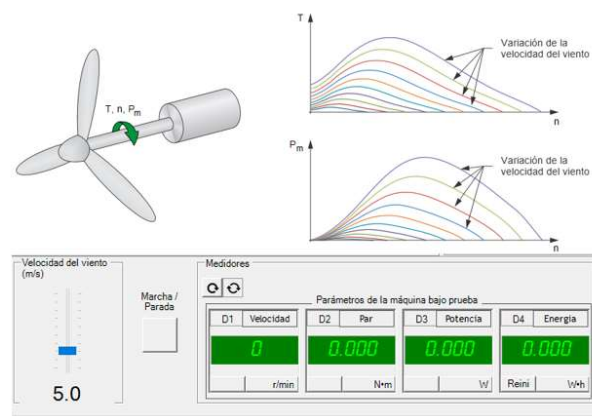
**Relación de polea:** Define la relación de transmisión entre el Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes y la máquina bajo prueba. Cabe mencionar que la relación que se utilizó dentro de todas las practicas fue de 24:24, debido a que esa era la relación del motor/alternador del laboratorio.

**Tipo de termistor:** Selecciona el tipo de termistor usado para medir la temperatura.

**Estado:** Permite poner marcha o detener la función actualmente seleccionada.

**Figura 21.**

*Tipo de aerogenerador (1,15m, 3 alabes).*



Tomado del Software Emulador Aerogenerador LVDAC-EMS de FESTO, 2024.

La figura 21, muestra cómo se comporta la turbina respecto a la variación de la velocidad del viento, respecto a los parámetros de velocidad de la máquina, par y potencia mecánica.

### 3.1.1.2. Tipo de aerogenerador - 1,15 m, 3 álabes con caja de engranajes

**Tabla 2.**

*Funciones de la turbina 1,15 m, 3 álabes con caja de engranajes.*

Control del viento	Deslizador o Entrada de comando del modulo
Velocidad del viento (m/s)	12
Densidad del aire (Kg/m <sup>3</sup> )	1.225
Inercia J (kg*m <sup>2</sup> )	0.028
Relación de engranajes R	1.00
Relación de polea	24:32 (acoplamiento por correa de distribución)
Tipo de Termistor	Ninguno
Estado	Detenido o Marcha

Respecto a este tipo de aerogenerador, este cuenta con algunas funciones que la turbina de la figura 21 tiene, como velocidad de viento, densidad del aire, relación de polea, tipo de termistor y estado. Por lo que, las nuevas funciones de este tipo de turbina son:

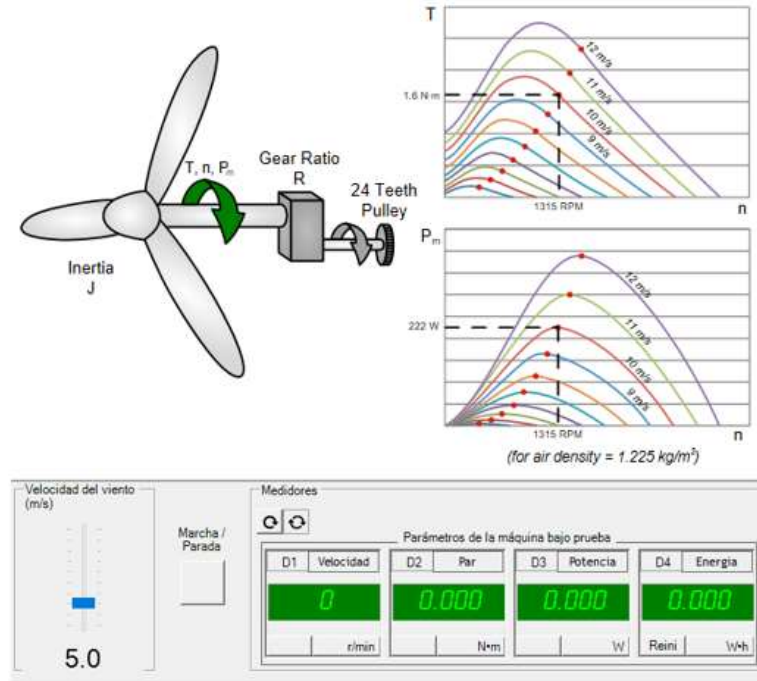
**Inercia:** Ajusta el momento de inercia de la unión palas/buje en el aerogenerador emulado. Cuanto mayor es el momento de inercia de dicha unión, mayor es la resistencia del aerogenerador a los cambios en su velocidad de rotación. El intervalo de entrada de este parámetro es de 0,02 kg m<sup>2</sup> a 0,40 kg m<sup>2</sup> (0.475 lb pies<sup>2</sup> a 9,492 lb pies<sup>2</sup>).

**Relación de engranajes:** Define la relación de la caja de engranajes del aerogenerador emulado. Dicha relación es igual al número de dientes del engranaje del eje del rotor de palas fijado en el aerogenerador emulado dividido por el número de dientes del engranaje del eje real el Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes (eje con una polea de 24 dientes). El intervalo de entrada de este parámetro es de 0,5 a 6.0.

Por otra parte, la figura 22, muestra el comportamiento de la turbina con caja de engranajes, del mismo modo para diferentes velocidades de viento.

**Figura 22.**

*Tipo de aerogenerador - 1,15 m, 3 álabes con caja de engranajes.*



Tomado del Software Emulador Aerogenerador LVDAC-EMS de FESTO, 2024.

**3.1.1.3. Tipo de aerogenerador - 0,72 m, 3 álabes con bloqueo pasivo**

**Tabla 3.**

*Funciones de la turbina 0,72 m, 3 álabes con bloqueo pasivo.*

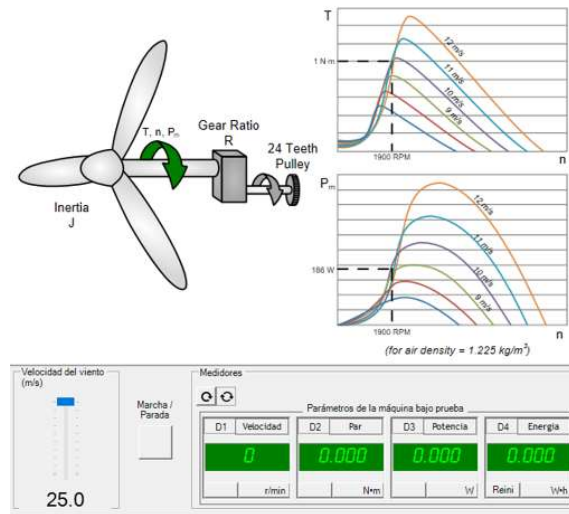
Control del viento	Deslizador o Entrada de comando del modulo
Velocidad del viento (m/s)	24
Densidad del aire (Kg/m <sup>3</sup> )	1.225
Inercia J (kg*m <sup>2</sup> )	0.028
Relación de engranajes R	1.00
Relación de polea	24:32 (acoplamiento por correa de distribución)
Tipo de Termistor	Ninguno
Estado	Detenido o Marcha

Como se puede observar, las funciones de esta turbina son las mismas que la turbina anterior, pero algo en particular que si tiene esta es su característica de control pasivo, se refiere a un tipo de aerogenerador que utiliza mecanismos pasivos es decir propios de la construcción de la turbina para limitar la velocidad de rotación del rotor y protegerse contra daños en condiciones de viento elevado.

Dentro de este control, el deslizador de este tipo puede variar de 3 a 25 m/s de velocidad de viento, como se puede visualizar en la figura 23, donde se puede analizar cuyo comportamiento de la turbina bajo esos efectos de control pasivo.

**Figura 23.**

*Tipo de aerogenerador - 0,72 m, 3 álabes con bloqueo pasivo.*



Tomado del Software Emulador Aerogenerador LVDAC-EMS de FESTO, 2024.

**3.1.1.4. Tipo de aerogenerador - 1,15 m, 3 aspas con caja de engranajes y control de paso**

**Tabla 4.**

*Funciones de la turbina 1,15 m, 3 aspas con caja de engranajes y control de paso*

Control del viento	Deslizador o Entrada de comando del modulo
Velocidad del viendo (m/s)	24

<b>Densidad del aire (Kg/m3)</b>	1.225
<b>Límite de potencia del ángulo de paso automático</b>	Apagado o Encendido
<b>Angulo de paso (°)</b>	0
<b>Inercia J (kg*m2)</b>	0.028
<b>Relación de engranajes R</b>	1.00
<b>Relación de polea</b>	24:32 (acoplamiento por correa de distribución)
<b>Tipo de Termistor</b>	Ninguno
<b>Estado</b>	Detenido o Marcha

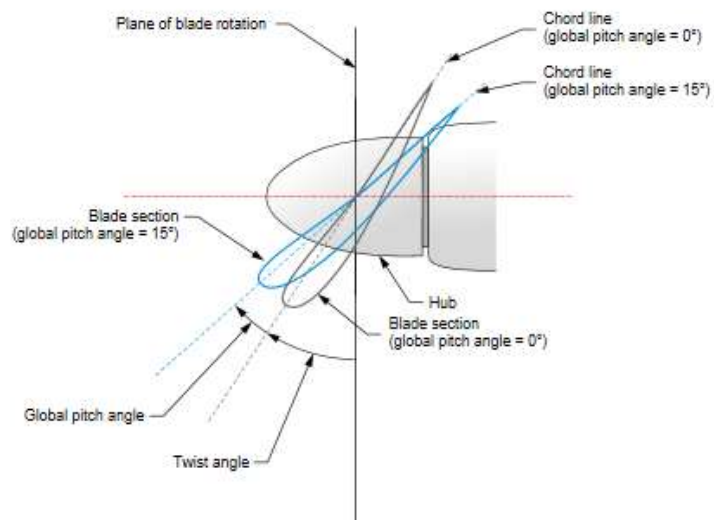
En relación con este tipo de turbina esta cuenta con las mismas funciones de las turbinas anterior, pero si cuenta con dos funciones adicionales, que con las siguientes:

**Límite de potencia del ángulo de paso automático:** Esta función limita la potencia del ángulo de paso, si es automática o no.

**Ángulo de paso:** Ajusta el ángulo de las aspas del aerogenerador emulado. El intervalo de entrada de este parámetro es de  $0.0^\circ$  a  $30,0^\circ$ . La figura 24 muestra el ángulo de paso de las aspas de la turbina.

**Figura 24.**

*Ángulo de paso de las aspas de la turbina.*

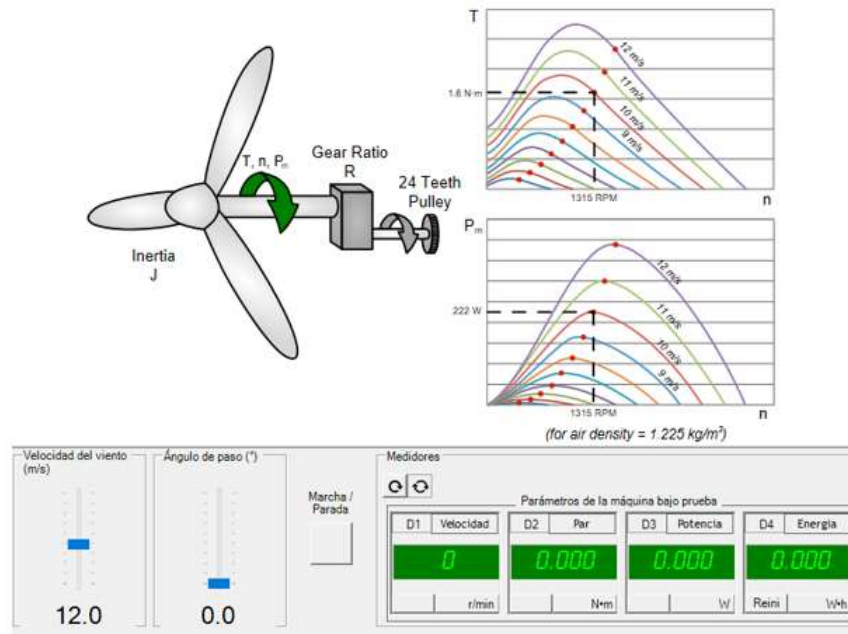


Tomado del Software Emulador Aerogenerador LVDAC-EMS de FESTO, 2024.

La figura 25, muestra el comportamiento de este tipo de turbina, la diferencia con las demás es que se puede trabajar con velocidades más altas que 12 m/s, permitiendo regular la potencia máxima que entrega la turbina mediante el ángulo de las palas del aerogenerador.

**Figura 25.**

*Tipo de aerogenerador - 1,15 m, 3 aspas con caja de engranajes y control de paso*



El dinamómetro/fuente de alimentación de cuatro cuadrantes se alimenta de un receptáculo de pared estándar a través de un cable de línea que se conecta al panel frontal del módulo. El módulo contribuye al ahorro de energía devolviendo la energía mecánica o eléctrica que recibe a la red de corriente alterna, manteniendo un factor de potencia unitario, como se muestra en la figura 26.

**Figura 26.**

*Energía eléctrica que recibe la red por parte del dinamómetro.*



Tomado de Presentation - Four Quadrant Dynamometer/Power supply – LabVolt Series 8960-20, Festo Didactic – LabVolt Series, 2012.

### 3.1.2. Especificaciones técnicas

**Tabla 5.**

*Especificaciones técnicas de dinamómetro de cuatro cuadrantes*

Parámetros	Valor
<b>Modo Dinamómetro</b>	
Par Magnético	0 a 3 N*m (0 a 27 lbf-in)
Sentido de Rotación	0 a 2500 r/min
Potencia nominal	350 W
<b>Modo de Alimentación</b>	
Tensión CC	0 a +- 150 V
Tensión CA (RMS)	0 a 105 V (sin carga)
Corriente continua	0 a +- 5 A
Corriente alterna (RMS)	0 a 3,5 A
Potencia máxima de salida	500 W

Frecuencia CA	10 a 120 Hz
<b>Funciones de control</b>	
Conjuntos activados	Funciones estándar (control manual) Funciones estándar (control por PC) Emulador de turbina Cargador de baterías de plomo-acido Emulador de panel solar
<b>Entradas de control</b>	
Entrada de comandos	0 a +- 10 V
Entrada de termistor	10 K $\Omega$ , Tipo 1
<b>Salidas de control</b>	
Codificador de eje	Codificador en cuadratura (A-B)
Sensibilidad de salida de par	0,3 N*m/V (2,655 lbf-in/V)
Sensibilidad de salida de velocidad	500 r/min/V
Puerto de comunicación	USB 2.0
Requisitos de potencia	120 V -6 A - 60 Hz
<b>Características físicas</b>	
Dimensiones (Al x An x Pr)	308x286x490 mm (12,1x11,3x19,3 plg)
Peso neto	19,5 kg (43,0 lb)

## 3.2. Selección de Instrumentos y Equipos

### 3.2.1. Módulo Dinamómetro/fuente de alimentación de cuatro cuadrantes

**Figura 27.**

*Dinamómetro/Fuente de Alimentación de Cuatro Cuadrantes Modelo 8960-F con emulador de aerogenerador*



Tomado de LabVolt Series by Festo Didactic—Four-Quadrant Dynamometer/Power Supply (8960-F0) [Figura], por FESTO, 2023, Labvolt Festo ([https://labvolt.festo.com/solutions/6\\_power\\_energy/50-8960](https://labvolt.festo.com/solutions/6_power_energy/50-8960))

### 3.2.2. Módulo Fuente de Alimentación (LabVolt)

El módulo de fuente de alimentación variable de la marca FESTO, Serie LabVolt, está diseñado para suministrar voltaje trifásico AC variable o fijo. Proporciona voltajes de 0 a 120/208 variables o fijo de 120/208, con una corriente nominal de 15 amperios. Además, ofrece voltaje en CC y otras características técnicas que se pueden encontrar en la página oficial de (FESTO, 2023). Este módulo es de gran importancia debido a que es la fuente con la que se alimenta al módulo de motor/alternador y permite realizar las diversas prácticas manteniendo un voltaje fijo y controlado en el lado emisor de la línea.

El módulo se encuentra en el laboratorio de potencia de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí para fines académicos.

**Figura 28.**

*Modulo fuente de alimentación variable*



Tomado de <https://labvolt.festo.com/>, por FESTO,2023.

### **3.2.3. Módulo de Carga Resistiva (LabVolt)**

El módulo carga resistiva de la marca FESTO- Serie LabVolt es un equipo diseñado para trabajar con 120 voltios AC/DC, a frecuencia de 60 Hertz, está conformado por tres bancos de resistencias, cada banco está constituido por tres resistencias con valores iguales en paralelo de 1200, 600, 300 ohm, cada una con su respectivo interruptor para ajustar a la carga que uno desea. La potencial nominal esta entre los rangos de 12-84 vatios con una corriente de 0.1-0.7 amperios según las resistencias activadas (FESTO, 2023)

Este módulo permitió realizar los estudios de los cambios en los parámetros eléctricos de la turbina eólica, permitiendo ver varios escenarios cuando se aumenta y se disminuye los valores de resistencias. El módulo se encuentra en el laboratorio de potencia de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí para fines académicos.

**Figura 29.**

*Módulo de Carga Resistiva (LabVolt)*



Tomado del Laboratorio de potencia de la Facultad de Ingeniería de la carrera de Electricidad, 2024.

### **3.2.4. Motor/Alternador Sincrónico (LabVolt)**

El motor/generador sincrónicos con salida de termistor es una maquina trifásica que puede funcionar de tres formas, ya sea como motor, un generador o un condensador sincrónico, se puede acceder a sus tres bobinados del estator mediante los terminales que se ubican en el panel frontal del módulo, se puede configurar en delta o estrella, y posee otros terminales que se encuentran en el mismo panel frontal con otras funciones, este equipo es de la marca FESTO-Serie LabVolt, el voltaje requerido es de 120/208, como generador el voltaje de salida es de 120/208 trifásico a una potencia de 200VA a un FP de 0,8. Los demás datos técnicos se podrán encontrar en la página oficial (FESTO, 2023).

Este motor/alternador es crucial porque puede funcionar como generador cuando se lo alimenta con corriente continua. El equipo se encuentra en el laboratorio de potencia de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí para propósitos académicos.

**Figura 30.**

*Motor/Alternador síncrono*



Tomado de <https://labvolt.festo.com/>, por Festo, 2023.

### **3.2.5. Pinza Amperimétrica**

Las pinzas amperimétricas permiten la medición de corriente de forma indirecta mediante un gancho que se coloca alrededor del conductor eléctrico, también cuentan con varias funciones de medición adicionales como tensión o frecuencia de la red, estas características permiten la medición segura de los parámetros antes mencionados y sin tener que desconectar el circuito (FLUKE, 2024)

**Figura 31.**

*Pinza amperimétrica*



Tomado de <https://www.rolumed.com/MCO-2309895672-pinza-amperimetrica-digital-intendvision-ht206d-trms-600-a- JM> , por Rolumed, 2024.

### 3.2.6. *Multímetro*

Como lo indica su nombre, un multímetro permite la medición de varios parámetros eléctricos, tales como la tensión (V), corriente (A), resistencia (ohm), continuidad, etc. Al ser una herramienta practica permite su utilización en varios ámbitos como la ingeniería eléctrica o electrónica (FLUKE, 2024), tal como se muestra en la figura 32, los multímetros que poseen una medición de true rms tienen la mayor precisión en el mercado.

**Figura 32.**

*Multímetro true rms*



Tomado de: <https://prosinfer.com.pe/producto/multitesters-digital-truper-100360-profesional/> , por PROSINFER, 2022.

### 3.2.7. *Conectores*

Se utilizaron conectores macho tipo banana de 4mm para las conexiones y poder realizar las prácticas, estos se muestran en la figura 33 con sus respectivos colores.

### Figura 33.

*Conectores bananas para pruebas*



Tomado de Amazon.es, por Amazon,2023.

### 3.3. Procedimiento de las practicas

En cada practica se utilizaron los elementos de protección personal, se realizaron las conexiones entre los módulos siempre que estos estuvieran apagados y desenergizados, no se manipulo ningún aspecto mecánico del dinamómetro mientras estaba girando, ni tampoco se realizaron conexiones de cables banana o manipulación de circuitos mientras los módulos estaban energizados, adicionalmente antes de empezar con la ejecución de las practicas, se explicó al tutor lo que se tenía pensado hacer, para posteriormente pedir una revisión de la banda de caucho acoplada al dinamómetro y de las conexiones eléctricas del generador con la carga.

#### 3.3.1. *Practica 1: Producción eólica de energía mecánica en aerogenerador*

Esta práctica se centró en la utilización del recurso eólico para la generación de energía mecánica mediante un aerogenerador de 1,15 m con 3 álabes, utilizando como datos del viento, los del sitio Urdaneta (Provincia de Los Ríos), los datos de densidad se presentan a continuación, los mismos fueron tomados del MERRA 2 de la NASA.

- Densidad del aire de enero a junio:  $0.962 \text{ (Kg/m}^3\text{)}$
- Densidad del aire de julio a diciembre:  $0.972 \text{ (Kg/m}^3\text{)}$

Debido a que el software permite la entrada de densidad del aire desde 1.12 a 1.44 (Kg/m<sup>3</sup>) es necesario ajustar la densidad al rango que nos permite el emulador, esto se hará basándonos en la ecuación de la potencia generada por una turbina eólica que incluye el límite Betz, esta indica una relación directamente proporcional entre la potencia del viento y la densidad del aire, esto nos permitirá calcular la potencia mecánica para los valores disponibles de densidad del emulador de aerogenerador, para posteriormente aplicar un factor de corrección y encontrar la potencia mecánica del aerogenerador para las condiciones reales del sitio. Por lo que, para la simulación:

- Densidad del aire de enero a junio: 1.120 (Kg/m<sup>3</sup>)
- Densidad del aire de julio a diciembre: 1.131 (Kg/m<sup>3</sup>)
- Factor de conversión de densidad y por lo tanto potencia (real/emulador):  
0.8589

En la tabla 6, se presentan las velocidades del viento en el sitio Urdaneta (Provincia de Los Ríos) tomados de Enair Ryse Energy y los datos de densidad del aire a utilizados en la práctica.

**Tabla 6.**

*Condiciones del viento en el sitio Urdaneta (Provincia de Los Ríos)*

Mes	Velocidad del Viento (m/s)	Densidad del aire (kg/m <sup>3</sup> ) *
enero-23	5,50	1.120
febrero-23	5,40	1.120
marzo-23	5,80	1.120
abril-23	6,50	1.120
mayo-23	7,00	1.120
junio-23	9,70	1.120
julio-23	10,40	1.131
agosto-23	10,00	1.131
septiembre-23	9,40	1.131
octubre-23	5,80	1.131
noviembre-23	4,40	1.131
diciembre-23	5,00	1.131

*Nota.* \*Ajustada para estar dentro del rango de densidad del aire del emulador. Fuente: Enair Ryse Energy

El objetivo de la practica 1 es:

- Evaluar la producción de energía mecánica en vacío de un aerogenerador en función de condiciones meteorológicas reales.

A continuación, se describen los pasos para realizar la practica:

1. Colocar el Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes en la estructura porta módulos de LabVolt del laboratorio y seleccionar la función de dinamómetro en el selector de modo de operación.
2. Realizar la conexión del cable USB a la computadora con el software de LV-SIM/EMS previamente instalado y posteriormente enchufar la clavija de alimentación del módulo a la toma eléctrica.
3. Entrar al software LV-SIM/EMS y seleccionar la función Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes y posteriormente en apartado de función, emulador de aerogenerador.
4. Configurar la densidad del aire y el tipo de aerogenerador en base a los datos proporcionados en la fundamentación, y la relación de la polea en 24:24.
5. Abrir la tabla de datos en el software y en parámetros de registro marcar los parámetros de velocidad, potencia y velocidad del viento
6. Ubicar en el apartado de velocidad del viento, la primera velocidad proporcionada en la fundamentación y presionar el botón de marcha/parada.
7. Registrar los valores absolutos de velocidad, potencia y energía mecánica del aerogenerador.
8. Modificar los valores de velocidad del viento de acuerdo con los datos proporcionados en la fundamentación y repetir el paso 6.

9. Disminuir paulatinamente la velocidad del aire hasta el valor de 5 metros por segundo y apagar el emulador (presionar el botón de marcha/parada).

Los resultados obtenidos para esta práctica se observan en la tabla 7:

**Tabla 7.**

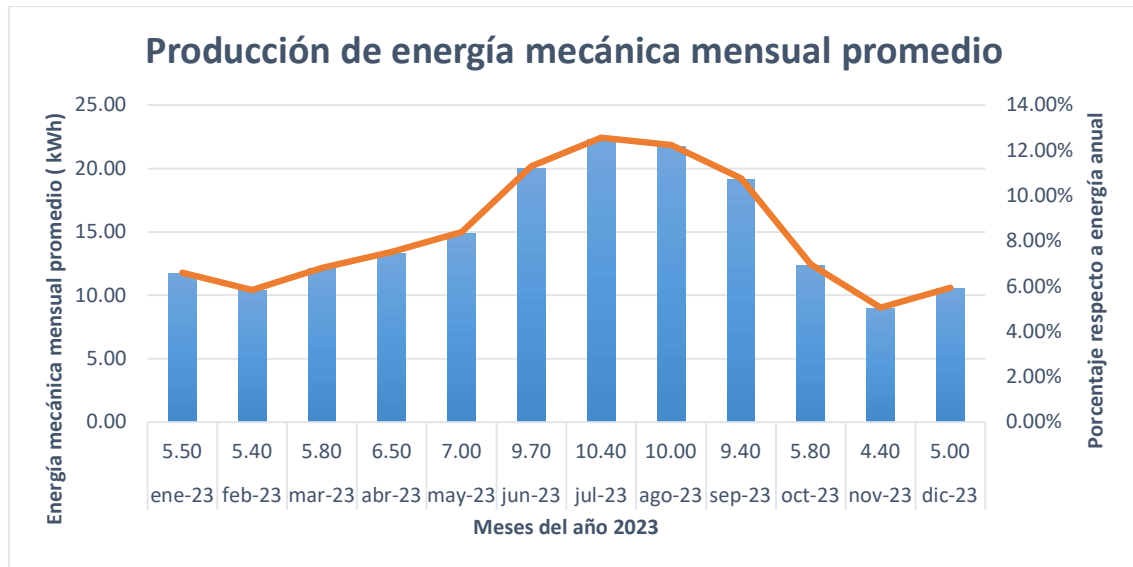
*Producción eólica promedio de energía mecánica en vacío del sitio Urdaneta*

Producción eólica promedio de energía mecánica en vacío							
	Velocidad del viento	Velocidad de rotación del eje	Potencia mecánica del emulador	Potencia mecánica corregida con factor	Energía mecánica	Energía mecánica mensual promedio	Porcentaje mensual
Meses	m/s	r/min	W	W	kWh	kWh/mes	Porcentaje
ene-23	5.50	1215	18.32	15.74	0.01574	11.71	6.60%
feb-23	5.40	1209	17.91	15.38	0.01538	10.34	5.83%
mar-23	5.80	1269	18.92	16.25	0.01625	12.09	6.82%
abr-23	6.50	1399	21.54	18.50	0.01850	13.32	7.51%
may-23	7.00	1497	23.28	20.00	0.02000	14.88	8.39%
jun-23	9.70	2002	32.41	27.84	0.02784	20.04	11.30%
jul-23	10.40	2130	34.86	29.94	0.02994	22.28	12.56%
ago-23	10.00	2056	33.95	29.16	0.02916	21.69	12.24%
sep-23	9.40	1942	30.89	26.53	0.02653	19.10	10.77%
oct-23	5.80	1265	19.31	16.59	0.01659	12.34	6.96%
nov-23	4.40	1020	14.52	12.47	0.01247	8.98	5.06%
dic-23	5.00	1125	16.48	14.15	0.01415	10.53	5.94%
<b>Total (kWh/año)</b>						<b>177.30</b>	<b>100.00%</b>

El comportamiento de los datos obtenidos en la tabla 7 se presentan en las curvas de producción de energía mecánica mensual promedio y el porcentaje de aportación a la energía anual presentados en la figura 34:

**Figura 34.**

*Producción de energía mecánica mensual promedio del sitio Urdaneta*



### **3.3.1.1. Análisis de la practica 1**

Se puede analizar en esta práctica como la velocidad del viento influye en la producción de energía mecánica producida por el aerogenerador, esto con se observa con una mayor tendencia si se cuentan con mayores velocidades del viento, logrando así en estos meses una mayor producción de energía mecánica mensual promedio.

### **3.3.1.2. Conclusiones de la practica 1**

Se concluye que la producción de energía mecánica promedio anual fue de 177.30 kWh, se pudo observar la mayor producción en el mes de julio, la cual ocurrió con la mayor velocidad promedio mensual de 10,40 (m/s) y densidad del aire de 1.131 (Kg/m<sup>3</sup>).

Se comprobaron las relaciones de velocidad del viento y potencia mecánica generada por un aerogenerador mediante la visualización de la curva de producción de energía mecánica mensual promedio; concluyendo que estos parámetros son directamente proporcionales, tal como fue mostrado en la fundamentación teórica.

### 3.3.2. *Practica 2: Eficiencia de un aerogenerador*

Esta práctica se centra en el cálculo de la eficiencia en la conversión de energía mecánica producida por la turbina de un aerogenerador a eléctrica por medio de un generador síncrono haciendo uso de una resistencia de 200 ohm por fase, esto con el fin de obtener los por porcentajes de eficiencia para cada velocidad del viento desde 4 a 12 (m/s) para un aerogenerador de 1,15 m con 3 álabes.

Los objetivos de la practica 2 son:

- Evaluar la eficiencia de un aerogenerador para distintas velocidades de viento manteniendo la densidad del viento y la carga conectada constantes.
- Analizar el comportamiento de las curvas de potencia mecánica de entrada y de potencia eléctrica de salida.

A continuación, se describen los pasos para realizar la practica:

1. Colocar los módulos indicados en la caja porta módulos de LabVolt, el dinamómetro de cuatro cuadrantes debe colocarse en el medio, al lado derecho debe estar el alternador, del lado izquierdo la fuente de alimentación, adicional se agregará el módulo de cargas resistivas que se ubicará en la parte superior de la fuente de alimentación.
2. Realizar la conexión en estrella en los bornes 4, 5 y 6 del alternador sincrónico, y conectar los bornes 7 y 8 a la fuente de alimentación en DC para la excitatriz
3. Conectar en estrella el final de cada resistencia y seleccionar 200 ohm de carga por fase (paralelo entre resistencias de 600 y 300 ohm), para luego conectar los bornes 1,2 y 3 del alternador a cada una de las cargas resistivas
4. Conectar en paralelo un multímetro en los bornes 1 y 2 del alternador sincrónico
5. Colocar en serie un multímetro con el cable de alimentación que va del borne 1 del alternador sincrónico a la carga resistiva

6. Conectar el cable de adquisición de datos del dinamómetro hacia la PC
7. Conectar la alimentación del dinamómetro, primero desde el módulo luego hacia el tomacorriente
8. Se enciende el dinamómetro y se abre el software LVSIM desde la PC
9. Colocar el switch en modo dinamómetro en el módulo para posterior escoger la función de aerogenerador turbina eólica en el software
10. Revisar los parámetros correctos para el arranque; relación de polea 24:24; tipo de aerogenerador 1,15m/3alabes; densidad del aire 1.225 (kg/m<sup>3</sup>)
11. Abrir la tabla de datos en el software y en parámetros de registro marcar los parámetros de velocidad, par, potencia y velocidad del viento
12. Colocar la velocidad de arranque en 5 m/s, encender el circuito de excitación del generador y posteriormente la fuente de alimentación.
13. Dar marcha al emulador, esperar que el sistema se estabilice un momento, para luego llevar la velocidad a 4 m/s
14. Registrar los valores de velocidad, par, potencia y velocidad del viento
15. Registrar los valores de voltaje de línea y de corriente de fase visualizados en los multímetros
16. Aumentar la velocidad del viento en 1 m/s y repetir los pasos 12 y 13 nuevamente, repetir este paso hasta llegar a la velocidad de viento de 12 m/s
17. Se procede a detener el emulador con el botón de marcha/parada y con el apagado de los equipos, en primer lugar, la fuente de alimentación, segundo lugar el dinamómetro y por último se procede con la desconexión de los enchufes de cada módulo.

Los resultados obtenidos para esta práctica se observan en la tabla 8:

**Tabla 8.**

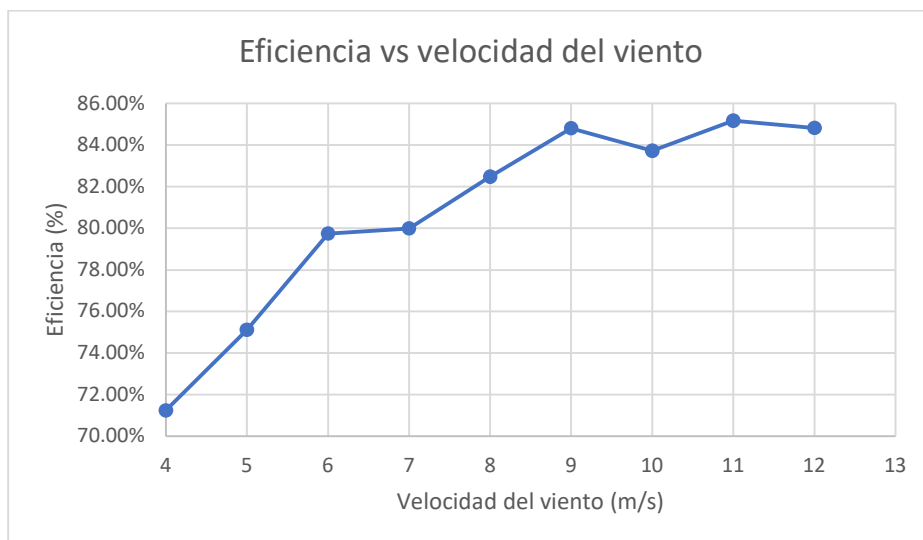
Eficiencia en proceso de conversión de energía mecánica en turbina eólica.

Velocidad del viento	Velocidad de rotación del aerogenerador	Par en el rotor del aerogenerador	Potencia mecánica en el rotor del aerogenerador	Voltaje de la línea de carga	Corriente de la carga	Potencia eléctrica trifásica	Eficiencia
m/s	r/min	(N.m)	W	V	A	W	%
4	482	0.262	13.25	54.5	0.1	9.44	71.24%
5	662	0.336	23.27	74.2	0.136	17.48	75.11%
6	839	0.398	34.98	93.1	0.173	27.90	79.75%
7	1039	0.485	52.81	114.5	0.213	42.24	79.99%
8	1227	0.552	70.98	135.2	0.25	58.54	82.48%
9	1422	0.617	91.89	155.7	0.289	77.94	84.82%
10	1613	0.707	119.5	176.1	0.328	100.04	83.72%
11	1820	0.777	148.1	197.9	0.368	126.14	85.17%
12	2005	0.852	179	217	0.404	151.85	84.83%

El comportamiento de los datos obtenidos en la tabla 8 se presenta en la figura 35:

**Figura 35.**

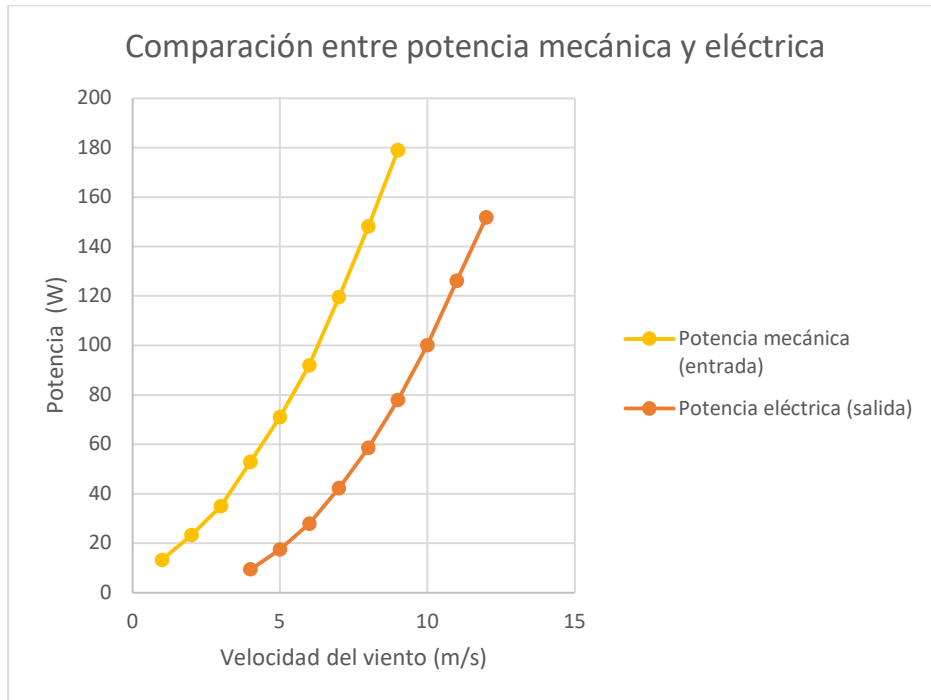
*Eficiencia vs velocidad del viento*



Una comparación entre las potencias mecánicas calculadas en la tabla 8 se presenta en la figura 36:

**Figura 36.**

*Comparación entre potencia mecánica y eléctrica para distintas velocidades de viento*



### 3.3.2.1. Análisis de la practica 2

Es posible analizar el proceso de conversión de energía mecánica producida por un aerogenerador a energía eléctrica entregada a una carga a diferentes velocidades de viento, notándose un incremento notorio desde la eficiencia más baja que fue de 71.24% hasta la mayor de 84.83 %, mientras que para la producción de potencia mecánica y eléctrica se observa un comportamiento exponencial, esto concuerda con la teoría que indica una dependencia cubica con respecto a la velocidad del viento, además de observarse que la potencia eléctrica es siempre menor a la mecánica.

### 3.3.2.2. Conclusiones de la practica 2

La eficiencia calculada en la conversión de energía mecánica a eléctrica fue del 85.17% con una velocidad del viento de 11 (m/s), mientras que para 4 (m/s) de velocidad del viento, el

porcentaje de conversión fue del 71.24%; estos dos valores son el mayor y menor porcentaje de eficiencia calculados con una resistencia constante de 200 ohm y sin variar la densidad del aire.

Se concluye en base a los resultados obtenidos que la eficiencia aumenta a medida que se incrementa la velocidad del viento, adicional se observó que la curva de potencia mecánica esta antes de la curva de potencia eléctrica, esto ocurre debido a las pérdidas en el proceso de conversión, además ambas curvas presentan una tendencia exponencial que concuerda con el criterio expuesto en la fundamentación acerca de la potencia del viento que circula por las palas.

### ***3.3.3. Practica 3: Aerogenerador con voltaje de salida constante***

Esta práctica se centra en la regulación para lograr que el aerogenerador mantenga constante el voltaje de salida en el generador síncrono acoplado al eje de las turbinas bajo condiciones de carga y en vacío, esto se logra mediante el control del circuito de excitación del generador, ya que, en máquinas eléctricas la tensión inducida depende del flujo magnético y de la velocidad de rotación de la máquina, sabiendo que este último es variable debido a las cambiantes condiciones del viento, el mecanismo que se puede utilizar es la regulación del flujo magnético mediante el circuito de excitación.

Esta práctica utiliza velocidades del viento de 5 a 10 m/s para aerogenerador en vacío y de 7 a 10 m/s para una carga conectada de 300 ohm, con una densidad de  $1.225 \text{ kg/m}^3$

Los objetivos de la practica 3 son:

- Analizar el comportamiento de las curvas velocidad de rotación del aerogenerador y voltaje del circuito de excitación en vacío y con carga.
- Determinar la relación de las curvas velocidad de rotación del aerogenerador y par en el rotor del aerogenerador con la potencia entregada a la carga.

A continuación, se describen los pasos para realizar la practica:

1. Colocar los módulos indicados en la caja porta módulos de LabVolt, el dinamómetro de cuatro cuadrantes debe colocarse en el medio, al lado derecho debe estar el alternador, del lado izquierdo la fuente de alimentación, adicional se agregará el módulo de cargas resistivas que se ubicará en la parte superior de la fuente de alimentación.
2. Realizar la conexión en estrella en los bornes 4, 5 y 6 del alternador sincrónico, y conectar los bornes 7 y 8 a la fuente de alimentación en DC para la excitatriz
3. Conectar en estrella el final de cada resistencia y colocar el interruptor en vacío del módulo (apagado), para luego conectar los bornes 1,2 y 3 del alternador a cada una de las cargas resistivas
4. Conectar en paralelo un multímetro en los bornes 1 y 2 del alternador sincrónico
5. Colocar en serie un multímetro con el cable de alimentación que va del borne 1 del alternador sincrónico a la carga resistiva
6. Colocar en paralelo un multímetro con el circuito de excitación del generador síncrono
7. Conectar el cable de adquisición de datos del dinamómetro hacia la PC
8. Conectar la alimentación del dinamómetro, primero desde el módulo luego hacia el tomacorriente
9. Se enciende el dinamómetro y se abre el software LVSIM desde la PC
10. Colocar el switch en modo dinamómetro en el módulo para posterior escoger la función de aerogenerador turbina eólica en el software
11. Revisar los parámetros correctos para el arranque; relación de polea 24:24; tipo de aerogenerador 1,15m/3alabes; densidad del aire 1.225 (kg/m<sup>3</sup>)

12. Abrir la tabla de datos en el software y en parámetros de registro marcar los parámetros de velocidad, par, potencia y velocidad del viento
13. Colocar la velocidad de arranque en 5 m/s
14. Dar marcha al sistema, esperar que se establezca unos segundos y se observen parámetros estables
15. Regular la excitación del generador síncrono mediante su perilla de excitación hasta que el valor de tensión DC sea de 120 voltios DC.
16. Registrar los valores de velocidad, par, potencia y velocidad del viento
17. Registrar los valores de voltaje de línea, del circuito de excitación y corriente de fase visualizados en los multímetros
18. Aumentar la velocidad del viento en base a la tabla proporcionada en la fundamentación y repetir los pasos 12, 13 y 14 nuevamente
19. Detener el emulador con el botón de marcha/parada y cambiar el valor de resistencias por fase a 300 ohm
20. Colocar el valor inicial de velocidad del viento en 7 m/s y repetir los pasos 12, 13, 14 y 15
21. Se procede a detener el emulador con el botón de marcha/parada y con el apagado de los equipos, en primer lugar, la fuente de alimentación, segundo lugar el dinamómetro y por último se procede con la desconexión de los enchufes de cada módulo.

Los resultados obtenidos para esta práctica se observan en la tabla 9:

**Tabla 9.**

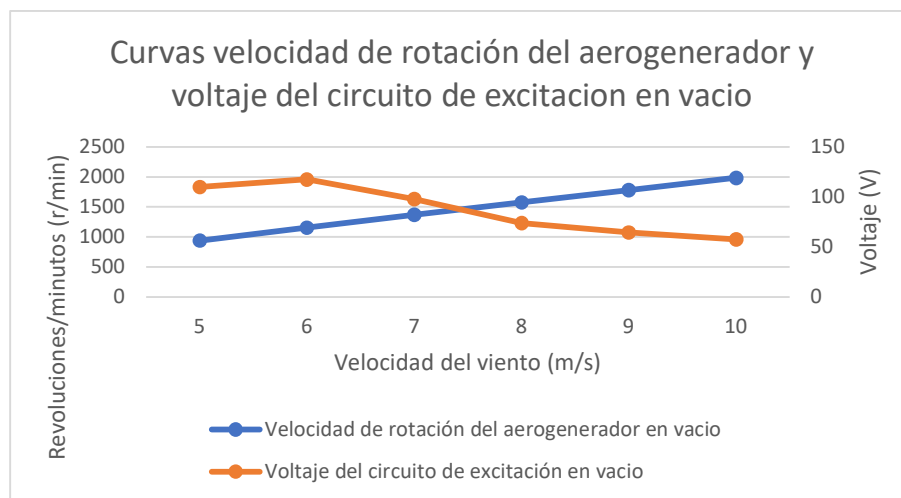
Regulación del voltaje de salida del aerogenerador en vacío

Velocidad del viento	Velocidad de rotación del aerogenerador en vacío	Par en el rotor del aerogenerador en vacío	Potencia mecánica en el rotor del aerogenerador en vacío	Voltaje del circuito de excitación en vacío	Voltaje de línea de la carga
m/s	r/min	(N.m)	W	V	V
5	938	0.054	5.275	110	120
6	1158	0.041	4.923	117.6	120
7	1370	0.025	3.544	97.8	120
8	1579	0.005	0.876	74	120
9	1784	0	0.037	64.5	120
10	1985	0.001	0.291	57.6	120

Las curvas del comportamiento de la velocidad del eje del aerogenerador y el voltaje en generador síncrono obtenidos en la tabla 9 se presentan en la figura 37:

**Figura 37.**

*Curvas velocidad de rotación del aerogenerador y voltaje del circuito de excitación en vacío*



La regulación del voltaje para una carga de 300 ohm se presenta en la tabla 10:

**Tabla 10.**

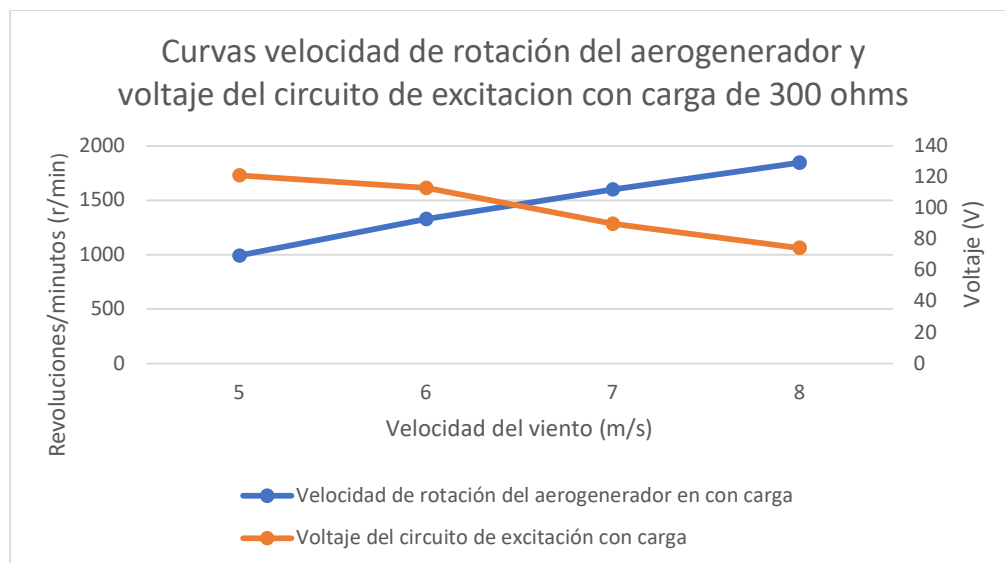
*Regulación del voltaje de salida del aerogenerador con una carga de 300 ohms*

Velocidad del viento	Velocidad de rotación del aerogenerador en con carga	Par en el rotor del aerogenerador con carga	Potencia mecánica en el rotor del aerogenerador con carga	Voltaje del circuito de excitación con carga	Voltaje de línea de la carga
m/s	r/min	(N.m)	W	V	V
7	992	0.55	57.16	121	120
8	1327	0.395	54.86	113	120
9	1599	0.326	54.57	89.8	120
10	1845	0.285	55.04	74.3	120

Las curvas que representan los datos de tabla 10 se presentan en la figura 38:

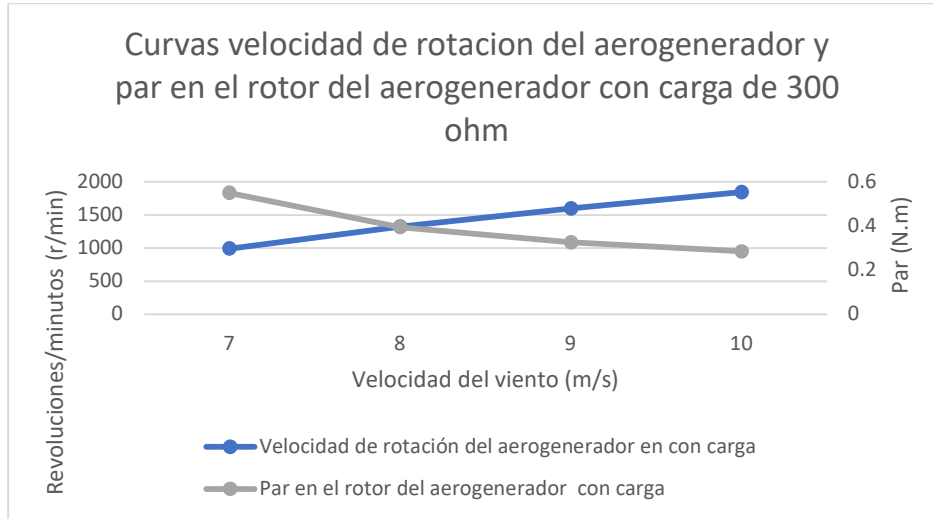
**Figura 38.**

*Curvas velocidad de rotación del aerogenerador y voltaje del circuito de excitación con carga de 300 ohms*



**Figura 39.**

*Curvas velocidad de rotación del aerogenerador y par en el rotor del aerogenerador con carga de 300 ohm*



### 3.3.3.1. Análisis de la practica 3

Se analiza en la presente practica que para ambos casos analizados, las curvas de velocidad en el rotor del aerogenerador y del voltaje en el circuito de excitación tienen similitud, y comportamiento inversamente proporcional, la respuesta se encuentra en la curva de par presentada en la figura 38, la cual indica que para velocidades mayores es necesario reducir la excitación con el fin de disminuir el par y que el aumento en la velocidad del eje del aerogenerador producto de una mayor velocidad del viento compense esta disminución con el fin de mantener el voltaje de salida constante en el generador síncrono.

### 3.3.3.2. Conclusiones de la practica 3

Se observó en las curvas del aerogenerador en vacío que a medida de que el viento va aumentando su velocidad, también lo hace el eje de rotación del aerogenerador y es necesario para cada velocidad reducir el voltaje del circuito de excitación para mantener el voltaje de línea en la carga constante en 120 (V), adicionalmente se visualizó el aumento de la velocidad

del aerogenerador cercano al límite del dinamómetro de cuatro cuadrantes, esto refleja la importancia de regular este parámetro cuando se tienen velocidades de viento altas y pocas o ninguna carga conectada.

Se concluye que la curva del aerogenerador con carga tiene un comportamiento similar a aquella sin carga, con la diferencia de que las velocidades de rotación del eje son más bajas y el voltaje del circuito de excitación es mayor, esta reducción de velocidad al colocar carga es uno de varios métodos utilizados para el frenado de un aerogenerador.

Las curvas velocidad de rotación del aerogenerador y par en el rotor del aerogenerador con carga concuerdan con los valores observados de potencia mecánica, ya que mientras que la velocidad aumenta, el par disminuye, esto debido a que al mantener en todo momento constante el voltaje de salida del generador y la carga, se tiene la misma potencia eléctrica demandada para todos los casos.

#### ***3.3.4. Practica 4: Aerogenerador con excitación variable bajo diversas velocidades del viento.***

Esta práctica se centra en el cálculo de la máxima potencia que puede ser entregada por el aerogenerador bajo los escenarios de excitación mínima, media y máxima para diferentes velocidades del viento y para 200 ohm por fase, específicamente para excitación mínima se utilizan velocidades del viento de 4 a 12 m/s, mientras que para media y máxima de 4 a 11 m/s, la densidad del aire es de  $1.225 \text{ kg/m}^3$  y el tipo de turbina a utilizar es aerogenerador de 1,15 m con 3 álabes

Los objetivos de la practica 4 son:

- Analizar el comportamiento de las curvas de potencia eléctrica entregada por un aerogenerador con excitación máxima, media y mínima bajo diversas velocidades del viento.

- Determinar el porcentaje de potencia máxima que es posible obtener del aerogenerador variando la excitación del generador síncrono acoplado al eje de la turbina para distintas velocidades del viento.

A continuación, se describen los pasos para realizar la práctica:

1. Colocar los módulos indicados en la caja porta módulos de LabVolt, el dinamómetro de cuatro cuadrantes debe colocarse en el medio, al lado derecho debe estar el alternador, del lado izquierdo la fuente de alimentación, adicional se agregará el módulo de cargas resistivas que se ubicará en la parte superior de la fuente de alimentación.
2. Realizar la conexión en estrella en los bornes 4, 5 y 6 del alternador síncrono, y conectar los bornes 7 y 8 a la fuente de alimentación en DC para la excitatriz
3. Conectar en estrella el final de cada resistencia y encender en cada fase los interruptores de las resistencias de 600 y 300 ohm que permiten ponerlas en paralelo y tener 200 ohm por fase, para luego conectar los bornes 1,2 y 3 del alternador a cada una de las cargas resistivas
4. Conectar en paralelo un multímetro en los bornes 1 y 2 del alternador síncrono
5. Colocar en serie un multímetro con el cable de alimentación que va del borne 1 del alternador síncrono a la carga resistiva
6. Colocar en paralelo un multímetro con el circuito de excitación del generador síncrono
7. Conectar el cable de adquisición de datos del dinamómetro hacia la PC
8. Conectar la alimentación del dinamómetro, primero desde el módulo luego hacia el tomacorriente
9. Se enciende el dinamómetro y se abre el software LVSIM desde la PC

10. Colocar el switch en modo dinamómetro en el módulo para posterior escoger la función de aerogenerador turbina eólica en el software
11. Revisar los parámetros correctos para el arranque; relación de polea 24:24; tipo de aerogenerador 1,15m/3alabes; densidad del aire 1.225 (kg/m<sup>3</sup>)
12. Abrir la tabla de datos en el software y en parámetros de registro marcar los parámetros de velocidad, par, potencia y velocidad del viento
13. Colocar la velocidad de arranque en 5 m/s para romper la inercia del sistema.
14. Colocar la perilla de la excitatriz del generador síncrono en máxima, media o mínima según el caso que se vaya a analizar.
15. Dar marcha al sistema, esperar que el módulo se estabilice unos segundos y colocar la velocidad en 4 m/s
16. Registrar los valores de velocidad, par, potencia y velocidad del viento
17. Registrar los valores de voltaje de línea, del circuito de excitación y corriente de fase visualizados en los multímetros
18. Aumentar la velocidad del viento en base a la tabla proporcionada en la fundamentación y repetir los pasos 13 y 14 nuevamente
19. Detener el emulador con el botón de marcha/parada y cambiar la excitación del generador según el siguiente caso a analizar.
20. Repetir los pasos 12, 13, 14, 15 y 16.
21. Una vez finalizados los tres casos, se procede a detener el emulador con el botón de marcha/parada y con el apagado de los equipos, en primer lugar, la fuente de alimentación, segundo lugar el dinamómetro y por último se procede con la desconexión de los enchufes de cada módulo.

A continuación, se presenta la tabla 11 que contine los parámetros mecánicos y eléctricos para excitación máxima y resistencia de 200 ohm por fase:

**Tabla 11.**

*Excitación máxima y resistencia de 200 ohm con diferentes velocidades del viento*

Excitación máxima y resistencia de 200 ohm							
Velocidad del viento	Velocidad de rotación del aerogenerador	Par en el rotor del aerogenerador	Potencia mecánica en el rotor del aerogenerador	Voltaje del circuito de excitación DC	Voltaje de línea de la carga	Corriente de la carga	Potencia eléctrica trifásica
m/s	r/min	(N.m)	W	V	V	A	W
4	386	0.356	14.38	92.5	45.29	0.128	10.041
5	551	0.471	27.16	93.6	64.2	0.181	20.127
6	722	0.581	43.97	93.8	83.8	0.235	34.109
7	903	0.697	65.89	94.2	103	0.293	52.272
8	1081	0.823	93.13	94.2	123.8	0.351	75.264
9	1260	0.941	124.1	94.3	143.2	0.403	99.956
10	1439	1.041	156.9	94.3	164.1	0.464	131.883
11	1631	1.163	198.7	94.5	183.3	0.52	165.092
12	1831	1.265	242.5	94.8	205.3	0.576	204.820

La tabla 12 presenta los cálculos realizados para la condición de excitación media:

**Tabla 12.**

*Excitación media y resistencia de 200 ohm para diferentes velocidades del viento*

Excitación media y resistencia de 200 ohm							
Velocidad del viento	Velocidad de rotación del aerogenerador	Par en el rotor del aerogenerador	Potencia mecánica en el rotor del aerogenerador	Voltaje del circuito de excitación DC	Voltaje de línea de la carga	Corriente de la carga	Potencia eléctrica trifásica
m/s	r/min	(N.m)	W	V	V	A	W
4	442	0.305	14.12	105	45.43	0.127	9.993
5	610	0.396	25.31	105.1	62.7	0.175	19.005
6	788	0.49	40.41	105.4	79.9	0.226	31.276
7	963	0.576	58.13	105.4	97.2	0.273	45.961
8	1156	0.666	80.59	105.2	115.9	0.318	63.837
9	1351	0.749	106	105.2	134.1	0.379	88.030
10	1540	0.839	135.4	105	151.7	0.428	112.458

11	1747	0.91	166.5	104.7	170.1	0.478	140.829
----	------	------	-------	-------	-------	-------	---------

Se presentan a continuación en la tabla 13 los parámetros para la condición de excitación mínima

**Tabla 13.**

*Excitación mínima y resistencia de 200 ohm para diferentes velocidades del viento*

Excitación mínima y resistencia de 200 ohm							
Velocidad del viento	Velocidad de rotación del aerogenerador	Par en el rotor del aerogenerador	Potencia mecánica en el rotor del aerogenerador	Voltaje del circuito de excitación DC	Voltaje de línea de la carga	Corriente de la carga	Potencia eléctrica trifásica
m/s	r/min	(N.m)	W	V	V	A	W
4	495	0.254	13.15	111.3	44.19	0.124	9.491
5	664	0.324	22.54	111.3	59.8	0.168	17.401
6	845	0.395	34.94	111.3	75.5	0.212	27.723
7	1043	0.475	51.91	111.2	91.8	0.259	41.182
8	1241	0.53	68.92	111.2	107.4	0.304	56.551
9	1440	0.582	87.75	111.2	123.1	0.346	73.773
10	1648	0.632	109.1	111.1	138	0.39	93.219
11	1850	0.679	131.6	111.1	152.4	0.431	113.769

La comparación entre los datos calculados de la potencia eléctrica trifásica para las condiciones de excitación baja, media y máxima se presentan en la tabla 14:

**Tabla 14.**

*Diferencia en porcentaje entre las potencias generadas por el aerogenerador en los casos de excitación máxima, media y mínima.*

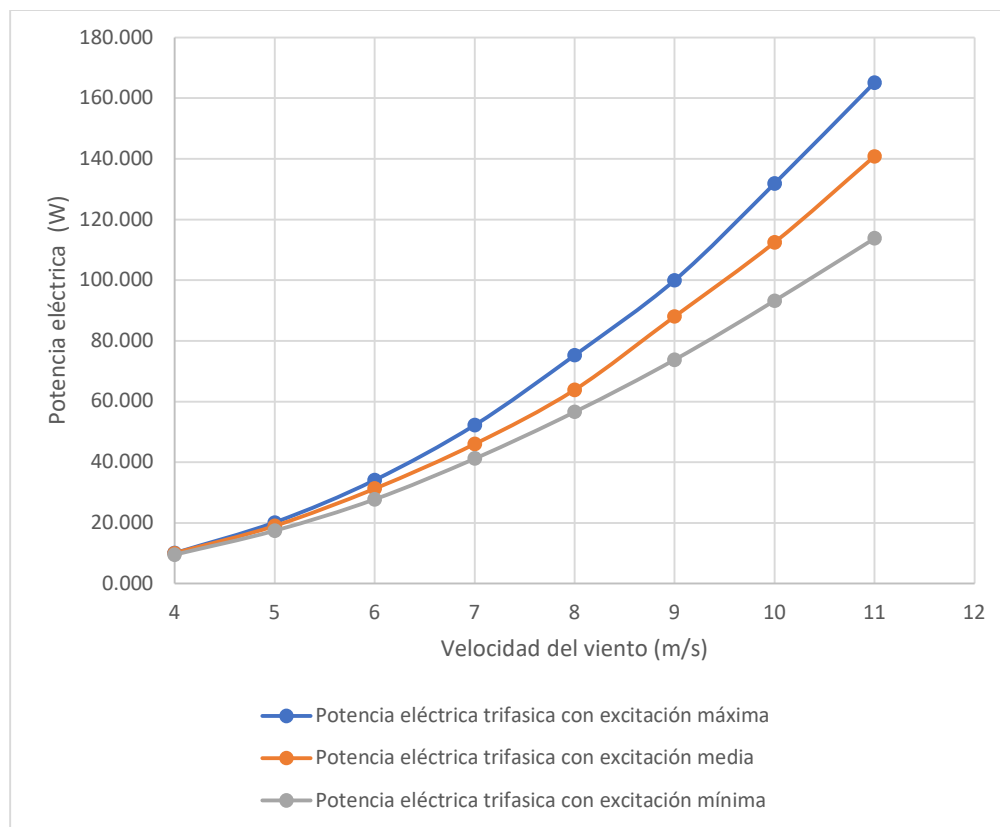
Velocidad del viento	Excitación máxima	Excitación media	Excitación mínima	Diferencia entre potencia de excitación máxima y media	Diferencia entre potencia de excitación máxima y mínima
	Potencia eléctrica trifásica	Potencia eléctrica trifásica	Potencia eléctrica trifásica		

m/s	W	W	W	%	%
4	10.041	9.993	9.491	0.47%	5.48%
5	20.127	19.005	17.401	5.57%	13.54%
6	34.109	31.276	27.723	8.31%	18.72%
7	52.272	45.961	41.182	12.07%	21.22%
8	75.264	63.837	56.551	15.18%	24.86%
9	99.956	88.030	73.773	11.93%	26.19%
10	131.883	112.458	93.219	14.73%	29.32%
11	165.092	140.829	113.769	14.70%	31.09%

Una gráfica comparativa de los datos obtenidos en la tabla 14, se presenta en la figura 40 a continuación:

**Figura 40.**

*Potencias generadas por el aerogenerador con diferentes excitaciones.*



### 3.3.4.1. Análisis de la practica 4

En los datos obtenidos por la practica 4 se analiza un incremento en la potencia eléctrica entregada por el aerogenerador para excitaciones mayores, esto es sucede debido a que si se aumenta la excitación se obtiene un mayor voltaje inducido en bornes del generador síncrono

y por lo tanto se entrega mayor potencia eléctrica a la carga, esto se observa con mayor detalle en la velocidad del viento de 11 m/s.

#### **3.3.4.2. Conclusiones de la practica 4**

Como se pudo observar, las curvas de potencia eléctrica entregada por el aerogenerador para los casos de excitación máxima, media y mínima tienen un comportamiento exponencial y son similares, sin embargo, se observa que a mayor excitación, más potencia eléctrica será entregada a la carga, esto permite un mejor aprovechamiento del recurso eólico para cada velocidad del viento, ya que, como se observó en las tablas de datos, se obtiene una mayor potencia mecánica y eléctrica para el caso de excitación máxima.

Se concluye en base a la tabla de comparación de potencias para casos de excitación máxima, media y mínima, que se puede obtener hasta un 31.09% más de potencia entregada por el aerogenerador si se aumenta la excitación del generador síncrono para una velocidad del viento de 11 (m/s), mientras que para velocidades bajas de 4 (m/s) es posible tener un aumento del 5.48% de la potencia eléctrica generada si se trabaja con la excitación máxima.

#### **3.3.5. Practica 5: Curvas características de un aerogenerador**

Esta práctica es una de las más relevantes dentro del estudio de los aerogeneradores, ya que permite obtener sus curvas características que determinan su comportamiento óptimo ante diferentes velocidades del viento, para esto se utilizaron resistencias de 171, 200, 300, 400 y 600 para velocidades del viento de 4 a 12 m/s, con la diferencia de que para la velocidad de 11 m/s se utilizaron todas menos la de 600 ohm y para 12 m/s no se utilizaron las de 600 y 400 ohm debido a que sobrepasaban la velocidad nominal del dinamómetro, se utilizó un aerogenerador de 1,15 m con 3 álabes y una densidad del aire de  $1.225 \text{ kg/m}^3$ .

A continuación, se describen los pasos para realizar la práctica:

1. Colocar los módulos indicados en la caja porta módulos de LabVolt, el dinamómetro de cuatro cuadrantes debe colocarse en el medio, al lado derecho

debe estar el alternador sincrónico, del lado izquierdo la fuente de alimentación, adicional se agregará el módulo de cargas resistivas que se ubicará en la parte superior de los módulos antes mencionados.

2. Bajar los paneles frontales del dinamómetro de cuatro cuadrantes y el alternador sincrónico para colocar la banda de caucho que acople ambos ejes, verificando que quede firme y sin holguras haciendo uso de los rodamientos al lado del eje de cada módulo.
3. Realizar la conexión en estrella en los bornes 4, 5 y 6 del alternador sincrónico, y conectar los bornes 7 y 8 a la fuente de alimentación en DC para la excitatriz
4. Conectar en estrella el final de cada resistencia, conectar uno de estos finales con el neutro de la fuente de alimentación, posteriormente seleccionar la resistencia por fase a utilizar según el caso a analizar, y por último conectar los bornes 1,2 y 3 del alternador sincrónico a cada una de las cargas resistivas
5. Conectar en paralelo un multímetro en los bornes 1 y 2 del alternador sincrónico
6. Colocar en serie un multímetro con el cable de alimentación que va del borne 1 del alternador sincrónico a la carga resistiva
7. Conectar el cable de adquisición de datos del dinamómetro hacia la PC
8. Conectar la alimentación del dinamómetro, primero desde el módulo luego hacia el tomacorriente
9. Se enciende el dinamómetro y se abre el software LVSIM desde la PC
10. Colocar el switch en modo dinamómetro en el módulo para posterior escoger la función de aerogenerador turbina eólica en el software
11. Revisar los parámetros correctos para el arranque; relación de polea 24:24; tipo de aerogenerador 1,15m/3alabes; densidad del aire 1.225 (kg/m<sup>3</sup>)

12. Abrir la tabla de datos en el software y en parámetros de registro marcar los parámetros de velocidad, par, potencia y velocidad del viento
13. Colocar la velocidad de arranque en 5 m/s, encender el circuito de excitación del generador y posteriormente la fuente de alimentación.
14. Dar marcha al emulador, esperar que el sistema se estabilice un momento, para luego llevar la velocidad a 4 m/s
15. Registrar los valores de velocidad, par, potencia y velocidad del viento
16. Registrar los valores de voltaje de línea y de corriente de fase visualizados en los multímetros
17. Aumentar la velocidad del viento en pasos de 1 m/s según la tabla proporcionada en la fundamentación para cada caso y repetir los pasos 12 y 13 nuevamente, repetir este paso hasta llegar a la velocidad de viento de 12 m/s
18. Detener el emulador con el botón de marcha/parada para posteriormente cambiar el valor de las resistencias por fase y después volver a realizar los pasos 11, 12, 13, 14 y 15.
19. Una vez terminados todos los casos, se procede a detener el emulador con el botón de marcha/parada y con el apagado de los equipos, en primer lugar, la fuente de alimentación, segundo lugar el dinamómetro y por último se procede con la desconexión de los enchufes de cada módulo.

A continuación, se muestran las tablas de resultados de la practica 5 que muestran los parámetros medidos y los calculados, estos últimos son la potencia eléctrica trifásica, el coeficiente potencia, el TSR y las eficiencias en los procesos de conversión:

La tabla 15 muestra las variables para una velocidad del viento de 4 m/s:

**Tabla 15.**

*Datos simulados y calculados para graficar curva característica de aerogenerador con velocidad del viento de 4 m/s*

Velocidad del viento: 4 m/s										
Resistencia de la carga	Velocidad de rotación del aerogenerador	Par en el rotor del aerogenerador	Potencia mecánica en el rotor del aerogenerador	Voltaje de línea de la carga	Corriente de la carga	Potencia eléctrica trifásica	Coefficiente de potencia	Tip speed ratio (TSR)	Eficiencia de conversión de energía mecánica a eléctrica	Eficiencia total del proceso para velocidad del viento: 4 m/s
ohm	r/min	(N.m)	W	V	A	W	Cp	$\lambda$	%	%
171	350	0.383	14.05	41.7	0.136	9.823	0.345	5.269	69.91%	24.12%
200	388	0.35	14.21	46.1	0.13	10.380	0.349	5.841	73.05%	25.49%
300	463	0.288	13.98	54.7	0.102	9.664	0.343	6.970	69.13%	23.73%
400	500	0.238	12.48	58.9	0.084	8.569	0.307	7.527	68.67%	21.05%
600	549	0.191	10.96	66.7	0.061	7.047	0.269	8.264	64.30%	17.31%

La tabla 16 muestra las variables para una velocidad del viento de 5 m/s:

**Tabla 16.**

*Datos simulados y calculados para graficar curva característica de aerogenerador con velocidad del viento de 5 m/s*

Velocidad del viento: 5 m/s										
Resistencia de la carga	Velocidad de rotación del aerogenerador	Par en el rotor del aerogenerador	Potencia mecánica en el rotor del aerogenerador	Voltaje de línea de la carga	Corriente de la carga	Potencia eléctrica trifásica	Coefficiente de potencia	Tip speed ratio (TSR)	Eficiencia de conversión de energía mecánica a eléctrica	Eficiencia total del proceso para velocidad del viento: 5 m/s
ohm	r/min	(N.m)	W	V	A	W	Cp	$\lambda$	%	%
171	508	0.516	27.44	60.1	0.197	20.507	0.345	6.11	74.73%	25.79%
200	551	0.473	27.32	65.1	0.182	20.522	0.344	6.63	75.12%	25.81%
300	630	0.371	24.49	74.7	0.139	17.984	0.308	7.58	73.44%	22.61%
400	683	0.305	21.81	81.2	0.115	16.174	0.274	8.22	74.16%	20.34%
600	743	0.239	18.61	89.7	0.084	13.051	0.234	8.94	70.13%	16.41%

La tabla 17 muestra las variables para una velocidad del viento de 6 m/s:

**Tabla 17.**

*Datos simulados y calculados para graficar curva característica de aerogenerador con velocidad del viento de 6 m/s*

Velocidad del viento: 6 m/s										
Resistencia de la carga	Velocidad de rotación del aerogenerador	Par en el rotor del aerogenerador	Potencia mecánica en el rotor del aerogenerador	Voltaje de línea de la carga	Corriente de la carga	Potencia eléctrica trifásica	Coefficiente de potencia	Tip speed ratio (TSR)	Eficiencia proceso de conversión de energía mecánica a eléctrica	Eficiencia total del proceso para velocidad del viento: 6 m/s
ohm	r/min	(N.m)	W	V	A	W	Cp	$\lambda$	%	%
171	668	0.666	46.57	79.1	0.26	35.621	0.339	6.704	76.49%	25.92%
200	721	0.596	45.03	84.7	0.238	34.916	0.328	7.236	77.54%	25.41%
300	806	0.464	39.18	95.7	0.179	29.671	0.285	8.089	75.73%	21.59%
400	863	0.37	33.4	102.9	0.145	25.843	0.243	8.661	77.37%	18.81%
600	933	0.291	28.39	112.2	0.106	20.600	0.207	9.363	72.56%	14.99%

La tabla 18 muestra las variables obtenidas para una velocidad del viento de 7 m/s:

**Tabla 18.**

*Datos simulados y calculados para graficar curva característica de aerogenerador con velocidad del viento de 7 m/s*

Velocidad del viento: 7 m/s										
Resistencia de la carga	Velocidad de rotación del aerogenerador	Par en el rotor del aerogenerador	Potencia mecánica en el rotor del aerogenerador	Voltaje de línea de la carga	Corriente de la carga	Potencia eléctrica trifásica	Coefficiente de potencia	Tip speed ratio (TSR)	Eficiencia proceso de conversión de energía mecánica a eléctrica	Eficiencia total del proceso para velocidad del viento: 7 m/s
ohm	r/min	(N.m)	W	V	A	W	Cp	$\lambda$	%	%
171	843	0.812	71.68	99.1	0.325	55.785	0.328	7.251	77.83%	25.56%
200	891	0.717	66.89	103.8	0.294	52.857	0.307	7.664	79.02%	24.22%
300	1001	0.532	55.75	118.4	0.221	45.322	0.255	8.611	81.29%	20.77%

400	1065	0.437	48.78	125.5	0.178	38.692	0.224	9.161	79.32%	17.73%
600	1133	0.345	40.91	136.8	0.128	30.329	0.187	9.746	74.14%	13.90%

La tabla 19 muestra los parámetros obtenidos para una velocidad del viento de 8 m/s:

**Tabla 19.**

*Datos simulados y calculados para graficar curva característica de aerogenerador con velocidad del viento de 8 m/s*

Velocidad del viento: 8 m/s										
Resistencia de la carga	Velocidad de rotación del aerogenerador	Par en el rotor del aerogenerador	Potencia mecánica en el rotor del aerogenerador	Voltaje de línea de la carga	Corriente de la carga	Potencia eléctrica trifásica	Coefficiente de potencia	Tip speed ratio (TSR)	Eficiencia de proceso de conversión de energía mecánica a eléctrica	Eficiencia total del proceso para velocidad del viento: 8 m/s
ohm	r/min	(N.m)	W	V	A	W	Cp	$\lambda$	%	%
171	1008	0.937	98.93	118.3	0.388	79.502	0.304	7.587	80.36%	24.41%
200	1078	0.838	94.62	124.2	0.353	75.938	0.290	8.114	80.26%	23.31%
300	1182	0.627	77.66	139.4	0.261	63.018	0.238	8.897	81.15%	19.35%
400	1252	0.517	67.76	148.9	0.212	54.675	0.208	9.423	80.69%	16.79%
600	1336	0.393	54.97	161.2	0.152	42.439	0.169	10.056	77.20%	13.03%

La tabla 20 muestra las variables para una velocidad del viento de 9 m/s:

**Tabla 20.**

*Datos simulados y calculados para graficar curva característica de aerogenerador con velocidad del viento de 9 m/s*

Velocidad del viento: 9 m/s										
Resistencia de la carga	Velocidad de rotación del aerogenerador	Par en el rotor del aerogenerador	Potencia mecánica en el rotor del aerogenerador	Voltaje de línea de la carga	Corriente de la carga	Potencia eléctrica trifásica	Coefficiente de potencia	Tip speed ratio (TSR)	Eficiencia de proceso de conversión de energía mecánica a eléctrica	Eficiencia total del proceso para velocidad del viento: 9 m/s
ohm	r/min	(N.m)	W	V	A	W	Cp	$\lambda$	%	%
171	1195	1.078	134.9	138.2	0.456	109.152	0.291	7.995	80.91%	23.54%
200	1254	0.941	123.5	144.7	0.407	102.005	0.266	8.390	82.60%	21.99%
300	1374	0.71	102.2	161.7	0.302	84.582	0.220	9.193	82.76%	18.24%
400	1452	0.584	88.74	172.1	0.244	72.733	0.191	9.715	81.96%	15.68%
600	1531	0.438	70.21	185.4	0.17	54.591	0.151	10.243	77.75%	11.77%

La tabla 21 muestra las variables obtenidas para una velocidad del viento de 10 m/s:

**Tabla 21.**

*Datos simulados y calculados para graficar curva característica de aerogenerador con velocidad del viento de 10 m/s*

Velocidad del viento: 10 m/s										
Resistencia de la carga	Velocidad de rotación del aerogenerador	Par en el rotor del aerogenerador	Potencia mecánica en el rotor del aerogenerador	Voltaje de línea de la carga	Corriente de la carga	Potencia eléctrica trifásica	Coefficiente de potencia	Tip speed ratio (TSR)	Eficiencia de proceso de conversión de energía mecánica a eléctrica	Eficiencia total del proceso para velocidad del viento: 10 m/s
ohm	r/min	(N.m)	W	V	A	W	Cp	$\lambda$	%	%
171	1370	1.202	172.4	157.3	0.519	141.402	0.271	8.249	82.02%	22.23%
200	1444	1.069	161.7	165.9	0.465	133.616	0.254	8.695	82.63%	21.00%
300	1557	0.808	131.7	183.9	0.342	108.935	0.207	9.375	82.71%	17.12%
400	1636	0.65	111.4	194.7	0.277	93.413	0.175	9.851	83.85%	14.68%
600	1735	0.475	86.27	208.9	0.197	71.280	0.136	10.447	82.62%	11.20%

La tabla 22 muestran las variables obtenidas para una velocidad del viento de 11 m/s

**Tabla 22.**

*Datos simulados y calculados para graficar curva característica de aerogenerador con velocidad del viento de 11 m/s*

Velocidad del viento: 11 m/s										
Resistencia de la carga	Velocidad de rotación del aerogenerador	Par en el rotor del aerogenerador	Potencia mecánica en el rotor del aerogenerador	Voltaje de línea de la carga	Corriente de la carga	Potencia eléctrica trifásica	Coefficiente de potencia	Tip speed ratio (TSR)	Eficiencia de proceso de conversión de energía mecánica a eléctrica	Eficiencia total del proceso para velocidad del viento: 11 m/s
ohm	r/min	(N.m)	W	V	A	W	Cp	$\lambda$	%	%
171	1565	1.343	220	177.4	0.587	180.365	0.260	8.567	81.98%	21.30%
200	1632	1.181	201.8	185.8	0.523	168.309	0.238	8.934	83.40%	19.88%
300	1764	0.883	163.2	206.3	0.387	138.284	0.193	9.656	84.73%	16.33%
400	1842	0.732	141.2	218.4	0.31	117.267	0.167	10.083	83.05%	13.85%

**Tabla 23.**

*Datos simulados y calculados para graficar curva característica de aerogenerador con velocidad del viento de 12 m/s*

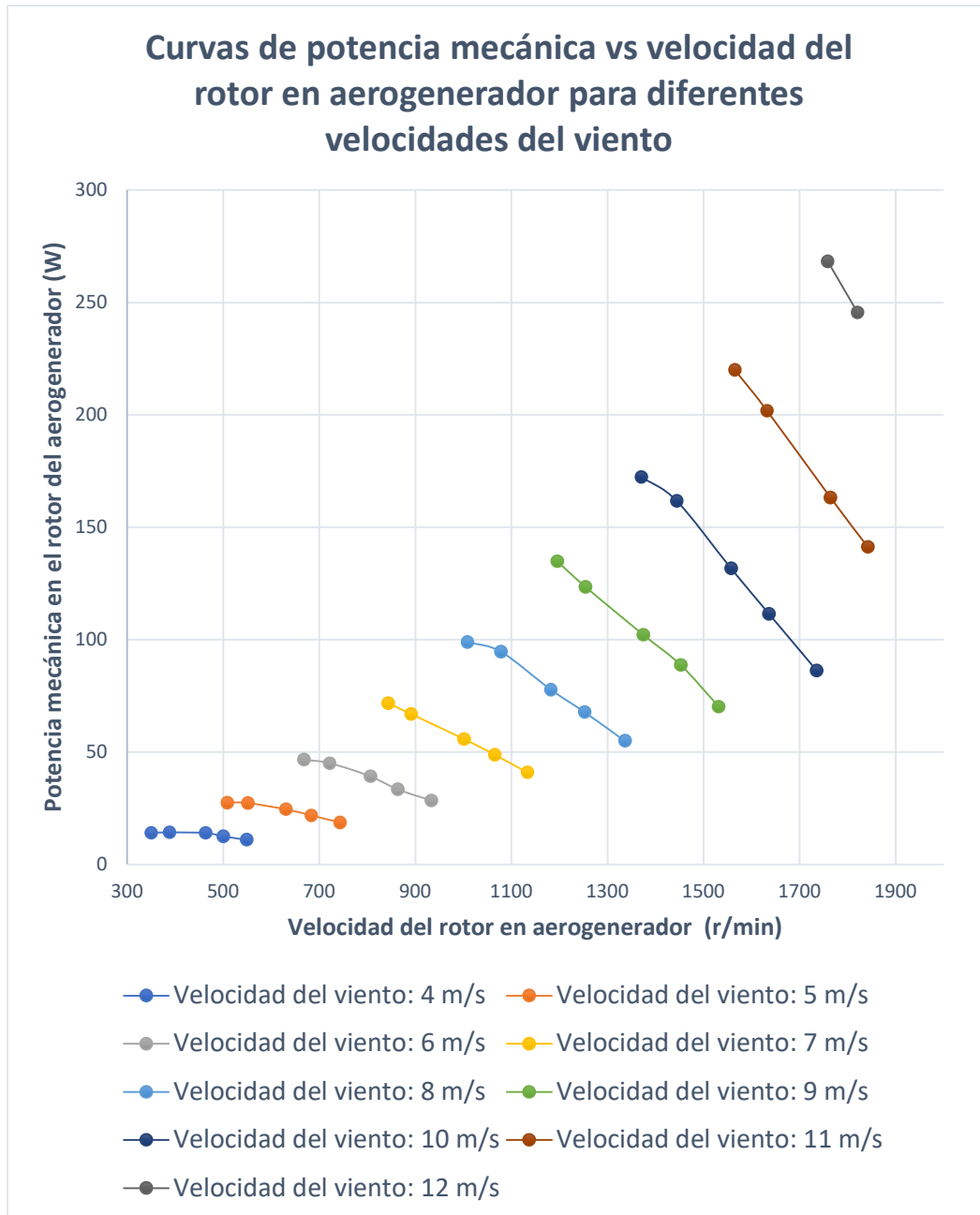
Velocidad del viento: 12 m/s										
Resistencia de la carga	Velocidad de rotación del aerogenerador	Par en el rotor del aerogenerador	Potencia mecánica en el rotor del aerogenerador	Voltaje de línea de carga	Corriente de la carga	Potencia eléctrica trifásica	Ceficiente de potencia	Tip speed ratio (TSR)	Eficiencia proceso de conversión de energía mecánica a eléctrica	Eficiencia total del proceso para velocidad del viento : 12 m/s
ohm	r/min	(N.m)	W	V	A	W	Cp	$\lambda$	%	%
171	1758	1.457	268.3	198.1	0.651	223.371	0.244	8.821	83.25%	20.32%
200	1820	1.288	245.6	206.9	0.582	208.566	0.223	9.132	84.92%	18.97%

Los datos obtenidos para las diferentes velocidades del viento nos permiten graficar las curvas características de un aerogenerador real, estas se observan en las figuras 41, 42 y 43.

La figura 41 muestra las curvas de potencia mecánica para las diferentes velocidades del viento bajo las condiciones de carga disponibles en el laboratorio:

**Figura 41.**

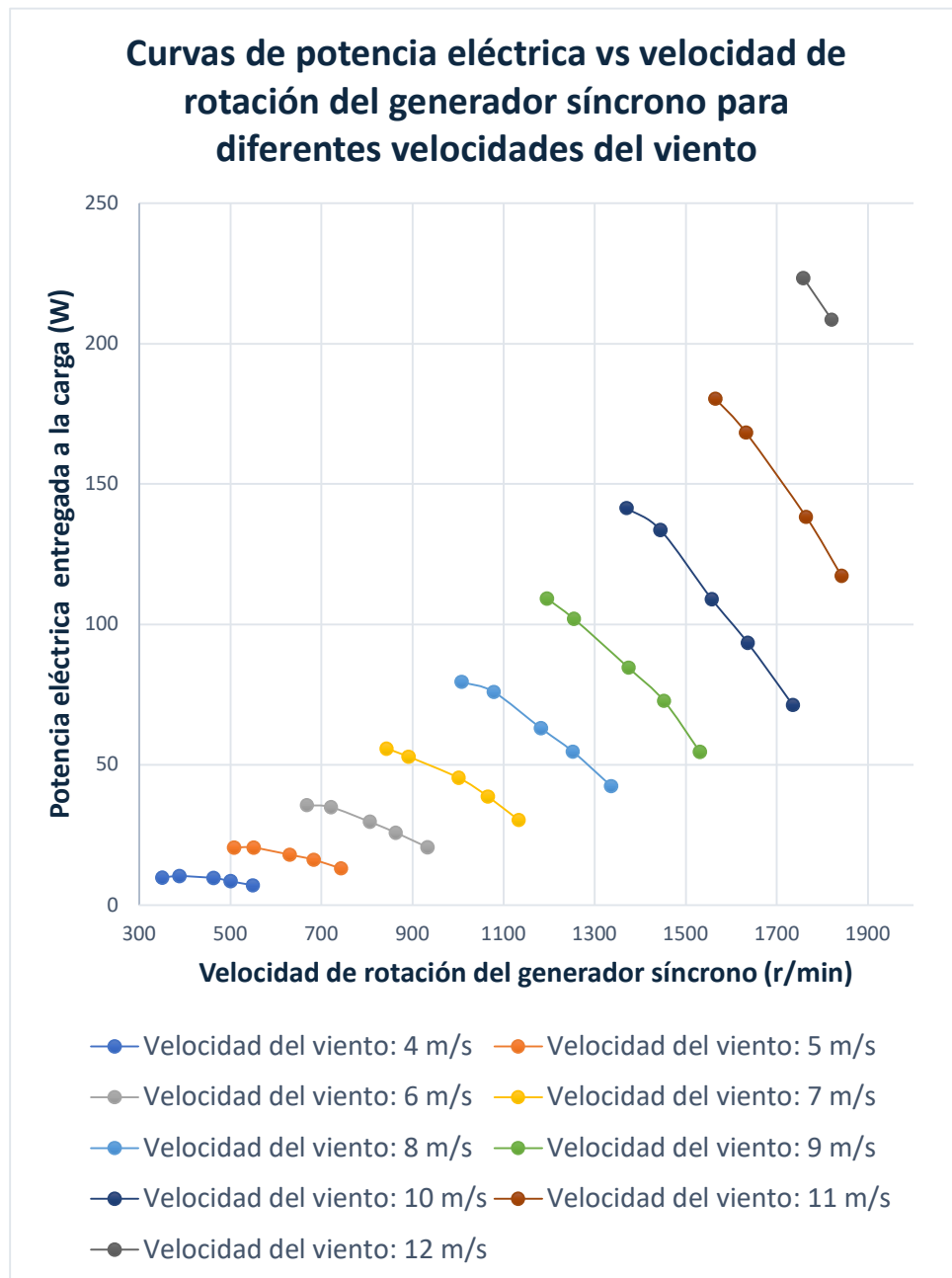
*Curvas de potencia mecánica vs velocidad del rotor en aerogenerador para diferentes velocidades del viento*



La figura 42 muestra las curvas de potencia eléctrica para las diferentes velocidades del viento bajo las condiciones de carga disponibles en el laboratorio:

**Figura 42.**

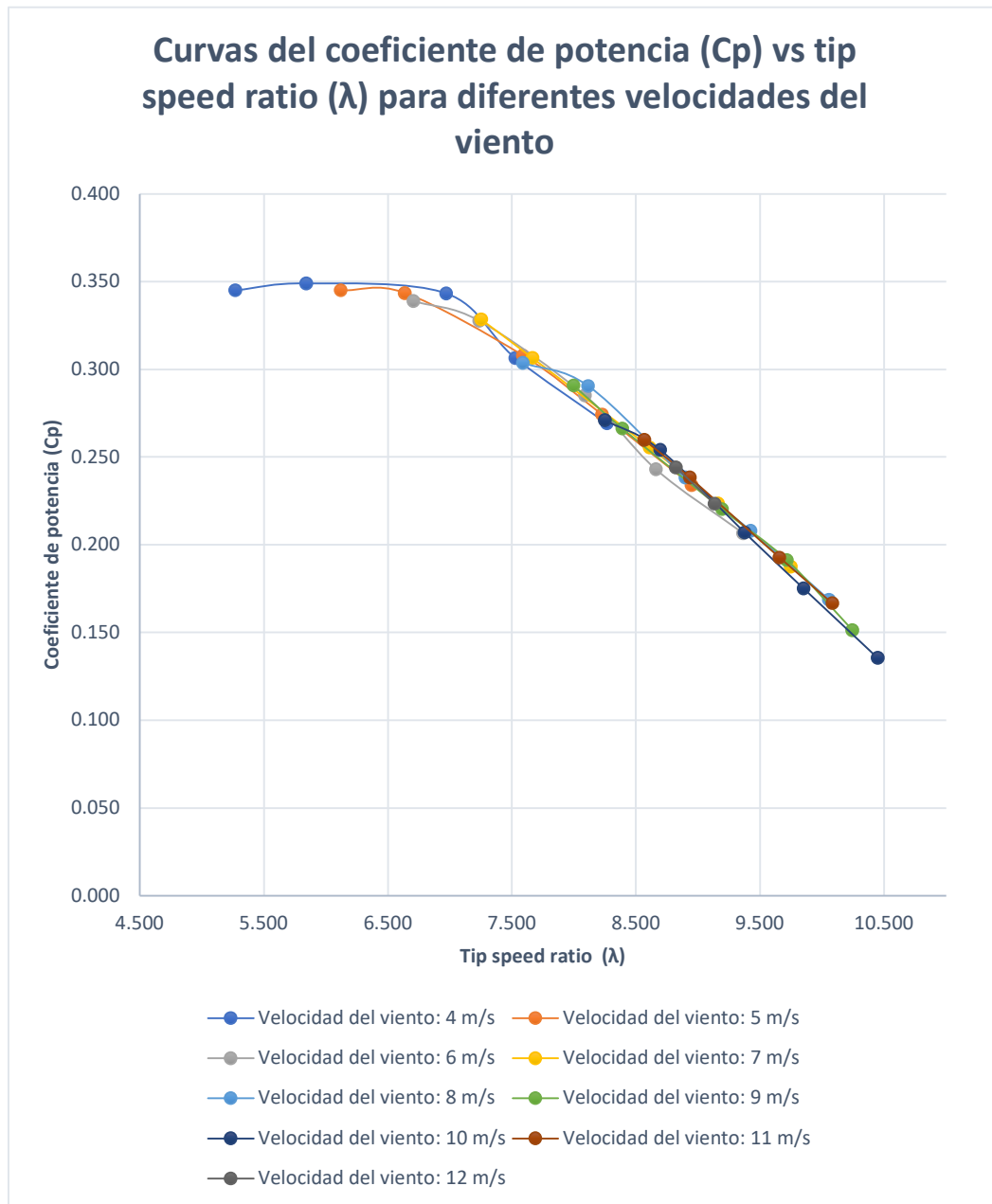
*Curvas de potencia eléctrica vs velocidad de rotación del generador síncrono para diferentes velocidades del viento*



La figura 43 muestra las curvas del coeficiente de potencia para los diferentes valores del tip speed ratio bajo las condiciones de carga disponibles en el laboratorio:

**Figura 43.**

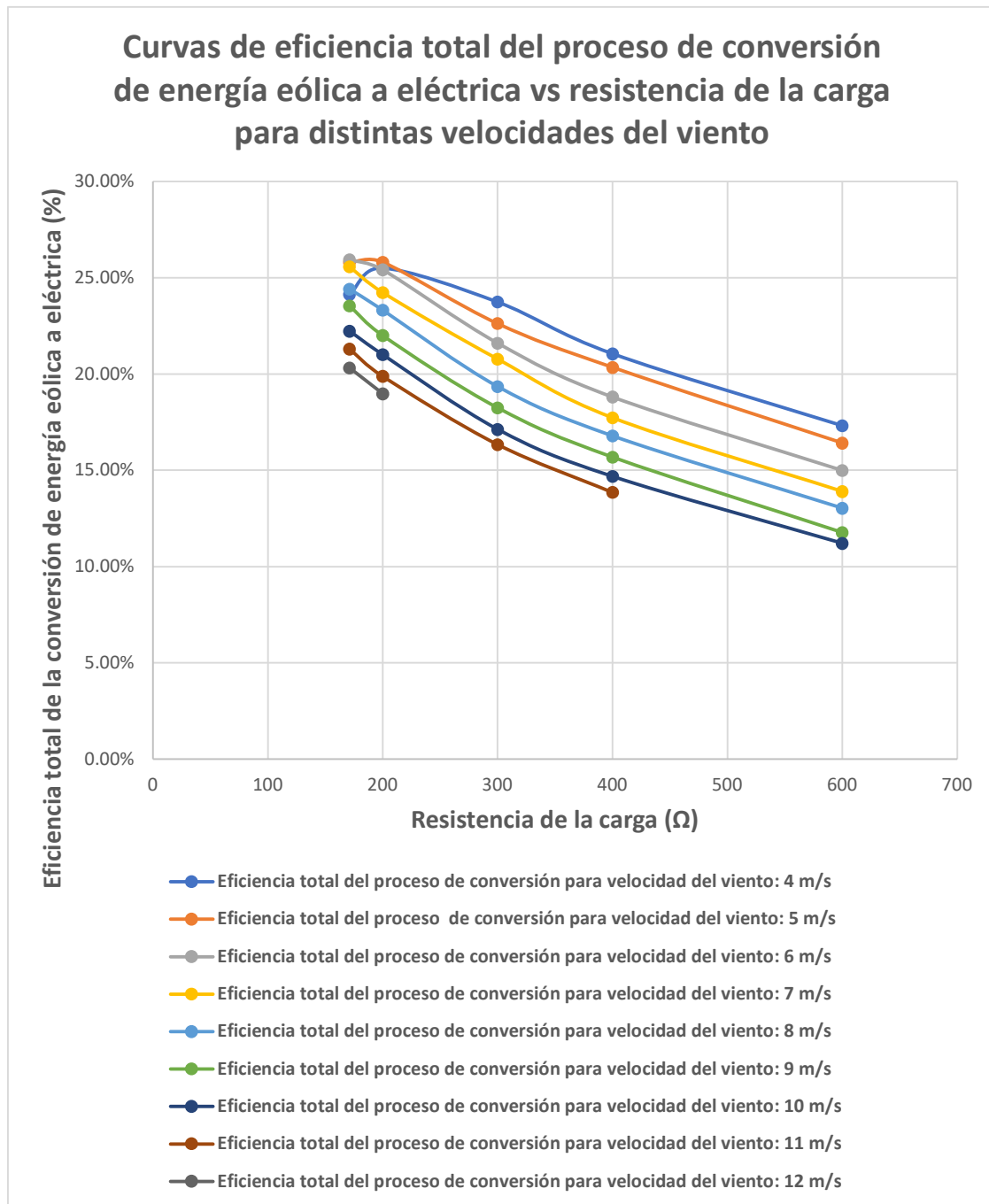
*Curvas del coeficiente de potencia ( $C_p$ ) vs tip speed ratio ( $\lambda$ ) para diferentes velocidades del viento*



La figura 44 muestra las curvas de eficiencia total del proceso de conversión de energía eólica a eléctrica vs resistencia de la carga para distintas velocidades del viento:

**Figura 44.**

*Curvas de eficiencia total del proceso de conversión de energía eólica a eléctrica vs resistencia de la carga para distintas velocidades del viento*



### **3.3.5.1. Análisis de la practica 5**

Se puede analizar de la practica 5, que es posible calcular las curvas características de potencia mecánica y eléctrica que permitan el máximo aprovechamiento del recurso eólico de un aerogenerador real, esto se pudo lograr debido a que se puso bajo carga distintas resistencias disponibles en el laboratorio para cada una de las velocidades del viento a las que estaba funcionando el aerogenerador, para encontrar los distintos puntos de potencia producidos en cada una de las curvas de velocidad del viento, adicionalmente mediante la curva  $c_p$  vs  $\lambda$  fue posible encontrar el valor máximo del coeficiente de potencia en el que debería trabajar el aerogenerador para todas las velocidades del viento.

### **3.3.5.2. Conclusiones de la practica 5**

Se concluye que las curvas de potencia tanto mecánica como eléctrica para las diferentes cargas con distintas velocidades del viento tienen similitud con aquellas presentadas en la fundamentación, siendo la potencia eléctrica menor a la mecánica, y aunque se observen incompletas, se puede visualizar que para las velocidades de viento de 4, 5 y 6 (m/s) obtenemos los valores de máxima potencia de las curvas, mientras que para las demás velocidades se tienen valores después del punto de máxima potencia, esto debido a la limitación de resistencias disponibles.

Las curvas del coeficiente de potencia ( $C_p$ ) vs el tip speed ratio ( $\lambda$ ) para diferentes velocidades del viento mostraron el coeficiente  $C_p$  ideal con el que el aerogenerador debe trabajar, siendo este de 0.349, el mismo se dio para la velocidad del viento de 4(m/s) con una resistencia de 200 ohm, y aunque es posible obtener este valor del coeficiente  $C_p$  para todas las velocidades del viento, no fue posible debido a que no se disponían de resistencias con valores más bajos.

La eficiencia total del proceso de conversión de energía eólica a eléctrica varía para cada velocidad del viento, teniendo la mayor eficiencia de 25.92% para una velocidad del

viento de 6(m/s) con una resistencia de 171 ohm, la segunda fue de 25.81% para la velocidad del viento de 5 (m/s) con una resistencia de 200 ohm, pasado este punto, la velocidad del viento de 4 (m/s) tiene mayores eficiencias para resistencias de valores más altos, pero sin superar la máxima de 25.92%.

### ***3.3.6. Practica 6: Producción eléctrica de aerogenerador bajo condiciones meteorológicas reales del sitio minas de Huascachaca***

En la practica 6 se analiza la producción eléctrica de un aerogenerador bajo condiciones meteorológicas reales del sitio minas de Huascachaca esto con el fin de visualizar el comportamiento de un aerogenerador real en un sitio donde existe en la actualidad una central eólica, esta práctica permite visualizar los meses de mayor producción así como las eficiencias en la conversión de energía eólica a eléctrica mediante el uso de una turbina de aerogenerador de 1,15 m con 3 álabes con una densidad de aire anual promedio de 0.9621 (Kg/m<sup>3</sup> )

Debido a que el software permite la entrada de densidad del aire desde 1.12 a 1.44 (Kg/m<sup>3</sup> ) es necesario ajustar la densidad al rango que nos permite el emulador, esto se hará basándonos en la ecuación del límite de Betz que indica una relación directamente proporcional entre la potencia del viento y la densidad del aire, esto con el fin de calcular la potencia generada con las condiciones disponibles en emulador para posteriormente aplicar este factor de corrección y encontrar la potencia eléctrica real del aerogenerador bajo las condiciones reales Por lo que, para los cálculos de potencia a corregir:

Factor de conversión de densidad y por lo tanto potencia (real/emulador): 0.859

Las velocidades del viento promedio mensual de enero a diciembre del 2023 son: 6.2, 6.3, 6.4, 6.7, 7.2, 10.3, 12, 10.4, 9.4, 6.4, 5.5, y 6.4

Los objetivos de la practica 6 son:

- Evaluar la producción de energía eléctrica de un aerogenerador bajo una carga de 171 ohm en función de condiciones meteorológicas reales del sitio minas de Huascachaca.

- Calcular la eficiencia total de conversión de energía eólica a eléctrica para los doce meses del año 2023 presentados en la fundamentación.

A continuación, se describen los pasos para realizar la práctica:

1. Colocar los módulos indicados en la caja porta módulos de LabVolt, el dinamómetro de cuatro cuadrantes debe colocarse en el medio, al lado derecho debe estar el alternador, del lado izquierdo la fuente de alimentación, adicional se agregará el módulo de cargas resistivas que se ubicará en la parte superior de la fuente de alimentación.
2. Realizar la conexión en estrella en los bornes 4, 5 y 6 del alternador sincrónico, y conectar los bornes 7 y 8 a la fuente de alimentación en DC para la excitatriz
3. Conectar en estrella el final de cada resistencia y seleccionar 171 ohm de carga por fase (paralelo entre resistencias de 1200, 600 y 300 ohm), para luego conectar los bornes 1,2 y 3 del alternador a cada una de las cargas resistivas
4. Conectar en paralelo un multímetro en los bornes 1 y 2 del alternador sincrónico
5. Colocar en serie un multímetro con el cable de alimentación que va del borne 1 del alternador sincrónico a la carga resistiva
6. Conectar el cable de adquisición de datos del dinamómetro hacia la PC
7. Conectar la alimentación del dinamómetro, primero desde el módulo luego hacia el tomacorriente
8. Se enciende el dinamómetro y se abre el software LVSIM desde la PC
9. Colocar el switch en modo dinamómetro en el módulo para posterior escoger la función de aerogenerador turbina eólica en el software
10. Revisar los parámetros correctos para el arranque; relación de polea 24:24; tipo de aerogenerador 1,15m/3alabes; densidad del aire 1.12 (kg/m<sup>3</sup>)

11. Abrir la tabla de datos en el software y en parámetros de registro marcar los parámetros de velocidad, par, potencia y velocidad del viento
12. Colocar la velocidad de arranque en el valor de velocidad de viento del mes de enero, encender el circuito de excitación del generador y posteriormente la fuente de alimentación.
13. Dar marcha al emulador, esperar que el sistema se estabilice un momento
14. Registrar los valores de velocidad, par, potencia y velocidad del viento
15. Registrar los valores de voltaje de línea y de corriente de fase visualizados en los multímetros
16. Cambiar la velocidad a la del siguiente mes y repetir los pasos 12 y 13 nuevamente, repetir este paso hasta llegar a la velocidad de viento del mes de diciembre.
17. Se procede a detener el emulador con el botón de marcha/parada y con el apagado de los equipos, en primer lugar, la fuente de alimentación, segundo lugar el dinamómetro y por último se procede con la desconexión de los enchufes de cada módulo.

A continuación, se muestran los datos de producción eléctrica:

La tabla 24 muestra la producción eléctrica mensual promedio del sitio minas de Huascachaca:

**Tabla 24.**

*Producción eléctrica promedio mensual del sitio minas de Huascachaca*

Meses	Velocidad del viento promedio	Velocidad de rotación del aerogenerador	Par en el rotor del aerogenerador	Potencia mecánica en el rotor del aerogenerador	Potencia mecánica corregida con factor	Voltaje de línea de la carga	Corriente de la carga	Potencia eléctrica trifásica	Potencia eléctrica corregida con factor
	m/s	r/min	(N.m)	W	W	V	A	W	W

ene-23	6.2	719	0.605	45.57	39.145	79.9	0.262	36.258	31.146
feb-23	6.3	739	0.62	47.98	41.215	82.3	0.27	38.488	33.061
mar-23	6.4	756	0.634	50.18	43.105	84.2	0.276	40.251	34.576
abr-23	6.7	808	0.671	56.79	48.783	89.9	0.295	45.935	39.458
may-23	7.2	892	0.73	68.15	58.541	99.5	0.325	56.010	48.113
jun-23	10.3	1445	1.132	171.2	147.061	157.6	0.518	141.399	121.462
jul-23	12	1758	1.312	241.5	207.449	189.2	0.623	204.160	175.373
ago-23	10.4	1453	1.121	170.6	146.545	159.8	0.528	146.141	125.535
sep-23	9.4	1277	1.016	135.9	116.738	140.9	0.464	113.237	97.271
oct-23	6.4	754	0.628	49.55	42.563	84.6	0.278	40.736	34.992
nov-23	5.5	609	0.528	33.7	28.948	67.9	0.225	26.461	22.730
dic-23	6.4	756	0.636	50.31	43.216	84.7	0.279	40.931	35.159

La tabla 25 muestra los datos de producción eléctrica anual del sitio minas de Huascachaca

**Tabla 25.**

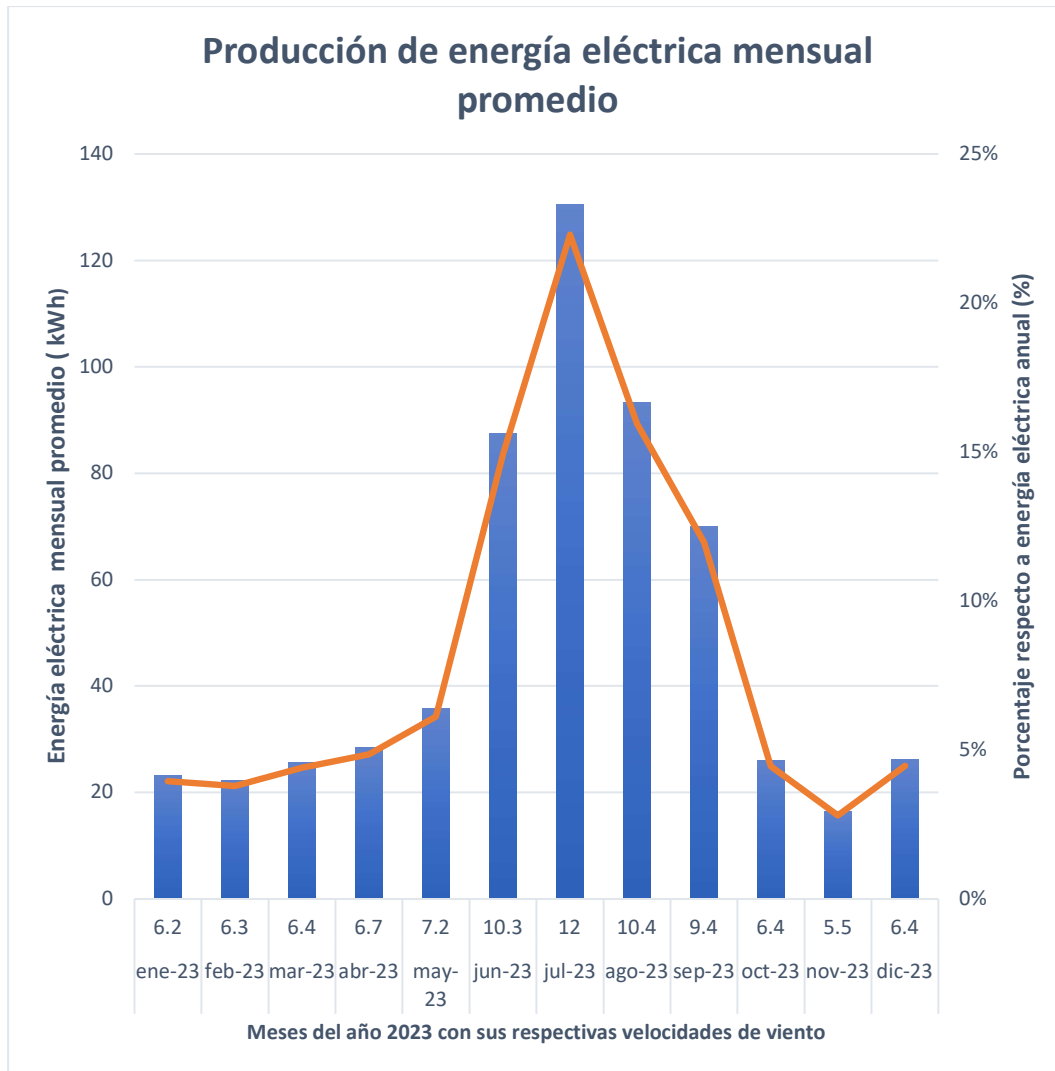
*Producción eléctrica anual del sitio minas de Huascachaca*

Meses	Energía eléctrica promedio producida	Energía eléctrica mensual promedio	Porcentaje mensual de generación	Producción de energía eléctrica mensual acumulada	Porcentaje mensual acumulado de energía eléctrica	Potencia eólica del viento	Eficiencia total de potencia eólica a eléctrica
	kWh	kWh/mes	%	kWh	%	W	%
ene-23	0.031	23.17	3.96%	23.17	3.96%	119.083	26.15%
feb-23	0.033	22.22	3.80%	45.39	7.76%	124.939	26.46%
mar-23	0.035	25.72	4.40%	71.11	12.15%	130.983	26.40%
abr-23	0.039	28.41	4.85%	99.52	17.01%	150.280	26.26%
may-23	0.048	35.80	6.12%	135.32	23.12%	186.498	25.80%
jun-23	0.121	87.45	14.94%	222.77	38.07%	545.993	22.25%
jul-23	0.175	130.48	22.29%	353.25	60.36%	863.415	20.31%
ago-23	0.126	93.40	15.96%	446.65	76.32%	562.051	22.34%
sep-23	0.097	70.04	11.97%	516.68	88.29%	415.011	23.44%
oct-23	0.035	26.03	4.45%	542.72	92.73%	130.983	26.71%
nov-23	0.023	16.37	2.80%	559.08	95.53%	83.131	27.34%
dic-23	0.035	26.16	4.47%	585.24	100.00%	130.983	26.84%
<b>Total (kWh/año)</b>		<b>585.24</b>	<b>100.00%</b>				

A continuación, la figura 45 se presentan las gráficas de producción eléctrica mensual

**Figura 45.**

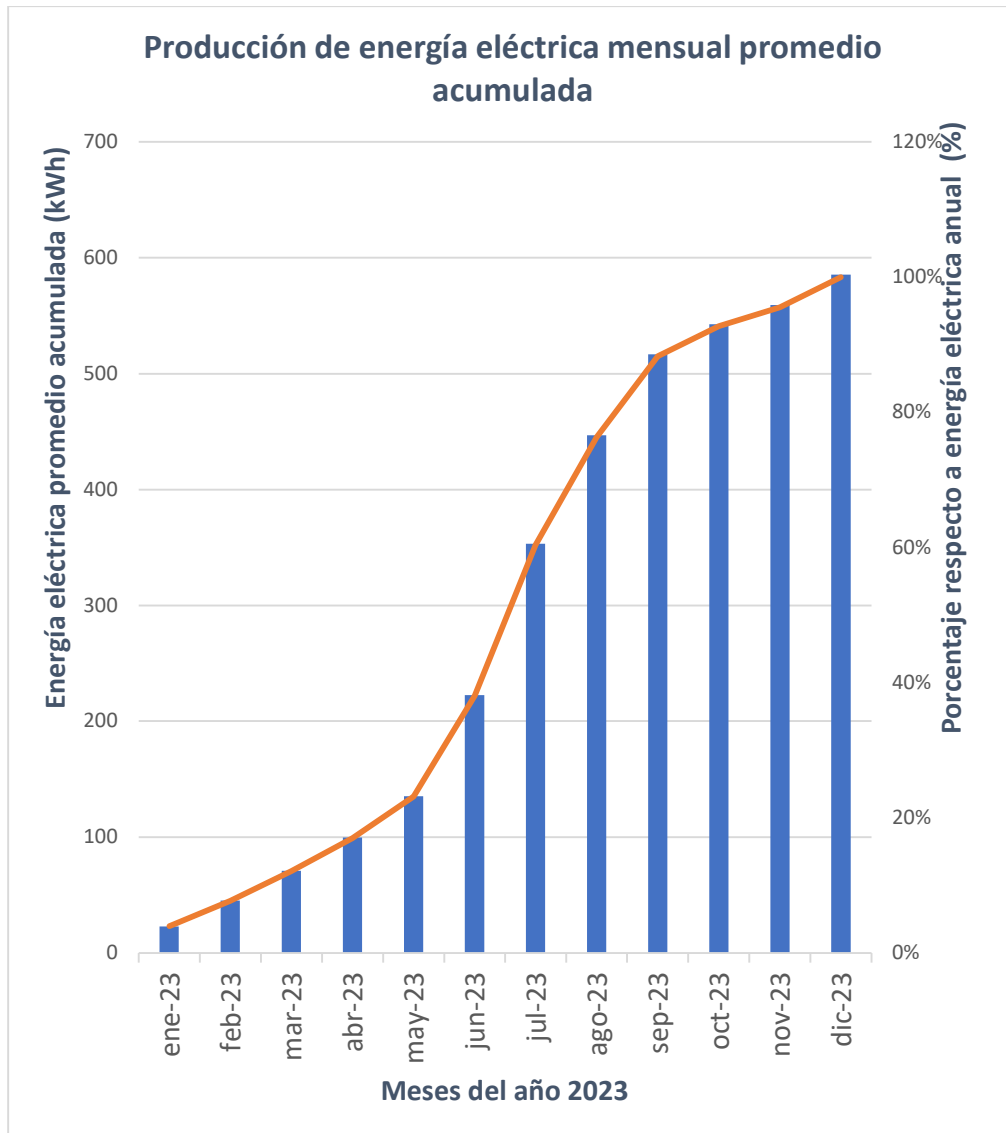
*Gráfico de producción eléctrica promedio mensual del sitio minas de Huascachaca*



A continuación, la figura 46 presenta las gráficas de producción eléctrica mensual promedio acumulada:

**Figura 46.**

*Producción de energía eléctrica mensual acumulada del sitio minas de Huascachaca.*



### 3.3.6.1. Análisis de la practica 6

Como se puede analizar en las curvas mostradas, la producción eléctrica es mayor en los meses centrales del año, esto sucede debido a que hay velocidades de viento mayores y por lo tanto un mayor aprovechamiento del recurso eólico, tal como se muestra en el gráfico de producción de energía eléctrica mensual promedio acumulada, en estos meses se producen los mayores incrementos de energía producidos con respecto a la energía anual.

### 3.3.6.2. Conclusiones de la practica 6

En base a los datos calculados derivados de la simulación del sitio minas de Huascachaca, la producción de energía eléctrica anual fue de  $585.24 \left(\frac{kWh}{año}\right)$ , se pudo observar la mayor producción en el mes de julio con un valor de  $130.48 \left(\frac{kWh}{mes}\right)$ , la cual ocurrió con la mayor velocidad promedio mensual de  $12 \left(\frac{m}{s}\right)$ , aportando 22.29% de la energía anual promedio producida por el aerogenerador, adicionalmente se concluye en base a la curva de producción de energía eléctrica mensual promedio acumulada que a partir del mes de junio hasta septiembre se producen los mayores incrementos en la energía eléctrica producida por el aerogenerador, esto debido a que se tienen vientos con altas velocidades que permiten un aprovechamiento mayor de la energía eólica.

El cálculo de la eficiencia total para convertir la energía del viento a eléctrica mostro que los meses con menor velocidad del viento tienen una mayor eficiencia, específicamente el mes de noviembre con un valor 27.34% de eficiencia total, esto es debido a que la resistencia de 171 ohm esta cercana al punto de máxima potencia para velocidades de viento más bajas.

### 3.3.7. *Practica 7: Regulación de potencia en aerogenerador haciendo uso del pitch control bajo condiciones meteorológicas reales del sitio Villonaco*

La practica 7 busca analizar uno de los componentes mas importantes en los aerogeneradores, el mismo es llamado pitch control, este mecanismo sirve para girar las palas del aerogenerador en caso de que se requiera disminuir la potencia obtenida del viento, disminuyendo así la velocidad de rotación del eje y para esto varia el ángulo de las palas entre 0 y 30 °, esta práctica hace uso de este mecanismo incorporado en uno de los tipos de turbina del emulador de aerogenerador.

Para esta práctica se analiza la producción eléctrica de un aerogenerador bajo condiciones meteorológicas reales del sitio Villonaco esto con el fin de visualizar el

comportamiento de un aerogenerador real en un sitio donde existe en la actualidad una central eólica, esta práctica permite calcular los porcentajes de regulación de potencia si se disminuyen 5 grados del ángulo de paso con respecto a aquel de máximo aprovechamiento, esto mediante el uso de un Aerogenerador de 1,15 m, 3 aspas con caja de engranajes y control de paso con una densidad de aire anual promedio de :  $0.971 \text{ (Kg/m}^3 \text{)}$

Debido a que el software permite la entrada de densidad del aire desde 1.12 a 1.44 ( $\text{Kg/m}^3$ ) es necesario ajustar la densidad al rango que nos permite el emulador, esto se hará basándonos en la ecuación del límite de Betz que indica una relación directamente proporcional entre la potencia del viento y la densidad del aire, esto con el fin de calcular la potencia generada con las condiciones disponibles en emulador para posteriormente aplicar este factor de corrección y encontrar la potencia eléctrica real del aerogenerador bajo las condiciones reales. Los datos de la practica fueron tomados del Merra 2 y del sitio Enair Ryse Energy, por lo que, para los cálculos de potencia a corregir:

Factor de conversión de densidad y por lo tanto potencia (real/emulador): 0.867

Las velocidades del viento promedio mensual de enero a diciembre del 2023 son: 9.9, 9.8, 10.2, 11.4, 12.8, 17.8, 18.8, 17.9, 16.5, 10.3, 7.5, 9.36.2, 6.3, 6.4, 6.7, 7.2, 10.3, 12, 10.4, 9.4, 6.4, 5.5, y 6.4

Los objetivos de la practica 7 son:

- Evaluar la regulación de potencia mecánica entregada por un aerogenerador bajo una carga de 171 ohm haciendo uso del ángulo de paso del pitch control en 30 y 25° en función de condiciones meteorológicas reales del sitio Villonaco en la provincia de Loja proporcionadas en la fundamentación.
- Calcular la potencia eléctrica producida por el aerogenerador para ángulos de paso del pitch control en 30° y 25 ° para los doce meses del año expuestos en la fundamentación.

A continuación, se describen los pasos para realizar la práctica:

1. Colocar los módulos indicados en la caja porta módulos de LabVolt, el dinamómetro de cuatro cuadrantes debe colocarse en el medio, al lado derecho debe estar el alternador, del lado izquierdo la fuente de alimentación, adicional se agregará el módulo de cargas resistivas que se ubicará en la parte superior de la fuente de alimentación.
2. Realizar la conexión en estrella en los bornes 4, 5 y 6 del alternador sincrónico, y conectar los bornes 7 y 8 a la fuente de alimentación en DC para la excitatriz
3. Conectar en estrella el final de cada resistencia y seleccionar 171 ohm de carga por fase (paralelo entre resistencias de 1200, 600 y 300 ohm), para luego conectar los bornes 1,2 y 3 del alternador a cada una de las cargas resistivas
4. Conectar en paralelo un multímetro en los bornes 1 y 2 del alternador sincrónico
5. Colocar en serie un multímetro con el cable de alimentación que va del borne 1 del alternador sincrónico a la carga resistiva
6. Conectar el cable de adquisición de datos del dinamómetro hacia la PC
7. Conectar la alimentación del dinamómetro, primero desde el módulo luego hacia el tomacorriente
8. Se enciende el dinamómetro y se abre el software LVSIM desde la PC
9. Colocar el switch en modo dinamómetro en el módulo para posterior escoger la función de aerogenerador turbina eólica en el software
10. Revisar los parámetros correctos para el arranque; relación de polea 24:24; tipo de aerogenerador 1,15 m, 3 aspas con caja de engranajes y control de paso; densidad del aire 1.12 (kg/m<sup>3</sup>); ángulo de control de paso según caso a analizar (30° o 25°)
11. Abrir la tabla de datos en el software y en parámetros de registro marcar los parámetros de velocidad, par, potencia y velocidad del viento

12. Colocar la velocidad de arranque en el valor de velocidad de viento del mes de enero, encender el circuito de excitación del generador y posteriormente la fuente de alimentación.
13. Dar marcha al emulador, esperar que el sistema se estabilice un momento
14. Registrar los valores de velocidad, par, potencia y velocidad del viento
15. Registrar los valores de voltaje de línea y de corriente de fase visualizados en los multímetros
16. Cambiar la velocidad a la del siguiente mes y repetir los pasos 12 y 13 nuevamente, repetir este paso hasta llegar a la velocidad de viento del mes de diciembre.
17. Cambiar el ángulo de paso según el siguiente caso a analizar ( $30^\circ$  o  $25^\circ$ ) y repetir los pasos 10, 11, 12, 13 y 14.
18. Se procede a detener el emulador con el botón de marcha/parada y con el apagado de los equipos, en primer lugar, la fuente de alimentación, segundo lugar el dinamómetro y por último se procede con la desconexión de los enchufes de cada módulo.

A continuación, se muestran los datos de producción eólica:

La tabla 26 muestra la producción de energía eléctrica con ángulo de paso de aerogenerador en 30% que permite el mayor aprovechamiento de energía eólica:

**Tabla 26.***Producción de energía eléctrica con ángulo de paso de aerogenerador en 30%*

Producción de energía eléctrica con ángulo de paso de aerogenerador en 30%									
Meses	Velocidad del viento promedio	Velocidad de rotación del aerogenerador	Par en el rotor del aerogenerador	Potencia mecánica en el rotor del aerogenerador	Potencia mecánica corregida con factor	Voltaje de línea de la carga	Corriente de la carga	Potencia eléctrica trifásica	Potencia eléctrica corregida con factor
	m/s	r/min	(N.m)	W	W	V	A	W	W
ene-23	9.9	157	0.17	2.798	2.426	15.7	0.048	1.305	1.132
feb-23	9.8	155	0.156	2.526	2.190	15.8	0.047	1.286	1.115
mar-23	10.2	166	0.167	2.907	2.520	17.9	0.06	1.860	1.613
abr-23	11.4	200	0.191	4.004	3.471	24.5	0.078	3.310	2.870
may-23	12.8	241	0.235	5.931	5.142	27.6	0.089	4.255	3.689
jun-23	17.8	408	0.368	15.71	13.621	45.5	0.149	11.742	10.181
jul-23	18.8	443	0.388	18.01	15.615	49.6	0.162	13.917	12.066
ago-23	17.9	413	0.358	15.49	13.430	46.1	0.151	12.057	10.453
sep-23	16.5	359	0.311	11.7	10.144	40.7	0.133	9.376	8.129
oct-23	10.3	166	0.176	3.068	2.660	19.3	0.061	2.039	1.768
nov-23	7.5	100	0.103	1.074	0.931	15.1	0.049	1.282	1.111
dic-23	9.3	142	0.155	2.309	2.002	12.9	0.038	0.849	0.736

La tabla 27 muestra la producción de energía eléctrica con ángulo de paso de aerogenerador en 25%, lo cual permite disminuir la potencia eólica aprovechada.

**Tabla 27.***Producción de energía eléctrica con ángulo de paso de aerogenerador en 25%*

Producción de energía eléctrica con ángulo de paso de aerogenerador en 25%									
Meses	Velocidad del viento promedio	Velocidad de rotación del aerogenerador	Par en el rotor del aerogenerador	Potencia mecánica en el rotor del aerogenerador	Potencia mecánica corregida con factor	Voltaje de línea de la carga	Corriente de la carga	Potencia eléctrica trifásica	Potencia eléctrica corregida con factor
	m/s	r/min	(N.m)	W	W	V	A	W	W
ene-23	9.9	141	0.045	0.667	0.578	12.9	0.002	0.045	0.039
feb-23	9.8	118	0.036	0.44	0.381	14.6	0.003	0.076	0.066
mar-23	10.2	129	0.058	0.777	0.674	13.2	0.002	0.046	0.040
abr-23	11.4	160	0.053	0.885	0.767	17.2	0.006	0.179	0.155
may-23	12.8	198	0.067	1.385	1.201	25.7	0.01	0.445	0.386
jun-23	17.8	368	0.091	3.499	3.034	44.8	0.02	1.552	1.346
jul-23	18.8	419	0.101	4.436	3.846	49.3	0.023	1.964	1.703
ago-23	17.9	396	0.089	3.687	3.197	47.7	0.021	1.735	1.504
sep-23	16.5	339	0.081	2.861	2.480	41.6	0.018	1.297	1.124
oct-23	10.3	139	0.04	0.579	0.502	14.2	0.002	0.049	0.043
nov-23	7.5	71	0.032	0.235	0.204	10.2	0.002	0.035	0.031
dic-23	9.3	103	0.036	0.384	0.333	12.1	0.002	0.042	0.036

La tabla 28 muestra la relación entre las potencias obtenidas con un ángulo de paso de 30 y 25° del pitch control.

**Tabla 28.**

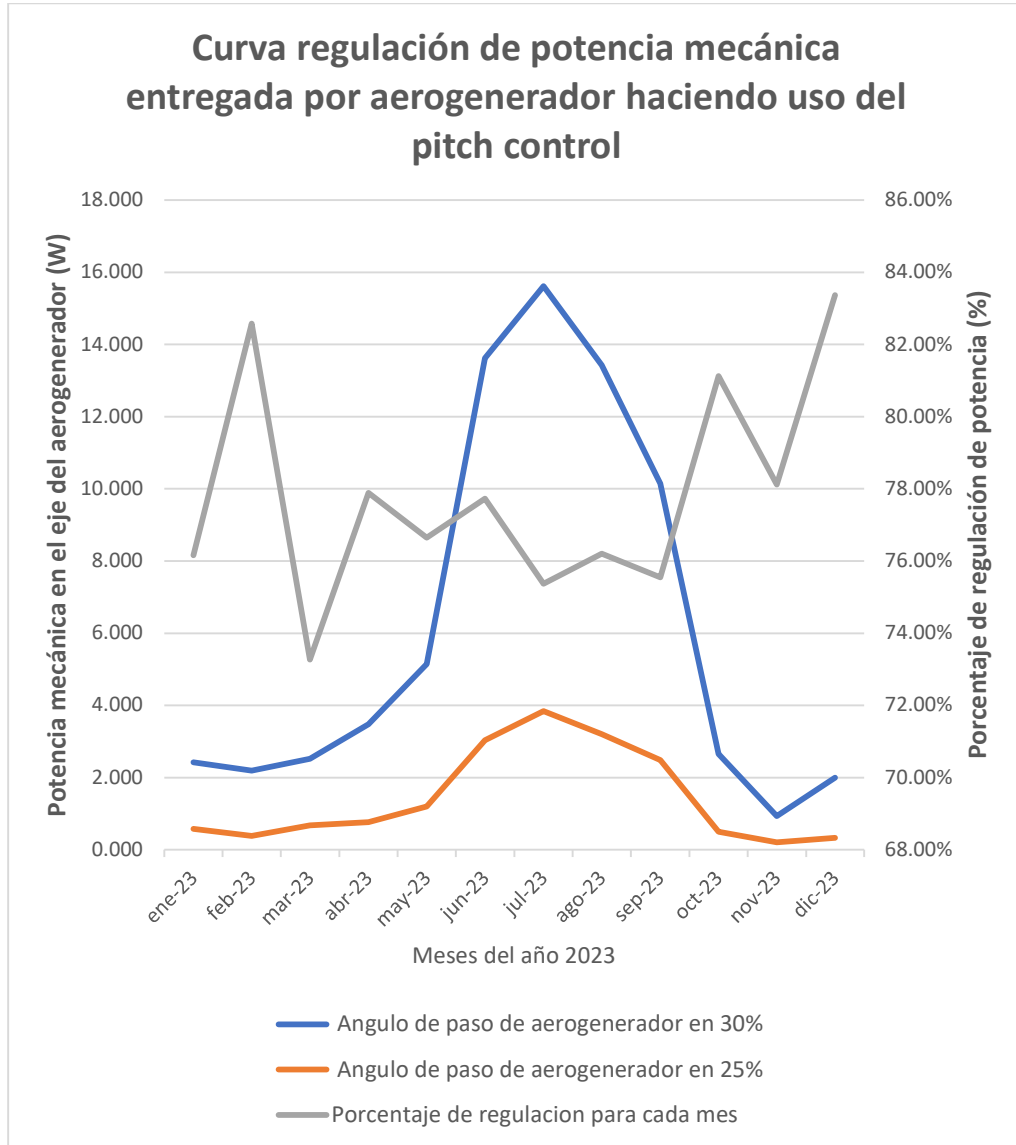
*Relación entre las variaciones de potencia obtenidas con ángulos de pitch control de 30 y 25°*

	Angulo de paso de aerogenerador en 30%	Angulo de paso de aerogenerador en 25%	
Meses	Potencia mecánica en eje	Potencia mecánica en eje	Porcentaje de regulación
	W	W	%
ene-23	2.426	0.578	76.16%
feb-23	2.190	0.381	82.58%
mar-23	2.520	0.674	73.27%
abr-23	3.471	0.767	77.90%
may-23	5.142	1.201	76.65%
jun-23	13.621	3.034	77.73%
jul-23	15.615	3.846	75.37%
ago-23	13.430	3.197	76.20%
sep-23	10.144	2.480	75.55%
oct-23	2.660	0.502	81.13%
nov-23	0.931	0.204	78.12%
dic-23	2.002	0.333	83.37%

A continuación, en la figura 47 se muestran las gráficas de producción mecánica y regulación de potencia:

**Figura 47.**

*Curva regulación de potencia mecánica entregada por aerogenerador haciendo uso del pitch control*



### **3.3.7.1. Análisis de la practica 7**

Como se pudo analizar en la practica 7, las potencias generadas con el ángulo de 25° de pitch control son menores que aquellas con un ángulo de 30° esto sucede debido a la posición desfavorable de las aspas respecto al viento que las golpea, este control del ángulo de paso del pitch control permite disminuir la potencia en caso de que se tenga poca demanda o también cuando la turbina experimente velocidades del viento mayores la velocidad optima de funcionamiento.

### **3.3.7.2. Conclusiones de la practica 7**

Como conclusión, en base a la curva regulación de potencia mecánica entregada por el aerogenerador haciendo uso del pitch control, el porcentaje de regulación mayor de potencia mecánica si se aplica un ángulo de paso de 25° en las palas del aerogenerador es del 83.37%, la aplicación de este tipo de control es importante debido a que permite una regulación de la velocidad en las palas del aerogenerador, ya que, como se observó en las velocidades de rotación para ambos casos, estas disminuyen a medida que también lo hace el ángulo de paso de las palas del aerogenerador.

El cálculo de la mayor potencia eléctrica generada por el aerogenerador para el caso del ángulo de paso de 30% fue de 12.066 vatios, mientras que para el ángulo de 25% fue de 1.7 vatios, esto supone una regulación de potencia eléctrica del 85.91%

## Capítulo IV: Discusión de los Resultados

### 4. Conclusiones

- Las configuraciones adecuadas del dinamómetro de cuatro cuadrantes permitieron que el emulador de aerogenerador replicara con exactitud las curvas características de un aerogenerador real para diferentes velocidades del viento, logrando obtener así los coeficientes de potencia de la turbina emulada que influyen en la generación de energía eléctrica.
- Se destaca la importancia de realizar simulaciones de casos de estudio con condiciones meteorológicas reales debido a que permitieron comprender las producciones de energía eléctrica mensual, anual, eficiencias y comportamientos de aerogeneradores para sitios de alto potencial eólico en Ecuador, brindando así la pauta para realizar análisis adicionales en localidades que también posean un gran potencial de generación pero que aún no han sido estudiados o aprovechados.
- El manual de laboratorio del simulador de aerogenerador permite a los estudiantes interesados en la energía eólica aprender de una manera sencilla, didáctica y segura los conceptos claves que definen el comportamiento de turbinas eólicas reales bajo diferentes condiciones del viento, esto mediante la realización de prácticas de laboratorio que cuentan con una fundamentación adecuada para cada caso, así como instrucciones claras para el conexionado de los módulos utilizados en estas.

## 5. Recursos

### 5.1. Recursos humanos

Tabla 29.

*Recursos humanos*

<b>NOMBRE</b>	<b>FUNCION O CARGO</b>	<b>APORTE AL PROYECTO</b>
Ing. Vladimir Jaramillo García, PhD	Docente	Tutor del Proyecto
Palma Rodríguez Leonardo	Estudiante	Autor
Vera Parrales Richard	Estudiante	Autor

### 5.2. Recursos institucionales

Tabla 30.

*Recursos institucionales*

<b>EQUIPO/LABORATORIO/ SOFTWARE (OTROS)</b>	<b>ÁREA</b>	<b>FACULTAD</b>
Fuente de Voltaje variable	Laboratorio de Potencia	Ingeniería Eléctrica
Conectores	Laboratorio de Potencia	Ingeniería Eléctrica
Módulo de resistencias	Laboratorio de Potencia	Ingeniería Eléctrica
Motor/Alternador sincrónico	Laboratorio de Potencia	Ingeniería Eléctrica

### 5.3. Recursos materiales y económicos

**Tabla 31.**

*Recursos materiales y económicos*

Nº	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD U	VALOR	VALOR TOTAL
			UNITARIO \$	\$
1	Módulo de Dinamómetro/Fuente de Alimentación de Cuatro Cuadrantes 8960-F	1	\$9782,71	\$9782,71
2	Licencia para firmware simulador de pequeña turbina eólica 8968-3	1	\$300	\$300
3	Correa dentada de acoplamiento	1	30	30
4	Manual de prácticas	1	20	20
5	Conectores de entradas o salidas	15	1,5	1,5
			Total	<b>\$10.134,21</b>

**TOTAL: diez mil ciento treinta y cuatro dólares americanos con veintiún centavos**

## Cronograma

**Tabla 32.**

*Cronograma Etapa 1*

Meses  Actividades	Año 2023-2024											
	Agosto		Septiembre		Octubre		Noviembre		Diciembre		Enero	
Entrega del anteproyecto y petición de tutor para trabajo de titulación												
Aprobación del tema y designación de tutor.												
Elaboración del tema de Anteproyecto.												
Reconocimiento del módulo a implementar y estudiar.												
Planteamiento de Objetivos y revisión del tutor.												
Desarrollo de la propuesta.												
Elaboración de Antecedentes y revisión del tutor.												
Desarrollo de Justificación y revisión del tutor.												
Elaboración de Marco teórico y revisión de Fuentes bibliográficas.												
Planteamiento y desarrollo de Recursos.												
Revisión y corrección del Anteproyecto por parte del tutor												
Entrega del anteproyecto a la comisión académica												
Entrega del proyecto final, petición de tribunal y fecha de sustentación												

**Tabla 33.**

*Cronograma Etapa 2*

Meses  Actividades	Año 2023-2024																
	Abril			Mayo			Junio			Julio		Agosto					
Desarrollo del capítulo 1: El problema	■	■															
Adquisición del dinamómetro de cuatro cuadrantes			■														
Desarrollo del capítulo 2: arco teórico				■													
Desarrollo del capítulo 3: Diseño del proyecto					■	■											
Seguimiento del tutor en el formato de tesis						■											
Desarrollo de practicas							■	■	■	■	■	■	■				
Desarrollo del capítulo 4: Discusiones de los resultados								■	■	■	■	■	■				
Revisión y corrección del proyecto												■					
Conclusiones y anexos													■				
Entrega del proyecto al tutor y correcciones														■			
Entregar del proyecto final con la documentación															■		
Designación de fecha de sustentación																■	■

## Referencias bibliográficas

- Abo-Khalil, A., & Sayed, K. (2021). Wind Turbine Simulation and Control Using Squirrel-Cage Induction Generator for Dfig Wind Energy Conversion Systems. *Sohag Engineering Journal*, 1(1), 1-15.  
<https://doi.org/10.21608/sej.2021.155556>
- Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables [ARCERNNR]. (2024). Balance Nacional de Energía Eléctrica – Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables (p. 1) [Balance nacional de energía eléctrica]. ARCERNNR.  
<https://www.controlrecursosyenergia.gob.ec/balance-nacional-de-energia-electrica/>
- Ahluwalia, V. K. (2019). *Energy and Environment*. Energy and Resources Institute.
- Ahonen, H. M., Möllersten, K., & Spalding-Fecher, R. (2021). *Voluntary compensation of greenhouse gas emissions: International guidance and initiatives*. Nordic Council of Ministers.  
<http://dx.doi.org/10.6027/temanord2021-541>
- Amjith, L. R., & Bavanish, B. (2022). A review on biomass and wind as renewable energy for sustainable environment. *Chemosphere*, 293, 133579.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133579>
- Andrade, R. G., Ramírez, A. F., Reyes, A. M., & Tamez, M. (2020). Diseño de hélices de aerogenerador de bajas velocidades de viento. *Miscelánea Científica en México*, 625.
- Aragón-Moreno, J. A., Serna-Castaño, E. D., & Solano-Romero, D. S. (2019). Estudio climatológico de los vientos para la ciudad de Bogotá en el periodo 2010 – 2016. *Entramado*, 15(2), 286-307.  
<https://doi.org/10.18041/1900-3803/entramado.2.5733>

- Armijo, L. A. U., Masaquiza, J. U. M., Carrión, J. M. P., & Jácome, M. G. M. (2023). Revisión documental de la energía eólica para la generación de energía eléctrica en el Ecuador. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(6), 6714-6734.  
[https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v7i6.9202](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i6.9202)
- Auer, M. E., & May, D. (2020). *Cross Reality and Data Science in Engineering: Proceedings of the 17th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation*. Springer International Publishing.  
<https://doi.org/10.1007/978-3-030-52575-0>
- Barragán-Escandón, A., Jara-Nieves, D., Romero-Fajardo, I., Zalamea-Leon, E. F., & Serrano-Guerrero, X. (2022). Barriers to renewable energy expansion: Ecuador as a case study. *Energy Strategy Reviews*, 43, 14.  
<https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.100903>
- Becerra, G., Hernández, J., Osorio, E., O. Aguilar, J., & Vazquez, J. (2020). Evaluación de sistemas eólicos en el Caribe. *Científica*, 24(2), 125-133.  
<https://doi.org/10.46842/ipn.cien.v24n2a04>
- Bennett, S. (2020). *Medium/Heavy Duty Truck Engines, Fuel & Computerized Management Systems*. Cengage Learning.
- Burton, T., Jenkins, N., Bossanyi, E., Sharpe, D., & Graham, M. (2021). *Wind energy handbook* (Third edition). Wiley.
- Chakrabarti, A. H., Sunita. (2022). *Power Systems Analysis: Operation and Control*. PHI Learning.
- Cruz, T., Schaeffer, R., Lucena, A. F. P., Melo, S., & Dutra, R. (2020). Solar water heating technical-economic potential in the household sector in Brazil. *Renewable Energy*, 146, 1618-1639.  
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.085>

- Cubillo Sagues, M. I., Gordaliza Lozoya, D., & Garcia Sanchez, J. M. (2020). *Gestión de la eficiencia energética en el sector industrial*. AENOR - Asociación Española de Normalización y Certificación. <https://elibro.net/es/lc/uleam/titulos/171688>
- Calvache, J. E., & Lincango, J. B. (2024). *Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito Carrera De Mecatrónica*. Obtenido de Diseño Y Construcción De Un Prototipo De Turbina Eólica De Eje Vertical Para Su Utilización En Equipos De Baja Potencia Hasta 20w: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/27277/4/TTS1791.pdf>
- Corte, D., Sierra, F., & Valencia, G. (2015). Validación del modelo matemático “Función de densidad de probabilidad (pdf) de Weibull”, evaluando el recurso eólico en la zona del caribe colombiano: Caso estudio. *Prospectiva*, 13(2), 38.  
<https://doi.org/10.15665/rp.v13i2.485>
- David Pérez. (2023). *Energía Eólica. Fundamentos, Tecnologías Y Aplicaciones*. Marcombo.
- Damilola Ilesanmi, K., & Tewari, D. D. (2022). Increased Fossil Fuel Consumption and Its Impact on Energy Efficiency and Economic Growth. *Academic Journal of Interdisciplinary Studies*, 11(1), 188.  
<https://doi.org/10.36941/ajis-2022-0017>
- Dori, Y. J., Ngai, C., & Szeinberg, G. (2023). *Digital Learning and Teaching in Chemistry*. Royal Society of Chemistry.
- Enair. (2024). *Atlas Eolico y Solar Mundial*. Obtenido de RyseEnergy:  
<https://www.enair.es/es/app>
- Energy Institute. (2024). *Statistical Review of world Energy* (73.<sup>a</sup> ed.). KPMG.
- Energy, U. D. (2023). *Land-Based Wind Market Report*. Obtenido de  
<https://www.energy.gov/sites/default/files/2023-08/land-based-wind-market-report-2023-edition.pdf>

ETAP. (2023). *ETAP.COM*. Obtenido de <https://etap.com/es/product/wind-turbine-generator-software>

Eurostat. (2023). *Shedding light on energy—2023 edition*.

<https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/DDN-20230119-1>

Europea, C. d. (2023). *Consejo de la UE y del Consejo Europeo*. Obtenido de

<https://www.consilium.europa.eu/es/policies/climate-change/paris-agreement/>

FESTO. (2023). *LabVolt Series by Festo Didactic—Four-Quadrant Dynamometer/Power*

*Supply (8960-F0)*. [https://labvolt.festo.com/solutions/6\\_power\\_energy/50-8960-](https://labvolt.festo.com/solutions/6_power_energy/50-8960-)

[F0\\_four\\_quadrant\\_dynamometer\\_power\\_supply](https://labvolt.festo.com/solutions/6_power_energy/50-8960-F0_four_quadrant_dynamometer_power_supply)

FESTO. (2023). *Festo Didactic*. Obtenido de Four-Quadrant Dynamometer/Power Supply

579669

(8960-F0):

[https://labvolt.festo.com/solutions/6\\_electricity\\_and\\_new\\_energy/50-8960-](https://labvolt.festo.com/solutions/6_electricity_and_new_energy/50-8960-)

[F0\\_four\\_quadrant\\_dynamometer\\_power\\_supply](https://labvolt.festo.com/solutions/6_electricity_and_new_energy/50-8960-F0_four_quadrant_dynamometer_power_supply)

FLUKE. (2024). *FLUKE*. Obtenido de What is a digital multimeter?:

[https://www.fluke.com/es-ec/informacion/blog/electrica/que-es-un-multimetro-](https://www.fluke.com/es-ec/informacion/blog/electrica/que-es-un-multimetro-digital#:~:text=Un%20mult%C3%ADmetro%20digital%20(DMM)%20es,las%20ind)

[digital#:~:text=Un%20mult%C3%ADmetro%20digital%20\(DMM\)%20es,las%20ind](https://www.fluke.com/es-ec/informacion/blog/electrica/que-es-un-multimetro-digital#:~:text=Un%20mult%C3%ADmetro%20digital%20(DMM)%20es,las%20ind)

[ustrias%20e%20el%C3%A9ctricas%20y%20electr%C3%B3nicas.](https://www.fluke.com/es-ec/informacion/blog/electrica/que-es-un-multimetro-digital#:~:text=Un%20mult%C3%ADmetro%20digital%20(DMM)%20es,las%20ind)

FLUKE. (2024). *FLUKE*. Obtenido de ¿Qué es una pinza amperimétrica?:

<https://www.fluke.com/es-ec/informacion/blog/sonda-tipo-pinzas/el-abc-de-las->

[pinzas-](https://www.fluke.com/es-ec/informacion/blog/sonda-tipo-pinzas/el-abc-de-las-pinzas-)

[amperimetricas#:~:text=Una%20pinza%20amperim%C3%A9trica%20es%20una,Las](https://www.fluke.com/es-ec/informacion/blog/sonda-tipo-pinzas/el-abc-de-las-pinzas-amperimetricas#:~:text=Una%20pinza%20amperim%C3%A9trica%20es%20una,Las)

[%20sondas%20miden%20la%20tensi%C3%B3n.](https://www.fluke.com/es-ec/informacion/blog/sonda-tipo-pinzas/el-abc-de-las-pinzas-amperimetricas#:~:text=Una%20pinza%20amperim%C3%A9trica%20es%20una,Las%20sondas%20miden%20la%20tensi%C3%B3n.)

Francisco, B. D., & Bruno Villena, R. A. (2024). *Universidad Tecnológica del Perú*.

Obtenido de Diseño y modelado de un sistema Green Energy compuesto de un

aerogenerador Savonius de 2 aspas y un servomecanismo automático para el

- suministro eléctrico a una vivienda unifamiliar en condiciones de baja velocidad del viento en Puno 2023: <https://repositorio.utp.edu.pe/handle/20.500.12867/8827>
- Gallo Jaramillo, L. A., Chica Arrieta, E. L., & Flórez Serrano, E. G. (2022). Estudio de desempeño de distintos perfiles de álabe de una turbina eólica para aprovechar vientos de baja velocidad. *Ingeniería*, 27(1), e18127.  
<https://doi.org/10.14483/23448393.18127>
- Gao, Q., Lian, S., & Yan, H. (2022). Aerodynamic Performance Analysis of Adaptive Drag-Lift Hybrid Type Vertical Axis Wind Turbine. *Energies*, 15(15), 5600.  
<https://doi.org/10.3390/en15155600>
- GEOGRAPHIC, N. (2022). *National Geographic*. Obtenido de Energía eólica:  
<https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/que-es-la-energia-eolica>
- Gielen, D., Boshell, F., Saygin, D., Bazilian, M. D., Wagner, N., & Gorini, R. (2019). The role of renewable energy in the global energy transformation. *Energy Strategy Reviews*, 24, 38-50.  
<https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.01.006>
- Gómez González, O. (2022). *Control de un aerogenerador de eje horizontal basado en un generador de inducción doblemente alimentado: Suministro de potencia a la red eléctrica*  
<https://doi.org/10.24275/uama.6741.8712>
- González, G. N., De Angelo, C. H., & Aligia, D. A. (2022). A control strategy for DFIG-based systems operating under unbalanced grid voltage conditions. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 142, 108273.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108273>
- González Hernández, J. G. (2018). Mejora del aprendizaje de la eficiencia eólica mediante el modelado del coeficiente de potencia en la Universidad Tecnológica de Altamira /

Improvement of the Learning of Wind Efficiency by Modeling the Power Coefficient at Technological University of Altamira. *RIDE Revista Iberoamericana para la Investigación y el Desarrollo Educativo*, 9(17), 529-534.

<https://doi.org/10.23913/ride.v9i17.392>

Hernández, E. S., & Lizarazo, J. A. (2023). *Universidad Antonio Nariño*. Obtenido de Desarrollo de una plataforma didáctica de simulación en tiempo real de un sistema de generación eléctrica compuesto por un aerogenerador de 400W y un inversor de potencia. <https://repositorio.uan.edu.co/server/api/core/bitstreams/0ca94599-6035-43c1-9c48-d71088796b65/content>

*Introducción a la energía eólica. Guía del profesor, 86353-12* (Primera edición). (2012). Lab-Volt.

IRENA. (2024). *Tracking COP28 outcomes: Tripling renewable power capacity by 2030*.

Kunjumammed, L., Kuenzel, S., & Pal, B. (2019). *Simulation of Power System with Renewables*. Elsevier Science.

Kutt, F., Blecharz, K., & Karkosiński, D. (2020). Axial-Flux Permanent-Magnet Dual-Rotor Generator for a Counter-Rotating Wind Turbine. *Energies*, 13(11).

<https://doi.org/10.3390/en13112833>

Lenscak, M. P. (2022). Inta Digital Repositorio Institucional Biblioteca Digital. Obtenido de Rosa de los vientos de Bella Vista, Corrientes:

<https://repositorio.inta.gob.ar/handle/20.500.12123/13344>

Mahjoub, S., Chrifi-Alaoui, L., Drid, S., & Derbel, N. (2023). Control and Implementation of an Energy Management Strategy for a PV-Wind-Battery Microgrid Based on an Intelligent Prediction Algorithm of Energy Production. *Energies*, 16(4).

<https://doi.org/10.3390/en16041883>

- Martos, J. A. (2023). *UNIVERSIDAD DE JAÉN - Escuela Politécnica Superior de Linares*.  
Obtenido de Diseño y construcción de un aerogenerador de laboratorio y control mediante arduino:  
[https://crea.ujaen.es/bitstream/10953.1/20465/1/Jesus\\_Cabello\\_Martos\\_TFG%20-%20Jesus%20Alfonso%20Cabello%20Martos.pdf](https://crea.ujaen.es/bitstream/10953.1/20465/1/Jesus_Cabello_Martos_TFG%20-%20Jesus%20Alfonso%20Cabello%20Martos.pdf)
- Mills, B. (2023). *Renewable Energy*. Amazon Digital Services LLC - Kdp.
- Ministerio de Energía y Minas. (2023). Gobierno Nacional pone en operación el Parque Eólico más grande del Ecuador –Ministerio de Energía y Minas.  
<https://www.recursosyenergia.gob.ec/gobierno-nacional-pone-en-operacion-el-parque-eolico-mas-grande-del-ecuador/>
- Mohanty, B., & Stelson, K. A. (2022). Dynamics and Control of an Energy-Efficient, Power-Regenerative, Hydrostatic Wind Turbine Dynamometer. *Energies*, 15(8), Article 8.  
<https://doi.org/10.3390/en15082868>
- Naciones Unidas (ONU), *Acuerdo de París de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC)*, 12 Diciembre 2015,  
<https://www.refworld.org/es/leg/trat/onu/2015/es/134497>
- Naranjo-Silva, S. (2024). Una perspectiva del desarrollo hidroeléctrico en Ecuador: Pasado, presente y futuro. *La Granja. Revista de Ciencias de la Vida*, 39(1), 63-77.
- Nicolini, A. (2020). *Conexao de Turbinas Eolicas a Rede Eletrica*. Bibliomundi.
- Okedu, K. E., & Barghash, H. F. A. (2021). Enhanced Dynamic Behaviour of Grid Connected Wind Farms in Load Participation and Frequency Regulation. *Frontiers in Energy Research*, 8, 606019.  
<https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.606019>
- Okedu, K. E. (2023). *Performance of DFIG and PMSG wind turbines*. CRC Press, Taylor & Francis Group.

- Patel, M. R., & Beik, O. (2021). *Wind and solar power systems: Design, analysis, and operation* (Third edition). CRC Press.
- Paul, B. C. (2024). *Escuela Profesional De Ingeniería Mecánica Eléctrica*. Obtenido de Diseño de un sistema híbrido eólico - solar para suministrar energía eléctrica a una vivienda unifamiliar en la ciudad de Eten.
- Perez Montes, D., De Ávila Solano, A., & Jimenez Cardozo, J. (2022). Análisis del potencial eólico a través de la función de distribución de Weibull y Rosa de los vientos. *LADEE*, 3(1).  
<https://doi.org/10.17981/ladec.03.01.2022.4>
- Peszko, G., Mensbrughe, D. van der, Golub, A., Ward, J., Marijs, C., Schopp, A., Rogers, J., & Midgley, A. (2020). *Diversification and Cooperation in a Decarbonizing World: Climate Strategies for Fossil Fuel-Dependent Countries*. World Bank Publications.
- Quaschnig, V., & Eppel, H. (2020). *Renewable energy and climate change* (Second edition). Wiley.
- Rio, A. del, & Luna, N. (2019). *¿Cómo ves? Energías renovables: Hacia la sustentabilidad*. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).
- Roga, S., Bardhan, S., Kumar, Y., & Dubey, S. K. (2022). Recent technology and challenges of wind energy generation: A review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52, 102239.
- Sánchez-Orgaz, E. M., Maronda-Tarrasa, I., Muñoz-Pellicer, D., & Martínez-Sanchís, S. (2022). Diseño optimizado del perfil de pala de un aerogenerador doméstico de 700 W mediante algoritmo genético. *Revista UIS Ingenierías*, 21(1).  
<https://doi.org/10.18273/revuin.v21n1-2022011>

- San Miguel Alfaro, G., Regueiro Ferreira, R., Gómez Catasús, J., & Gomez Villarino, M. T. (2023). *Tecnología y sostenibilidad de la energía eólica. Preguntas y respuestas [Figura]*. Ediciones Mundi-Prensa.
- Schaffarczyk, A. P. (2020). *Introduction to wind turbine aerodynamics*. Springer Nature.  
<https://doi.org/10.1007/978-3-030-41028-5>
- Schröder, L. (2020). *Towards digital twin technology: Wind farm operation analysis and optimization using model-supported data analytics*.  
<https://doi.org/10.11581/DTU:00000100>
- Shoaib, M., Siddiqui, I., Amir, Y. M., & Rehman, S. U. (2017). Evaluation of wind power potential in Baburband (Pakistan) using Weibull distribution function. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 1343-1351.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.037>
- Solano, A. A., Cruz Jiménez, B., Ramos Fernández, C. A., Solís Guzmán, K., Núñez Mata, O., & Pérez Mora, A. (2021). Metodología FMECA para un aerogenerador doblemente alimentado. *Ingeniería*, 31(2), 112-125.  
<https://doi.org/10.15517/ri.v31i2.46100>
- Tong, W. (2022). *Mechanical Design and Manufacturing of Electric Motors*. CRC Press.
- Vargas, L., Haas, J., & Reyes, L. (2020). *Generación de energía eléctrica con fuentes renovables*. Editorial Universitaria de Chile.
- Vedovelli, M., Eltayesh, A., Natili, F., & Castellani, F. (2022). Experimental and Numerical Investigation of the Effect of Blades Number on the Dynamic Response of a Small Horizontal-Axis Wind Turbine. *Energies*, 15(23), 9134.  
<https://doi.org/10.3390/en15239134>
- Woolley, O. (2023). *Renewable Energy Law*. Bloomsbury Publishing.

Xu, W., Li, G., Wang, F., & Li, Y. (2020). High-resolution numerical investigation into the effects of winglet on the aerodynamic performance for a three-dimensional vertical axis wind turbine. *Energy Conversion and Management*, 205, 112333.

<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112333>

Zhang, J. H., Lien, F.-S., & Yee, E. (2022). Investigations of Vertical-Axis Wind-Turbine Group Synergy Using an Actuator Line Model. *Energies*, 15(17), 6211.

<https://doi.org/10.3390/en15176211>



## LABORATORIO

### PRÁCTICAS EN EMULADOR EOLICO

#### INFORME

<b>NOMBRE DE LA PRÁCTICA</b>	Producción eólica de energía mecánica en aerogenerador.	<b>No. PRÁCTICA:</b> CIE_eólica-01
------------------------------	---	------------------------------------

#### 1. DATOS INFORMATIVOS

<b>CARRERA:</b>	Electricidad
<b>CICLO/NIVEL:</b>	Egresado
<b>FECHA:</b>	23/05/2024
<b>NOMBRE DEL ESTUDIANTE:</b>	Richard Vera Parrales Leonardo Palma Rodríguez
<b>DOCENTE RESPONSABLE</b>	Ing. Vladimir Jaramillo García, PhD

#### 2. FUNDAMENTACIÓN

- Velocidad y energía del viento
- Relaciones De Velocidad Y Potencia
- Límite de Betz

##### - Definiciones

#### Velocidad y energía del viento

El aerogenerador convierte la energía cinética del viento en electricidad a través de un rotor compuesto por dos o más palas, que están conectadas mecánicamente a un generador eléctrico. La turbina se monta en una torre alta para maximizar la captación de energía. Se utiliza la adición de turbinas para lograr el objetivo de generación deseado. Una mayor producción de energía en un año dependerá de la velocidad y constancia del viento.

Existen dos configuraciones principales para el diseño de turbinas eólicas: la de eje horizontal (Figura 1) y de eje vertical. Sin embargo, la mayoría de las turbinas eólicas

modernas utilizan un diseño de eje horizontal. Exceptuando el rotor, la mayoría de los otros componentes son parecidos, pero con variación en el lugar de ubicación (Patel & Beik, 2021).

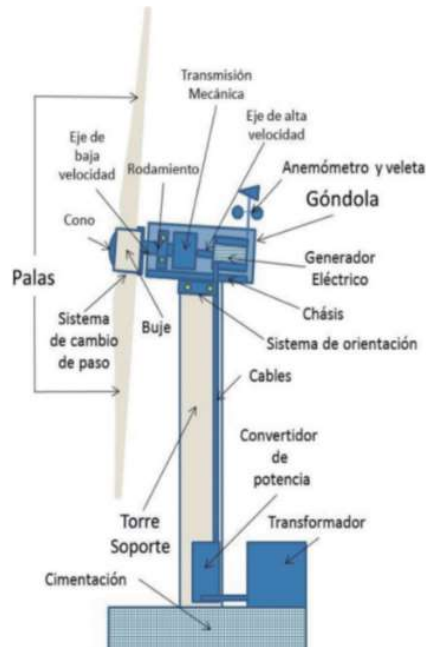


Figura 48. Componentes de un aerogenerador de eje horizontal. Fuente: (San Miguel Alfaro et al., 2023)

### Relaciones De Velocidad Y Potencia

La energía cinética del aire en movimiento puede ser aprovechada para generar electricidad mediante aerogeneradores. La energía cinética de una masa de aire  $m$  que se desplaza con una velocidad  $V$  se calcula con la fórmula:

$$Energía\ cinética = \frac{1}{2} mV^2 \quad (1)$$

La potencia del aire en movimiento, que es la tasa de flujo de esta energía cinética por segundo, se expresa en vatios como:

$$Potencia = \frac{1}{2} (\text{flujo masico por segundo})V^2 \quad (2)$$

El caudal volumétrico es el área barrida por las palas del rotor ( $m^2$ ) multiplicado por la velocidad del aire ( $\frac{m}{s}$ ) es  $A * V$ , el caudal másico del aire en kilogramos por segundo es  $\rho *$

$A * V$ , por lo que la potencia mecánica que posee el viento está dada por la siguiente ecuación en vatios (W):

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

Donde:

$P$  = potencia del viento que circula por las aspas del aerogenerador (vatios)

$\rho$  = densidad del aire  $\left(\frac{Kg}{m^3}\right)$

$A$  = área barrida por las aspas del aerogenerador ( $m^2$ )

$V$  = velocidad del viento  $\left(\frac{m}{s}\right)$

### **Límite de Betz**

Permite calcular la máxima cantidad de potencia eólica que puede ser extraída por las palas del aerogenerador, este valor es del 59,3%, en sistemas reales el eje del aerogenerador acoplado a las palas no llega a un porcentaje tan alto de aprovechamiento ya que se debe considerar la eficiencia del conjunto buje-rotor que transmite la potencia mecánica al eje del generador eléctrico (Andrade et al., 2020).

### **Tipo de turbina del emulador de aerogenerador a utilizar**

- Aerogenerador de 1,15 m con 3 álabes

### **Datos del sitio propuesto para la practica**

La simulación es de un aerogenerador con palas de 1,15 m con 3 álabes ubicado en el sitio Urdaneta (Provincia de Los Ríos) y los datos de velocidad de viento, densidad del aire son obtenidos del MERRA-2 - oficina global de modelado y asimilación, de la administración nacional de aeronáutica y el espacio (NASA)

- Latitud: -3.71592
- Longitud: -79.19517
- Altitud: 3174.9 m.
- Densidad del aire de enero a junio:  $0.962 \left(\frac{Kg}{m^3}\right)$
- Densidad del aire de julio a diciembre:  $0.972 \left(\frac{Kg}{m^3}\right)$

Debido a que el software permite la entrada de densidad del aire desde 1.12 a  $1.44 \left(\frac{Kg}{m^3}\right)$  es necesario ajustar la densidad al rango que nos permite el emulador, esto se hará basándonos en la ecuación (3) que indica una relación directamente proporcional entre la potencia del viento y la densidad del aire, para posteriormente aplicar el mismo factor de corrección y

encontrar la potencia mecánica real del aerogenerador para esas condiciones. Por lo que, **para la simulación:**

- ✓ Densidad del aire de enero a junio:  $1.120 \left(\frac{Kg}{m^3}\right)$
- ✓ Densidad del aire de julio a diciembre:  $1.131 \left(\frac{Kg}{m^3}\right)$
- ✓ Factor de conversión de densidad y potencia  $\left(\frac{real}{emulador}\right)$ : 0.8589

**Estimación de la velocidad del viento en Software ENAIR Ryse Energy**

Este software permite el cálculo de la velocidad del viento, producción mensual, anual, distribución de Weibull y demás parámetros basándose en fuentes como el DTU, MERRA-2, VAISALA y BBDD de fuente propia, sin embargo se pueden tener para medias del viento con márgenes de error de hasta el 15% debido a la precisión de los datos y cálculos(Enair, 2024).

A continuación se encuentran los parámetros y valores para la simulación de la producción eólica de energía mecánica de una turbina eólica de 300 vatios en vacío del sitio Urdaneta (Provincia de Los Ríos):

**Tabla 34**

*Condiciones del viento para la simulación mediante dinamómetro de cuatro cuadrantes de la producción de energía mecánica de una turbina de aerogenerador de 300 vatios en el sitio Urdaneta (Provincia de Los Ríos):*

Mes	Velocidad del Viento (m/s)	Densidad del aire (kg/m <sup>3</sup> ) *
enero-23	5,50	1.120
febrero-23	5,40	1.120
marzo-23	5,80	1.120
abril-23	6,50	1.120
mayo-23	7,00	1.120
junio-23	9,70	1.120
julio-23	10,40	1.131
agosto-23	10,00	1.131
septiembre-23	9,40	1.131
octubre-23	5,80	1.131
noviembre-23	4,40	1.131
diciembre-23	5,00	1.131

*Nota. \*Ajustada para estar dentro del rango de densidad del aire del emulador*

### 3. OBJETIVOS

Evaluar la producción de energía mecánica en vacío de un aerogenerador en función de condiciones meteorológicas reales.

### 4. MATERIALES E INSUMOS

- ✓ Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes - LabVolt Serie 8960-20.
- ✓ Software LVDAC-EMS función Emulador de Aerogenerador.

### 5. PROCEDIMIENTO

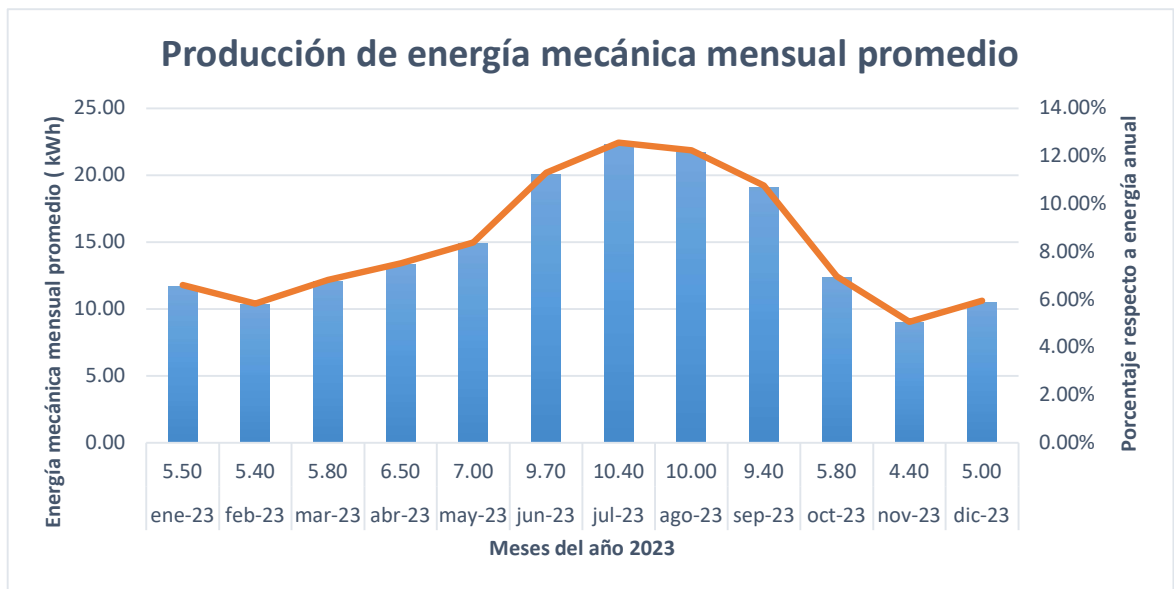
N°	ACTIVIDADES	OBSERVACIONES
1	Colocar el Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes en la estructura porta módulos de Labvolt del laboratorio y seleccionar la función de dinamómetro en el selector de modo de operación.	
2	Realizar la conexión del cable USB a la computadora con el software de LV-SIM/EMS previamente instalado y posteriormente enchufar la clavija de alimentación del módulo a la toma eléctrica.	
3	Entrar al software LV-SIM/EMS y seleccionar la función Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes y posteriormente en apartado de función, emulador de aerogenerador.	Colocar el valor de voltaje y frecuencia de la red de alimentación del módulo al iniciar el software.
4	Configurar la densidad del aire y el tipo de aerogenerador en base a los datos proporcionados en la fundamentación, y la relación de la polea en 24:24.	
5	Abrir la tabla de datos en el software y en parámetros de registro marcar los parámetros de velocidad, potencia y velocidad del viento	
6	Ubicar en el apartado de velocidad del viento, la primera velocidad proporcionada en la fundamentación y presionar el botón de marcha/parada.	
7	Registrar los valores absolutos de velocidad, potencia y energía mecánica del aerogenerador.	Esperar unos segundos hasta que se observen parámetros

		estables para el registro de datos.
8	Modificar los valores de velocidad del viento de acuerdo con los datos proporcionados en la fundamentación y repetir el paso 6.	Para cada cambio de velocidad es necesario esperar unos segundos hasta que se estabilicen los valores
9	Disminuir paulatinamente la velocidad del aire hasta el valor de 5 metros por segundo y apagar el emulador (presionar el botón de marcha/parada).	

## 6. CUADRO DE RESULTADOS

### Cuadro de resultados de la producción eólica

Producción eólica promedio de energía mecánica en vacío							
	Velocidad del viento	Velocidad de rotación del eje	Potencia mecánica del emulador	Potencia mecánica corregida con factor	Energía mecánica	Energía mecánica mensual promedio	Porcentaje mensual
Meses	m/s	r/min	W	W	kWh	kWh/mes	Porcentaje
ene-23	5.50	1215	18.32	15.74	0.01574	11.71	6.60%
feb-23	5.40	1209	17.91	15.38	0.01538	10.34	5.83%
mar-23	5.80	1269	18.92	16.25	0.01625	12.09	6.82%
abr-23	6.50	1399	21.54	18.50	0.01850	13.32	7.51%
may-23	7.00	1497	23.28	20.00	0.02000	14.88	8.39%
jun-23	9.70	2002	32.41	27.84	0.02784	20.04	11.30%
jul-23	10.40	2130	34.86	29.94	0.02994	22.28	12.56%
ago-23	10.00	2056	33.95	29.16	0.02916	21.69	12.24%
sep-23	9.40	1942	30.89	26.53	0.02653	19.10	10.77%
oct-23	5.80	1265	19.31	16.59	0.01659	12.34	6.96%
nov-23	4.40	1020	14.52	12.47	0.01247	8.98	5.06%
dic-23	5.00	1125	16.48	14.15	0.01415	10.53	5.94%
<b>Total (kWh/año)</b>						<b>177.30</b>	<b>100.00%</b>



## 7. CONCLUSIONES

- ✓ La producción de energía mecánica promedio anual fue de 177.30 kWh, se pudo observar la mayor producción en el mes de julio, la cual ocurrió con la mayor velocidad promedio mensual de  $10,40 \left(\frac{m}{s}\right)$  y densidad del aire de  $1.131 \left(\frac{Kg}{m^3}\right)$ .
- ✓ Se comprobaron las relaciones de velocidad del viento y potencia mecánica generada por un aerogenerador mediante la visualización de la curva de producción de energía mecánica mensual promedio; concluyendo que estos parámetros son directamente proporcionales, tal como fue mostrado en la fundamentación teórica.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

Andrade, R. G., Ramírez, A. F., Reyes, A. M., & Tamez, M. (2020). Diseño de hélices de aerogenerador de bajas velocidades de viento. *Miscelánea Científica en México*, 625.

Enair. (2024). *Estimacion de produccion eólica*. enair Ryse Energy.  
<https://www.enair.es/es/app>

Manual de trabajo Introducción a la energía eólica FESTO didactic es 579354

Patel, M. R., & Beik, O. (2021). *Wind and solar power systems: Design, analysis, and operation* (Third edition). CRC Press.

San Miguel Alfaro, G., Regueiro Ferreira, R., Gómez Catasús, J., & Gomez Villarino, M. T. (2023). *Tecnología y sostenibilidad de la energía eólica. Preguntas y respuestas*. Ediciones Mundi-Prensa.

## 9. ANEXOS

**EMULADOR DE AEROGENERADOR**

Velocidad del viento (m/s): 5.5

Medidores

D1	Velocidad	D2	Par	D3	Potencia	D4	Energía
	1206	0.141		17.86		1.311	
	r/min	N·m		W		kWh	

Conectado al módulo DIN/FA 4C #G471430 (Listo) | Modo de operación: Dinamómetro de cuatro cuadrantes

**Fecha de Elaboración:** 23/05/2024

**Elaborado por:** Richard Vera Parrales, Leonardo Palma Rodríguez.

**REVISADO POR:**

**FECHA:**



**LABORATORIO**

**PRÁCTICAS EN EMULADOR EOLICO**

**INFORME**

<b>NOMBRE DE LA PRÁCTICA</b>	Eficiencia de un aerogenerador	<b>No. PRÁCTICA:</b> CIE_eólica-02
------------------------------	--------------------------------	------------------------------------

**1. DATOS INFORMATIVOS**

<b>CARRERA:</b>	Electricidad
<b>CICLO/NIVEL:</b>	Egresado
<b>FECHA:</b>	20/06/2024
<b>NOMBRE DEL ESTUDIANTE:</b>	Richard Vera Parrales Leonardo Palma Rodríguez
<b>DOCENTE RESPONSABLE</b>	Ing. Vladimir Jaramillo García, PhD

**2. FUNDAMENTACIÓN**

- Relaciones de velocidad, potencia y límite de Betz
- Conversión de energía mecánica a eléctrica
- Diagrama de flujo de potencia y eficiencia

**- Definiciones**

**Relaciones de velocidad, potencia y límite de Betz**

La energía cinética del aire en movimiento puede ser aprovechada para generar electricidad mediante aerogeneradores, esto se logra mediante la rotación de las palas, que se produce al circular viento a través de estas, y que a su vez están acopladas a un eje en el buje del aerogenerador. La energía cinética de una masa de aire  $m$  que se desplaza con una velocidad  $V$  se calcula con la fórmula:

$$Energía\ cinética = \frac{1}{2} mV^2 \quad (4)$$

La potencia del aire en movimiento, que es la tasa de flujo de esta energía cinética por segundo, se expresa en vatios como:

$$Potencia = \frac{1}{2} (flujo\ masico\ por\ segundo)V^2 \quad (5)$$

El caudal volumétrico es el área barrida por las palas del rotor ( $m^2$ ) multiplicado por la velocidad del aire ( $\frac{m}{s}$ ) es  $A * V$ , el caudal másico del aire en kilogramos por segundo es  $\rho * A * V$ , por lo que la potencia mecánica que posee el viento está dada por la siguiente ecuación en vatios (W):

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (6)$$

Donde:

$P$  = potencia del viento que circula por las palas del aerogenerador (vatios)

$\rho$  = densidad del aire ( $\frac{Kg}{m^3}$ )

$A$  = área barrida por las palas del rotor ( $m^2$ )

$V$  = velocidad del viento ( $\frac{m}{s}$ )

### **Límite de Betz**

Nombrado al igual que su descubridor Alberto Betz, nos indica la máxima potencia que un rotor de un aerogenerador puede aprovechar del viento, este valor es del 59,3%, en la realidad los rotores no llegan a un porcentaje tan alto de aprovechamiento ya que se debe considerar la eficiencia del conjunto buje-rotor que transmite la potencia mecánica al eje del generador eléctrico (Andrade et al., 2020).

### **Conversión de energía mecánica a eléctrica**

La incidencia de un flujo magnético variable a través de las espiras de un conductor genera una fuerza electromotriz (FEM) tal que, su polaridad será la que tenga una corriente que genere un flujo magnético que se opone al cambio de flujo que originalmente indujo la FEM. Estos principios son conocidos como la ley de Faraday (magnitud de la fem inducida dependiente de la variación del flujo magnético) y la ley de Lenz (dirección de la corriente que produce un flujo magnético opuesto).

Ambos principios son la base para la conversión de energía mecánica a eléctrica mediante un generador que puede ser una máquina síncrona. El generador síncrono crea un flujo magnético mediante un circuito de excitación con corriente continua (DC) que se encuentra montado en el eje del generador y la variación del flujo se da por el movimiento rotativo que se le aplica al eje producto de la incidencia del viento en las palas del aerogenerador. Este

flujo magnético variable incide en tres bobinados del estator separados 120 grados entre sí, dando como resultado un voltaje de corriente alterna (AC) inducido en tres fases de igual magnitud, pero separados cada uno en 120 grados eléctricos del otro.

### Diagrama de flujo de potencia y eficiencia

En el proceso de conversión de energía mecánica a eléctrica existen pérdidas debido a factores mecánicos como eléctricos, en la siguiente figura se representan estos aspectos:

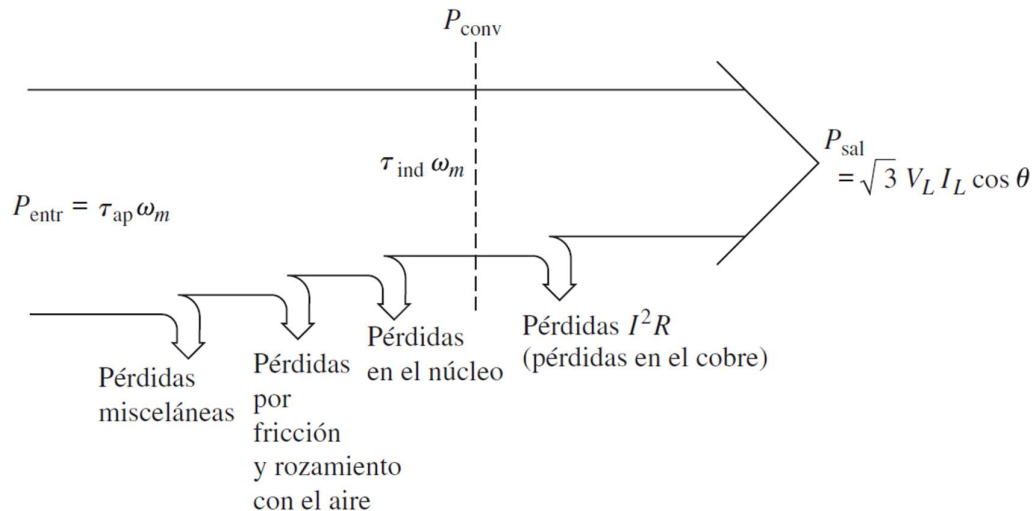


Figura 49. Diagrama de flujo de potencia de un generador síncrono. Fuente: (Chapman et al., 2012)

Donde de la potencia de entrada representa la potencia mecánica en el eje del generador y la potencia de salida representa la potencia eléctrica entregada a la carga. Por lo que es posible definir la eficiencia con la siguiente fórmula:

$$\eta = \frac{\text{Potencia}_{mecanica\ entrada}}{\text{Potencia}_{electrica\ salida}} = \frac{\tau * \omega}{\sqrt{3} * V_L * I_L * \cos \theta} \quad (7)$$

Donde:

$\tau$  = Torque aplicado por el eje del aerogenerador

$\omega$  = Velocidad del eje del aerogenerador

$V_L$  = Voltaje de línea en las terminales de la carga

$I_L$  = Corriente de línea que circula por la carga

$\theta$  = Ángulo entre la potencia activa y aparente de una carga en un triángulo de potencia

### Tipo de turbina del emulador de aerogenerador a utilizar

- Longitud de palas de 1,15 m con 3 álabes

### 3. OBJETIVOS

Evaluar la eficiencia de un aerogenerador para distintas velocidades de viento manteniendo la densidad del viento y la carga conectada constantes.

Analizar el comportamiento de las curvas de potencia mecánica de entrada y de potencia eléctrica de salida.

### 4. MATERIALES E INSUMOS

- ✓ Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes - LabVolt Serie 8960-32.
- ✓ Software LVDAC-EMS función Emulador de Aerogenerador.
- ✓ Fuente de alimentación 8821-22
- ✓ Módulo de cargas resistivas 8311-02
- ✓ Alternador sincrónico 8241-22
- ✓ 2 Multímetros
- ✓ Cables tipo banana

### 5. PROCEDIMIENTO

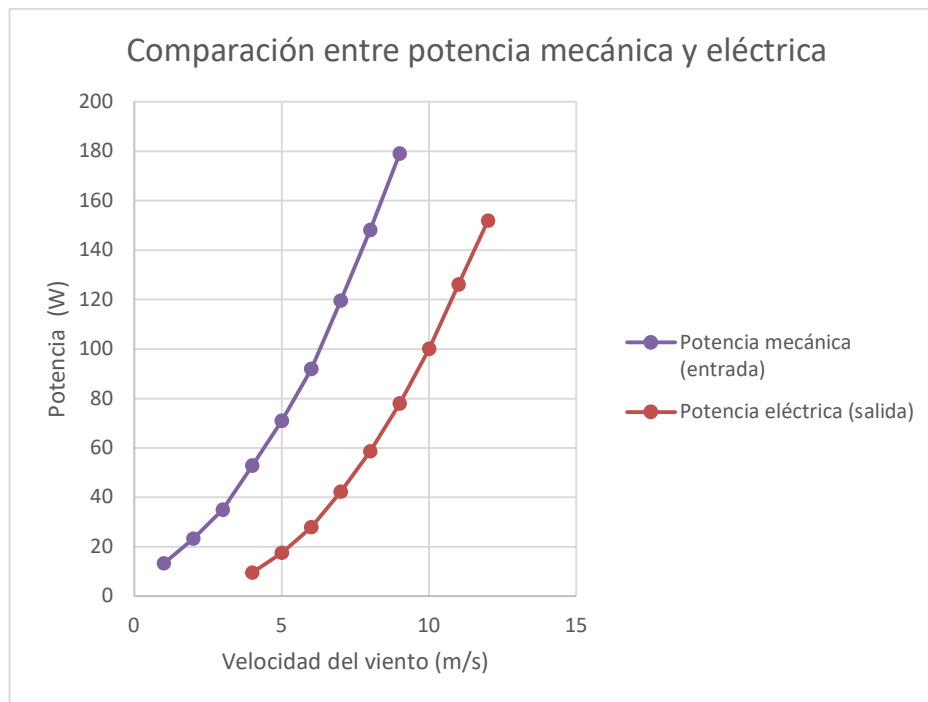
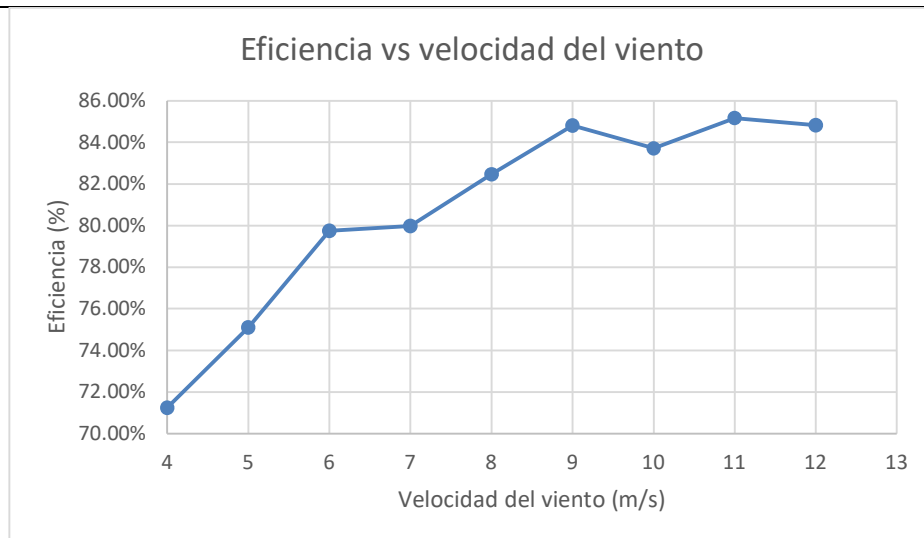
Nº	ACTIVIDADES	OBSERVACIONES
1	Colocar los módulos indicados en la caja porta módulos de LabVolt, el dinamómetro de cuatro cuadrantes debe colocarse en el medio, al lado derecho debe estar el alternador, del lado izquierdo la fuente de alimentación, adicional se agregará el módulo de cargas resistivas que se ubicará en la parte superior de la fuente de alimentación.	
2	Realizar la conexión en estrella en los bornes 4, 5 y 6 del alternador sincrónico, y conectar los bornes 7 y 8 a la fuente de alimentación en DC para la excitatriz	
3	Conectar en estrella el final de cada resistencia y seleccionar 200 ohm de carga por fase (paralelo entre resistencias de 600 y 300 ohm), para luego conectar los bornes 1,2 y 3 del alternador a cada una de las cargas resistivas	
3.1	Conectar en paralelo un multímetro en los bornes 1 y 2 del alternador sincrónico	Verificar que la medición sea en voltios AC

3.2	Colocar en serie un multímetro con el cable de alimentación que va del borne 1 del alternador sincrónico a la carga resistiva	Verificar que la medida este en corriente AC
4	Conectar el cable de adquisición de datos del dinamómetro hacia la PC	
5	Conectar la alimentación del dinamómetro, primero desde el módulo luego hacia el tomacorriente	Verificar que el tomacorriente tenga valores cercanos a 120 V
6	Se enciende el dinamómetro y se abre el software LVSIM desde la PC	Ingresar en la interfaz 120v y 60Hz
7	Colocar el switch en modo dinamómetro en el módulo para posterior escoger la función de aerogenerador turbina eólica en el software	
8	Revisar los parámetros correctos para el arranque; relación de polea 24:24; tipo de aerogenerador 1,15m/3alabes; densidad del aire 1.225 (kg/m <sup>3</sup> )	
9	Abrir la tabla de datos en el software y en parámetros de registro marcar los parámetros de velocidad, par, potencia y velocidad del viento	
10	Colocar la velocidad de arranque en 5 m/s, encender el circuito de excitación del generador y posteriormente la fuente de alimentación.	
11	Dar marcha al emulador, esperar que el sistema se estabilice un momento, para luego llevar la velocidad a 4 m/s	
12	Registrar los valores de velocidad, par, potencia y velocidad del viento	
13	Registrar los valores de voltaje de línea y de corriente de fase visualizados en los multímetros	
14	Aumentar la velocidad del viento en 1 m/s y repetir los pasos 12 y 13 nuevamente, repetir este	

	paso hasta llegar a la velocidad de viento de 12 m/s	
15	Se procede a detener el emulador con el botón de marcha/parada y con el apagado de los equipos, en primer lugar, la fuente de alimentación, segundo lugar el dinamómetro y por último se procede con la desconexión de los enchufes de cada módulo.	

## 6. CUADRO DE RESULTADOS

Velocidad del viento	Velocidad de rotación del aerogenerador	Par en el rotor del aerogenerador	Potencia mecánica en el rotor del aerogenerador	Voltaje de línea de la carga	Corriente de la carga	Potencia eléctrica trifásica	Eficiencia
m/s	r/min	(N.m)	W	V	A	W	%
4	482	0.262	13.25	54.5	0.1	9.44	71.24%
5	662	0.336	23.27	74.2	0.136	17.48	75.11%
6	839	0.398	34.98	93.1	0.173	27.90	79.75%
7	1039	0.485	52.81	114.5	0.213	42.24	79.99%
8	1227	0.552	70.98	135.2	0.25	58.54	82.48%
9	1422	0.617	91.89	155.7	0.289	77.94	84.82%
10	1613	0.707	119.5	176.1	0.328	100.04	83.72%
11	1820	0.777	148.1	197.9	0.368	126.14	85.17%
12	2005	0.852	179	217	0.404	151.85	84.83%



## 7. CONCLUSIONES

- ✓ La eficiencia calculada en la conversión de energía mecánica a eléctrica fue del 85.17% con una velocidad del viento de  $11 \left(\frac{m}{s}\right)$ , mientras que para  $4 \left(\frac{m}{s}\right)$  de velocidad del viento, el porcentaje de conversión fue del 71.24%; estos dos valores son el mayor y menor porcentaje de eficiencia calculados con una resistencia constante de 200 ohm y sin variar la densidad del aire.
- ✓ Se concluye en base a los resultados obtenidos que la eficiencia aumenta a medida que se incrementa la velocidad del viento.

- ✓ Se observo que la curva de potencia mecánica esta antes de la curva de potencia eléctrica, esto ocurre debido a las perdidas en el proceso de conversión, además ambas curvas presentan una tendencia exponencial que concuerda con el criterio expuesto en la fundamentación acerca de la potencia del viento que circula por las palas.

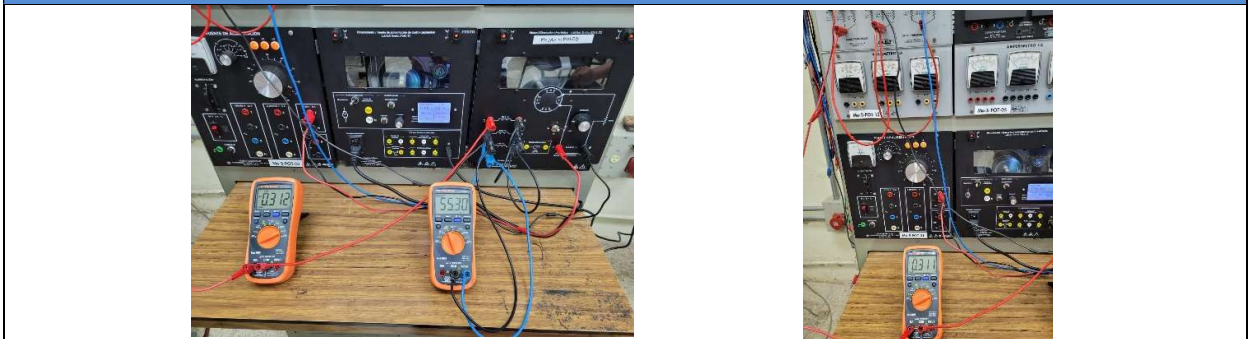
## 8. BIBLIOGRAFÍA

Andrade, R. G., Ramírez, A. F., Reyes, A. M., & Tamez, M. (2020). DISEÑO DE HÉLICES DE AEROGENERADOR DE BAJAS VELOCIDADES DE VIENTO. *Miscelánea Científica en México*, 625.

Chapman, S. J., Rodríguez Pérez, C., & Santana Díaz Alfredo. (2012). *Máquinas eléctricas* (5a ed). McGraw-Hill Interamericana.

Manual de trabajo Introducción a la energía eólica FESTO didactic es 579354

## 9. ANEXOS



**Fecha de Elaboración:** 20/06/2024

**Elaborado por:** Richard Vera Parrales, Leonardo Palma Rodríguez.

**REVISADO POR:**

**FECHA:**

## LABORATORIO



**Escuela de  
Ingeniería Eléctrica**  
UNIVERSIDAD LAICA ELOY ALFARO DE MANABÍ



**Uleam**  
UNIVERSIDAD LAICA  
ELOY ALFARO DE MANABÍ

### PRÁCTICAS EN EMULADOR EOLICO

#### INFORME

<b>NOMBRE DE LA PRÁCTICA</b>	Aerogenerador con voltaje de salida constante	<b>No. PRÁCTICA:</b> CIE_eólica-03
------------------------------	---	------------------------------------

#### 1. DATOS INFORMATIVOS

<b>CARRERA:</b>	Electricidad
<b>CICLO/NIVEL:</b>	Egresado
<b>FECHA:</b>	27/06/2024
<b>NOMBRE DEL ESTUDIANTE:</b>	Richard Vera Parrales Leonardo Palma Rodríguez
<b>DOCENTE RESPONSABLE</b>	Ing. Vladimir Jaramillo García, PhD

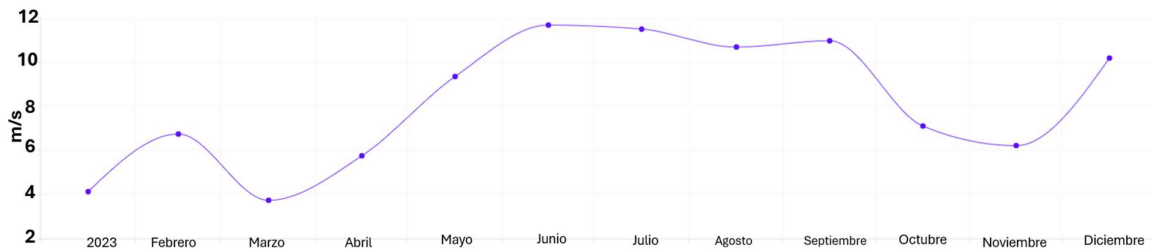
#### 2. FUNDAMENTACIÓN

- Variación de la velocidad del viento
- Conversión de energía mecánica a eléctrica
- Voltaje generado en generador síncrono

##### - Definiciones

##### **Variación de la velocidad del viento**

El viento presenta fluctuaciones a lo largo de un periodo de tiempo, por lo cual, al variar este parámetro también lo harán las principales variables que definen el comportamiento del aerogenerador y por lo tanto de la máquina que realiza el aprovechamiento de este recurso primario, a continuación, se presenta un ejemplo de variación de la velocidad de viento promedio:



**Figura 50.** Velocidad del viento (m/s) vs meses en estación meteorológica Villonaco año 2023. Tomado de <https://vinculacion.utpl.edu.ec/observatorios/clima>

### **Conversión de energía mecánica a eléctrica mediante generador síncrono**

El generador síncrono acoplado a la turbina eólica crea un flujo magnético mediante un circuito de excitación con corriente continua (DC) que se encuentra montado en el eje del generador y la variación del flujo se da por el movimiento rotativo que se le aplica al eje producto de la incidencia del viento en las palas del aerogenerador. Este flujo magnético variable incide en tres bobinados del estator separados 120 grados entre sí, dando como resultado un voltaje de corriente alterna (AC) inducido en tres fases de igual magnitud, pero separados cada uno en 120 grados eléctricos del otro.

### **Voltaje generado en generador síncrono**

El voltaje interno generado en el estator depende de la velocidad de rotación del eje y del flujo magnético inducido sobre él, este flujo se genera por la corriente que pasa por el circuito de excitación del rotor, esto da lugar a que la tensión a la salida del generador síncrono sea igual a la tensión interna generada restando las respectivas caídas de tensión por efecto de la variación del flujo magnético en el entrehierro, efecto joule en el estator, autoinductancia y si el rotor es liso o de polos salientes (Chapman et al., 2012). A continuación, se muestra la integración de la turbina eólica con el generador síncrono:

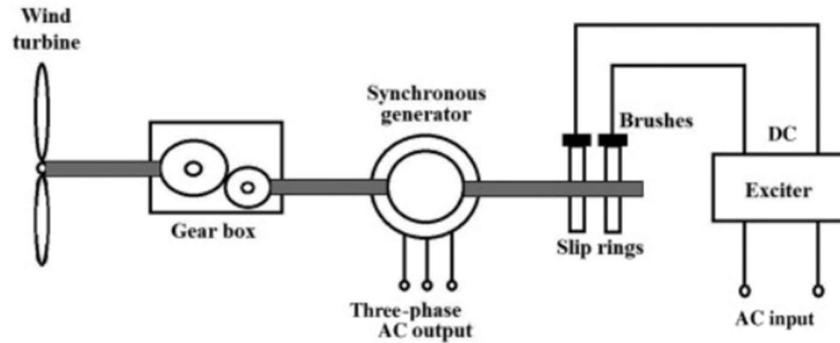


Figura 51. Aerogenerador con generador síncrono. Fuente: (Dutta & Hussain, 2021)

### Tipo de turbina del emulador de aerogenerador a utilizar

- Aerogenerador de 1,15 m con 3 álabes

Datos a utilizar de la velocidad del viento para cada caso:

En vacío	Con carga de 300 ohm	
Velocidad del viento	Velocidad del viento	Densidad de aire
m/s	m/s	(kg/ m <sup>3</sup> )
5	-	1.225
6	-	1.225
7	7	1.225
8	8	1.225
9	9	1.225
10	10	1.225

### 3. OBJETIVOS

Analizar el comportamiento de las curvas velocidad de rotación del aerogenerador y voltaje del circuito de excitación en vacío y con carga.

Determinar la relación de las curvas velocidad de rotación del aerogenerador y par en el rotor del aerogenerador con la potencia entregada a la carga.

### 4. MATERIALES E INSUMOS

- ✓ Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes - LabVolt Serie 8960-32.
- ✓ Software LVDAC-EMS función Emulador de Aerogenerador.
- ✓ Fuente de alimentación 8821-22
- ✓ Módulo de cargas resistivas 8311-02
- ✓ Alternador sincrónico 8241-22
- ✓ 3 Multímetros
- ✓ Cables tipo banana

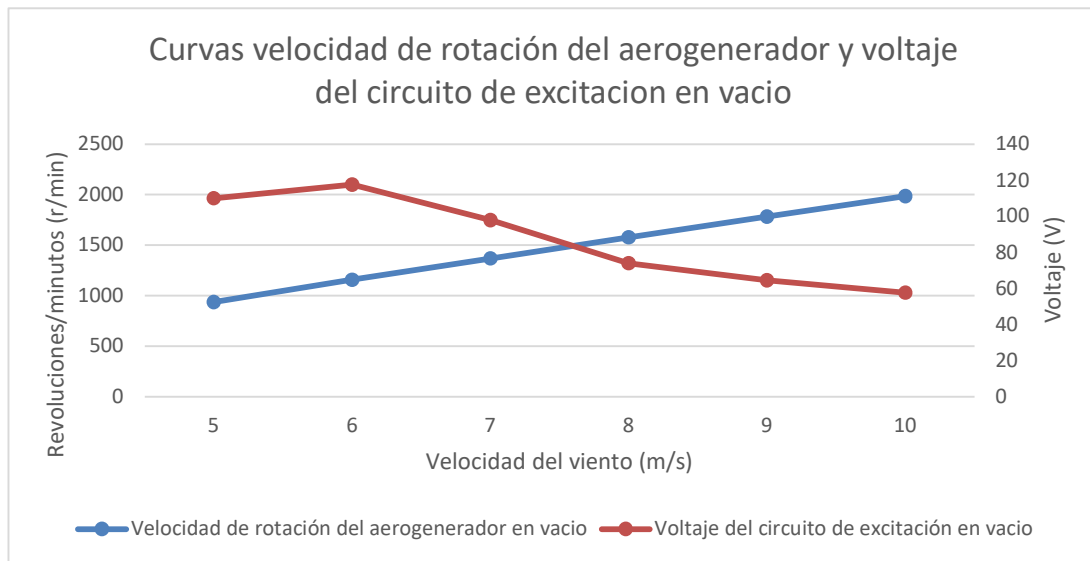
5. PROCEDIMIENTO		
N°	ACTIVIDADES	OBSERVACIONES
1	Colocar los módulos indicados en la caja porta módulos de LabVolt, el dinamómetro de cuatro cuadrantes debe colocarse en el medio, al lado derecho debe estar el alternador, del lado izquierdo la fuente de alimentación, adicional se agregará el módulo de cargas resistivas que se ubicará en la parte superior de la fuente de alimentación.	
2	Realizar la conexión en estrella en los bornes 4, 5 y 6 del alternador sincrónico, y conectar los bornes 7 y 8 a la fuente de alimentación en DC para la excitatriz	
3	Conectar en estrella el final de cada resistencia y colocar el interruptor en vacío del módulo (apagado), para luego conectar los bornes 1,2 y 3 del alternador a cada una de las cargas resistivas	
3.1	Conectar en paralelo un multímetro en los bornes 1 y 2 del alternador sincrónico	Verificar que la medición sea en voltios AC
3.2	Colocar en serie un multímetro con el cable de alimentación que va del borne 1 del alternador sincrónico a la carga resistiva	Verificar que la medida este en corriente AC
3.3	Colocar en paralelo un multímetro con el circuito de excitación del generador síncrono	Verificar que la medida este en voltios DC
4	Conectar el cable de adquisición de datos del dinamómetro hacia la PC	
5	Conectar la alimentación del dinamómetro, primero desde el módulo luego hacia el tomacorriente	Verificar que el tomacorriente tenga valores cercanos a 120 V
6	Se enciende el dinamómetro y se abre el software LVSIM desde la PC	Ingresar en la interfaz 120v y 60Hz

7	Colocar el switch en modo dinamómetro en el módulo para posterior escoger la función de aerogenerador turbina eólica en el software	
8	Revisar los parámetros correctos para el arranque; relación de polea 24:24; tipo de aerogenerador 1,15m/3alabes; densidad del aire 1.225 (kg/m <sup>3</sup> )	
9	Abrir la tabla de datos en el software y en parámetros de registro marcar los parámetros de velocidad, par, potencia y velocidad del viento	
10	Colocar la velocidad de arranque en 5 m/s	
11	Dar marcha al sistema, esperar que se estabilice unos segundos y se observen parámetros estables	
12	Regular la excitación del generador síncrono mediante su perilla de excitación hasta que el valor de tensión DC sea de 120 voltios DC.	
13	Registrar los valores de velocidad, par, potencia y velocidad del viento	
14	Registrar los valores de voltaje de línea, del circuito de excitación y corriente de fase visualizados en los multímetros	
15	Aumentar la velocidad del viento en base a la tabla proporcionada en la fundamentación y repetir los pasos 12, 13 y 14 nuevamente	
16	Detener el emulador con el botón de marcha/parada y cambiar el valor de resistencias por fase a 300 ohm	
16	Colocar el valor inicial de velocidad del viento en 7 m/s y repetir los pasos 12, 13, 14 y 15	
16	Se procede a detener el emulador con el botón de marcha/parada y con el apagado de los equipos, en primer lugar, la fuente de alimentación, segundo lugar el dinamómetro y por último se procede con la desconexión de los enchufes de cada módulo.	

## 6. CUADRO DE RESULTADOS

Los resultados de los parámetros y gráficas involucrados en la regulación del voltaje de salida del aerogenerador en vacío son:

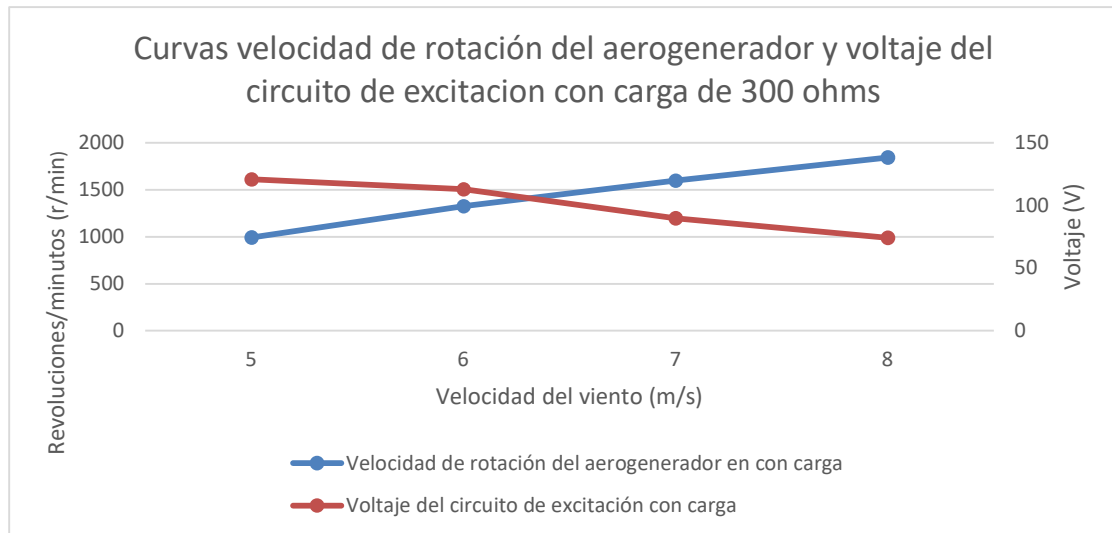
Velocidad del viento	Velocidad de rotación del aerogenerador en vacío	Par en el rotor del aerogenerador en vacío	Potencia mecánica en el rotor del aerogenerador en vacío	Voltaje del circuito de excitación en vacío	Voltaje de línea de la carga
m/s	r/min	(N.m)	W	V	V
5	938	0.054	5.275	110	120
6	1158	0.041	4.923	117.6	120
7	1370	0.025	3.544	97.8	120
8	1579	0.005	0.876	74	120
9	1784	0	0.037	64.5	120
10	1985	0.001	0.291	57.6	120



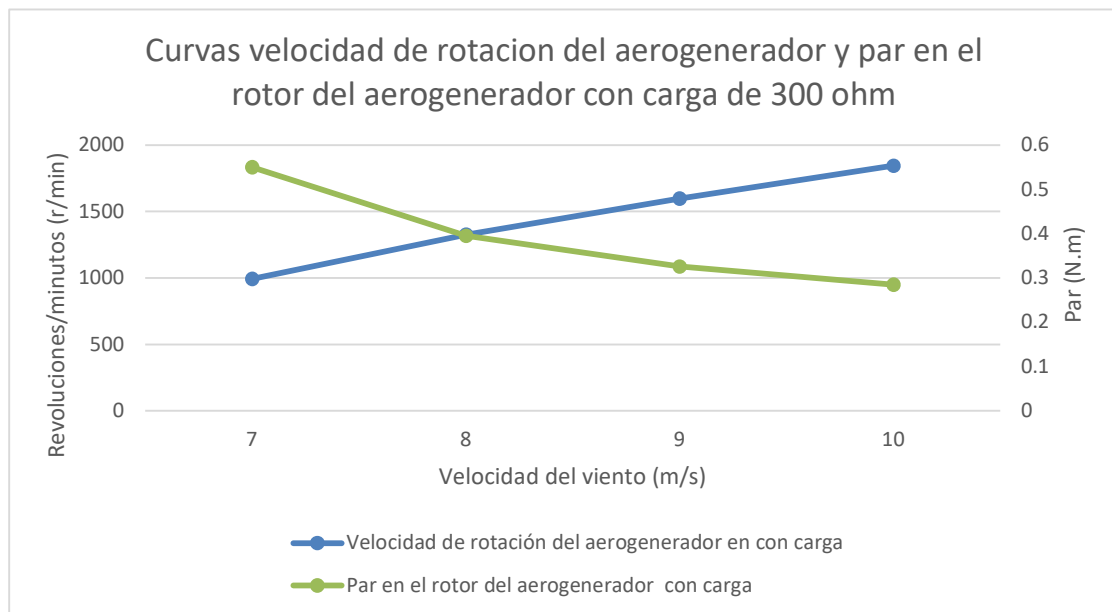
Los resultados de los parámetros y gráficas involucrados en la regulación del voltaje de salida del aerogenerador con una carga de 300 ohms son:

Velocidad del viento	Velocidad de rotación del aerogenerador en con carga	Par en el rotor del aerogenerador con carga	Potencia mecánica en el rotor del aerogenerador con carga	Voltaje del circuito de excitación con carga	Voltaje de línea de la carga
m/s	r/min	(N.m)	W	V	V
7	992	0.55	57.16	121	120
8	1327	0.395	54.86	113	120

9	1599	0.326	54.57	89.8	120
10	1845	0.285	55.04	74.3	120



A continuación se muestran una gráfica comparativa entre la velocidad de rotación del eje y el par producido por el aerogenerador con carga de 300 ohm.



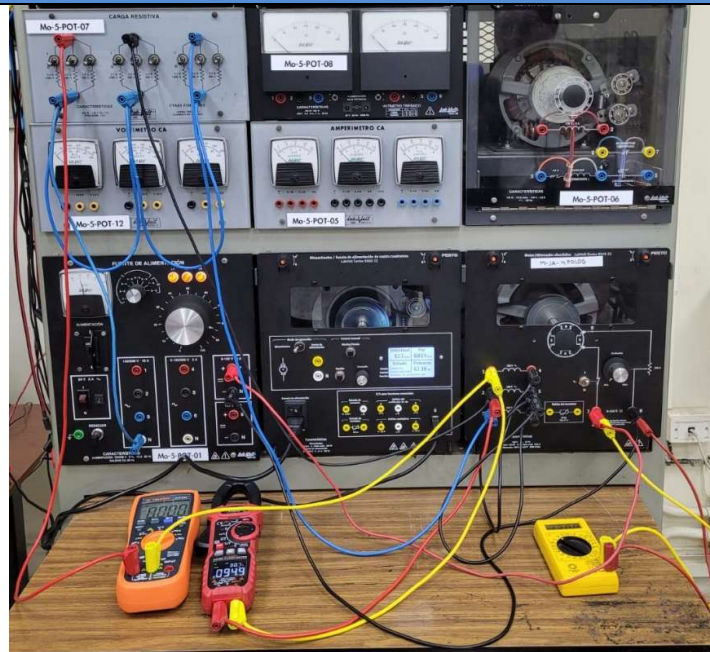
## 7. CONCLUSIONES

- ✓ Se observó en las curvas del aerogenerador en vacío que a medida de que el viento va aumentando su velocidad, también lo hace el eje de rotación del aerogenerador y es necesario para cada velocidad reducir el voltaje del circuito de excitación para mantener el voltaje de línea en la carga constante en 120 (V), adicionalmente se visualizó el aumento de la velocidad del aerogenerador cercano al límite del dinamómetro de cuatro cuadrantes, esto refleja la importancia de regular este parámetro cuando se tienen velocidades de viento altas y pocas o ninguna carga conectada.
- ✓ Se concluye que la curva del aerogenerador con carga tiene un comportamiento similar a aquella sin carga, con la diferencia de que las velocidades de rotación del eje son más bajas y el voltaje del circuito de excitación es mayor, esta reducción de velocidad al colocar carga es uno de varios métodos utilizados para el frenado de un aerogenerador.
- ✓ Las curvas velocidad de rotación del aerogenerador y par en el rotor del aerogenerador con carga concuerdan con los valores observados de potencia mecánica, ya que mientras que la velocidad aumenta, el par disminuye, esto debido a que al mantener en todo momento constante el voltaje de salida del generador y la carga, se tiene la misma potencia eléctrica demandada para todos los casos.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- Chapman, S. J., Rodríguez Pérez, C., & Santana Díaz Alfredo. (2012). *Máquinas eléctricas* (5a ed). McGraw-Hill Interamericana.
- Dutta, S., & Hussain, C. M. (2021). *Sustainable fuel technologies handbook*. Academic press.

## 9. ANEXOS



Conexión de los módulos y elementos de medición para realización de práctica 3

**Fecha de Elaboración:** 27/06/2024

**Elaborado por:** Richard Vera Parrales, Leonardo Palma Rodríguez.

**REVISADO POR:**

**FECHA:**



**LABORATORIO**

**PRÁCTICAS EN EMULADOR EOLICO**

**INFORME**

<b>NOMBRE DE LA PRÁCTICA</b>	Aerogenerador con excitación variable bajo diversas velocidades del viento.	<b>No. PRÁCTICA:</b> CIE_eólica-04
------------------------------	---	------------------------------------

**1. DATOS INFORMATIVOS**

<b>CARRERA:</b>	Electricidad
<b>CICLO/NIVEL:</b>	Egresado
<b>FECHA:</b>	04/07/2024
<b>NOMBRE DEL ESTUDIANTE:</b>	Richard Vera Parrales Leonardo Palma Rodríguez
<b>DOCENTE RESPONSABLE</b>	Ing. Vladimir Jaramillo García, PhD

**2. FUNDAMENTACIÓN**

- Variación de la velocidad del viento
- Conversión de energía mecánica a eléctrica
- Excitaciones variables
- Voltaje generado en generador síncrono

**- Definiciones**

**Variación de la velocidad del viento**

El viento fluctúa a lo largo del tiempo, lo que afecta las variables principales del aerogenerador y la máquina que aprovecha este recurso. A continuación, se presenta un

ejemplo de la variación de la velocidad del viento promedio:

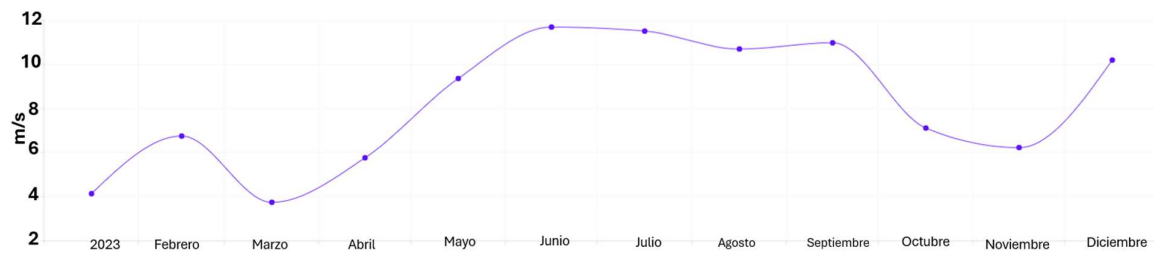


Figura 52. Velocidad del viento (m/s) vs meses en estación meteorológica Villonaco año 2023. Tomado de <https://vinculacion.utpl.edu.ec/observatorios/clima>

### Conversión de energía mecánica a eléctrica mediante generador síncrono

El generador síncrono acoplado a la turbina eólica crea un flujo magnético mediante un circuito de excitación con corriente continua (DC) en el eje del generador. La variación del flujo, causada por el movimiento rotativo del eje debido al viento en las palas del aerogenerador, afecta tres bobinados del estator, separados 120 grados entre sí, generando un voltaje de corriente alterna (AC) en tres fases de igual magnitud, pero separados 120 grados eléctricos entre sí

#### Excitaciones variables

##### Excitación mínima

La excitación mínima es la cantidad mínima de corriente de excitación necesaria para que el generador produzca una tensión de salida detectable, por lo que, en este estado, el generador puede no ser capaz de soportar ninguna carga significativa, pero se mantiene para evitar que el generador permanezca inactivo sin flujo magnético.

##### Excitación media

La excitación media representa un nivel de excitación donde el generador puede operar eficientemente dentro de su rango de operación nominal. Por lo que, este nivel es ideal para operaciones normales y para la mayoría de las condiciones de carga, proporcionando un balance adecuado entre estabilidad y eficiencia energética.

##### Excitación máxima

La excitación máxima es la cantidad máxima de corriente de excitación que el generador puede manejar sin incurrir en daños. Este nivel se usa en situaciones de alta demanda de energía o cuando se necesita una salida máxima de potencia, esta excitación máxima

maximiza el flujo magnético y, por lo tanto, la tensión y la corriente de salida, pero también aumenta el riesgo de sobrecalentamiento y desgaste (Li, 2019).

### **Voltaje generado en generador síncrono**

El voltaje interno generado en el estator depende de la velocidad de rotación del eje y del flujo magnético inducido sobre él, este flujo se genera por la corriente que pasa por el circuito de excitación del rotor, esto da lugar a que la tensión a la salida del generador síncrono sea igual a la tensión interna generada restando las respectivas caídas de tensión por efecto de la variación del flujo magnético en el entrehierro, efecto joule en el estator, autoinductancia y si el rotor es liso o de polos salientes (Chapman et al., 2012). A continuación, se muestra la integración de la turbina eólica con el generador síncrono:

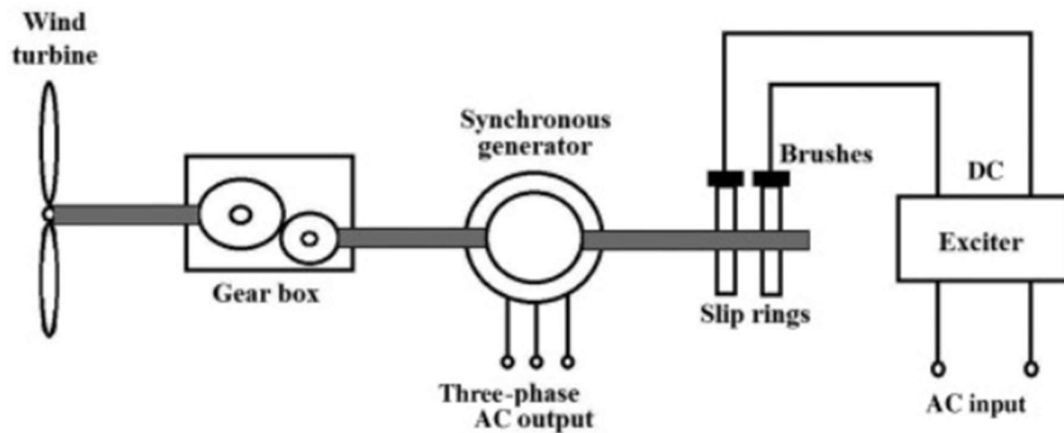


Figura 53. Aerogenerador con generador síncrono. Fuente: (Dutta & Hussain, 2021)

### **Tipo de turbina del emulador de aerogenerador a utilizar**

- Aerogenerador de 1,15 m con 3 álabes

Datos a utilizar de la velocidad del viento para cada caso:

Con excitación máxima	Con excitación media	Con excitación mínima	
Velocidad del viento	Velocidad del viento	Velocidad del viento	Densidad del aire
m/s	m/s	m/s	(kg/ m3)
4	4	4	1.225
5	5	5	1.225
6	6	6	1.225
7	7	7	1.225
8	8	8	1.225
9	9	9	1.225
10	10	10	1.225
11	11	11	1.225
12	-	-	1.225

### 3. OBJETIVOS

- Analizar el comportamiento de las curvas de potencia eléctrica entregada por un aerogenerador con excitación máxima, media y mínima bajo diversas velocidades del viento.
- Determinar el porcentaje de potencia máxima que es posible obtener del aerogenerador variando la excitación del generador síncrono acoplado al eje de la turbina para distintas velocidades del viento.

### 4. MATERIALES E INSUMOS

- ✓ Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes - LabVolt Serie 8960-32.
- ✓ Software LVDAC-EMS función Emulador de Aerogenerador.
- ✓ Fuente de alimentación 8821-22
- ✓ Módulo de cargas resistivas 8311-02
- ✓ Alternador síncrono 8241-22
- ✓ 3 multímetros
- ✓ Cables tipo banana

### 5. PROCEDIMIENTO

Nº	ACTIVIDADES	OBSERVACIONES
1	Colocar los módulos indicados en la caja porta módulos de LabVolt, el dinamómetro de cuatro cuadrantes debe colocarse en el medio, al lado derecho debe estar el alternador, del lado izquierdo la fuente de alimentación, adicional se agregará el módulo de cargas resistivas que se	

	ubicará en la parte superior de la fuente de alimentación.	
2	Realizar la conexión en estrella en los bornes 4, 5 y 6 del alternador sincrónico, y conectar los bornes 7 y 8 a la fuente de alimentación en DC para la excitatriz	
3	Conectar en estrella el final de cada resistencia y encender en cada fase los interruptores de las resistencias de 600 y 300 ohm que permiten ponerlas en paralelo y tener 200 ohm por fase, para luego conectar los bornes 1,2 y 3 del alternador a cada una de las cargas resistivas	
3.1	Conectar en paralelo un multímetro en los bornes 1 y 2 del alternador sincrónico	Verificar que la medición sea en voltios AC
3.2	Colocar en serie un multímetro con el cable de alimentación que va del borne 1 del alternador sincrónico a la carga resistiva	Verificar que la medida este en corriente AC
3.3	Colocar en paralelo un multímetro con el circuito de excitación del generador síncrono	Verificar que la medida este en voltios DC
4	Conectar el cable de adquisición de datos del dinamómetro hacia la PC	
5	Conectar la alimentación del dinamómetro, primero desde el módulo luego hacia el tomacorriente	Verificar que el tomacorriente tenga valores cercanos a 120 V
6	Se enciende el dinamómetro y se abre el software LVSIM desde la PC	Ingresar en la interfaz 120v y 60Hz
7	Colocar el switch en modo dinamómetro en el módulo para posterior escoger la función de aerogenerador turbina eólica en el software	
8	Revisar los parámetros correctos para el arranque; relación de polea 24:24; tipo de aerogenerador 1,15m/3alabes; densidad del aire 1.225 (kg/m <sup>3</sup> )	

9	Abrir la tabla de datos en el software y en parámetros de registro marcar los parámetros de velocidad, par, potencia y velocidad del viento	
10	Colocar la velocidad de arranque en 5 m/s para romper la inercia del sistema.	
11	Colocar la perilla de la excitatriz del generador síncrono en máxima, media o mínima según el caso que se vaya a analizar.	
12	Dar marcha al sistema, esperar que el módulo se estabilice unos segundos y colocar la velocidad en 4 m/s	
13	Registrar los valores de velocidad, par, potencia y velocidad del viento	
14	Registrar los valores de voltaje de línea, del circuito de excitación y corriente de fase visualizados en los multímetros	
15	Aumentar la velocidad del viento en base a la tabla proporcionada en la fundamentación y repetir los pasos 13 y 14 nuevamente	
16	Detener el emulador con el botón de marcha/parada y cambiar la excitación del generador según el siguiente caso a analizar.	
17	Repetir los pasos 12, 13, 14, 15 y 16.	
18	Una vez finalizados los tres casos, se procede a detener el emulador con el botón de marcha/parada y con el apagado de los equipos, en primer lugar, la fuente de alimentación, segundo lugar el dinamómetro y por último se procede con la desconexión de los enchufes de cada módulo.	

## 6. CUADRO DE RESULTADOS

Excitación máxima y resistencia de 200 ohm							
Velocidad del viento	Velocidad de rotación del aerogenerador	Par en el rotor del aerogenerador	Potencia mecánica en el rotor del aerogenerador	Voltaje del circuito de excitación DC	Voltaje de línea de la carga	Corriente de la carga	Potencia eléctrica trifásica
m/s	r/min	(N.m)	W	V	V	A	W
4	386	0.356	14.38	92.5	45.29	0.128	10.041
5	551	0.471	27.16	93.6	64.2	0.181	20.127
6	722	0.581	43.97	93.8	83.8	0.235	34.109
7	903	0.697	65.89	94.2	103	0.293	52.272
8	1081	0.823	93.13	94.2	123.8	0.351	75.264
9	1260	0.941	124.1	94.3	143.2	0.403	99.956
10	1439	1.041	156.9	94.3	164.1	0.464	131.883
11	1631	1.163	198.7	94.5	183.3	0.52	165.092
12	1831	1.265	242.5	94.8	205.3	0.576	204.820

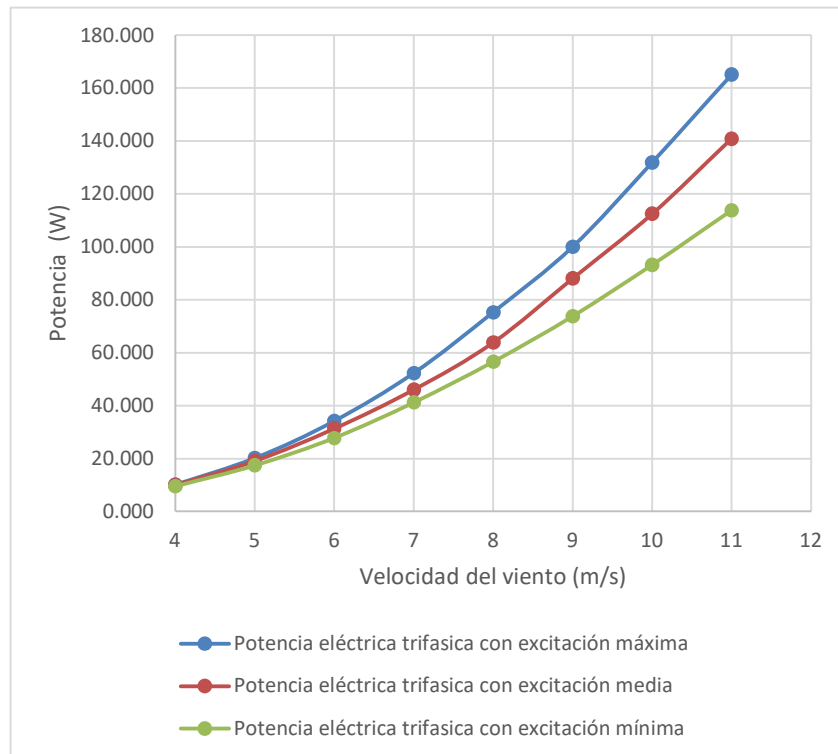
Excitación media y resistencia de 200 ohm							
Velocidad del viento	Velocidad de rotación del aerogenerador	Par en el rotor del aerogenerador	Potencia mecánica en el rotor del aerogenerador	Voltaje del circuito de excitación DC	Voltaje de línea de la carga	Corriente de la carga	Potencia eléctrica trifásica
m/s	r/min	(N.m)	W	V	V	A	W
4	442	0.305	14.12	105	45.43	0.127	9.993
5	610	0.396	25.31	105.1	62.7	0.175	19.005
6	788	0.49	40.41	105.4	79.9	0.226	31.276
7	963	0.576	58.13	105.4	97.2	0.273	45.961
8	1156	0.666	80.59	105.2	115.9	0.318	63.837
9	1351	0.749	106	105.2	134.1	0.379	88.030
10	1540	0.839	135.4	105	151.7	0.428	112.458
11	1747	0.91	166.5	104.7	170.1	0.478	140.829

Excitación mínima y resistencia de 200 ohm							
Velocidad del viento	Velocidad de rotación del aerogenerador	Par en el rotor del aerogenerador	Potencia mecánica en el rotor del aerogenerador	Voltaje del circuito de excitación DC	Voltaje de línea de la carga	Corriente de la carga	Potencia eléctrica trifásica
m/s	r/min	(N.m)	W	V	V	A	W
4	495	0.254	13.15	111.3	44.19	0.124	9.491
5	664	0.324	22.54	111.3	59.8	0.168	17.401
6	845	0.395	34.94	111.3	75.5	0.212	27.723
7	1043	0.475	51.91	111.2	91.8	0.259	41.182
8	1241	0.53	68.92	111.2	107.4	0.304	56.551
9	1440	0.582	87.75	111.2	123.1	0.346	73.773
10	1648	0.632	109.1	111.1	138	0.39	93.219
11	1850	0.679	131.6	111.1	152.4	0.431	113.769

El siguiente cuadro muestra la comparación en porcentaje entre las potencias generadas por el aerogenerador en los casos de excitación máxima, media y mínima.

	Excitación máxima	Excitación media	Excitación mínima		
Velocidad del viento	Potencia eléctrica trifásica	Potencia eléctrica trifásica	Potencia eléctrica trifásica	Diferencia entre potencia de excitación máxima y media	Diferencia entre potencia de excitación máxima y mínima
m/s	W	W	W	%	%
4	10.041	9.993	9.491	0.47%	5.48%
5	20.127	19.005	17.401	5.57%	13.54%
6	34.109	31.276	27.723	8.31%	18.72%
7	52.272	45.961	41.182	12.07%	21.22%
8	75.264	63.837	56.551	15.18%	24.86%
9	99.956	88.030	73.773	11.93%	26.19%
10	131.883	112.458	93.219	14.73%	29.32%
11	165.092	140.829	113.769	14.70%	31.09%

A continuación se muestra el gráfico comparativo de las potencias generadas por el aerogenerador con diferentes excitaciones.



## 7. CONCLUSIONES

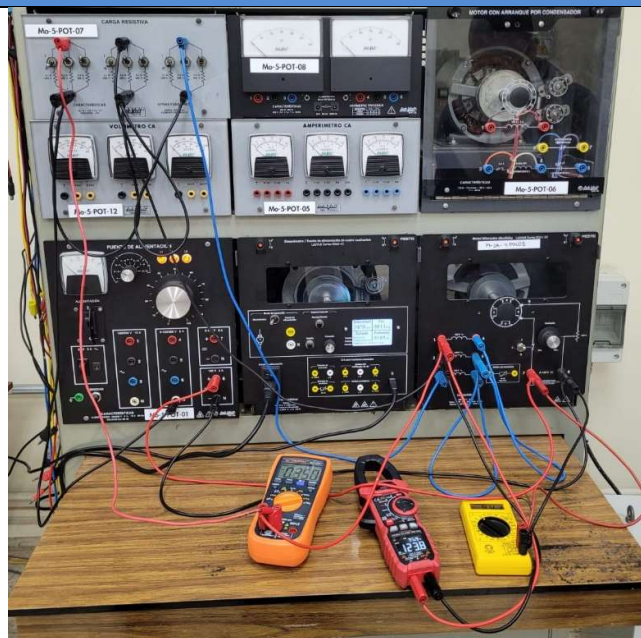
- ✓ Como se pudo observar, las curvas de potencia eléctrica entregada por el aerogenerador para los casos de excitación máxima, media y mínima tienen un comportamiento exponencial y son similares, sin embargo, se observa que a mayor excitación, más potencia eléctrica será entregada a la carga, esto permite un mejor aprovechamiento del recurso eólico para cada velocidad del viento, ya que, como se observó en las tablas de datos, se obtiene una mayor potencia mecánica y eléctrica para el caso de excitación máxima.
- ✓ Se concluye en base a la tabla de comparación de potencias para casos de excitación máxima, media y mínima, que se puede obtener hasta un 31.09% más de potencia entregada por el aerogenerador si se aumenta la excitación del generador síncrono para una velocidad del viento de  $11 \left(\frac{m}{s}\right)$ , mientras que para velocidades bajas de  $4 \left(\frac{m}{s}\right)$  es posible tener un aumento del 5.48% de la potencia eléctrica generada si se trabaja con la excitación máxima.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

Chapman, S. J., Rodríguez Pérez, C., & Santana Díaz Alfredo. (2012). *Máquinas eléctricas* (5a ed). McGraw-Hill Interamericana.

Dutta, S., & Hussain, C. M. (2021). *Sustainable fuel technologies handbook*. Academic press.

## 9. ANEXOS



Conexión de los módulos y elementos de medición para realización de practica 4

**Fecha de Elaboración:** 27/06/2024

**Elaborado por:** Richard Vera Parrales, Leonardo Palma Rodríguez.

**REVISADO POR:**

**FECHA:**



**LABORATORIO**

**PRÁCTICAS EN EMULADOR EOLICO**

**INFORME**

<b>NOMBRE DE LA PRÁCTICA</b>	Curvas características de un aerogenerador	<b>No. PRÁCTICA:</b> CIE_eólica-05
------------------------------	--	------------------------------------

<b>1. DATOS INFORMATIVOS</b>	
<b>CARRERA:</b>	Electricidad
<b>CICLO/NIVEL:</b>	Egresado
<b>FECHA:</b>	18/07/2024
<b>NOMBRE DEL ESTUDIANTE:</b>	Richard Vera Parrales Leonardo Palma Rodríguez
<b>DOCENTE RESPONSABLE</b>	Ing. Vladimir Jaramillo García, PhD
<b>2. FUNDAMENTACIÓN</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Curvas características de un aerogenerador</li> <li>• Relaciones de velocidad, potencia y límite de Betz</li> <li>• Conversión de energía mecánica a eléctrica</li> <li>• Diagrama de flujo de potencia y eficiencia</li> </ul> <p style="text-align: center;">- <b>Definiciones</b></p> <p><b>Curvas características de un aerogenerador</b></p> <p>Las curvas características de un aerogenerador son representaciones gráficas esenciales que describen la relación entre diversos parámetros operativos y el rendimiento del aerogenerador. Como son las curvas de: curvas de potencia, curva de coeficiente de potencia, curva de velocidad de rotación del rotor, curva de torque del rotor, entre otras. Estas curvas son fundamentales para entender y optimizar su funcionamiento.</p> <p><b>Relaciones de velocidad, potencia y límite de Betz</b></p> <p>La energía cinética del aire en movimiento puede ser aprovechada para generar electricidad mediante aerogeneradores, esto se logra mediante la rotación de las palas, que se produce al circular viento a través de estas, y que a su vez están acopladas a un eje en el buje del</p>	

aerogenerador. La energía cinética de una masa de aire  $m$  que se desplaza con una velocidad  $V$  se calcula con la fórmula:

$$\text{Energía cinética} = \frac{1}{2} mV^2 \quad (8)$$

La potencia del aire en movimiento, que es la tasa de flujo de esta energía cinética por segundo, se expresa en vatios como:

$$\text{Potencia} = \frac{1}{2} (\text{flujo masico por segundo})V^2 \quad (9)$$

El caudal volumétrico es el área barrida por las palas del rotor ( $m^2$ ) multiplicado por la velocidad del aire ( $\frac{m}{s}$ ) es  $A * V$ , el caudal másico del aire en kilogramos por segundo es  $\rho * A * V$ , por lo que la potencia mecánica que posee el viento está dada por la siguiente ecuación en vatios (W):

$$P = \frac{1}{2} \rho AV^3 \quad (10)$$

Donde:

$P$  = potencia del viento que circula por las palas del aerogenerador (vatios)

$\rho$  = densidad del aire ( $\frac{Kg}{m^3}$ )

$A$  = área barrida por las palas del rotor ( $m^2$ )

$V$  = velocidad del viento ( $\frac{m}{s}$ )

### **Límite de Betz**

Nombrado al igual que su descubridor Alberto Betz, nos indica la máxima potencia que un rotor de un aerogenerador puede aprovechar del viento, este valor es del 59,3%, en la realidad los rotores no llegan a un porcentaje tan alto de aprovechamiento ya que se debe considerar la eficiencia del conjunto buje-rotor que transmite la potencia mecánica al eje del generador eléctrico (Andrade et al., 2020). El comportamiento del límite de Betz se lo puedo analizar por la ecuación de continuidad:

$$vA = v_1A_1 = v_2A_2 \quad (4)$$

Esto quiere decir que en  $A_1$  se tiene una potencia  $P_1$  en  $A_2$  se tiene una potencia  $P_2$ , de lo cual se deduce que en A se tiene una potencia P que viene dada por:

$$P = P_1 - P_2$$

$$P = \frac{1}{2}\rho A_1 V_1^3 - \frac{1}{2}\rho A_2 V_2^3$$

Que también se puede escribir por agrupación de factores como:

$$P = \frac{1}{2}\rho(A_1 V_1) V_1^2 - \frac{1}{2}\rho(A_2 V_2) V_2^2 \quad (5)$$

Justo en las palas, aplicando la ecuación de continuidad:

$$vA = v_1 A_1 = v_2 A_2$$

Que al remplazar en la ecuación (5), y sacando factor común se tiene:

$$P = \frac{1}{2}\rho A v (V_1^2 - V_2^2)$$

Definiremos a v como la velocidad en la turbina, por tanto, como el promedio de la velocidad  $v_1$  y  $v_2$ , es así como:

$$P = \frac{1}{2}\rho A \left(\frac{v_1 + v_2}{2}\right) (V_1^2 - V_2^2) \quad (6)$$

Si consideramos que  $a = \frac{v_1}{v_2}$ , entonces  $v_2 = a * v_1$ ; que sustituido en la ecuación 4, queda:

$$P = \frac{1}{2}\rho A (v_1 + a * v_1) (V_1^2 - a^2 V_1^2)$$

Simplificando y agrupando términos:

$$P = \frac{1}{2}\rho A v_1^2 \frac{1}{2} (1 + a) (1 - a^2)$$

Llamando

$$C_p = \frac{1}{2} (1 + a) (1 - a^2)$$

La expresión de la potencia generada en el aerogenerador, en función de la velocidad del viento:

$$P = \frac{1}{2}\rho A C_p v_1^3$$

Si llevamos a una gráfica la ecuación de  $C_p$  en función de  $a$ , sabiendo que solo puede variar en el intervalo  $[0,1]$  ( $v_2 < v_1$ )

### Conversión de energía mecánica a eléctrica

Un flujo magnético variable a través de las espiras de un conductor induce una fuerza electromotriz (FEM). La polaridad de esta FEM es tal que la corriente generada produce un flujo magnético que se opone al cambio original, siguiendo la ley de Faraday (magnitud de la FEM relacionada con la variación del flujo) y la ley de Lenz (dirección de la corriente opuesta al cambio de flujo). Estos principios fundamentan la conversión de energía mecánica en eléctrica en un generador síncrono. En este generador, un circuito de excitación con corriente continua (DC) crea un flujo magnético en el rotor, el cual varía debido al movimiento del eje impulsado por el viento en las palas del aerogenerador. Este flujo magnético variable induce un voltaje en tres bobinados del estator, separados 120 grados entre sí, generando corriente alterna (AC) trifásica.

### Diagrama de flujo de potencia y eficiencia

En el proceso de conversión de energía mecánica a eléctrica existen pérdidas debido a factores mecánicos como eléctricos, en la siguiente figura se representan estos aspectos:

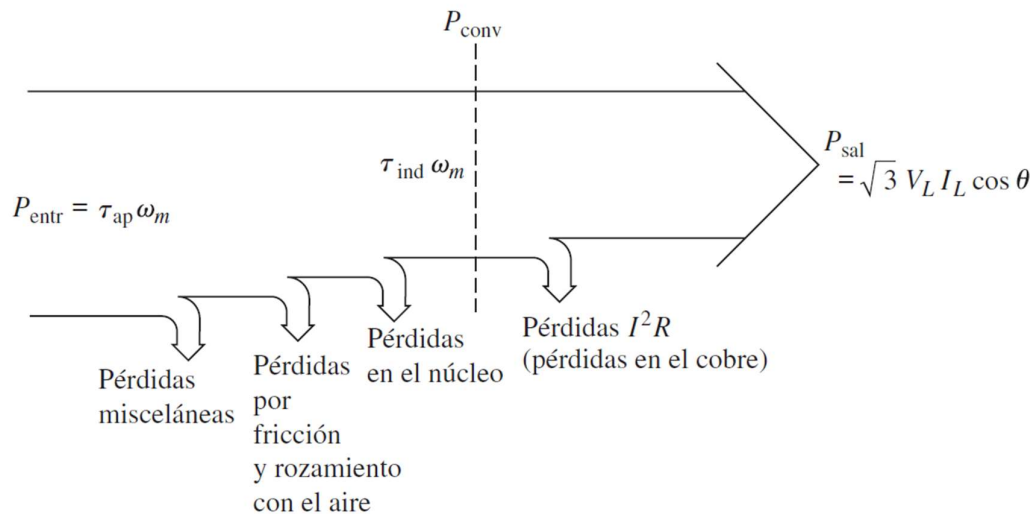


Figura 54. Diagrama de flujo de potencia de un generador síncrono. Fuente: (Chapman et al., 2012)

Donde de la potencia de entrada representa la potencia mecánica en el eje del generador y la potencia de salida representa la potencia eléctrica entregada a la carga. Por lo que es posible definir la eficiencia con la siguiente fórmula:

$$\eta = \frac{\text{Potencia}_{mecanica\ entrada}}{\text{Potencia}_{electronica\ salida}} = \frac{\tau * \omega}{\sqrt{3} * V_L * I_L * \cos \theta} \quad (11)$$

Donde:

$\tau$  = Torque aplicado por el eje del aerogenerador

$\omega$  = Velocidad del eje del aerogenerador

$V_L$  = Voltaje de línea en las terminales de la carga

$I_L$  = Corriente de línea que circula por la carga

$\theta$  = Ángulo entre la potencia activa y aparente de una carga en un triángulo de potencia

**Tipo de turbina del emulador de aerogenerador a utilizar**

- Longitud de palas de 1,15 m con 3 álabes

Densidad del aire:  $1.225 \frac{kg}{m^3}$

**Cuadro de parámetros y valores a utilizar en el emulador de aerogenerador y alternador sincrónico para la realización de la practica:**

Velocidad del viento								
4 m/s	5 m/s	6 m/s	7 m/s	8 m/s	9 m/s	10 m/s	11 m/s	12 m/s
Resistencia de la carga	Resistencia de la carga	Resistencia de la carga	Resistencia de la carga	Resistencia de la carga	Resistencia de la carga	Resistencia de la carga	Resistencia de la carga	Resistencia de la carga
ohm	ohm	ohm	ohm	ohm	ohm	ohm	ohm	ohm
171	171	171	171	171	171	171	171	171
200	200	200	200	200	200	200	200	200
300	300	300	300	300	300	300	300	-
400	400	400	400	400	400	400	400	-
600	600	600	600	600	600	600	-	-

### 3. OBJETIVOS

- Obtener las curvas características de potencia mecánica y eléctrica de un aerogenerador para diferentes velocidades del viento bajo diferentes condiciones de carga.
- Determinar el coeficiente de potencia ideal para la operación del aerogenerador en todas las velocidades del viento haciendo uso de la curva  $C_p$  vs  $\lambda$ .
- Calcular la eficiencia total del proceso de conversión de energía eólica a eléctrica en diferentes velocidades del viento para distintas condiciones de carga.

### 4. MATERIALES E INSUMOS

- ✓ Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes - LabVolt Serie 8960-32.
- ✓ Software LVDAC-EMS función Emulador de Aerogenerador.
- ✓ Fuente de alimentación 8821-22
- ✓ Módulo de cargas resistivas 8311-02
- ✓ Alternador sincrónico 8241-22
- ✓ 2 Multímetros
- ✓ Cables tipo banana

## 5. PROCEDIMIENTO

N°	ACTIVIDADES	OBSERVACIONES
1	Colocar los módulos indicados en la caja porta módulos de LabVolt, el dinamómetro de cuatro cuadrantes debe colocarse en el medio, al lado derecho debe estar el alternador sincrónico, del lado izquierdo la fuente de alimentación, adicional se agregará el módulo de cargas resistivas que se ubicará en la parte superior de los módulos antes mencionados.	
2	Bajar los paneles frontales del dinamómetro de cuatro cuadrantes y el alternador sincrónico para colocar la banda de caucho que acople ambos ejes, verificando que quede firme y sin holguras haciendo uso de los rodamientos al lado del eje de cada módulo.	
3	Realizar la conexión en estrella en los bornes 4, 5 y 6 del alternador sincrónico, y conectar los bornes 7 y 8 a la fuente de alimentación en DC para la excitatriz	
4	Conectar en estrella el final de cada resistencia, conectar uno de estos finales con el neutro de la fuente de alimentación, posteriormente seleccionar la resistencia por fase a utilizar según el caso a analizar, y por último conectar los bornes 1,2 y 3 del alternador sincrónico a cada una de las cargas resistivas	
4.1	Conectar en paralelo un multímetro en los bornes 1 y 2 del alternador sincrónico	Verificar que la medición sea en voltios AC
4.2	Colocar en serie un multímetro con el cable de alimentación que va del borne 1 del alternador sincrónico a la carga resistiva	Verificar que la medida este en corriente AC
5	Conectar el cable de adquisición de datos del dinamómetro hacia la PC	

6	Conectar la alimentación del dinamómetro, primero desde el módulo luego hacia el tomacorriente	Verificar que el tomacorriente tenga valores cercanos a 120 V
7	Se enciende el dinamómetro y se abre el software LVSIM desde la PC	Ingresar en la interfaz 120v y 60Hz
8	Colocar el switch en modo dinamómetro en el módulo para posterior escoger la función de aerogenerador turbina eólica en el software	
9	Revisar los parámetros correctos para el arranque; relación de polea 24:24; tipo de aerogenerador 1,15m/3alabes; densidad del aire 1.225 (kg/m <sup>3</sup> )	
10	Abrir la tabla de datos en el software y en parámetros de registro marcar los parámetros de velocidad, par, potencia y velocidad del viento	
11	Colocar la velocidad de arranque en 5 m/s, encender el circuito de excitación del generador y posteriormente la fuente de alimentación.	
12	Dar marcha al emulador, esperar que el sistema se estabilice un momento, para luego llevar la velocidad a 4 m/s	
13	Registrar los valores de velocidad, par, potencia y velocidad del viento	
14	Registrar los valores de voltaje de línea y de corriente de fase visualizados en los multímetros	
15	Aumentar la velocidad del viento en pasos de 1 m/s según la tabla proporcionada en la fundamentación para cada caso y repetir los pasos 12 y 13 nuevamente, repetir este paso hasta llegar a la velocidad de viento de 12 m/s	
16	Detener el emulador con el botón de marcha/parada para posteriormente cambiar el valor de las resistencias por fase y después volver a realizar los pasos 11, 12, 13, 14 y 15.	

16	Una vez terminados todos los casos, se procede a detener el emulador con el botón de marcha/parada y con el apagado de los equipos, en primer lugar, la fuente de alimentación, segundo lugar el dinamómetro y por último se procede con la desconexión de los enchufes de cada módulo.	
----	---	--

## 6. CUADROS DE RESULTADOS

A continuación se detallan las mediciones tomadas y parámetros calculados para cada velocidad del viento con diferentes resistencias de carga:

Velocidad del viento: 4 m/s										
Resistencia de la carga	Velocidad de rotación del aerogenerador	Par en el rotor del aerogenerador	Potencia mecánica en el rotor del aerogenerador	Voltaje de línea de la carga	Corriente de la carga	Potencia eléctrica trifásica	Coefficiente de potencia	Tip speed ratio (TSR)	Eficiencia proceso de conversión de energía mecánica a eléctrica	Eficiencia total del proceso para velocidad del viento: 4 m/s
ohm	r/min	(N.m)	W	V	A	W	Cp	$\lambda$	%	%
171	350	0.383	14.05	41.7	0.136	9.823	0.345	5.269	69.91%	24.12%
200	388	0.35	14.21	46.1	0.13	10.380	0.349	5.841	73.05%	25.49%
300	463	0.288	13.98	54.7	0.102	9.664	0.343	6.970	69.13%	23.73%
400	500	0.238	12.48	58.9	0.084	8.569	0.307	7.527	68.67%	21.05%
600	549	0.191	10.96	66.7	0.061	7.047	0.269	8.264	64.30%	17.31%

Velocidad del viento: 5 m/s										
Resistencia de la carga	Velocidad de rotación del aerogenerador	Par en el rotor del aerogenerador	Potencia mecánica en el rotor del aerogenerador	Voltaje de línea de la carga	Corriente de la carga	Potencia eléctrica trifásica	Coefficiente de potencia	Tip speed ratio (TSR)	Eficiencia proceso de conversión de energía mecánica a eléctrica	Eficiencia total del proceso para velocidad del viento: 5 m/s
ohm	r/min	(N.m)	W	V	A	W	Cp	$\lambda$	%	%
171	508	0.516	27.44	60.1	0.197	20.507	0.345	6.118	74.73%	25.79%
200	551	0.473	27.32	65.1	0.182	20.522	0.344	6.636	75.12%	25.81%
300	630	0.371	24.49	74.7	0.139	17.984	0.308	7.587	73.44%	22.61%
400	683	0.305	21.81	81.2	0.115	16.174	0.274	8.225	74.16%	20.34%
600	743	0.239	18.61	89.7	0.084	13.051	0.234	8.948	70.13%	16.41%

Velocidad del viento: 6 m/s										
Resistencia de la carga	Velocidad de rotación del aerogenerador	Par en el rotor del aerogenerador	Potencia mecánica en el rotor del aerogenerador	Voltaje de línea de la carga	Corriente de la carga	Potencia eléctrica trifásica	Coefficiente de potencia	Tip speed ratio (TSR)	Eficiencia proceso de conversión de energía mecánica a eléctrica	Eficiencia total del proceso para velocidad del viento: 6 m/s
ohm	r/min	(N.m)	W	V	A	W	Cp	$\lambda$	%	%
171	668	0.666	46.57	79.1	0.26	35.621	0.339	6.704	76.49%	25.92%
200	721	0.596	45.03	84.7	0.238	34.916	0.328	7.236	77.54%	25.41%
300	806	0.464	39.18	95.7	0.179	29.671	0.285	8.089	75.73%	21.59%
400	863	0.37	33.4	102.9	0.145	25.843	0.243	8.661	77.37%	18.81%
600	933	0.291	28.39	112.2	0.106	20.600	0.207	9.363	72.56%	14.99%

Velocidad del viento: 7 m/s										
Resistencia de la carga	Velocidad de rotación del aerogenerador	Par en el rotor del aerogenerador	Potencia mecánica en el rotor del aerogenerador	Voltaje de línea de la carga	Corriente de la carga	Potencia eléctrica trifásica	Coefficiente de potencia	Tip speed ratio (TSR)	Eficiencia proceso de conversión de energía mecánica a eléctrica	Eficiencia total del proceso para velocidad del viento: 7 m/s
ohm	r/min	(N.m)	W	V	A	W	Cp	$\lambda$	%	%
171	843	0.812	71.68	99.1	0.325	55.785	0.328	7.251	77.83%	25.56%
200	891	0.717	66.89	103.8	0.294	52.857	0.307	7.664	79.02%	24.22%
300	1001	0.532	55.75	118.4	0.221	45.322	0.255	8.611	81.29%	20.77%
400	1065	0.437	48.78	125.5	0.178	38.692	0.224	9.161	79.32%	17.73%
600	1133	0.345	40.91	136.8	0.128	30.329	0.187	9.746	74.14%	13.90%

Velocidad del viento: 8 m/s										
Resistencia de la carga	Velocidad de rotación del aerogenerador	Par en el rotor del aerogenerador	Potencia mecánica en el rotor del aerogenerador	Voltaje de línea de la carga	Corriente de la carga	Potencia eléctrica trifásica	Coefficiente de potencia	Tip speed ratio (TSR)	Eficiencia proceso de conversión de energía mecánica a eléctrica	Eficiencia total del proceso para velocidad del viento: 8 m/s
ohm	r/min	(N.m)	W	V	A	W	Cp	$\lambda$	%	%
171	1008	0.937	98.93	118.3	0.388	79.502	0.304	7.587	80.36%	24.41%
200	1078	0.838	94.62	124.2	0.353	75.938	0.290	8.114	80.26%	23.31%
300	1182	0.627	77.66	139.4	0.261	63.018	0.238	8.897	81.15%	19.35%
400	1252	0.517	67.76	148.9	0.212	54.675	0.208	9.423	80.69%	16.79%
600	1336	0.393	54.97	161.2	0.152	42.439	0.169	10.056	77.20%	13.03%

Velocidad del viento: 9 m/s										
Resistencia de la carga	Velocidad de rotación del aerogenerador	Par en el rotor del aerogenerador	Potencia mecánica en el rotor del aerogenerador	Voltaje de línea de la carga	Corriente de la carga	Potencia eléctrica trifásica	Coefficiente de potencia	Tip speed ratio (TSR)	Eficiencia proceso de conversión de energía mecánica a eléctrica	Eficiencia total del proceso para velocidad del viento: 9 m/s
ohm	r/min	(N.m)	W	V	A	W	Cp	$\lambda$	%	%
171	1195	1.078	134.9	138.2	0.456	109.152	0.291	7.995	80.91%	23.54%
200	1254	0.941	123.5	144.7	0.407	102.005	0.266	8.390	82.60%	21.99%
300	1374	0.71	102.2	161.7	0.302	84.582	0.220	9.193	82.76%	18.24%
400	1452	0.584	88.74	172.1	0.244	72.733	0.191	9.715	81.96%	15.68%
600	1531	0.438	70.21	185.4	0.17	54.591	0.151	10.243	77.75%	11.77%

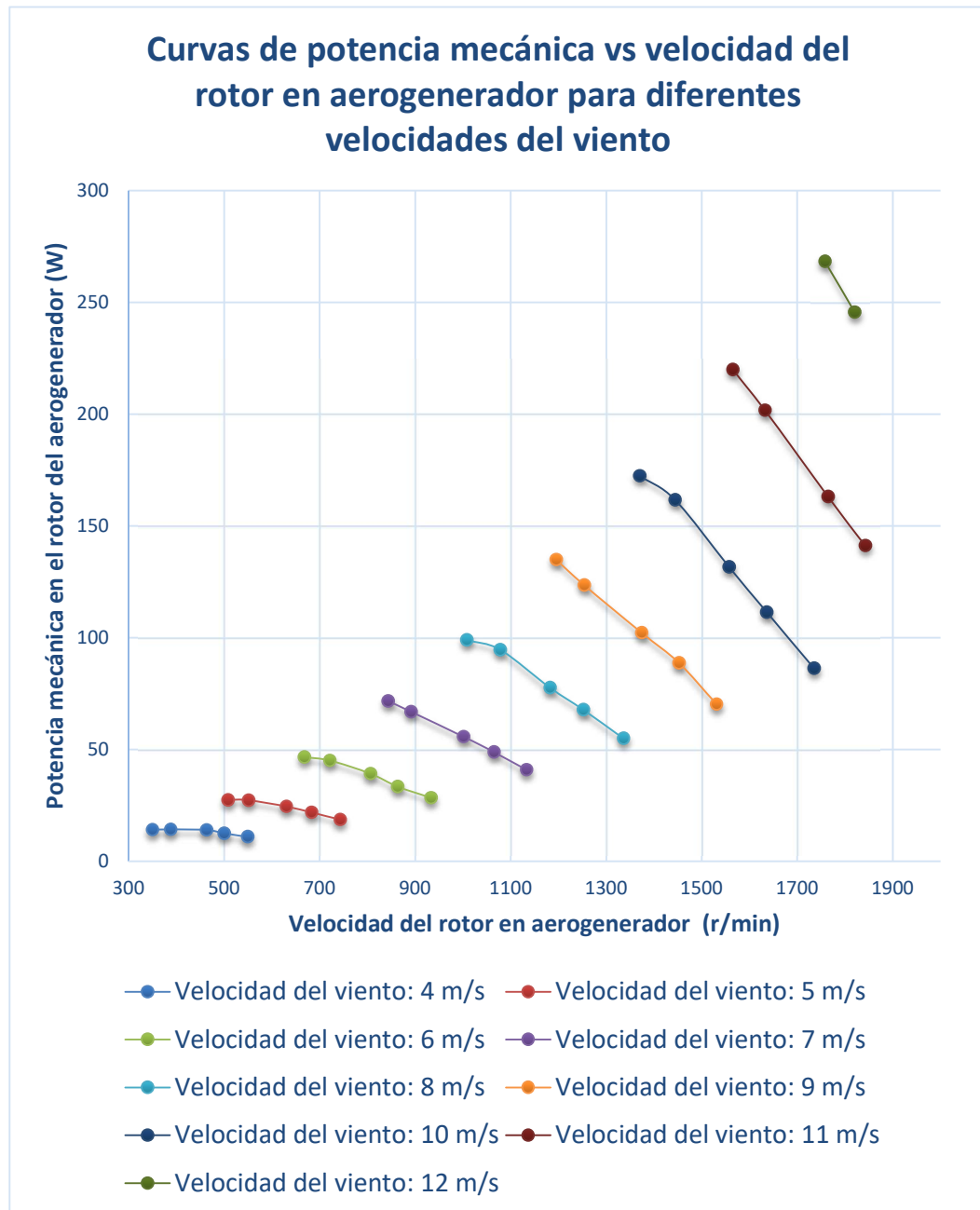
  

Velocidad del viento: 10 m/s										
Resistencia de la carga	Velocidad de rotación del aerogenerador	Par en el rotor del aerogenerador	Potencia mecánica en el rotor del aerogenerador	Voltaje de línea de la carga	Corriente de la carga	Potencia eléctrica trifásica	Coefficiente de potencia	Tip speed ratio (TSR)	Eficiencia proceso de conversión de energía mecánica a eléctrica	Eficiencia total del proceso para velocidad del viento: 10 m/s
ohm	r/min	(N.m)	W	V	A	W	Cp	$\lambda$	%	%
171	1370	1.202	172.4	157.3	0.519	141.402	0.271	8.249	82.02%	22.23%
200	1444	1.069	161.7	165.9	0.465	133.616	0.254	8.695	82.63%	21.00%
300	1557	0.808	131.7	183.9	0.342	108.935	0.207	9.375	82.71%	17.12%
400	1636	0.65	111.4	194.7	0.277	93.413	0.175	9.851	83.85%	14.68%
600	1735	0.475	86.27	208.9	0.197	71.280	0.136	10.447	82.62%	11.20%

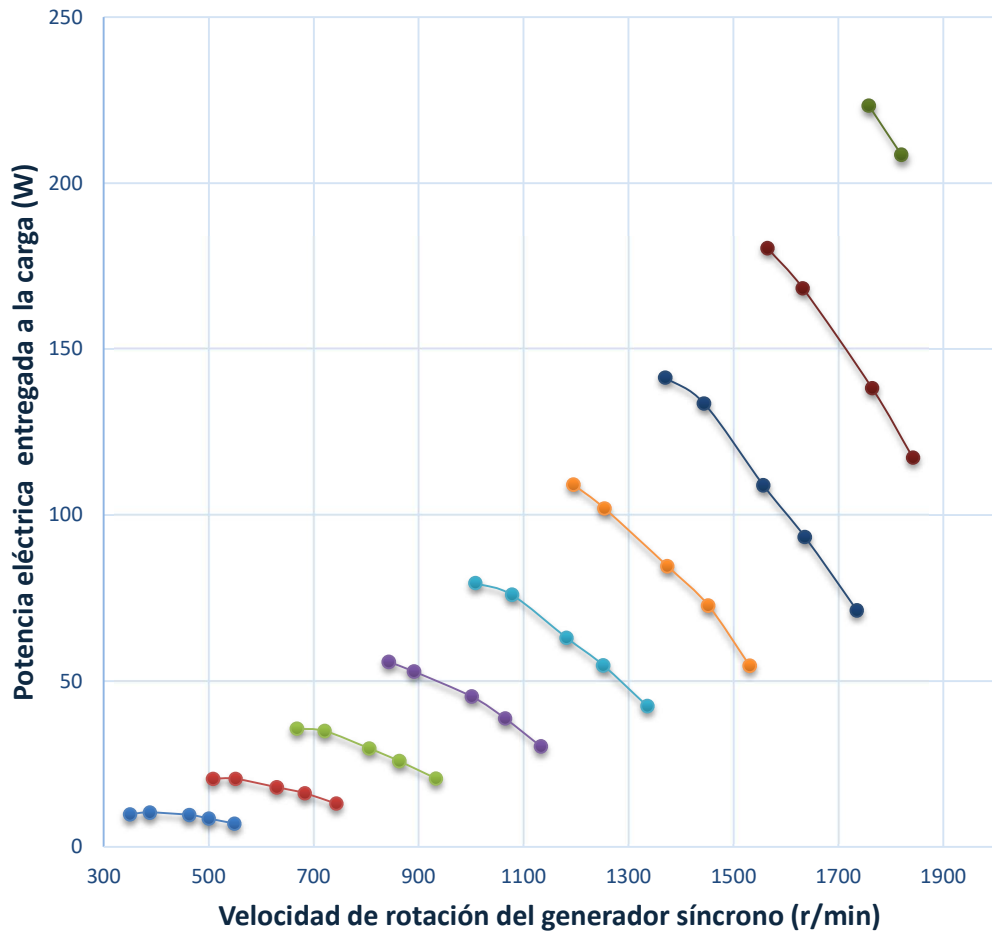
Velocidad del viento: 11 m/s										
Resistencia de la carga	Velocidad de rotación del aerogenerador	Par en el rotor del aerogenerador	Potencia mecánica en el rotor del aerogenerador	Voltaje de línea de la carga	Corriente de la carga	Potencia eléctrica trifásica	Coefficiente de potencia	Tip speed ratio (TSR)	Eficiencia proceso de conversión de energía mecánica a eléctrica	Eficiencia total del proceso para velocidad del viento: 11 m/s
ohm	r/min	(N.m)	W	V	A	W	Cp	$\lambda$	%	%
171	1565	1.343	220	177.4	0.587	180.365	0.260	8.567	81.98%	21.30%
200	1632	1.181	201.8	185.8	0.523	168.309	0.238	8.934	83.40%	19.88%
300	1764	0.883	163.2	206.3	0.387	138.284	0.193	9.656	84.73%	16.33%
400	1842	0.732	141.2	218.4	0.31	117.267	0.167	10.083	83.05%	13.85%

Velocidad del viento: 12 m/s										
Resistencia de la carga	Velocidad de rotación del aerogenerador	Par en el rotor del aerogenerador	Potencia mecánica en el rotor del aerogenerador	Voltaje de línea de la carga	Corriente de la carga	Potencia eléctrica trifásica	Coefficiente de potencia	Tip speed ratio (TSR)	Eficiencia proceso de conversión de energía mecánica a eléctrica	Eficiencia total del proceso para velocidad del viento: 12 m/s
ohm	r/min	(N.m)	W	V	A	W	Cp	$\lambda$	%	%
171	1758	1.457	268.3	198.1	0.651	223.371	0.244	8.821	83.25%	20.32%
200	1820	1.288	245.6	206.9	0.582	208.566	0.223	9.132	84.92%	18.97%

A continuación se muestran las curvas características del aerogenerador:

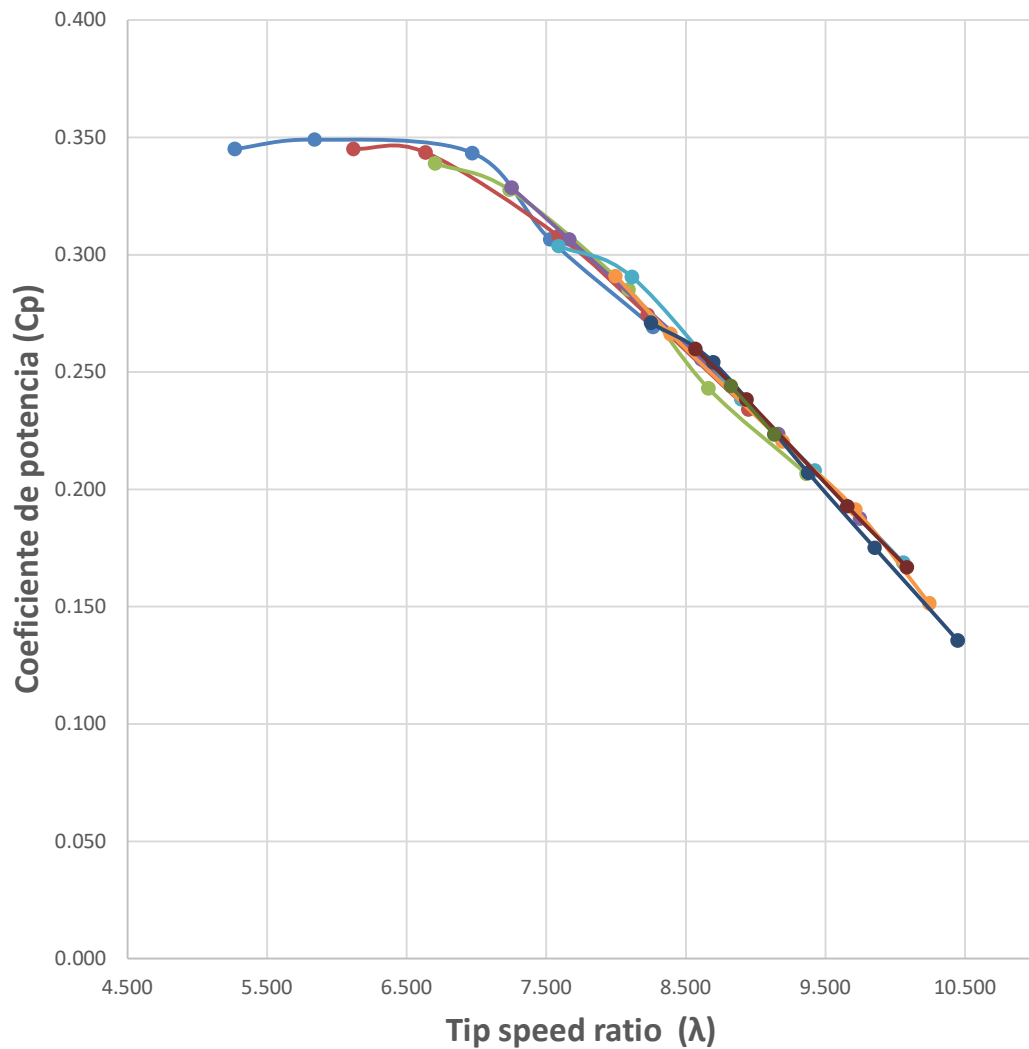


### Curvas de potencia eléctrica vs velocidad de rotación del generador síncrono para diferentes velocidades del viento



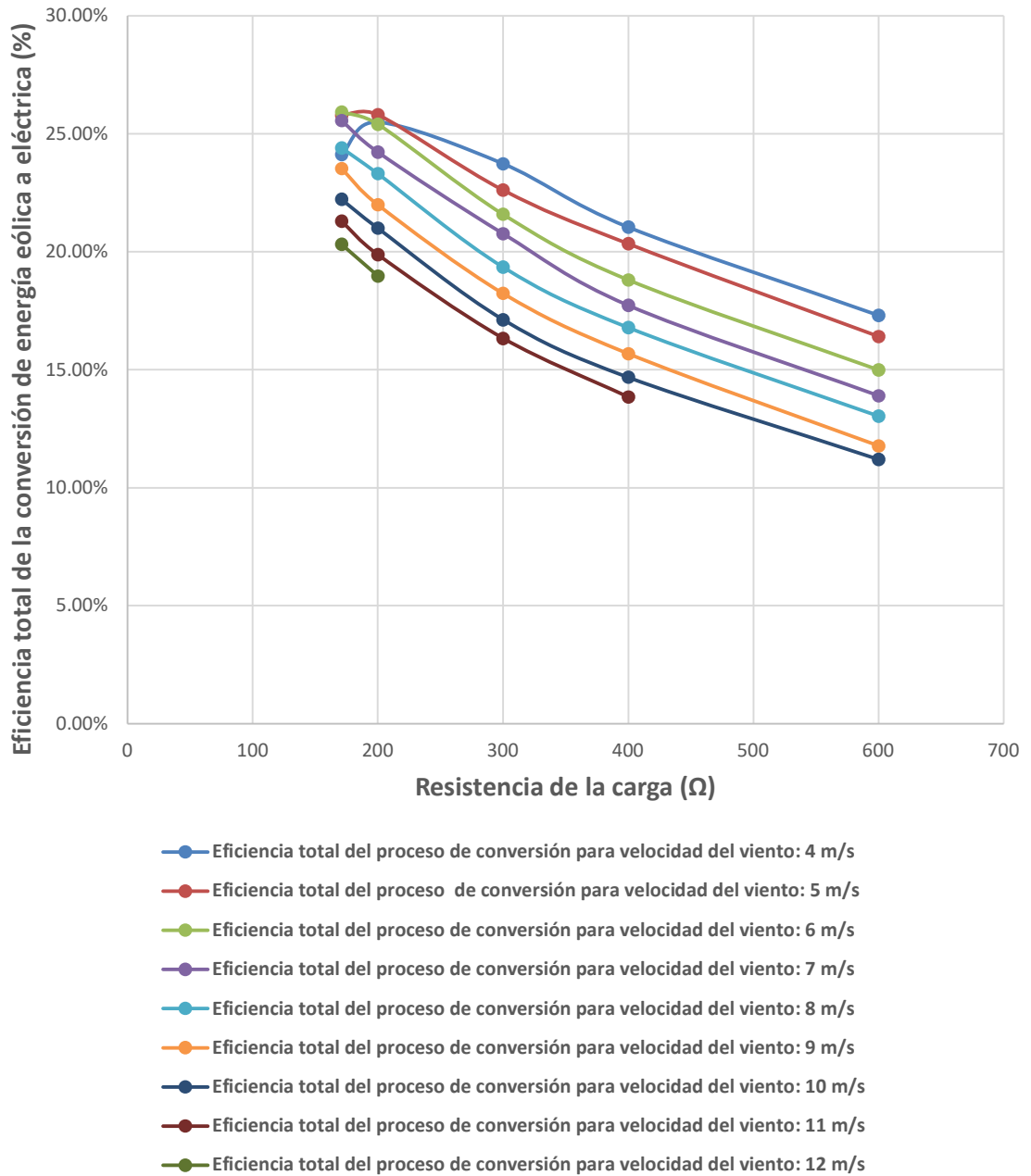
- Velocidad del viento: 4 m/s
- Velocidad del viento: 5 m/s
- Velocidad del viento: 6 m/s
- Velocidad del viento: 7 m/s
- Velocidad del viento: 8 m/s
- Velocidad del viento: 9 m/s
- Velocidad del viento: 10 m/s
- Velocidad del viento: 11 m/s
- Velocidad del viento: 12 m/s

Curvas del coeficiente de potencia ( $C_p$ ) vs tip speed ratio ( $\lambda$ ) para diferentes velocidades del viento



- Velocidad del viento: 4 m/s
- Velocidad del viento: 5 m/s
- Velocidad del viento: 6 m/s
- Velocidad del viento: 7 m/s
- Velocidad del viento: 8 m/s
- Velocidad del viento: 9 m/s
- Velocidad del viento: 10 m/s
- Velocidad del viento: 11 m/s
- Velocidad del viento: 12 m/s

### Curvas de eficiencia total del proceso de conversión de energía eólica a eléctrica vs resistencia de la carga para distintas velocidades del viento



## 7. CONCLUSIONES

- ✓ Se concluye que las curvas de potencia tanto mecánica como eléctrica para las diferentes cargas con distintas velocidades del viento tienen similitud con aquellas presentadas en la fundamentación, siendo la potencia eléctrica menor a la mecánica, y aunque se observen incompletas, se puede visualizar que para las velocidades de viento de 4, 5 y 6  $\left(\frac{m}{s}\right)$  obtenemos los valores de máxima potencia de las curvas, mientras que para las demás velocidades se tienen valores después del punto de máxima potencia, esto debido a la limitación de resistencias disponibles.
- ✓ Las curvas del coeficiente de potencia ( $C_p$ ) vs el tip speed ratio ( $\lambda$ ) para diferentes velocidades del viento mostraron el coeficiente  $C_p$  ideal con el que el aerogenerador debe trabajar, siendo este de 0.349, el mismo se dio para la velocidad del viento de 4  $\left(\frac{m}{s}\right)$  con una resistencia de 200 ohm, y aunque es posible obtener este valor del coeficiente  $C_p$  para todas las velocidades del viento, no fue posible debido a que no se disponían de resistencias con valores más bajos.
- ✓ La eficiencia total del proceso de conversión de energía eólica a eléctrica varía para cada velocidad del viento, teniendo la mayor eficiencia de 25.92% para una velocidad del viento de 6  $\left(\frac{m}{s}\right)$  con una resistencia de 171 ohm, la segunda fue de 25.81% para la velocidad del viento de 5  $\left(\frac{m}{s}\right)$  con una resistencia de 200 ohm, pasado este punto, la velocidad del viento de 4  $\left(\frac{m}{s}\right)$  tiene mayores eficiencias para resistencias de valores más altos pero sin superar la máxima de 25.92%.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

Andrade, R. G., Ramírez, A. F., Reyes, A. M., & Tamez, M. (2020). DISEÑO DE HÉLICES

DE AEROGENERADOR DE BAJAS VELOCIDADES DE VIENTO. *Miscelánea*

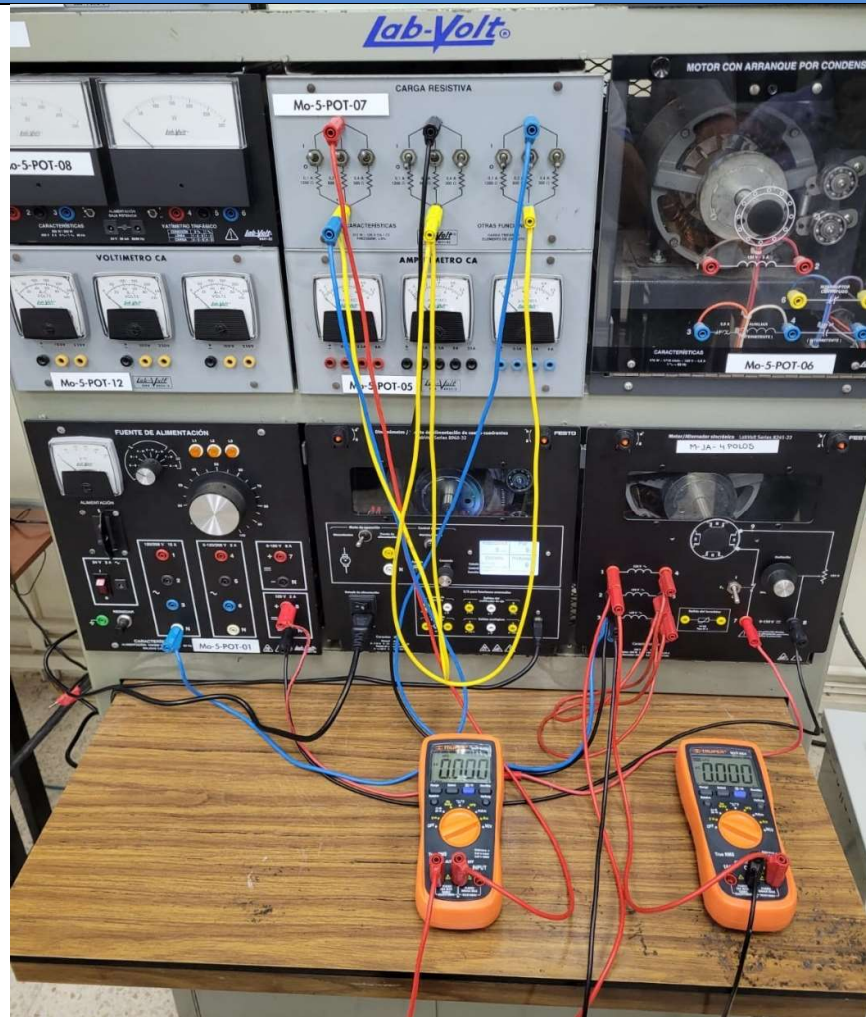
*Científica en México*, 625.

Chapman, S. J., Rodríguez Pérez, C., & Santana Díaz Alfredo. (2012). *Máquinas eléctricas* (5a

ed). McGraw-Hill Interamericana.

Manual de trabajo Introducción a la energía eólica FESTO didactic es 579354

## 9. ANEXOS



Disposición y conexión de módulos con dispositivos de medición para practica 5

**Fecha de Elaboración:** 18/07/2024

**Elaborado por:** Richard Vera Parrales, Leonardo Palma Rodríguez.

**REVISADO POR:**

**FECHA:**



**LABORATORIO**

**PRÁCTICAS EN EMULADOR EOLICO**

**INFORME**

<b>NOMBRE DE LA PRÁCTICA</b>	Producción eléctrica de aerogenerador bajo condiciones meteorológicas reales del sitio minas de Huascachaca	<b>No. PRÁCTICA:</b> CIE_eólica-06
------------------------------	---	------------------------------------

**1. DATOS INFORMATIVOS**

<b>CARRERA:</b>	Electricidad
<b>CICLO/NIVEL:</b>	Egresado
<b>FECHA:</b>	18/07/2024
<b>NOMBRE DEL ESTUDIANTE:</b>	Richard Vera Parrales Leonardo Palma Rodríguez
<b>DOCENTE RESPONSABLE</b>	Ing. Vladimir Jaramillo García, PhD

**2. FUNDAMENTACIÓN**

- ✓ Fundamento de la producción de energía
- ✓ Velocidad y energía del viento
- ✓ Relaciones De Velocidad Y Potencia
- ✓ Límite de Betz

✓ **Definiciones**

**Fundamento de la producción de energía**

La producción de energía implica la conversión de diversas formas de energía en electricidad o energía mecánica. Los principios fundamentales incluyen la Ley de Conservación de la Energía, que establece que la energía no se crea ni se destruye, solo se transforma. Se consideran las unidades de medida como vatios (W) para potencia, Joules (J) para energía y las tasas de conversión entre diferentes formas de energía.

Entre los tipos de energía se diferencian las fuentes primarias de energía en renovables (solar, eólica, hidroeléctrica, geotérmica, biomasa) y no renovables (carbón, petróleo, gas natural, energía nuclear). Cada tipo tiene características específicas en términos de disponibilidad, impacto ambiental y eficiencia (Chai et al., 2021).

Las energías renovables se basan en recursos naturales que se regeneran de manera continua, por lo que, la energía eólica utiliza la fuerza del viento para generar electricidad a través de aerogeneradores, como se muestra en la figura 1.



Figura 55. Ministerio de Energía y Minas - Eólico Villonaco.

### Velocidad y energía del viento

El aerogenerador convierte la energía cinética del viento en electricidad mediante un rotor con dos o más palas conectadas a un generador eléctrico. La turbina se monta en una torre alta para maximizar la captación de energía y se utilizan varias unidades para alcanzar la generación deseada. La producción anual depende de la velocidad y constancia del viento. Existen dos configuraciones principales: eje horizontal y eje vertical, siendo la de eje horizontal la más común. Exceptuando el rotor, la mayoría de los componentes son similares, aunque varían en ubicación (Patel & Beik, 2021).

### Relaciones De Velocidad Y Potencia

La energía cinética del aire en movimiento puede ser aprovechada para generar electricidad mediante aerogeneradores. La energía cinética de una masa de aire  $m$  que se desplaza con una velocidad  $V$  se calcula con la fórmula:

$$\text{Energía cinética} = \frac{1}{2} mV^2 \quad (12)$$

La potencia del aire en movimiento, que es la tasa de flujo de esta energía cinética por segundo, se expresa en vatios como:

$$\text{Potencia} = \frac{1}{2} (\text{flujo masico por segundo})V^2 \quad (13)$$

El caudal volumétrico es el área barrida por las palas del rotor ( $m^2$ ) multiplicado por la velocidad del aire ( $\frac{m}{s}$ ) es  $A * V$ , el caudal másico del aire en kilogramos por segundo es  $\rho * A * V$ , por lo que la potencia mecánica que posee el viento está dada por la siguiente ecuación en vatios (W):

$$P = \frac{1}{2} \rho AV^3 \quad (14)$$

Donde:

$P$  = potencia del viento que circula por las palas del aerogenerador (vatios)

$\rho$  = densidad del aire ( $\frac{Kg}{m^3}$ )

$A$  = área barrida por las palas del aerogenerador ( $m^2$ )

$V =$  velocidad del viento  $\left(\frac{m}{s}\right)$

### Límite de Betz

Denominado en honor a su descubridor, Alberto Betz, el límite de Betz representa la máxima cantidad de energía que un rotor de aerogenerador puede extraer del viento, con un valor teórico del 59,3%. En la práctica, los rotores no alcanzan este nivel de eficiencia debido a la influencia del conjunto buje-rotor, que transmite la potencia mecánica al eje del generador eléctrico (Andrade et al., 2020). El análisis del límite de Betz se puede realizar a través de la ecuación de continuidad:

$$vA = v_1A_1 = v_2A_2 \quad (4)$$

Esto quiere decir que en  $A_1$  se tiene una potencia  $P_1$  en  $A_2$  se tiene una potencia  $P_2$ , de lo cual se deduce que en  $A$  se tiene una potencia  $P$  que viene dada por:

$$P = P_1 - P_2$$
$$P = \frac{1}{2}\rho A_1 V_1^3 - \frac{1}{2}\rho A_2 V_2^3$$

Que también se puede escribir por agrupación de factores como:

$$P = \frac{1}{2}\rho(A_1 V_1)V_1^2 - \frac{1}{2}\rho(A_2 V_2)V_2^2 \quad (5)$$

Justo en las palas, aplicando la ecuación de continuidad:

$$vA = v_1A_1 = v_2A_2$$

Que al remplazar en la ecuación (5), y sacando factor común se tiene:

$$P = \frac{1}{2}\rho Av(V_1^2 - V_2^2)$$

Definiremos a  $v$  como la velocidad en la turbina, por tanto, como el promedio de la velocidad  $v_1$  y  $v_2$ , es así como:

$$P = \frac{1}{2}\rho A\left(\frac{v_1 + v_2}{2}\right)(V_1^2 - V_2^2) \quad (6)$$

Si consideramos que  $a = \frac{v_1}{v_2}$ , entonces  $v_2 = a * v_1$ ; que sustituido en la ecuación 4, queda:

$$P = \frac{1}{2}\rho A(v_1 + a * v_1)(V_1^2 - a^2 V_1^2)$$

Simplificando y agrupando términos:

$$P = \frac{1}{2}\rho A v_1^2 \frac{1}{2}(1 + a)(1 - a^2)$$

Llamando

$$C_p = \frac{1}{2}(1 + a)(1 - a^2)$$

La expresión de la potencia generada en el aerogenerador, en función de la velocidad del viento:

$$P = \frac{1}{2}\rho A C_p v_1^3$$

Si llevamos a una gráfica la ecuación de  $C_p$  en función de  $a$ , sabiendo que solo puede variar en el intervalo  $[0,1]$  ( $v_2 < v_1$ )

### Tipo de turbina del emulador de aerogenerador a utilizar

- ✓ Longitud de palas de 1,15 m con 3 álabes

### Datos del sitio propuesto para la practica

La simulación es de un aerogenerador con palas de 1,15 m con 3 álabes ubicado en el sitio minas de Huascachaca (Provincia de Loja) y los datos de densidad del aire son obtenidos del MERRA-2 - oficina global de modelado y asimilación, de la administración nacional de aeronáutica y el espacio (NASA)

- ✓ Latitud: -3.3665
- ✓ Longitud: -79.3942
- ✓ Altitud: 1.400 msnm.
- ✓ Densidad de aire anual promedio:  $0.9621 \left(\frac{Kg}{m^3}\right)$

Debido a que el software permite la entrada de densidad del aire desde 1.12 a 1.44  $\left(\frac{Kg}{m^3}\right)$  es necesario ajustar la densidad al rango que nos permite el emulador, esto se hará basándonos en la ecuación (3) que indica una relación directamente proporcional entre la potencia del viento y la densidad del aire, para posteriormente aplicar este factor de corrección y encontrar la potencia eléctrica real del aerogenerador bajo esas condiciones. Por lo que, **para los cálculos de potencia a corregir:**

- ✓ Factor de conversión de densidad y por lo tanto potencia  $\left(\frac{real}{emulador}\right)$ : 0.859

#### **Estimación de la velocidad del viento en Software ENAIR Ryse Energy**

Este software permite el cálculo de la velocidad del viento, distribución de Weibull y demás parámetros basándose en fuentes como el DTU, MERRA-2, VAISALA y BBDD de fuente propia, sin embargo se pueden tener para medias del viento con márgenes de error de hasta el 15% debido a la precisión de los datos y cálculos(Enair, 2024).

A continuación, se encuentran los parámetros y valores para la simulación de la producción eléctrica de un aerogenerador de 300 vatios del sitio minas de Huascachaca (Provincia de Loja):

**Tabla 35**

*Condiciones de viento del sitio minas de Huascachaca para la simulación de la producción eléctrica de un aerogenerador de 300 vatios mediante dinamómetro de cuatro cuadrantes.*

Mes	Velocidad del Viento (m/s)	Densidad del aire (kg/m <sup>3</sup> ) *
enero-23	6.2	1.120
febrero-23	6.3	1.120
marzo-23	6.4	1.120
abril-23	6.7	1.120
mayo-23	7.2	1.120
junio-23	10.3	1.120
julio-23	12	1.120
agosto-23	10.4	1.120
septiembre-23	9.4	1.120
octubre-23	6.4	1.120
noviembre-23	5.5	1.120
diciembre-23	6.4	1.120

*Nota.* \*Ajustada para estar dentro del rango de densidad del aire del emulador

### 3. OBJETIVOS

- Evaluar la producción de energía eléctrica de un aerogenerador bajo una carga de 171 ohm en función de condiciones meteorológicas reales del sitio minas de Huascachaca.
- Calcular la eficiencia total de conversión de energía eólica a eléctrica para los doce meses del año 2023 presentados en la fundamentación.

### 4. MATERIALES E INSUMOS

- ✓ Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes - LabVolt Serie 8960-32.
- ✓ Software LVDAC-EMS función Emulador de Aerogenerador.
- ✓ Fuente de alimentación 8821-22
- ✓ Módulo de cargas resistivas 8311-02
- ✓ Alternador sincrónico 8241-22
- ✓ 2 multímetros
- ✓ Cables tipo banana

### 5. PROCEDIMIENTO

N°	ACTIVIDADES	OBSERVACIONES
1	Colocar los módulos indicados en la caja porta módulos de LabVolt, el dinamómetro de cuatro cuadrantes debe colocarse en el medio, al lado derecho debe estar el alternador, del lado izquierdo la fuente de alimentación, adicional se agregará el módulo de cargas resistivas que se ubicará en la parte superior de la fuente de alimentación.	
2	Realizar la conexión en estrella en los bornes 4, 5 y 6 del alternador sincrónico, y conectar los bornes 7 y 8 a la fuente de alimentación en DC para la excitatriz	
3	Conectar en estrella el final de cada resistencia y seleccionar 171 ohm de carga por fase (paralelo entre resistencias de 1200, 600 y 300 ohm), para luego conectar los bornes 1,2 y 3 del alternador a cada una de las cargas resistivas	
3.1	Conectar en paralelo un multímetro en los bornes 1 y 2 del alternador sincrónico	Verificar que la medición sea en voltios AC

3.2	Colocar en serie un multímetro con el cable de alimentación que va del borne 1 del alternador sincrónico a la carga resistiva	Verificar que la medida este en corriente AC
4	Conectar el cable de adquisición de datos del dinamómetro hacia la PC	
5	Conectar la alimentación del dinamómetro, primero desde el módulo luego hacia el tomacorriente	Verificar que el tomacorriente tenga valores cercanos a 120 V
6	Se enciende el dinamómetro y se abre el software LVSIM desde la PC	Ingresar en la interfaz 120v y 60Hz
7	Colocar el switch en modo dinamómetro en el módulo para posterior escoger la función de aerogenerador turbina eólica en el software	
8	Revisar los parámetros correctos para el arranque; relación de polea 24:24; tipo de aerogenerador 1,15m/3alabes; densidad del aire 1.12 (kg/m <sup>3</sup> )	
9	Abrir la tabla de datos en el software y en parámetros de registro marcar los parámetros de velocidad, par, potencia y velocidad del viento	
10	Colocar la velocidad de arranque en el valor de velocidad de viento del mes de enero, encender el circuito de excitación del generador y posteriormente la fuente de alimentación.	
11	Dar marcha al emulador, esperar que el sistema se estabilice un momento	
12	Registrar los valores de velocidad, par, potencia y velocidad del viento	
13	Registrar los valores de voltaje de línea y de corriente de fase visualizados en los multímetros	
14	Cambiar la velocidad a la del siguiente mes y repetir los pasos 12 y 13 nuevamente, repetir este paso hasta llegar a la velocidad de viento del mes de diciembre.	
16	Se procede a detener el emulador con el botón de marcha/parada y con el apagado de los equipos, en primer lugar, la fuente de alimentación, segundo lugar el dinamómetro y por último se procede con la desconexión de los enchufes de cada módulo.	

## 6. CUADRO DE RESULTADOS

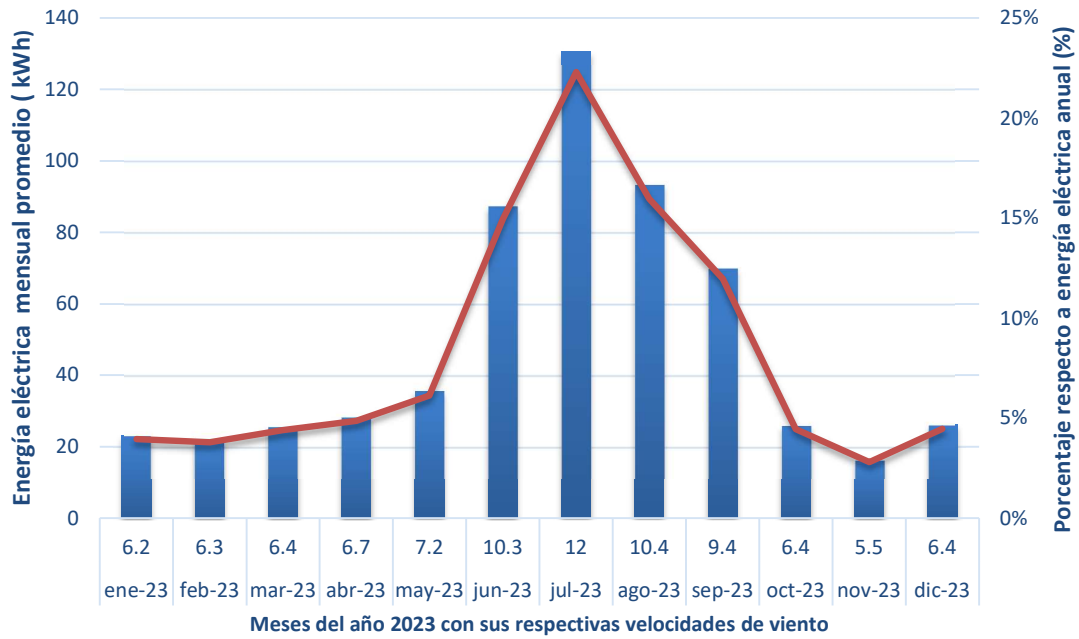
A continuación, se muestran los datos de producción eléctrica:

Meses	Velocidad del viento promedio	Velocidad de rotación del aerogenerador	Par en el rotor del aerogenerador	Potencia mecánica en el rotor del aerogenerador	Potencia mecánica corregida con factor	Voltaje de línea de la carga	Corriente de la carga	Potencia eléctrica trifásica	Potencia eléctrica corregida con factor
	m/s	r/min	(N.m)	W	W	V	A	W	W
ene-23	6.2	719	0.605	45.57	39.145	79.9	0.262	36.258	31.146
feb-23	6.3	739	0.62	47.98	41.215	82.3	0.27	38.488	33.061
mar-23	6.4	756	0.634	50.18	43.105	84.2	0.276	40.251	34.576
abr-23	6.7	808	0.671	56.79	48.783	89.9	0.295	45.935	39.458
may-23	7.2	892	0.73	68.15	58.541	99.5	0.325	56.010	48.113
jun-23	10.3	1445	1.132	171.2	147.061	157.6	0.518	141.399	121.462
jul-23	12	1758	1.312	241.5	207.449	189.2	0.623	204.160	175.373
ago-23	10.4	1453	1.121	170.6	146.545	159.8	0.528	146.141	125.535
sep-23	9.4	1277	1.016	135.9	116.738	140.9	0.464	113.237	97.271
oct-23	6.4	754	0.628	49.55	42.563	84.6	0.278	40.736	34.992
nov-23	5.5	609	0.528	33.7	28.948	67.9	0.225	26.461	22.730
dic-23	6.4	756	0.636	50.31	43.216	84.7	0.279	40.931	35.159

Meses	Energía eléctrica promedio producida	Energía eléctrica mensual promedio	Porcentaje mensual de generación	Producción de energía eléctrica mensual acumulada	Porcentaje mensual acumulado de energía eléctrica	Potencia eólica del viento	Eficiencia total de potencia eólica a eléctrica
	kWh	kWh/mes	%	kWh	%	W	%
ene-23	0.031	23.17	3.96%	23.17	3.96%	119.083	26.15%
feb-23	0.033	22.22	3.80%	45.39	7.76%	124.939	26.46%
mar-23	0.035	25.72	4.40%	71.11	12.15%	130.983	26.40%
abr-23	0.039	28.41	4.85%	99.52	17.01%	150.280	26.26%
may-23	0.048	35.80	6.12%	135.32	23.12%	186.498	25.80%
jun-23	0.121	87.45	14.94%	222.77	38.07%	545.993	22.25%
jul-23	0.175	130.48	22.29%	353.25	60.36%	863.415	20.31%
ago-23	0.126	93.40	15.96%	446.65	76.32%	562.051	22.34%
sep-23	0.097	70.04	11.97%	516.68	88.29%	415.011	23.44%
oct-23	0.035	26.03	4.45%	542.72	92.73%	130.983	26.71%
nov-23	0.023	16.37	2.80%	559.08	95.53%	83.131	27.34%
dic-23	0.035	26.16	4.47%	585.24	100.00%	130.983	26.84%
<b>Total (kWh/año)</b>		<b>585.24</b>	<b>100.00%</b>				

A continuación, se presentan las gráficas de producción mensual y acumulada:

### Producción de energía eléctrica mensual promedio



### Producción de energía eléctrica mensual promedio acumulada



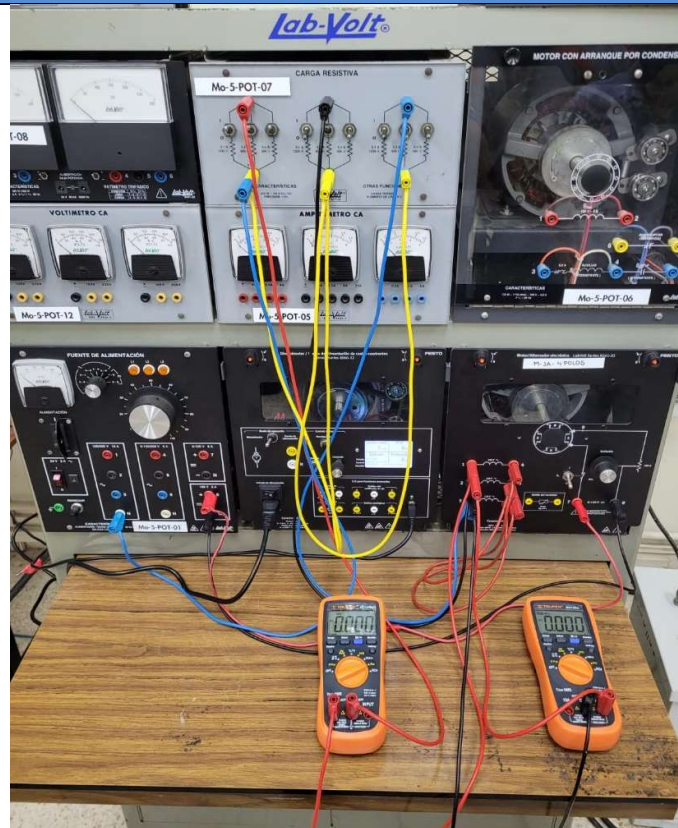
## 7. CONCLUSIONES

- ✓ En base a los datos calculados derivados de la simulación del sitio minas de Huascachaca, la producción de energía eléctrica anual fue de  $585.24 \left(\frac{kW}{año}\right)$ , se pudo observar la mayor producción en el mes de julio con un valor de  $130.48 \left(\frac{kW}{mes}\right)$ , la cual ocurrió con la mayor velocidad promedio mensual de  $12 \left(\frac{m}{s}\right)$ , aportando 22.29% de la energía anual promedio producida por el aerogenerador, adicionalmente se concluye en base a la curva de producción de energía eléctrica mensual promedio acumulada que a partir del mes de junio hasta septiembre se producen los mayores incrementos en la energía eléctrica producida por el aerogenerador, esto debido a que se tienen vientos con altas velocidades que permiten un aprovechamiento mayor de la energía eólica.
- ✓ El cálculo de la eficiencia total para convertir la energía del viento a eléctrica mostro que los meses con menor velocidad del viento tienen una mayor eficiencia, específicamente el mes de noviembre con un valor 27.34% de eficiencia total, esto es debido a que la resistencia de 171 ohm esta cercana al punto de máxima potencia para velocidades de viento más bajas.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- Andrade, R. G., Ramírez, A. F., Reyes, A. M., & Tamez, M. (2020). Diseño de hélices de aerogenerador de bajas velocidades de viento. *Miscelánea Científica en México*, 625.
- Enair. (2024). *Estimación de producción eólica*. enair Ryse Energy.  
<https://www.enair.es/es/app>
- Manual de trabajo Introducción a la energía eólica FESTO didactic es 579354
- Patel, M. R., & Beik, O. (2021). *Wind and solar power systems: Design, analysis, and operation* (Third edition). CRC Press.
- San Miguel Alfaro, G., Regueiro Ferreira, R., Gómez Catasús, J., & Gomez Villarino, M. T. (2023). *Tecnología y sostenibilidad de la energía eólica. Preguntas y respuestas*. Ediciones Mundi-Prensa.

## 9. ANEXOS



Ubicación y conexión de módulos con equipos de medición para practica 6

Fecha de Elaboración: 23/05/2024

Elaborado por: Richard Vera Parrales, Leonardo Palma Rodríguez.

REVISADO POR:

FECHA:



**LABORATORIO**

**PRÁCTICAS EN EMULADOR EOLICO**

**INFORME**

<b>NOMBRE DE LA PRÁCTICA</b>	Regulación de potencia en aerogenerador haciendo uso del pitch control bajo condiciones meteorológicas reales del sitio Villonaco	<b>No. PRÁCTICA:</b> CIE_eólica-07
------------------------------	---	------------------------------------

**1. DATOS INFORMATIVOS**

<b>CARRERA:</b>	Electricidad
<b>CICLO/NIVEL:</b>	Egresado
<b>FECHA:</b>	18/07/2024
<b>NOMBRE DEL ESTUDIANTE:</b>	Richard Vera Parrales Leonardo Palma Rodríguez
<b>DOCENTE RESPONSABLE</b>	Ing. Vladimir Jaramillo García, PhD

**2. FUNDAMENTACIÓN**

- ✓ Pitch Control
- ✓ Velocidad y energía del viento
- ✓ Relaciones De Velocidad Y Potencia
- ✓ Límite de Betz

✓ **Definiciones**

**Pitch Control**

El control de pitch es un mecanismo crucial en los aerogeneradores para optimizar su rendimiento y protegerlos contra condiciones adversas. El control de pitch ajusta el ángulo de las palas del aerogenerador para regular la cantidad de energía que se captura del viento. Al variar el ángulo de ataque de las palas, se controla la cantidad de viento que impacta en ellas, lo cual afecta directamente la potencia generada. Este ajuste permite mantener el aerogenerador funcionando de manera eficiente en una amplia gama de velocidades del viento (He et al., 2022).

**Beneficios del Control de Pitch**

- **Optimización del Rendimiento:** Aumenta la eficiencia del aerogenerador ajustando la captura de energía según las condiciones del viento.
- **Protección del Aerogenerador:** Previene daños por sobrevelocidad y excesiva carga de viento.

- **Larga Vida Útil:** Reduce el desgaste de los componentes al evitar condiciones extremas.

### **Velocidad y energía del viento**

El aerogenerador convierte la energía cinética del viento en electricidad mediante un rotor con dos o más palas conectadas a un generador eléctrico. La turbina se instala en una torre alta para optimizar la captación de viento, y se utilizan múltiples turbinas para alcanzar la capacidad de generación deseada. La producción anual de energía depende de la velocidad y constancia del viento. Existen dos configuraciones principales para turbinas eólicas: eje horizontal y eje vertical, siendo la mayoría de las turbinas modernas de eje horizontal. A excepción del rotor, los componentes de las turbinas suelen ser similares, aunque varían en ubicación (Patel & Beik, 2021).

### **Relaciones De Velocidad Y Potencia**

La energía cinética del aire en movimiento puede ser aprovechada para generar electricidad mediante aerogeneradores. La energía cinética de una masa de aire  $m$  que se desplaza con una velocidad  $V$  se calcula con la fórmula:

$$\text{Energía cinética} = \frac{1}{2} mV^2 \quad (15)$$

La potencia del aire en movimiento, que es la tasa de flujo de esta energía cinética por segundo, se expresa en vatios como:

$$\text{Potencia} = \frac{1}{2} (\text{flujo masico por segundo})V^2 \quad (16)$$

El caudal volumétrico es el área barrida por las palas del rotor ( $m^2$ ) multiplicado por la velocidad del aire ( $\frac{m}{s}$ ) es  $A * V$ , el caudal másico del aire en kilogramos por segundo es  $\rho * A * V$ , por lo que la potencia mecánica que posee el viento está dada por la siguiente ecuación en vatios (W):

$$P = \frac{1}{2} \rho AV^3 \quad (17)$$

Donde:

$P$  = potencia del viento que circula por las palas del aerogenerador (vatios)

$\rho$  = densidad del aire ( $\frac{Kg}{m^3}$ )

$A$  = área barrida por las palas del aerogenerador ( $m^2$ )

$V$  = velocidad del viento ( $\frac{m}{s}$ )

### **Límite de Betz**

Permite calcular la máxima cantidad de potencia eólica que puede ser extraída por las palas del aerogenerador, este valor es del 59,3%, en sistemas reales el eje del aerogenerador acoplado a las palas no llega a un porcentaje tan alto de aprovechamiento ya que se debe considerar la eficiencia del conjunto buje-rotor que transmite la potencia mecánica al eje del generador eléctrico (Andrade et al., 2020).

### Tipo de turbina del emulador de aerogenerador a utilizar

- ✓ Aerogenerador de 1,15 m, 3 aspas con caja de engranajes y control de paso

### Datos del sitio propuesto para la practica

La simulación es de un aerogenerador de 1,15 m, 3 aspas con caja de engranajes y control de paso ubicado en el Villonaco (Provincia de Loja) y los datos de densidad del aire son obtenidos del MERRA-2 – oficina global de modelado y asimilación, de la administración nacional de aeronáutica y el espacio (NASA)

- ✓ Latitud: -4.00092
- ✓ Longitud: -79.25915
- ✓ Altitud: 2700 msnm.
- ✓ Densidad de aire anual promedio:  $0.971 \left(\frac{Kg}{m^3}\right)$

Debido a que el software permite la entrada de densidad del aire desde 1.12 a  $1.44 \left(\frac{Kg}{m^3}\right)$  es necesario ajustar la densidad al rango que nos permite el emulador, esto se hará basándonos en la ecuación (3) que indica una relación directamente proporcional entre la potencia del viento y la densidad del aire, para posteriormente aplicar este factor de corrección y encontrar la potencia eléctrica real del aerogenerador bajo esas condiciones. Por lo que, **para los cálculos de potencia a corregir:**

- ✓ Factor de conversión de densidad y por lo tanto potencia  $\left(\frac{real}{emulador}\right)$ : 0.867

### Estimación de la velocidad del viento en Software ENAIR Ryse Energy

Este software permite el cálculo de la velocidad del viento, distribución de Weibull y demás parámetros basándose en fuentes como el DTU, MERRA-2, VAISALA y BBDD de fuente propia, sin embargo se pueden tener para medias del viento con márgenes de error de hasta el 15% debido a la precisión de los datos y cálculos(Enair, 2024).

A continuación, se encuentran los parámetros y valores para la simulación de la producción eléctrica de un aerogenerador de 300 vatios del sitio Villonaco (Provincia de Loja):

**Tabla 36**

*Condiciones de viento del sitio Villonaco para simulación de la producción eólica de un aerogenerador de 300 vatios mediante dinamómetro de cuatro cuadrantes.*

Mes	Velocidad del Viento (m/s)	Densidad del aire (kg/m <sup>3</sup> ) *
enero-23	9.9	1.120
febrero-23	9.8	1.120
marzo-23	10.2	1.120
abril-23	11.4	1.120
mayo-23	12.8	1.120
junio-23	17.8	1.120
julio-23	18.8	1.120
agosto-23	17.9	1.120
septiembre-23	16.5	1.120
octubre-23	10.3	1.120

noviembre-23	7.5	1.120
diciembre-23	9.3	1.120

*Nota.* \*Ajustada para estar dentro del rango de densidad del aire del emulador

3. OBJETIVOS
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Evaluar la regulación de potencia mecánica entregada por un aerogenerador bajo una carga de 171 ohm haciendo uso del ángulo de paso del pitch control en 30 y 25° en función de condiciones meteorológicas reales del sitio Villonaco en la provincia de Loja proporcionadas en la fundamentación.</li> <li>• Calcular la potencia eléctrica producida por el aerogenerador para ángulos de paso del pitch control en 30° y 25 ° para los doce meses del año expuestos en la fundamentación.</li> </ul>

4. MATERIALES E INSUMOS
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes - LabVolt Serie 8960-32.</li> <li>✓ Software LVDAC-EMS función Emulador de Aerogenerador.</li> <li>✓ Fuente de alimentación 8821-22</li> <li>✓ Módulo de cargas resistivas 8311-02</li> <li>✓ Alternador sincrónico 8241-22</li> <li>✓ 2 multímetros</li> <li>✓ Cables tipo banana</li> </ul>

5. PROCEDIMIENTO		
N°	ACTIVIDADES	OBSERVACIONES
1	Colocar los módulos indicados en la caja porta módulos de LabVolt, el dinamómetro de cuatro cuadrantes debe colocarse en el medio, al lado derecho debe estar el alternador, del lado izquierdo la fuente de alimentación, adicional se agregará el módulo de cargas resistivas que se ubicará en la parte superior de la fuente de alimentación.	
2	Realizar la conexión en estrella en los bornes 4, 5 y 6 del alternador sincrónico, y conectar los bornes 7 y 8 a la fuente de alimentación en DC para la excitatriz	
3	Conectar en estrella el final de cada resistencia y seleccionar 171 ohm de carga por fase (paralelo entre resistencias de 1200, 600 y 300 ohm), para luego conectar los bornes 1,2 y 3 del alternador a cada una de las cargas resistivas	

3.1	Conectar en paralelo un multímetro en los bornes 1 y 2 del alternador sincrónico	Verificar que la medición sea en voltios AC
3.2	Colocar en serie un multímetro con el cable de alimentación que va del borne 1 del alternador sincrónico a la carga resistiva	Verificar que la medida este en corriente AC
4	Conectar el cable de adquisición de datos del dinamómetro hacia la PC	
5	Conectar la alimentación del dinamómetro, primero desde el módulo luego hacia el tomacorriente	Verificar que el tomacorriente tenga valores cercanos a 120 V
6	Se enciende el dinamómetro y se abre el software LVSIM desde la PC	Ingresa en la interfaz 120v y 60Hz
7	Colocar el switch en modo dinamómetro en el módulo para posterior escoger la función de aerogenerador turbina eólica en el software	
8	Revisar los parámetros correctos para el arranque; relación de polea 24:24; tipo de aerogenerador 1,15 m, 3 aspas con caja de engranajes y control de paso; densidad del aire 1.12 (kg/m <sup>3</sup> ); ángulo de control de paso según caso a analizar (30° o 25°)	
9	Abrir la tabla de datos en el software y en parámetros de registro marcar los parámetros de velocidad, par, potencia y velocidad del viento	
10	Colocar la velocidad de arranque en el valor de velocidad de viento del mes de enero, encender el circuito de excitación del generador y posteriormente la fuente de alimentación.	
11	Dar marcha al emulador, esperar que el sistema se estabilice un momento	
12	Registrar los valores de velocidad, par, potencia y velocidad del viento	
13	Registrar los valores de voltaje de línea y de corriente de fase visualizados en los multímetros	
14	Cambiar la velocidad a la del siguiente mes y repetir los pasos 12 y 13 nuevamente, repetir este paso hasta llegar a la velocidad de viento del mes de diciembre.	
15	Cambiar el ángulo de paso según el siguiente caso a analizar (30° o 25°) y repetir los pasos 10, 11, 12, 13 y 14.	
16	Se procede a detener el emulador con el botón de marcha/parada y con el apagado de los equipos, en primer lugar, la fuente de alimentación, segundo lugar el dinamómetro y por último se procede con la desconexión de los enchufes de cada módulo.	

## 6. CUADRO DE RESULTADOS

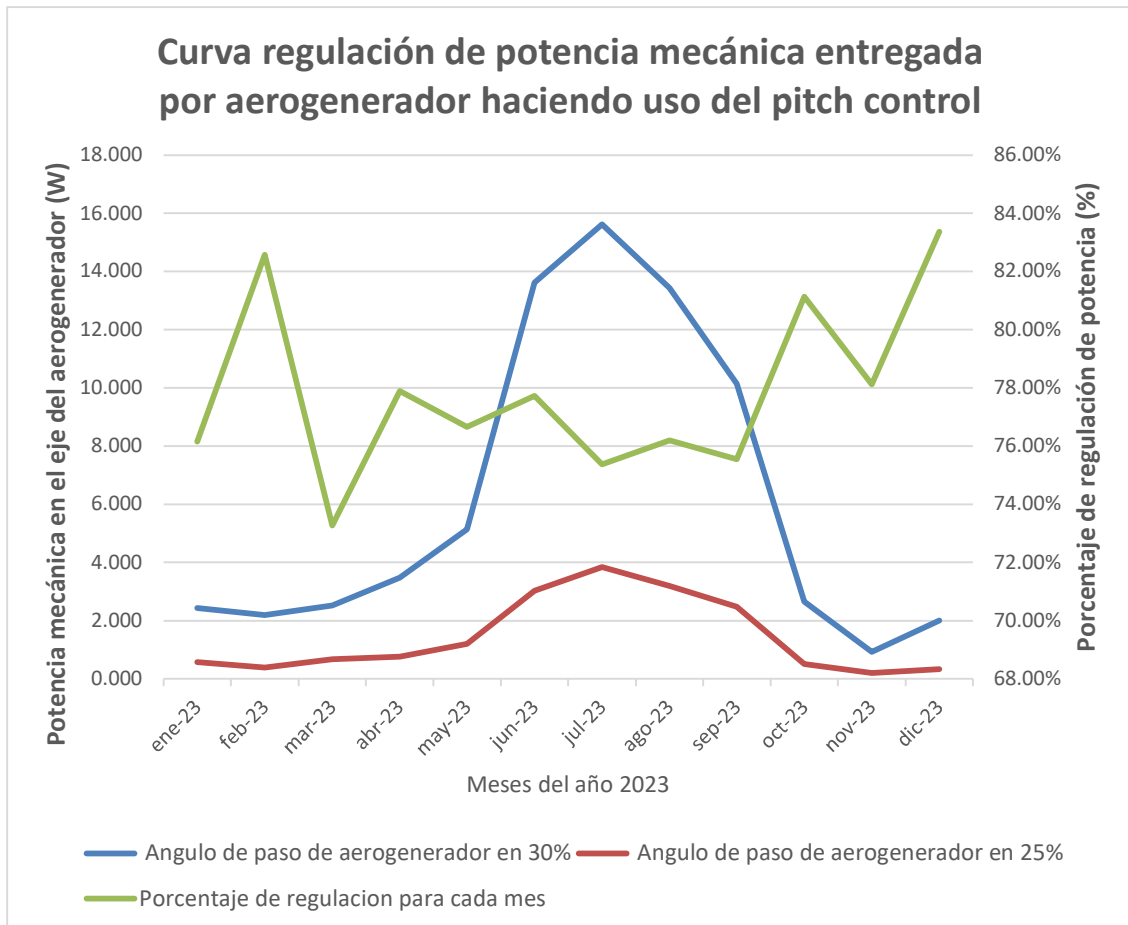
A continuación, se muestran los datos de producción eólica:

Producción de energía eléctrica con ángulo de paso de aerogenerador en 30%									
Meses	Velocidad del viento promedio	Velocidad de rotación del aerogenerador	Par en el rotor del aerogenerador	Potencia mecánica en el rotor del aerogenerador	Potencia mecánica corregida con factor	Voltaje de línea de la carga	Corriente de la carga	Potencia eléctrica trifásica	Potencia eléctrica corregida con factor
	m/s	r/min	(N.m)	W	W	V	A	W	W
ene-23	9.9	157	0.17	2.798	2.426	15.7	0.048	1.305	1.132
feb-23	9.8	155	0.156	2.526	2.190	15.8	0.047	1.286	1.115
mar-23	10.2	166	0.167	2.907	2.520	17.9	0.06	1.860	1.613
abr-23	11.4	200	0.191	4.004	3.471	24.5	0.078	3.310	2.870
may-23	12.8	241	0.235	5.931	5.142	27.6	0.089	4.255	3.689
jun-23	17.8	408	0.368	15.71	13.621	45.5	0.149	11.742	10.181
jul-23	18.8	443	0.388	18.01	15.615	49.6	0.162	13.917	12.066
ago-23	17.9	413	0.358	15.49	13.430	46.1	0.151	12.057	10.453
sep-23	16.5	359	0.311	11.7	10.144	40.7	0.133	9.376	8.129
oct-23	10.3	166	0.176	3.068	2.660	19.3	0.061	2.039	1.768
nov-23	7.5	100	0.103	1.074	0.931	15.1	0.049	1.282	1.111
dic-23	9.3	142	0.155	2.309	2.002	12.9	0.038	0.849	0.736

Producción de energía eléctrica con ángulo de paso de aerogenerador en 25%									
Meses	Velocidad del viento promedio	Velocidad de rotación del aerogenerador	Par en el rotor del aerogenerador	Potencia mecánica en el rotor del aerogenerador	Potencia mecánica corregida con factor	Voltaje de línea de la carga	Corriente de la carga	Potencia eléctrica trifásica	Potencia eléctrica corregida con factor
	m/s	r/min	(N.m)	W	W	V	A	W	W
ene-23	9.9	141	0.045	0.667	0.578	12.9	0.002	0.045	0.039
feb-23	9.8	118	0.036	0.44	0.381	14.6	0.003	0.076	0.066
mar-23	10.2	129	0.058	0.777	0.674	13.2	0.002	0.046	0.040
abr-23	11.4	160	0.053	0.885	0.767	17.2	0.006	0.179	0.155
may-23	12.8	198	0.067	1.385	1.201	25.7	0.01	0.445	0.386
jun-23	17.8	368	0.091	3.499	3.034	44.8	0.02	1.552	1.346
jul-23	18.8	419	0.101	4.436	3.846	49.3	0.023	1.964	1.703
ago-23	17.9	396	0.089	3.687	3.197	47.7	0.021	1.735	1.504
sep-23	16.5	339	0.081	2.861	2.480	41.6	0.018	1.297	1.124
oct-23	10.3	139	0.04	0.579	0.502	14.2	0.002	0.049	0.043
nov-23	7.5	71	0.032	0.235	0.204	10.2	0.002	0.035	0.031
dic-23	9.3	103	0.036	0.384	0.333	12.1	0.002	0.042	0.036

	Angulo de paso de aerogenerador en 30%	Angulo de paso de aerogenerador en 25%	
Meses	Potencia mecánica en eje	Potencia mecánica en eje	Porcentaje de regulación
	W	W	%
ene-23	2.426	0.578	76.16%
feb-23	2.190	0.381	82.58%
mar-23	2.520	0.674	73.27%
abr-23	3.471	0.767	77.90%
may-23	5.142	1.201	76.65%
jun-23	13.621	3.034	77.73%
jul-23	15.615	3.846	75.37%
ago-23	13.430	3.197	76.20%
sep-23	10.144	2.480	75.55%
oct-23	2.660	0.502	81.13%
nov-23	0.931	0.204	78.12%
dic-23	2.002	0.333	83.37%

A continuación, se muestran las gráficas de producción mecánica y regulación de potencia:



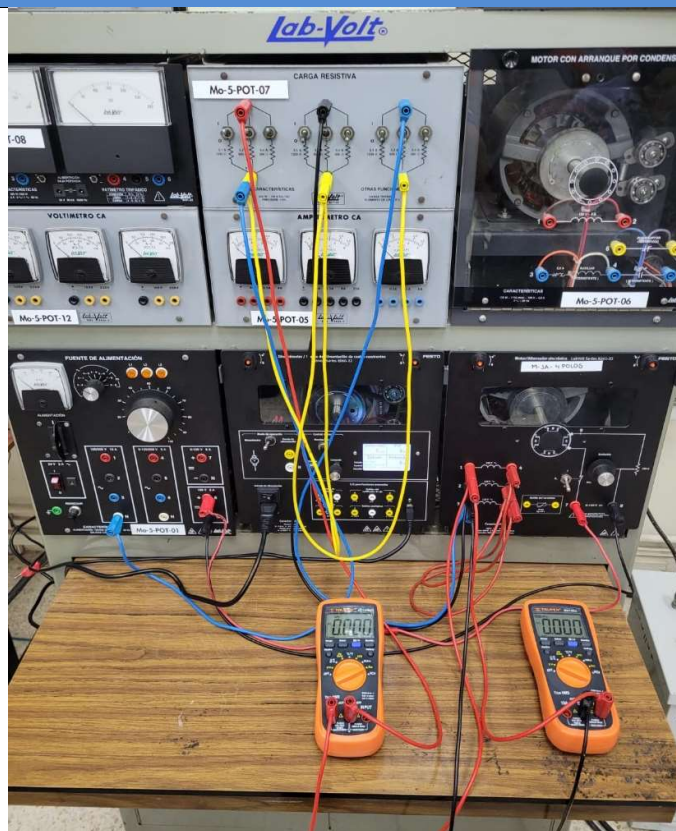
## 7. CONCLUSIONES

- ✓ Como conclusión, en base a la curva regulación de potencia mecánica entregada por el aerogenerador haciendo uso del pitch control, el porcentaje de regulación mayor de potencia mecánica si se aplica un ángulo de paso de 25° en las palas del aerogenerador es del 83.37%, la aplicación de este tipo de control es importante debido a que permite una regulación de la velocidad en las palas del aerogenerador, ya que, como se observó en las velocidades de rotación para ambos casos, estas disminuyen a medida que también lo hace el ángulo de paso de las palas del aerogenerador.
- ✓ El cálculo de la mayor potencia eléctrica generada por el aerogenerador para el caso del ángulo de paso de 30% fue de 12.066 vatios, mientras que para el ángulo de 25% fue de 1.7 vatios, esto supone una regulación de potencia eléctrica del 85.91%

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- Andrade, R. G., Ramírez, A. F., Reyes, A. M., & Tamez, M. (2020). Diseño de hélices de aerogenerador de bajas velocidades de viento. *Miscelánea Científica en México*, 625.
- Enair. (2024). *Estimacion de produccion eólica*. enair Ryse Energy.  
<https://www.enair.es/es/app>
- Manual de trabajo Introducción a la energía eólica FESTO didactic es 579354
- Patel, M. R., & Beik, O. (2021). *Wind and solar power systems: Design, analysis, and operation* (Third edition). CRC Press.
- San Miguel Alfaro, G., Regueiro Ferreira, R., Gómez Catasús, J., & Gomez Villarino, M. T. (2023). *Tecnología y sostenibilidad de la energía eólica. Preguntas y respuestas*. Ediciones Mundi-Prensa.

## 9. ANEXOS



Ubicación y conexión de módulos con equipos de medición para practica 7

Fecha de Elaboración: 18/07/2024

Elaborado por: Richard Vera Parrales, Leonardo Palma Rodríguez.

REVISADO POR:

FECHA: