



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD INGENIERÍA EN CIENCIAS
AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES

CARRERA DE INGENIERÍA EN ENERGÍAS
RENOVABLES

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

TEMA:

“CONSTRUCCIÓN DE UN MÓDULO PARA ESTUDIOS DE
ENERGÍA EÓLICA CON TECNOLOGÍA DE EJE VERTICAL
PARA EL LABORATORIO DE ENERGÍAS RENOVABLES”

Trabajo de titulación previo a la obtención del título en Ingeniería en
Energías Renovables

Línea de investigación: Biotecnología, energía y recursos naturales
renovables

AUTOR:

Kevin German Suárez Cadena

DIRECTOR

Paul Michael Tafur Escanta

Ibarra – Ecuador 2025



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

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

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

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

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1004914873		
APELLIDOS Y NOMBRES:	SUÁREZ CADENA KEVIN GERMAN		
DIRECCIÓN:	IBARRA		
EMAIL:	kgsuarezc@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:		TELF. MOVIL	0996390676

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	CONSTRUCCIÓN DE UN MÓDULO PARA ESTUDIOS DE ENERGÍA EÓLICA CON TECNOLOGÍA DE EJE VERTICAL PARA EL LABORATORIO DE ENERGÍAS RENOVABLES
AUTOR :	SUÁREZ CADENA KEVIN GERMAN
FECHA: AAAA/MM/DD	2025/11/25
SOLO PARA TRABAJOS DE TITULACIÓN	
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TITULO POR EL QUE OPTA:	INGENIERO EN ENERGÍAS RENOVABLES
DIRECTOR:	Paul Michael Tafur Escanta

2. CONSTANCIAS

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

Ibarra, a los 25 días del mes de noviembre de 2025

EL AUTOR:

(Firma).....
Nombre: Kevin German Suárez Cadena

CERTIFICACIÓN DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTERGRACIÓN CURRICULAR

Ibarra, 25 de noviembre de 2025

Ing. Paul Michael Tafur Escanta PhD.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

Haber revisado el presente informe final del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.

(f)
Paul Michael Tafur Escanta PhD.

C.C.: 1003867353

APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR

El Comité Calificador del Trabajo de Integración Curricular “CONSTRUCCIÓN DE UN MÓDULO PARA ESTUDIOS DE ENERGÍA EÓLICA CON TECNOLOGÍA DE EJE VERTICAL PARA EL LABORATORIO DE ENERGÍAS RENOVABLES” elaborado por SUÁREZ CADENA KEVIN GERMAN previo a la obtención del título de INGENIERO EN ENERGÍAS RENOVABLES aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte:

(f):.....
TUTOR: PhD. Paul Michael Tafur Escanta

C.C.: 1003867353

(f):.....
ASESOR: PhD. Daniel Sono Toledo

C.C.: 1714331913

(f):.....
BIOMETRISTA: PhD. Juan Carlos García

C.C.: 1002279535

DEDICATORIA

Quiero expresar mi más profunda dedicatoria a mi familia quienes me han apoyado y guiado cada día, convirtiéndose en un pilar fundamental durante el desarrollo de mi formación personal y profesional. Su fortaleza ha sido fundamental para poder superar los obstáculos y desafíos que se presentaron en mi camino.

A la Universidad Técnica del Norte, extendiendo un enorme agradecimiento por los conocimientos adquiridos durante los años de formación universitaria permitiéndome formar parte de su comunidad estudiantil y también me ayudó a crecer y desarrollarme como profesional.

Finalmente quiero agradecer a los docentes de la carrera de Ingeniería en Energías Renovables, especialmente a mi tutor: PhD. Paul Michael Tafur, quien con su paciencia y su valioso conocimiento ha sabido guiarme durante la elaboración del trabajo logrando concluirlo satisfactoriamente, su apoyo y virtud no se limitó solo a este proyecto, sino que también me brindó conocimientos valiosos en diversas materias en el transcurso de la carrera.

AGRADECIMIENTO

Expreso mi más sincero agradecimiento a mis padres y hermanos por los sacrificios que realizaron día tras día para enfrentar las adversidades que, en su momento, parecían insuperables, su amor incondicional y apoyo constante en los momentos más difíciles de mi vida han sido los pilares fundamentales durante el camino de mi desarrollo personal y académico.

Mis padres me han enseñado a valorar cada aspecto de la vida, desde las pequeñas cosas hasta los logros más grandes, su ejemplo de perseverancia, fortaleza y dedicación fue mi inspiración para esforzarme y superar cada obstáculo presentado durante mi camino, su sabiduría y cariño me han brindado la confianza necesaria para alcanzar mis metas y seguir adelante.

RESUMEN

Esta investigación tiene como objetivo diseñar e implementar un módulo didáctico para estudios de energía eólica basado en tecnología de eje vertical, destinado al Laboratorio de Energías Renovables de la Universidad Técnica del Norte. El módulo se centra en un túnel de viento construido para evaluar experimentalmente una turbina eólica Savonius de eje vertical. Se realizó el diseño del prototipo en el software SolidWorks para posteriormente ser fabricado mediante impresión 3D y finalmente se integra un sistema para la adquisición, procesamiento y análisis de datos en tiempo real. Para caracterizar el recurso eólico, se emplea la distribución de Weibull mediante tres enfoques de estimación más importantes: máxima verosimilitud, mínimos cuadrados y el método gráfico, estos procedimientos permiten determinar los parámetros de escala y forma necesarios para correlacionar las observaciones experimentales con las condiciones de velocidad de viento dentro del túnel. Con base en estas condiciones se evalúa el rendimiento del prototipo mediante la obtención curvas de potencia representativas y validando el diseño propuesto. Los resultados evidencian que el aerogenerador de eje vertical tipo Savonius, presentan un desempeño propicio en escenarios de baja velocidad de viento que los convierte en alternativas viables para entornos rurales con recurso eólico limitado. La implementación de este módulo va a fortalecer la formación académica y práctica de los estudiantes, consolidando al laboratorio como un espacio de experimentación en energías renovables.

Palabras clave: SolidWorks, Impresión 3D, Curvas de potencia, Distribución de Weibull, Túnel de viento, Flujo de viento, pruebas experimentales.

ABSTRACT

This research study aims to design and implement a didactic module focused on wind energy studies based on vertical axis technology intended for the Renewable Energies Laboratory at Universidad Tecnica del Norte university. The module involves a wind tunnel developed to experimentally evaluate a Savonius type vertical axis wind turbine. The design of the prototype was carried out by using SolidWorks software which was built later through the 3D printing and it also integrates a system to acquire, process, and analyze data in real time. To characterize the wind resource, the distribution of Weibull was used under three important approaches: maximum probability, least squares, and the graphic method. These procedures let to define the scale and shape parameters needed to relate experimental observations with the speed conditions of the wind into the tunnel. These conditions facilitate the evaluation of the prototype performance by getting representative power curves. The results of the research indicate that the vertical axis wind turbine Savonius type shows a proper development in low-speed sceneries which make them significant possibilities in rural contexts as limited wind resource. The implementation of this module will highly enhance the academic and practical training of the students, letting the laboratory be an academic environment for experimentation regarding renewable energies.

Keywords: SolidWorks, 3D Printing, Power Curves, Weibull Distribution, Wind Tunnel, Wind Flow, Experimental Tests.

ÍNDICE DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1.1 Problema de investigación	1
1.2 Justificación.....	2
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo General	3
1.3.2 Objetivos Específicos.....	3
1.4 Preguntas de Investigación.....	4
1.5 Hipótesis.....	4
CAPÍTULO II	5
MARCO TEÓRICO	5
2.1 Antecedentes	5
2.2 Base Conceptual.....	8
2.3 El viento como recurso.....	12
2.4 Tipos de Aerogeneradores.....	13
2.4.1 Eje Horizontal	14
2.4.1.1 Monopala.....	14
2.4.1.2 Bipala	14
2.4.1.3 Tripala	14
2.4.1.4 Multipala	15
2.4.2 Eje vertical	15
2.4.2.1 Darrieus.....	16

2.4.2.2	Darrieus Tipo H o Giromill	16
2.4.2.3	Windside.....	16
2.4.2.4	Savonius	16
2.5	Componentes de los aerogeneradores	17
2.5.1	Eje horizontal	17
2.5.1.1	Cono frontal	17
2.5.1.2	Hélices o palas.....	17
2.5.1.3	Buje	18
2.5.1.4	Carcasa	18
2.5.1.5	Generador.....	18
2.5.1.6	Torre	18
2.5.1.7	Sistema de regulación de potencia	18
2.5.2	Eje vertical	18
2.5.2.1	Rotor.....	18
2.5.2.2	Mástil.....	19
2.5.2.3	Anclaje	19
2.5.2.4	Multiplicador.....	19
2.5.2.5	Generador.....	19
2.6	Fundamentos para la Evaluación de la Velocidad de Viento	19
2.7	Bases Conceptuales para el Diseño de un Aerogenerador Savonius.....	22

2.8	Consideraciones Técnicas para la Construcción de un Aerogenerador Savonius	26
2.9	Consideraciones y Dimensionamiento de un Túnel de Viento	28
CAPÍTULO III		30
MATERIALES Y MÉTODOS		30
3.1	Área de estudio	30
3.2	Métodos Estadísticos	31
3.2.1	Distribución de Weibull	31
3.2.2	Distribución de Rayleigh	34
3.2.3	Cálculo de la Densidad del Aire	35
3.3	Diseño del Aerogenerador	35
3.3.1	Diseño de Álabes	38
3.3.2	Determinación del Espesor de Álabes y Tapas	39
3.3.3	Cálculo de la velocidad de rotación	40
3.3.4	Eje de rotación	40
3.3.5	Simulaciones en el software SolidWorks	40
3.4	Diseño del túnel de viento	41
3.4.1	Diseño de la cámara de pruebas	41
3.4.2	Diseño de la sección de contracción	42
3.4.3	Diseño del difusor	43
3.5	Selección de sensores	43
3.6	Procedimiento de adquisición	48

3.6.1	Calibración y validación	48
3.6.2	Diagramas Eléctricos	49
3.7	Software de programación y comunicación	50
CAPITULO IV.....		51
RESULTADOS Y DISCUSIONES.....		51
4.1.	Diseño y construcción de aerogenerador Savonius.....	51
4.2.	Diseño y construcción del Túnel de Viento	53
4.2.1.	Sección de la cámara de pruebas.....	53
4.2.2.	Sección de contracción.....	54
4.2.3.	Sección del difusor.....	55
4.3.	Fuente de simulación del viento.....	55
4.4.	Sistema de adquisición de datos.....	56
4.4.1.	Medición de la velocidad del viento	58
4.4.2.	Medición de las revoluciones del rotor	59
4.5.	Interfaz y aplicación para el monitoreo de los datos.....	59
4.5.1.	Desarrollo de la interfaz del encoder	60
4.5.2.	Desarrollo de la interfaz del anemómetro	62
4.6.	Análisis estadístico con distribución de Weibull.....	63
4.7.	Análisis e interpretación de las curvas del aerogenerador en función de la variación de la velocidad del viento	64
4.7.1.	Primer caso: Velocidad Baja	65
4.7.2.	Segundo caso: Velocidad Media	69

4.7.3.	Tercer caso: Velocidad Alta.....	74
4.8.	Monitoreo del encoder	81
4.8.1.	Caso 1: Velocidad de viento baja	82
4.8.2.	Caso 2: Velocidad de viento media	84
CAPITULO V		90
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		90
5.1.	Conclusiones	90
5.2.	Recomendaciones.....	91
BIBLIOGRAFÍA.....		93
ANEXOS.....		100

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Valores de la rugosidad del terreno.....	20
Tabla 2 Detalles técnicos del microcontrolador ESP32	44
Tabla 3 Detalles técnicos del Arduino UNO	45
Tabla 4 Detalles técnicos del Encoder Rotatorio.....	46
Tabla 5 Detalles técnicos del Anemómetro YF-WIND	47
Tabla 6 Dimensiones de los protoripos	53

INDICE DE FIGURAS

Figura 1	Atlas Eólico del Ecuador	7
Figura 2	Velocidades del viento	13
Figura 3	Tipos de aerogeneradores de eje horizontal.....	15
Figura 4	Tipos de aerogeneradores de eje vertical.....	17
Figura 5	Fuerzas aerodinámicas en un perfil alar	23
Figura 6	Ubicación de la Universidad Técnica del Norte	31
Figura 7	Coefficientes aerodinámicos.....	36
Figura 8	Fuerzas diferenciales de arrastre.....	37
Figura 9	Microcontrolador ESP32	44
Figura 10	Microcontrolador Arduino Uno	45
Figura 11	Encoder	46
Figura 12	Anemómetro YF-WIND Analógico	47
Figura 13	Diagrama de conexión del anemómetro	49
Figura 14	Diagrama de conexión del Encoder.....	49
Figura 15	Rotor Savonius diseño original.....	52
Figura 16	Rotor savonius diseño escalado	52
Figura 17	Cámara de pruebas.....	54
Figura 18	Sección de contracción	54
Figura 19	Sección del difusor	55

Figura 20	Fuente para simulación de viento	56
Figura 21	Montaje del Encoder.....	57
Figura 22	Interfaz del encoder	61
Figura 23	Interfaz del monitoreo del anemómetro.....	63
Figura 24	Distribución de Weibull vs Potencia.....	65
Figura 25	Factor de planta vs Potencia nominal	66
Figura 26	Potencia del rotor vs velocidad del viento.....	67
Figura 27	Variación de factores K para Weibull	67
Figura 28	Comparación de ajuste de Weibull por diferentes métodos.....	68
Figura 29	Linealización de la distribución de Weibull	69
Figura 30	Distribución de Weibull vs Potencia.....	70
Figura 31	Factor de planta vs Potencia nominal	71
Figura 32	Potencia del rotor vs velocidad del viento.....	72
Figura 33	Variación de factor k para Weibull	72
Figura 34	Comparación de ajuste de Weibull por diferentes métodos.....	73
Figura 35	Linealización de la distribución de Weibull	74
Figura 36	Distribución de Weibull vs Potencia.....	75
Figura 37	Factor de planta vs potencia nominal	76
Figura 38	Potencia del Aerogenerador vs velocidad del viento.....	77
Figura 39	Comparación con varios factores k	78
Figura 40	Comparación de ajuste de Weibull por diferentes métodos.....	79

Figura 41	Linealización de la distribución de Weibull	80
Figura 42	Visualización de los datos en tiempo real.....	82
Figura 43	Velocidad angular	83
Figura 44	Comparación potencia y torque	84
Figura 45	Visualización de los datos en tiempo real.....	85
Figura 46	Velocidad angular	86
Figura 47	Comparación potencia y torque	86
Figura 48	Visualización de los datos en tiempo real.....	88
Figura 49	Velocidad angular	89
Figura 50	Comparación entre potencia y torque.....	89

INTRODUCCIÓN

En este capítulo se detalla la problemática que fundamentan la investigación, así como la justificación y los objetivos específicos del estudio. Además, se presentan las preguntas directrices que orientan el desarrollo de la investigación, proporcionando un marco claro para el análisis y diseño del prototipo de aerogenerador Savonius.

1.1 Problema de investigación

Esta fuente energética surge particularmente como una opción limpia de alto potencial. Sin embargo, comprender sus fundamentos como la conversión de energía cinética del viento en mecánica mediante turbinas enfrenta obstáculos por la carencia de equipamiento adecuado (Guerra, 2024). Esto deriva en una formación predominantemente teórica que, pese a su valor, no logra traducirse en habilidades concretas demandadas en el campo laboral.

En Latinoamérica, la aceptación de modelos para desarrollar sistemas energéticos sostenibles y de bajas emisiones ha incrementado considerablemente enfocándose en la relevancia de la colaboración regional y aprovechamiento de diversas fuentes, su creciente necesidad de energía sustentable ha impulsado la adopción constante de estos modelos ante los desafíos del sector (OLADE, 2023).

Abordar estas limitaciones es trascendental, ya que se desarrollaron múltiples modelos vigentes para distintos contextos que podría restringir su precisión y utilidad al interpretar las complejidades específicas de los sistemas energéticos latinoamericanos. Por esta razón, tanto investigadores como especialistas están siempre mejorando estas herramientas para potenciar sus habilidades (Mendoza, 2024).

Para lograr una mayor eficiencia energética, es necesario optar por equipos y talleres que mejoren el rendimiento energético y generen ahorros económicos, que permite establecer políticas y objetivos dentro del Sistema de Gestión de Energía (SGE). Estas medidas son esenciales para las industrias manufactureras, especialmente en sus procesos productivos, debido a que impulsan el uso de fuentes de energía sostenibles (ICIPLAM, 2021).

La Carrera de Ingeniería en Energías Renovables no cuenta con laboratorio donde se pueda evidenciar el componente práctico y relacionarlo con el teórico. El presente trabajo tiene como finalidad incorporar un módulo de estudios con tecnología eólica de eje vertical para el laboratorio que ayudará a entender los fenómenos físicos, mecánicos y aerodinámicos que ocurren al influir una corriente de viento sobre palas mecánicas que giran sobre un mismo eje.

1.2 Justificación

La crisis climática y la inmediata necesidad de la transición hacia fuentes de energía más sostenibles y limpias sitúan al desarrollo de tecnologías innovadoras como una preferencia estratégica los aerogeneradores de eje vertical que son destacados por su eficiencia y versatilidad que tienen para aprovechar la energía cinética y representan una conmovición importante para la generación de energía limpia y sostenible, minimizando considerablemente el impacto ambiental asociado con la producción energética (González, 2024).

La aplicación de estas tecnologías de eje vertical en lugares urbanos y áreas con poco espacio, generan perspectivas para la generación descentralizada de energía fortaleciendo la seguridad energética e impulsando el crecimiento del sector laboral vinculado a las energías renovables y optimizaría los costos, aumentando la

eficiencia en la producción de energía y convirtiéndose más competitiva dentro del mercado energético global.

Además de su potencial, la escasez de dispositivos especializados dificulta la capacidad de realizar investigaciones prácticas en esta área aplicada resultando prioritario desarrollar un módulo de estudios mediante energía eólica con tecnología de eje vertical para el laboratorio de energías renovables. Este módulo permitirá validar el rendimiento y la factibilidad de esta tecnología para el laboratorio de energías renovables, además potenciar la formación académica y la investigación interdisciplinaria en el campo de las energías renovables.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Construir un módulo de estudio para energía eólica incorporando un aerogenerador de eje vertical tipo Savonius para el Laboratorio de la Carrera de Ingeniería en Energías Renovables de la Universidad Técnica del Norte.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Construir el prototipo del aerogenerador Savonius a escala con especificaciones técnicas que aseguren su eficiencia y funcionalidad para el laboratorio de Energías Renovables.
- Elaborar un túnel de viento que se adapte al aerogenerador Savonius para el laboratorio de Energías Renovables.
- Analizar la influencia de diferentes velocidades de viento en generación de las curvas de potencia del aerogenerador Savonius.

1.4 Preguntas de Investigación

¿Cuáles son las especificaciones técnicas de un aerogenerador que asegure eficiencia y funcionalidad?

¿En qué consiste el diseño del módulo de pruebas para la evaluación de velocidades de viento y su influencia en la potencia generada?

¿Cómo es el comportamiento de las curvas de potencia a diferentes velocidades del viento?

1.5 Hipótesis

Alternativa: Existe influencia de diferentes velocidades de viento en generación de las curvas de potencia del aerogenerador Savonius

Nula: No existe influencia de diferentes velocidades de viento en generación de las curvas de potencia del aerogenerador Savonius

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

En este apartado se encuentra la información de referencia sobre la evaluación de la velocidad del viento y sus patrones de variación, elementos de diseño y eficiencia del aerogenerador Savonius, además se tiene en cuenta los materiales y procesos de construcción recomendados para prototipos de turbinas eólicas de eje vertical.

2.1 Antecedentes

Aprovechar la energía del viento para generar trabajo no es un concepto nuevo, cuando los primeros navegantes utilizaron velas para cruzar mares hacia otros continentes, el viento ha sido una fuerza motriz esencial para el transporte. A lo largo de miles de años, el uso de velas fue predominante, especialmente en los barcos, hasta mediados del siglo XIX, cuando muchas naciones dependían del transporte marítimo a vela (Sanz, 2020). A pesar de que los primeros desarrollos en el uso de energía generada por el viento se concentraron en el mar, el aprovechamiento de esta fuente en tierra comenzó a cobrar relevancia con la evolución tecnológica, abriendo nuevas posibilidades, como las turbinas de eje horizontal y vertical. El uso del Molino se extendió por Inglaterra y acabó llegando al continente europeo en los años 1300 donde se observaron los primeros molinos de eje horizontal en países tales como España, Francia, Bélgica y Holanda, entre otros, a partir de esto los molinos más potentes y elaborados surgieron en los Países Bajos mejorando diseños tecnología y otras características lo hacían mejor (González, 2019). Luego de la Primera Guerra Mundial muchos avances de aeronáutica y aerodinámica se aplicaron al diseño de una turbina eólica mucho más económica a gasolina, sin embargo, algunos países no

disponían de esa tecnología. No obstante, a finales de este mismo año se establecieron que las turbinas de eólicas sean para familias agrícolas en cuanto a producción de electricidad (Pintado, 2021).

Las energías renovables se han considerado un pilar fundamental para promover la diversificación de la matriz energética a nivel mundial debido a su gran contribución en la mitigación del cambio climático (Villamizar et al., 2023). Este tipo de energía se destaca por ser la fuente renovable más prometedora, especialmente ante la creciente necesidad de implementar soluciones sostenibles para la generación de electricidad. Este estudio se basa en diseñar y construir un sistema para la investigación en energía eólica utilizando una tecnología de turbinas de eje vertical, que se ha considerado como una alternativa y además en los últimos años experimenta avances importantes. Desde la década de 1970, esta tecnología es objeto de interés para investigadores y diseñadores debido a su innovación y a su potencial como solución adecuada para aplicaciones en zonas urbanas y de pequeña escala (Herrera, 2024).

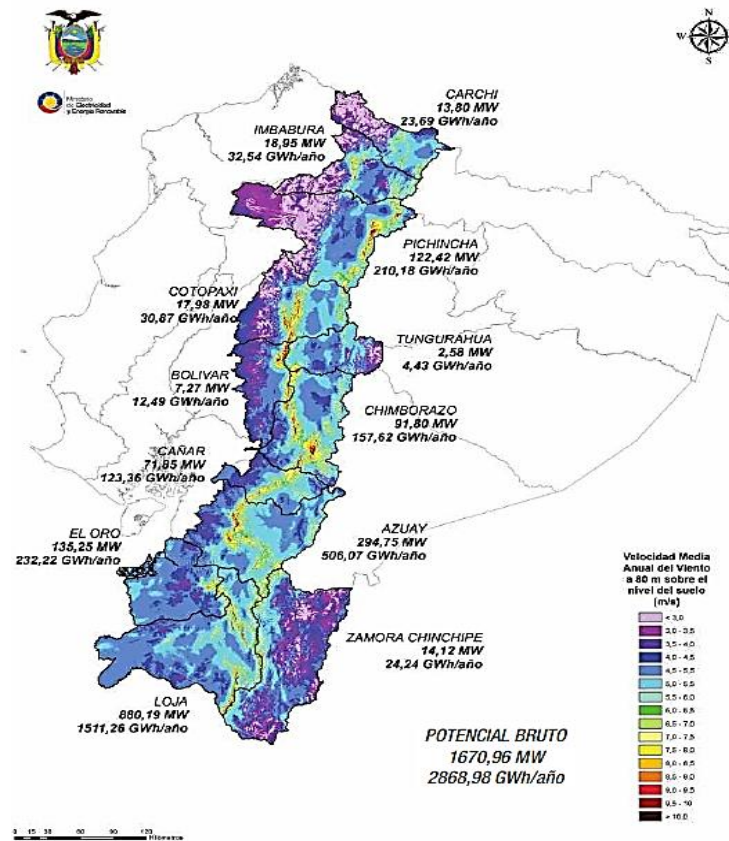
Según los datos globales de la capacidad instalada de energía eólica, en 2021 instalaron 837 GW en 31 países, generando aproximadamente 2186 TWh de electricidad y reduciendo 1311 Mt de CO₂ (REN21, 2023). Teniendo en cuenta las políticas actuales de contaminación cero, los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y el Tratado de París enfocado en solucionar el problema del cambio climático, se han centrado a la transformación de la matriz energética a nivel mundial contemplando la participación de todos los países, se espera que la energía eólica represente más del 30% de la generación eléctrica mundial a mediados del siglo XXI, que coincide con los mismos objetivos de muchos países de alcanzar el Net Zero.

Esto podría disminuir las emisiones de CO₂ hasta 14871 Mt para 2050 y 32864 Mt para 2100 (Akimoto et al., 2021). Además, el desplazamiento hacia el sur de la línea ecuatorial de los recursos eólicos a nivel mundial refuerza la confianza del desarrollo en este tipo de energía en países de baja latitud como Brasil, Vietnam y los de África Central (Long et al., 2023), sumándose a ellos, países como Ecuador.

El aumento de energía generada por el viento a nivel mundial y la necesidad para realizar la transición energética desde energías fósiles hasta energías renovables llevaron al Ecuador a desarrollar en el año 2013 un atlas eólico para identificar áreas con mayor potencial de energía eólica y estimar su capacidad para generar electricidad. El Plan Maestro de Electricidad del gobierno tiene como meta aumentar el uso de energías renovables, proyectando que para 2026 se generen 50 GWh mediante fuentes eólicas y solares. El potencial eólico factible a corto plazo para todo el país asciende a 884 MW. Las provincias identificadas con mayor potencial para generación eléctrica anual mediante energía eólica corresponden a Loja (520 MW), Pichincha (122 MW) y Azuay (101 MW) (Figura 1). Actualmente, Ecuador cuenta con 3 plantas generadoras de electricidad provenientes de energía eólica ubicadas en Loja y dos en las Islas Galápagos, en ejecución se encuentran los proyectos eólicos de Huaschacha con una capacidad de 50 MW el cual se encuentra en estado de construcción y el Villonaco II y III los cuales fueron adjudicados en el primer semestre del año 2021 (Mendoza et al., 2023).

Figura 1

Atlas Eólico del Ecuador



Nota: Potencial eólico en el Ecuador para implementar proyectos eólicos (Mendoza et al., 2023).

2.2 Base Conceptual

La importancia de evaluar la velocidad del viento para generación de electricidad a partir de recursos renovables y la estimación del potencial de energía del viento, como se indica en el estudio *Wind Energy Engineering: A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines* (2023) depende exactamente de las mediciones de velocidad del viento que son necesarias para la modelación estadística (Distribución de Weibull o Railegth) y el diseño de sistemas de energía eólica. En este sentido, el sistema SCADA para turbinas eólicas, que también proporciona la medición de la velocidad del viento, puede ser relevante para las prácticas de laboratorio que se evaluarán en este estudio (Jin et al., 2021).

Es imprescindible, con el propósito de diseñar y poner en funcionamiento las turbinas eólicas de forma eficiente, contar con dispositivos que permitan medir y recopilar datos con precisión, como lo hace el anemómetro. Un alto porcentaje de estudios enfocados en el anemómetro revelan que este desarrollo puede usarse para uso doméstico (Zheng et al., 2023).

Al investigar sobre la energía eólica, según Gaertner et al. (2020) respalda la implementación de estadística como la Distribución de Weibull y un promedio de la velocidad del viento, que son herramientas prácticas para estimar el potencial energético de un sitio dado. Una mejor planificación y estimación de la producción de energía es posible con tales modelos y, por lo tanto, se obtiene una visión económica confiable de los proyectos de energía eólica (García et al., 2024).

Para analizar el rendimiento del aerogenerador tipo Savonius de pequeña escala, se prestará atención a la recopilación de datos y las pruebas para evaluar su potencial de conversión de energía (Liew et al., 2020). La investigación de Delgado y Serna (2021) abarca el diseño y la prueba de la energía eólica, prototipos de pequeña escala de turbinas eólicas tipo Savonius, destinados a aumentar la eficiencia de conversión de energía a velocidades del viento inferiores a tres metros por segundo, que es común en Arequipa, Perú. La investigación lleva a cabo el diseño y la búsqueda de nuevas formas de palas de rotor de esta turbina, que ha sido mejorada desde la invención de Sigurd J. Savonius en 1924. Al utilizar herramientas de simulación CAD/CAE, se analizan una serie de elementos, incluida la disposición y forma de las palas, en relación con su eficiencia en una serie de parámetros clave como el rendimiento y el coeficiente de potencia (C_p) con el fin de aumentar la

captura de energía y diseñar un prototipo para una futura construcción capaz de cumplir con los niveles requeridos de eficiencia energética.

Los túneles de viento son fundamentales para analizar el rendimiento de las turbinas eólicas de eje vertical en condiciones de velocidades de viento bajas (Rajamohan et al., 2022). La cuidadosa elaboración de estos túneles resulta esencial para simular con exactitud condiciones reales, incorporando factores de escala, la distribución de presión y velocidad en el interior. Complementariamente, las técnicas dinámicas de fluidos computacional (CFD) se aplican sistemáticamente para optimizar el diseño y evaluación de distintas configuraciones en túneles de viento, permitiendo así realizar el análisis de comportamiento aerodinámico a diferentes velocidades (Zhang et al., 2021).

Estos recursos han permitido evaluar turbinas eólicas de eje vertical en una escala menor, simplificando el análisis de su aerodinámica y control (Bottasso & Campagnolo, 2022). Estas evaluaciones permiten entender el comportamiento de las turbinas y también ayudan a predecir la velocidad crítica de aleteo en las palas de los aerogeneradores grandes que es un parámetro fundamental para garantizar un diseño y operación segura (Li et al., 2023).

Los túneles de viento también han sido utilizados para investigar la interacción entre el viento y diversas aplicaciones, como los sistemas de recolección de energía eólica en túneles de metro. Estos estudios han demostrado que los túneles de viento son una herramienta invaluable para evaluar el rendimiento de los sistemas de energía eólica en una amplia gama de entornos y condiciones de viento (Raffaele et al., 2021).

Además, tienen una función esencial en la valoración del comportamiento aerodinámico de las turbinas eólicas en condiciones controladas, en el estudio de (Pöschke et al., 2022), se desarrollaron y validaron estrategias de control fundamentadas en desigualdades matriciales lineales (LMI) en un túnel de viento que simula diferentes flujos de entrada, este enfoque posibilita la evaluación del rendimiento de turbinas de velocidad variable con diversas configuraciones de paso y como resultados experimentales pusieron de relieve la capacidad del sistema para adaptarse de manera ágil a variaciones en las condiciones de entrada y satisfacer con requisitos de estabilización rápida de la red eléctrica, de esta manera, el túnel de viento actúa no solo como herramienta de prueba, sino también como una plataforma fundamental para la optimización de estrategias de control en escenarios dinámicos.

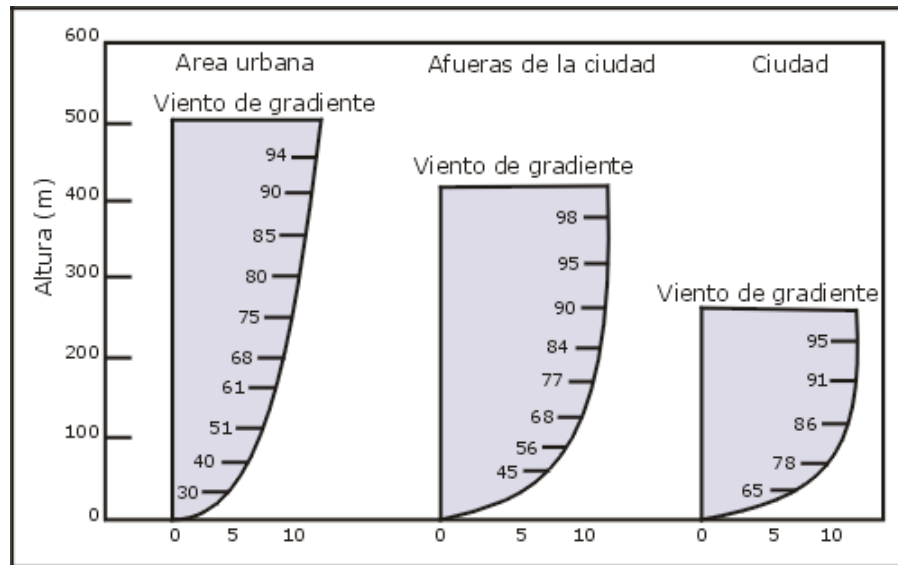
El diseño de túneles se enfoca en analizar la velocidad y el flujo del aire para emular situaciones reales, los túneles de baja velocidad se utilizan para estudios detallados, el número de Reynolds es fundamental para estudios de aerodinámica y acústica porque afecta la similitud dinámica entre un modelo y la escala real, para lograr esta similitud los túneles deben operar a velocidades controladas y uniformes, asegurando un flujo de calidad y validez en los datos. Además, deben manejar limitaciones de energía y espacio al optimizar el flujo uniforme y reducir la turbulencia para obtener resultados precisos, repetibles y confiables (Cattafesta et al., 2010).

Un túnel de viento recientemente desarrollado en el Laboratorio de Tribología y Dinámica de Sistemas (LTDS) ha sido diseñado para evaluar el desempeño de componentes de ventilación bajo distintas velocidades de viento, este túnel de viento de circuito abierto incorpora sensores avanzados y emplea tanto enfoques

experimentales como numéricos para caracterizar los flujos de aire en diversas ubicaciones, mediante pruebas con velocidades de viento de hasta 7 m/s y modelado en CFD (Dinámica de Fluidos Computacional), se logró identificar los modelos de turbulencia óptimos para representar la distribución de velocidades con una precisión del 95%. Estas herramientas permiten una evaluación exhaustiva de la dinámica del aire, la cual es crucial para aplicaciones como la mejora de la ventilación mecánica y la eficiencia energética en edificaciones (Mahiba et al., 2023).

2.3 El viento como recurso

El calentamiento desigual de la superficie provocado por la radiación solar es la principal causa de los vientos. La radiación solar se absorbe más en las regiones ecuatoriales que en las polares, el aire cálido que se eleva en los trópicos es reemplazado por una masa de aire fresco en la superficie proveniente de los polos además es importante indicar que la velocidad del viento varía según la altura y además depende de la naturaleza del terreno sobre la cual están presentes como se muestra en la Figura 2 (Rodríguez, 2021).

Figura 2*Velocidades del viento*

Nota: Variación del viento con respecto a la altura. Fuente: Rodriguez 2021.

El viento es una masa de aire que se encuentra en movimiento, si se considera esta corriente de aire como un caso de flujo incomprensible.

2.4 Tipos de Aerogeneradores

En la actualidad la preocupación más importante es por el calentamiento global causado por las actividades humanas entre la más principal es el contaminante resultado de la combustión de los combustibles con el fin de cubrir con el fin de reducir de forma parcial los índices de estos gases de efecto invernadero que se encuentran dentro de la atmósfera (Wu & Skye, 2021). Uno de los sistemas que más llama la atención son los que se basan en el uso de energía eólica el cual aprovecha la energía del viento para transformarla en energía mecánica y posteriormente convertirla a energía eléctrica para el sector tanto residencial. De acuerdo con el eje de rotación los sistemas de generación pueden ser de eje horizontal (HAWT) y de eje

vertical (VAWT), las de eje horizontal se utilizan en aplicaciones para la generación de alta potencia debido a que tienen mayor eficiencia en la conversión de energía , por otra parte las VAWT se utilizan en aplicaciones de mini-aerogeneradores porque no necesitan ser orientadas al viento predominante y su costo de instalación es mucho menor a las otras (Zhao et al., 2022).

2.4.1 Eje Horizontal

Las aeroturbinas de eje horizontal tienen la capacidad de autoarranque, así como también un mecanismo de orientación y prácticamente estos son altamente dependientes de la dirección del viento por esta razón son operados a alturas más altas que los de aerogeneradores de eje vertical ya mencionados.

Los aerogeneradores de eje horizontal se pueden clasificar en monopalas, bipalas, tripalas y multipalas como se observa en la Figura 2.

2.4.1.1 Monopala

Al tener una sola pala necesitan de un contrapeso, su velocidad de giro es muy elevada, esto genera un inconveniente introduciendo en el eje unos esfuerzos muy variables, causando un acortamiento de la vida de la instalación.

2.4.1.2 Bipala

Los diseños bipala consideran una ventaja de ahorro en cuanto a su costo y peso, pero una desventaja es que necesitan una velocidad de giro más alta para producir la misma cantidad de energía a comparación de otras tecnologías.

2.4.1.3 Tripala

Los aerogeneradores actuales son tripalas con el rotor a barlovento, usando motores eléctricos para los mecanismos de orientación. El motivo es la fricción con

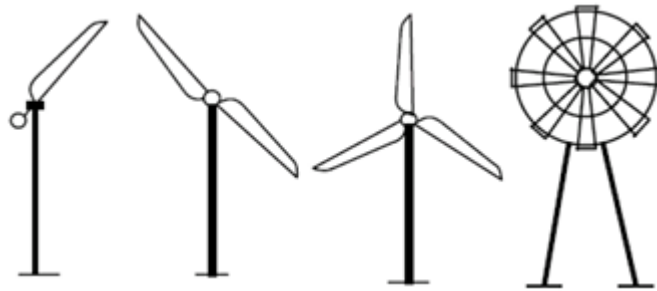
el aire, con tres palas es un 4% más eficiente que con dos y con 2 palas es un 10% más eficiente que con una.

2.4.1.4 Multipala

También conocido como el modelo americano, contiene multitud de palas, y sobre todo es utilizado para la extracción de agua en pozos y o son las más utilizados desde años atrás (Figura 3).

Figura 3

Tipos de aerogeneradores de eje horizontal



Nota: Aerogeneradores de eje horizontal monopalas, bipalas, tripalas y multipalas (Zhao et al., 2022).

2.4.2 Eje vertical

Este tipo de aerogeneradores presentan la ventaja que pueden operar a bajas velocidades y necesita estar orientado en dirección del viento permitiendo que su rotor se accione en cualquier dirección de viento como se observa en la Figura 3, una desventaja que presentan es su baja eficiencia en la conversión de energía (Quevedo, 2020).

2.4.2.1 Darrieus

Presentan dos o tres palas en forma de "C" que capturan el viento, este diseño permite velocidades muy altas en comparación a un rotor Savonius. Uno de los inconvenientes que presenta es que no se inician por sí mismos, por lo que requieren energía

2.4.2.2 Darrieus Tipo H o Giromill

Presentan un rotor que es impulsado por tres perfiles verticales con soportes horizontales, este diseño es bastante económico y en condiciones de viento de elevada turbulencia es bueno debido a que tienen perfiles verticales que cambian su orientación a medida que empieza a girar el rotor para aprovechar la fuerza que produce el viento.

2.4.2.3 Windside

Este posee una geometría alabeada con torsión. La principal diferencia con los otros tipos de eje vertical es el alto aprovechamiento aerodinámico, que se acerca a la eficacia de las turbinas de eje horizontal.

2.4.2.4 Savonius

Su estructura es un cilindro hueco cortado por la mitad, y con sus dos partes tiene forma de S; En su geometría, las partes cóncavas atrapan el viento, mientras que las partes convexas resisten un poco el viento, por lo que su sentido de giro depende de la geometría de menor resistencia (Figura 4). Este tipo de rotor se utiliza a bajas velocidades, ya que su diseño proporciona una excelente resistencia al aire.

Figura 4

Tipos de aerogeneradores de eje vertical



Nota: Aerogeneradores de eje vertical Darrius, Giromill, Windside y Savonius (Zhao et al., 2022).

2.5 Componentes de los aerogeneradores

2.5.1 Eje horizontal

2.5.1.1 Cono frontal

Su forma es cónica hecha de un material de baja resistencia y es un elemento esencial para direccionar el viento hacia las palas teniendo un mejor aprovechamiento del viento.

2.5.1.2 Hélices o palas

Estas están directamente en contacto con el viento que son la que captan la energía cinética del viento para transformarla en electricidad cada hélice tiene diferente forma de acuerdo con su necesidad y perfil aerodinámico, además son los elementos de mayor sobrecarga debido a la sollicitación por fatiga.

Estas deben estar equilibradas donde el centro de gravedad debe quedar en el centro de rotación del rotor que va alojado el eje.

2.5.1.3 Buje

Es el elemento que sujeta las hélices y conecta al eje principal transmitiendo la potencia que se extrae del viento.

2.5.1.4 Carcasa

Cubre y protege el generador y los demás componentes eléctricos de todos los factores atmosféricos.

2.5.1.5 Generador

Es el conjunto de elementos que producen la electricidad, el más utilizado en turbinas pequeñas es el de imanes permanentes el cual consiste en mover un imán sobre una bobina creando un campo magnético inducido.

2.5.1.6 Torre

La torre suele tener tres secciones, su altura varía, pero suele ser igual al diámetro del círculo que crean las aspas al girar a demás también contiene los cables de alimentación que conectan la góndola con el transformador en tierra.

2.5.1.7 Sistema de regulación de potencia

Evita que los vientos fuertes acaben destruyendo la turbina ya sea rompiendo las palas o quemando el generador provocado por las fuerzas que actúan sobre ellas a grandes velocidades o generando vibraciones.

2.5.2 Eje vertical

2.5.2.1 Rotor

Capta la energía cinética del viento convirtiéndola en mecánica para ser transmitida por medio del eje.

2.5.2.2 Mástil

Es encargado de soportar los esfuerzos estáticos producidos tanto por el peso del rotor como esfuerzos dinámicos producidos por la acción del viento.

2.5.2.3 Anclaje

Recibe los esfuerzos transmitidos por la estructura y garantiza la estabilidad.

2.5.2.4 Multiplicador

Ajusta la velocidad de rotación entre el eje de transmisión y el generador para así generar la energía necesaria a la velocidad determinada.

2.5.2.5 Generador

Convierte la energía mecánica en energía eléctrica.

2.6 Fundamentos para la Evaluación de la Velocidad de Viento

La velocidad del viento es un parámetro fundamental en el diseño de un aerogenerador, ya que influye directamente a la capacidad de generación de energía, en este caso se requiere utilizar los datos obtenidos del anemómetro. Estas mediciones reflejarán las condiciones reales del sitio de instalación en donde se verán reflejadas las fluctuaciones en la velocidad del viento en el transcurso del día, brindando un promedio que ayuda a caracterizar el recurso eólico que se calculará mediante la ecuación 1, la información recopilada será un factor crucial en el análisis energético, para garantizar que el diseño del aerogenerador se adapte a las condiciones del entorno (Ver Tabla 1).

$$v_2 = v_1 \times \left[\frac{\ln\left(\frac{h_2}{Z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_1}{Z_0}\right)} \right] \quad (1)$$

Donde:

v_1 : es la velocidad del viento a la altura h_1 (m/s)

v_2 : es la velocidad del viento a la altura h_2 (m/s)

h_1 : la altura 1 sobre el nivel del terreno (m)

h_2 : la altura 2 sobre el nivel del terreno (m)

Z_0 : rugosidad del terreno

La rugosidad del terreno se obtiene de la Tabla 1.

Tabla 1

Valores de la rugosidad del terreno

z_0 [m]	Características del terreno (uso del suelo)	Clasificación de la rugosidad
1	Ciudad	4 (1 m)
0,8	Bosques bajos	
0,5	Zona suburbana	3 (40 cm)
0,4	Línea de árboles de protección	
0,2	Grupo de árboles o arbustos	2 (10 cm)
0,1	Granjas cercanas	
0,05	Granjas lejanas	
0,03	Granjas con pocos árboles	1 (3 cm)
0,02	Aeropuertos con algunos edificios	
0,01	Pistas de aeropuertos	
0,008	Césped	
0,005	Suelo desnudo	
0,001	Nieve	

0,0003	Arena	
0,0002	Agua (utilizado en el Atlas)	0 (0,2 mm)
0,0001	Agua (lagos, mar abierto)	

Nota: Valores de referencia de rugosidad de acuerdo con el entorno y su clasificación (Miguel et al., 2021).

La potencia disponible en el viento hace referencia a la energía cinética total presente en el flujo de aire que atraviesa el área barrida por las aspas del aerogenerador. Esta potencia se calculará utilizando la siguiente ecuación 2:

$$P_d = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V_1^3 \quad (2)$$

Donde:

P : es la densidad del aire (kg/m^3)

A : es el área barrida por las aspas (m^2)

V : es la velocidad del viento (m/s)

Por otro lado, la potencia aprovechable es cantidad de energía eléctrica que se puede generar a partir del viento disponible (Rodríguez et al., 2024). Esta potencia depende básicamente de factores como la velocidad del viento, el área barrida por las aspas y el coeficiente de potencia (C_p) del aerogenerador. La potencia aprovechable se calculará mediante la ecuación 3:

$$P_a = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V_1^3 \cdot C_p \quad (3)$$

C_p es el coeficiente de potencia del aerogenerador limitado por el límite de Betz, que establece que el valor máximo teórico del C_p es de $16/27 \approx 0.593$ o 59.3%, para calcular el C_p real del aerogenerador se utilizará la ecuación 4.

$$C_{p, Real} = \frac{P_a}{P_d} \quad (4)$$

En la actualidad los valores reales de C_p oscilan entre 0.45 – 0.48 para tecnologías de eje vertical (Jemal et al., 2023).

2.7 Bases Conceptuales para el Diseño de un Aerogenerador Savonius

El diseño optimiza parámetros como el número de palas, la relación de aspecto de las alas ecuación 5, la relación de aspecto del rotor ecuación 6 que para los aerogeneradores de eje vertical están entre los rangos 1 a 2 y el área proyectada del rotor para aumentar la eficiencia. A través de un modelo de prueba en un túnel de viento, se intenta investigar el rendimiento del rotor y su potencial para la generación de energía en áreas urbanas, facilitando así la transición hacia fuentes de energía limpias y sostenibles (Humberto et al., 2023).

$$RAA = \frac{H}{c} \quad (5)$$

Donde:

H : es la altura de las aspas

c : es la cuerda de las aspas

$$RAR = \frac{H}{D} \quad (6)$$

Donde:

H : es la altura de la pala

D : es su ancho máximo

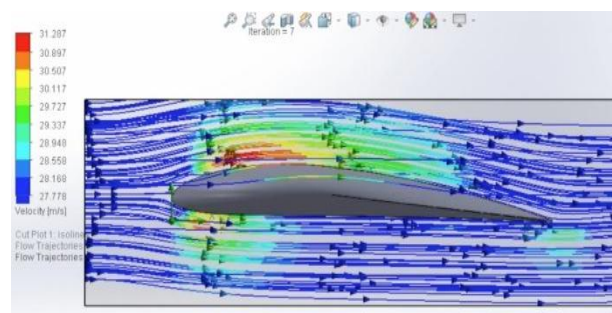
Las turbinas Savonius, que tienen un diseño simple y robusto, se consideran adecuadas para su aplicación a pequeña escala, aunque su eficiencia histórica ha sido pobre. Para mejorarla, se requiere la optimización del diseño y la selección de

materiales, ya que los materiales compuestos tienen una alta relación de rigidez a peso y el método de infusión al vacío ha demostrado ser una forma asequible de fabricar componentes del rotor. Este proceso mejora el control de las propiedades mecánicas, influyendo positivamente en la funcionalidad del sistema (Joseph y Gómez, 2022).

Por eso, el diseño y la simulación de estas turbinas se enfocan en realizar un ajuste fino de los parámetros de aspecto, el número de palas, módulos y configuración de tapa para asegurar la captura máxima de energía durante condiciones de baja velocidad del viento. Para esto, utilizando programas como ANSYS, se simulan los flujos de viento, se evalúan los contornos de presión y velocidad para fines de validación y también para predecir el rendimiento bajo diversas condiciones como se puede observar en la Figura 5 (Serrano, 2021).

Figura 5

Fuerzas aerodinámicas en un perfil alar



Nota: La imagen representa el flujo de viento en un perfil alar de un aerogenerador que es sometido a pruebas de presión, fuerza de arrastre y sustentación para asegurar su rendimiento (López, 2022).

Según el estudio de García (2021) este prototipo de aerogenerador Savonius que diseñó se ejecutó en pasos específicos que son diseño, fabricación, ensamblaje y

prueba en parámetros controlados, donde se llevó a cabo un diseño que incluía una serie de pruebas en lo cual se establecían las dimensiones de los álabes, el perfil y el complejo, la eficiencia energética y la complejidad de la estructura estaban en un equilibrio. Para el ensamblaje detallada en el laboratorio se debe comprobar la alineación y la resistencia de los componentes, después de lo cual tendría lugar la fase de evaluación. En la etapa experimental, para analizar el comportamiento del régimen de viento se extendió las pruebas en el ventilador de velocidad controlada para el estudio de los diferentes ángulos de posición rotativa y su efecto en el torque estático, revoluciones por minuto, capacidad de potencia (C_p) en función de la velocidad del viento.

Otro estudio de Cubas (2021) el análisis aerodinámico de turbinas eólicas de eje vertical, como el rotor Savonius, es fundamental para optimizar su rendimiento. Estas turbinas operan mediante el principio de arrastre, utilizando fuerzas aerodinámicas generadas por el viento sobre las aspas cóncavas y convexas. Para calcular la potencia disponible del viento se lo hace mediante la ecuación 7:

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_1^3 \quad (7)$$

En este estudio se empleó el software QBlade para analizar los coeficientes aerodinámicos de arrastre y sustentación de diferentes perfiles alares en función del número de Reynolds. Además, se utilizó la ecuación 8 para el coeficiente de potencia real del aerogenerador teniendo en cuenta que el C_p esta dado por el límite de Betz que establece que el valor máximo teórico del C_p es de $16/27 \approx 0.593$ o 59.3%, además el cálculo real debe ser menor a lo teórico debido a que estos aerogeneradores tienen un valor bajo.

$$C_p = \frac{P_T}{P_w} \quad (8)$$

Estos análisis permitieron identificar el diseño más eficiente para condiciones de viento promedio de 3.39 m/s, maximizando el rendimiento energético.

Según el estudio de Hernández (2021) nos encontramos ante el diseño y la materialización de elementos para impresión 3D. Gracias a la simulación, se pudo anticipar el comportamiento aerodinámico y estructural del prototipo, así como su fabricación y operación real, este desarrollo en su totalidad apunta a la creciente importancia de la ingeniería asistida por ordenador en la selección de materiales y procesos para lograr diseños viables para la aplicación práctica de sistemas de energía renovable a nivel doméstico y educativo.

En el estudio realizado por Peña et al. (2024), donde aprovechó las funcionalidades del software SolidWorks para modelar, simular y realizar un análisis estático y dinámico de dos configuraciones de aerogeneradores de eje vertical, el Modelo A y el Modelo B. A partir de las simulaciones se evaluaron los comportamientos mecánicos como deformaciones, desplazamientos y el rendimiento aerodinámico bajo condiciones reales simuladas de presión atmosférica y velocidad del viento. Los resultados de SolidWorks mostraron que el Modelo B presentó un 40.50% menos de deformación en relación con el Modelo A, relevando la superioridad desde los puntos de vista estructural y operativo. Además, mediante el uso del complemento FlowSimulation, se elaboró un túnel de viento virtual con la finalidad de estudiar la eficiencia aerodinámica de estos modelos reconstruidos, concluyendo al final que el Modelo B es más adecuado para regiones con viento moderado.

El análisis dado por Bacilo y Inuma (2020) está orientado al diseño y simulación de un prototipo de un generador eólico de eje vertical múltiple con el uso del software SolidWorks. El mismo pretende determinar la factibilidad de este generador para la producción de electricidad en el distrito de Usquil, en el País del Perú. En su metodología, los autores reunieron información sobre generadores eólicos y un factor climático de la zona entre los años 2017 y 2019. SolidWorks no solo fue empleado porque es uno del software que se puede usar en el diseño del prototipo, sino que también se utilizó en la manipulación de las variables del prototipo dado, lo que permitió una evaluación detallada de la eficiencia y optimización del prototipo. Los resultados logrados a través de las simulaciones en SolidWorks fueron complementados con el análisis estadístico (SPSS), lo que hizo posible resaltar la variación más efectiva del diseño.

2.8 Consideraciones Técnicas para la Construcción de un Aerogenerador

Savonius

La investigación de Perdomo y Palomino (2022) se enfoca en la concepción y diseño de un prototipo de generador eólico de baja tecnología que tiene como objetivo mejorar el acceso a la energía eléctrica en áreas rurales. Se utilizaron materiales de fácil obtención y bajo costo, como la resina epóxica, que aporta gran resistencia mecánica y térmica para el diseño del aerogenerador, este diseño incluye elementos esenciales como los álabes horizontales que son semicirculares para aprovechar mejor el viento y una combinación de Darrieus con Savonius. Este esquema no solo busca la eficiencia en el consumo energético, sino la sostenibilidad permitiendo que el prototipo produzca un mínimo de 3.0 kWh y un máximo de 5.2

kWh por día con miras a las necesidades básicas y lujosas de un hogar en zonas con limitada electrificación.

El estudio ejecutado por Moran (2023) procede a la especialización en el diseño y construcción del rotor de una turbina tipo Savonius, dando énfasis sobre todo a la generación de energía eólica de pequeña escala. En el rotor se usaron materiales compuestos que son resinas epóxicas y fibras de refuerzo que tienen una alta relación de rigidez a peso, crítica para los desarrollos de aerogeneradores. El proceso de fabricación incluyó el uso de la técnica de infusión al vacío en el que se hace el molde en una preforma y es infundido con resina para reforzar la integridad del rotor en la estructura. Este modo no solo trata de mejorar la eficiencia del funcionamiento de la turbina, sino también de facilitar la instalación y el mantenimiento de la turbina en un entorno urbano donde la turbina de eje vertical tiene ventajas particularmente.

En un estudio de Reinoso et al. (2024) el generador eólico Savonius es un tipo de turbina de eje vertical construida para utilizarse en velocidades de viento bajas, el principio de funcionamiento se basa en la diferencia del esfuerzo de arrastre o resistencia entre los álabes cóncavos y convexos de la turbina como elemento simple de regulación de velocidad. Investigaciones previas, como la que se realizó en Riobamba, comprueban que este diseño es adecuado para las áreas rurales y su potencial de aprovechar los limitados recursos son suficientemente amplios para cualquier región además destaca su rendimiento ubicado dentro de condiciones tales como la geometría del rotor, la velocidad del viento, la densidad del aire y, por lo tanto, se adapta a las condiciones climáticas del lugar en donde se encuentra en

operación con objeto de optimizar la conversión de energía cinética en energía eléctrica.

2.9 Consideraciones y Dimensionamiento de un Túnel de Viento

El diseño de los túneles de viento debe cumplir con ciertas simetrías, geometrías y patrones de flujo en su construcción para producir resultados más fiables y extrapolables. La relación de bloqueo (la relación de las áreas del área barrida del rotor con el área de la sección transversal del túnel) no puede exceder el 10% para que no haya interferencias en el flujo causadas por las paredes que se calcula mediante la ecuación 9. Si esta relación es demasiado alta, se emplean métodos de corrección como el método Glauert, que ajusta los valores de velocidad y fuerza medidos (ecuación 10). Los túneles deben ser capaces de cambiar el contorno de la entrada y establecer el nivel de turbulencia para la simulación del entorno real a fin de probar diseños de aerogeneradores (He et al., 2022).

$$V' = V \cdot (1 + \beta \cdot CT) \quad (9)$$

Donde:

V' : Velocidad corregida.

V : Velocidad medida.

β : Factor de corrección dependiendo de la geometría del túnel.

CT : Coeficiente de empuje.

$$\frac{V}{V'} = \left[1 - \frac{\tau\alpha}{2(1 + 2\tau)^{\frac{1}{2}}} \right]^{-1} \quad (10)$$

Donde:

α : Relación de áreas (área del rotor/área de la sección transversal del túnel).

τ : Coeficiente de empuje.

Un túnel de viento debe construirse con proporciones adecuadas para reducir los efectos de interferencia. Esto también significa que debe haber una distancia del modelo a las paredes de al menos 3 veces el radio del rotor. Algunas características necesarias son flujo uniforme, turbulencia controlada y compatibilidad con modelos a escala. En instalaciones subsónicas, las velocidades de entrada van de 1.5 m/s a 35 m/s dependiendo del experimento. En este caso se prefieren los túneles cerrados para disminuir las perturbaciones externas y maximizar las condiciones de prueba. La configuración es adecuada para estudios aerodinámicos de turbinas de eje vertical (Peng et al., 2022).

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

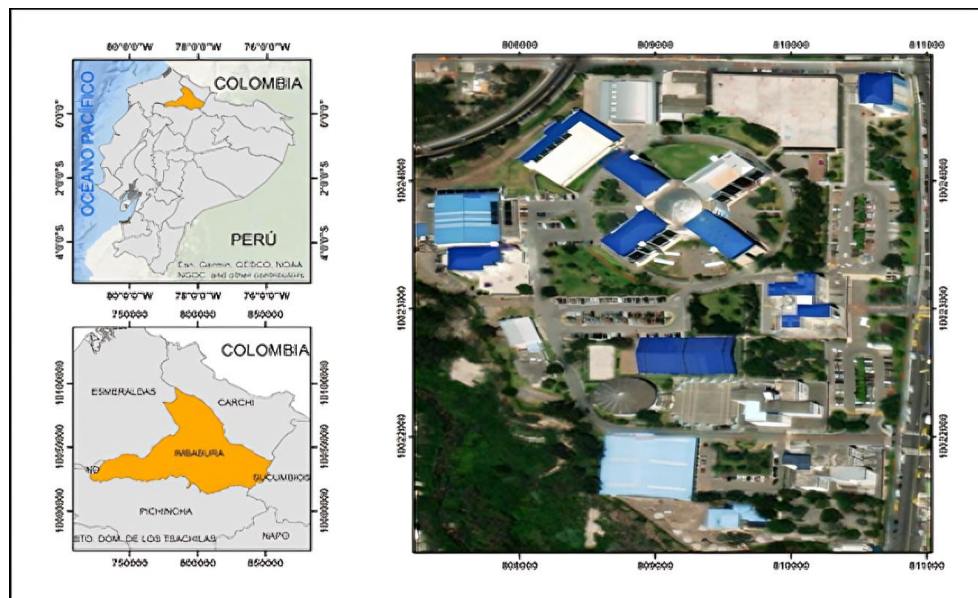
En este capítulo se detalla el área de estudio, enfoque, diseño y procedimientos empleados en la construcción del módulo eólico considerando factores climáticos en la localidad. El presente trabajo adopta un enfoque experimental de tipo aplicativo con un diseño descriptivo.

3.1 Área de estudio

El área de estudio se encuentra ubicada en la provincia de Imbabura, ciudad de Ibarra, dentro del campus El Olivo de la Universidad Técnica del Norte, en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería en Ciencias Agropecuarias y Ambientales (FICAYA). El Laboratorio de Energías Renovables se identificó como el sitio donde se instalará el proyecto eólico, considerando su acceso a una infraestructura adecuada y su propósito académico presentada en la Figura 6. En este espacio se evaluó el recurso eólico disponible y las mediciones de la velocidad del viento que ayudó para la estimación del recurso mediante un análisis estadístico.

Figura 6

Ubicación de la Universidad Técnica del Norte



Nota: Área de estudio, elaboración propia.

3.2 Métodos Estadísticos

3.2.1 Distribución de Weibull

Para la evaluación del recurso eólico se realizó mediante un anemómetro digital con un error de precisión del $\pm 5\%$, el mismo que fue utilizado para medir la velocidad del viento. Este instrumento permitió registrar datos con precisión garantizando una base de información confiable del sitio. Asimismo, se registró de manera continua durante cierto periodo de tiempo para garantizar que las mediciones reflejen tanto las variaciones diarias como las estacionales del viento.

Se utilizó el modelo estadístico de estimación de la función de densidad de probabilidad de Weibull como técnica de análisis de acuerdo con la ecuación 11, este modelo es uno de los más recomendados para el análisis del recurso eólico (Hoxha et al., 2018). Esta distribución se utilizó para caracterizar la velocidad del viento y su

comportamiento probabilístico, lo que fué fundamental para conocer el potencial energético del aerogenerador mediante dos funciones, la función de densidad de probabilidad (PDF) y la función de distribución acumulativa (CDF) como se muestra en la ecuación 12 y 13 (Mahmood et al., 2020).

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (11)$$

Donde:

k : corresponde al parámetro de forma

c : corresponde al parámetro de escala (m/s)

v : es la velocidad de viento para la matriz de frecuencias relativas.

La función de distribución acumulada de la velocidad (v) mostró la fracción de tiempo durante la cual la velocidad del viento será igual o menor que la velocidad. Por lo tanto, la función de distribución acumulada $f(v)$ se obtuvo integrando la función de densidad de probabilidad de Weibull y se da mediante las siguientes expresiones:

$$f(v) = \int_0^v \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} dv \quad (12)$$

$$f(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (13)$$

Para aplicaciones efectivas de la distribución de Weibull, la velocidad media del viento y la desviación estándar de los parámetros se calcularon utilizando los siguientes parámetros de las ecuaciones 14 y 15 (Teimourian et al., 2022):

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \quad (14)$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2} \quad (15)$$

Donde:

n : es el número de contenedores

σ : es la desviación estándar

v_i : es la i -ésima velocidad del viento

El parámetro de forma k es adimensional y se calcula mediante la ecuación

16:

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

Para este caso sigma (σ) es la desviación estándar obtenida mediante la gráfica de la velocidad en función al tiempo y \bar{v} es la velocidad promedio.

El factor c está relacionado de manera directa con la velocidad media y esta expresado en m/s se calcula con la siguiente ecuación 17:

$$c = \left(\frac{\bar{v}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)}\right) \quad (17)$$

Donde:

Γ : es la función Gamma de Euler

Esta es una función que extiende el concepto de factorial a los números complejos que aparece en varias funciones de distribución de probabilidad, si la parte

real del número complejo z es positivo entonces la integral se presenta en la ecuación 18:

$$\Gamma = \int_0^{\infty} t^{z-1} e^{-t} dt \quad (18)$$

Si n es un entero positivo, entonces:

$$\Gamma(n + 1) = n!$$

3.2.2 Distribución de Rayleigh

Según Serban et al. (2020) en el caso de que los datos recolectados sean más simples se consideró la pertinencia de utilizar la distribución de Rayleigh donde el factor $k = 2$ que es un caso particular de Weibull bajo determinadas condiciones.

En este caso el parámetro c se determinó de la siguiente ecuación 19:

$$c = \frac{2 \bar{v}}{\sqrt{\pi}} \quad (19)$$

La función de densidad de probabilidad (PDF) y la función de distribución acumulativa (CDF), se calcularon mediante las ecuaciones 20 y 21:

$$f(v) = \frac{\pi}{2} \frac{v}{e^{-2}} e^{-\left[\frac{\pi}{4} \left(\frac{v}{\bar{v}}\right)^2\right]} \quad (20)$$

$$f(v) = 1 - e^{-\left[\frac{\pi}{4} \left(\frac{v}{\bar{v}}\right)^2\right]} \quad (21)$$

El procesamiento y análisis de los datos se realizó utilizando el software Microsoft Office Excel 365, aprovechando sus herramientas para el cálculo de parámetros, generación de gráficos de distribución y ajuste de curvas, además, nos permite realizar validaciones y comparaciones de los modelos estadísticos, garantizando la precisión y fiabilidad de los resultados. El contenido del análisis estadístico se complementó con la elaboración de gráficos de frecuencia, ajuste de

parámetros y validación del modelo, que se las considera importantes en la toma de decisiones en el diseño.

3.2.3 Cálculo de la Densidad del Aire

Se calculó la densidad del viento a una altura de 2225 m.s.n.m. en la ciudad de Ibarra, tomando en cuenta la temperatura media de los últimos cuatro años debido a la variación del cambio climático que tiene una gran significancia dentro de este período por lo cual se optó por ese dato para una mayor precisión y exactitud dentro del cálculo matemático, para ello se utilizó la siguiente ecuación 22:

$$\rho = 1.225 \left(\frac{288}{T + 273.15} \right) e^{-\left(\frac{h}{8435}\right)} \quad (22)$$

$$\rho = 1.225 \left(\frac{288}{23 + 273.15} \right) e^{-\left(\frac{2225}{8435}\right)}$$

$$\rho = 0.915 \text{ kg/m}^3$$

Donde:

T : es la temperatura media del sitio (°C)

h : es la altura a la que se encuentra (m)

3.3 Diseño del Aerogenerador

Para el diseño del prototipo se empleó el uso del software SolidWorks Premium 2022 SP2.0 que permite modelar en tres dimensiones los componentes, realizar análisis estructurales y estudiar el comportamiento aerodinámico. Este proceso está constituido con la adquisición de parámetros primarios, que incluyen las dimensiones del rotor Savonius, las velocidades de operación y las cargas anticipadas, que servirán como puntos de partida para el modelado que se detallará en el siguiente capítulo. El funcionamiento del aerogenerador está basado mediante

la fuerza aerodinámica que ejerce el fluido sobre distintas superficies (Quiroz, 2023), la cual está representada mediante la ecuación 23:

$$F = C \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^2 \right) \quad (23)$$

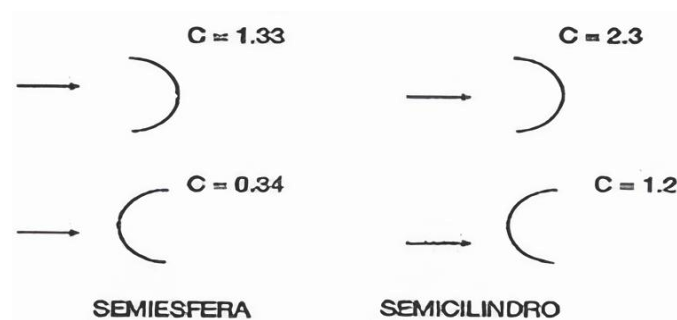
Donde

C : es el coeficiente aerodinámico que depende de la geometría del objeto

El aerogenerador tipo Savonius puede analizarse con superficies semiesféricas y semicilíndricas, los coeficientes aerodinámicos C para lados cóncavos y convexos de las superficies se establece mediante la Figura 7:

Figura 7

Coeficientes aerodinámicos

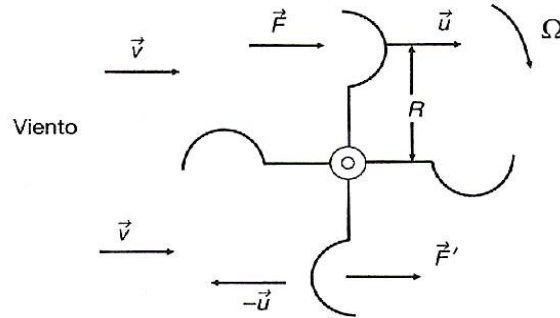


Nota: Valores de coeficiente de resistencia aerodinámico para semiesferas y semicilíndricas (Quiroz, 2023).

En consecuencia, sobre un rotor Savonius ejercen dos fuerzas con la misma dirección y sentido, pero con diferentes magnitudes como se muestra en la Figura 8 (Cogollo & Valderrama, 2019), una fuerza F sobre la parte cóncava representada mediante la ecuación 24 y una fuerza en la parte convexa representada con la ecuación 25:

Figura 8

Fuerzas diferenciales de arrastre



Nota: Acción del viento sobre un rotor de arrastre diferencial. Tomada de (Cogollo & Valderrama, 2019).

$$F = C \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot (v - u)^2 \quad (24)$$

$$F' = C' \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot (v + u)^2 \quad (25)$$

Donde u es la velocidad lineal en la punta de los álabes y v el coeficiente aerodinámico de resistencia se elegirá de acuerdo con la forma geométrica del álabe que se elaborará, esto nos permite obtener la potencia ejercida por el viento con la ecuación 26:

$$P = (F - F') u \quad (26)$$

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

La potencia se hace máxima cuando la velocidad lineal u se hace máxima, para encontrar un u_m derivamos la anterior ecuación con respecto a (u) e igualamos a cero teniendo como resultado la ecuación 27 (Mirzaei et al., 2023):

$$u_m = v \left(\frac{2a - \sqrt{4a^2 - 3b^3}}{3b} \right) \quad (27)$$

Donde:

$$a: C + C'$$

$$b: C - C'$$

La potencia máxima obtenida por un alabe se presenta con la ecuación 28:

$$P_m = \eta \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V_1^3 \right) \quad (28)$$

3.3.1 Diseño de Álabes

Para calcular el diámetro del aerogenerador se utilizó la relación de aspecto de la ecuación 6, en base a los rangos de esta relación se eligió 1.6 y la altura de 40 cm, se obtuvo como resultado un diámetro de 25 cm considerado óptimo y que se utilizó para el cálculo de los siguientes componentes.

El diseño de las aspas, que son el elemento principal encargado de obtener la energía del viento. Se optó realizar en una impresora 3D de marca Active X3PLUS y se utilizó un filamento PETG que es un material termoplástico que ayuda a tener una mejor resistencia en las piezas, facilitando la construcción debido a las formas geométricas típicas que presenta un rotor Savonius, que es un diseño que tiene perfiles en forma de arco para incrementar su interacción con el aire.

Para calcular el diámetro de cada álabe se ocupó la ecuación 29 y para calcular la longitud del arco de los álabes se utilizó la ecuación 30:

$$R_{\text{álabes}} = R_{\text{total}} - R_{\text{eje}} \quad (29)$$

$$R_{\text{álabes}} = 12,5 \text{ cm} - 1,25$$

$$R_{\text{álabes}} = 2,5 \text{ cm}$$

$$L = 2\pi R_{\text{álabes}} \times \frac{\theta}{360} \quad (30)$$

$$L = 2\pi(11,25 \text{ cm}) \times \frac{120}{360}$$

$$L = 23,56 \text{ cm}$$

3.3.2 *Determinación del Espesor de Álabes y Tapas*

Para determinar el espesor de los álabes se optó por criterios y referencias de estudios anteriormente realizados donde se evalúan diferentes configuraciones estructurales con énfasis en la aerodinámica. De acuerdo con la investigación realizada por (Pranta et al., 2021), los álabes construidos con un espesor igual al 5% del diámetro total del rotor proporcionan una buena relación entre rigidez estructural y eficiencia aerodinámica, especialmente en modelos a pequeña escala. Esta relación para los álabes fue aplicada en el diseño mediante la ecuación 31:

$$t = 0,05 \times D'_{\text{total}} \text{ cm} \quad (31)$$

$$t = 0,05 \times 25 \text{ cm}$$

$$t = 1,25 \text{ cm}$$

El diseño de las bases y tapas del aerogenerador debe garantizar estabilidad y alineación del eje. La base será resistente y firme fabricada en acrílico, con orificios para fijación y reducción de vibraciones. La tapa superior debe incluir un soporte para rodamiento que minimice la fricción, mientras que la tapa inferior debe sujetar firmemente, las dos tapas deben contar con alojamientos para rodamientos que aseguren la estabilidad del eje, el diseño será modular y desmontable para facilitar ensamblaje, mantenimiento y modificaciones. Para el cálculo del espesor de las tapas (superior e inferior) se definió como el 2.5% del diámetro total (ecuación 32):

$$t' = 0,025 \times D'_{total} \quad (32)$$

$$t' = 0,025 \times 25 \text{ cm}$$

$$t' = 0,625 \text{ cm}$$

3.3.3 Cálculo de la velocidad de rotación

Para el cálculo de la velocidad de rotación se utilizó la ecuación 33.

$$\lambda = \frac{2\pi * n * R}{60 * v} \quad (33)$$

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

3.3.4 Eje de rotación

Esta pieza es un perfil redondo que se encargó de transmitir el movimiento de los álabes mediante los rodamientos y a su vez está unido a la base y tapa de los álabes. El diseño del eje interno considera la estabilidad estructural, según estudios como el realizado por (Hand et al., 2021), destacan que un eje con un diámetro equivalente al 10–15% garantiza un equilibrio óptimo de los álabes entre la resistencia estructural y rendimiento mecánico en turbinas tipo Savonius, obteniendo así el siguiente cálculo (ecuación 34):

$$D' = 25 \text{ cm} \times 10\% \quad (34)$$

$$D' = 2,5 \text{ cm}$$

3.3.5 Simulaciones en el software SolidWorks

La simulación dentro del software SolidWorks se realizó para evaluar el desempeño y la funcionalidad del prototipo del aerogenerador Savonius permitiendo analizar aspectos como las fuerzas aerodinámicas y el comportamiento del flujo de

aire alrededor de los componentes, para la simulación aerodinámica se modeló un volumen de fluido alrededor del rotor que representó al sitio en condiciones reales configurando la velocidad y dirección de aire. Con el objetivo de obtener la trayectoria del flujo y el torque en el eje de la turbina a cierta velocidad y densidad del aire.

Se realizó un análisis estático para ver cuanta fuerza ejerce sobre el viento en los álabes del aerogenerador y se añadió el fluido en este caso el aire, luego se configuró en las condiciones iniciales que se estableció el eje de referencia para el flujo del viento, la densidad y velocidad que se definan.

3.4 Diseño del túnel de viento

El diseño del túnel se desarrolló mediante la investigación profunda sobre el tema de túnel de viento, el estudio de (Casa, 2023) fue fundamental para calcular las dimensiones del túnel y garantiza condiciones controladas y direccionamiento del flujo para las pruebas, además contempla parámetros fundamentales como la velocidad del flujo, la sección transversal de la cámara de pruebas y la uniformidad del perfil de viento que se consideró para el dimensionamiento de cada sección que facilitó el desarrollo de los planos empleando el uso del software Solidworks 2022 SP2.0.

3.4.1 Diseño de la cámara de pruebas

Con las medidas establecidas de la sección de la cámara de pruebas correspondientes altura 0,54 m, base 0,34 m y profundidad de 0,34 m se realizó el cálculo del área de la sección transversal (ecuación 35).

$$A = B * H \quad (35)$$

$$A = 0,34 \text{ m} * 0,54 \text{ m}$$

$$A = 0,18 \text{ m}$$

Para calcular el perímetro mojado se utilizó la ecuación 36:

$$Pm = 2B + 2H \quad (36)$$

$$Pm = 2(0,34)m + 2(0,54) \text{ m}$$

$$Pm = 1,76 \text{ m}$$

El diámetro hidráulico resulta la relación del área transversal y el perímetro mojado (ecuación 37).

$$Dh = \frac{4A}{Pm} \quad (37)$$

$$Dh = \frac{4(0,18 \text{ m})}{1,76 \text{ m}}$$

$$Dh = 0,41 \text{ m}$$

3.4.2 *Diseño de la sección de contracción*

Con las medidas obtenidas de la cámara de pruebas se calculó la sección de contracción (ecuación 38) que ayuda a estabilizar el flujo que ingresa gran turbulencia en la entrada y a su vez incrementa la velocidad para el ingreso a la cámara.

$$A_1 = \pi r^2 \quad (38)$$

$$A_1 = \pi(0,30)^2 m$$

$$A_1 = 0,29 \text{ m}^2$$

3.4.3 *Diseño del difusor*

Para el cálculo del difusor se optó por un coeficiente de 1 a 1.3 veces el área de entrada (ecuación 39).

$$A_3 = 1.1A \quad (39)$$

$$A_3 = 1.1m * 0.18 m$$

$$A_3 = 0,20 m^2$$

3.5 Selección de sensores

Para el estudio del comportamiento del aerogenerador Savonius a escala, se diseñó un sistema de monitoreo de potencia, utilizando un ventilador de 24 pulgadas como fuente de viento controlada en tres niveles de velocidad. El sistema fue acoplado al interior de la cámara de pruebas, donde se situó el prototipo del aerogenerador fabricado por impresión 3D.

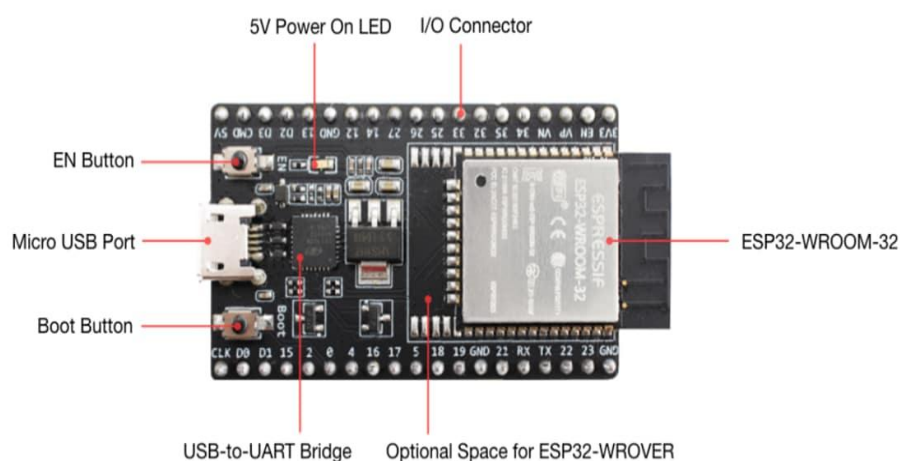
El eje del prototipo fue adaptado a un encoder rotatorio, esta señal fue captada mediante un microcontrolador, este dispositivo ayudó a calcular en tiempo real el número de revoluciones por minuto (RPM) que nos da el sensor para posteriormente ser utilizadas como variable referencial para validar el comportamiento del aerogenerador bajo distintas condiciones de flujo de aire. Los datos se presentaron en tiempo real mediante una interfaz gráfica local, y también se almacenaron para su posterior análisis comparativo entre las tres velocidades de prueba.

Para la caracterización aerodinámica del aerogenerador en túnel de viento, se implementó un sistema de adquisición de datos basado en los siguientes componentes:

Tabla 2*Detalles técnicos del microcontrolador ESP32*

Parámetros	Especificaciones
Dispositivo	Microcontrolador ESP32 (Espressif Systems)
Función	Unidad central de procesamiento y adquisición de señales
Interfaz	Comunicación serial vía USB con computador central
Procesador	Dual-core Xtensa LX6 a 240 MHz
Resolución ADC	12 bits ($3.3V / 4096 = 0.805 \text{ mV}$)
Memoria SRAM	520 KB
GPIO	34 pines programables
Protocolos	SPI, I ² C, UART

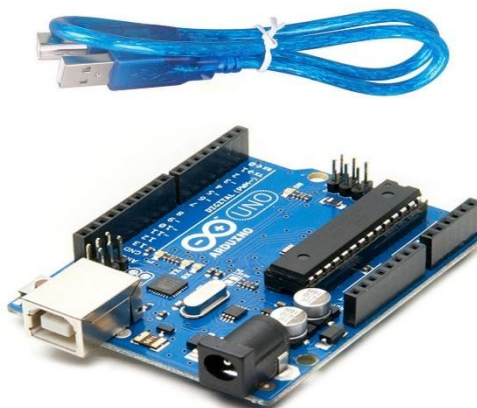
soportados

Figura 9*Microcontrolador ESP32*

Nota. Obtenido de (By ALLDATASHEETCOM, 2019)

Tabla 3*Detalles técnicos del Arduino UNO*

Parámetros	Especificación
Dispositivo	Microcontrolador Arduino Uno
Función	Adquisición auxiliar de variables complementarias
Microcontrolador	ATmega328P a 16 MHz
Resolución ADC	10 bits (rango 0-5V)
Memoria Flash	32 KB
Memoria SRAM	2 KB

Figura 10*Microcontrolador Arduino Uno*

Nota. Obtenido de (*A000066-Datasheet*, n.d.)

Tabla 4*Detalles técnicos del Encoder Rotatorio*

Parámetros	Especificaciones
Dispositivo	Encoder Rotatorio
Resolución	400 pulsos/revolución (PPR)
Señales de salida	Dos canales en cuadratura (A/B)
Implementación	Acoplado mecánicamente al eje del rotor
Lectura	Mediante interrupciones en pines GPIO del ESP32
Cálculo de RPM	Algoritmo en firmware con precisión de $\pm 0.5\%$

Figura 11*Encoder*

Nota. Obtenido de (*Photoelectric Incremental Rotary Encoder*, n.d.)

Tabla 5*Detalles técnicos del Anemómetro YF-WIND*

Parámetros	Especificaciones
Dispositivo	Anemómetro YF-WIND (Shenzhen Yifei Technology)
Principio de operación	Sensor analógico de efecto Hall
Salida analógica	0–1.2 V DC (lineal con velocidad)
Rango de medición	0.5–50 m/s
Sensibilidad	24 mV/(m/s) (validado en calibración previa)
Conexión de señal	Canal A0 del Arduino Uno
Voltaje de referencia	1.2 V (Filtro RC)
Resolución efectiva	$1.2 \text{ V} / 4096 \approx 0.293 \text{ mV} \rightarrow 0.012 \text{ m/s}$

Figura 12*Anemómetro YF-WIND Analógico*

Nota. Obtenido de (*Sensor de Velocidad Del Viento Salida*

Modbus_RS485_Analógico_0-5 V_4-20 MA, n.d.)

3.6 Procedimiento de adquisición

El anemómetro proporciona un voltaje analógico proporcional a la velocidad del viento adquirido por el Arduino Uno.

El encoder rotatorio se muestrea mediante interrupciones, calculando RPM mediante:

$$\text{RPM} = (\Delta \text{pulsos} \times 60) / (\text{PPR} \times \Delta t)$$

Los datos se transmiten vía USB-serial a 115200 baudios a un script Python (PySerial) que registra:

- Tiempo (ms)
- Voltaje anemómetro (V)
- Velocidad calculada (m/s)
- RPM del rotor
- Parámetros complementarios del Arduino

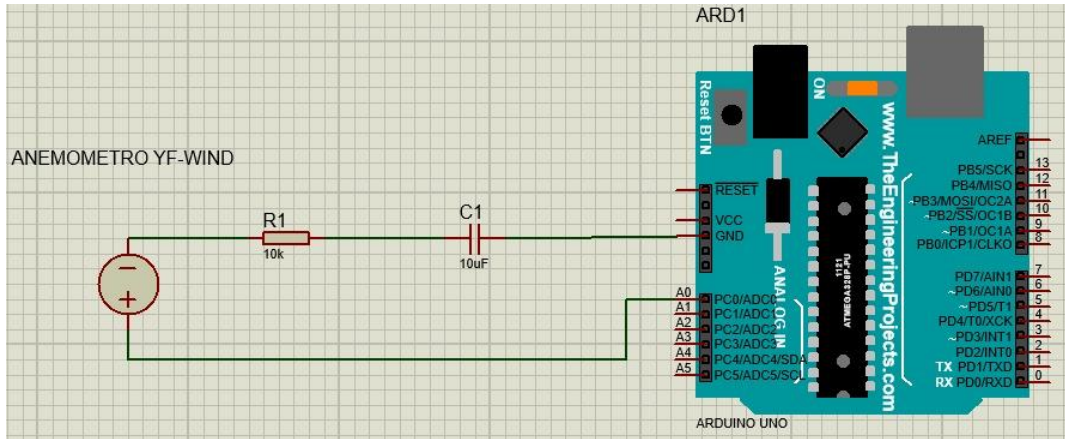
3.6.1 Calibración y validación

- El anemómetro se calibró frente a un anemómetro certificado (BT-100) en rango 2-25 m/s ($R^2=0.998$).
- El ADC del ESP32 se caracterizó con fuente de precisión (Fluke 5522A), mostrando error máximo $\pm 0.1\%$ FS.
- Sincronización temporal: Todos los sensores muestreados con timestamp interno (resolución 1 μs).

3.6.2 Diagramas Eléctricos

Figura 13

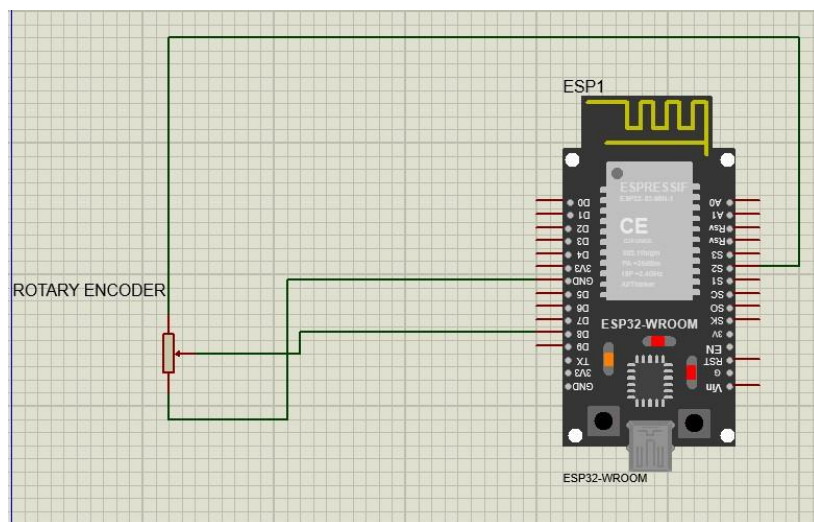
Diagrama de conexión del anemómetro



Nota. Elaboración propia

Figura 14

Diagrama de conexión del Encoder



Nota. Elaboración propia

3.7 Software de programación y comunicación

El sistema de software se estructuró en dos componentes principales: la programación en el microcontrolador ESP32 y la aplicación de escritorio desarrollada en Python. El flujo de datos inicia con la adquisición sincronizada de señales en el ESP32, que muestrea continuamente los sensores mediante pulsos que detecta el sensor. El anemómetro YF-WIND, cuya salida analógica (0-1.2 V) se conecta al A0 del microcontrolador Arduino pasando por un filtro RC que ayuda a eliminar el ruido de todo el circuito. Simultáneamente, las señales del encoder rotatorio se procesan mediante interrupciones contabilizando los pulsos para calcular la velocidad angular del rotor. El voltaje del anemómetro (precisión $\pm 10\%$) y RPM calculadas mediante la relación $RPM = (\text{pulsos} \times 60) / (\text{PPR} \times \Delta t)$. La información recolectada se estructura en un formato estandarizado que se transmite por comunicación serial (USB) a 115200 baudios, en el receptor un software desarrollado en el programa Python gestiona la conexión usando la librería PySerial, estableciendo un enlace con el puerto COM correspondiente y los datos se almacenan automáticamente en formato CSV para posteriormente ser analizados.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIONES

El siguiente capítulo detalla y analiza los resultados experimentales obtenidos en el proceso de la construcción y pruebas del aerogenerador tipo Savonius a escala y se presentan los datos experimentales obtenidos en el túnel de viento, incluyendo las RPM, el comportamiento del sistema bajo diferentes velocidades del viento y con ello la potencia generada por el prototipo. Además, se realiza un análisis de curvas de potencia del aerogenerador, el análisis estadístico de los datos que se obtienen mediante el anemómetro producidos por el ventilador que permite estudiar la distribución de Weibull y el rendimiento global del prototipo, que relaciona los resultados con estudios previos y los objetivos del proyecto.

4.1. Diseño y construcción de aerogenerador Savonius

Se completó con éxito el diseño y la construcción del prototipo del aerogenerador Savonius, con las siguientes dimensiones de 40 cm de alto y 25 cm de diámetro, este diseño fue elaborado mediante el software de modelado 3D SolidWorks y fabricado con tecnología de impresión 3D utilizando el filamento PETG, material seleccionado por su resistencia mecánica y facilidad de manufactura.

El aerogenerador se montó sobre un eje metálico, acoplado a un sistema de soporte con rodamientos para reducir la fricción y se integró un encoder rotativo en el eje del rotor, permitiendo la medición de las revoluciones por minuto (RPM) del sistema. El prototipo cumple con los requerimientos funcionales para estudios de laboratorio, permitiendo observar la respuesta dinámica del rotor ante distintas condiciones de flujo de aire.

Figura 15

Rotor Savonius diseño original



Nota. Sección de pruebas y montaje del prototipo.

Debido a limitaciones del flujo del viento con el espesor del prototipo se decidió escalar el diseño a un 80% del original (ver Tabla 6) para tener un mejor control y visualización del funcionamiento.

Figura 16

Rotor savonius diseño escalado



Nota. Diseño escalado a un 80 % del prototipo original.

Este escalado no afectó la geometría funcional del rotor original ni su desempeño, pero sí permitió un mejor acoplamiento para realizar las pruebas experimentales en el túnel de viento.

Tabla 6

Dimensiones de los prototipos

Parámetro	Dimensión original	Escalado 80%
Altura total	40 cm	32 cm
Diámetro del rotor	25 cm	20 cm
Ancho de pala	15 cm	12 cm

4.2. Diseño y construcción del Túnel de Viento

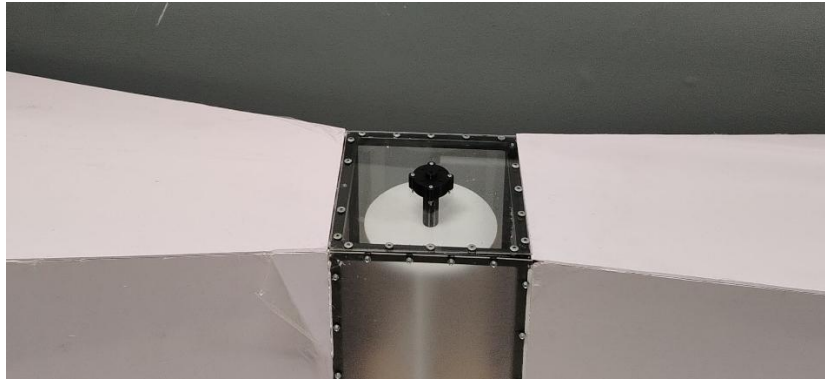
Se diseñó y ensambló un túnel de viento a escala de laboratorio que permite evaluar el rendimiento del aerogenerador Savonius en condiciones controladas.

4.2.1. Sección de la cámara de pruebas

El túnel consta de una cámara de pruebas de 50 cm de largo por 40 cm de ancho, dimensiones adecuadas para el alojamiento del prototipo sin interferencias laterales. Además, su cubierta se encuentra hecha con láminas de acrílico que permiten visualizar de forma correcta el funcionamiento y esta consta con una tapa superior para adaptar otros prototipos con diferentes medidas u formas para sus debidos estudios experimentales.

Figura 17

Cámara de pruebas



Nota. Sección de pruebas con montaje del prototipo.

4.2.2. Sección de contracción

Esta sección se diseñó a partir de las dimensiones ya establecidas a partir de la sección anterior y a la entrada con limitación a la fuente simulación de viento que es de 24”.

Figura 18

Sección de contracción



Nota. Diseño de la sección de contracción para el ingreso de aire.

4.2.3. *Sección del difusor*

La sección de salida es de menor área que ayuda a controlar el flujo turbulento del aire de salida después de pasar por el prototipo Savonius.

Figura 19

Sección del difusor



Nota. Salida del aire por medio del difusor controlando la turbulencia.

4.3. Fuente de simulación del viento

La fuente del flujo de aire está compuesta mediante un ventilador de 24 pulgadas con tres velocidades operativas que simulan diferentes condiciones de viento. El flujo se canaliza a través de una estructura de guía hecha de perfiles, Sintra y acrílico, diseñada para reducir turbulencias antes de llegar a la cámara de pruebas.

Figura 20

Fuente para simulación de viento



Nota. Ventilador de 24” para simular el flujo de aire y graficar las curvas de potencia.

4.4. Sistema de adquisición de datos

Para el monitoreo de los datos necesarios se desarrolló un sistema de adquisición de datos en dos partes: un microcontrolador Arduino que se encarga de leer las señales analógicas provenientes del anemómetro tipo YF-WIND, el cual entrega un voltaje proporcional a la velocidad del viento integrado un filtro RC para eliminar el ruido existente en el circuito, y un microcontrolador ESP32 captura las RPM del rotor a través del encoder.

Ambos microcontroladores están conectados a un computador mediante USB, permitiendo la transmisión de datos en tiempo real. Se ha elaborado una interfaz en Python (usando pyqt5, numpy, matplotlib, pyserial, scipy) que permite

visualizar los valores registrados, generar gráficas en tiempo real, y guardar los datos en formato CSV para su posterior análisis.

Figura 21

Montaje del Encoder



Detalles técnicos del código Arduino: configuración del ADC, cálculo de velocidad del viento en m/s a partir del voltaje:

```
const int ANEM_PIN = A0;
```

```
const int SAMPLES = 50;
```

```
const float VREF = 5.0;
```

```
const float MAX_EXPECTED_VOLTAGE = 0.1; // Máximo voltaje REAL esperado  
(0.1V)
```

```
// Parámetros CALIBRADOS (valores realistas)
```

```
float voltOffset = 0.0;
```

```

float windFactor = 250.0; // 1 m/s = 0.004V → 1/0.004 = 250

// Variables para control de tiempo

unsigned long previousSampleMillis = 0;

const long sampleInterval = 2000; // Intervalo de 2 segundos entre lecturas

unsigned long lastActivation = 0;

const long activationInterval = 300000; // 5 minutos en milisegundos

bool isActive = true;

Detalles del código ESP32: método de conteo de pulsos por revolución,
temporización, y cálculo de RPM.

float voltaje = analogRead(34) * 3.3 / 4095;

float velocidad = voltaje * factor; // Ajustar factor según calibración

Serial.println(velocidad);

```

4.4.1. Medición de la velocidad del viento

Se implementó un sensor anemométrico YF-WIND con salida analógica de dos cables, conectado al microcontrolador Arduino UNO. La señal pasa por un filtro RC ($R = 10 \text{ k}\Omega$, $C = 10 \text{ }\mu\text{F}$) ayudando a estabilizar la señal antes de ser leída por el pin A0 del Arduino, el voltaje analógico resultante fue calibrado para representar la velocidad del viento (m/s) conforme a la curva de respuesta del sensor.

Se implementó un circuito equivalente en Proteus usando un potenciómetro conectado al filtro RC y al pin A0, lo que permite variar manualmente el voltaje y observar la respuesta del sistema para simular distintos valores durante la fase de pruebas experimentales en el túnel de viento en el laboratorio.

4.4.2. Medición de las revoluciones del rotor

Para la medición de datos se utilizó un encoder rotativo industrial de modelo E38S6G5-600B-G24N, con 600 pulsos por revolución (PPR), conectado a un microcontrolador ESP32. Se estableció la conexión utilizando los pines:

- GND del encoder a GND del ESP32
- VCC (24V) del encoder (alimentado externamente, regulado si es necesario)
- Canales A y B a los pines GPIO5 y GPIO9 del ESP32, respectivamente.

Este sistema permite la lectura precisa de las RPM del rotor, a partir de la detección de los flancos de señal por interrupciones configuradas en el ESP32.

Ambos microcontroladores envían sus datos al computador a través del puerto serie, los cuales son capturados y procesados por una aplicación de escritorio desarrollada en Python con interfaz gráfica. Esta aplicación:

- Recibe datos en tiempo real desde Arduino (voltaje del anemómetro) y ESP32 (RPM del encoder).
- Transforma el voltaje en velocidad del viento mediante una función calibrada.
- Evalúa la velocidad angular, la potencia mecánica, y el coeficiente de potencia (C_p).
- Visualiza y guarda los datos capturados para realizar un análisis posterior.

4.5. Interfaz y aplicación para el monitoreo de los datos

Con la finalidad de visualizar y registrar los datos en tiempo real del comportamiento del aerogenerador Savonius y la potencia generada en función de la velocidad registrada por el anemómetro durante las pruebas experimentales, se

elaboró una interfaz gráfica para posteriormente desarrollar una aplicación complementaria que permita monitorear variables clave, analizar tendencias y guardar reportes para el análisis de datos y gráficas obtenidas.

4.5.1. Desarrollo de la interfaz del encoder

La interfaz fue diseñada en Python utilizando el paquete PyQt5 para la construcción de la GUI (interfaz gráfica de usuario), y Matplotlib para la generación de gráficos dinámicos. Se integró además la librería PySerial para la comunicación en tiempo real con el microcontrolador conectado al encoder y mediante otra interfaz conectada al anemómetro para una mejor facilidad de lectura de los puertos “COM”.

Las principales funcionalidades de la interfaz incluyen:

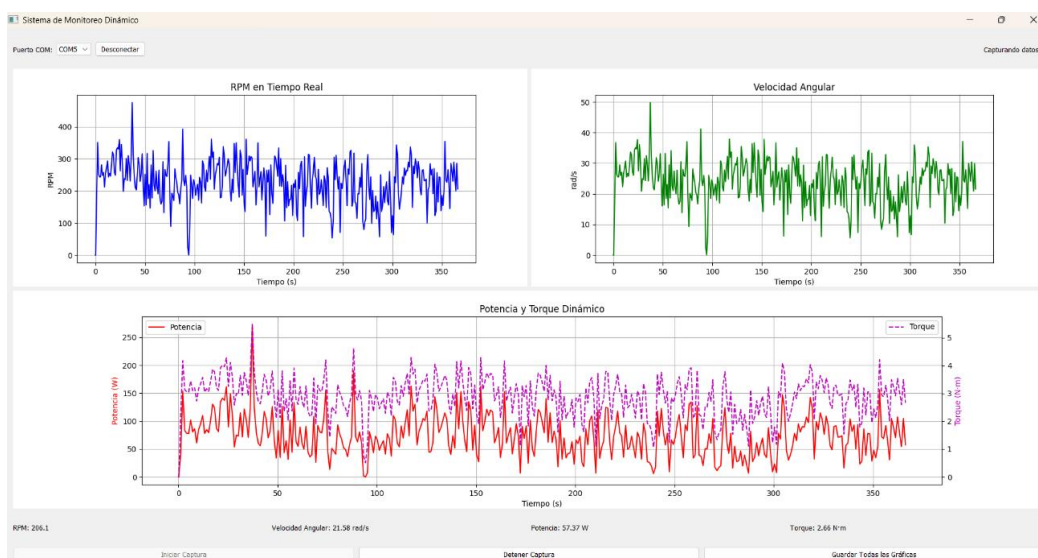
- Lectura en tiempo real de pulsos del encoder.
- Cálculo automático de RPM y velocidad angular.
- Estimación de potencia mecánica instantánea.
- Cálculo del coeficiente de potencia $C_p C_p$.
- Generación de gráficos en vivo:
 - RPM vs Tiempo
 - Potencia vs Tiempo
 - Curva de Potencia (Potencia vs Velocidad del viento)

Funcionalidades implementadas

Función	Descripción
Conexión serial	Detección y lectura automática desde puerto COM del microcontrolador.
Visualización en tiempo real	Muestra dinámica de RPM, ω .
Almacenamiento de datos	Exportación de los resultados en archivos CSV.
Botón de inicio/parada de lectura	Control de la adquisición de datos desde la GUI.
Sección de gráficos interactivos	Actualización en vivo de gráficos con opción de guardar como imagen.

Figura 22

Interfaz del encoder



4.5.2. *Desarrollo de la interfaz del anemómetro*

El anemómetro analógico de tipo cazoletas está conectado a un segundo microcontrolador (Arduino Uno) que transmite los datos de velocidad del viento a través de otro puerto serial hacia la computadora, el sistema convierte el voltaje del anemómetro en m/s y los envía a la interfaz de Python para su procesamiento y visualización en tiempo real y construcción de las gráficas correspondientes.

Principales funcionalidades del módulo de anemómetro:

- Lectura analógica de los datos en tiempo real desde el microcontrolador (Arduino Uno).
- Conversión automática de voltaje a velocidad del viento basada en una curva de calibración.
- Visualización de la velocidad en la interfaz del programa.
- Gráficas de análisis de Weibull, Frecuencia, etc.

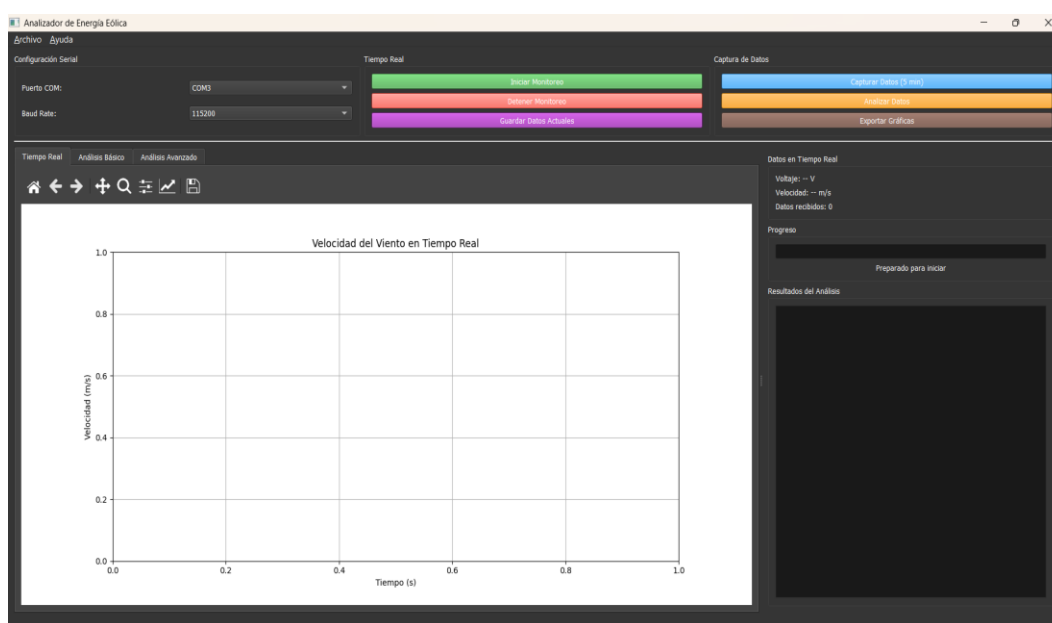
Funcionalidades implementadas en la interfaz:

Funcionalidad	Descripción
Lectura continua del ADC	El microcontrolador envía lecturas del voltaje en tiempo real por puerto serial.
Visualización numérica	Se muestra la velocidad del viento actual en la ventana principal.
Gráfica dinámica del viento	Se genera una curva de velocidad del viento vs tiempo.

Funcionalidad	Descripción
Exportación de datos	Permite guardar las lecturas de los datos de velocidad del viento en archivo CSV.

Figura 23

Interfaz del monitoreo del anemómetro



4.6. Análisis estadístico con distribución de Weibull

Para cumplir con el tercer objetivo específico, se ha estructurado el análisis estadístico en función de la distribución de Weibull, con el fin de representar la variabilidad del viento simulado en el túnel y analizar su impacto en el rendimiento del aerogenerador Savonius. Para ello, se tomarán registros cada segundo, filtrando solo los datos a partir del momento en que el anemómetro registre una velocidad distinta de cero (es decir, cuando el flujo de aire es suficiente para activar el sistema).

En 5 minutos de prueba se recolectó aproximadamente 150 datos por velocidad, y en 10 minutos unos 300 datos, lo cual proporciona una base suficiente para ajustar curvas estadísticas y generar histogramas de frecuencia.

Se han preparado las plantillas de cálculo necesarias para:

- Estimar los parámetros estadísticos de Weibull a partir de las velocidades medidas.
- Asociar dichas velocidades con las revoluciones del rotor para generar las curvas de potencia.
- Evaluar la eficiencia del aerogenerador a través de la relación entre potencia capturada y potencia disponible en el viento.

4.7. Análisis e interpretación de las curvas del aerogenerador en función de la variación de la velocidad del viento

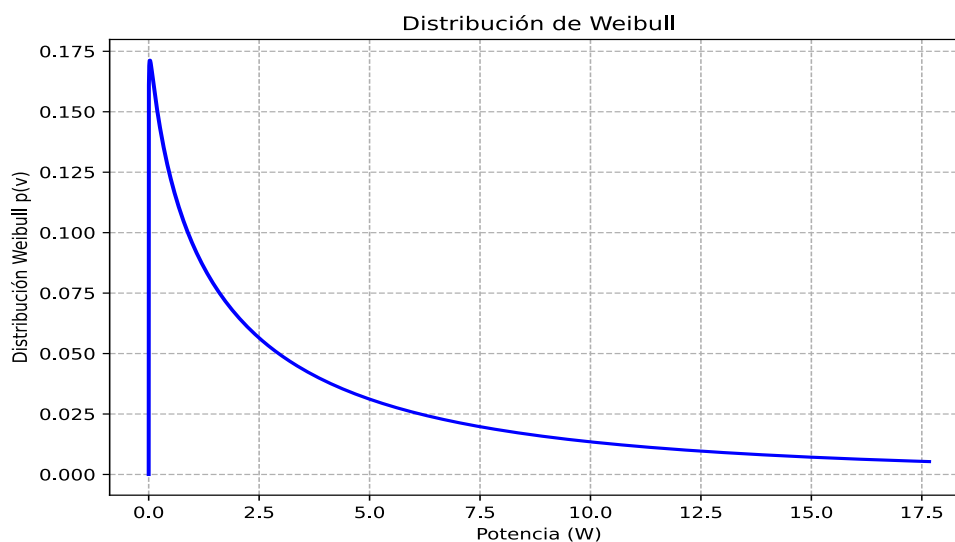
En esta sección se presentan los resultados obtenidos del aerogenerador Savonius operando bajo condiciones de viento a baja velocidad. Se analizan seis gráficas representativas que describen la distribución de Weibull, el rendimiento del aerogenerador, potencia del aerogenerador, comparación de diferentes factores k , análisis de máxima verosimilitud (LME), mínimos cuadrados (LSQ) y el método gráfico para ajuste de Weibull. Las 3 gráficas comportamiento del sistema en términos de velocidad angular, RPM, potencia generada, torque y eficiencia se generan en cada compilación de datos. Cada una de estas gráficas permite interpretar el rendimiento del rotor en este régimen, proporcionando una base para comparaciones posteriores con otras velocidades de operación.

4.7.1. Primer caso: Velocidad Baja

En este primer caso se analiza el comportamiento del aerogenerador Savonius cuando es sometido a una velocidad baja del viento (2 - 4 m/s) dentro del túnel de viento, esta condición permite observar el arranque del rotor, su capacidad de respuesta a flujos suaves y la generación inicial de potencia. Se presentan las gráficas correspondientes a las variables establecidas que permite evaluar el rendimiento del sistema en condiciones de mínima exigencia aerodinámica siendo este caso fundamental para determinar el umbral de funcionamiento eficiente del aerogenerador.

Figura 24

Distribución de Weibull vs Potencia

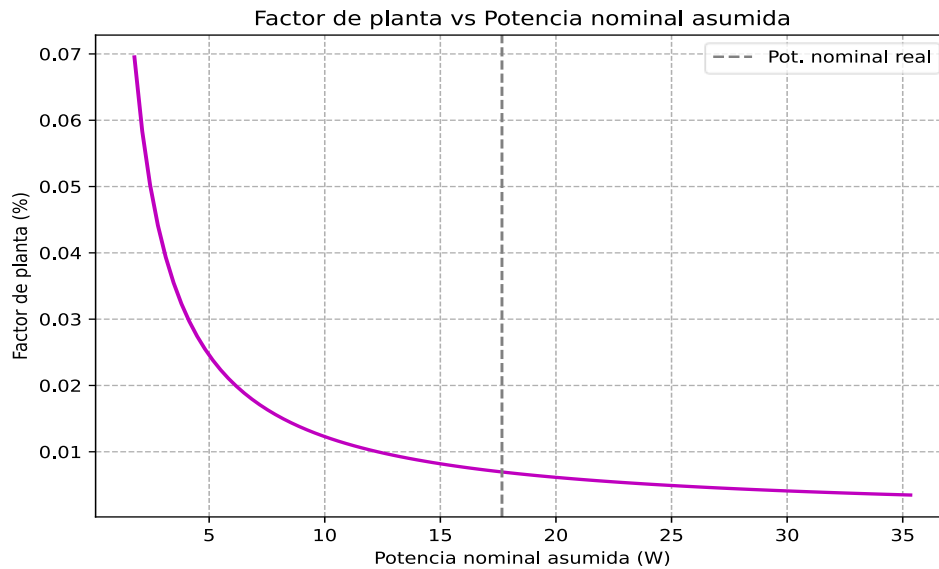


La Figura 24 ilustra la distribución Weibull aplicada a valores de potencia eléctrica en vatios (W), la curva inicia suave cerca de cero alcanzando su pico máximo aproximadamente hacia los cinco vatios, luego desciende gradualmente conforme aumenta la potencia revelando de esta forma cómo se concentran los valores más probables en el rango medio mientras que los extremos altos resultan menos

frecuentes y el modelo captura esa asimetría típica donde la cola derecha se extiende indicando presencia ocasional de potencias elevadas pero no muy comunes.

Figura 25

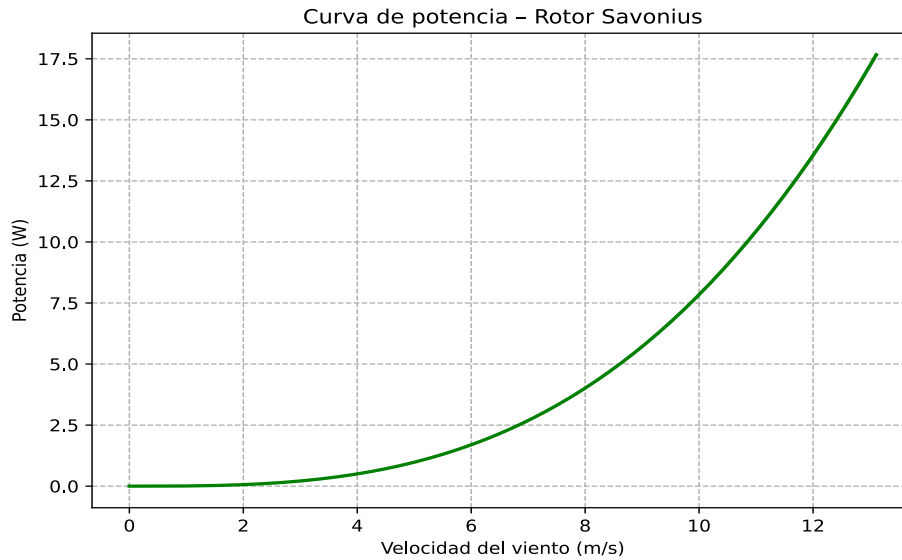
Factor de planta vs Potencia nominal



La Figura 25 muestra que, al aumentar la potencia nominal asumida, el factor de planta disminuye de forma exponencial. Esto indica si se sobreestima la potencia del aerogenerador en relación con el recurso eólico disponible, su rendimiento será bajo. Se destaca el valor real de potencia nominal, evidenciando un punto de referencia importante para el análisis de eficiencia.

Figura 26

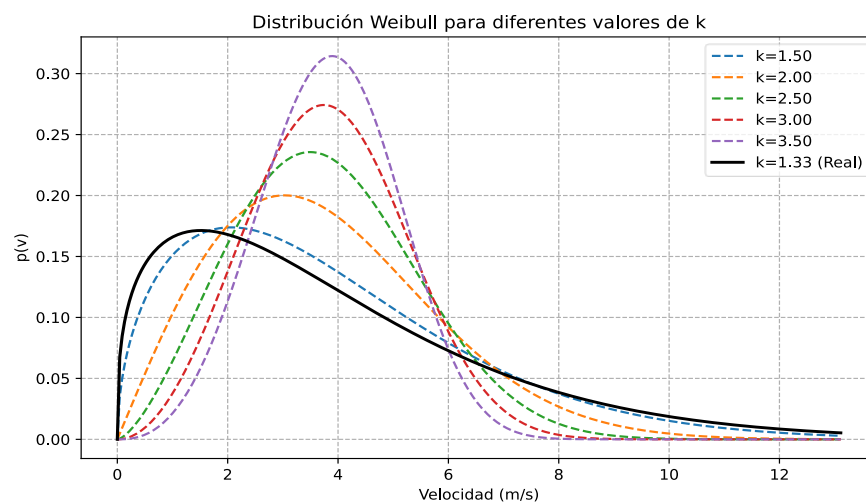
Potencia del rotor vs velocidad del viento



Esta Figura 26 muestra cómo la potencia generada por el rotor Savonius aumenta conforme crece la velocidad del viento, observándose una tendencia exponencial, lo que es característico en aerogeneradores, debido a que la potencia es proporcional al cubo de la velocidad del viento.

Figura 27

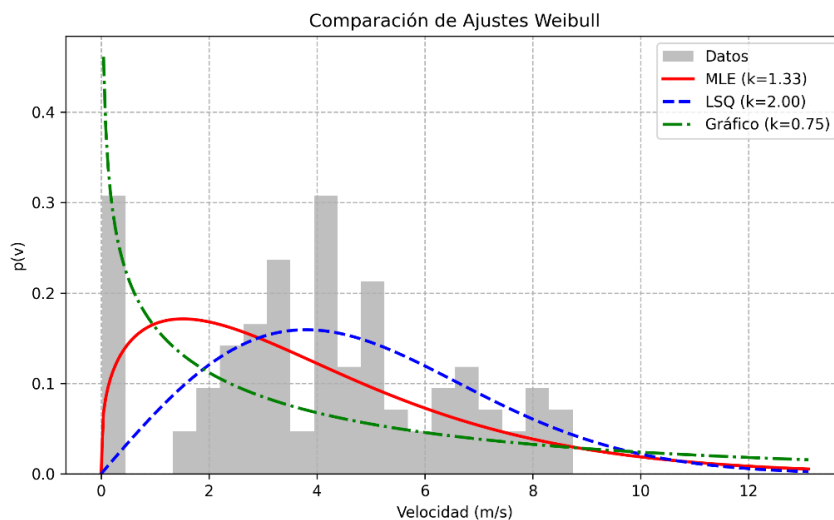
Variación de factores K para Weibull



En la Figura 27 se presenta como cambia la forma de la distribución de Weibull al modificar el parámetro k , manteniendo fija la media, a menor k la curva es más dispersa y asimétrica, mientras que los valores mayores concentran las velocidades cerca del valor medio y permite visualizar qué tipo de comportamiento del viento predomina en un sitio específico.

Figura 28

Comparación de ajuste de Weibull por diferentes métodos

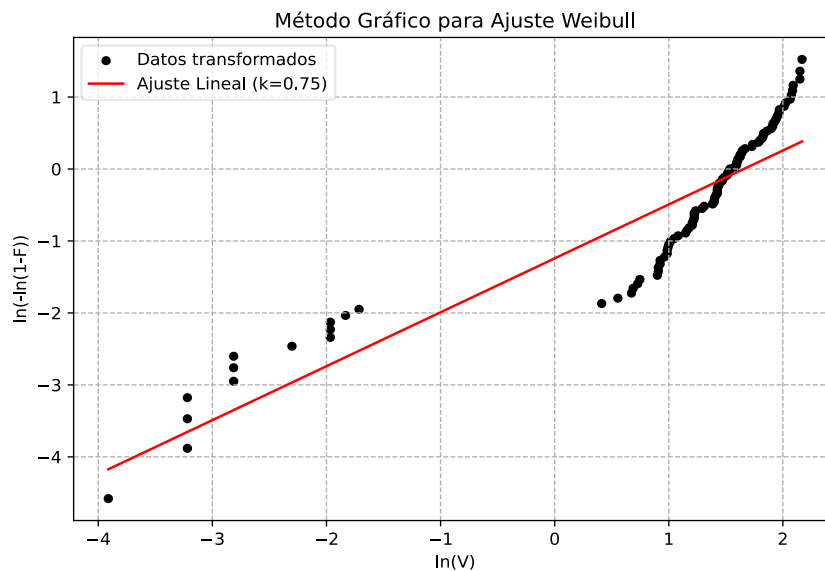


La Figura 28, compara tres métodos de ajuste de la distribución Weibull (MLE, LSQ y método gráfico), teniendo como resultado cuál se aproxima mejor a los datos reales de velocidad del viento. El método MLE (línea roja) presenta el mejor ajuste al histograma, convirtiéndolo en una herramienta confiable para modelar el recurso eólico. La Figura 29 muestra la linealización de Weibull y presenta un análisis gráfico transformando los datos originales mediante escalas logarítmicas especiales donde los puntos se reajustan buscando alinearse con esa recta diagonal dibujada como referencia clave y la pendiente de esta línea directamente relacionada con el parámetro k de valor 0.75 refleja cómo se comporta la variabilidad subyacente en las

mediciones, cuando los puntos transformados siguen de cerca esa trayectoria recta confirma que la distribución Weibull describe adecuadamente los patrones ocultos en la información inicial

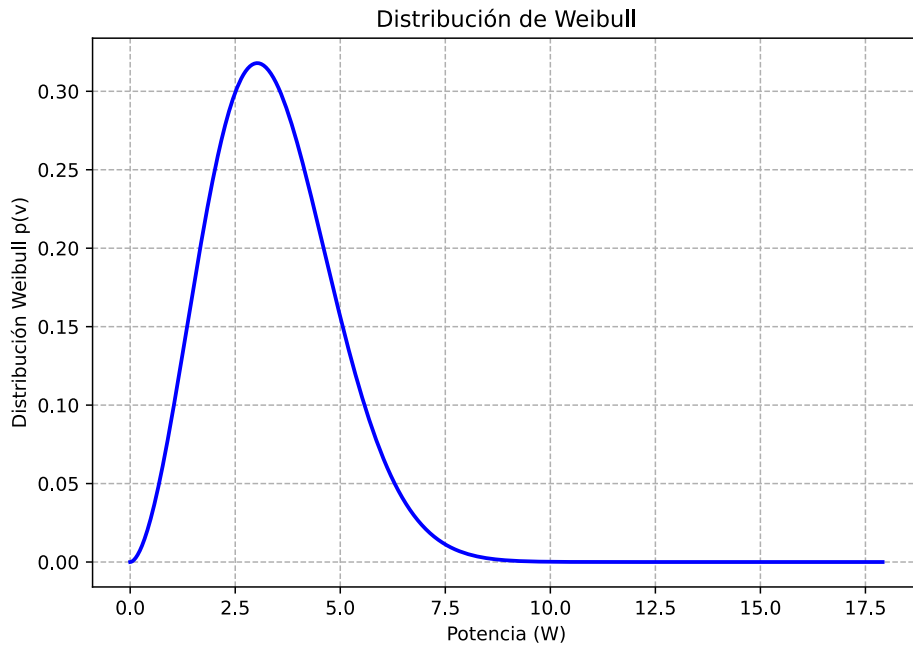
Figura 29

Linealización de la distribución de Weibull



4.7.2. Segundo caso: Velocidad Media

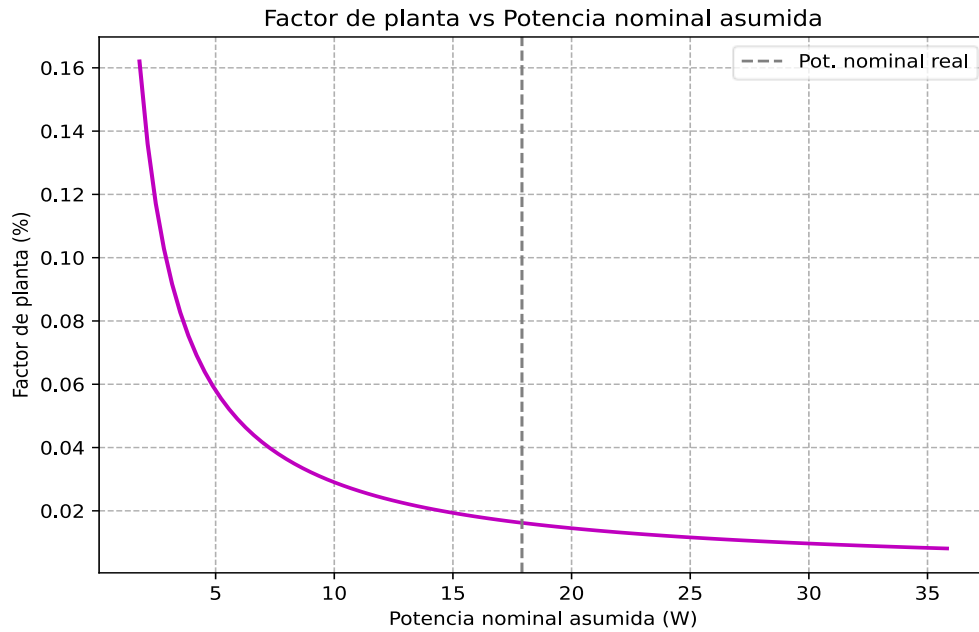
En este segundo escenario se expone el desempeño del aerogenerador bajo una velocidad media del viento (4 – 6 m/s), la cual representa una condición operativa intermedia que favorece una generación más estable de potencia, a esta velocidad, el rotor alcanza un régimen funcional más constante, permitiendo observar el comportamiento en cuanto a eficiencia, estabilidad de RPM y evolución del coeficiente de potencia (C_p). Las gráficas presentadas ayudan a establecer tendencias de rendimiento y comparar la respuesta con respecto al caso de baja velocidad.

Figura 30*Distribución de Weibull vs Potencia*

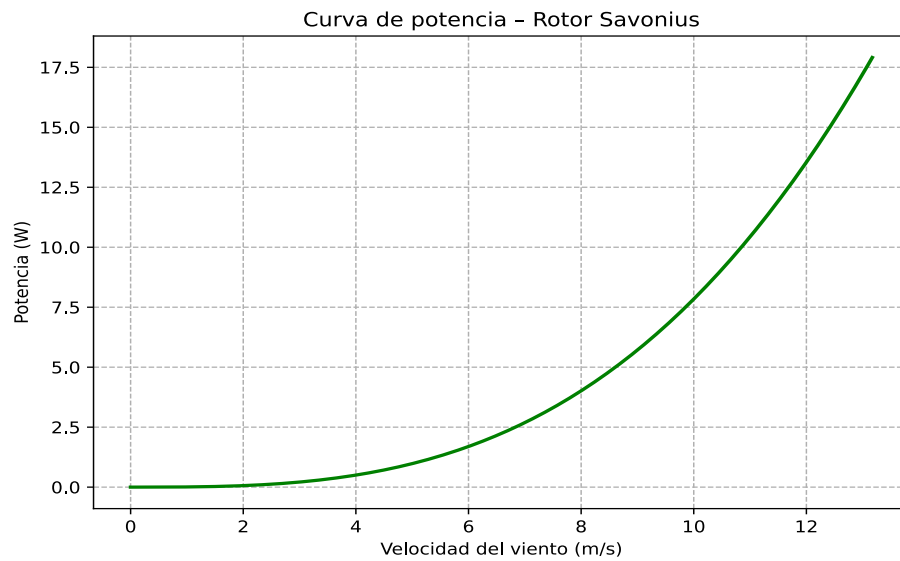
La curva de la Figura 30 detalla una distribución de Weibull representativa aplicada a datos de viento, observando una velocidad predominante alrededor de la media indicando la velocidad más común durante el periodo medido, esta información es esencial para dimensionar aerogeneradores adecuados al túnel de viento.

Figura 31

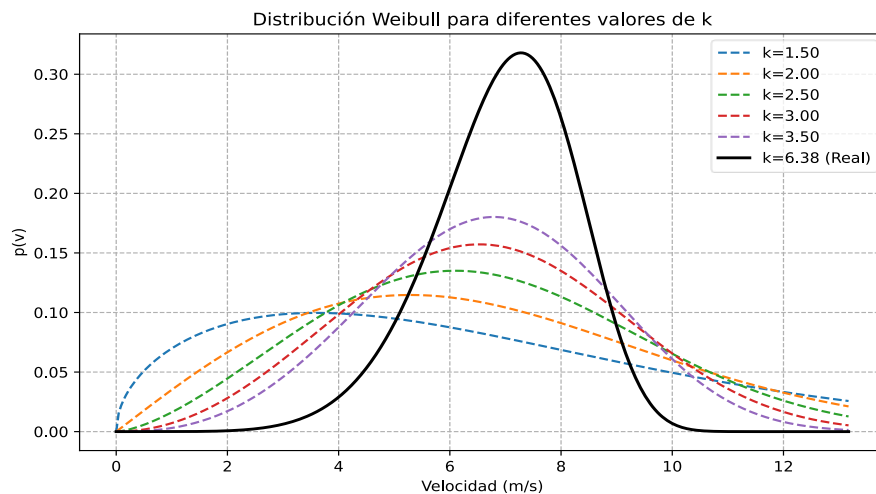
Factor de planta vs Potencia nominal



La Figura 31 recalca que al aceptar potencias nominales más altas, el factor de planta cae rápidamente, esto muestra más detalladamente el punto donde se cruza la línea de potencia real enfatizando la importancia de una estimación adecuada para maximizar el uso del recurso disponible.

Figura 32*Potencia del rotor vs velocidad del viento*

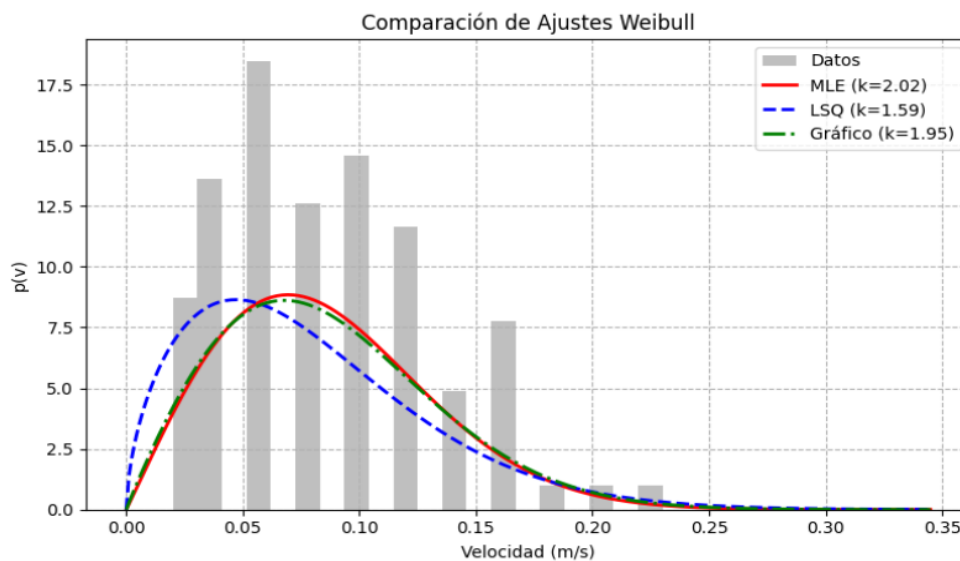
La Figura 32 reafirma la misma tendencia creciente de potencia respecto a la velocidad del viento y refuerza el hecho de que en velocidades más altas se obtiene un incremento considerable de energía, lo que valida el uso en sitios de viento moderado.

Figura 33*Variación de factor k para Weibull*

La Figura 33 es similar a la figura del caso 1, esta gráfica compara distribuciones Weibull para distintos valores k junto con la curva ajustada al valor real que permite visualizar como un mal ajuste del parámetro k puede representar erróneamente el comportamiento del viento, afectando la predicción de energía generada.

Figura 34

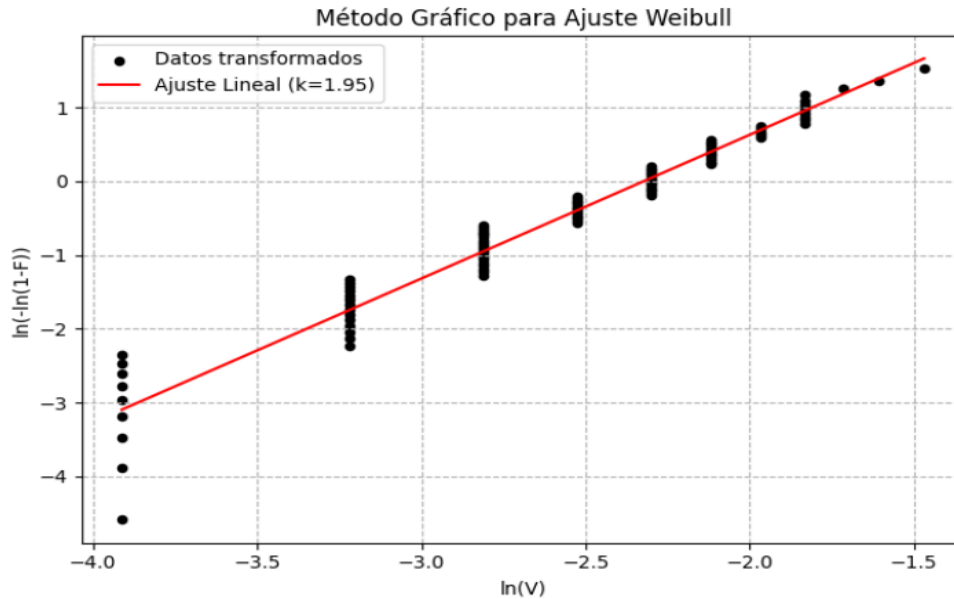
Comparación de ajuste de Weibull por diferentes métodos



La Figura 34 compara los métodos de ajuste, esta vez con valores distintos de k . La superposición con los datos reales permite validar la precisión de cada modelo, siendo fundamental para la planificación energética en sistemas eólicos pequeños o experimentales.

Figura 35

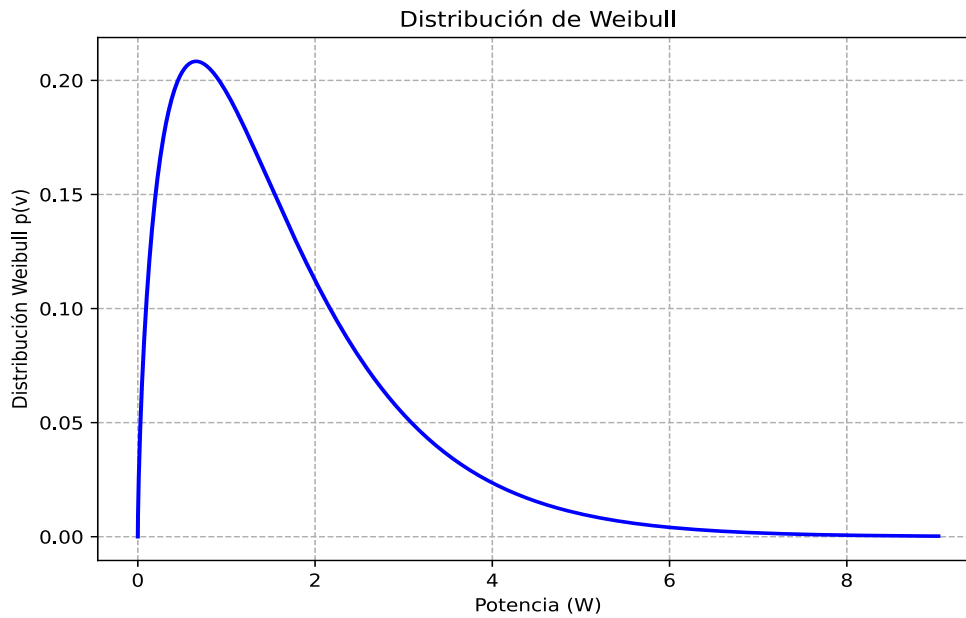
Linealización de la distribución de Weibull



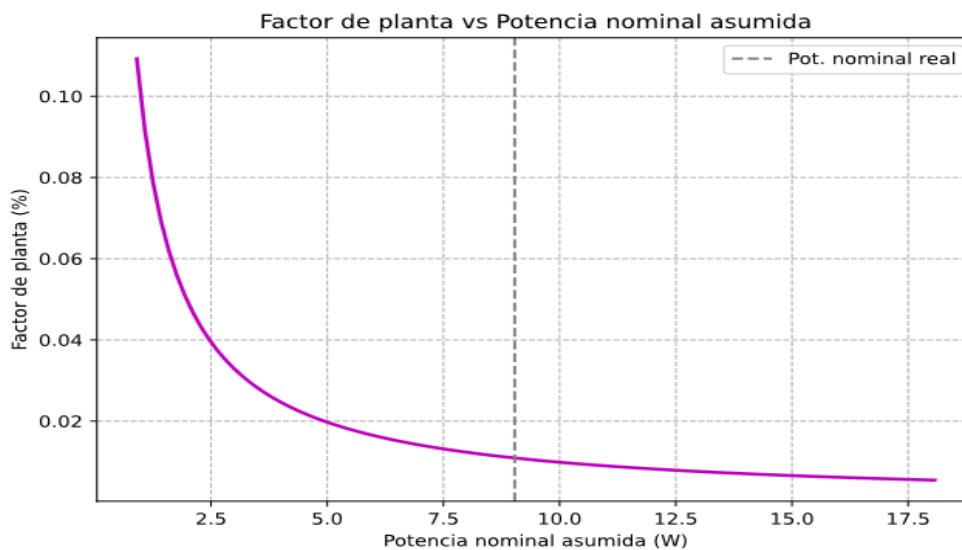
La Figura 35, presenta la linealización de los datos mediante una transformación de Weibull, permitiendo encontrar el parámetro k por medio de una regresión lineal. La recta de ajuste ofrece una forma visual de validar si los datos se comportan como una distribución de Weibull.

4.7.3. Tercer caso: Velocidad Alta

Finalmente, en el tercer caso se examinan los resultados obtenidos al exponer el aerogenerador Savonius a una velocidad alta del viento (6 – 8 m/s) dentro del túnel. Esta condición permite analizar la capacidad máxima de generación de potencia, el comportamiento dinámico del rotor a altas RPM y los posibles límites operativos del diseño. Las gráficas resultantes revelan el aprovechamiento energético en condiciones favorables y permiten evaluar la resistencia mecánica y estabilidad del sistema. Este análisis resulta clave para identificar el rendimiento pico del aerogenerador.

Figura 36*Distribución de Weibull vs Potencia*

Esta Figura 36 revela la relación crítica entre la distribución de velocidad del viento modelada por Weibull y la potencia eólica disponible, la forma asimétrica típica de la distribución Weibull con alta frecuencia en velocidades moderadas (3-7 m/s) y cola extendida hacia velocidades mayores explica el comportamiento no lineal de la potencia generada, esta concentración de probabilidad en el rango 0.05-0.15 para potencias medias (1 a 2 W) indica que el túnel de viento analizado presenta condiciones eólicas óptimas para turbinas de baja, media potencia. La escasa densidad en potencias superiores 5 W sugiere limitaciones para aprovechar vientos de alta velocidad, por ello esta distribución es fundamental para dimensionar correctamente aerogeneradores que maximicen la captación energética en este entorno específico.

Figura 37*Factor de planta vs potencia nominal*

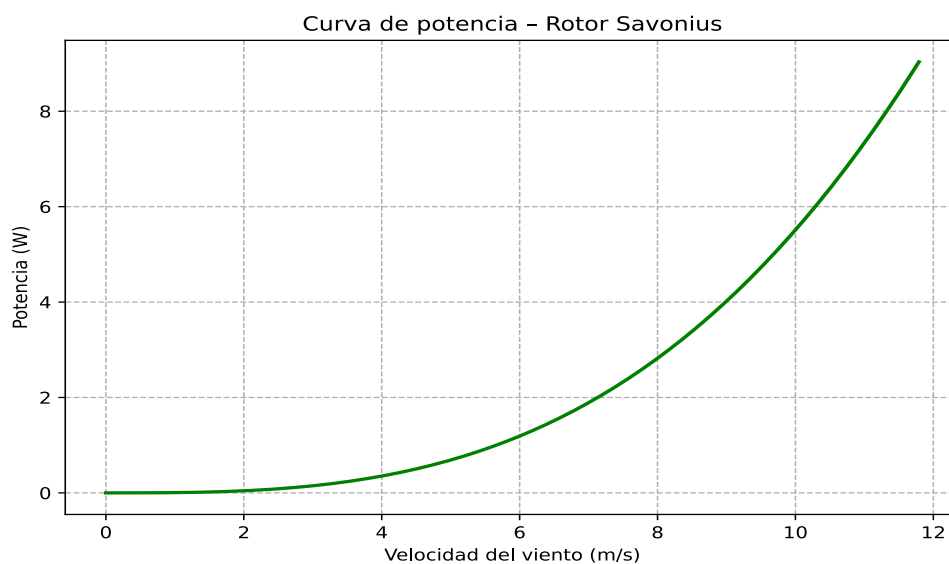
La Figura 37 evalúa cómo varía el rendimiento relativo del sistema en función de diferentes escenarios de potencia nominal, analiza el factor de planta (Fp), que representa la proporción de energía generada respecto a la energía que se produciría si el sistema operara todo el tiempo a su potencia nominal, en el eje X se presentan valores de potencia nominal asumida en vatios, mientras que en el eje Y se grafica el factor de planta asociado a cada caso.

Se observa una relación inversamente proporcional entre el aumento de la potencia nominal y la disminución del factor de planta, esto indica que si se asume una potencia nominal muy alta para el sistema, el rendimiento porcentual disminuirá bruscamente, pues el sistema rara vez alcanza ese nivel de generación. En cambio, si se elige una potencia nominal más baja, el factor de planta mejora, reflejando un mayor aprovechamiento relativo de la capacidad instalada, la línea vertical punteada señala la potencia nominal real del sistema determinada probablemente por diseño o

pruebas previas, y se utiliza como punto de referencia para verificar si el sistema está sobredimensionado o adecuadamente calibrado.

Figura 38

Potencia del Aerogenerador vs velocidad del viento



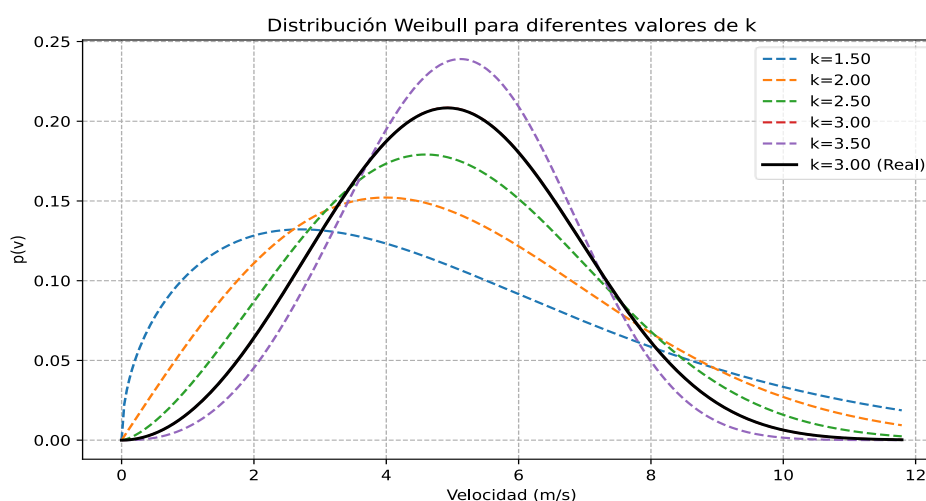
La siguiente Figura 38 muestra la relación directa entre la velocidad del viento (m/s) y la potencia generada (W) por el aerogenerador Savonius a escala evaluado. La curva verde representa cómo aumenta la potencia de forma no lineal a medida que se incrementa la velocidad del viento, siguiendo una relación exponencial con velocidades inferiores a los 3 m/s, la potencia generada es prácticamente nula, lo que refleja la velocidad de arranque del rotor, mediante este punto, la generación crece progresivamente y se acelera desde los 6 m/s en adelante. A 12 m/s, la potencia alcanza su valor máximo cercano a los 9 W, que representa la capacidad límite de este sistema particular dentro de las condiciones del ensayo.

Este comportamiento es típico de un aerogenerador Savonius, que presenta un coeficiente de potencia bajo en comparación con otros tipos de aerogeneradores,

pero destaca por su capacidad de arranque a bajas velocidades, la curva de potencia obtenida resulta esencial para superponerla con las distribuciones de probabilidad de viento como la Weibull y determinar cuánta energía efectiva puede ser extraída en un entorno real, según la frecuencia con la que ocurren ciertas velocidades del viento.

Figura 39

Comparación con varios factores k



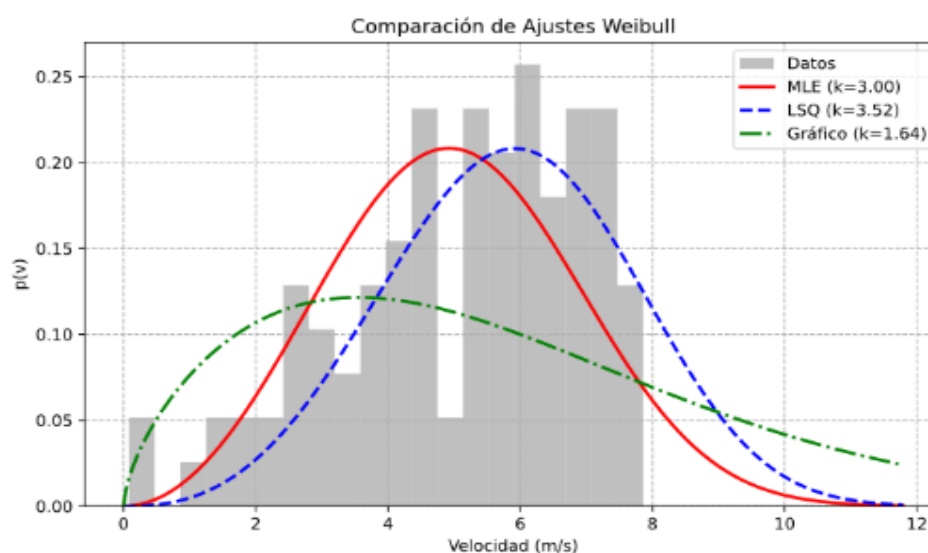
La Figura 39 analiza cómo cambia la forma de la distribución de probabilidad del viento cuando se modifica el parámetro de forma k de la distribución de Weibull, por medio de este parámetro se determina la curvatura y simetría de la distribución: valores bajos de k como 1.5 o 2.0 generan distribuciones más asimétricas y extendidas, lo que indica mayor variabilidad y presencia de vientos extremos. Por otro lado, valores mayores de k como 3.5 hacen que la distribución sea más concentrada y simétrica, reflejando un comportamiento del viento más constante.

En la gráfica se compara una serie de curvas Weibull con distintos valores de k , siendo la curva negra la que representa el valor real calculado experimentalmente para este caso específico $k=3.00$. Esta curva muestra que la velocidad más probable

está en torno a los 5.5–6 m/s, y que hay una caída progresiva en la ocurrencia de velocidades mayores o menores. Esta información, combinada con la curva de potencia del aerogenerador, permite evaluar cuánta potencia será generada en promedio: si la mayoría de los vientos se encuentran entre 4 y 8 m/s, se puede esperar que el sistema trabaje regularmente en un rango de 2 a 7 W.

Figura 40

Comparación de ajuste de Weibull por diferentes métodos



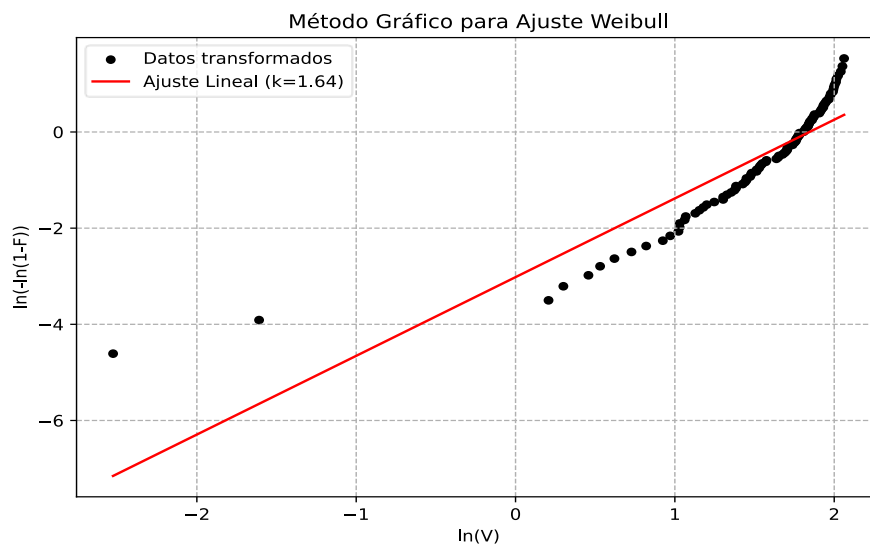
La siguiente figura 40 muestra un análisis comparativo utilizados para ajustar una distribución de Weibull a un conjunto de datos de velocidad del viento mediante tres métodos, este histograma superpone tres curvas correspondientes a los métodos de ajuste: Máxima Verosimilitud (MLE), Mínimos Cuadrados (LSQ) y el método gráfico, cada curva tiene un valor distinto del parámetro de forma k , que determina el perfil de la distribución y el ajuste por MLE presenta un valor de $k=3.00$, lo que indica una distribución más simétrica y concentrada alrededor del valor promedio. Por otra parte, el ajuste por LSQ muestra un valor aún mayor de $k=3.52$ que sugiere una curva más aguda, enfocada principalmente en el pico de frecuencia de las

velocidades. En contraste, el método gráfico presenta un valor de $k=1.64$, lo que implica una distribución más extendida con una mayor dispersión de los datos a lo largo del eje de velocidad.

Estos tres métodos permiten observar cómo la selección del procedimiento de ajuste puede alterar significativamente la forma de la distribución Weibull obtenida, mientras los métodos MLE y LSQ tienden a enfocarse en ajustar mejor el centro de la distribución, además pueden subestimar los valores extremos, lo cual es relevante en estudios donde los vientos bajos o muy altos tienen impacto sobre el rendimiento de aerogeneradores y el método gráfico, si bien menos preciso en el centro, representa mejor la variabilidad en los extremos del conjunto de datos siendo útil cuando se desea capturar con mayor realismo las condiciones límite de operación de un sistema eólico.

Figura 41

Linealización de la distribución de Weibull



En la figura 41 se utiliza una transformación logarítmica para linealizar la función de distribución acumulada de Weibull, donde los puntos negros representan

los datos transformados, y la línea roja corresponde al ajuste lineal que permite estimar el valor del parámetro de forma k , para este caso, se obtuvo un valor de $k=1.64$, la aproximación gráfica permite identificar si los datos siguen una distribución de Weibull, ya que un comportamiento lineal de los puntos indica que el modelo es adecuado. Sin embargo, se puede observar que los puntos en los extremos se desvían de la línea ajustada, lo que sugiere que este método puede no representar con total precisión los valores más bajos o altos de velocidad del viento.

4.8. Monitoreo del encoder

Para poder comprender como se comporta el rotor del aerogenerador Savonius mientras está en funcionamiento, se utilizó un sistema de monitoreo en tiempo real que incluye un Encoder rotatorio, este dispositivo permitió registrar con precisión las revoluciones por minuto (RPM) del eje durante las pruebas y mediante estos datos fue posible calcular también la velocidad angular y el torque, lo cual es fundamental para evaluar el rendimiento mecánico en distintas velocidades del viento.

Gracias al Encoder se capturaron datos continuos durante el experimento en el túnel de viento que garantizó una lectura detallada y confiable del comportamiento del aerogenerador, con la información recopilada se elaboraron gráficas que muestran aspectos como la estabilidad del giro, la respuesta del sistema ante el flujo de aire y la eficiencia con la que convierte energía mecánica.

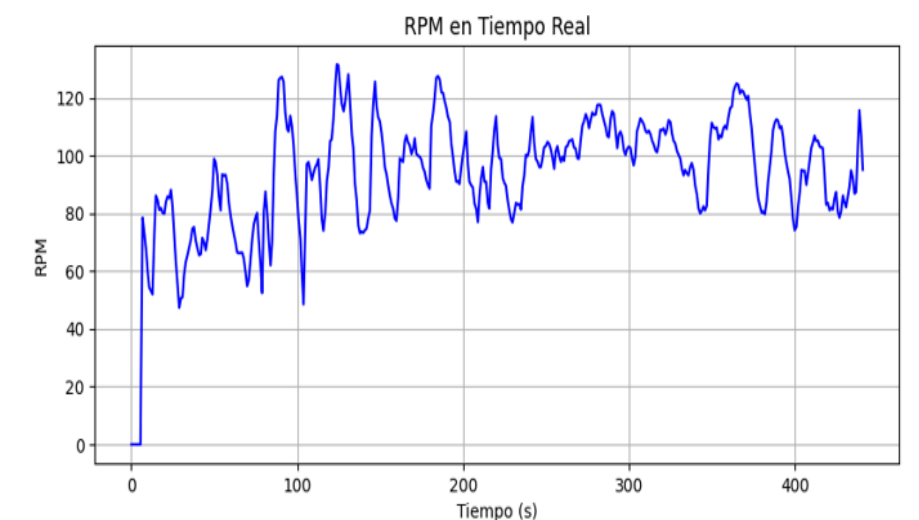
Este monitoreo fue fundamental para respaldar el diseño del aerogenerador, y también para entender la reacción frente a diferentes condiciones aerodinámicas aplicadas durante cada caso de estudio distinto.

4.8.1. Caso 1: Velocidad de viento baja

En esta parte se presenta como varían las revoluciones por minuto (RPM) del rotor mientras el aerogenerador Savonius está en funcionamiento dentro del túnel de viento, esta gráfica permite visualizar la estabilidad de rotación, si hay fluctuaciones causadas por el flujo de aire, y cómo responde el rotor justo al inicio de cada ensayo dentro del túnel de viento y observar este comportamiento es clave que brinda una idea clara sobre que tan bien está diseñado el sistema y como interactúa con el viento.

Figura 42

Visualización de los datos en tiempo real

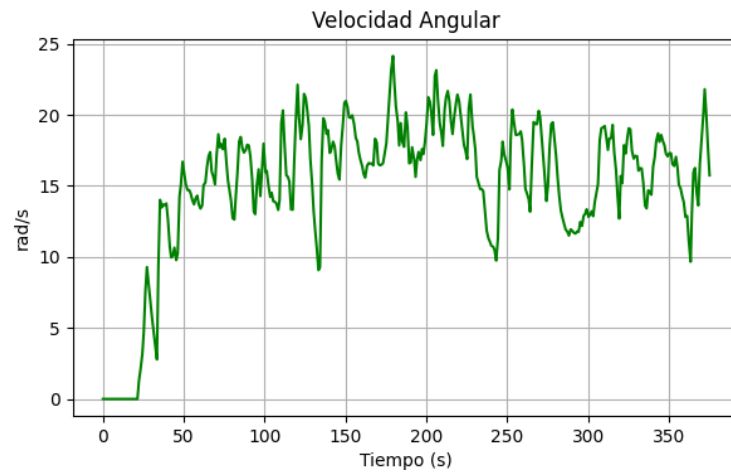


La Figura 42 muestra las revoluciones por minuto (RPM) del rotor durante 350 segundos, iniciando con un ascenso hasta ~200 RPM los primeros 100 s, seguido de un descenso gradual hasta estabilizarse en ~100 RPM después de 150 s. Este patrón muestra una respuesta inicial a ráfagas de viento intensas presentes típicamente en entornos con turbulencias, la estabilización posterior refleja la adaptación del sistema de control para mantener una operación eficiente, evitando

fallos mecánicos y la fluctuación entre 100-150 RPM indica variabilidad del recurso eólico, común en sitios no costeros.

Figura 43

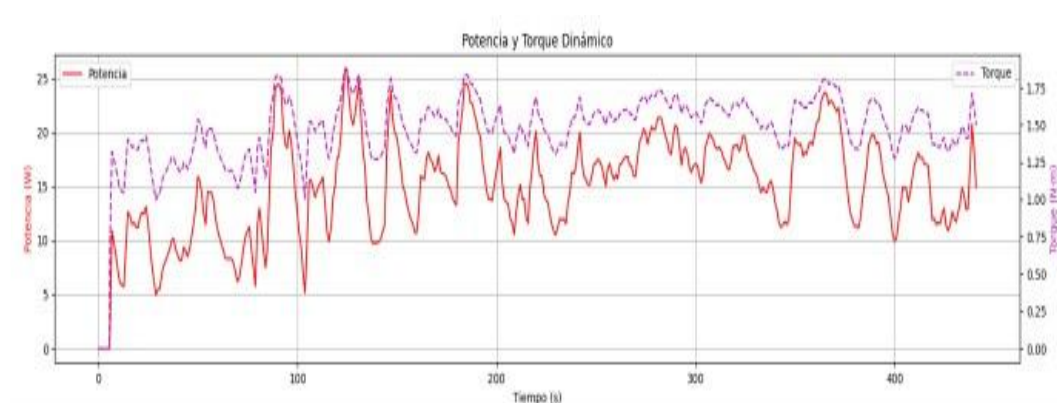
Velocidad angular



La velocidad angular (rad/s) de la Figura 43 presenta oscilaciones significativas, picos de 25-50 rad/s intercalados con caídas bruscas (incluso a 0 rad/s), este comportamiento es preocupante, ya que evidencia inestabilidad en la transmisión mecánica o perturbaciones del viento. Las caídas abruptas podrían deberse a stall aerodinámico o problemas en el sistema de pitch, en energía eólica una irregularidad iguala a esta reduce la vida útil de los rodamientos y genera fatiga estructural requiriendo ajustes en el controlador para suavizar transiciones.

Figura 44

Comparación de potencia y torque



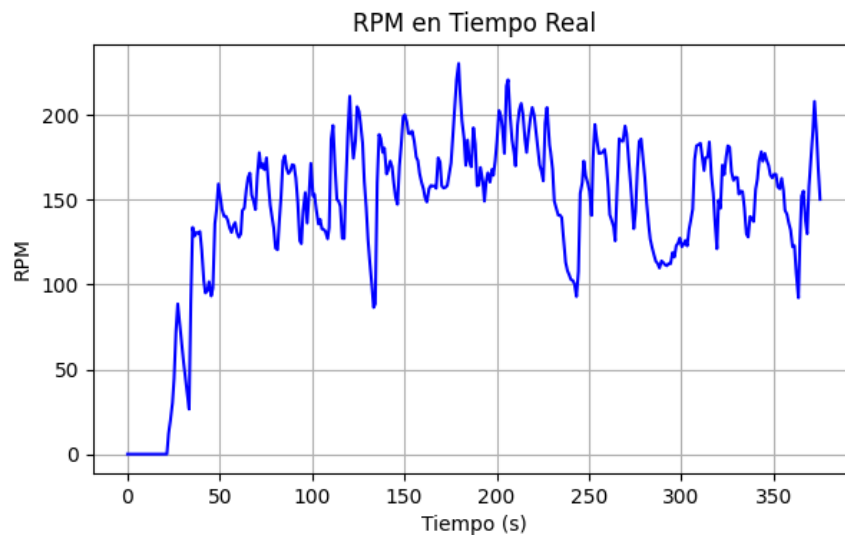
La potencia (W) y el torque de la Figura 44 muestran una correlación directa, pero con alta volatilidad, la potencia alcanza 70 W en picos, pero fluctúa entre 10-60 W, mientras el torque oscila de 0.5 a 3.0 N·m. Esta variación de datos indica desajustes entre la energía cinética captada y la entrega eléctrica, posiblemente por deficiencias en el MPPT (Maximum Power Point Tracking), el torque elevado en momentos de baja potencia sugiere pérdidas por fricción o deslizamiento en la caja de engranajes indicando la necesidad de mantenimiento preventivo.

4.8.2. Caso 2: Velocidad de viento media

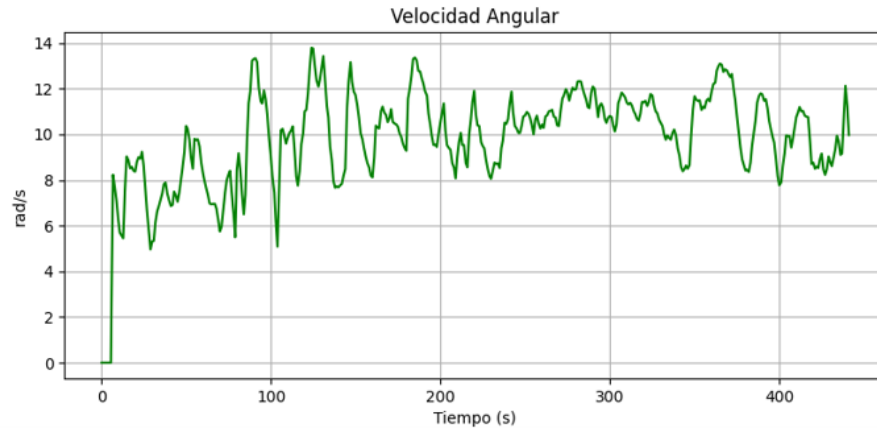
En este segundo caso corresponde a la condición de viento intermedio en el que el flujo es más constante y permite que el rotor mantenga una rotación más estable. A esta velocidad, el aerogenerador tiende a operar en un punto más cerca de su zona eficiente, por lo que fue posible evaluar con mayor claridad y exactitud el comportamiento dinámico, el desarrollo del torque y el aumento de la potencia generada. Además, este punto de análisis sirvió como referencia para comparar el rendimiento general con respecto a las otras velocidades.

Figura 45

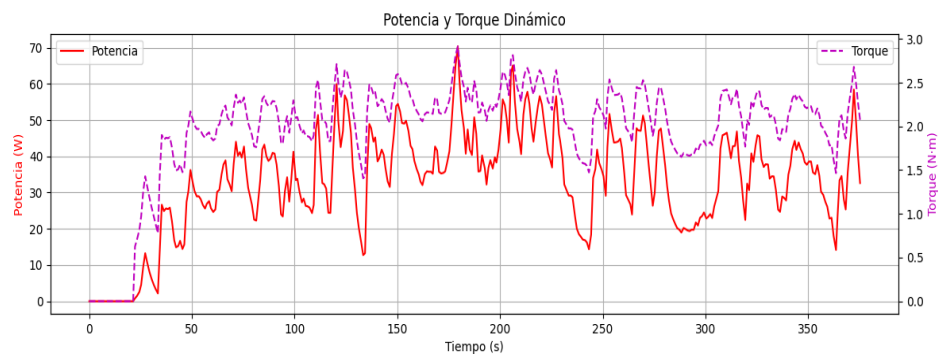
Visualización de los datos en tiempo real



La Figura 45 muestra como varían las revoluciones por minuto (RPM) del aerogenerador Savonius a lo largo del tiempo. Se observa una línea azul que sube y baja entre 0 y 120 RPM, reflejando los cambios en la velocidad de giro del rotor, probablemente influenciados por pequeñas variaciones en el viento, el aumento brusco al inicio sugiere que el rotor arranca con fuerza, mientras que las oscilaciones posteriores son típicas en sistemas eólicos operando a velocidad baja.

Figura 46*Velocidad angular*

En la Figura 46 se presenta la velocidad angular del rotor, expresada rad/s mediante una línea verde que oscila entre 0 y 14 rad/s. Este comportamiento sigue una tendencia similar a la de las RPM, debido a que ambos valores están directamente relacionados y se puede notar que después de los primeros 100 segundos, la velocidad angular se estabiliza ligeramente, indicando que el rotor alcanza un ritmo de operación más constante.

Figura 47*Comparación potencia y torque*

La Figura 47 ilustra el comportamiento temporal de la potencia (línea roja) y el torque (línea morada) del rotor, la potencia expone un rango dinámico entre 0 y 25

W, con una fase inicial de crecimiento seguida de oscilaciones persistentes, en contraste, el torque demuestra mayor estabilidad, fluctuando moderadamente dentro de un margen de 0 a 1.75 N·m y la divergencia revela que a pesar de las variaciones en la producción de energía, el esfuerzo torsional aplicado al eje del rotor se mantiene relativamente constante, dicho patrón es característico de aerogeneradores operando en regímenes eólicos turbulentos, donde la inercia del sistema mitiga cambios abruptos en carga mecánica.

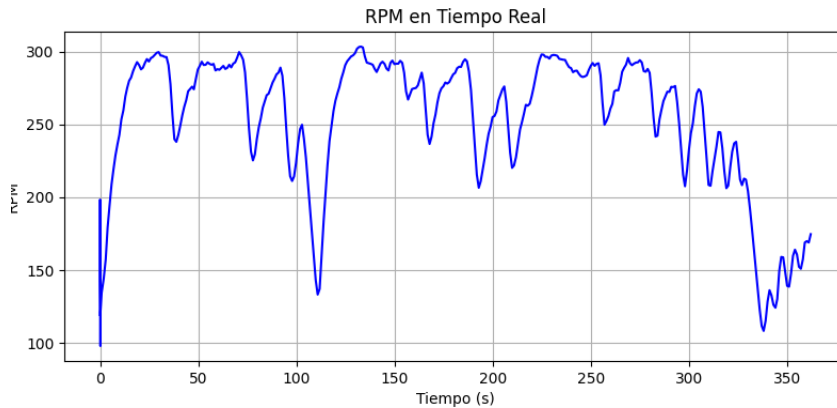
4.8.3. Caso 3: Velocidad de viento alta

En el último caso se evaluó el rendimiento del aerogenerador expuesto a una velocidad de viento alta, buscando conocer su capacidad máxima de respuesta y con esta condición se registró valores más elevados de RPM, torque y potencia, así como observar el comportamiento estructural y la estabilidad del sistema frente a un flujo más exigente, por otra parte se analizaron los límites operativos del rotor para entender hasta qué punto su diseño puede seguir siendo eficiente sin comprometer su funcionamiento.

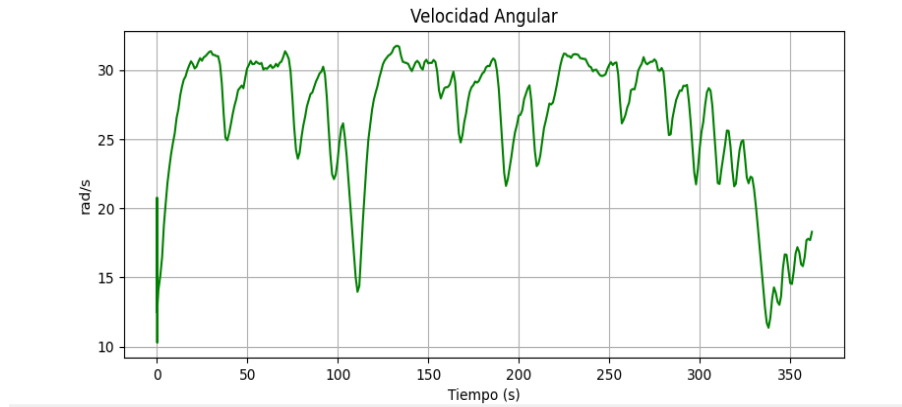
El sistema mostró un comportamiento estable en las revoluciones por minuto durante el período de análisis y la mayor parte de la prueba se mantuvo alrededor de 250 RPM. Se puede observar en la Figura 48 una pequeña tendencia descendente hacia los 200 segundos posiblemente relaciona a variaciones en la carga aplicada o condiciones operativas y la estabilidad del régimen rotacional indica que el mecanismo de control responde correctamente a las demandas energéticas sin sobresaltos significativos, la consistencia es fundamental para garantizar la eficiencia del sistema en el uso industrial.

Figura 48

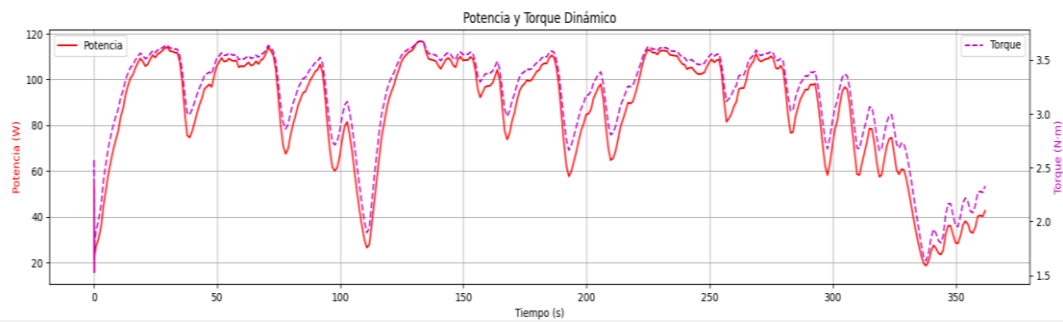
Visualización de los datos en tiempo real



La conversión de RPM a velocidad angular (rad/s) revela un comportamiento directamente proporcional al modo rotacional, la curva detalla una pequeña concavidad hacia los 150 segundos, propone una transferencia de momento inercial óptima entre componentes mecánicos, la ausencia de picos abruptos en la Figura 49 indica que el sistema opera dentro del rango elástico sin evidenciar fatiga material, este perfil suave es característico de transmisiones bien lubricadas y alineadas, donde las pérdidas por fricción son mínimas, permitiendo una conversión más eficiente de energía cinética.

Figura 49*Velocidad angular*

El torque mostró una relación no lineal con la velocidad angular que alcanzó valores máximos de 2.33 N·m en condiciones de media carga, la potencia desarrollada (42.64 W) evidencia un punto óptimo de operación hacia los 200 segundos, donde la eficiencia energética alcanza su máximo, la divergencia entre las curvas de torque y potencia alrededor de los 300 segundos sugiere el inicio de la zona de desacople mecánico, donde incrementos adicionales de velocidad no generan beneficios proporcionales en rendimiento (Figura 50). Este fenómeno es crítico para determinar los límites operativos seguros del sistema.

Figura 50*Comparación entre potencia y torque*

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este capítulo presenta un resumen de los hallazgos más relevantes alcanzados durante el diseño e implementación del módulo de estudio basado en un aerogenerador de eje vertical tipo Savonius, resaltando su contribución en el ámbito de la generación eólica a baja escala. Además, se incluyen sugerencias de carácter técnico y metodológico que ayuden como guía para el perfeccionamiento del prototipo, así como para el desarrollo de futuras investigaciones o aplicaciones prácticas en entornos reales y educativos.

5.1. Conclusiones

La implementación de un módulo de estudios con un aerogenerador Savonius a escala evidenció que esta tecnología es adecuada para fines académicos, especialmente en estudios relacionados con la energía eólica con tecnología de eje vertical de baja velocidad del viento, durante las pruebas en túnel de viento, el prototipo mostró un comportamiento estable y predecible, lo cual respalda su funcionalidad dentro de un entorno controlado como el túnel de viento.

Desarrollar el sistema de monitoreo mediante la implementación de sensores para realizar la medición de la velocidad angular y velocidad de viento, favoreció una caracterización detallada de la curva de potencia del prototipo, comprobando su rendimiento en función de las RPM y del flujo eólico inducido al prototipo.

La aplicación estadística de la distribución de Weibull sobre los datos obtenidos en el túnel de viento permitió representar de manera confiable y precisa la variabilidad del recurso eólico, estableciendo una base estadística útil para análisis

predictivos y simulaciones futuras orientadas al rendimiento energético del prototipo Savonius.

Utilizar un encoder y el anemómetro fue fundamental para obtener información precisa sobre el funcionamiento del aerogenerador, mediante el encoder se midió con precisión la velocidad de rotación del eje que permitió evaluar el rendimiento del sistema bajo diferentes condiciones de viento y la información recopilada se procesó para elaborar gráficos que representen el rendimiento del aerogenerador mejorando la interpretabilidad y el anemómetro proporcionó lecturas del viento que fueron fundamentales para el estudio de la potencia y análisis estadístico, gracias a estos dos instrumentos de medición se logró construir gráficas claras y confiables facilitando una evaluación más completa.

El análisis realizado de la distribución de velocidades del viento con relación a la potencia generada muestra que existe una mayor probabilidad de obtener energía útil en rangos de velocidad moderada, lo que sugiere que el entorno de pruebas evaluado ofrece condiciones adecuadas para el funcionamiento de turbinas de eje vertical diseñadas para baja y media potencia, la forma en que se comporta la distribución, con una clara concentración en ciertas velocidades, explica por qué la generación de energía no es lineal y depende fuertemente de estas condiciones predominantes.

5.2. Recomendaciones

Se plantea como mejora la actualización del sistema de adquisición de datos mediante el uso de sensores digitales de mayor exactitud, junto con la implementación de comunicación inalámbrica facilitando la integración del módulo

en plataformas de Internet de las Cosas (IoT), permitiendo el monitoreo a distancia y el procesamiento en entornos digitales avanzados.

Se recomienda realizar pruebas en condiciones reales de viento, para observar el desempeño del aerogenerador frente a variaciones naturales del viento, incluyendo turbulencias, direcciones cambiantes y fluctuaciones de velocidad que contribuyan a validar su funcionalidad en contextos rurales o urbanos donde se requiere generación distribuida a pequeña escala.

Finalmente, se considera pertinente llevar a cabo comparaciones experimentales con otros diseños de rotores de eje vertical, como el tipo Darrieus, Giromill, Windside y LIAM F1 bajo las mismas condiciones de prueba permitiendo establecer criterios técnicos más amplios y fundamentados para seleccionar la tecnología eólica más adecuada según las características del recurso disponible.

BIBLIOGRAFÍA

- A000066-datasheet*. (s.f.).
- Akimoto, K., Sano, F., Oda, J., Kanaboshi, H., & Nakano, Y. (2021). Climate CO2 capture and utilization and direct air capture. *Energy and Climate Change*, 2, 100057.
<https://doi.org/10.1016/J.EGYCC.2021.100057>
- López, J. A. (2022). *ESTUDIO DEL FLUJO SOBRE UN PERFIL ALAR*.
<https://doi.org/https://oa.upm.es/70033/>
- Bacilo, V., & Inuma, D. (2020). “*Diseño y simulación de un prototipo de generador eólico múltiple de eje vertical mediante el software SolidWorks para la generación de energía eléctrica en el distrito de Usquil - Otuzco - 2020*.” 1–118. <https://doi.org/https://hdl.handle.net/20.500.12692/63261>
- Bottasso, C. L., & Campagnolo, F. (2022). Wind Tunnel Testing of Wind Turbines and Farms. *Handbook of Wind Energy Aerodynamics: With 678 Figures and 33 Tables*, 1077–1126. https://doi.org/10.1007/978-3-030-31307-4_54
- By ALLDATASHEET.COM, P. (2019). *DATASHEET SEARCH SITE* | WWW.ALLDATASHEET.COM. www.espressif.com/en/subscribe.
- Casa, E. (2023). *Diseño y Construcción de un Túnel de Viento a Escala Para Obtener Datos Mediante Pruebas*.
<https://doi.org/https://repositorio.uisek.edu.ec/handle/123456789/5040>
- Cattafesta, L., Bahr, C., & Mathew, J. (2010). Fundamentals of Wind-Tunnel Design. In *Encyclopedia of Aerospace Engineering*. Wiley.
<https://doi.org/10.1002/9780470686652.eae532>
- Cogollo, R., & Valderrama, O. (2019). *Por una Universidad con calidad, moderna e incluyente 2019-2020* (Issue 77).
<https://doi.org/https://repositorio.unicordoba.edu.co/handle/ucordoba/6564>
- Cubas, H. (2021). *Análisis comparativo aerodinámico de las turbinas darrieus y savonius para la obtención del potencial de energía eléctrica en la Universidad Señor de Sipán*. <https://hdl.handle.net/20.500.12802/8736>
- Cucaita, L. T., & Palomino, C. A. (2022). *Diseño E Implementación De Una Turbina Eólica De Bajo Costo En Zona Rural Del Departamento Del Meta*. 1–7. <https://doi.org/10.26507/ponencia.1718>

- Delgado, E. N. (2021). *MODELO OPTIMIZADOR DEL RENDIMIENTO DE ROTORES TIPO SAVONIUS MEDIANTE DISEÑO DE ÁLABES OMNIDIRECCIONAL CON VELOCIDAD DE VIENTO MENOR A 3 M/S*. 156. <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/4124>
- Gaertner, E., Rinker, J., Sethuraman, L., Zahle, F., Anderson, B., Barter, G. E., Abbas, N. J., Meng, F., Bortolotti, P., Skrzypinski, W., Scott, G. N., Feil, R., Bredmose, H., Dykes, K., Shields, M., Allen, C., & Viselli, A. (2020). *IEA Wind TCP Task 37: Definition of the IEA 15-Megawatt Offshore Reference Wind Turbine*. <https://doi.org/10.2172/1603478>
- García, S. G. Z. (2021). *Universidad Nacional José Faustino*. 100. <http://repositorio.unjfsc.edu.pe/handle/UNJFSC/4619>
- Gil, I. C., Fernández Guillamón, A., & Montes Torres, Á. H. (2024). Innovation in clean energy from man-made wind and small-wind generation. *Scientific Reports*, 14(1), 22932. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-74141-w>
- Gonzáles. (2019). *Origen del molino de viento: ¿Quién lo inventó? - QueInventor*. <https://queinventor.info/tecnologia/origen-del-molino-de-viento-quien-lo-invento/>
- González, C. (2024). *EFICIENCIA ENERGÉTICA Y AUTOCONSUMO. PRESENTE Y FUTURO*. <https://doi.org/https://hdl.handle.net/2117/410931>
- Guerra, J., & Huayapa, E. (2024). *Diseño y simulación de un banco de pruebas para evaluar el rendimiento de turbinas eólicas de eje horizontal de hasta una potencia de 600W*. <https://doi.org/http://hdl.handle.net/10757/670528>
- Hand, B., Kelly, G., & Cashman, A. (2021). Structural analysis of an offshore vertical axis wind turbine composite blade experiencing an extreme wind load. *Marine Structures*, 75. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2020.102858>
- He, R., Sun, H., Gao, X., & Yang, H. (2022). Wind tunnel tests for wind turbines: A state-of-the-art review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 166). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112675>
- Hernández, A. (2021). “*Diseño y fabricación de un prototipo de micro aerogenerador de baja potencia.*”

- https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/342051/REPORT_HERRANDEZ_ANDRES.pdf?sequence=2
- Herrera, J. G., & Arias, F. J. (2024). *An alternative method for ocean wave energy conversion including wind energy*.
<https://doi.org/https://hdl.handle.net/2117/412799>
- Hoxha, B., Selimaj, R., & Osmanaj, S. (2018). An experimental study of Weibull and Rayleigh distribution functions of wind speeds in Kosovo. *Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 16(5), 2451–2457. <https://doi.org/10.12928/TELKOMNIKA.v16i5.10260>
- Humberto, J., Millán, P., Álvaro, A. :, Sepúlveda, P., & Mecánico, I. (n.d.). *CARACTERIZACIÓN Y PRUEBAS DE UN ROTOR TIPO SAVONIUS*.
<https://doi.org/https://hdl.handle.net/1992/67131>
- Jemal, T., Shimels, S., Ali, Y., & Fatoba, S. O. (2023). Impact of Turbulent Flow on H-Type Vertical Axis Wind Turbine Efficiency: An Experimental and Numerical Study. *International Journal of Heat and Technology*, 41(6), 1513–1520. <https://doi.org/10.18280/ijht.410613>
- Jin, X., Xu, Z., & Qiao, W. (2021). Condition monitoring of wind turbine generators using SCADA data analysis. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 12(1), 202–210. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2020.2989220>
- Joseph, J., & Gomez, V. (2022). *Diseño y construcción de generador eléctrico y drive de potencia para el control eléctrico en baja tensión y potencia 1 Kw orientada a la micro-generación eólica urbana*. 142.
<https://doi.org/https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/84963>
- Lasso Mendoza, G., Santos Alvite, F., Jaramillo Carrera, M., Echeverria Zambrano, A., Ligna Cumbal, C., Gómez, J. R., Thys, K., & Molina, M. J. (2023). *Hoja De Ruta Del Hidrógeno Verde En Ecuador*.
<https://www.ambienteyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/2023/08/Hoja-de-Ruta-del-Hidrogeno-Verde-en-Ecuador.pdf>
- Li, S., Li, X., Li, J., Su, Y., & Wu, B. (2023). Measurements of the unsteady lift force on a 5:1 rectangular cylinder based on active-passive hybrid wind tunnel tests. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 213. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.112674>

- Liew, H. F., Rosemizi, A. R., Aihsan, M. Z., Muzamir, I., & Baharuddin, I. (2020). Wind Characterization by Three Blade Savonius Wind Turbine Using IoT. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 932(1).
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/932/1/012080>
- Long, Y., Chen, Y., Xu, C., Li, Z., Liu, Y., & Wang, H. (2023a). The role of global installed wind energy in mitigating CO2 emission and temperature rising. *Journal of Cleaner Production*, 423, 138778.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138778>
- Long, Y., Chen, Y., Xu, C., Li, Z., Liu, Y., & Wang, H. (2023b). The role of global installed wind energy in mitigating CO2 emission and temperature rising. *Journal of Cleaner Production*, 423, 138778.
<https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2023.138778>
- Macas-mendoza, D. R. (2024). *Ecuador y su rol a nivel regional*. 545–567.
[https://doi.org/https://doi.org/10.59282/reincisol.V3\(6\)545-567](https://doi.org/https://doi.org/10.59282/reincisol.V3(6)545-567)
- Mahiba, G., Mélois, A., & Mankibi, M. (2023). Experimental and numerical analysis of a new wind tunnel for building and mechanical ventilation components performance assessment. *E3S Web of Conferences*, 396.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339602036>
- Mahmood, F. H., Resen, A. K., & Khamees, A. B. (2020). Wind characteristic analysis based on Weibull distribution of Al-Salman site, Iraq. *Energy Reports*, 6(September 2019), 79–87.
<https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.10.021>
- Marín P, M. J. (2022). *Métodos para la estimación de la producción de energía eólica*. <https://doi.org/http://hdl.handle.net/10366/151722>
- Mirzaei, R., Mirhosseini, M., & Farajollahi, M. (2023). *Aerodynamic design of horizontal axis wind turbine using different airfoils*. 11(4), 387–399.
<https://doi.org/10.22059/ees.2023.1998814.1420>
- Pérez, M. (2023). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL ROTOR DE UNA TURBINA EÓLICA TIPO SAVONIUS*.
<https://doi.org/http://rinfi.fi.mdp.edu.ar/xmlui/handle/123456789/764>
- Niño, Y. A., Nieves, M. E., & Cortés, C. A. (2023). Desafíos de la transición energética sostenible: perspectivas para la investigación y la gestión.

Revista Facultad de Ciencias Económicas: Investigación y Reflexión, 31(2), 137–158. <https://doi.org/10.18359/RFCE.6423>

- Organización Latinoamericana de Energía (OLADE). (2023). *Estrategia para una América Latina y el Caribe más renovable*. <https://www.olade.org/publicaciones/estrategia-para-una-america-latina-y-el-caribe-mas-renovable/>
- Peña Hernández, L. Á., Rodríguez Muñoz, J. L., Pacheco Cedeño, J. S., Ituna Yudonago, J. F., & Borja Soto, C. E. (2024). Análisis de desplazamientos resultantes en palas de aerogeneradores verticales empleando SolidWorks. *Ingenio y Conciencia Boletín Científico de La Escuela Superior Ciudad Sahagún*, 11(22), 69–79. <https://doi.org/10.29057/escs.v11i22.12438>
- Peng, H. Y., Zhong, B. W., Hu, G., & Liu, H. J. (2022). Optimization analysis of straight-bladed vertical axis wind turbines in turbulent environments by wind tunnel testing. *Energy Conversion and Management*, 257. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115411>
- Photoelectric Incremental Rotary Encoder*. (n.d.).
- Pöschke, F., Petrović, V., Berger, F., Neuhaus, L., Hölling, M., Kühn, M., & Schulte, H. (2022). Model-based wind turbine control design with power tracking capability: A wind-tunnel validation. *Control Engineering Practice*, 120. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2021.105014>
- Pranta, M. H., Rabbi, M. S., & Roshid, M. M. (2021). A computational study on the aerodynamic performance of modified savonius wind turbine. *Results in Engineering*, 10. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2021.100237>
- Quiroz, D. (2023). “Análisis de un micro aerogenerador omnidireccional para generar electricidad en entornos rurales de la región Junín.” <https://doi.org/http://hdl.handle.net/20.500.12894/9359>
- Raffaele, L., van Beeck, J., & Bruno, L. (2021). Wind-sand tunnel testing of surface-mounted obstacles: Similarity requirements and a case study on a Sand Mitigation Measure. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 214. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2021.104653>
- Rajamohan, S., Vinod, A., Pragada Venkata Sessa Aditya, M., Gopalakrishnan Vadivudaiyanayaki, H., Nhanh Nguyen, V., Arıcı, M., Nižetić, S., Thai Le,

- T., Hidayat, R., & Tuyen Nguyen, D. (2022). Approaches in performance and structural analysis of wind turbines – A review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 53.
<https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102570>
- Reinoso, S. K., Carrasco, B. A., & Castillo, B. A. (2024). *Diseño y Fabricación de un Generador Eólico de Baja Capacidad para Sectores sin Cableado Eléctrico*. 9(7), 2304–2324.
<https://doi.org/https://doi.org/10.23857/pc.v9i7.7628>
- REN21. (2023). Renewables 2023 Global Status Report Collection, Global Overview. Paris: REN21 Secretariat), 1–49. www.ren21.net/gsr-2023
- Rodríguez, C., Ovando, N., López, N. de J., Méndez, A., & Romellón, M. J. (2024). Concha de ostión como agregado fino para la elaboración de morteros. *REVISTA IPSUMTEC*, 7(2), 28–37.
<https://doi.org/https://doi.org/10.61117/ipsumtec.v7i2.305>
- Rodríguez, F. K. (2021). *Optimización técnica y económica para la interconexión de dos parques eólicos en México , incluyendo CAPEX y OPEX durante la vida de la planta*. <https://doi.org/http://hdl.handle.net/11531/47105>
- Guillamón, D. S. (2021). *Aerogeneradores: Evolución Histórica Y Sus Desafíos Tribológicos*. <https://doi.org/http://hdl.handle.net/10317/9671>
- Sanz, A. (2020). *Imperium Maris: Historia de la Armada romana imperial y republicana - Arturo S. Sanz - Google Libros*.
- Sensor de velocidad del viento Salida Modbus_RS485_Analógico_0-5 V_4-20 mA*. (n.d.).
- Serban, A., Paraschiv, L. S., & Paraschiv, S. (2020). Assessment of wind energy potential based on Weibull and Rayleigh distribution models. *Energy Reports*, 6(April), 250–267. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.08.048>
- Serrano, A. E., & Serrano, A. E. (2021). Diseño de una turbina eólica Savonius de eje vertical de 30W. *Exploraciones, Intercambios y Relaciones Entre El Diseño y La Tecnología*, 57–79.
<https://doi.org/10.16/CSS/JQUERY.DATATABLES.MIN.CSS>
- Teimourian, H., Abubakar, M., Yildiz, M., & Teimourian, A. (2022). A Comparative Study on Wind Energy Assessment Distribution Models: A Case Study on

Weibull Distribution. *Energies*, 15(15), 1–15.

<https://doi.org/10.3390/en15155684>

Wind Energy Engineering: A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines - Google Books. (n.d.).

Wu, W., & Skye, H. M. (2021). Residential net-zero energy buildings: Review and perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 142, 110859.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110859>

Zhang, Y., Cardiff, P., & Keenahan, J. (2021). Wind-induced phenomena in long-span cable-supported bridges: A comparative review of wind tunnel tests and computational fluid dynamics modelling. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(4), 1–26. <https://doi.org/10.3390/app11041642>

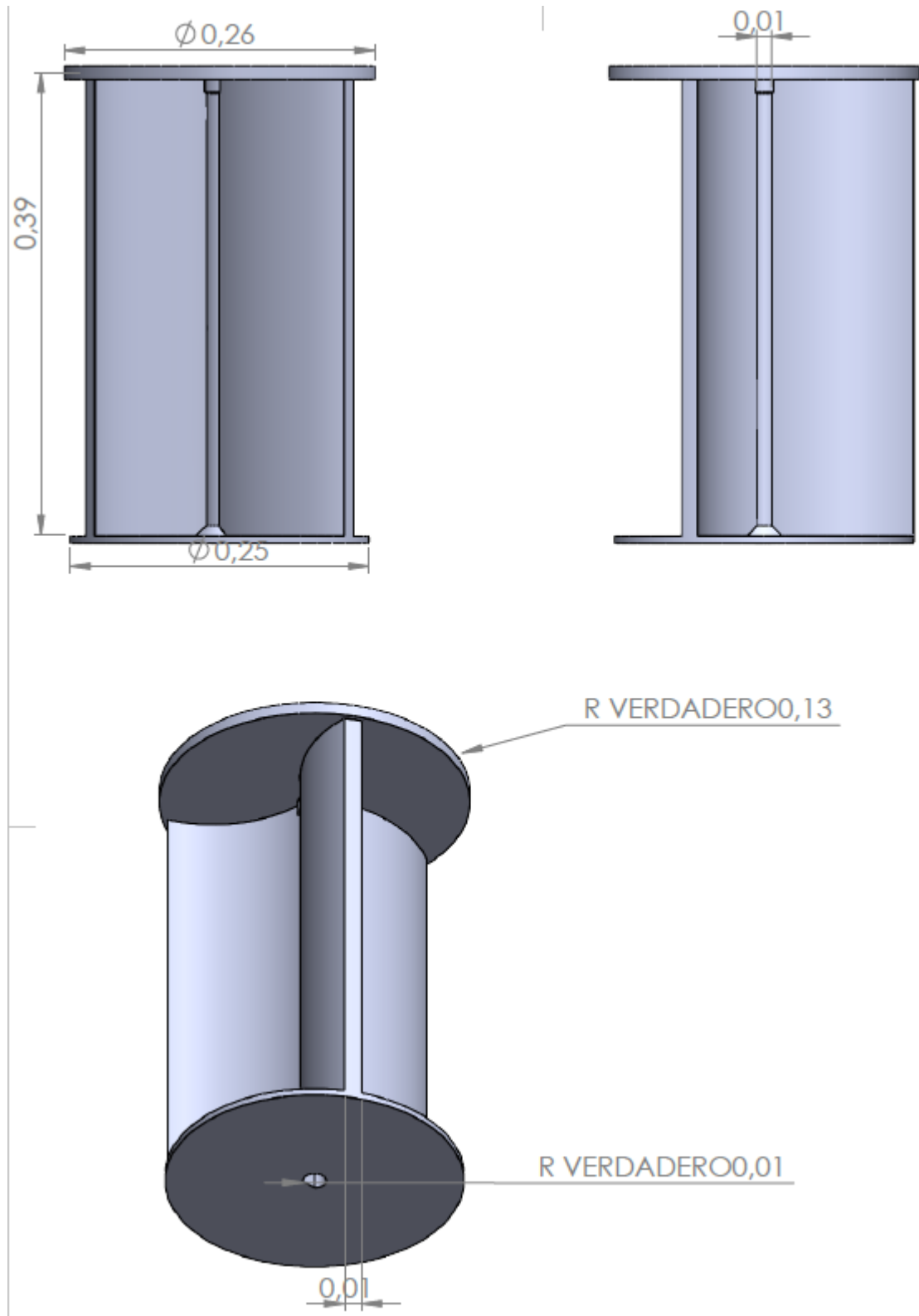
Zhao, Z., Wang, D., Wang, T., Shen, W., Liu, H., & Chen, M. (2022). A review: Approaches for aerodynamic performance improvement of lift-type vertical axis wind turbine. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 49, 101789.

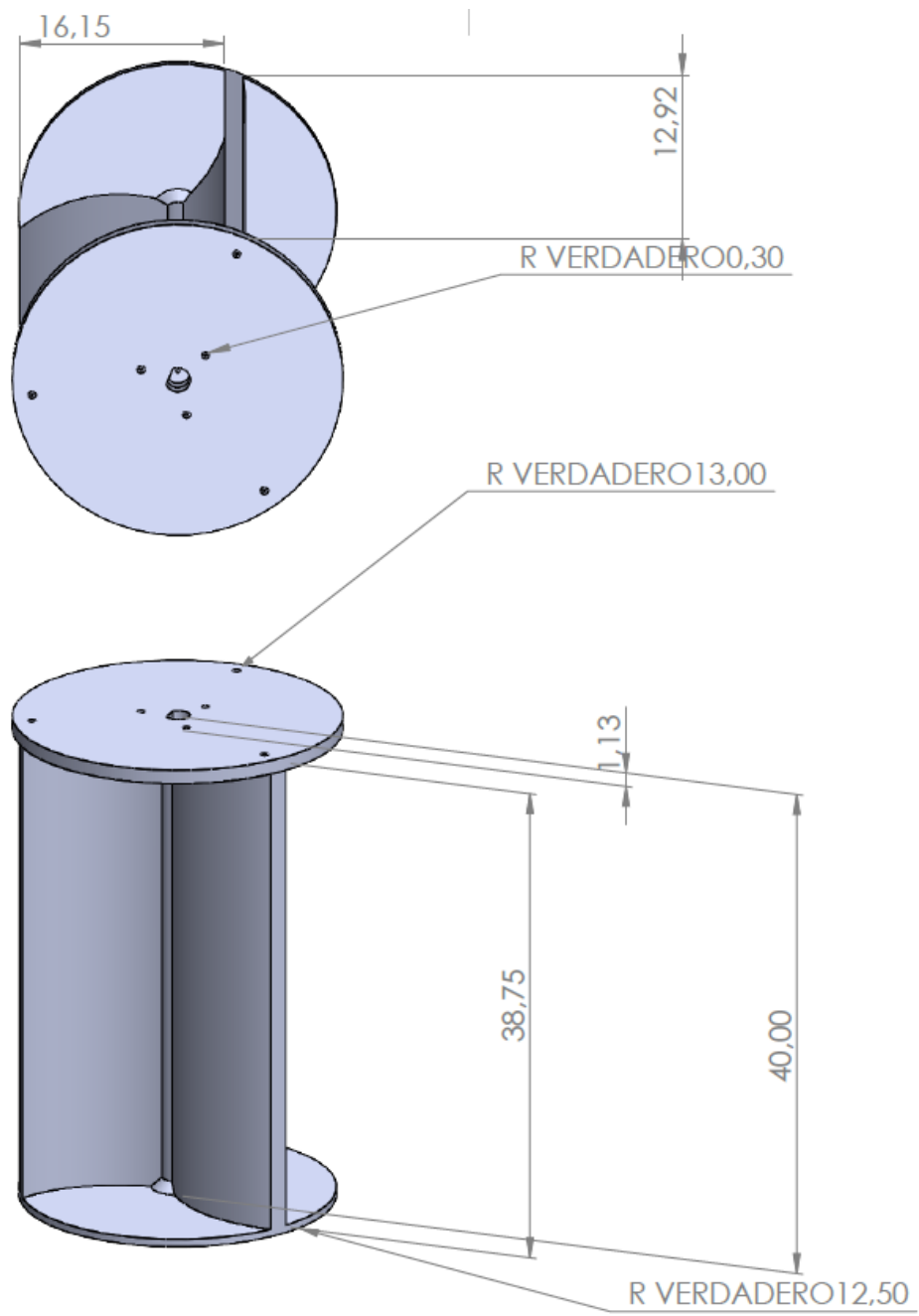
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101789>

Zheng, Y., Ge, Y., Muhsen, S., Wang, S., Elkamchouchi, D. H., Ali, E., & Ali, H. E. (2023). New ridge regression, artificial neural networks and support vector machine for wind speed prediction. *Advances in Engineering Software*, 179, 103426. <https://doi.org/10.1016/J.ADVENGSOFT.2023.103426>

ANEXOS

PROTOTIPO ORIGINAL





PROTOTIPO ESCALADO