

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN

FACULTAD DE INGENIERÍA



**UNIVERSIDAD NACIONAL
DE JAÉN**

**CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA Y
ELÉCTRICA**

**“DISEÑO DE PROTOTIPO DE TURBINA EÓLICA DE EJE
VERTICAL PARA ENERGIZAR SISTEMA DE SENSORES
REMOTOS DEL CENTRO VULCANOLÓGICO NACIONAL-
IGP”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO
MECÁNICO ELECTRICISTA**

Autores: Bach. Darwin Jesús Altamirano Silva

Bach. Emerson Junior Vásquez Mejía

Asesor: MSc. Ing. Henry Oswaldo Pinedo Nava

Línea de Investigación: Energías alternativas

JAÉN – PERÚ, DICIEMBRE, 2025

Darwin Jesús Altamirano Silva Emerson Junior Vás...

DISEÑO DE PROTOTIPO DE TURBINA EÓLICA DE EJE VERTICAL PARA ENERGIZAR SISTEMA DE SENSORES REMOT...

 Quick Submit Quick Submit Universidad Nacional de Jaen

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::1:3434548353

Fecha de entrega

5 dic 2025, 10:14 a.m. GMT-5

Fecha de descarga

5 dic 2025, 10:19 a.m. GMT-5

Nombre del archivo

Emerson_V_squez_Mej_a_Informe_-_EMERSON_JUNIOR_VASQUEZ_MEJIA.pdf

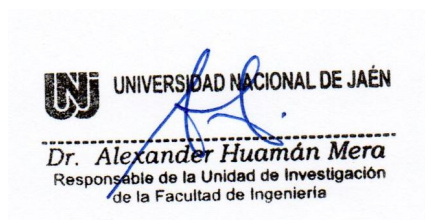
Tamaño del archivo

13.0 MB

146 páginas

23.263 palabras

130.737 caracteres






4% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe


- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 15 palabras)

Fuentes principales

- 4%  Fuentes de Internet
- 0%  Publicaciones
- 3%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

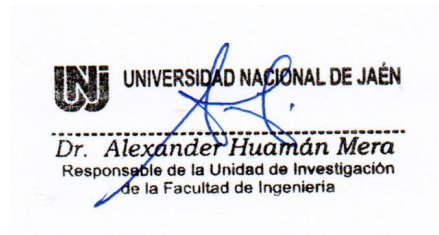
Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión

-  **Caracteres reemplazados**
59 caracteres sospechosos en N.º de páginas
Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.



FORMATO 03: ACTA DE SUSTENTACIÓN

En la ciudad de Jaén, el día miércoles 17 de diciembre del 2025, siendo las 16:30 horas, se reunieron los integrantes del Jurado:

Presidente : Dr. Edwin Carlos Lenin Felix Poicon
Secretario : Mg. José Andrés Fernández Mera
Vocal : Mtro. Marco Luis Pérez Silva

Para evaluar la Sustentación del Informe Final:

- () Trabajo de Investigación
(X) Tesis
() Trabajo de Suficiencia Profesional

Titulado: **“DISEÑO DE PROTOTIPO DE TURBINA EÓLICA DE EJE VERTICAL PARA ENERGIZAR SISTEMA DE SENSORES REMOTOS DEL CENTRO VULCANOLÓGICO NACIONAL - IGP”**

Presentado por los bachilleres: **Darwin Jesús Altamirano Silva y Emerson Junior Vásquez Mejía**, de la Escuela Profesional de INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA.

Después de la sustentación y defensa, el Jurado acuerda:

- (X) Aprobar () Desaprobar (X) Unanimidad () Mayoría

Con la siguiente mención:

- | | | |
|----------------|------------|--------|
| a) Excelente | 18, 19 20 | () |
| b) Muy bueno | 16, 17 | (17) |
| c) Bueno | 14, 15 | () |
| d) Regular | 13 | () |
| e) Desaprobado | 12 ó menos | () |


Siendo las 17:00 horas del mismo día, el Jurado concluye el acto de sustentación confirmando con la suscripción de la presente.



Dr. Edwin Carlos Lenin Felix Poicon
Presidente Jurado Evaluador



Mg. José Andrés Fernández Mera
Secretario Jurado Evaluador



Mtro. Marco Luis Pérez Silva
Vocal Jurado Evaluador



“Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana”

ANEXO N°06:

**DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD Y DE NO PLAGIO
DE LA TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN (PREGRADO)**

Nosotros, **Darwin Jesús Altamirano Silva** y **Emerson Junior Vásquez Mejía**, egresados de la carrera Profesional de **Ingeniería Mecánica y Eléctrica** de la **Facultad de Ingeniería** de la Universidad Nacional de Jaén, identificados (a) con DNI **74229160** y **71539862**.

Declaramos bajo juramento que:

1. Somos Autores del trabajo titulado:

“Diseño de prototipo de turbina eólica de eje vertical para energizar sistema de sensores remotos del Centro Vulcanológico Nacional-IGP”.

Asesorado por el Mg. Henry Oswaldo Pinedo Nava.

El mismo que presentamos bajo la modalidad de bachiller para optar; el Título Profesional de Ingeniero Mecánico Electricista.

2. El texto de nuestro trabajo final respeta y no vulnera los derechos de terceros, incluidos los derechos de propiedad intelectual. En el sentido, el texto de nuestro trabajo final no ha sido plagiado total ni parcialmente, para la cual hemos respetado las normas internacionales de citas y referencias de las fuentes consultadas.
3. El texto del trabajo final que presentamos no ha sido publicado ni presentado antes en cualquier medio electrónico o físico.
4. La investigación, los resultados, datos, conclusiones y demás información presentada que atribuimos a nuestra autoría son veraces.
5. Declaramos que nuestro trabajo final cumple con todas las normas de la Universidad Nacional de Jaén.
6. Somos conscientes de que el hecho de no respetar los derechos de autor y hacer plagio, es objeto de sanciones universitarias y/o legales.

El incumplimiento de lo declarado da lugar a responsabilidad de los declarantes, en consecuencia; a través del presente documento asumimos frente a terceros, la Universidad Nacional de Jaén y/o la Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado incluye responsabilidad pecuniaria incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se ocasionen.

Fecha: Jaén, 31 de diciembre del 2025.

Darwin Jesús Altamirano Silva

Emerson Junior Vásquez Mejía

ÍNDICE

I	INTRODUCCIÓN.....	10
1.1.	Antecedentes	10
1.2.	Problemática	13
1.3.	Justificación	15
1.4.	Objetivos	18
1.4.1.	Objetivo General.....	18
1.4.2.	Objetivos Específicos.....	18
II	MATERIALES Y MÉTODOS.....	18
2.1.	Instrumentos de recolección de datos	18
2.2.	Software	29
2.3.	Ubicación del área de estudio	30
2.3.1.	Ubicación geográfica de Arequipa.....	30
2.3.2.	Ubicación de pruebas de laboratorio.....	31
2.4.	Marco Metodológico.....	31
2.4.1.	Enfoque de Investigación.....	31
2.4.2.	Método de Investigación.....	32
2.4.3.	Tipos de Investigación	32
2.4.4.	Diseño de Investigación.....	33
2.5.	Base teórica.....	33
2.5.1.	Aerogeneradores de eje vertical.....	33
2.5.2.	Clasificación de los aerogeneradores de eje vertical	33
2.5.3.	Eficiencia de los aerogeneradores según el coeficiente de potencia C_p	34
2.5.4.	Parámetros Geométricos de desempeño en las Turbinas de eje Vertical.....	39
2.6.	Procedimiento	47
2.6.1.	Determinación de la demanda energética y el potencial eólico	47
2.6.2.	Requerimientos de la turbina	49
2.6.3.	Cálculos para el Dimensionamiento de la VAWT.....	50

2.6.4.	Diseño de la turbina Savonius.....	61
2.6.5.	Simulación de la turbina Savonius.....	66
2.6.6.	Manufactura del prototipo de la turbina.....	77
2.6.7.	Realización de las pruebas de laboratorio.....	80
III	RESULTADOS	86
3.1.	Requerimiento energético	86
3.2.	Potencial eólico	86
3.3.	Diseño mecánico de la turbina eólica de eje vertical	88
3.4.	Simulación de esfuerzos de la turbina eólica de eje vertical	89
3.5.	Simulación CFD de la turbina eólica de eje vertical.....	92
3.6.	Manufactura de la turbina Savonius	93
3.7.	Análisis del rendimiento energético.....	93
IV	DISCUSIÓN.....	109
V	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	113
5.1.	Conclusiones	113
5.2.	Recomendaciones	114
VI	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	115
	DEDICATORIA	120
	AGRADECIMIENTOS	121
	ANEXOS	122

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	<i>Especificaciones técnicas del módulo MAX485 Conversor RS485 a Serial TTL</i>	19
Tabla 2	<i>Especificaciones técnicas del Arduboard Nano CH340G mini-USB</i>	20
Tabla 3	<i>Especificaciones técnicas del Módulo Lector de memoria Micro SD</i>	21
Tabla 4	<i>Especificaciones técnicas del Módulo RTC</i>	22
Tabla 5	<i>Especificaciones técnicas del Monitor de corriente voltaje</i>	23
Tabla 6	<i>Especificaciones técnicas del Transmisor de velocidad del viento RS485</i>	24
Tabla 7	<i>Especificaciones técnicas del Módulo Sensor LDR</i>	25
Tabla 8	<i>Especificaciones técnicas de la Pinza Amperimétrica</i>	26
Tabla 9	<i>Especificaciones Técnicas del Convertidor de voltaje XL6009</i>	27
Tabla 10	<i>Especificaciones técnicas de la Pantalla Alfanumérica LCD 1602</i>	28
Tabla 11	<i>Valores alcanzados del límite de Betz</i>	36
Tabla 12	<i>Estudios realizados para determinar el AR óptimo</i>	41
Tabla 13	<i>Estudios realizados para determinar el TA óptimo</i>	43
Tabla 14	<i>Estudios realizados para determinar el OR óptimo</i>	44
Tabla 15	<i>Estudios realizados para determinar el número de álabes óptimo</i>	46
Tabla 16	<i>Velocidades de arranque de turbinas Savonius</i>	47
Tabla 17	<i>Tabla de comparación si el par útil vence la resistencia</i>	60
Tabla 18	<i>Propiedades de los materiales</i>	63
Tabla 19	<i>Tabla de asignación de pines del microcontrolador</i>	83

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Paneles fotovoltaicos del Centro Vulcanológico Nacional</i>	15
Figura 2 <i>Modulo MAX485 Conversor RS485 a Serial TTL</i>	19
Figura 3 <i>Arduboard Nano CH340G mini-USB</i>	20
Figura 4 <i>Módulo Lector de memoria Micro SD Card 74LVC125A</i>	21
Figura 5 <i>Módulo RTC DS3231 + EEPROM AT24C32 (I2C)</i>	22
Figura 6 <i>Monitor de corriente voltaje, high side INA219</i>	23
Figura 7 <i>Transmisor de velocidad del viento RS485 (0~32,4 m/s)</i>	24
Figura 8 <i>Módulo Sensor LDR</i>	25
Figura 9 <i>Pinza amperimétrica</i>	26
Figura 10 <i>Convertidor de voltaje XL6009</i>	27
Figura 11 <i>Pantalla Alfanumérica LCD 1602</i>	28
Figura 12 <i>Ubicación geográfica de la zona de recopilación de datos</i>	30
Figura 13 <i>Ubicación geográfica de la zona de pruebas de funcionamiento</i>	31
Figura 14 <i>Aerogeneradores de eje vertical</i>	34
Figura 15 <i>Análisis del potencial eólico</i>	35
Figura 16 <i>Límite de Betz</i>	37
Figura 17 <i>Valores del coeficiente de potencia en función de TSR de cada aerogenerador</i> ...	38
Figura 18 <i>Rotor tipo Savonius con diferentes relaciones de aspecto</i>	40
Figura 19 <i>Rotor tipo Savonius con diferentes ángulos de torsión</i>	42
Figura 20 <i>Rotor tipo Savonius con diferentes relaciones de superposición</i>	44
Figura 21 <i>Rotor tipo Savonius con diferentes números de álabes</i>	45
Figura 22 <i>Velocidades de viento en zona de estudio en el departamento de Arequipa</i>	48
Figura 23 <i>Características geométricas de la turbina</i>	54
Figura 24 <i>Creación de los álabes</i>	62
Figura 25 <i>Álabes con un ángulo de torsión de 90°</i>	62
Figura 26 <i>Diseño del soporte de la turbina</i>	64
Figura 27 <i>Diseño de la cubierta metálica</i>	64
Figura 28 <i>Chumacera de pared</i>	65
Figura 29 <i>Polea para el eje del generador</i>	65
Figura 30 <i>Polea para el eje de la turbina</i>	66
Figura 31 <i>Preparación de la geometría</i>	67
Figura 32 <i>Enmallado de la zona rotacional</i>	68

Figura 33 <i>Enmallado del túnel de viento</i>	69
Figura 34 <i>Enmallado para la parte superior e inferior del cilindro</i>	69
Figura 35 <i>Configuración de los parámetros del apartado Models</i>	71
Figura 36 <i>Configuración en la sección de Boundary Conditions, la entrada del tunel</i>	72
Figura 37 <i>Configuración en la sección de Boundary Conditions, la salida del tunel</i>	73
Figura 38 <i>Configuración de los parámetros en la sección de Dynamic Mesh</i>	74
Figura 39 <i>Definición de las zonas de mallas dinámicas</i>	75
Figura 40 <i>Configuración de la sección de Solutions</i>	76
Figura 41 <i>Impresión de turbina a escala</i>	78
Figura 42 <i>Generador eléctrico parte externa e interna</i>	79
Figura 43 <i>Diagrama de conexiones del circuito de medición</i>	83
Figura 44 <i>Diseño y diagrama esquemático de la PCB</i>	84
Figura 45 <i>Frecuencia del viento desde distintas direcciones a lo largo del año</i>	86
Figura 46 <i>Variación promedio de la velocidad del viento a lo largo del día por cada mes</i> ..	87
Figura 47 <i>Mapa de calor de la velocidad de viento en la estación de monitoreo</i>	87
Figura 48 <i>Diseño de la turbina eólica tipo Savonius</i>	88
Figura 49 <i>Diseño del ensamblaje de la turbina eólica de eje vertical</i>	89
Figura 50 <i>Distribución de la Presión Importada (MPa) sobre las palas</i>	90
Figura 51 <i>Resultados de la Deformación Total (mm) de la turbina</i>	91
Figura 52 <i>Simulación de la turbina Savonius sometida a Viento</i>	92
Figura 53 <i>Simulación de la turbina Savonius sometida a Viento de vista superior</i>	93
Figura 54 <i>Circuito de medición ensamblado en la PCB diseñada</i>	94
Figura 55 <i>Análisis del voltaje y corriente generados durante el día 1</i>	95
Figura 56 <i>Análisis de potencia, velocidad del viento y energía acumulada en el día 1</i>	96
Figura 57 <i>Relación entre la velocidad del viento y la potencia generada en el día 1</i>	97
Figura 58 <i>Análisis del voltaje y corriente generados durante el día 2</i>	98
Figura 59 <i>Análisis de potencia, velocidad del viento y energía acumulada en el día 2</i>	98
Figura 60 <i>Relación entre la velocidad del viento y la potencia generada en el día 2</i>	99
Figura 61 <i>Análisis del voltaje y corriente generados durante el día 3</i>	100
Figura 62 <i>Análisis de potencia, velocidad del viento y energía acumulada en el día 3</i>	100
Figura 63 <i>Relación entre la velocidad del viento y la potencia generada en el día 3</i>	101
Figura 64 <i>Análisis del voltaje y corriente generados durante el día 4</i>	102
Figura 65 <i>Análisis de potencia, velocidad del viento y energía acumulada en el día 4</i>	102
Figura 66 <i>Relación entre la velocidad del viento y la potencia generada en el día 4</i>	103

Figura 67 <i>Análisis del voltaje y corriente generados durante el día 5</i>	104
Figura 68 <i>Análisis de potencia, velocidad del viento y energía acumulada en el día 5</i>	105
Figura 69 <i>Relación entre la velocidad del viento y la potencia generada en el día 5</i>	105
Figura 70 <i>Análisis del voltaje y corriente generados durante el día 6</i>	106
Figura 71 <i>Análisis de potencia, velocidad del viento y energía acumulada en el día 6</i>	107
Figura 72 <i>Relación entre la velocidad del viento y la potencia generada en el día 6</i>	107
Figura 73 <i>Comparación de la energía acumulada de los 6 días de medición</i>	108
Figura 74 <i>Valores promedios de la velocidad de viento del día 1 al día 6</i>	109
Figura 75 <i>Clasificación de Niveles de Madurez Tecnológica (TRL)</i>	112

RESUMEN

El Centro Vulcanológico Nacional del Perú enfrenta limitaciones energéticas en sus estaciones de monitoreo debido a la dependencia exclusiva de sistemas fotovoltaicos, cuya eficiencia se ve afectada por la acumulación de ceniza, polvo y humedad. Ante esta problemática, se desarrolló el diseño, fabricación y evaluación de un prototipo de turbina eólica de eje vertical tipo Savonius como fuente complementaria al sistema fotovoltaico existente. El diseño se realizó mediante herramientas CAD y CAE, obteniéndose una turbina de 1.30 m de altura y 0.52 m de diámetro, optimizada estructuralmente para operar en condiciones de viento variable. Las simulaciones CFD confirmaron un flujo aerodinámico estable con velocidades entre 0 y 10 m/s, mientras que las pruebas experimentales mostraron potencias máximas en el segundo y tercer día con 11.84 W y 11.30 W respectivamente, con una energía acumulada de hasta 8.0958 Watt-hora/día y un promedio general de 7.21 Watts-hora/día. Los resultados demostraron la viabilidad técnica y funcional del sistema para cubrir parcialmente la demanda energética de 15 Watt-hora de los sensores de monitoreo. Se concluye que la implementación de la turbina eólica complementará eficazmente el sistema solar, mejorando la autonomía y resiliencia energética de las estaciones, y asegurando un monitoreo volcánico continuo y confiable.

Palabras clave: Energía eólica, turbina Savonius, autonomía energética, monitoreo volcánico, energía renovable.

ABSTRACT

The National Volcanological Center of Peru faces energy limitations at its monitoring stations due to their exclusive reliance on photovoltaic systems, whose efficiency is affected by the accumulation of ash, dust, and moisture. To address this issue, the design, fabrication, and evaluation of a vertical-axis Savonius wind turbine prototype were carried out as a complementary source to the existing photovoltaic system. The design was developed using CAD and CAE tools, resulting in a turbine measuring 1.30 m in height and 0.52 m in diameter, structurally optimized to operate under variable wind conditions. CFD simulations confirmed a stable aerodynamic flow with wind speeds between 0 and 10 m/s, while experimental tests recorded maximum power outputs on the second and third days of 11.84 W and 11.30 W, respectively. The system achieved an accumulated energy of up to 8.0958 Watt-hours per day and an overall average of 7.21 Watt-hours per day. The results demonstrated the technical and functional feasibility of the system to partially meet the 15 Watt-hour energy demand of the monitoring sensors. It is concluded that the implementation of the wind turbine will effectively complement the solar system, enhancing the energy autonomy and resilience of the stations and ensuring continuous and reliable volcanic monitoring.

Keywords: wind energy, Savonius turbine, energy autonomy, volcanic monitoring, renewable energy.

I INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

Con el objetivo de establecer un método de diseño avanzado que permita la optimización integral de una turbina Savonius, se tomó como referencia principal el estudio desarrollado por Torres et al. (2022). Este estudio propuso un método de diseño novedoso que combina dinámica de fluidos computacional (CFD) 3D a gran escala, una superficie de respuesta (RS) construida con 340 simulaciones y técnicas de optimización matemática (algoritmos genéticos NSGA-II y programación cuadrática secuencial SQP) para maximizar el coeficiente de potencia (C_p) de una turbina Savonius. La configuración óptima resultante presentó una Relación de Aspecto (AR) de 8.38, una Relación de Superposición (OR) de 0.08, un Ángulo de Torsión (TA) de 174.05° y 2 álabes, alcanzando un C_p máximo de 0.21 a una velocidad de viento de 12 m/s, lo que se traduce en una potencia mecánica máxima de aproximadamente 160 W. En la presente investigación se discrepa levemente de la generalización de los resultados, ya que la optimización se realizó para un TSR fijo de 0.7, y el C_p óptimo final de 0.21 se validó en un TSR de 0.75, lo que podría indicar que el óptimo global podría variar ligeramente si el TSR se incluyera como variable de diseño. Esta referencia fue seleccionada por ser el estudio más completo y metodológicamente avanzado encontrado sobre optimización de turbinas Savonius. Los valores óptimos de los parámetros geométricos (AR, OR, TA) servirán como base para el diseño preliminar. Además, el hecho de que el par instantáneo permanezca siempre positivo en el diseño optimizado representa un indicador clave de rendimiento que se procurará replicar.

Farozan et al. (2025) llevaron a cabo una investigación experimental para evaluar el rendimiento de turbinas Savonius en entornos de baja velocidad de viento, con un enfoque particular en la capacidad de autoarranque. En el estudio, se diseñaron y probaron en un túnel de viento siete rotores con variaciones en su relación de aspecto, número de etapas y ángulo de

torsión. El hallazgo principal indicó que, si bien un rotor convencional (una etapa, $AR = 2.0$, sin torsión) logró un coeficiente de potencia (C_p) de 0.190, presentaba grandes fluctuaciones y zonas de par negativo que resultaban en una alta velocidad media de autoarranque (5.0 m/s). Sin embargo, los rotores multi-etapa y, en particular, aquellos con palas torsionadas a 90° , eliminaron las zonas de par negativo y redujeron significativamente la velocidad de autoarranque a un valor constante de 2.5 m/s. La significancia del estudio se evidenció al correlacionar los datos experimentales con las características de viento de un sitio urbano real (velocidad media de 1.98 m/s), donde la turbina con torsión de 90° ($C_p = 0.184$) generó una potencia promedio hasta 5.1 veces mayor que la turbina convencional, demostrando que en entornos de viento bajo una baja velocidad de corte es un parámetro más crítico que la máxima eficiencia aerodinámica. La importancia de esta investigación y su conexión con el presente proyecto radica en la demostración experimental de que, en entornos de vientos bajos, la capacidad de autoarranque es un factor más determinante para el rendimiento energético real que el coeficiente de potencia máximo.

En la investigación de Shahriare et al. (2025) presentaron un estudio numérico basado en CFD para mejorar el rendimiento aerodinámico de turbinas Savonius mediante modificaciones en el diseño de las palas. Se analizaron dos modelos modificados frente al modelo semicircular convencional, empleando el modelo de turbulencia SST $k-\omega$ en ANSYS Fluent. Los resultados mostraron que a una relación de velocidad de punta (TSR) de 1, los modelos modificados aumentaron el coeficiente de potencia en 8.5% y 11.6%, respectivamente, respecto al diseño base, alcanzando valores máximos de C_p de 0.34 y 0.35 frente al 0.32 del convencional. Además, los diseños mejorados redujeron la formación de estelas y distribuyeron de manera más uniforme la presión, lo que se tradujo en mayores coeficientes de torque. El trabajo resalta el potencial de las simulaciones CFD para evaluar y optimizar variaciones geométricas sin incurrir en elevados costos experimentales, aunque al

ser un estudio bidimensional queda pendiente validar los resultados en condiciones tridimensionales y de campo. Se está de acuerdo con la pertinencia de los cambios geométricos propuestos, ya que aportan mejoras medibles en el rendimiento aerodinámico. Este artículo fue escogido porque aporta un enfoque metodológico aplicable a la tesis, en tanto demuestra cómo las herramientas de simulación pueden orientar el diseño de prototipos más eficientes para contextos de baja velocidad de viento.

Didane et al. (2024) realizaron una revisión exhaustiva que sintetiza las estrategias recientes para superar la principal limitación de las turbinas eólicas de eje vertical (VAWT): su baja eficiencia de conversión. El estudio concluye que las mejoras se categorizan en técnicas activas, que modifican directamente el rotor (optimizando la relación de aspecto, el número de etapas, el ángulo de torsión de las palas, la implementación de rotores contrarrotantes - CRVAWT- o la adición de palas internas), y técnicas pasivas, que optimizan el flujo de entrada mediante el uso de deflectores, difusores o álabes guía. La revisión destaca que el diseño de rotores contrarrotantes es particularmente prometedor, logrando eficiencias comparables a las turbinas de eje horizontal. Asimismo, subraya la importancia crítica de la ubicación geográfica, señalando que un emplazamiento adecuado que garantice un flujo uniforme es tan crucial como la optimización tecnológica del rotor para maximizar la producción de energía. Se considera que esta revisión es sumamente valiosa por su amplitud y estructuración clara de las estrategias de mejora, ofreciendo una hoja de ruta integral para cualquier investigador en el campo. Este artículo es importante para la siguiente tesis porque sirve como un marco conceptual fundamental para la tesis, al ofrecer una visión panorámica y actualizada de las estrategias existentes para optimizar VAWT. Su utilidad radica en que clasifica y explica claramente los parámetros de diseño (como la relación de aspecto y el ángulo de torsión) que serán investigados experimentalmente, y sustenta la justificación de por qué es crucial mejorar no

solo la eficiencia aerodinámica (C_p) sino también la capacidad de autoarranque, especialmente para entornos de viento bajo.

K. A. H. Al-Gburi et al. (2023) desarrollaron un estudio integral para mejorar el rendimiento de turbinas eólicas Savonius de eje vertical mediante un enfoque que combina análisis numérico e investigaciones experimentales. Los investigadores implementaron una metodología de optimización que incorporó una nueva geometría de pala con guía de flujo en el entrehierro, analizando las características aerodinámicas mediante el software ANSYS CFX 3D. Utilizaron el método de diseño de experimentos (DOE) con el software estadístico Minitab, considerando como parámetros cruciales los perfiles de las palas, la relación de solape y el número de palas, con el coeficiente de potencia como función objetivo. Los resultados demostraron que el diseño optimizado "OR0.109BS2BN2" superó a la turbina de referencia con un coeficiente de potencia 22.8% mayor, identificándose además una relación de compromiso entre el flujo giratorio a través de la guía de flujo y la relación de bloqueo resultante de la reducción del ancho del canal causado por la longitud extendida de la punta de la pala. La relevancia de este estudio para la presente investigación radica en su enfoque metodológico integral y sus hallazgos sobre optimización geométrica de palas, los cuales servirán como referencia fundamental para el desarrollo de la tesis centrada en la mejora del rendimiento de turbinas eólicas de eje vertical mediante técnicas de optimización paramétrica y análisis computacional de fluidos.

1.2. Problemática

Las actividades volcánicas son repentinas, y a pesar del avance la ciencia, nadie ha logrado hasta la fecha poder predecir la ocurrencia de estas. Sin embargo, los sistemas de alerta temprana basados en el monitoreo con sensores ubicados cerca de la zona del volcán, permite percibir comportamientos predecesores a una actividad volcánica que con su oportuna detección permitirá emitir la alerta temprana a las zonas pobladas aledañas al volcán, esto

también es lo que da a entender en su artículo (Mota et al., 2024) y (Rodríguez & Nadeau, 2015), por otra parte (Mota et al., 2024) incluye el uso de datos multiescalar para garantizar un monitoreo más completo en zonas remotas.

En la actualidad, el Centro Vulcanológico Nacional utiliza dichos sistemas de sensores ubicados en las faldas de los volcanes que actualmente se energizan con paneles solares que debido a la actividad continua del volcán que monitorean, pueden eventualmente cubrirse con capas de cenizas, a esto, sumado la altura genera humedad creando una capa que impide la captación eficiente de los rayos solares (ver Figura 1) poniendo en riesgo que se asegure un monitoreo continuo del estado situacional del volcán. Esta situación requiere que el personal realice constantes visitas técnicas de mantenimiento a los paneles en zonas muy alejadas y remotas donde se encuentran estos equipos, generando vacíos en la recolección de datos durante los periodos que el sistema queda sin energía por la cobertura de los paneles solares.

Por otro lado, los sistemas fotovoltaicos presentan una limitación intrínseca, no pueden cubrir la demanda energética de manera continua durante todo el día debido a su restringido período de generación solar. A ello se suma que las temporadas de lluvia reducen su eficiencia al disminuir la radiación disponible. En consecuencia, se requerirían baterías de mayor capacidad, lo que incrementa los costos, complica el mantenimiento y limita la posibilidad de implementar sistemas de videovigilancia, una medida esencial dada la vulnerabilidad de estos equipos frente a robos, lo que constituye un problema adicional.

Figura 1

Paneles fotovoltaicos del Centro Vulcanológico Nacional



Nota: La figura muestra el mantenimiento de los paneles fotovoltaicos cercano a los volcanes en actividad. Tomada de (IGP, 2023).

1.3. Justificación

Práctica

El uso de una turbina eólica de eje vertical responde a la necesidad práctica de garantizar un suministro constante de energía en las estaciones de monitoreo volcánico del Centro Vulcanológico Nacional ubicadas en zonas remotas sin acceso a la red eléctrica (ver Figura 1). Dado a que utilizan los paneles fotovoltaicos, estos se ven afectados por la acumulación de ceniza y humedad, lo que disminuye su eficiencia, la turbina aprovechará el potencial eólico de las altitudes volcánicas para mantener operativos los sensores durante las 24 horas del día, reduciendo la necesidad de baterías de gran tamaño y visitas frecuentes de mantenimiento. Además, de ser una fuente de energía complementaria, mejorará el monitoreo continuo y reducirá la pérdida de datos críticos para alertas tempranas.

Teórica

El diseño de una turbina eólica de eje vertical se basa en principios de aerodinámica y mecánica de fluidos, estas turbinas se destacan por su diseño compacto y la capacidad de funcionar a bajas velocidades de viento, lo que las hace ideales para zonas con vientos intermitentes o variables. A diferencia de las turbinas de eje horizontal, las de eje vertical pueden captar el viento desde cualquier dirección, lo cual las hace adecuadas en áreas donde el viento puede cambiar rápidamente, como en las zonas cercanas a los volcanes. Además, la investigación contribuirá al conocimiento científico sobre la eficiencia y el rendimiento de las turbinas eólicas en condiciones extremas abriendo así las puertas a nuevas investigaciones.

Económica

La implementación de turbinas eólicas de eje vertical reducirá los costos asociados con el mantenimiento frecuente de paneles solares y la adquisición de baterías de alta capacidad, que actualmente no son viables debido a su elevado precio. Al minimizar las visitas técnicas y el tamaño de las baterías, el proyecto permitirá un ahorro significativo a largo plazo, mientras que la generación de energía ininterrumpida garantiza un monitoreo más eficiente y económico. En consecuencia, llevaría a tener una mejor relación costo-beneficio para las operaciones del Centro Vulcanológico Nacional.

Social

El proyecto busca aumentar la confiabilidad el abastecimiento de energía en los sistemas de alerta temprana, asegurando un monitoreo continuo, lo que permitirá evacuar oportunamente a las comunidades cercanas en caso de actividad volcánica, salvando vidas y reduciendo pérdidas materiales. Además, el uso de estas turbinas eólicas promueve el uso de energías renovables en el país, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental y fomentando una cultura de prevención ante desastres. Esto beneficia directamente a las poblaciones vulnerables,

garantizando su seguridad y bienestar mediante un monitoreo confiable y continuo de los volcanes.

Ambiental

El proyecto promueve el uso de energías renovables como alternativa a los sistemas fotovoltaicos, los cuales presentan limitaciones en zonas volcánicas debido a la acumulación de ceniza y humedad. La implementación de una turbina eólica de eje vertical no solo contribuye a mejorar el suministro continuo de energía, sino que también contribuye a mitigar el impacto ambiental asociado con el uso de combustibles fósiles. Además, al reducir la necesidad de baterías de alta capacidad, el proyecto disminuye la generación de desechos electrónicos, alineándose con objetivos globales de sostenibilidad y reducción de huella ambiental. Este enfoque fomenta la transición hacia fuentes de energía limpia en regiones remotas, como las cercanías de los volcanes.

Tecnológica

La solución propuesta incorpora tecnología avanzada mediante el diseño de turbinas eólicas de eje vertical, optimizadas para funcionar en condiciones de viento variable y multidireccional, comunes en altitudes elevadas. Esta tecnología se complementa con sistemas de monitoreo volcánico que operan en tiempo real, permitiendo un suministro de energía constante y confiable para sensores instalados in situ. Además, el proyecto aprovecha el desarrollo de sistemas híbridos para integrar la generación eólica y solar, garantizando una infraestructura energética eficiente y resiliente. Esto mejora significativamente la capacidad tecnológica del monitoreo volcánico, evitando interrupciones en la recolección de datos cruciales para alertas tempranas y prevención de desastres.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Diseñar prototipo de turbina eólica de eje vertical para energizar sistema de sensores remotos del Centro Vulcanológico Nacional - IGP.

1.4.2. Objetivos Específicos

- **OE1.** Determinar la demanda energética del sistema de sensores remotos y el potencial energético eólico disponible, para definir los requerimientos de la turbina.
- **OE2.** Diseñar mecánicamente en software CAD y simulación en CAE de la turbina eólica de eje vertical.
- **OE3.** Manufacturar el prototipo de turbina eólica y seleccionar el generador eléctrico para su montaje.
- **OE4.** Analizar el rendimiento energético del prototipo mediante pruebas bajo condiciones de viento natural variable, estimando su potencial de generación.

II MATERIALES Y MÉTODOS

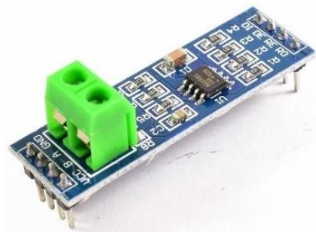
2.1. Instrumentos de recolección de datos

- **Módulo MAX485 Conversor RS485 a Serial TTL**

Permite agregar comunicación RS485 a Arduino con la ventaja de lograr distancias de conexión mucho mayores que el Serial TTL y RS232. Soporta Modbus y DMX. En la Figura 2 se ilustra el Módulo MAX485 Conversor RS485 empleado en el estudio y sus características técnicas más relevantes se resumen en la Tabla 1.

Figura 2

Modulo MAX485 Conversor RS485 a Serial TTL



Nota. Recuperada de la página web Naylamp Mechatronics

Tabla 1

Especificaciones técnicas del módulo MAX485 Conversor RS485 a Serial TTL

Módulo MAX485 Conversor RS485 a Serial TTL	
Voltaje de entrada	5V DC
Corriente	500 uA (máx)
Chip conversor	MAX485
Interfaz	Serial UART TTL
Tipo de comunicación	Half-Duplex
Velocidad máxima	10 Mbit/s (a 12 metros)
Distancia máxima de alcance	1200 metros (a 100 kbit/s)

Nota. Adaptado de Naylamp Mechatronics

- **Arduboard Nano CH340G mini-USB**

Es una placa de desarrollo electrónica compacta basada en el microcontrolador ATmega328P, se utiliza para programar, controlar y automatizar sistemas electrónicos. En la Figura 3 se ilustra el Arduboard Nano CH340G empleado en el estudio y sus características técnicas más relevantes se resumen en la Tabla 2.

Figura 3

Arduboard Nano CH340G mini-USB



Nota. Recuperada de la página web [Naylamp Mechatronics](#)

Tabla 2

Especificaciones técnicas del Arduboard Nano CH340G mini-USB

Arduboard Nano CH340G mini-USB	
Microcontrolador	ATmega328P (8-bit)
Chip USB	CH340G
Conector USB	mini-USB tipo B
Voltaje de entrada	7V - 12V DC
Voltaje nivel lógico I/O	5V DC
Pines digitales I/O	14 (6 PWM)
Entradas analógicas	8 (6 pueden ser I/O digital)
Corriente máx. por Pin I/O	40mA
Frecuencia de Reloj	16MHz
Memoria SRAM	2KB
Voltaje de salida	3.3V

Nota. Adaptado de [Naylamp Mechatronics](#)

- **Módulo Lector de memoria Micro SD Card 74LVC125A**

Módulo lector de tarjetas Micro SD que utiliza comunicación SPI, permitiendo acceder a memorias micro SD y SDHC. Incorpora conversión de niveles lógicos y un regulador de voltaje, siendo compatible con Arduino y otros microcontroladores. En la Figura 4 se ilustra el

Módulo lector de memoria empleado en el estudio y sus características técnicas más relevantes se resumen en la Tabla 3.

Figura 4

Módulo Lector de memoria Micro SD Card 74LVC125A



Nota. Recuperada de la página web Naylamp Mechatronics

Tabla 3

Especificaciones técnicas del Módulo Lector de memoria Micro SD

Módulo Lector de memoria Micro SD Card 74LVC125A	
Voltaje de Operación	3.3V-5V
Interfaz	SPI
Pines SPI de la tarjeta SD	MOSI, MISO, SCK, CS
Chip conversor lógico	MC74VHCT125A/74LVC125A
Dimensiones	42*24 mm

Nota. Adaptado de Naylamp Mechatronics

- **Módulo RTC DS3231 + EEPROM AT24C32 (I2C)**

El módulo RTC DS3231 permite medir y mantener el tiempo con gran precisión. En la Figura 5 se ilustra el Módulo RTC DS3231 empleado en el estudio y sus características técnicas más relevantes se resumen en la Tabla 4.

Figura 5

Módulo RTC DS3231 + EEPROM AT24C32 (I2C)



Nota. Recuperada de la página web [Naylamp Mechatronics](#)

Tabla 4

Especificaciones técnicas del Módulo RTC

Módulo RTC DS3231 + EEPROM AT24C32 (I2C)	
Voltaje de alimentación	3.3V - 5V DC
Exactitud Reloj	2ppm
Interfaz de comunicación digital	I2C
Dirección I2C del DS3132	Write (11010000)
Memoria EEPROM AT24C32	4KByte

Nota. Adaptado de [Naylamp Mechatronics](#)

- **Monitor de corriente voltaje, high side INA 219**

El módulo INA219 mide voltaje y corriente DC mediante interfaz I2C, incorporando una resistencia shunt de $0,1 \Omega$ para obtener lecturas precisas hasta 25 V y 3,2 A. En la Figura 6 se ilustra el sensor INA 219 empleado en el estudio y sus características técnicas más relevantes se resumen en la Tabla 5.

Figura 6

Monitor de corriente voltaje, high side INA219



Nota. Recuperada de la página web [Naylamp Mechatronics](#)

Tabla 5

Especificaciones técnicas del Monitor de corriente voltaje

Monitor de corriente voltaje, high side INA219	
Voltaje de entrada	3.3V - 5V DC
Voltaje máximo de medición	25 V
Corriente máxima de medición	3.2 A
Resolución	0.8 mA
Resistencia Shunt	0.1 Ohm

Nota. Adaptado de [Naylamp Mechatronics](#)

- **Transmisor de velocidad del viento RS485 (0~32,4 m/s)**

Es un sensor electrónico que mide la velocidad del viento y transmite esa información en forma digital mediante el protocolo de comunicación RS485. En la Figura 7 se ilustra el anemómetro empleado en el estudio y sus características técnicas más relevantes se resumen en la Tabla 6.

Figura 7

Transmisor de velocidad del viento RS485 (0~32,4 m/s)



Nota. Recuperada de la página web [Dfrobot](#)

Tabla 6

Especificaciones técnicas del Transmisor de velocidad del viento RS485

Transmisor de velocidad del viento RS485	
Modelo	RS485 Wind Speed Transmitter (SEN0483)
Rango de medición	0 ~ 32.4 m/s
Velocidad de arranque	0.2 – 0.4 m/s
Precisión	±0.3 m/s
Tensión de alimentación	7 – 24 V
Protocolo de comunicación	Interfaz RS485 (Modbus)

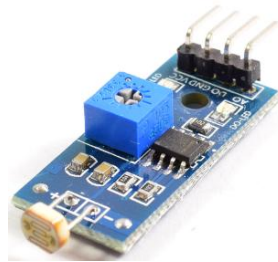
Nota. Adaptado de [Dfrobot](#)

- **Módulo Sensor LDR - 4 pin**

Detecta la intensidad de luz mediante una resistencia que varía según la iluminación. Su circuito comparador convierte esa variación en una señal digital o analógica proporcional al nivel de luz. En la Figura 8 se ilustra el sensor LDR empleado en el estudio y sus características técnicas más relevantes se resumen en la Tabla 7.

Figura 8

Módulo Sensor LDR



Nota. Recuperada de la página web [Naylamp Mechatronics](#)

Tabla 7

Especificaciones técnicas del Módulo Sensor LDR

Módulo Sensor LDR	
Voltaje de operación	3.3 V – 5 V DC
Tipo de conexión	(VCC, GND, DO)
Salida analógica	Disponible
Comparador integrado	LM393
Indicadores LED	LED rojo de encendido y LED verde de salida digital

Nota. Adaptado de [Naylamp Mechatronics](#)

- **Pinza amperimétrica**

Es un instrumento de medición eléctrica que permite medir la corriente que circula por un conductor, voltaje, entre otras magnitudes. En la Figura 9 se ilustra pinza amperimétrica empleado en el estudio y sus características técnicas más relevantes se resumen en la Tabla 8.

Figura 9

Pinza amperimétrica



Nota. La figura muestra una pinza amperimétrica UNI-T 203.

Tabla 8

Especificaciones técnicas de la Pinza Amperimétrica

Pinza Amperimétrica UNI-T 203	
Modelo	UNI-T 203
Tipo de medición	True RMS
Corriente DC	400A \pm (2% + 5)
Corriente AC	400A \pm (2% + 5)
Voltaje DC	400mV / 4V / 40V / 400V / 600V \pm (0.8% + 1)
Voltaje AC	4V / 40V / 400V / 600V \pm (1.2% + 5)
Resistencia	400 Ω / 4k Ω / 40k Ω / 400k Ω / 4M Ω / 40M Ω \pm (1% + 2)
Frecuencia	10Hz – 1MHz \pm (1% + 5)
Prueba de continuidad	Sí

Nota. Adaptado de la página web [Westor](#)

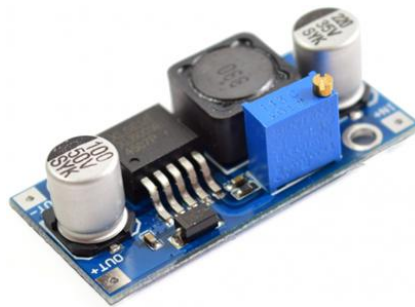
- **Convertidor de voltaje XL6009**

El convertidor de voltaje DC-DC Step-Up 2.5A XL6009 tiene como función entregar un voltaje de salida constante superior al voltaje de entrada frente a variaciones del voltaje de

entrada o de carga. En la Figura 10 se ilustra el convertidor de voltaje empleado en el estudio y sus características técnicas más relevantes se resumen en la Tabla 9.

Figura 10

Convertidor de voltaje XL6009



Nota. Adaptado de [Naylamp Mechatronics](#)

Tabla 9

Especificaciones Técnicas del Convertidor de voltaje XL6009

Convertidor de voltaje XL6009	
Tipo de regulador	Tipo de Regulador Boost (Elevador) no aislado
Volt. de Entrada	5V a 32V DC
Volt. de Salida	7V a 35V DC (ajustable)
V. Salida ajustable	Regulable
Corriente de Salida	2.5A máx.
Potencia de Salida	25W
Frecuencia de Conmutación	400 kHz
Eficiencia de Conversión	92% (máximo)
Dimensiones	43mm x 21mm x 13mm
Peso	Aprox. 12 gramos

Nota. Adaptado de [Naylamp Mechatronics](#)

- **Pantalla Alfanumérica LCD 1602**

El Display LCD1602 permite mostrar texto/números/caracteres, además hacer debugging o correcciones en nuestros proyectos sobre todo cuando se trabaja con sensores y procesamiento de datos. En la Figura 11 se ilustra la pantalla LCD empleado en el estudio y sus características técnicas más relevantes se resumen en la Tabla 10.

Figura 11

Pantalla Alfanumérica LCD 1602



Nota. Adaptado de [Naylamp Mechatronics](#)

Tabla 10

Especificaciones técnicas de la Pantalla Alfanumérica LCD 1602

Módulo Sensor LDR	
Voltaje de operación	5 V DC
Interface de comunicación	Paralelo 4 u 8 bits
Color Texto	Blanco
Backlight	Azul
Filas	2
Columnas	16
Dimensiones Pantalla	64.5*14.5 mm
Dimensiones externas	80.0*36.0 mm
Peso	34 g

Nota. Adaptado de la página web [Naylam Mechatronic](#)

2.2. Software

- **SolidWorks**

Es un software que se utiliza para realizar el diseño CAD, el cual es una herramienta ideal para el desarrollo del diseño en 3D, además permite realizar análisis y simulación.

- **ANSYS**

Es un software simulación computacional, en este caso para un CFD aplicado para la turbina eólica de eje vertical.

- **Orca slider**

Es un software de corte gratuito y de código abierto que traduce modelos 3D a instrucciones para impresoras 3D.

- **Microsoft Word**

Es un software de procesamiento de texto que permite crear, editar y dar formato a documentos.

- **Microsoft Excel**

Es un Software de hoja de cálculo de Microsoft que sirve para organizar, analizar y visualizar datos mediante el uso de tablas, fórmulas y gráficos.

- **Python**

Es un lenguaje de programación de alto nivel, interpretado y de propósito general, diseñado para ser fácil de leer y escribir. Se utiliza ampliamente en áreas como ciencia de datos, inteligencia artificial, desarrollo web, automatización, electrónica.

- **Visual Studio Code (VS Code)**

Es un editor de código fuente desarrollado por Microsoft, gratuito y multiplataforma, que permite programar en diferentes lenguajes (como Python, C++, JavaScript, etc.). Es muy usado por desarrolladores gracias a su ligereza, personalización mediante extensiones y herramientas integradas.

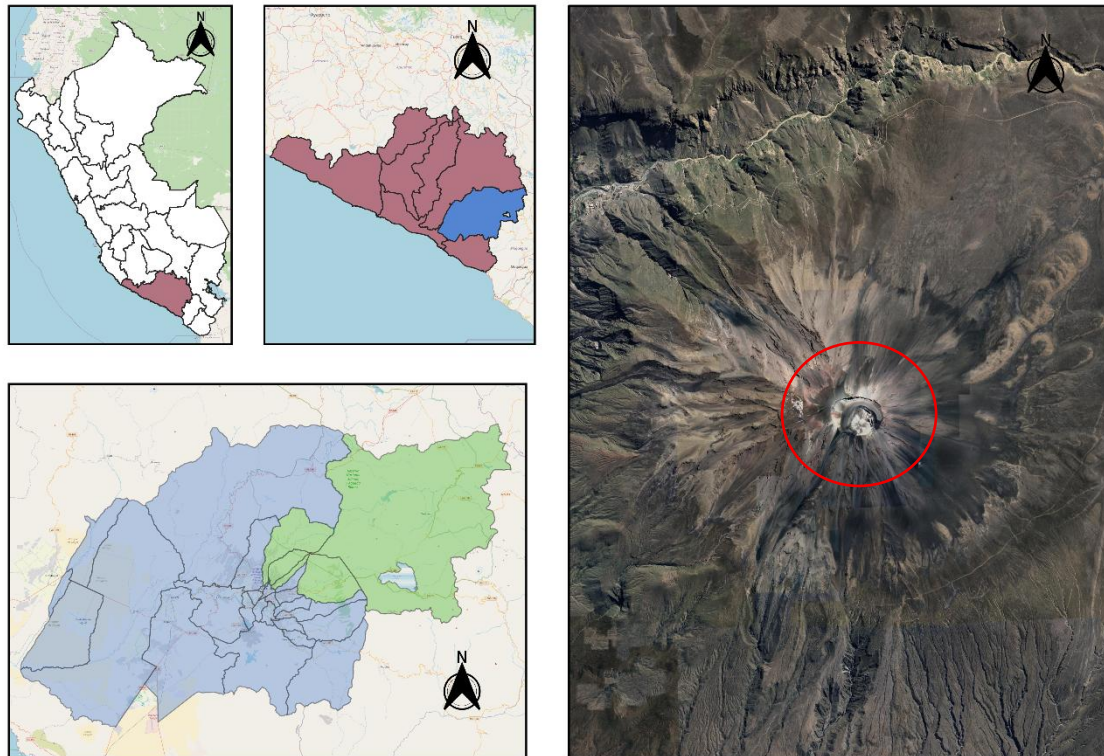
2.3. Ubicación del área de estudio

2.3.1. Ubicación geográfica de Arequipa

Área de recopilación de datos meteorológicos obtenidos en uno de los centros de monitoreo del Centro Vulcanológico Nacional (CENVUL), ubicado en las laderas del volcán Misti, Provincia de Arequipa, Departamento de Arequipa, información utilizada para el dimensionamiento de la turbina eólica Savonius.

Figura 12

Ubicación geográfica de la zona de recopilación de datos.



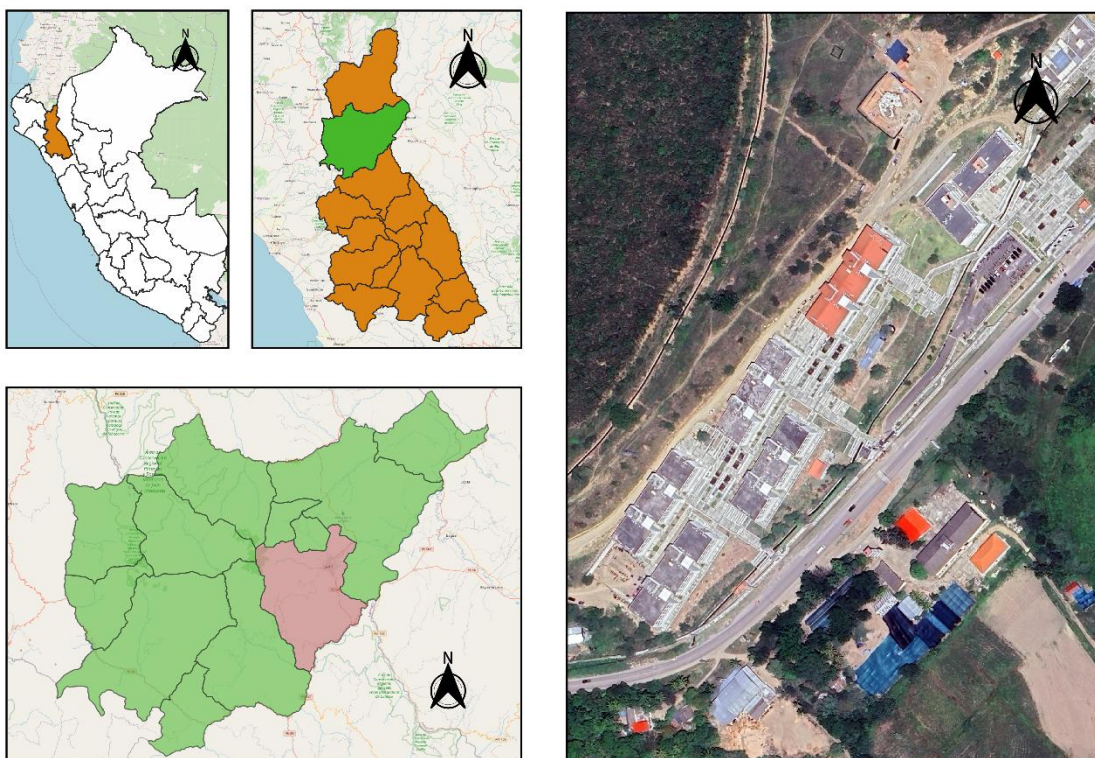
Nota. La figura muestra la zona donde están instalados los sensores que está encerrado con un círculo de color rojo.

2.3.2. Ubicación de pruebas de laboratorio

Las pruebas de laboratorio se desarrollaron en las instalaciones de la Universidad Nacional de Jaén (UNJ), Ubicado en el Distrito de Jaén, Provincia de Jaén, Departamento de Cajamarca, con el fin de evaluar su desempeño en condiciones controladas.

Figura 13

Ubicación geográfica de la zona de pruebas de funcionamiento.



Nota. La figura muestra la ubicación en donde se realizaron las pruebas de rendimiento de la turbina.

2.4. Marco Metodológico

2.4.1. Enfoque de Investigación

La investigación se desarrolló bajo un **enfoque cuantitativo**, dado que se basó en la medición numérica de variables como velocidad del viento, voltaje, corriente y potencia

generada por el prototipo de turbina. Este enfoque permitió analizar el comportamiento del sistema de manera objetiva. Según Hernández et al., (2014), el enfoque cuantitativo “utiliza la recolección de datos para probar hipótesis y responder preguntas mediante análisis estadístico”.

2.4.2. Método de Investigación

El estudio empleó un **método deductivo**, dado que partió de principios teóricos sobre turbinas Savonius, aerodinámica y conversión de energía, para luego contrastarlos con los resultados obtenidos en las pruebas experimentales del prototipo. Hernández et al., (2014) señalan que el método deductivo consiste en partir “de conceptos generales aceptados para llegar a conclusiones particulares”.

2.4.3. Tipos de Investigación

La investigación fue de tipo **aplicada**, ya que buscó resolver un problema concreto: garantizar una fuente energética alternativa y funcional para las estaciones remotas de monitoreo Centro Vulcanológico Nacional. Como señalan Hernández et al., (2014) , la investigación aplicada se orienta a “resolver necesidades reales mediante la utilización del conocimiento científico”.

El estudio también fue **descriptivo**, porque caracterizó el comportamiento del prototipo bajo diferentes intensidades de viento, detallando su desempeño eléctrico. Cegarra, (2004) indica que la investigación descriptiva se enfoca en “explicar las particularidades de un fenómeno tal como ocurre en su contexto natural”, lo cual coincide con el análisis de los parámetros energéticos registrados.

Asimismo, la investigación se clasificó como **desarrollo tecnológico**, puesto que implicó el diseño, construcción y prueba de un dispositivo funcional. De acuerdo con Cegarra, (2004), este tipo de investigación integra conocimientos científicos y técnicos para “generar prototipos o soluciones operativas que respondan a necesidades específicas”. Esto se evidenció

en la creación y validación del prototipo de turbina Savonius fabricado para resolver una problemática real.

2.4.4. Diseño de Investigación

El estudio empleó un **diseño experimental** de tipo pre-experimental, dado que se manipularon deliberadamente los parámetros geométricos y operativos de la turbina para evaluar su impacto en el desempeño energético. De acuerdo con Hernández et al., (2014), este diseño se caracteriza por la "manipulación intencional de una o más causas para analizar las consecuencias de tal manipulación sobre uno o más efectos".

2.5. Base teórica

2.5.1. Aerogeneradores de eje vertical

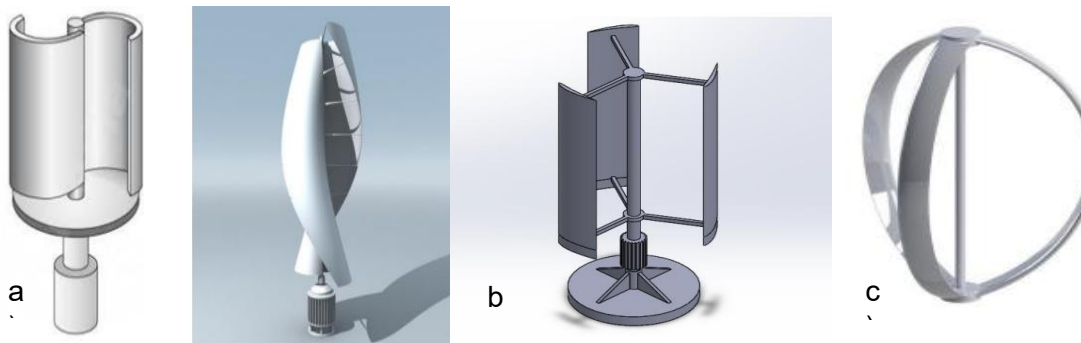
Los aerogeneradores de eje vertical (VAWT's) tienen la ventaja de aprovechar el recurso eólico en entornos limitados (ver Figura 14), esto se debe a la capacidad de captar el viento de manera omnidireccional, asimismo resaltan la capacidad de autoinicio de generación, factores que limitan aerogeneradores de eje horizontal (HAWT's) (Vargas et al., 2022).

2.5.2. Clasificación de los aerogeneradores de eje vertical

Los VAWT's se clasifican principalmente en dos categorías según su principio de funcionamiento, en sustentación aerodinámica, como las turbinas Darrieus, H Rotor , siendo estas las más estudiadas y aquellos basados en arrastre, como las turbinas Savonius (Vargas et al., 2022). Las turbinas Darrieus son eficientes, pero requieren una velocidad de viento relativamente alta para iniciar su operación, además de presentar una mayor complejidad geométrica en su proceso de fabricación. Por el contrario, las Savonius tienen menor eficiencia, pero pueden autoiniciarse con vientos muy bajos (Vargas et al., 2022). Además, su diseño permite una integración arquitectónica más sencilla y no requieren mecanismos de orientación hacia el viento, lo que simplifica su construcción y mantenimiento.

Figura 14

Aerogeneradores de eje vertical



Nota. En la figura se muestra los 3 modelos de aerogeneradores de eje vertical: a) Savonius b) H rotor c) Darrieus. Tomada de (De la Calle Bernardo, 2018).

2.5.3. Eficiencia de los aerogeneradores según el coeficiente de potencia (C_p)

El concepto de coeficiente de potencia, parte de la teoría del límite de Betz presentada por el ingeniero alemán Albert Betz en 1919, la cual estableció que ninguna turbina eólica puede extraer más del 59,3 % (ver Figura 16) de la energía cinética disponible en el viento (ver Tabla 11). La energía eólica es extrae mediante el flujo del aire (ver Figura 15), teniendo en cuenta que el aire es un fluido entonces se aprovecha como energía cinética:

La ecuación de la energía cinética de denota de la siguiente manera:

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

m : masa (kg)

v : velocidad del viento (m/s)

Derivando la energía eólica con respecto al tiempo obtenemos la potencia del viento es:

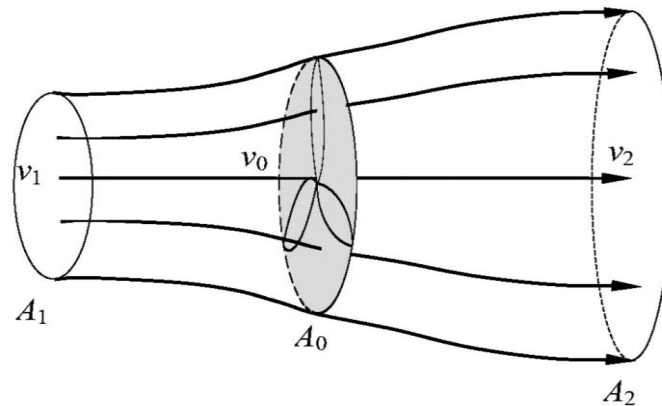
$$P_W = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad (2)$$

Donde:

P_W : potencial eólico, ρ : densidad del aire, A : área de barrida de la turbina y v : velocidad del viento.

Figura 15

Análisis del potencial eólico



Nota. En la figura se muestra cómo se realiza el análisis del potencial eólico al inicio y a la salida del rotor. Fuente: Tomada de (Coelho, 2023)

La potencia de la turbina está dada por la diferencia de la energía cinética del viento del punto uno y dos (ver Figura 15), entonces:

$$P_T = P_1 - P_2 \quad (3)$$

$$P_T = \frac{1}{2} \rho A_1 v_1^2 - \frac{1}{2} \rho A_2 v_2^2 \quad (4)$$

Por la ecuación de continuidad:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 = Av \quad (5)$$

$$P_T = \frac{1}{2} \rho Av (v_1^2 - v_2^2) \quad (6)$$

Donde:

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad (7)$$

$$P_T = \frac{1}{4} \rho A (v_1^2 - v_2^2) (v_1 + v_2) \quad (8)$$

El coeficiente de potencia relaciona la potencia de la turbina y la potencia eólica.

$$Cp = \frac{P_T}{P_W} \quad (9)$$

Reemplazando la ecuación 2 y 8 en la ecuación 9, tenemos:

$$Cp = \frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 \right] \left[1 + \left(\frac{v_2}{v_1} \right) \right] \quad (10)$$

Llamamos a un factor de interferencia “ α ” $\alpha = \frac{v_2}{v_1}$

$$Cp = \frac{1}{2} [1 - \alpha^2][1 + \alpha] \quad (11)$$

Determinamos el límite de Betz dando un rango de interferencia de 0 a 1, obteniendo un valor del 59.3%.

Tabla 11

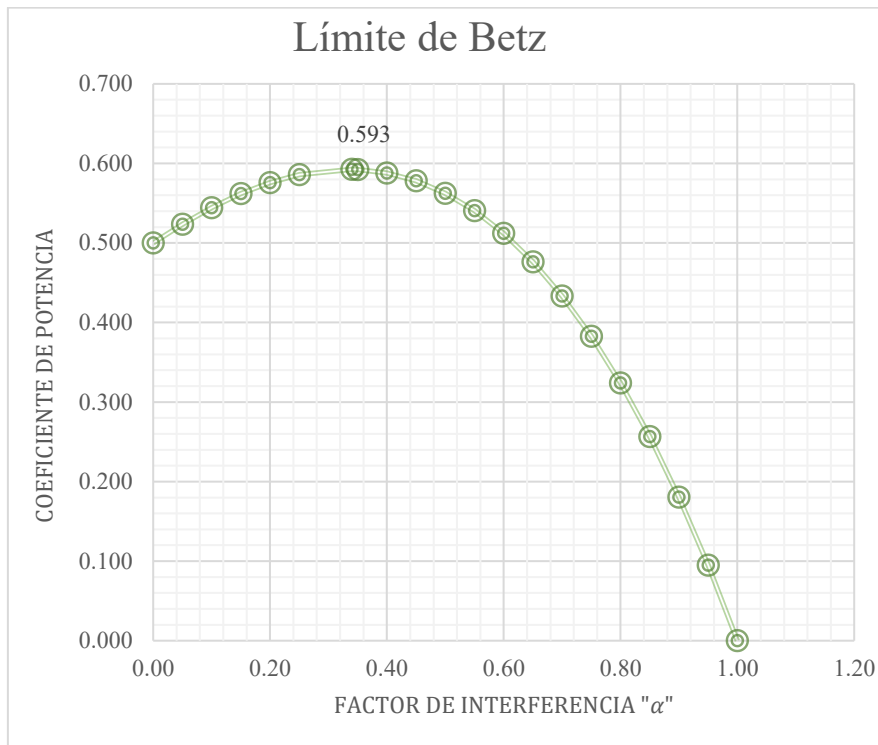
Valores alcanzados del límite de Betz

Valores del factor de interferencia			Valores del (Cp)		
0.00	0.35	0.70	0.500	0.592	0.434
0.05	0.40	0.75	0.524	0.588	0.383
0.10	0.45	0.80	0.545	0.578	0.324
0.15	0.50	0.85	0.562	0.563	0.257
0.20	0.55	0.90	0.576	0.541	0.181
0.25	0.60	0.95	0.586	0.512	0.095
0.34	0.65	1.00	0.593	0.476	0.000

Nota. La tabla muestra los el valor máximo que alcanza el Cp de un aerogenerador, denominado el límite de Betz.

Figura 16

Límite de Betz



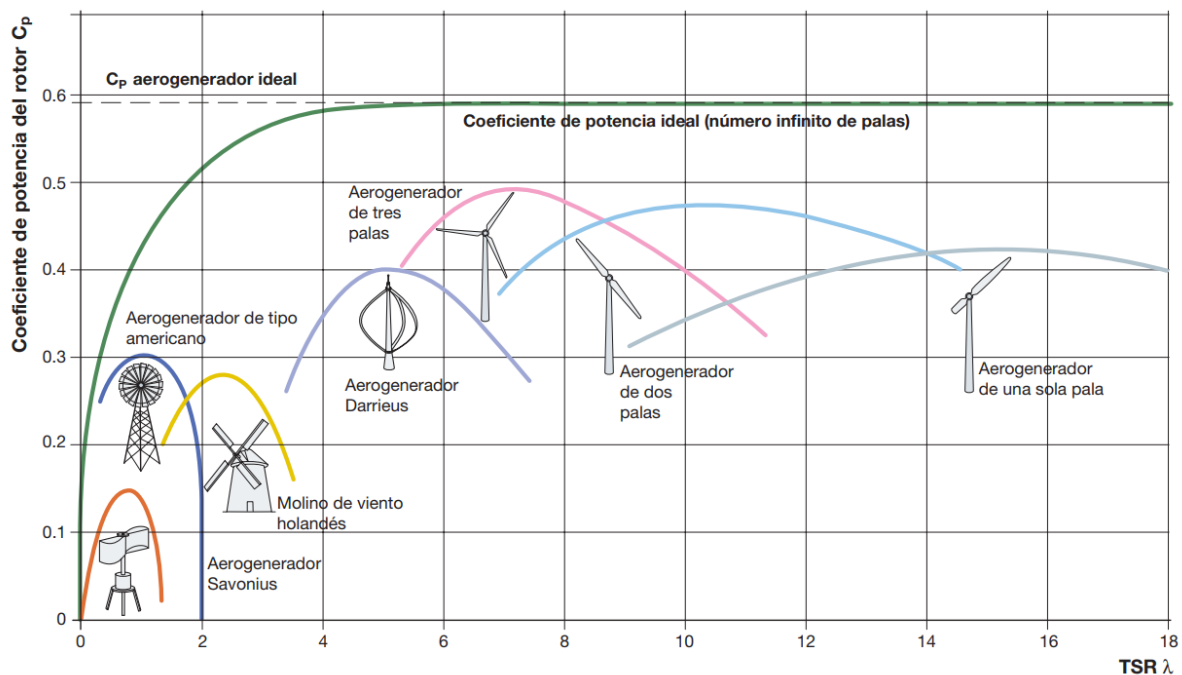
Nota: En la figura se muestra cual es el límite de Betz de un generador ideal con un valor aproximado de 0.593.

La eficiencia de los aerogeneradores, medida por su coeficiente de potencia, varía para cada aerogenerador, (Tobías Salas et al., 2017) indica que el C_p del aerogenerador Savonius oscila entre 0.05 y 0.30, mientras que los diseños Darrieus y H-rotor son más eficientes, con valores de 0,49 y 0,41, respectivamente. Estas cifras están sujetas a variaciones según el perfil del álabe, las dimensiones del rotor y otros factores de diseño.

El coeficiente de potencia está en función del Relación de Velocidad de Punta en aerogeneradores TSR (λ) que es la relación velocidad de la punta de la pala y la velocidad del viento (Pulfer et al., 2018). Esto es un factor determinante al momento de seleccionar el tipo de aerogenerador (ver figura 17)

Figura 17

Valores del coeficiente de potencia en función de TSR de cada aerogenerador



Nota. La figura muestra la relación del C_p con TSR, donde se aprecia el C_p de cada aerogenerador de manera estándar, es decir, sin modificaciones en su diseño que pueden mejorar su rendimiento. Extraída de (De la Calle Bernardo, 2018)

En su investigación (Sanaye & Hosseinkhani, 2024) estudia la configuración óptima para un aerogenerador de eje vertical de palas curvas con un ángulo de paso $-1,4^\circ$, D/H 1,3, relación de aspecto de las palas 19,8, TSR 4,3 y utilizando tres palas, con esta configuración logró un coeficiente de potencia de 0,49 y una fuerza normal de 158,7 N.

La investigación de (Hadi Ali, 2013) comparó el rendimiento de rotores Savonius de dos y tres álabes bajo un rango de velocidades de viento de 2–6 m/s. Ambos modelos tenían una relación de aspecto $H/D = 1$ ($H = D = 200$ mm), álabes semicirculares de 100 mm de diámetro sin separación, y placas en los extremos de 210 mm. Los resultados indicaron que, a

una TSR de 0.8, el rotor de dos álabes fue más eficiente, con un C_p de 0.21 frente a 0.17 que obtuvo el de tres álabes.

2.5.4. Parámetros Geométricos de desempeño en las Turbinas de eje Vertical

Los parámetros geométricos de desempeño en las turbinas eólicas de eje vertical (VAWT) del tipo Savonius son aquellas variables dimensionales y de configuración que determinan el comportamiento aerodinámico, el par de arranque, la eficiencia energética y la estabilidad del rotor. Numerosas investigaciones han integrado múltiples variables de diseño dentro de un mismo análisis, con el fin de optimizar los coeficientes obtenidos y garantizar su adecuación a los objetivos del estudio. Entre los más relevantes se encuentran cuatro variables geométricas, que son: la Relación de Aspecto (AR), el Ángulo de Torsión (TA), la Relación de Superposición (OR) y el Número de Álabes. Estos parámetros modifican la interacción del flujo con los álabes, influyendo en el coeficiente de potencia (C_p), la relación de velocidad de punta (TSR o λ) y la suavidad del par de giro.

a) Relación de Aspecto (AR)

Uno de los parámetros geométricos que determinan el desempeño de las turbinas verticales es la relación de aspecto, que es la relación entre la altura y el diámetro de la turbina eólica (ver figura 18), se define con la siguiente expresión.

$$AR = H/D \quad (12)$$

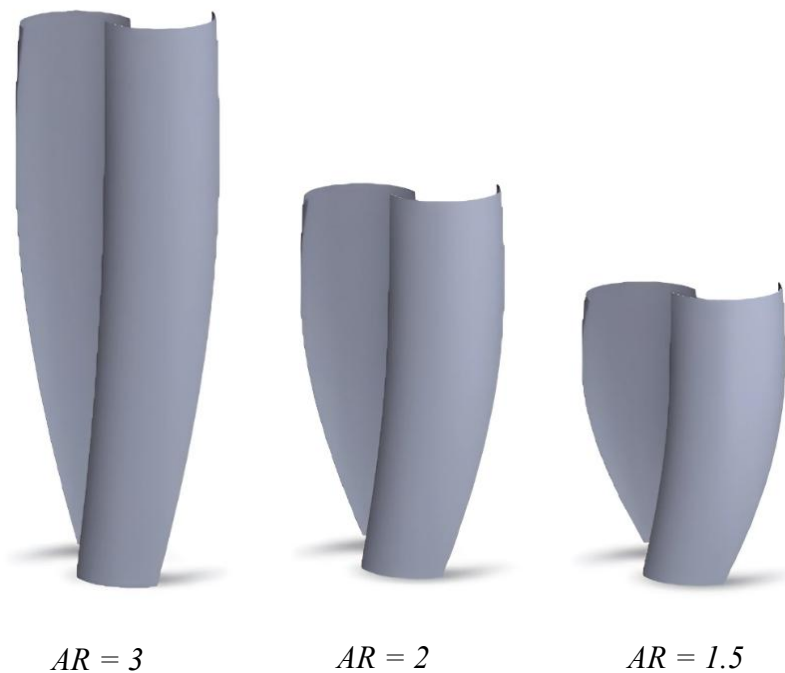
Se ha evidenciado que el coeficiente de potencia de las turbinas Savonius tiende a aumentar con el incremento de la relación de aspecto, lo que demuestra la influencia positiva de este parámetro en la eficiencia aerodinámica del rotor (Mahmoud et al., 2012). Este fenómeno puede deberse a la disminución de la inercia de masa (Al-Kayiem et al., 2016). No obstante, aunque una relación de aspecto alta favorece el rendimiento, la mayoría de los rotores

construidos presentan valores bajos de este parámetro debido a limitaciones estructurales. En este contexto, se ha señalado que la eficiencia de rotores con baja relación de aspecto puede mejorarse mediante la incorporación de placas terminales, las cuales reducen las pérdidas por fuga lateral y optimizan la interacción del flujo con los álabes (Roy & Saha, 2013).

En la (Tabla 12) se muestran los valores de la relación de aspecto (AR) considerados como óptimos en distintos estudios, así como los correspondientes coeficientes de potencia (C_p) máximos alcanzados en cada caso. Esta recopilación permitió establecer una referencia comparativa entre investigaciones previas sobre turbinas eólicas de eje vertical, evidenciando la influencia directa del AR en el desempeño aerodinámico de este tipo de rotores.

Figura 18

Rotor tipo Savonius con diferentes relaciones de aspecto



Nota. La figura muestra tres relaciones de aspecto de 3,2 y 1.5.

Tabla 12*Estudios realizados para determinar el AR óptimo*

Autores	Configuraciones	AR	$C_{p,max}$	TSR	Metodología
(Alexander & Holownia, 1978)	Placas terminales y Escudo plano	4.80	0.24	0.72	Experimental
(Modi et al., 1984)	Placas terminales y perfil modificado	0.77	0.24	0.85	Experimental
(Kamoji et al., 2009a)	Placas terminales y perfil modificado	0.70	0.21	0.69	Experimental
(Zhao, Zheng, Xu, Liu, & Zhou, 2009)	Placas terminales	6.00	0.21	0.75	CFD
(Mahmoud et al., 2012)	Placas terminales y eje	5.00	0.14	-	Experimental
(Mohammadi et al., 2018)	Placas terminales	0.89	0.22	0.66	GA y CFD
(Farozan et al., 2025)	Placas terminales	2.00	0.20	-	Experimental

Nota. Tabla tomada y modificada de (Torres, 2021)

b) Ángulo de Torsión (TA)

La geometría del álabe constituye uno de los factores más relevantes en la mejora del rendimiento de las turbinas eólicas de eje vertical. El ángulo de torsión (TA) corresponde a la variación angular existente entre la parte superior y la inferior del álabe. En los modelos convencionales de turbinas Savonius de eje vertical, dicho ángulo tiene un valor de 0° , mientras que, al modificarse, es común denominar a estas configuraciones como turbinas helicoidales. La Figura 19 muestra ejemplos de SVAWT con ángulos de torsión comprendidos entre 0° y 135° .

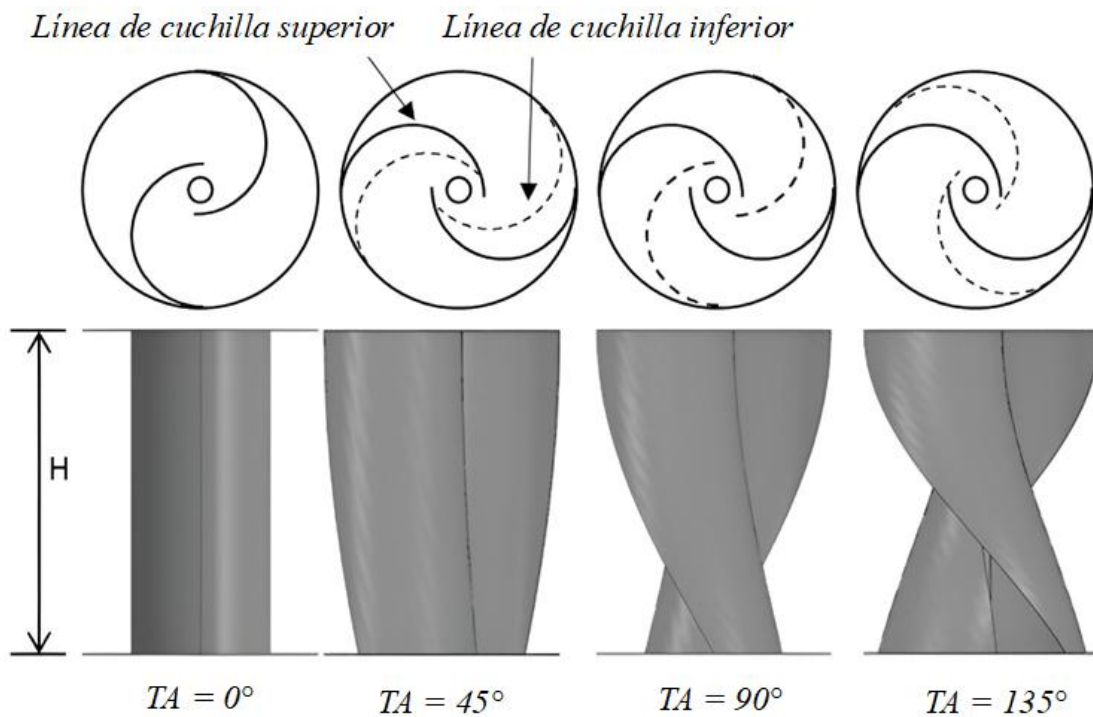
Aplicar una torsión controlada a los álabes del rotor eólico tipo Savonius, ajustándolos a un ángulo óptimo, puede mejorar significativamente tanto el rendimiento aerodinámico como las características de arranque del sistema. Esta modificación geométrica reduce las posiciones en las que se genera torque negativo, lo que se traduce en un perfil de torque más eficiente y

estable durante la operación del rotor (Al-Kayiem et al., 2016). La forma helicoidal puede considerarse como una turbina de infinitas etapas, lo que permite reducir significativamente las oscilaciones de par durante el funcionamiento, aunque su rendimiento aerodinámico es comparable al de un rotor Savonius convencional con álabes semicirculares (Vicente et al., 2012).

Las investigaciones más relevantes recopiladas para este estudio se presentan en la (Tabla 13), donde se destaca el coeficiente de potencia (C_p) máximo alcanzado en cada caso, correspondiente al ángulo de torsión óptimo (TA) determinado por los respectivos autores.

Figura 19

Rotor tipo Savonius con diferentes ángulos de torsión



Nota. Figura tomada y adaptada de Lee et al. (2016)

Tabla 13*Estudios realizados para determinar el TA óptimo*

Autores	Configuraciones	TA	$C_{p,max}$	TSR	Metodología
(Saha & Rajkumar, 2006)	Con eje	15°	0.14	0.65	Experimental
(Kamoji et al., 2009b)	Placas terminales	90°	0.17	0.70	Experimental
(Zhao, Zheng, Xu, Liu, & Zhou, 2009)	Placas terminales, Placas internas y eje	180°	0.21	0.75	Experimental
(Lee et al., 2016)	Placas terminales y eje	45°	0.13	0.54	Experimental y CFD
(Anbarsooz, 2016)	Placas terminales	0°	0.12	0.70	Experimental y CFD
(El-Askary et al., 2018)	Placas terminales y perfil modificado	45°	0.22	0.80	Experimental y CFD
(Mohammadi et al., 2018)	Placas terminales	0°	0.22	0.66	GA y CFD
(Saad et al., 2020)	Placas terminales	45°	0.22	0.80	CFD
(Farozan et al., 2025)	Placas terminales	45°	0.20	-	Experimental

Nota. Tabla tomada y modificada de (Torres, 2021).

c) Relación de Superposición (OR)

La relación de superposición describe el grado en que los álabes de la turbina se superponen en el eje central del rotor (ver figura 20). Se calcula como la relación entre la distancia de traslape existente entre los álabes (e) y el diámetro de un solo álabes (d):

$$OR = o/c \quad (13)$$

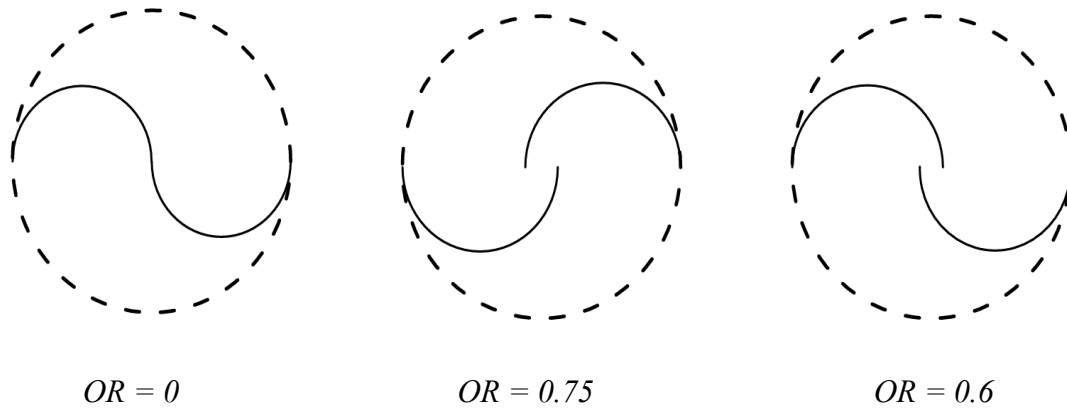
La configuración de superposición facilita que una fracción del flujo de aire se desplace desde el álabes de avance (de perfil cóncavo) hacia el álabes de retorno (de perfil convexo), lo que genera un incremento en la presión en la parte posterior de esta última y contribuye a disminuir el par negativo o efecto de frenado (Al-Kayiem et al., 2016).

Respecto a las dimensiones de la superposición entre álabes, los estudios publicados hasta la fecha no han alcanzado un consenso claro. Este parámetro desempeña un papel crucial

en la mejora del rendimiento aerodinámico del rotor tipo Savonius, lo que ha motivado múltiples investigaciones orientadas a su optimización, como se resume en la Tabla 14.

Figura 20

Rotor tipo Savonius con diferentes relaciones de superposición



Nota. La figura muestra tres valores de OR.

Tabla 14

Estudios realizados para determinar el OR óptimo

Autores	Configuraciones	OR	$C_{p,max}$	TSR	Metodología
(Alexander & Holownia, 1978)	Placas terminales y Escudo plano	0.22	0.24	0.72	Experimental
(Fujisawa, 1996)	Placas terminales	0.15	0.17	0.90	Experimental
(Menet, 2004)	Placas terminales, 2 etapas y eje	0.21	0.18	0.90	Experimental
(Kamoji et al., 2009a)	Placas terminales y perfil modificado	0.00	0.21	0.69	Experimental
(Kamoji et al., 2009b)	Placas terminales	0.00	0.17	0.70	Experimental
(Zhao, Zheng, Xu, Liu, & Zhou, 2009)	Placas terminales, Placas internas y eje	0.19	0.21	0.75	CFD
(Nasef et al., 2013)	Placas terminales	0.15	0.21	0.90	Experimental y CFD
(Mohammadi et al., 2018)	Placas terminales	0.16	0.22	0.66	GA y CFD
(Ebrahimpour et al., 2019)	Con eje	0.15	0.13	0.70	CFD
(Saad et al., 2020)	Placas terminales	0.00	0.22	0.80	CFD

Nota. Tabla tomada y modificada de (Torres, 2021).

d) Numero de álabes

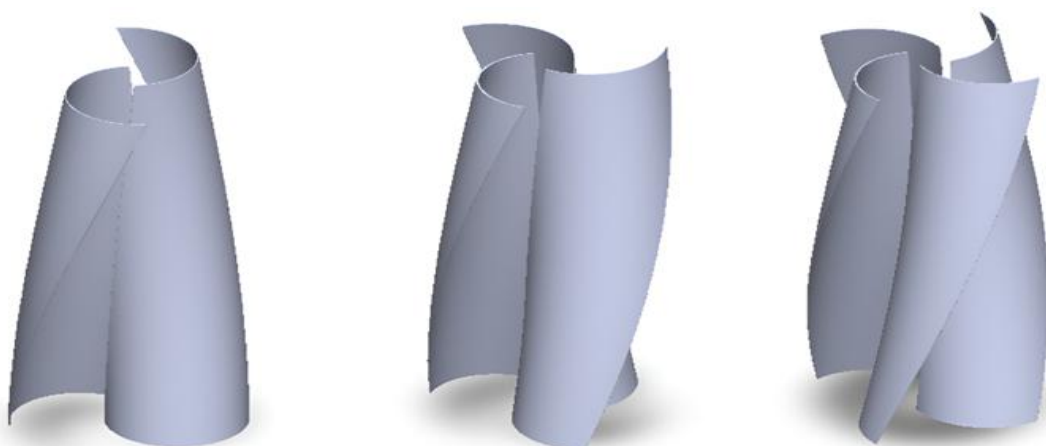
El número de álabes influye significativamente en el rendimiento del rotor (ver figura 21), ya que puede contribuir a optimizar las características del par dinámico.

La reducción del coeficiente de potencia (C_p) al incrementar el número de álabes se puede explicar por el hecho de que los rotores con tres, cuatro o más palas desvían una mayor cantidad de flujo en comparación con los rotores de dos álabes. Además, el incremento en el número de palas aumenta el área convexa expuesta al viento en determinadas posiciones angulares. Este efecto reduce la diferencia de par generada entre las superficies cóncava y convexa de los álabes, lo que finalmente repercute en una disminución del C_p (Al-Kayiem et al., 2016). Asimismo Saha et al. (2008) concluyen que el número óptimo de álabes para el rotor tipo Savonius es dos, independientemente de si la configuración corresponde a una, dos o tres etapas.

En la Tabla 15, se presentan los resultados de distintos estudios que analizan el efecto del número de álabes sobre el coeficiente de potencia (C_p).

Figura 21

Rotor tipo Savonius con diferentes números de álabes



Nota. La figura muestra una turbina eólica Savonius de 2,3 y 4 álabes.

Tabla 15*Estudios realizados para determinar el número de álabes óptimo*

Autores	Configuraciones	N° álabes	$C_{p,max}$	TSR	Metodología
(Saha & Rajkumar, 2006)	Con eje	3	0.14	0.65	Experimental
(Irabu & Roy, 2007)	Placas terminales	2	0.28	0.70	Experimental
(Saha et al., 2008)	Placas terminales y perfil modificado	2	0.19	-	Experimental
(Zhao, Zheng, Xu, Liu, & Hu, 2009)	Placas terminales	2	0.20	0.75	CFD
(Mahmoud et al., 2012)	Placas terminales y eje	2	0.14	-	Experimental
(Wenehenubun et al., 2015)	Placas terminales y eje	3	0.03	0.55	Experimental
(Rahman et al., 2018)	Con eje	2	0.14	0.48	Experimental
(Farozan et al., 2025)	Placas terminales	2	0.20	-	Experimental

Nota. Tabla tomada y modificada de (Torres, 2021).

Las turbinas eólicas de eje vertical tipo Savonius destacan por su capacidad de autoarranque a bajas velocidades de viento, una propiedad esencial para su implementación en entornos urbanos o regiones con patrones eólicos débiles. El desempeño durante el arranque depende en gran medida de la configuración geométrica del rotor, particularmente del número de palas y del ángulo de torsión. La siguiente Tabla 16 presenta una síntesis de estudios recientes que reportan las velocidades mínimas de viento requeridas para iniciar la rotación, un parámetro determinante para evaluar la viabilidad de estos diseños en zonas de baja densidad energética.

Tabla 16*Velocidades de arranque de turbinas Savonius*

Autores	Configuración de la turbina	Velocidad de arranque (m/s)	Nota
(Panyawong et al., 2022)	Turbina Savonius helicoidal, 3 palas, ángulo de torsión de 180°.	1.51 m/s	La turbina alcanzó su velocidad de arranque más baja con tres palas y torsión de 180°, mostrando un excelente desempeño en condiciones de viento débil.
(Prabowo et al., 2023)	Turbina micro Savonius, 2 palas rectas , diámetro pequeño, operando en túnel de viento.	1.85 m/s	Se observó que la turbina inicia su rotación a 1.85 m/s, confirmando su idoneidad para zonas de baja velocidad de viento.
(Santoso et al., 2020)	Turbina Savonius convencional de 2 álabes , instalada en zona costera.	2.0 m/s	El experimento mostró que la turbina inicia su movimiento a 2 m/s, lo que la hace adecuada para entornos con viento moderado.

2.6. Procedimiento

OE1. Determinar la demanda energética del sistema de sensores remotos y el potencial energético eólico disponible, para definir los requerimientos de la turbina.

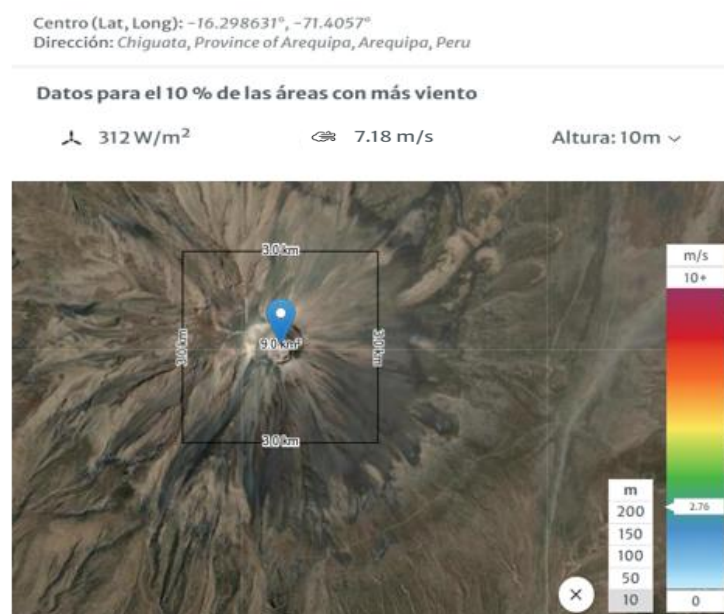
2.6.1. Determinación de la demanda energética y el potencial eólico

La investigación tomó como referencia la demanda de consumo energético de una de las estaciones de monitoreo del Centro Vulcanológico Nacional (CENVUL), ubicado en el departamento de Arequipa. Por tal motivo, los datos fueron obtenidos a través del director del Observatorio Vulcanológico del Sur, con quien se llevó a cabo una reunión remota junto a los encargados de dicha institución (ver Anexo 15). Durante este encuentro, se nos proporcionó la información de que el consumo energético total de los equipos eléctricos presentes en una estación de monitoreo es de 15 Watt-hora.

Para determinar el potencial energético, se tomó como referencia la investigación de (Guerreros et al., 2020), en la cual se reportaba que en el sector La Joya, ubicado en la región Arequipa, las velocidades de viento presentaban un promedio anual de entre 4 y 6 m/s. Dicho valor evidenciaba que la zona constituía un entorno favorable para el desarrollo de proyectos eólicos. A partir de esta información, se efectuó un análisis detallado del área donde se localizaba la estación meteorológica, recurriendo a los datos proporcionados por el atlas eólico con el propósito de obtener mediciones más precisas. Para ello, se delimitó una superficie de 9 km² y 3 km² en torno al volcán Misti (ver Figura 22), donde se encuentra la estación de monitoreo, verificándose la velocidad del viento a una altura de 10 metros (véase la Figura 1), aquí nos muestra que las áreas delimitadas presentan velocidades de 7.18 m/s respectivamente, por lo cual para realizar los cálculos se tomó una velocidad de viento de 6 m/s.

Figura 22

Velocidades de viento en zona de estudio en el departamento de Arequipa



Nota. Recuperada de la página web [Global Wind Atlas](#)

2.6.2. Requerimientos de la turbina

Posteriormente, se procedió a definir los requerimientos de la turbina.

- Potencia a generar: 15 W
- Operar en el rango de velocidades de viento: 2 a 6 m/s
- Alto par de arranque
- Bajo costo
- $C_p \geq 0.15$

Para determinar la turbina eólica de eje vertical (VAWT) más adecuada, se consideraron tres tipos principales (véase Figura 14). Esta decisión se basó en la investigación de Vargas et al. (2022), quienes señalan que dichos modelos son los más estudiados dentro de esta categoría. Asimismo, los autores indican que las turbinas Darrieus y H-rotor presentan un coeficiente de potencia (C_p) superior al de la Savonius, aunque con la limitación de no operar eficientemente a bajas velocidades de viento.

No obstante, como se evidencia en las investigaciones descritas en la base teórica (véase Figura 19), la turbina Savonius puede mejorar su C_p al incorporar un ángulo de torsión en sus álabes (45° , 90° o 135°), junto con una superposición óptima y una adecuada relación D/H. Considerando estos aspectos, se optó por diseñar una turbina Savonius, dado que cumple con la mayoría de los requerimientos previamente establecidos.

Una alternativa para mejorar el C_p de la turbina Savonius es que los álabes en vez de ser rectos tengan un ángulo de torsión, así lo manifiesta en su investigación (Lee et al., 2016) en el cual evaluaron distintos ángulos y concluyeron que una torsión de 45° ofrecía el mejor equilibrio entre eficiencia y capacidad de arranque, al reducir las zonas de torque negativo y facilitar la operación con vientos bajos. De manera complementaria, (Farozan et al., 2025) confirmaron estos resultados y añadieron que, si bien el ángulo de 45° maximiza el coeficiente

de potencia, un ángulo de 90° brinda una mejor capacidad de autoarranque y un mayor aprovechamiento energético en entornos con vientos reducidos. En conjunto, estas investigaciones evidencian que la elección del ángulo de torsión debe responder al contexto de aplicación: 45° cuando se busca eficiencia energética y 90° cuando se prioriza el arranque a bajas velocidades de viento.

OE2. Diseñar mecánicamente en CAD y simulación en CAE la turbina eólica de eje vertical.

2.6.3. Cálculos para el Dimensionamiento de la VAWT

- **Densidad del aire**

Es un factor importante para determinar la cantidad de energía que se puede extraer del viento, ya que la energía cinética del viento está directamente relacionada con la densidad del aire.

$$\rho = \frac{P_o}{R * T} \quad (14)$$

Donde:

P_o : presión atmosférica

ρ_o : densidad específica del aire

R: constante de los gases (287 J/kg.°K)

T: temperatura absoluta (288.15 °K)

Determinamos la presión atmosférica para la ciudad de Arequipa (ubicada a 2400 msnm).

La fórmula se deriva de la fórmula barométrica.

$$P = P_o \times \left(1 - \frac{(L \times h)}{T_o} \right)^{\left(\frac{g \times M}{R_u \times L} \right)} \quad (13)$$

Donde:

- P_0 = Presión al nivel del mar (101,325 Pa)
- L = Tasa de decrecimiento de temperatura con la altura = 0.0065 K/m
- h = Altitud (2400 msnm para Arequipa)
- T_0 = Temperatura standard al nivel del mar (288.15 K)
- g = Aceleración de la gravedad (9.81 m/s²)
- M = Masa molar del aire seco (0.0289644 kg/
- R_u = Constante universal de los gases (8.31447 J/(mol·K))

Reemplazando en la ecuación, obtenemos:

$$P = 101325 \times \left(1 - \frac{(0.0065 \times 2400)}{288.15} \right)^{\left(\frac{9.81 \times 0.02896}{8.31447 \times 0.0065} \right)}$$

$$P = 75621.88 \text{ Pa}$$

Reemplazamos en la ecuación 12

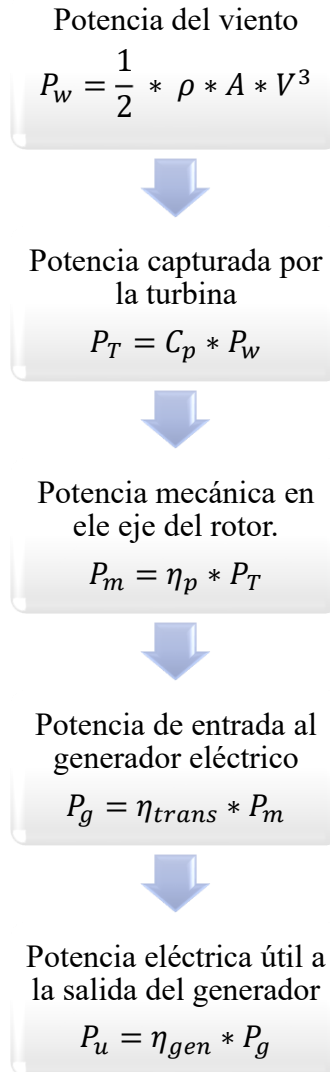
$$\rho = \frac{75621.88}{287 * 288.15}$$

$$\rho = 0.914 \text{ kg/m}^3$$

- **Eficiencia del sistema**

Calculamos la eficiencia total del sistema

Diagrama:



La potencia eléctrica útil a la salida del generador tiene que ser de 15 W

$$P_u = 15 \text{ W}$$

La eficiencia de cada fase se tomaron valores aproximados y son los siguientes:

Eficiencia del generador:

$$\eta_g \approx 80 \%$$

Eficiencia del sistema de transmisión:

$$\eta_{trans} \approx 90 \%$$

Eficiencia del eje del rotor:

$$\eta_{rotor} \approx 99 \%$$

Eficiencia total del sistema

$$\eta_{total} \approx 0.713 \approx 71\%$$

Por lo tanto, la potencia de la turbina:

$$P_T = \frac{15}{0.713} = 21.038 \text{ W}$$

Para objeto de estudio tomaremos una potencia de 21 W.

- **Cálculo del Área de Barrido**

Es aquella superficie ocupada por el giro de la turbina (eje y palas), esta se puede obtener despejando de la ecuación (09).

Según la investigación de (Tobías Salas et al., 2017) menciona que el C_p de la turbina Savonius oscila entre 0.05 – 0.30. Para cálculo se va a tomar un valor de 0.25

$$A = \frac{2 \cdot P_T}{\rho \cdot v^3 \cdot C_p} \quad (14)$$

Donde:

$P_T = 21 \text{ W}$ (potencia útil con todas las pérdidas del sistema)

$v = 6 \text{ m/s}$

$C_p = 0.32$ (asumido, típico para Savonius)

$\rho = 0.914 \text{ kg/m}^3$

$$A = \frac{2 \cdot 21}{0.914 \cdot 6^3 \cdot 0.32}$$

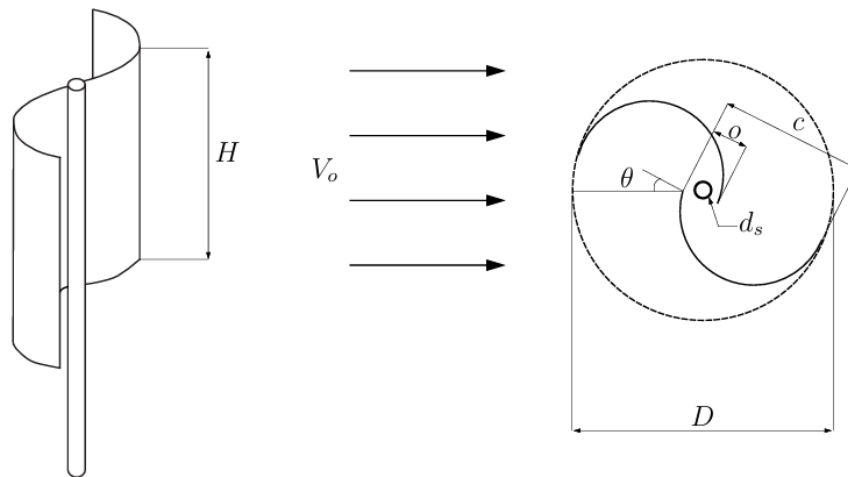
$$A = 0.665 \approx 0.67 \text{ m}^2$$

- **Variables geométricas**

Se consideran cuatro variables geométricas del rotor de la turbina Savonius, estas son: Relación de aspecto (AR), ángulo de torsión (TA), Relación de superposición (OR) y el número de álabes (ver Figura 23).

Figura 23

Características geométricas de la turbina



Nota. Extraída de (Torres, 2021)

- **Relación de Aspecto (AR)**

Según las investigaciones que se muestran en la figura 18

Optamos por una relación $H / D = 2.5:1$ (típico para Savonius)

$$A = H \cdot D = 2.5D \cdot D = 2.5D^2 \quad (15)$$

Despejamos D:

$$D = \sqrt{\frac{A}{2.5}} = \sqrt{\frac{0.67}{2.5}} = 0.518 \approx 0.52 \text{ m}$$

$$H = 2.5D = 2.5(0.52) = \mathbf{1.30\ m}$$

– **Número de álabes**

El número de álabes constituye un factor determinante en el rendimiento del rotor, dado que influye directamente en la optimización del par dinámico. El incremento en la cantidad de palas amplía el área convexa expuesta al flujo de viento en determinadas posiciones angulares, lo que conlleva a una reducción de la diferencia de par generada entre las superficies cóncava y convexa de los álabes, lo que finalmente repercute en una disminución del coeficiente de potencia (Al-Kayiem et al., 2016). Asimismo, Saha et al. (2008) concluyen que el número óptimo de álabes para el rotor tipo Savonius es dos, independientemente de si la configuración corresponde a una, dos o tres etapas.

– **Ángulo de Torsión (TA)**

La geometría del álabes es uno de los factores más analizados en la mejora del rendimiento de los aerogeneradores de eje vertical. En particular, la variable TA, que caracteriza la forma del álabes, corresponde al ángulo de torsión definido entre sus extremos superior e inferior (ver Figura 19), en ese sentido en la tabla 13 se aprecian los diferentes valores de TA según su rendimiento en consecuencia, el valor escogido para este diseño es del TA a 90 °.

– **Relación de Superposición (OR)**

Es un parámetro de diseño que cuantifica el grado en que los álabes del rotor se solapan o traslapan en la zona central. Se calcula como la relación entre la distancia de traslape existente entre los álabes (e) y el diámetro de un solo álabes (d), para este caso se ha tomado el valor de 0.20.

- **Velocidad de Rotación**

La relación del viento tangencial (TSR): Relaciona la velocidad tangencial en la punta de las aspas y la velocidad del viento.

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} \quad (16)$$

λ : relación de velocidad tangencial (0.9 asumido, típico para Savonius)

ω : velocidad angular (rad/s)

R: radio del rotor (D/2) = 0.26 m

v : velocidad del viento (6 m/s)

Velocidad angular:

$$\omega = \frac{6 * 0.9}{0.26} = 20.77 \text{ rad/s}$$

Conversión a RPM:

$$RPM_{rotor} = \frac{\omega \cdot 60}{2 \pi} = \frac{20.77 * 60}{2 \pi}$$

$$RPM_{rotor} = \mathbf{198.34}$$

198.34 es la velocidad aproximada del giro del rotor de la turbina Savonius.

- **Parámetros de la turbina de eje vertical:**

Como se hizo en mención anteriormente, debemos tener en cuenta el potencial eólico, la potencia generada de la turbina, este último se determina de la siguiente manera:

$$P_T = C_p P_W \quad (17)$$

$$P_T = C_p \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (18)$$

P_T : potencia de la turbina (W)

C_p : coeficiente de potencia

ρ : densidad del aire (kg/m^3)

A : área de barrida de la turbina (m^2)

v : velocidad del viento (m/s)

$$P_T = 0.32 \cdot \frac{1}{2} \cdot 0.914 \cdot 0.67 \cdot 6^3$$

$$P_T \approx 21.164 \approx 21 \text{ W}$$

- **Fuerza de Arrastre (F_D):** Fuerza de arrastre actúa en la dirección del flujo de aire. Su coeficiente de arrastre para la turbina Savonius.

Área frontal de cada Álabes

$$A_p = \frac{A}{2} = \frac{0.676}{2} = 0.338 \text{ m}^2$$

Ecuación de la fuerza de arrastre

$$F_D = C_D \frac{1}{2} \rho A_p v^2 \quad (19)$$

Donde:

ρ : densidad del aire (0.914 kg/m^3)

v : velocidad del aire (2 m/s)

C_D : coeficiente de arrastre

A_p : área proyectada del álabes (m^2)

Calculamos para el álabe cóncavo

C_D : 1.2 valor típico para el álabe cóncavo

$$F_{D1} = C_D \frac{1}{2} \rho A_P v^2 \quad (20)$$

$$F_{D1} = 1.2 \times \frac{1}{2} \times 0.914 \times 0.338 \times 2^2$$

$$F_{D1} = 0.739 \text{ N}$$

Calculamos para el álabe convexo

C_D : 0.3 valor típico para el álabe convexo

$$F_{D2} = C_D \frac{1}{2} \rho A_P v^2 \quad (21)$$

$$F_{D2} = 0.3 \times \frac{1}{2} \times 0.914 \times 0.338 \times 2^2$$

$$F_{D2} = 0.185 \text{ N}$$

Calculamos la fuerza de arrastre total:

$$F_{D \text{ total}} = F_{D1} - F_{D2} \quad (22)$$

$$F_{D \text{ total}} = 0.739 - 0.185$$

$$F_{D \text{ total}} = 0.554 \text{ N}$$

– Torque de la turbina

Calculamos el torque:

$$T_{\text{turbina}} = F_{D \text{ total}} * r \quad (23)$$

Donde:

$r = \text{radio de la turbina}$

$$T_{turbina} = 0.554 * 0.26$$

$$T_{turbina} = 0.144 \text{ N.m}$$

Esto es el par de torsión que intenta poner en movimiento al rotor

Calculamos el par de resistencia total, esto para determinar el valor de par de resistencia que tiene que vencer el par torsión de la turbina, es decir:

$$T_{turbina} > T_{resistencia}$$

$T_{resistencia}$: Resistencia mecánica, resistencia aerodinámica, resistencia del generador

$$T_{r \text{ fricción}} = \mu \times N \times r \quad (24)$$

Donde:

μ : Coeficiente de fricción (0.005 para rodamientos)

N : Fuerza normal (peso del eje del rotor + peso del eje), $8 \text{ kg} * 9.81 \text{ m/s}^2$

r : Radio del eje

$$T_{r \text{ fricción}} = 0.005 \times 78.5 \times 0.02$$

$$T_{r \text{ fricción}} = 0.008 \text{ N.m}$$

Calculamos el par por aerodinámica

$$T_{r \text{ aerodinámica}} = 10\% \times T_{turbina} \quad (25)$$

$$T_{r \text{ aerodinámica}} = 0.1 \times 0.144$$

$$T_{r \text{ aerodinámica}} = 0.0144 \text{ N.m}$$

Calculamos el par del generador:

$$T_{r \text{ generador}} = F \times r_{\text{polea}} \quad (26)$$

$$T_{r \text{ generador}} = 1.05 \times 0.02$$

$$T_{r \text{ generador}} = 0.021 \text{ N.m}$$

Sumamos la resistencia total:

$$T_{\text{resistencia}} = 0.008 + 0.0144 + 0.021$$

$$T_{\text{resistencia}} = 0.0434 \text{ N.m}$$

De acuerdo a este cálculo podemos inferir que se cumple la siguiente condición, esto a una velocidad de 2 m/s (ver Tabla 17).

$$T_{\text{turbina}} > T_{\text{resistencia}}$$

$$0.144 > 0.0434$$

Tabla 17

Tabla de comparación si el par útil vence la resistencia

Velocidad del viento (m/s)	Par útil (N·m)	Velocidad (RPM) turbina	¿Vence la resistencia?
1	0.036	10	✗
1.5	0.081	15	☑
2	0.145	20	☑
2.5	0.227	25	☑
3	0.325	30	☑
3.5	0.44	35	☑
4	0.574	40	☑
4.5	0.725	45	☑
5	0.89	50	☑
5.5	1.071	55	☑

6	1.278	60	<input checked="" type="checkbox"/>
6.5	1.498	65	<input checked="" type="checkbox"/>
7	1.739	70	<input checked="" type="checkbox"/>
7.5	1.998	75	<input checked="" type="checkbox"/>
8	2.265	80	<input checked="" type="checkbox"/>
8.5	2.548	85	<input checked="" type="checkbox"/>
9	2.854	90	<input checked="" type="checkbox"/>
9.5	3.177	95	<input checked="" type="checkbox"/>
10	3.506	100	<input checked="" type="checkbox"/>

Nota. En la tabla se observa que para vencer la resistencia se necesita una velocidad mínima de 1.5 m/s.

2.6.4. Diseño de la turbina Savonius

i. Configuración general

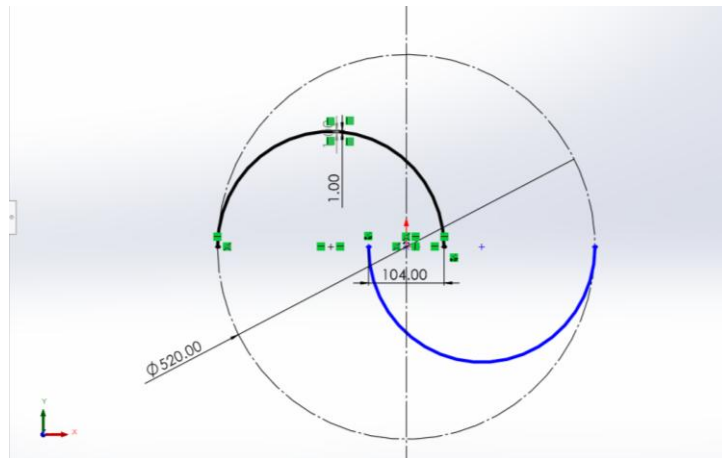
- Se creó una nueva pieza y se seleccionó el plano de trabajo.
- Se Configuraron las unidades al sistema métrico (mm).

ii. Creación de los álabes

- Se seleccionó el plano superior como área de trabajo. Posteriormente, se creó un croquis donde se dibujó un círculo de construcción en el origen, con un diámetro de 520 mm, correspondiente al diámetro de la turbina y una línea infinita de construcción.
- Se creó un semicírculo haciendo tangente en la punta con el círculo previamente dibujado y el otro extremo a una distancia de 520 cm del origen como se visualiza en la Figura 24.

Figura 24

Creación de los álabes

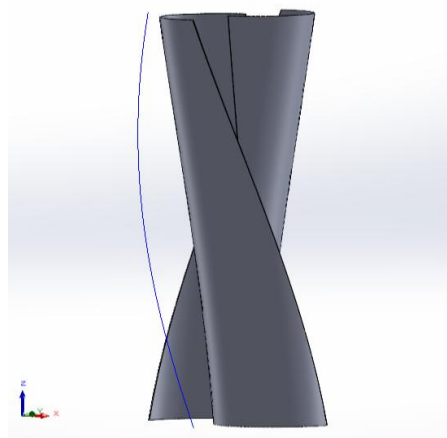


Nota. La figura muestra la creación de los alabes en vista de planta.

- Luego se seleccionó offset entities (equidistancias entidades), luego se creó una matriz circular de croquis creando el otro alabe. Posteriormente se realizó una espiral en el plano, definiendo la altura de 1300 cm y la torsión en los alabes de 90° o 0.25 revoluciones, luego se hace un barrido de los alabes (ver Figura 25).

Figura 25

Álabes con un ángulo de torsión de 90°



Nota. La figura muestra la turbina Savonius en 3D a un ángulo de torsión de 90° .

iii. Selección de los materiales:

Una vez definido el diseño mecánico preliminar del prototipo de turbina eólica de eje vertical tipo Savonius, se procedió a la selección de los materiales de sus componentes principales, considerando las propiedades mecánicas, físicas y de durabilidad requeridas para su correcto funcionamiento (ver Tabla 18).

Tabla 18

Propiedades de los materiales

Componente	Material seleccionado	Propiedades relevantes
Álabes	Plancha galvanizada (espesor 0,5 mm)	<ul style="list-style-type: none">- Alta resistencia a la corrosión por recubrimiento de zinc.- Peso reducido que facilita el montaje y mejora la eficiencia del giro.- Buena maleabilidad para corte, doblado y perforado.- Durabilidad frente a abrasión y daños mecánicos.
Base	Tubo cuadrado negro (Acero)	<ul style="list-style-type: none">- Elevada resistencia mecánica ante cargas y vibraciones.- Dureza y resistencia al desgaste superficial.- Tenacidad para absorber impactos sin fractura.- Plasticidad que permite su conformado sin fisuras.
Eje	Tubo galvanizado	<ul style="list-style-type: none">- Protección anticorrosiva por recubrimiento de zinc.- Buena resistencia a esfuerzos torsionales y vibraciones.- Larga vida útil en ambientes exteriores.- Bajo mantenimiento y alta estabilidad estructural.
Soportes transversales	Tubo de Aluminio (½ in)	<ul style="list-style-type: none">- Excelente relación resistencia-peso, contribuyendo a una estructura ligera y rígida.- Resistencia natural a la corrosión por formación de óxido protector.- Facilidad de mecanizado y perforación.

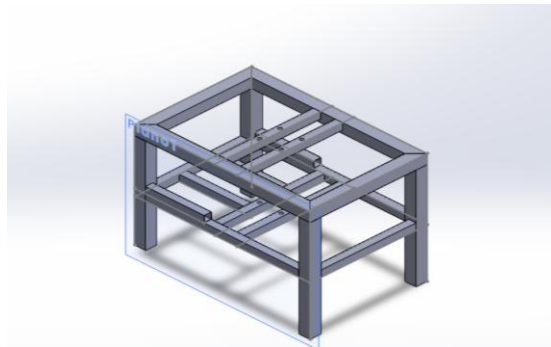
Nota. La tabla muestra las propiedades de los materiales que se ha utilizado para la construcción de la turbina eólica Savonius.

iv. Base de soporte

Se diseñó la base rectangular de 60 cm largo x 40 cm de ancho con una altura de 44 cm, todo esto con material de tubo cuadrado negro (acero), para ello se empleó tubos de 1 ½ in x 0.049 in y 1 in x 0.049 in (véase la Figura 26).

Figura 26

Diseño del soporte de la turbina



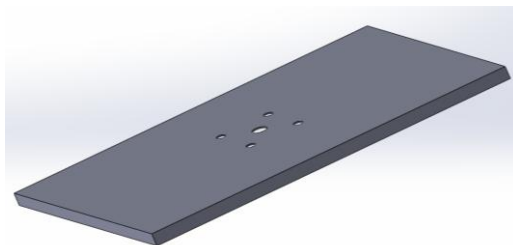
Nota. La figura muestra la base metálica de la turbina.

v. Cubierta metálica

La cubierta se realizó de plancha metálica de 2 mm de espesor para el cubrir el segundo piso (ver Figura 27) y el primer piso de 1 mm de espesor para la base de soporte.

Figura 27

Diseño de la cubierta metálica



Nota. La Figura muestra el diseño de la cubierta metálica que va en el segundo piso de la base metálica.

vi. Otros componentes

- Chumacera de pared modelo F 205 mostrándose en la Figura 28

Figura 28

Chumacera de pared



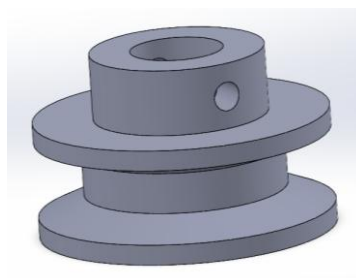
Nota. La figura muestra la chumacera utilizada para acoplar al eje de la turbina Savonius.

- Poleas para el sistema de transmisión

Polea de 2 in de diámetro que va acoplado al eje del generador.

Figura 29

Polea para el eje del generador

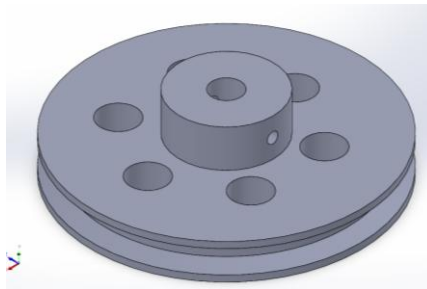


Nota. La figura muestra la polea que va acoplada el eje del generador.

Polea de 6 in de diámetro que va acoplado en el eje de la turbina.

Figura 30

Polea para el eje de la turbina



Nota. La figura muestra la polea que va acoplada al eje de la turbina Savonius.

2.6.5. Simulación de la turbina Savonius

Análisis en ANSYS: Para ello seguimos los siguientes pasos.

1. Preparación del modelo geométrico

Se diseñó previamente la turbina en software CAD (por ejemplo, SolidWorks).

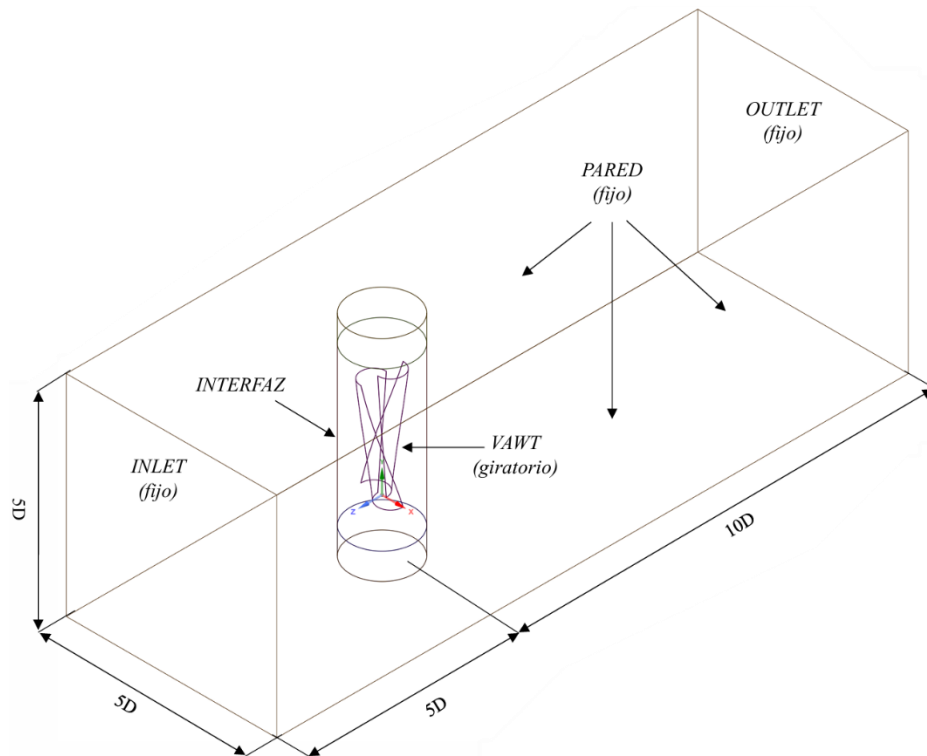
Una vez dentro de la interfaz de ANSYS, se utilizó Fluid Flow (Fluent) siendo una herramienta que permite simular y analizar el comportamiento de fluidos (para este caso el aire), posteriormente se importó el modelo 3D, una vez dentro de la geometría se realizó lo siguiente:

Este Enclosure fue dividido en dos partes:

En primera parte, se encapsuló la turbina dentro de un “Enclosure” con un volumen cilíndrico, se particiona en tres secciones, parte superior (estacionaria), parte central (Zona rotativa), parte inferior (estacionaria), se realiza de esta manera con la finalidad de aplicar movimiento relativo en el rotor y el resto del dominio y controlar las mallas con zonas. Posteriormente la segunda parte, se crea un Enclosure con un volumen rectangular (dominio computacional) que representa el espacio por donde fluye el aire (ver Figura 31)

Figura 31

Preparación de la geometría



Nota. La figura muestra la geometría de la turbina mostrando cual es la entrada y la salida de la turbina.

Seguidamente se añade los “named selections”:

- Inlet (entrada de aire): cara del volumen por donde entra el flujo de viento.
- Outlet (salida de aire): cara opuesta donde el flujo de aire sale.
- **Wall (paredes laterales, techo y piso del túnel): representan los límites del dominio, se configuran como condiciones de no deslizamiento o simetría.**
- Turbine Wall (alabes de la turbina) superficies sólidas de los alabes

2. Definición de dominios y malla (Meshing)

i. Zona rotacional cilíndrica (Rotating Domain)

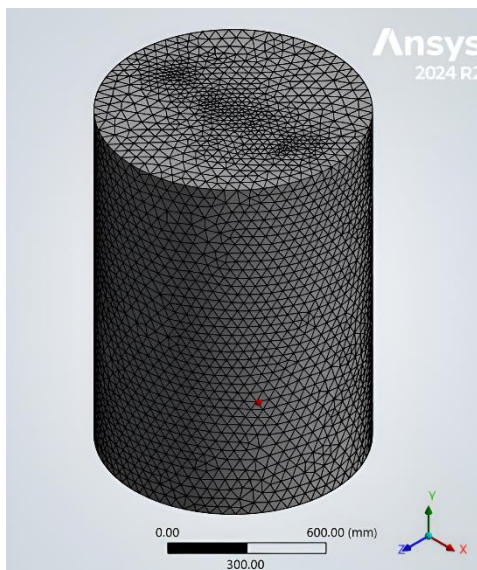
- Face Sizing (Turbine Wall): Element Size (20 mm)

- Body Sizing para el cilindro rotativo (50 mm).
- Inflation

Cargamos la malla para la zona rotacional mostrándose en la Figura 32.

Figura 32

Enmallado de la zona rotacional



Nota. La figura muestra el enmallado de la zona de rotación donde va la turbina Savonius.

Posteriormente se añaden los siguientes named selections

- Top Wall interior Side (seleccionas la parte superior de cilindro)
- Side Wall Interior Side (seleccionas la parte lateral del cilindro)
- Bottom Wall Interior Side: Es la parte inferior del cilindro

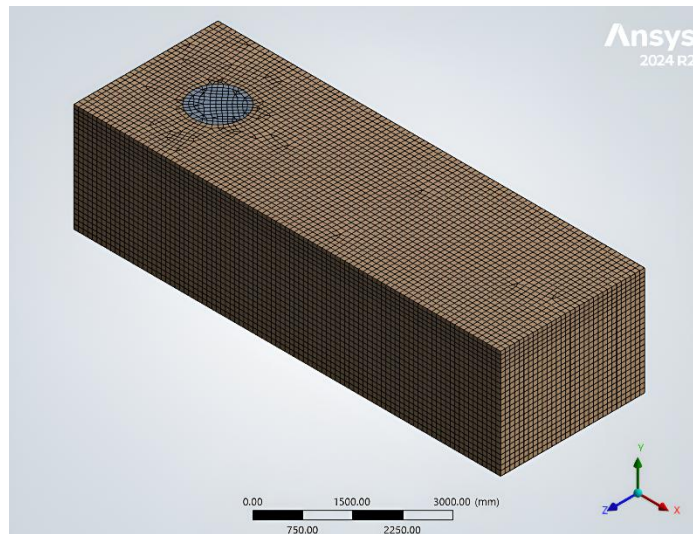
ii. Túnel zona de dominio computacional

- Method (Geometria 1 body): Multizone
- Body Sizing para el tunel (150 mm).
- Edge Sizing (para el contorno de cilindro)

Generas la malla para el túnel de viento (ver Figura 33).

Figura 33

Enmallado del túnel de viento



Nota. La figura muestra el enmallado del túnel de viento.

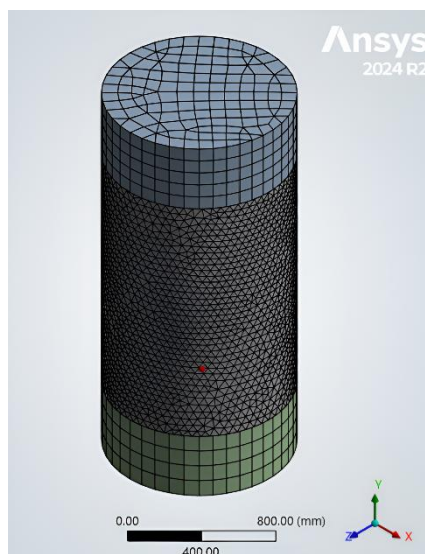
iii. secciones superior e inferior del cilindro

- Method (Geometria 2 body superior e inferior): Multizone
- Body Sizing para superior e inferior (80 mm).

Generamos la malla para esta sección (ver Figura34).

Figura 34

Enmallado para la parte superior e inferior del cilindro



Posteriormente se añaden los siguientes named selections

- Top Wall exterior Side (seleccionas la parte superior de cilindro)
- Side Wall Exterior Side (seleccionas la parte lateral del cilindro)
- Bottom Wall Exterior Side: Es la parte inferior del cilindro

Datos adicionales del Mallado (Meshing)

- Se generó una malla híbrida no estructurada, adaptada a la geometría compleja de la turbina.

El mallado fue más fino en:

- La interfaz entre el sólido y el fluido (donde ocurren los mayores gradientes de velocidad).
- La zona rotacional, para capturar vórtices, estelas y turbulencias con mayor precisión.
- El mallado se realizó con elementos tetraédricos y calidad ortogonal adecuada para evitar errores de convergencia.

3. Parámetros para el Setup (configuración)

a. Configuración General: Configuras el tipo de simulación

- Type: Definimos como (Pressure-Based) siendo este para simulaciones de viento.
- Velocity Formulation: Absolute
- Time: Definimos como transitorio (Transient).

b. Models: Configuras los modelos físicos adicionales (ver Figura 35).

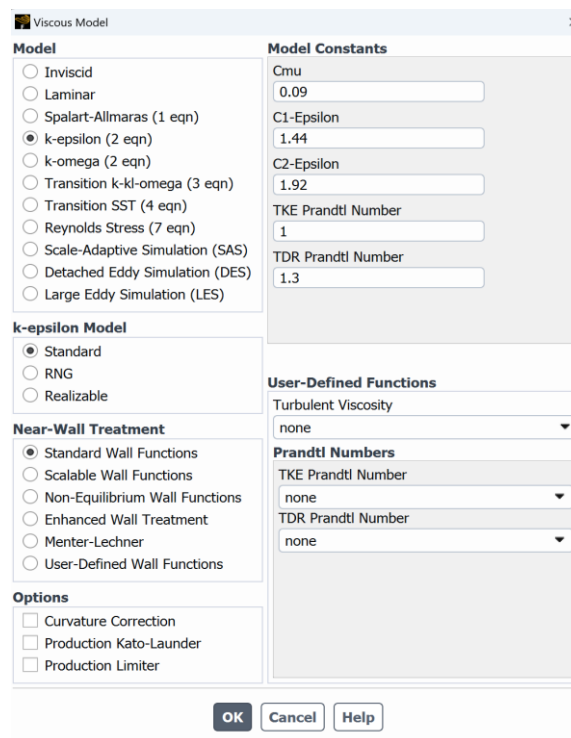
Viscosidad (Viscous):

- Models > K-epsilon: por ser más robusto para predecir flujos con curvaturas y rotación.

- K-epsilon Model: Definimos como (Standard) porque mejora la predicción del arrastre y la recirculación.
- Near-Wall Treatment: Definimos como (Standard Wall Functions), sirve para modelar la capa límite cerca de las palas, puesto que la malla no siempre tiene suficiente refinamiento para resolver la capa viscosa, por eso se usa porque aproxima el comportamiento cerca de la pared.

Figura 35

Configuración de los parámetros del apartado Models



Nota. La figura muestra la configuración realizada en el apartado Viscous Models.

c. Condiciones de entorno (Boundary consitions): Defines condiciones en las fronteras del dominio.

- Inlet (entrada): Se añade una velocidad de viento mediante una función transitoria, esto significa que el viento no empieza instantáneamente a 6 m/s, sino que se incrementa

progresivamente según la función exponencial, es decir, el viento “acelera” suavemente en los primeros 0.5 segundos hasta llegar al valor objetivo (6 m/s) (ver Figura 36).

$$6 \text{ [m s}^{-1}\text{]} * (1 - \exp(-\text{Time}/0.5[\text{s}]))$$

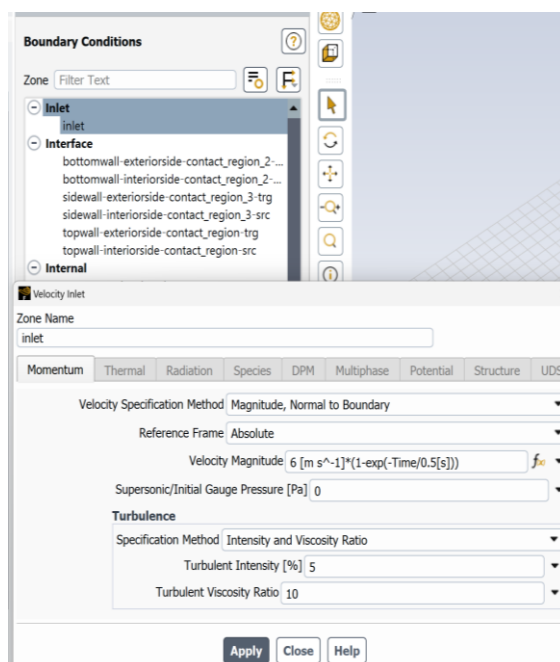
En el apartado de Turbulence (Para caracterizar el nivel de turbulencia del flujo de entrada).

Turbulent Intensity [%] = 5, indica que el viento tiene un nivel de fluctuaciones del 5 % respecto a la velocidad media, en túneles de viento o atmósfera controlada, 1–5 % es típico. Como dato adicional si simulas a condiciones reales de campo abierto, podría ser mayor (10–20 %).

Turbulent Viscosity Ratio = 10, es la relación entre la viscosidad turbulenta y la viscosidad molecular, se usa 10 para representar un flujo moderadamente turbulento.

Figura 36

Configuración en la sección de Boundary Conditions, la entrada del tunel

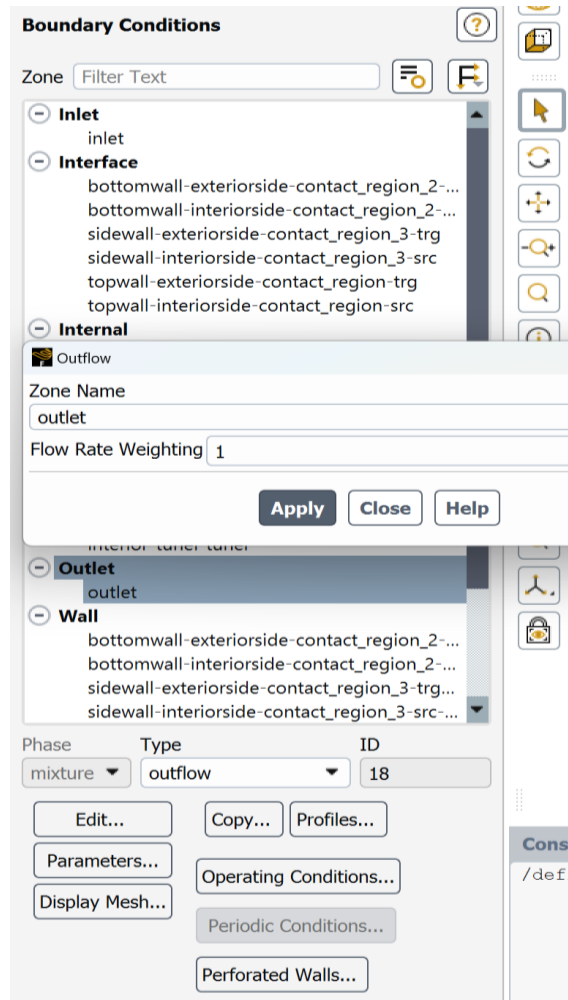


Nota. La figura muestra las condiciones que se ha configurado en la entrada del túnel.

- Outlet: Type Outflow, mostrándose en la Figura 37.

Figura 37

Configuración en la sección de Boundary Conditions, la salida del tunel



Nota. La figura muestra las condiciones que se ha configurado en la salida del túnel.

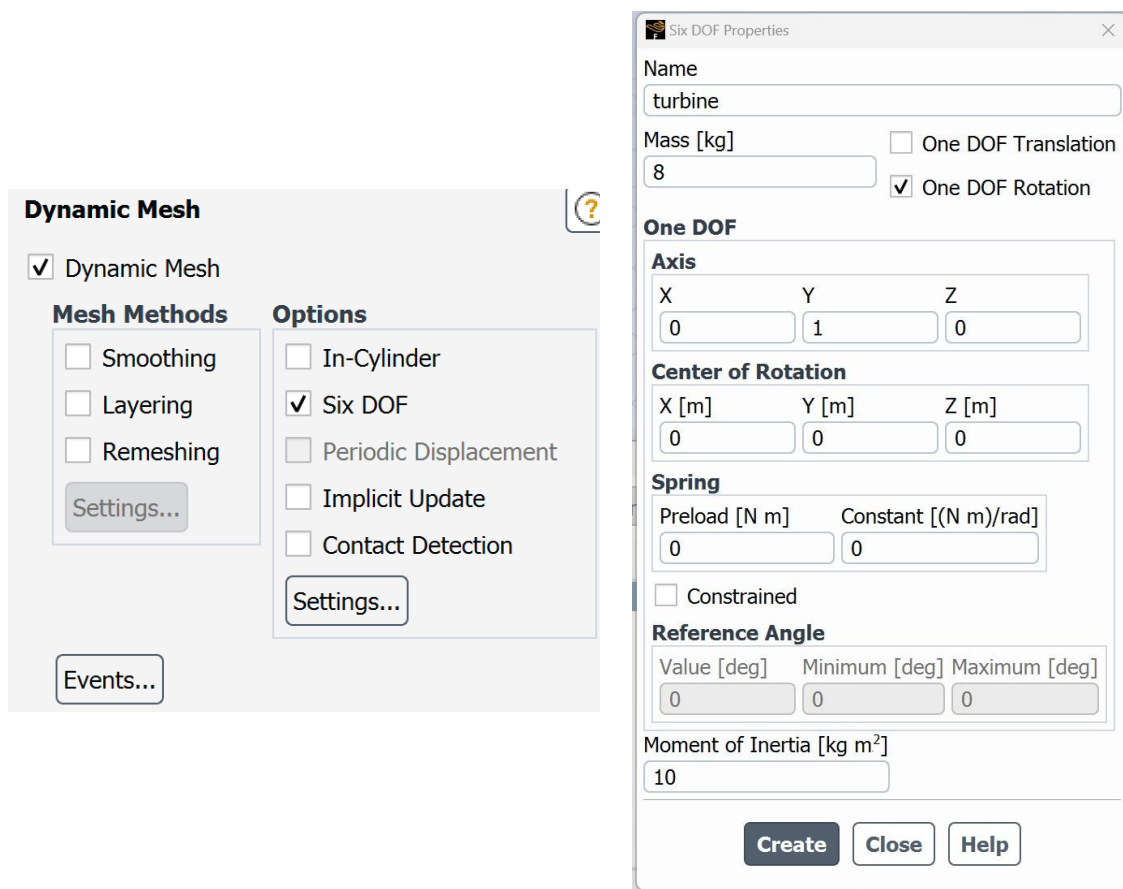
d. Dynamic Mesh: Simular el movimiento de la malla

- Usar la herramienta Six dof: Permite que la turbina gire libremente en respuesta al par generado por el flujo de viento, simulando así su operación real. Posteriormente configuramos y añadimos la masa de turbina. Dejamos desactivado One DOF Translation, significa que el centro de masa de la turbina no se puede mover en ninguna dirección (X, Y, Z) y activamos One DOF Rotation que permite que la turbina gire,

pero solo alrededor de un único eje. Configuramos que la rotación se de en el eje (Y), tambien que (Center of Rotation) este en el origen de las coordenadas, es decir, en (0,0,0). La configuración de **Spring > (Preload = 0), (Constant = 0)** se deja en cero, esta condición es de operación libre de la turbina. Para el Moment of Inertia [kg m²], agregamos un valor, para este caso el valor es de 8 kg m² (ver Figura 38).

Figura 38

Configuración de los parámetros en la sección de Dynamic Mesh



Nota. La figura muestra las condiciones definidas para la simular el movimiento.

Este es el parámetro más importante junto con el par aerodinámico para determinar la dinámica rotacional. La Segunda Ley de Newton para la rotación es Par Neto = Momento de Inercia * Aceleración Angular.

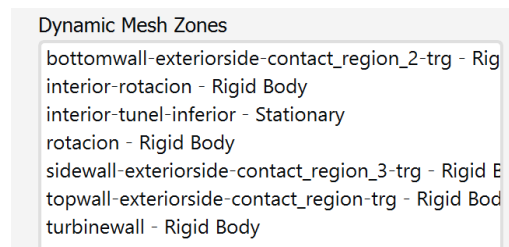
- Definimos las zonas de mallas dinámicas (Dynamic Mesh Zones):

Rigid Body: (turbinewall, interior, interior-interior, Botthomwall-exteriorside-contc_region, topwall-exteriorside-contac_region, sidewall-exteriorside-contac_región), para zonas donde gira (ver Figura 39).

Estacionary: (interior-exterior-part3), para zonas donde va ser fijo.

Figura 39

Definición de las zonas de mallas dinámicas

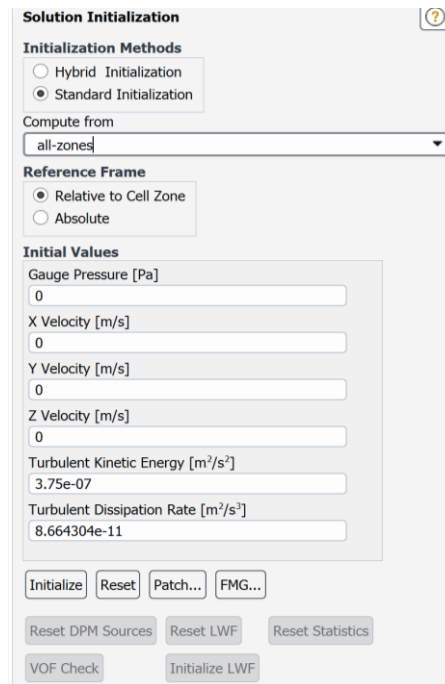


Nota. La figura muestra las condiciones que de la malla dinámica.

- e. **Solutions > Monitors > Inicializations:** Se configura cómo Fluent resolverá las ecuaciones matemáticas del modelo.
- Seleccionamos la opción de all-zones en la sección de Compute from: Indica a Fluent que calcule los valores iniciales promediando las condiciones de flujo en todo el dominio computacional (ver Figura 40).

Figura 40

Configuración de la sección de Solutions



Nota. La figura muestra las configuraciones de cómo se resolverán las ecuaciones.

f. Results > Graphics

- Mesh > (New surfaces): Se crea un plano en el plano ZX a la altura $Y=0.5$ m, para visualizar resultados en un plano de corte específico, luego seleccionamos el plano creado y activamos la opción de (edges) > save, esto nos permite visualizar y verificar que la malla este correctamente (diagnostico preventivo) antes de iniciar con la simulación.
- Contours: Seleccionamos la opción de velocidad en el mismo plano creado y se utiliza con la finalidad de analizar los resultados de la simulación que estas ejecutando (ir monitoreando los resultados en tiempo real) o has ejecutado una vez finalizado la simulación.

– Posteriormente definimos los siguientes parámetros siguiendo la siguiente ruta:
Solutions > Calculation Activities > Solutions Animations: Define la animación y
fluent guardara cada 10 pasos de tiempo.

Solutions > Calculation Activities: **Autosave Every = 250**

**g. Solutions > Run Calculation: Finalmente llenamos los siguientes parámetros para
terminar con la configuración.**

- **Time Step Size [s] = 0.002:** Para capturar $\sim 8.6^\circ$ de giro por paso.
- **Number of Time Steps = 2500:** Para simular 5 segundos físicos (~ 41 revoluciones).
- **Max Iterations/Time Step = 10:** Suficiente para avance estable.
- **Reporting Interval = 1**
- **Profile Update Interval = 1**

**OE3: Manufacturar el prototipo de la turbina y seleccionar el generador eléctrico para
su montaje.**

2.6.6. Manufactura del prototipo de la turbina

Impresión 3D a escala de 1:6 del prototipo de la turbina para validación del diseño.

Como parte del proceso de validación del diseño, se procedió a la fabricación del prototipo a
escala de la turbina eólica de eje vertical tipo Savonius mediante tecnología de impresión 3D
en la impresora Creality K1 Max. Esta etapa permite verificar físicamente las dimensiones y
geometría de la turbina.

Impresión de turbina a escala mostrándose en la Figura 41.

Figura 41

Impresión de turbina a escala



Nota: En la figura se muestra el diseño de la turbina impresa a escala.

En la siguiente sección se detallará el proceso de manufactura del prototipo de la turbina.

a) Pasos de la manufactura del prototipo de la turbina eólica:

La plancha galvanizada fue cortada conforme a las dimensiones establecidas en el diseño elaborado en software CAD (ver Anexo 11). Posteriormente, se efectuó el rolado de cada uno de los álabes, con el propósito de obtener la geometría semicircular y el ángulo de torsión requeridos. Finalmente, los álabes fueron ensamblados al eje principal, conformando la estructura definitiva de la turbina.

Seguidamente, se procedió a la construcción de la base de soporte de la turbina eólica. Para tal fin, se realizó el corte del tubo rectangular de acuerdo con las especificaciones del diseño CAD, y posteriormente se efectuó el proceso de soldadura (ver anexo #), garantizando que las dimensiones finales coincidieran con las establecidas en el modelo del diseño.

Finalmente, se realizaron los acabados correspondientes, consistentes en el pintado tanto de la turbina como de la base (ver Anexo 13), con el propósito de mejorar la estética y proporcionar una adecuada protección superficial frente a la corrosión.

b) Selección del generador eléctrico y montaje.

El generador fue seleccionado considerando la demanda energética requerida de 15 W/h, motivo por el cual se optó por un modelo con una potencia nominal de 100 W (ver Figura 42), garantizando así un margen adecuado de operación. Para su acoplamiento con la turbina eólica, se implementó un sistema de poleas multiplicadoras, encargado de transmitir el movimiento rotacional desde el eje de la turbina hacia el generador. Con este propósito, se procedió al cálculo de la relación de transmisión entre las poleas, a fin de optimizar la velocidad de giro y el rendimiento del sistema.

Figura 42

Generador eléctrico parte externa e interna.



Nota: En la figura se muestra el generador eléctrico seleccionado para producir energía.

- **Sistema de Transmisión**

Se utilizó un generador de 100 W, el cual se procedió a calcular sus RPM, como se observa en la Figura 41, el generador tiene un total de 12 polos.

$$RPM_{generador} = \frac{120 \cdot f}{p} \quad (27)$$

f : frecuencia nominal (Hz)

p : número de polos

$$RPM_{generador} = \frac{120 \cdot 60}{12}$$

$$RPM_{generador} = 600$$

- **Relación requerida**

$$Relación = \frac{RPM_{generador}}{RPM_{turbina}} \quad (28)$$

$$Relación = \frac{600}{198.34} = 3.025$$

El sistema de poleas tiene que tener una relación de 4:1

OE4. Analizar el rendimiento energético del prototipo mediante pruebas bajo condiciones de viento natural variable, estimando su potencial de generación.

2.6.7. Realización de las pruebas de laboratorio

Para la realización de las pruebas experimentales, se implementó un sistema de medición compuesto por diversos módulos y sensores eléctricos. Estos dispositivos permiten registrar variables fundamentales como la corriente, voltaje, potencia, revoluciones por minuto (RPM) y velocidad del viento.

Diseño del circuito de medición

El diseño e implementación del sistema de adquisición de datos fue una etapa fundamental del proyecto. Este circuito se diseñó con el objetivo de registrar de manera simultánea y fiable las variables eléctricas (voltaje, corriente) y las variables ambientales (velocidad del viento, RPM del rotor). A continuación, se detallan los elementos de dicho diseño.

Funcionamiento del circuito electrónico

El circuito se centró en un microcontrolador **Arduino Nano**, el cual actuó como la unidad central de procesamiento. Este fue responsable de gestionar las comunicaciones con los sensores, procesar los datos, mostrarlos en tiempo real y almacenarlos en un medio no volátil. El funcionamiento se estructuró de la siguiente manera:

- **Medición de Potencia:** Se utilizó un sensor **INA219** para medir el voltaje y la corriente provenientes del generador. Este sensor se comunicó con el Arduino Nano mediante el protocolo I2C.
- **Temporización y Fechado:** Para asegurar que cada registro de datos tuviera una marca de tiempo precisa (Timestamp), se integró un módulo de Reloj en Tiempo Real (RTC) **DS3231**. Este módulo, que también utiliza el protocolo I2C, mantuvo la fecha y hora exactas independientemente de la alimentación principal del circuito, gracias a su batería de respaldo.
- **Visualización de Datos:** Se incorporó una pantalla **LCD de 16x2** caracteres, también conectada por I2C, para permitir la monitorización en tiempo real de las variables más relevantes (ej. Potencia, RPM y Velocidad del Viento) sin necesidad de un ordenador.

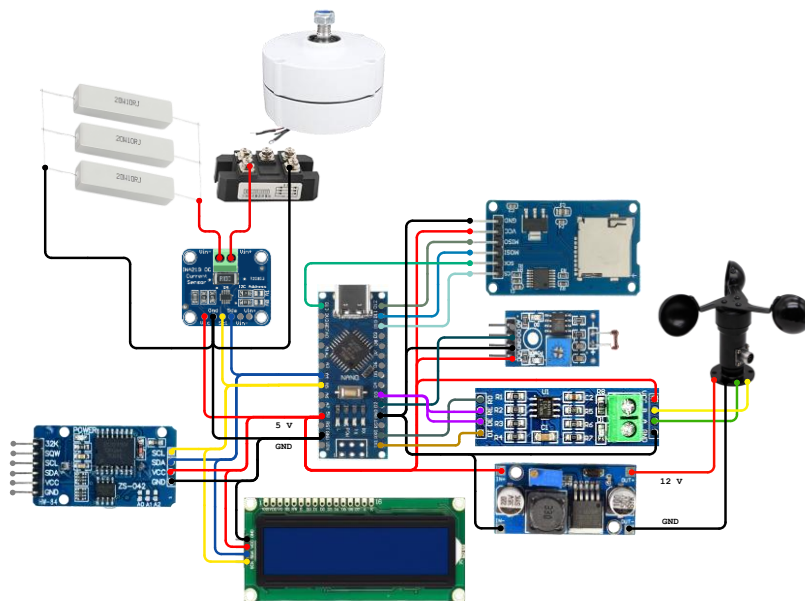
- **Medición de Velocidad del Viento:** Se empleó un anemómetro con protocolo de comunicación Modbus RTU (RS485) que requería una alimentación de 12 V. Para interactuar con él, se utilizó un módulo **Conversor MAX485**.
- **Medición de RPM:** La velocidad de rotación del generador se midió con un **sensor LDR** (configurado como tacómetro óptico). Este sensor envió un pulso digital al pin de interrupción D2 del Arduino por cada revolución.
- **Almacenamiento de Datos:** Todos los datos medidos se almacenaron en una **Tarjeta Micro SD**. El módulo lector de tarjetas se comunicó con el Arduino mediante el protocolo SPI.
- **Alimentación:** El circuito se alimentó principalmente con una **fuentes de 5 V**, la cual proveyó energía al Arduino Nano, la pantalla LCD, el módulo SD, el RTC y los sensores INA219 y LDR. Dado que el anemómetro requería una tensión de 12 V para operar, se integró un **conversor DC-DC (tipo *step-up* o *boost*)** que elevó el voltaje de 5 V a 12 V exclusivamente para este componente.

Diagrama de conexiones

Las interconexiones entre el microcontrolador Arduino Nano y los distintos módulos periféricos se realizaron siguiendo el diagrama esquemático presentado en la Figura 43. El diseño de estas conexiones se centró en la optimización de los pines disponibles en el microcontrolador, agrupando los componentes por su protocolo de comunicación.

Figura 43

Diagrama de conexiones del circuito de medición



Nota. En la figura se muestra el diagrama de conexiones el cual fue diseñado en el programa de Cirkit Designer.

La asignación detallada de pines se resume en la Tabla 19, la cual sirvió como guía para el ensamble físico.

Tabla 19

Tabla de asignación de pines del microcontrolador

Arduino nano	Sensor INA219	Tarjeta Micro SD	Módulo RTC DS3231	Sensor LDR	Pantalla LCD 16x2	Módulo MAX485 Convertor RS485
5V	VCC	VCC	VCC	VCC	VCC	VCC
GND	GND	GND	GND	GND	GND	GND
A5	SCL		SCL		SCL	
A4	SDA		SDA		SDA	
D12		MISO				
D11		MOSI				
D13		SCK				
D10		SC				
D2				D0		
D3						RE / DE
RX						RO
TX						DI

Como se observa en la tabla, se optimizó el uso de pines al compartir el bus **I2C** (pines A4 y A5) entre el INA219, el RTC DS3231 y la pantalla LCD. El bus **SPI** (pines D10-D13) se dedicó exclusivamente a la tarjeta Micro SD. Finalmente, los pines seriales (RX/TX), un pin de interrupción (D2) y un pin digital (D3) se reservaron para los sensores de RPM y viento.

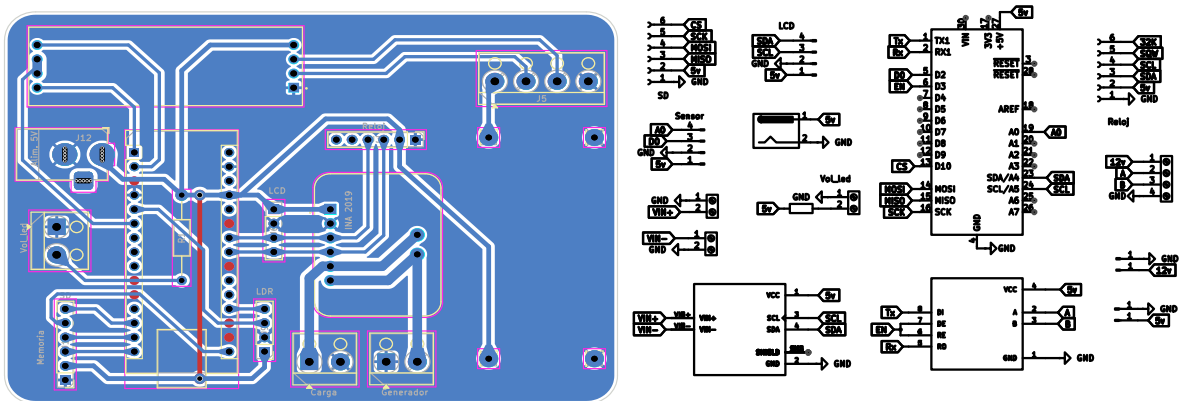
2.1.3 Diseño de placa de circuito impreso (PCB)

Basado en el diagrama esquemático (Figura 43) y la tabla de conexiones (Tabla 19), se procedió al diseño de una placa de circuito impreso (PCB) personalizada. El diseño se realizó en un software especializado (KiCad), optimizando el ruteo de las pistas para una placa de una sola cara, con el fin de facilitar su fabricación.

El diseño final de las pistas (capa de cobre) de la PCB se muestra en la Figura 44. Este diseño integró zócalos (sockets) y borneras (screw terminals) para permitir una conexión modular y segura de todos los componentes, facilitando tanto el ensamble como eventuales mantenimientos.

Figura 44

Diseño y diagrama esquemático de la PCB



Nota. En la figura da a conocer el esquema de conexiones del diagrama del PCB.

Ensamble de los componentes electrónicos

Tras la fabricación de la placa de circuito impreso (PCB), se realizó el ensamble final. Este proceso consistió en soldar todos los zócalos (para el Arduino Nano, módulo SD, INA219 y RTC) y las borneras de conexión (alimentación, anemómetro, LDR y LCD) en sus posiciones designadas. Finalmente, cada módulo se insertó en su zócalo correspondiente.

Programación

El firmware del sistema se desarrolló en el IDE de Arduino, empleando el lenguaje C++. La lógica principal del programa se diseñó para ser no bloqueante y eficiente.

- **Estructura Principal:** El loop() principal se configuró para un ciclo completo de lectura, visualización y guardado de datos cada segundo (1000 ms), controlado mediante una temporización basada en millis().
- **Gestión de Sensores:** Se utilizaron las bibliotecas RTCLib.h (para el RTC), Adafruit_INA219.h (para el sensor de potencia) y LiquidCrystal_I2C.h (para la LCD) para simplificar la interacción con estos componentes.
- **Medición de RPM:** Se utilizó una Rutina de Servicio de Interrupción (ISR). Esta se asoció al pin D2 (attachInterrupt) y se ejecutaba instantáneamente con cada pulso del sensor LDR, incrementando un contador volátil.
- **Comunicación Modbus (Anemómetro):** Requirió la implementación manual del protocolo Modbus RTU, construyendo una trama de solicitud de 8 bytes (con CRC-16) y procesando la trama de respuesta de 7 bytes (validando su CRC).
- **Almacenamiento de Datos:** En cada ciclo, los datos (Timestamp, Voltaje, Corriente, Potencia, RPM, Velocidad Viento) se concatenaron en una cadena de texto (formato CSV). Esta cadena se escribió en el archivo datalog.csv en la tarjeta SD.

III RESULTADOS

3.1. Requerimiento energético

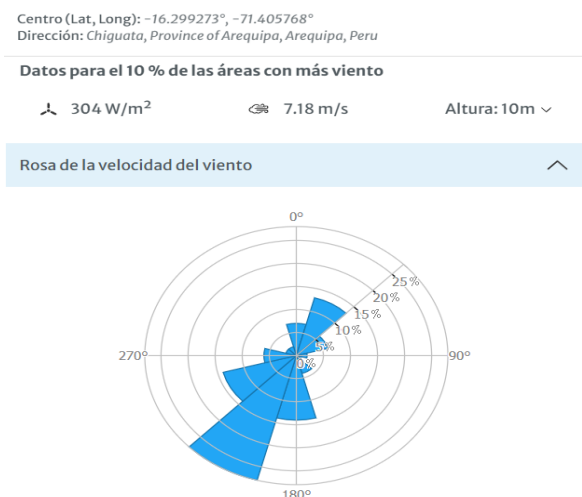
La demanda energética del sistema de sensores remotos de una de las estaciones del Observatorio Vulcanológico del Sur es de 15 Watt-hora, esta carga alimenta sensores de monitoreo que miden diferentes parámetros ambientales y geofísicos con el propósito de identificar variaciones que puedan constituir indicadores de actividad volcánica.

3.2. Potencial eólico

Los resultados obtenidos del análisis del recurso eólico en la provincia de Arequipa, se muestran la velocidad del viento, la rosa de velocidad de viento (ver Figura 45), comportamiento horario y mensual del viento en la Figura 46, mapa de calor de la velocidad de viento en la zona de estudio en la Figura 47, dichos resultados se obtuvieron a 10 m de altura.

Figura 45

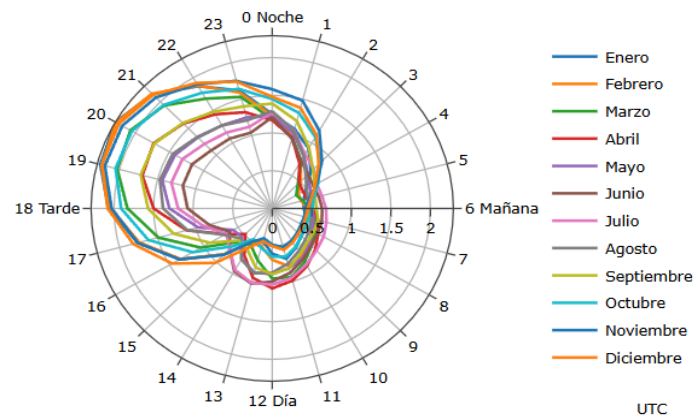
Frecuencia del viento desde distintas direcciones a lo largo del año.



Nota. La figura indica la frecuencia (%) con la que el viento proviene de esa dirección y cada grado representa una orientación (0°: Norte, 90°: Este, 180°: Sur, 270°: Oeste). Extraída de [global Wind Atlas](#).

Figura 46

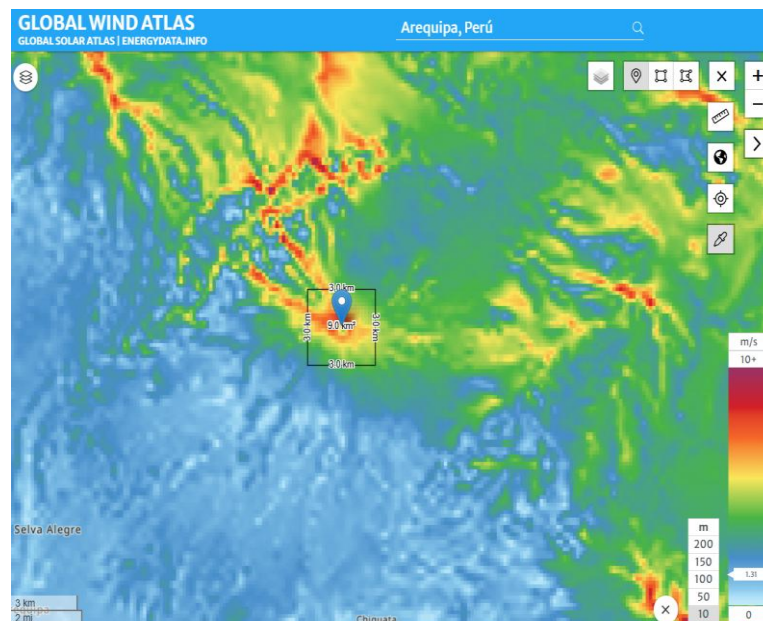
Variación promedio de la velocidad del viento a lo largo del día por cada mes



Nota: La figura muestra que las curvas se expanden más entre las 17:00 y las 22:00 horas, lo que indica que el viento alcanza sus mayores velocidades en horas de la tarde-noche. Extraída de [Global Wind Atlas](#).

Figura 47

Mapa de calor de la velocidad de viento en la estación de monitoreo.



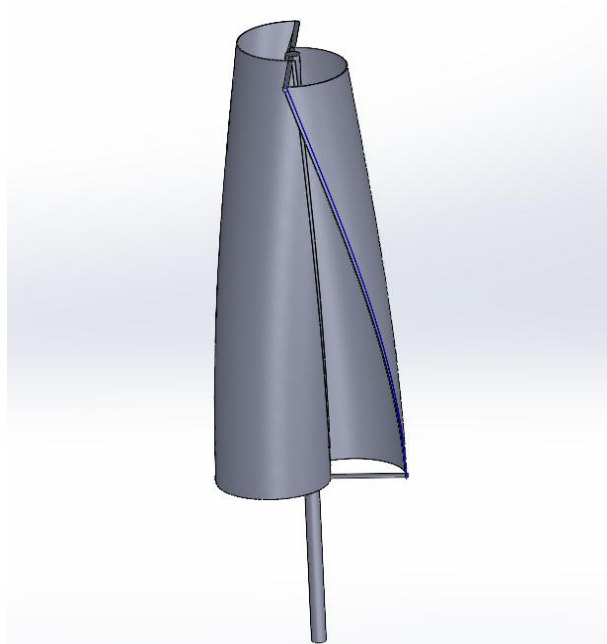
Nota: El mapa de calor indica que las zonas rojas tienen mayor presencia de recurso eólico disponible que puede ser aprovechable para turbinas eólicas y el área delimitada representa la zona de estudio. Extraída de [Global Wind Atlas](#).

3.3. Diseño mecánico de la turbina eólica de eje vertical

Durante el proceso de diseño mecánico se obtuvo como resultado una turbina eólica de eje vertical tipo Savonius (ver Figura 48). El prototipo presenta una altura de 1.30 m y un diámetro de 0.52 m, lo que corresponde a un área de barrido de 0.676 m². Estas dimensiones fueron determinadas a partir de los cálculos de diseño aerodinámico descritos en apartados anteriores, con el objetivo de satisfacer una demanda energética de 15 W, correspondiente al consumo de los sensores de monitoreo instalados en la estación del Observatorio Vulcanológico del Sur.

Figura 48

Diseño de la turbina eólica tipo Savonius

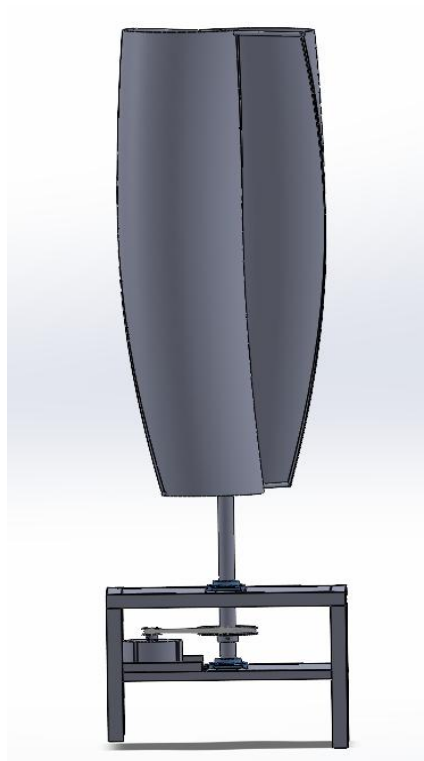


Como parte del diseño mecánico también se realizó la estructura de soporte de la turbina eólica en donde se fijó la turbina eólica de eje vertical y finalmente se procedió a ensamblar los demás componentes como el generador, poleas, faja de transmisión, chumacera, concluyendo de esta manera la parte del diseño mecánico de la turbina eólica de eje vertical (ver Figura 49).

Esta estructura fue diseñada considerando criterios de resistencia mecánica, estabilidad y facilidad de mantenimiento, garantizando así un funcionamiento confiable del conjunto.

Figura 49

Diseño del ensamblaje de la turbina eólica de eje vertical



Nota. En la figura se observa el ensamblaje total de la turbina Savonius con su base, generador, poleas, lista para pruebas.

3.4. Simulación de esfuerzos de la turbina eólica de eje vertical

Análisis Estructural Estático (Static Structural)

Con el fin de evaluar la integridad estructural del prototipo de la turbina bajo condiciones de operación, se realizó un análisis de elementos finitos (FEA) utilizando el módulo **Static Structural** de Ansys. El objetivo principal fue determinar las deformaciones y la distribución de esfuerzos resultantes de las cargas aerodinámicas calculadas en la simulación de fluidos (CFD).

Configuración de Cargas y Condiciones de Contorno

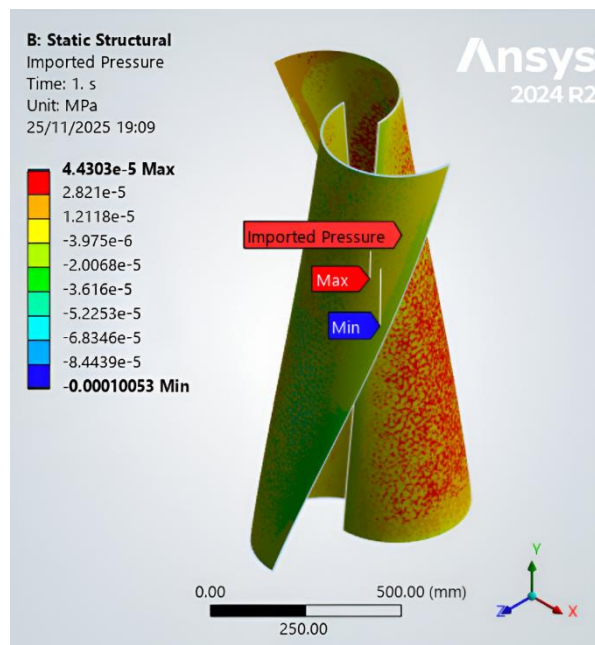
Se empleó un acoplamiento fluido-estructura (FSI) unidireccional. Las cargas de presión superficial, obtenidas de la simulación previa en Ansys Fluent, fueron importadas y mapeadas sobre la geometría de las palas de la turbina.

Como se observa en la Figura 50, la distribución de presiones no fue uniforme:

- Se registró una **presión positiva máxima de $4.4303e-5$ MPa** (zonas rojas), correspondiente a la fuerza de empuje del viento sobre la cara cóncava de la pala de avance.
- Se observó una **presión negativa mínima de -0.00010053 MPa** (zonas azules), indicando succión en la cara convexa de la pala de retroceso.

Figura 50

Distribución de la Presión Importada (MPa) sobre las palas.



El material asignado a la geometría fue Acero Estructural (Structural Steel). Para simular la unión de los álabes al eje central, se aplicó una condición de contorno de Soporte Fijo (Fixed Support) a los bordes internos de ambas palas. Esta restricción fijó todos los grados

de libertad en dichas aristas, modelando de forma precisa una unión soldada e impidiendo cualquier tipo de desplazamiento o rotación en esa zona.

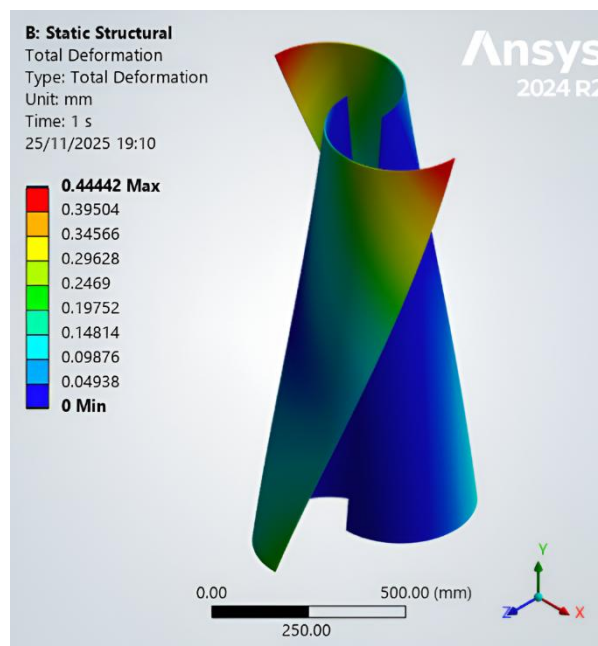
Resultados de la Deformación Total

Una vez resuelta la simulación, se procedió a analizar los resultados de la deformación. La Figura 51 muestra la Deformación Total (mm) sufrida por la estructura. Se obtuvo un valor **máximo de 0.44442 mm**. El análisis de la distribución de colores reveló que las zonas de máxima deformación (en rojo) se localizaron en los bordes exteriores y superiores de las palas, que son las áreas más alejadas de los soportes y que, a su vez, reciben la mayor carga de empuje.

La deformación mínima (color azul) se ubicó en los **bordes internos** sujetos al Soporte Fijo, donde el desplazamiento fue nulo (0 mm). Un valor de deformación máxima inferior a 0.5 mm se consideró aceptable e indicó que el diseño poseía la rigidez suficiente para soportar las cargas aerodinámicas de operación sin comprometer su integridad estructural.

Figura 51

Resultados de la Deformación Total (mm) de la turbina

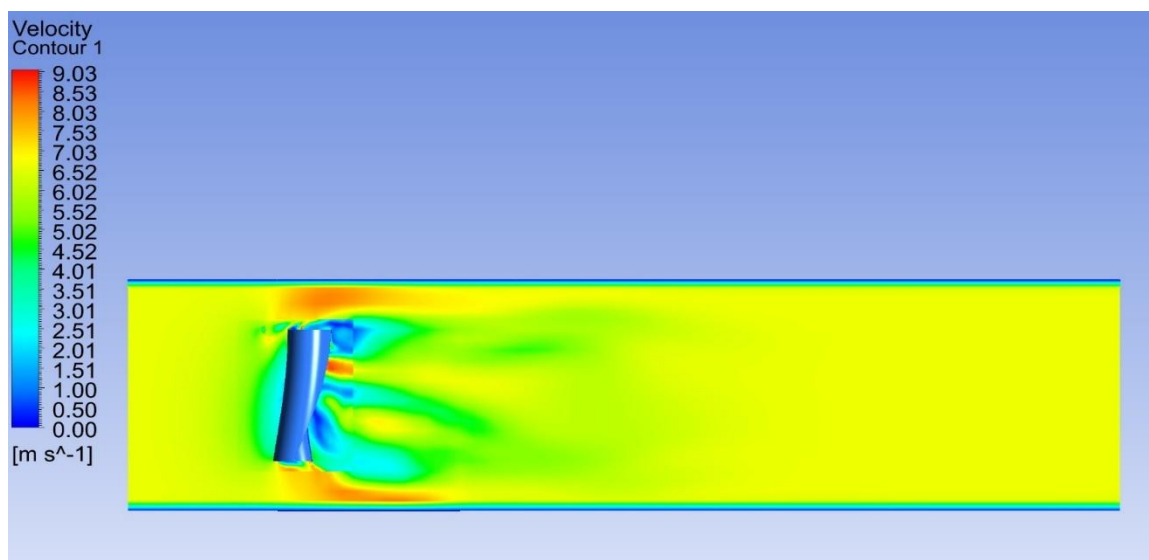


3.5. Simulación CFD de la turbina eólica de eje vertical

Los resultados de la simulación de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) se presentan en función del contorno de la magnitud de la velocidad, como se muestra en la Figura 52. El rango de velocidades obtenido en el dominio simulado varía entre 0.00 m/s y 9.03 m/s. La velocidad de entrada establecida en el túnel de viento fue de 6 m/s. En la zona de interacción con la turbina se evidencian perturbaciones en el flujo, acompañadas de una disminución de la velocidad del viento en la región posterior a la misma.

Figura 52

Simulación de la turbina Savonius sometida a Viento

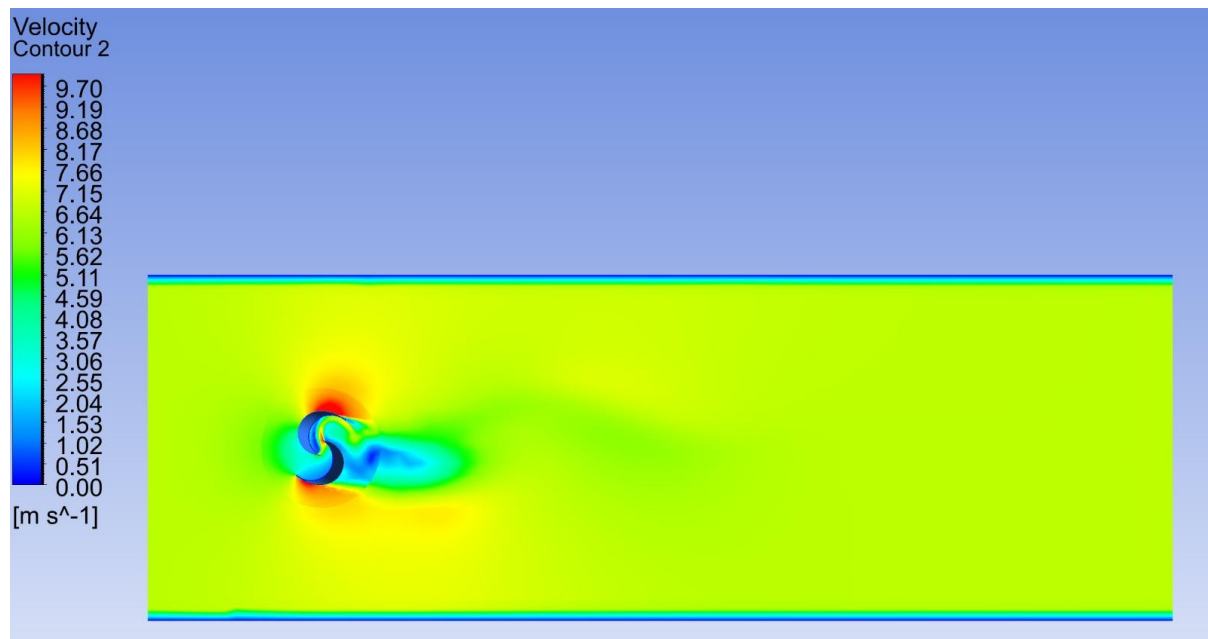


Nota. La figura muestra el comportamiento del viento ante la turbina visto desde un plano lateral.

En la Figura 53 se presenta el comportamiento del flujo de viento al interactuar con la turbina Savonius. La velocidad de entrada establecida es de 6 m/s, y se evidencia una disminución de esta conforme el flujo atraviesa la turbina. Dicho cambio se representa mediante la variación de color hacia tonos celestes y azules en la zona posterior a la turbina.

Figura 53

Simulación de la turbina Savonius sometida a Viento de vista superior



Nota. La figura muestra el comportamiento de la turbina frente a la velocidad de viento, visto del plano superior.

3.6. Manufactura de la turbina Savonius

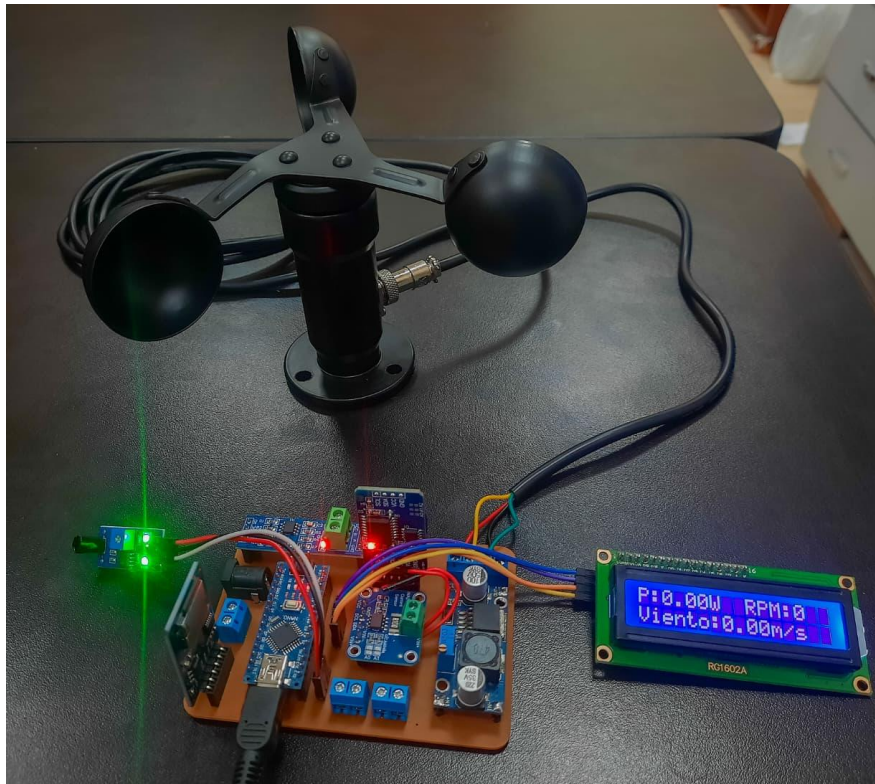
Para su construcción se emplearon materiales adquiridos, entre ellos planchas de acero galvanizado para la conformación de los álabes, un eje de acero galvanizado como elemento de transmisión y una estructura de soporte fabricada en acero al carbono. Posteriormente, cada componente fue ensamblado cuidadosamente, obteniéndose así la turbina Savonius completamente armada con su estructura de soporte y lista para las pruebas.

3.7. Análisis del rendimiento energético.

El resultado del circuito de medición completamente ensamblado y funcional se presenta en la Figura 54.

Figura 54

Circuito de medición ensamblado en la PCB diseñada.



Las mediciones presentadas a continuación corresponden a la turbina instalada en la azotea de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Estas se realizaron bajo condiciones de viento natural y conectada a una carga de 3 resistencias conectadas en paralelo de 10 ohm de 20 W cada una, esto con el fin obtener valores de la potencia generada de la turbina. La medición se realizó durante 6 días en el cual cada medición tiene un periodo de 24 horas, es decir, a un día completo de registro, el intervalo de medición se realizó a las horas 10:52 am hasta la misma hora del día siguiente.

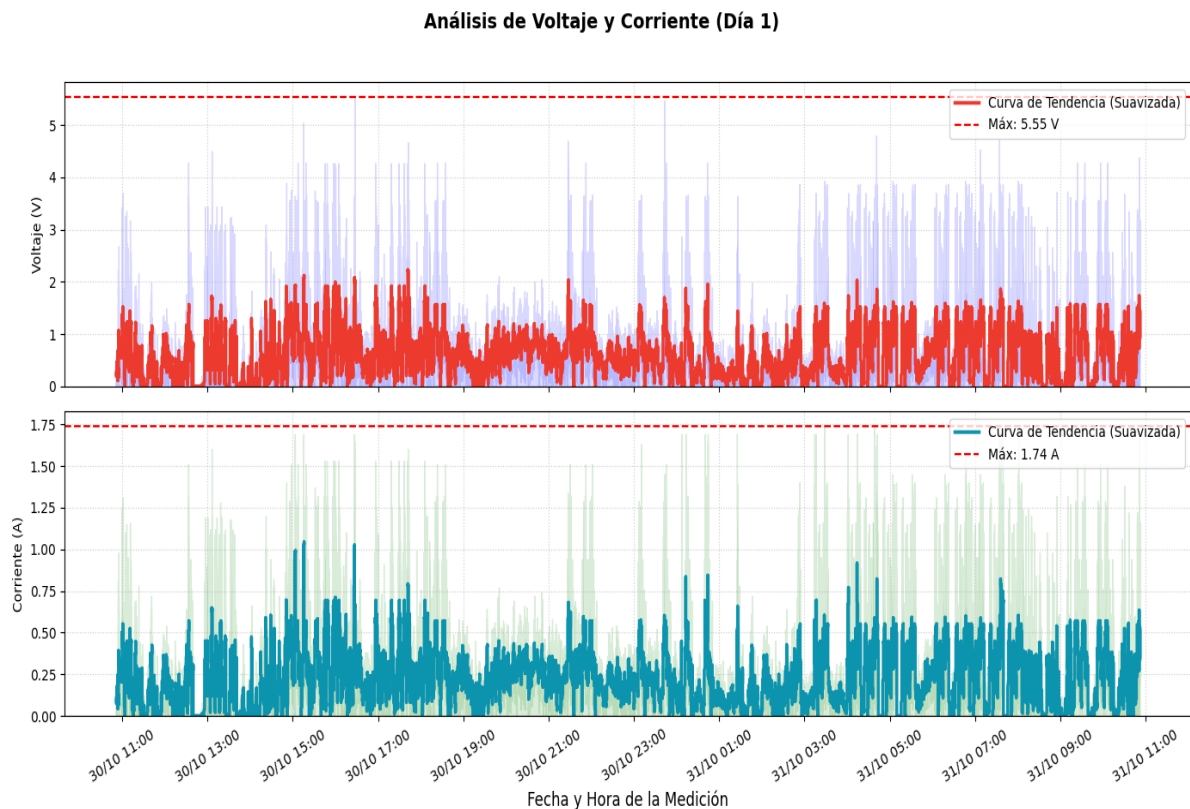
- **Resultados del día 1 de medición.**

Obteniéndose los resultados mostrados en la Figura 55, se observa que el voltaje generado presenta variaciones a lo largo del día, alcanzando un valor máximo de 5.55 V. Asimismo, que la corriente máxima registrada alcanza un valor de 1.74 A, como se aprecia los picos de voltaje más altos se registraron entre las 3:00 p.m. y las 6:00 p.m.

Los datos presentados en la Figura 56 corresponden a las mediciones potencia, velocidad de viento y la energía acumulada durante el periodo de medición.

Figura 55

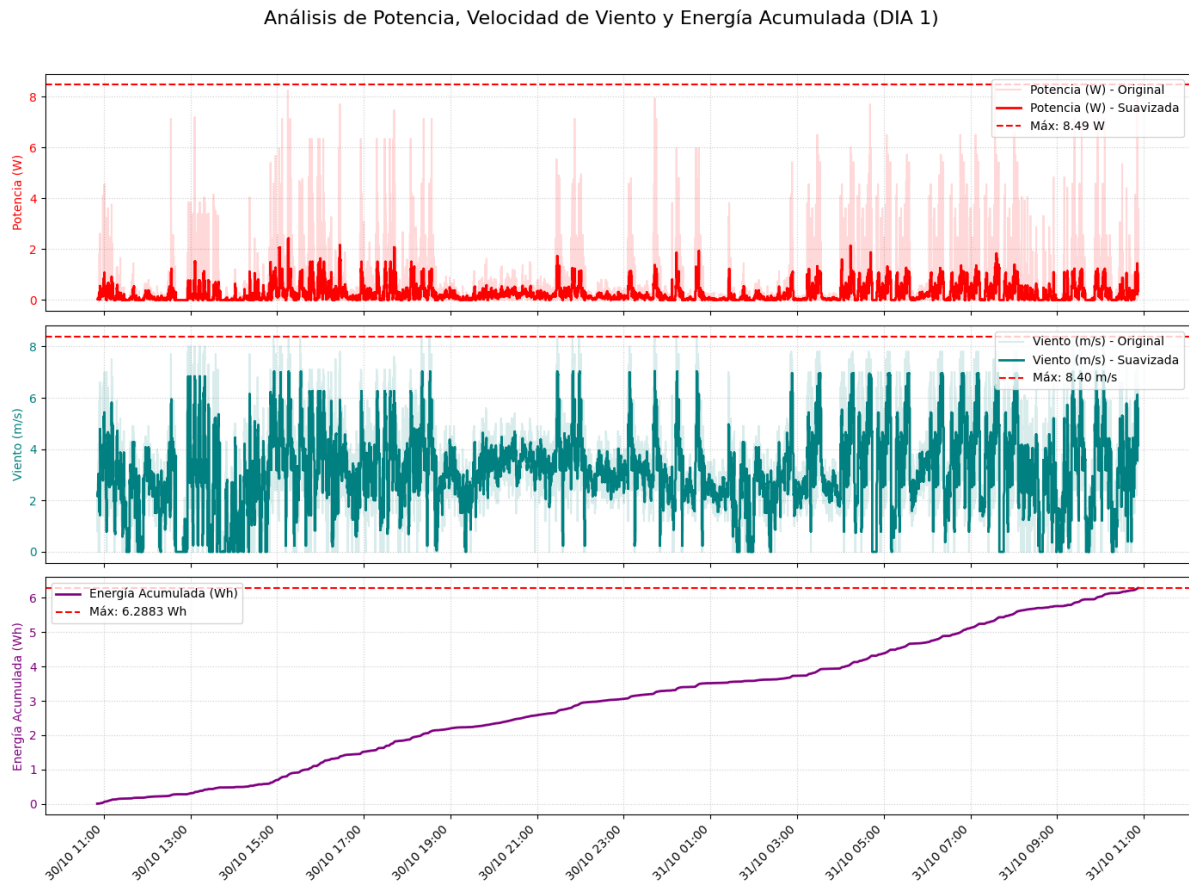
Análisis del voltaje y corriente generados durante el día 1



Nota. En el gráfico mostrado se visualiza los datos del voltaje y el corriente generado en el día 01, los picos de voltaje y corriente de color más tenue representan los valores reales obtenidos y lo de color más resaltante son los valores con una curva de tendencia suavizado.

Figura 56

Análisis de potencia, velocidad del viento y energía acumulada en el día 1

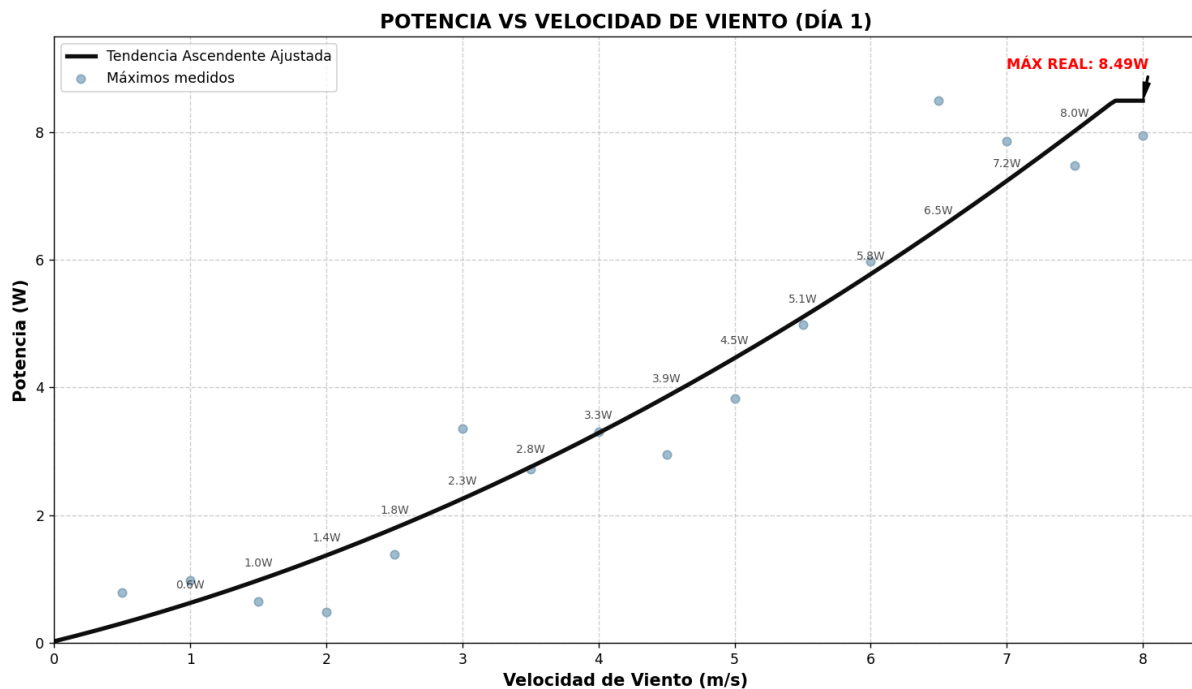


Nota. En el gráfico mostrado se visualiza los datos de la potencia, velocidad de viento y la energía acumulada con valores máximos de 8.49 W, 8.40 m/s y 6.2883 Watt-hora/día respectivamente.

En la Figura 57 se presentan los valores de potencia con respecto a la velocidad de viento obtenidos a partir de las mediciones. Se observa un valor máximo de 8.49 W a una velocidad de 7 m/s.

Figura 57

Relación entre la velocidad del viento y la potencia generada en el día 1



Nota. En el gráfico mostrado se visualiza los datos de la potencia en relación a la velocidad de viento en el primer día.

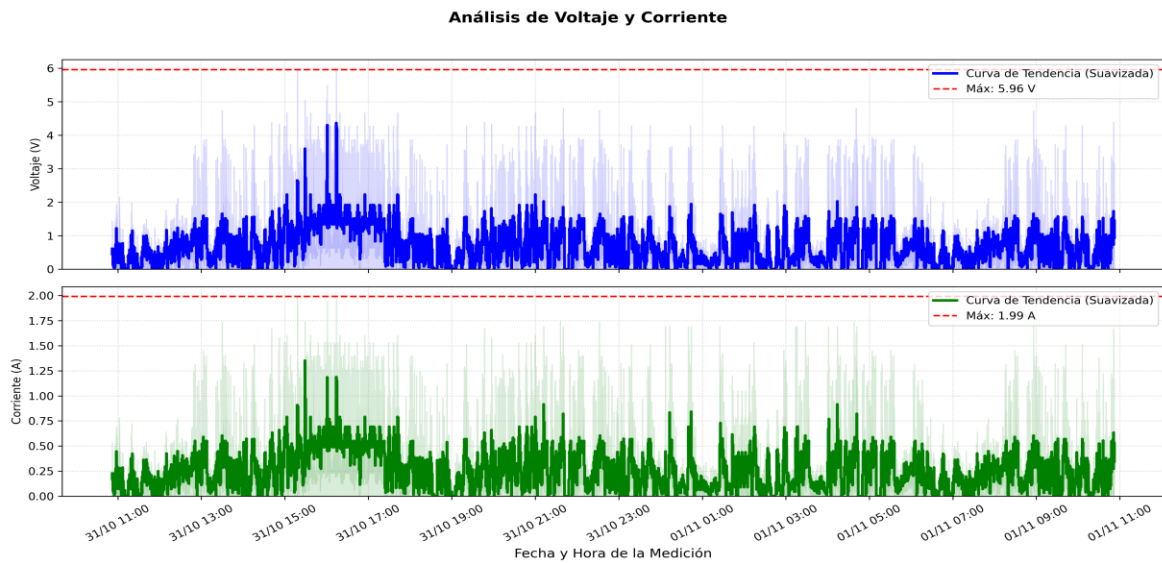
- **Resultados del día 2 de medición.**

Obteniéndose los resultados mostrados en la Figura 58, se observa que el voltaje y corriente generado a lo largo del día, alcanzando un valor máximo de 5.96 V y 199 A, como se aprecia los picos más altos se registraron entre las 3:00 p.m. y las 6:00 p.m.

La energía acumulada, la potencia y la velocidad de viento durante el periodo de medición se visualiza en la Figura 59. Asimismo, en la Figura 60 se presentan los valores máximos registrados de potencia con respecto a la velocidad de viento.

Figura 58

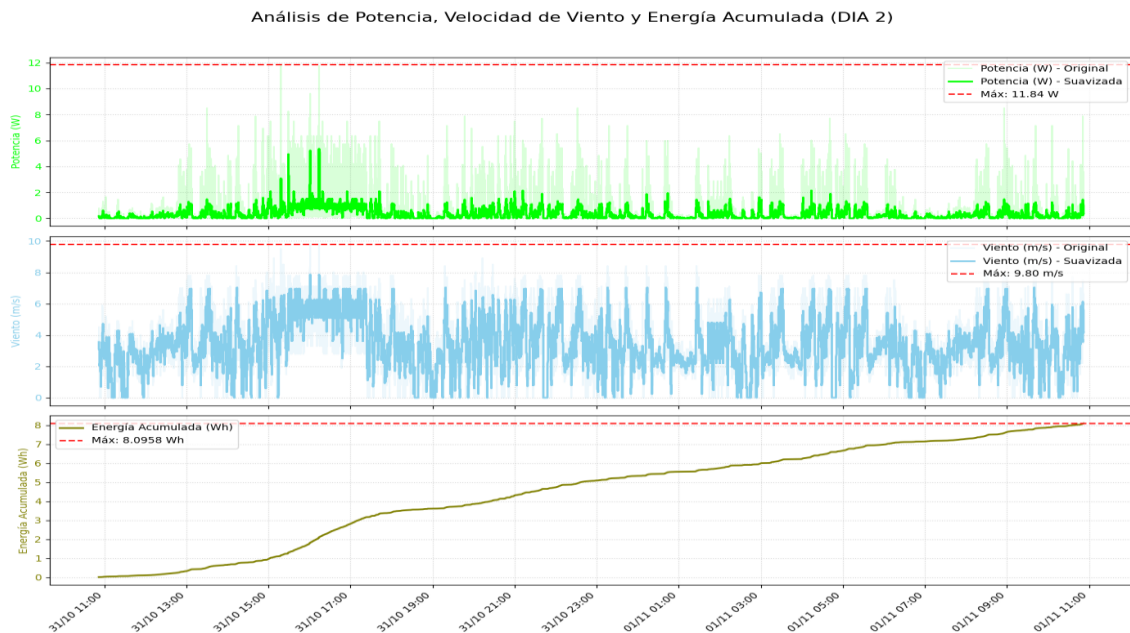
Análisis del voltaje y corriente generados durante el día 2



Nota. En el gráfico se visualiza los datos del voltaje y la corriente a lo largo del día 02.

Figura 59

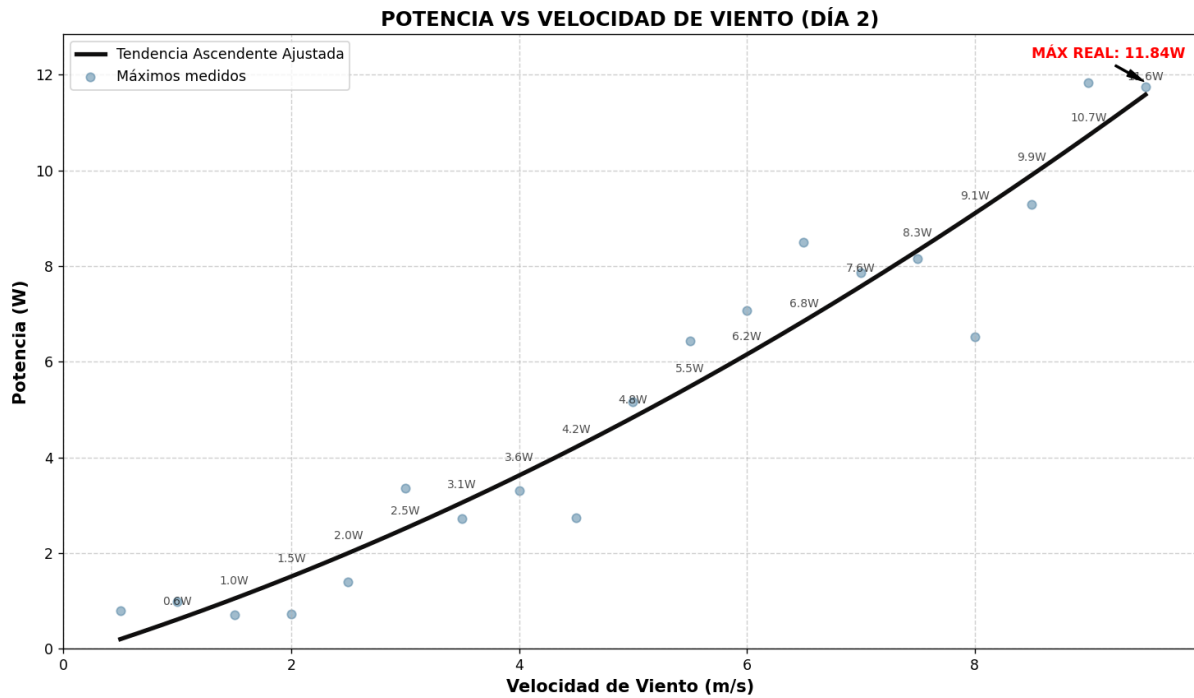
Análisis de potencia, velocidad del viento y energía acumulada en el día 2



Nota. En el gráfico mostrado se visualiza los datos de la potencia, velocidad de viento y energía acumulada en el día 01 con un total 11.84, 9.80 m/s y 6.3503 W/h respectivamente.

Figura 60

Relación entre la velocidad del viento y la potencia generada en el día 2



Nota. En el gráfico mostrado se visualiza los datos de la velocidad de viento y potencia.

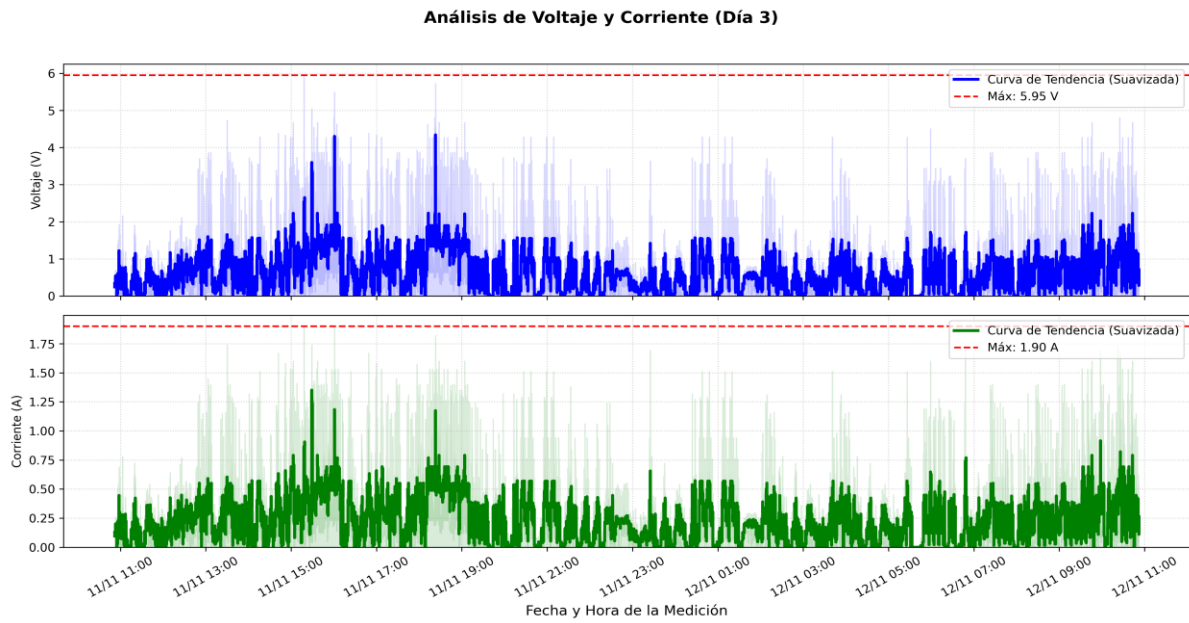
- **Resultados del día 3 de medición.**

Mostrándose los valores de corriente en la Figura 61, se aprecia que la corriente oscila entre 0-1.90 A y la corriente de 0-5.95. Además, los datos de la Figura 62 corresponde a la potencia, velocidad de viento y la energía acumulada en el día 3.

En la Figura 63 se muestra en análisis de la velocidad de viento y la potencia en el día 3, obteniendo un valor máximo de 9.80 m/s.

Figura 61

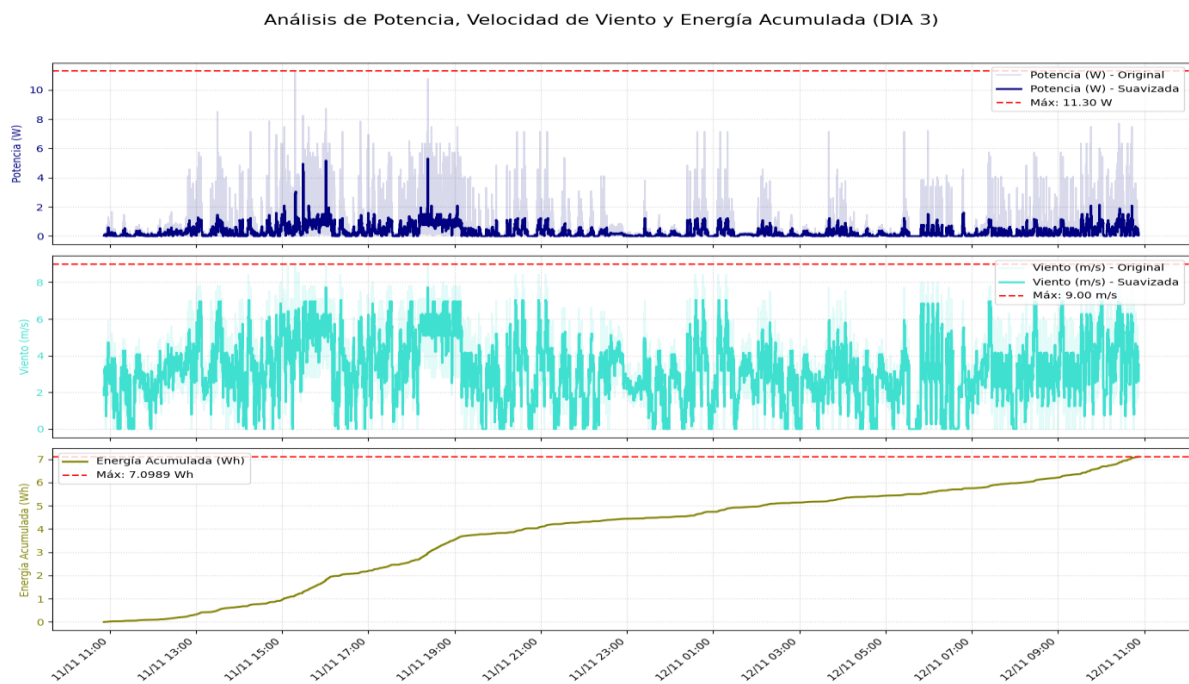
Análisis del voltaje y corriente generados durante el día 3



Nota. En el gráfico se visualiza los datos del corriente y voltaje generado en el día 03.

Figura 62

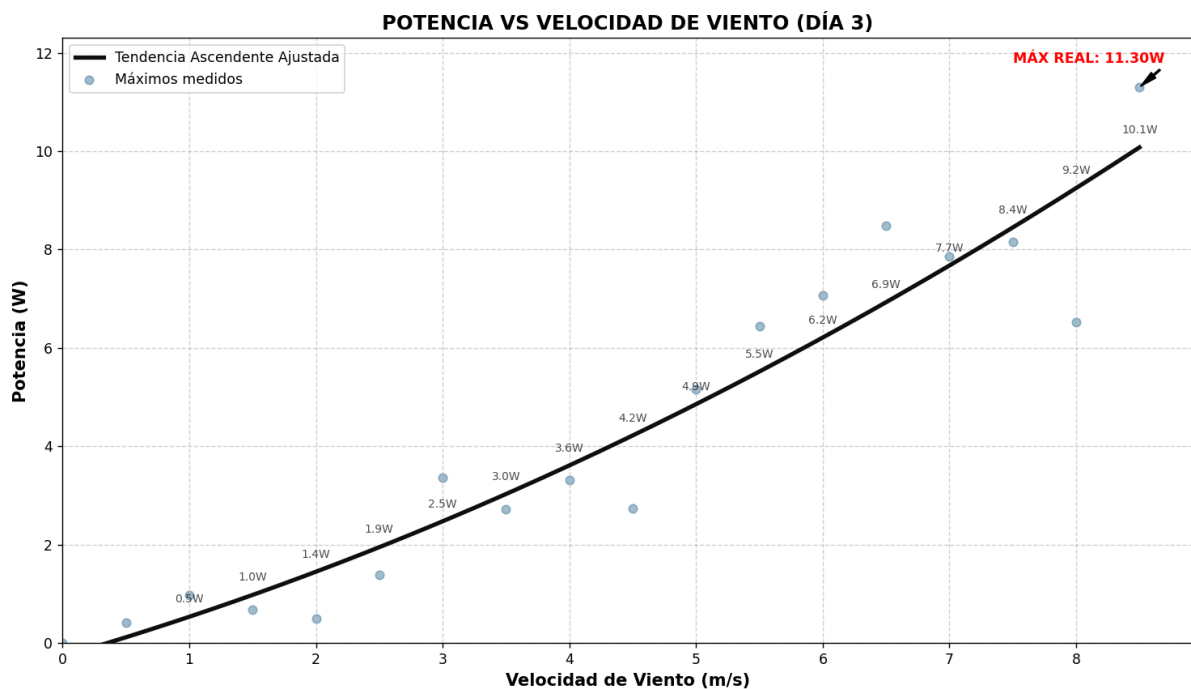
Análisis de potencia, velocidad del viento y energía acumulada en el día 3



Nota. En el gráfico mostrado se visualiza los datos de la potencia, velocidad y energía.

Figura 63

Relación entre la velocidad del viento y la potencia generada en el día 3



Nota. En el gráfico se visualiza los datos de la velocidad de viento y la potencia con sus valores máximos a lo largo del día 03.

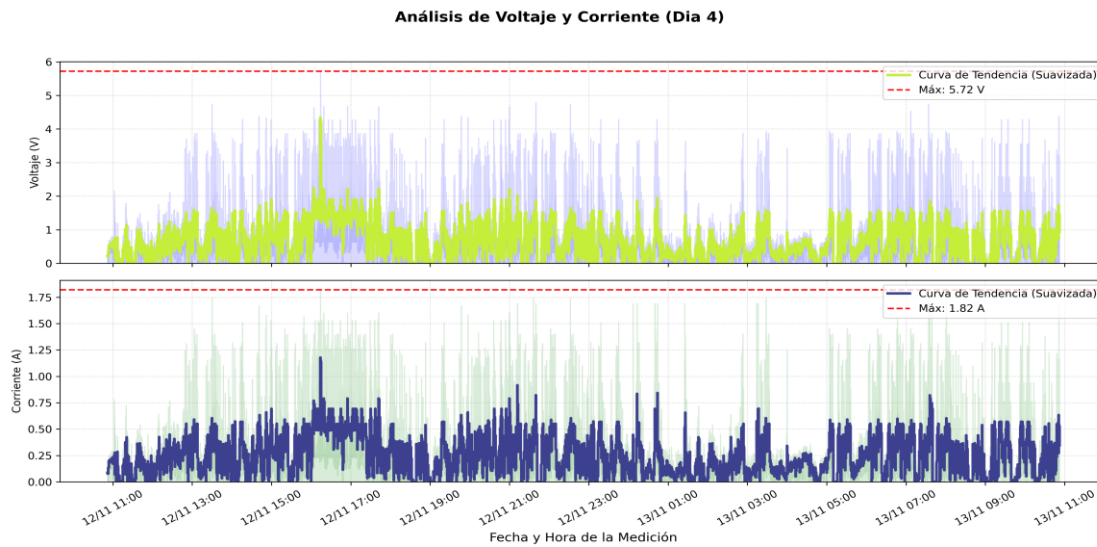
- **Resultados del día 4 de medición.**

Se observa en la Figura 64 se presenta el grafico del voltaje y la corriente generada por la turbina durante el 4 día de medición. La Figura 65 presenta los gráficos de la potencia, velocidad de viento y la energía acumulada durante el día 4 de medición.

Como le logra observar en la Figura 66 se incluyen los valores de la velocidad de viento y la potencia con un intervalo de 0.5 en el eje de la velocidad de viento.

Figura 64

Análisis del voltaje y corriente generados durante el día 4



Nota. En el gráfico mostrado se visualiza los datos del voltaje y la corriente con valores máximos de 5.72 V y 1.82 A respectivamente.

Figura 65

Análisis de potencia, velocidad del viento y energía acumulada en el día 4

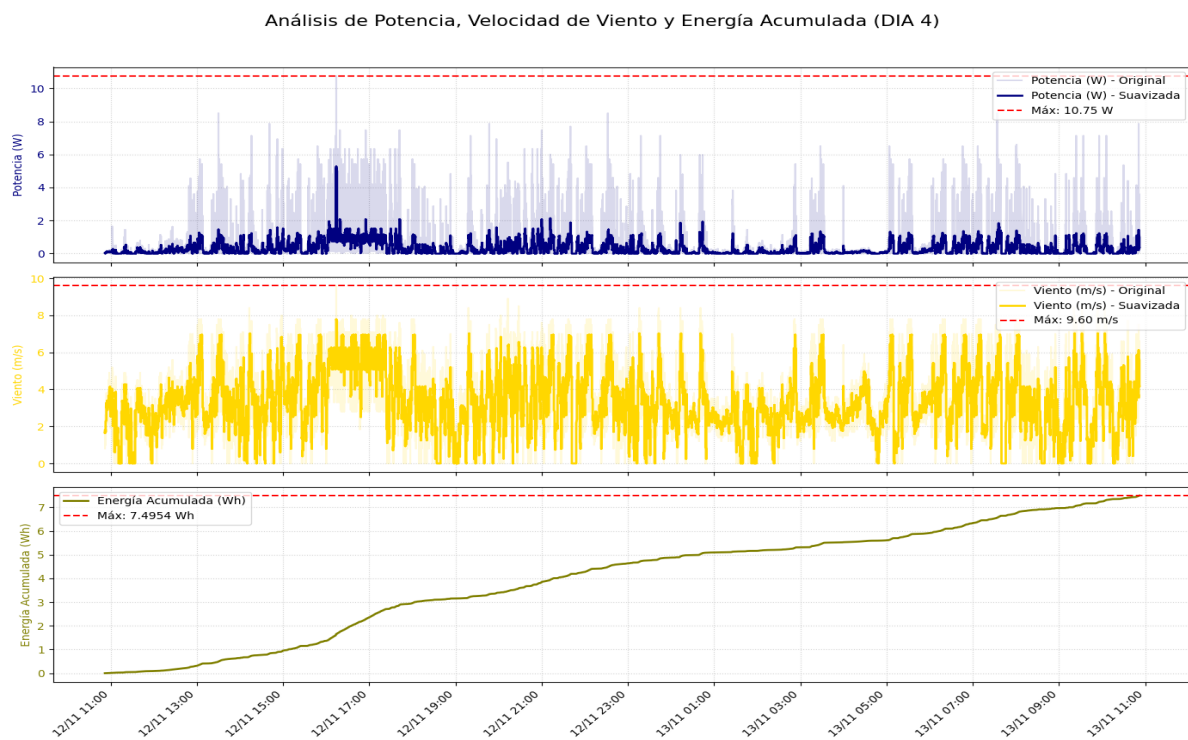
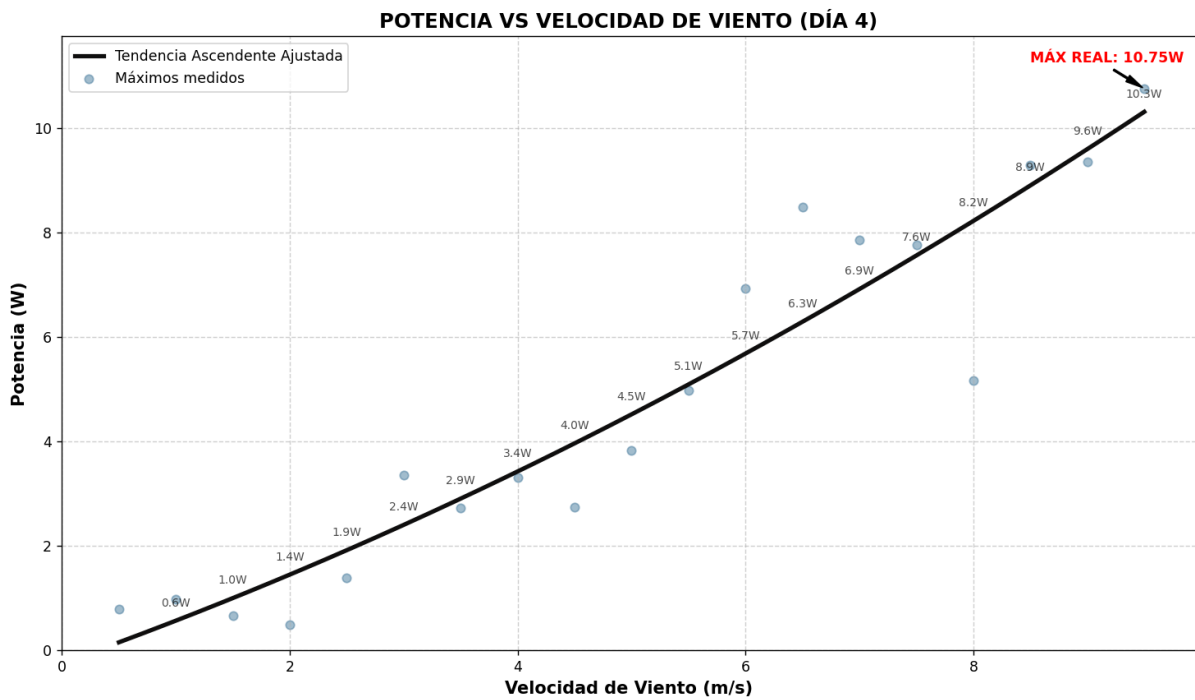


Figura 66

Relación entre la velocidad del viento y la potencia generada en el día 4

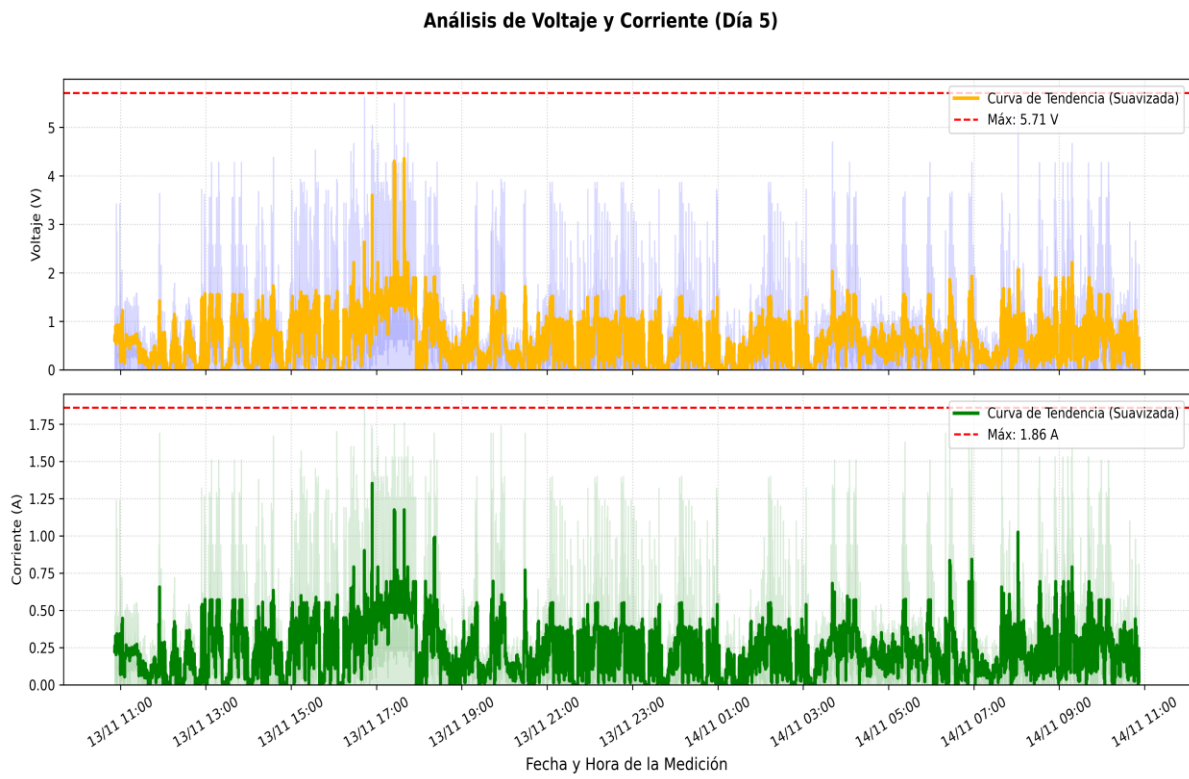


- **Resultados del día 5 de medición.**

La Figura 67 muestra los resultados del análisis de datos del voltaje y corriente estos medidos durante el día 5. Además, La Figura 68 se muestra los valores de la potencia, velocidad de viento y la energía acumulada, estos datos analizados respecto al día 5. Asimismo, en la Figura 69 se muestran los valores de la potencia con respecto a la velocidad de viento, logrando una potencia de 10.62 W alrededor de los 9.5 m/s.

Figura 67

Análisis del voltaje y corriente generados durante el día 5



Nota. En la graficas de visualiza los picos de volteje y corriente, obteniéndose 5.71 V y 1.86 A como valores máximos.

Figura 68

Análisis de potencia, velocidad del viento y energía acumulada en el día 5

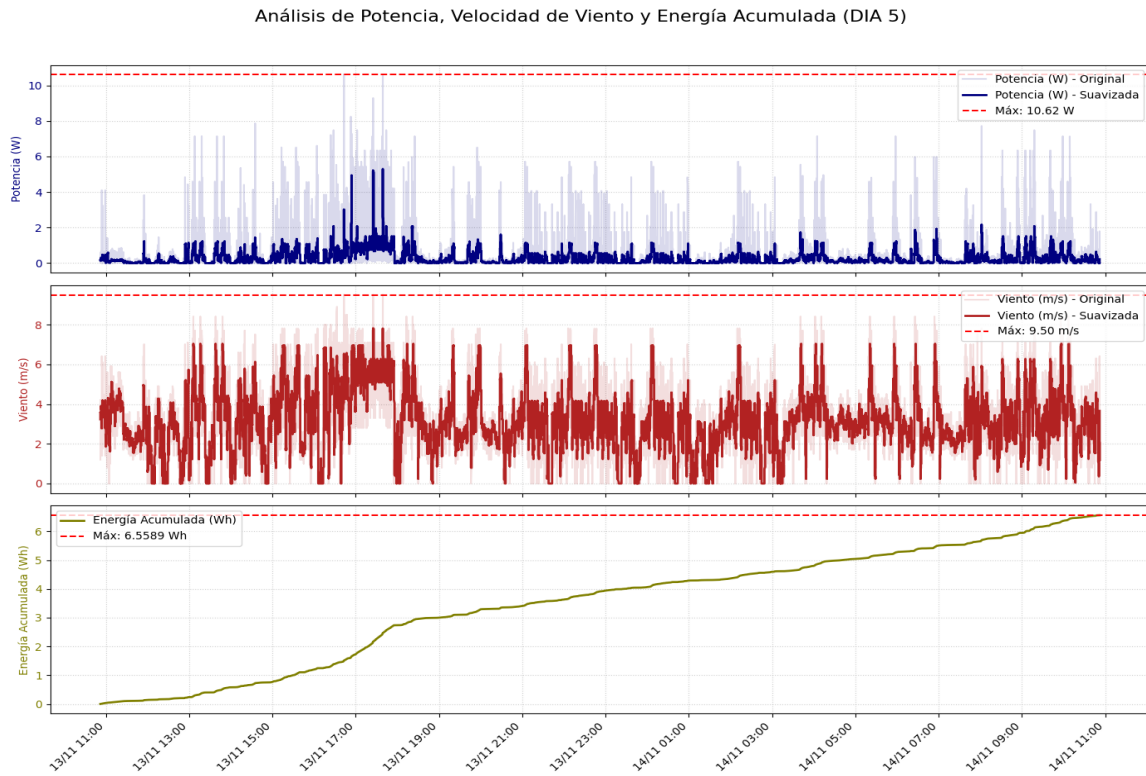
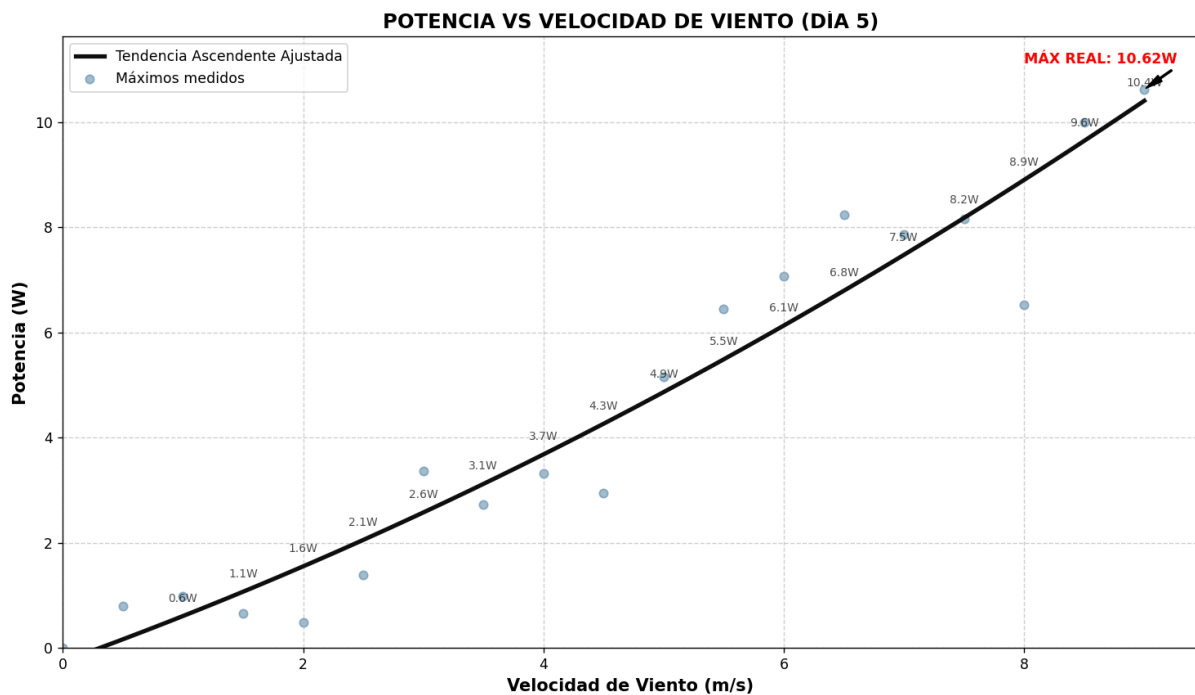


Figura 69

Relación entre la velocidad del viento y la potencia generada en el día 5

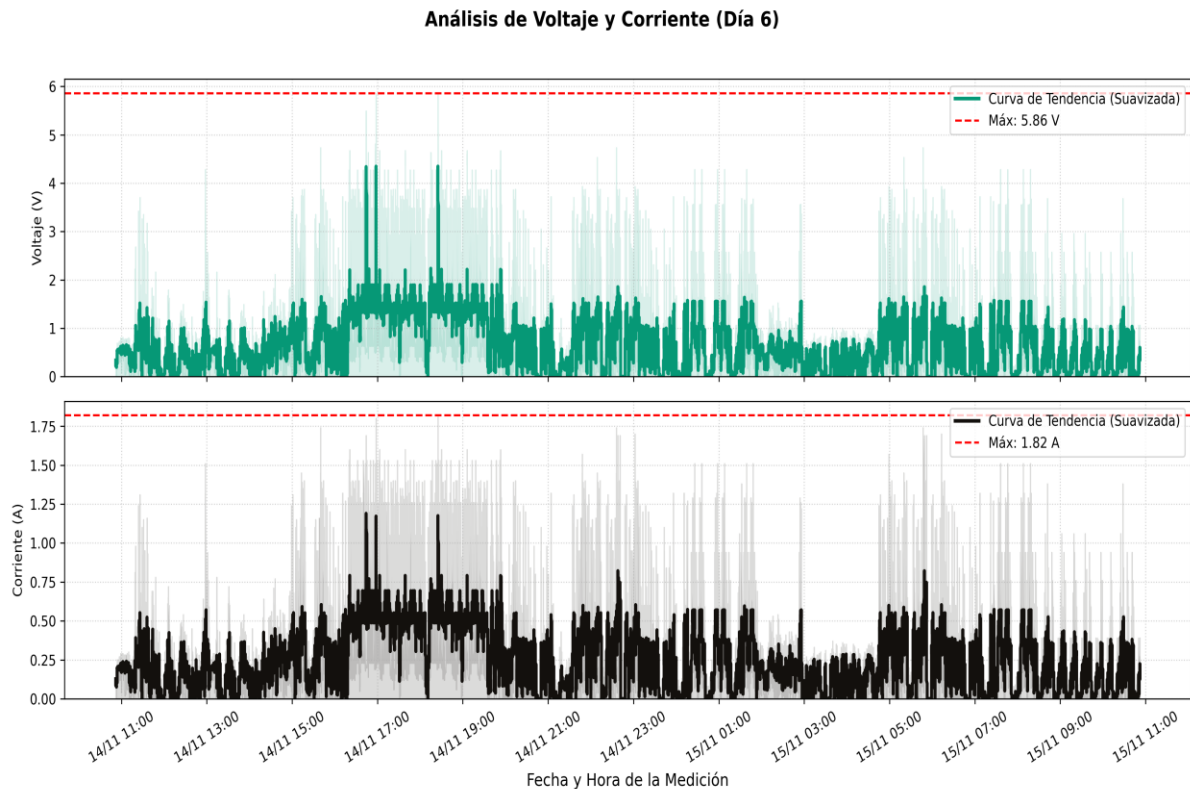


- **Resultados del día 6 de medición.**

La Figura 70 muestra los valores analizados de voltaje y corriente en el día 6, obteniendo valores máximos de 5.86 V y 1.82 A los cuales se alcanzaron entre la 3 - 7 pm. Además, en la Figura 71 se muestran los valores de potencia, velocidad de viento y la energía acumulada, logrando un total de 7.8307 Watts-hora. Asimismo, en la Figura 72 se muestra una comparación de la potencia obtenida a diversas velocidades de viento.

Figura 70

Análisis del voltaje y corriente generados durante el día 6



Nota. La graficas muestran los valores de voltaje y corriente medidos en el día 6.

Figura 71

Análisis de potencia, velocidad del viento y energía acumulada en el día 6

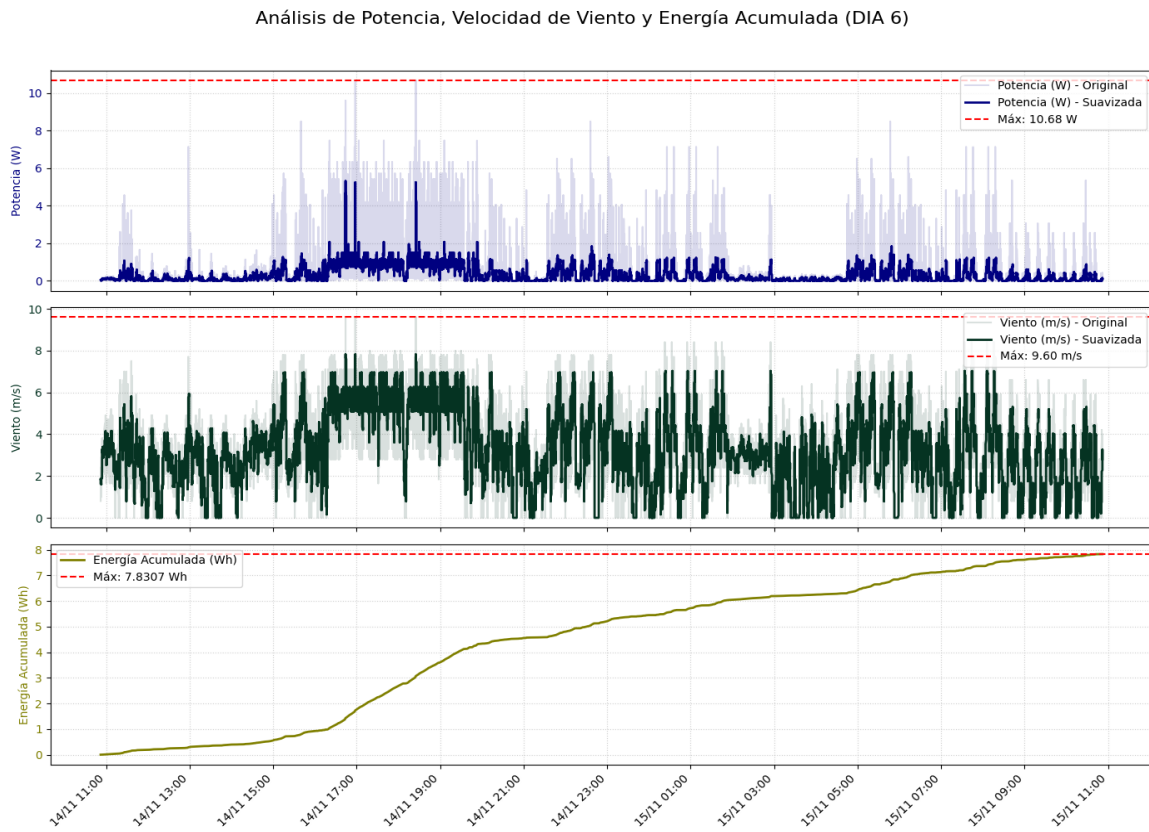
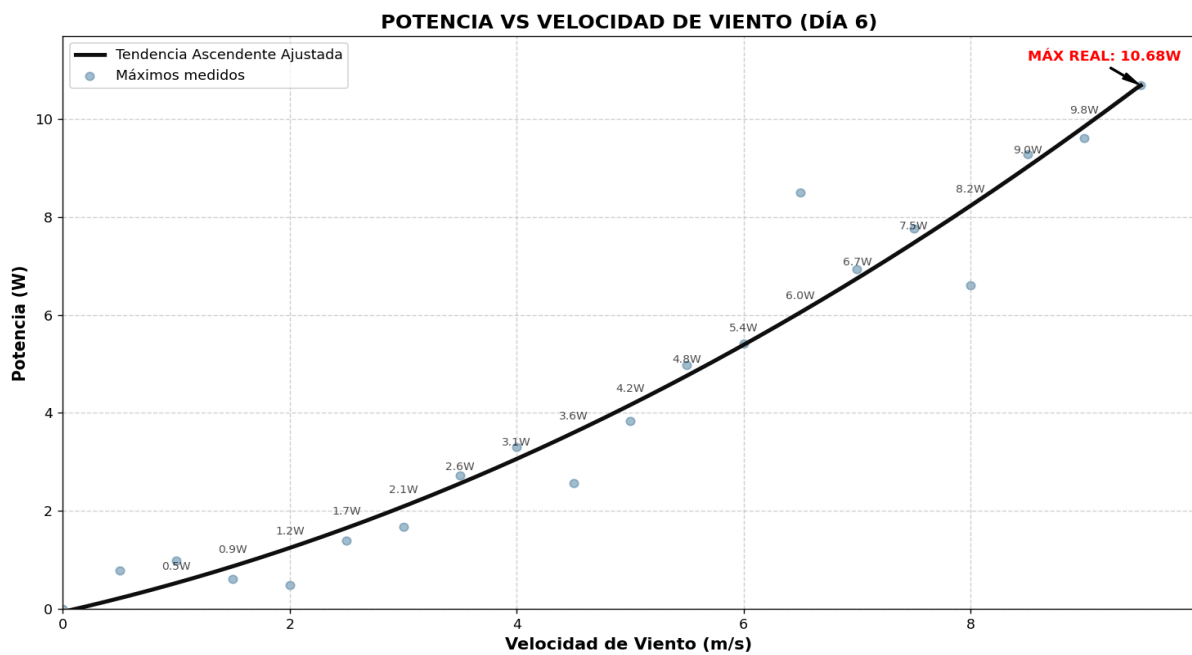


Figura 72

Relación entre la velocidad del viento y la potencia generada en el día 6

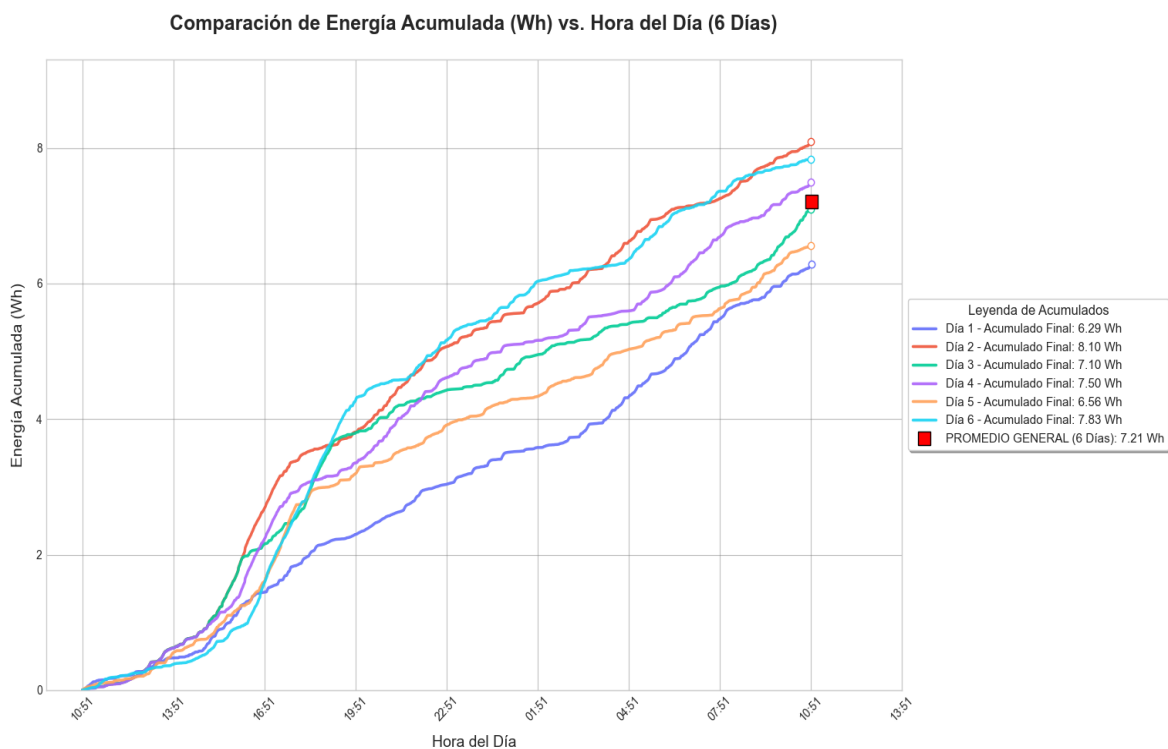


PROMEDIO DE RESULTADOS

En la Figura 73 se muestra la comparación de la energía acumulada de cada uno de los 6 días medidos y también se muestra el promedio total con un valor de 7.21 Watt-hora.

Figura 73

Comparación de la energía acumulada de los 6 días de medición

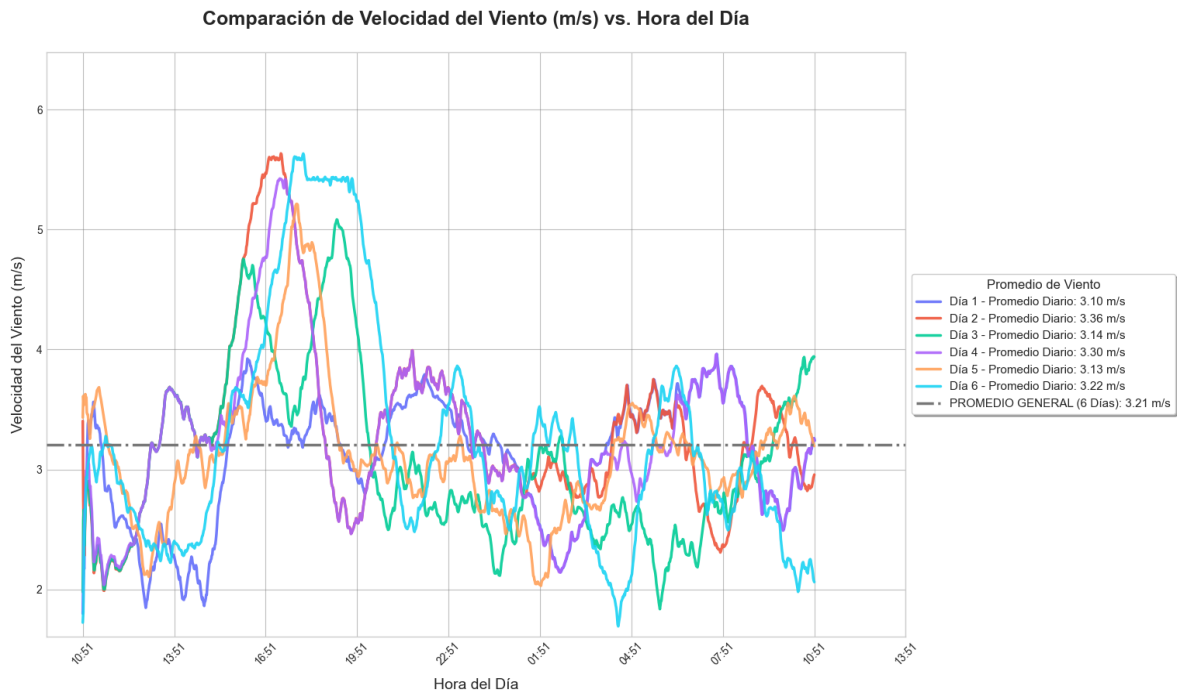


Nota. En la figura se muestra los gráficos de la energía acumulada con una línea de color rojo mostrando el promedio total.

En la Figura 74 se muestra los valores promedios de la velocidad de viento del día 1 al día 6, obteniendo valores máximos el día 2 y el día 4 con 3.36 m/s y 3.30 m/s respectivamente. Además, se muestra un valor promedio durante los días de medición de 3.21 m/s.

Figura 74

Valores promedios de la velocidad de viento del día 1 al día 6



Nota. En la figura se muestran las gráficas del comportamiento de la velocidad de viento durante los días de medición.

IV DISCUSIÓN

- Dado que la demanda energética fue de 15 Watt-hora lo cual permite establecer un punto de referencia fundamental para el dimensionamiento del sistema de generación eólica propuesto. Este valor, aunque relativamente bajo en comparación con aplicaciones residenciales o industriales, resulta crítico debido a la naturaleza continua y sensible de los equipos de monitoreo instalados. En este contexto, la estabilidad del suministro adquiere mayor relevancia que la magnitud de la potencia, pues cualquier interrupción podría comprometer la adquisición de datos geofísicos en tiempo real.
- El análisis del recurso eólico en la provincia de Arequipa permitió caracterizar el comportamiento del viento a 10 metros de altura, registrándose velocidades promedio

con picos de hasta 7.18 m/s. Según la teoría de conversión eólica, la potencia del viento es proporcional al cubo de su velocidad, por lo que incluso incrementos moderados generan aumentos notables en la energía cinética aprovechable. Asimismo, el comportamiento horario mostró máximos entre las 17:00 y 22:00 horas, coincidiendo con los patrones atmosféricos característicos de las zonas costeras y altoandinas del sur del Perú, donde la dinámica térmica diurna produce corrientes ascendentes en horas de la tarde.

- El proceso de diseño mecánico permitió desarrollar una turbina eólica de eje vertical tipo Savonius cuyas dimensiones finales de 1.30 m de altura y 0.52 m de diámetro fueron determinadas a partir de los criterios aerodinámicos establecidos, con el propósito de satisfacer la demanda energética de 15 Watt-hora. Dichas dimensiones se encuentran dentro del rango óptimo reportado por la literatura para microturbinas de baja potencia, lo que respalda la validez del procedimiento de diseño aplicado.
- Los resultados obtenidos mediante la simulación de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) permitieron analizar el comportamiento del flujo alrededor de la turbina eólica de eje vertical tipo Savonius, evidenciando un rango de velocidades en el dominio comprendido entre 0.00 m/s y 9.03 m/s, con una velocidad de entrada establecida en 6 m/s. Este comportamiento es coherente con lo descrito en la teoría de aerodinámica de rotores, donde la interacción del flujo con los álabes genera zonas de aceleración y desaceleración producto de la conversión parcial de la energía cinética del viento en energía mecánica de rotación.
- La construcción del prototipo de la turbina eólica de eje vertical tipo Savonius permitió materializar el diseño teórico desarrollado, confirmando la factibilidad técnica del modelo propuesto. El uso de materiales como planchas de acero galvanizado para los álabes, un eje del mismo material para la transmisión y una estructura de soporte en

acero al carbono respondió a criterios de resistencia, durabilidad y disponibilidad local, aspectos fundamentales en proyectos destinados a operar en condiciones ambientales adversas. La elección de estos materiales concuerda con estudios previos que destacan su idoneidad para aplicaciones de micro generación eólica debido a su buena relación entre rigidez estructural y facilidad de manufactura.

- Los resultados experimentales obtenidos evidencian que la turbina eólica de eje vertical tipo Savonius logro generar una potencia máxima de 11.30 W a una velocidad máxima alcanzada de 8.4 m/s en el día 3 y 11.84 W a una velocidad máxima de 9.80 m/s en el día 2. Este comportamiento confirma la capacidad del prototipo para producir energía eléctrica bajo condiciones de viento natural, validando su funcionalidad dentro del rango operativo esperado. La correspondencia entre los picos de voltaje y corriente registrados entre las 3:00 p.m. y las 6:00 p.m. coincide con el periodo de mayor velocidad del viento determinado en el análisis del recurso eólico, lo cual demuestra una relación directa entre la intensidad del viento y el desempeño eléctrico del sistema.
- Los seis días de medición registraron valores energéticos entre 6.2883 Wh y 8.0958 Wh, con un promedio de 7.21 Wh, evidenciando que la turbina mantiene una producción pese a la variabilidad del viento, pero presentó fluctuaciones en intensidad y continuidad que influyeron directamente en la acumulación de energía, especialmente en periodos de brisas suaves. Cabe resaltar que este sistema fue concebido desde el inicio como una fuente de respaldo y no como suministro principal para las estaciones de monitoreo vulcanológico, apoyando la continuidad energética cuando los paneles fotovoltaicos pierden eficiencia por ceniza, polvo o humedad. Asimismo, los resultados indican que un diseño más eficiente del sistema de transmisión mecánica podría incrementar la energía generada, además de considerar un generador que trabaje a bajas rpm para de esta manera mejorar el rendimiento del prototipo.

- De acuerdo con la clasificación de Niveles de Madurez Tecnológica (TRL) propuesta por [CONCYTEC](#), el desarrollo realizado en esta investigación se ubica en desarrollo experimental o prueba del concepto tecnológico.

“Prueba de concepto tecnológica, donde se demuestra que los principios básicos previstos, sustentan el desarrollo de la tecnología que serán ciertamente aplicables. Se comienza a demostrar la viabilidad de la nueva tecnología a través de estudios analíticos y de laboratorio. Se desarrolla en un entorno de laboratorio. ([CONCYTEC](#))”

Figura 75

Clasificación de Niveles de Madurez Tecnológica (TRL)



Nota. Representación de los niveles de madurez tecnológica establecidos por CONCYTEC, que permiten clasificar el grado de desarrollo de un prototipo. Extraída de [CONCYTEC](#).

V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- La estación de monitoreo requiere 15 Watts/hora para operar sus sensores remotos, valor que definió la capacidad mínima del sistema eólico a diseñar.
- El recurso eólico en la provincia de Arequipa presenta velocidades promedio de 7.18 m/s, con mayor intensidad entre las 17:00 y 22:00 h, confirmando la viabilidad del aprovechamiento eólico.
- Se diseñó una turbina vertical tipo Savonius de 1.30 m de altura y 0.52 m de diámetro, cuya configuración garantiza estabilidad mecánica y facilidad de mantenimiento.
- Las simulaciones CFD mostraron velocidades del flujo entre 0 y 9.03 m/s y una reducción posterior al rotor, validando el comportamiento aerodinámico previsto del diseño.
- La energía generada alcanzó entre 6.2883 y 8.0958 Wh, con un promedio de 7.21 Wh, demostrando capacidad para cubrir parcialmente la demanda y confirmando la viabilidad técnica del sistema como complemento al sistema fotovoltaico.

5.2. Recomendaciones

- Realizar mediciones del recurso eólico durante un año completo para caracterizar con mayor precisión la variabilidad del viento y optimizar el dimensionamiento del sistema.
- Incorporar un sistema de almacenamiento energético con controlador de carga y baterías para asegurar el suministro continuo durante periodos de baja velocidad del viento.
- Implementar un sistema de control y monitoreo remoto mediante microcontroladores con conexión Ethernet o inalámbrica, que permita registrar en tiempo real el desempeño eléctrico y operativo de la turbina.
- Considerar como prioridad el uso de un generador diseñado para operar eficientemente a bajas RPM, ya que es esencial para aprovechar la energía disponible en vientos moderados y maximizar la producción del sistema.
- Evaluar configuraciones alternativas como arreglos híbridos Savonius–Darrieus y analizar la durabilidad de los materiales bajo intemperie, aplicando recubrimientos anticorrosivos o materiales compuestos para mejorar la vida útil del prototipo.

VI REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al-Kayiem, H. H., Bhayo, B. A., & Assadi, M. (2016). Comparative critique on the design parameters and their effect on the performance of S-rotors. *Renewable Energy*, *99*, 1306–1317. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.07.015>
- Alexander, A. J., & Holownia, B. P. (1978). Wind tunnel tests on a savonius rotor. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, *3*(4), 343–351. [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(78\)90037-5](https://doi.org/10.1016/0167-6105(78)90037-5)
- Anbarsooz, M. (2016). Aerodynamic performance of helical Savonius wind rotors with 30° and 45° twist angles: Experimental and numerical studies. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, *230*(6), 523–534. <https://doi.org/10.1177/0957650916648828>
- Cegarra, J. (2004). *Metodología de la Investigación Científica y Tecnológica* (Ediciones). [https://gc.scalahed.com/recursos/files/r161r/w24111w/Metodologia de la Investigacion Científica y Tecnológica - Jose Cegarra Sanchez.pdf](https://gc.scalahed.com/recursos/files/r161r/w24111w/Metodologia%20de%20la%20Investigacion%20Cientifica%20y%20Tecnologica%20-%20Jose%20Cegarra%20Sanchez.pdf)
- Coelho, P. (2023). The Betz limit and the corresponding thermodynamic limit. *Wind Engineering*, *47*(2), 491–496. <https://doi.org/10.1177/0309524X221130109>
- De la Calle Bernardo, R. (2018). Estudio aerodinámico de un aerogenerador de eje vertical mediante técnicas de cálculo cfd. In *Universidad Politécnica De Madrid*. <https://oa.upm.es/53294/>
- Didane, D. H., Behery, M. R., Al-Ghriyah, M., & Manshoor, B. (2024). Recent Progress in Design and Performance Analysis of Vertical-Axis Wind Turbines—A Comprehensive Review. *Processes*, *12*(6). <https://doi.org/10.3390/pr12061094>
- Ebrahimpour, M., Rouzbeh, S., Rezvan, A., & Mostafa, S. S. (2019). Numerical Investigation of the Savonius Vertical Axis Wind Turbine and Evaluation of the Effect of the Overlap Parameter in Both Horizontal and Vertical Directions on Its Performance. *Symmetry*, *11*(6), 821. <https://doi.org/10.3390/sym11060821>
- El-Askary, W. A., Saad, A. S., AbdelSalam, A. M., & Sakr, I. M. (2018). Investigating the performance of a twisted modified Savonius rotor. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, *182*(October), 344–355. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.10.009>

- Farozan, I., Soelaiman, T. A. F., Soetikno, P., & Indartono, Y. S. (2025). The effect of rotor aspect ratio, stages, and twist angle on Savonius wind turbine performance in low wind speeds environment. *Results in Engineering*, 25, 104041.
<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104041>
- Fujisawa, N. (1996). Velocity measurements and numerical calculations of flow fields in and around Savonius rotors. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 59(1), 39–50. [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(94\)00031-X](https://doi.org/10.1016/0167-6105(94)00031-X)
- Guerreros, E. A., Sotelo, F., & Lopez, J. (2020). Calculation of wind potential in the La Joya Sector. Arequipa, Peru [Cálculo del Potencial Eólico en el Sector de La Joya. Arequipa - Perú]. *Proceedings of the LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology*. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.317>
- Hadi Ali, M. (2013). Experimental Comparison Study for Savonius Wind Turbine of Two & Three Blades At Low Wind Speed. *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER) Www.Ijmer.Com*, 3(5), 2978–2986.
http://www.ijmer.com/papers/Vol3_Issue5/CJ3529782986.pdf
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, M. del P. (2014). *Metodología de la Investigación* (Interameri). https://apiperiodico.jalisco.gob.mx/api/sites/periodicooficial.jalisco.gob.mx/files/metodologia_de_la_investigacion_-_roberto_hernandez_sampieri.pdf
- Irabu, K., & Roy, J. N. (2007). Characteristics of wind power on Savonius rotor using a guide-box tunnel. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 32(2), 580–586.
<https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2007.06.008>
- K. A. H. Al-Gburi, B. Basrawi, M. F. N. Tajuddin, & M. S. bin Ab Kadir. (2023). Enhancing Savonius vertical axis wind turbine performance through novel blade design: Numerical and experimental investigations. *Energies*, 16(10). <https://doi.org/10.3390/es16104204>
- Kamoji, M. A., Kedare, S. B., & Prabhu, S. V. (2009a). Experimental investigations on single stage modified Savonius rotor. *Applied Energy*, 86(7–8), 1064–1073.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.09.019>
- Kamoji, M. A., Kedare, S. B., & Prabhu, S. V. (2009b). Performance tests on helical Savonius rotors. *Renewable Energy*, 34(3), 521–529.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.06.002>

- Lee, J., Lee, Y., & Lim, H. (2016). Effect of twist angle on the performance of Savonius wind turbine. *Renewable Energy*, 89, 231–244. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.12.012>
- Mahmoud, N. H., El-Haroun, A. A., Wahba, E., & Nasef, M. H. (2012). An experimental study on improvement of Savonius rotor performance. *Alexandria Engineering Journal*, 51(1), 19–25. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2012.07.003>
- Menet, J. L. (2004). A double-step Savonius rotor for local production of electricity: A design study. *Renewable Energy*, 29(11), 1843–1862. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2004.02.011>
- Modi, V. J., Roth, N. J., & Fernando, M. S. U. K. (1984). Optimum-configuration studies and prototype design of a wind-energy-operated irrigation system. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 16(1), 85–96. [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(84\)90050-3](https://doi.org/10.1016/0167-6105(84)90050-3)
- Mohammadi, M., Lakestani, M., & Mohamed, M. H. (2018). Intelligent parameter optimization of Savonius rotor using Artificial Neural Network and Genetic Algorithm. *Energy*, 143, 56–68. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.10.121>
- Mota, R., Pacheco, J. M., Pimentel, A., & Gil, A. (2024). Monitoring Volcanic Plumes and Clouds Using Remote Sensing: A Systematic Review. *Remote Sensing*, 16(10). <https://doi.org/10.3390/rs16101789>
- Nasef, M. H., El-Askary, W. A., AbdEL-hamid, A. A., & Gad, H. E. (2013). Evaluation of Savonius rotor performance: Static and dynamic studies. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 123, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2013.09.009>
- Panyawong, S., Kammunang, N., Thapanasoontorn, N., Pantibpa, S., Jeejai, N., & Manosroi, W. (2022). *Performance Analysis of Micro Vertical-Axis Savonius Wind*. February 2015. <https://doi.org/10.1063/5.0115653>
- Prabowo, H., Wijayanto, D. S., Saputra, T. W., & Bakar, M. (2023). *JIPTEK : Journal Technical and Vocational Education Science*. 16(2). <https://doi.org/10.20961/jiptek.v16i2.71389>.
- Pulfer, J., Meza, W., Mitjans, F., & Gonzalez, J. (2018). Energy Efficiency Assessment of Four Designs of Vertical Axis And Drag Differential Wind Turbines. *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE)* e-ISSN: 2278-1676,p-ISSN: 2320-

3331, 13(1), 73–81. <https://doi.org/10.9790>

- Rahman, M., Salyers, T. E., El-Shahat, A., Ilie, M., Ahmed, M., & Soloiu, V. (2018). Numerical and Experimental Investigation of Aerodynamic Performance of Vertical-Axis Wind Turbine Models with Various Blade Designs. *Journal of Power and Energy Engineering*, 06(05), 26–63. <https://doi.org/10.4236/jpee.2018.65003>
- Rodríguez, L. A., & Nadeau, P. (2015). Resumen de las principales técnicas de percepción remota usadas en volcanes para monitorear las emisiones de gas en tierra. *Revista Geológica de América Central*, 52, 67–105. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i52.18982>
- Roy, S., & Saha, U. K. (2013). Review on the numerical investigations into the design and development of Savonius wind rotors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, 73–83. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.060>
- Saad, A. S., El-Sharkawy, I. I., Ookawara, S., & Ahmed, M. (2020). Performance enhancement of twisted-bladed Savonius vertical axis wind turbines. *Energy Conversion and Management*, 209(February), 112673. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112673>
- Saha, U. K., & Rajkumar, M. J. (2006). On the performance analysis of Savonius rotor with twisted blades. *Renewable Energy*, 31(11), 1776–1788. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.08.030>
- Saha, U. K., Thotla, S., & Maity, D. (2008). Optimum design configuration of Savonius rotor through wind tunnel experiments. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96(8–9), 1359–1375. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2008.03.005>
- Sanaye, S., & Hosseinkhani, A. (2024). Innovative multiobjective optimization of a curved-blade vertical axis wind turbine modeled by modified double multiple streamtube method. *Energy Science and Engineering*, 12(5), 2118–2136. <https://doi.org/10.1002/ese3.1734>
- Santoso, W., Saputro, H., & Bugis, H. (2020). *Experimental study of savonius turbine performance on the beach coast of demak district of demak electrical power generated*. JoMEVE (Journal of Mechanical Engineering and Vocational Education), 3(2). Recuperado de <https://jurnal.uns.ac.id/jomeve/article/view/46009>.

- Shahriare, S., Rony, M. R., & Das, P. (2025). Enhanced Aerodynamic Performance of Savonius Wind Turbines Through Blade Design Modifications: A CFD Study. *Wind Energy*, 28(8), 1–13. <https://doi.org/10.1002/we.70042>
- Tobías Salas, A., Jiménez, R., & Alberto, C. (2017). Estado del arte de aerogeneradores de eje horizontal y vertical. *Jóvenes En La Ciencia*, 3(2), 1996–1970. <https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/download/1778/1279/5816>
- Torres, S. (2021). *Optimización del diseño de la turbina eólica Savonius*. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. <https://repositorio.escuelaing.edu.co/handle/001/1680>
- Torres, S., Marulanda, A., Montoya, M. F., & Hernandez, C. (2022). Geometric design optimization of a Savonius wind turbine. *Energy Conversion and Management*, 262(December 2021), 115679. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115679>
- Vargas, E., Orellana, R., & Sempértégui, D. (2022). Estado del arte sobre aerogeneradores de eje vertical. *Investigacion & Desarrollo*, 22(1), 161–172. <https://doi.org/10.23881/idupbo.022.1-13i>
- Vicente, J., Antonio, H., & Prisco, A. (2012). A review on the performance of Savonius wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 3054–3064. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.056>
- Wenehenubun, F., Saputra, A., & Sutanto, H. (2015). An experimental study on the performance of Savonius wind turbines related with the number of blades. *Energy Procedia*, 68, 297–304. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.03.259>
- Zhao, Z., Zheng, Y., Xu, X., Liu, W., & Hu, G. (2009). Research on the improvement of the performance of savonius rotor based on numerical study. *1st International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, SUPERGEN '09*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/SUPERGEN.2009.5348197>
- Zhao, Z., Zheng, Y., Xu, X., Liu, W., & Zhou, D. (2009). Optimum design configuration of helical savonius rotor via numerical study. *Proceedings of the ASME Fluids Engineering Division Summer Conference 2009, FEDSM2009, 1(PART B)*, 1273–1278. <https://doi.org/10.1115/FEDSM2009-78430>

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a las personas más importantes de mi vida.

A mi padre, **Julio Edgardo Vásquez Tafur**, por su ejemplo de esfuerzo y por enseñarme el valor de la perseverancia. A mi madre, **Reyna Mejía León**, por su infinita paciencia, sus consejos y su apoyo incondicional que fueron mi fortaleza en los momentos difíciles. A ellos les debo no solo la oportunidad de formarme académicamente, sino también los valores que han guiado cada paso de mi vida. A mi hermano, **José Edinson Vásquez Mejía**, por su amistad, complicidad y por estar siempre presente en cada etapa de mi vida.

Emerson Junior Vásquez Mejía

Dedico este trabajo de investigación a Dios, por otorgarme la sabiduría, la guía en los momentos más exigentes y la claridad necesaria para avanzar con perseverancia. A mis padres, **Floridoro Altamirano Salazar** y **Adita Yulisa Silva Tocto**, por su amor incondicional, su ejemplo de esfuerzo y los valores que han guiado cada paso de mi formación personal y académica. Su apoyo constante ha sido el cimiento que me permitió continuar y concretar esta meta. Extiendo esta dedicatoria a todas las personas que contribuyeron al desarrollo de este proyecto: docentes, compañeros y amigos, quienes, con sus conocimientos, orientación y confianza, hicieron posible alcanzar los objetivos trazados y avanzar con determinación en cada etapa del proceso.

Darwin Jesús Altamirano Silva

AGRADECIMIENTOS

Hacemos extensivo nuestro agradecimiento al **Laboratorio de Diseño Mecánico, Fabricación y Manufactura (DFABLAB)**, y al **Laboratorio de Medición de Recursos Energéticos Renovables, Calidad y Eficiencia Eléctrica (MEDRER)**, , ambos adscritos al **Instituto de Investigación en Energías Renovables (INRER)** de la **Universidad Nacional de Jaén**, por facilitarnos las herramientas, instrumentos y equipos y el mobiliario adecuado para desarrollar nuestro proyecto y fortalecer nuestro aprendizaje que hicieron posible el desarrollo de este trabajo de investigación.

Asimismo, reconocemos el valioso soporte técnico y de componentes brindado por los semilleros de investigación: "**Diseño Mecánico y Procesos de Manufactura - CAD-CAM**"; y "**Desarrollo Tecnológico con Electrónica Embebida Programable - TECDES**".

Del mismo modo, valoramos la colaboración institucional con el **Instituto Geofísico del Perú (IGP)**, cuyo convenio permitió fortalecer el alcance y la calidad de los resultados obtenidos.

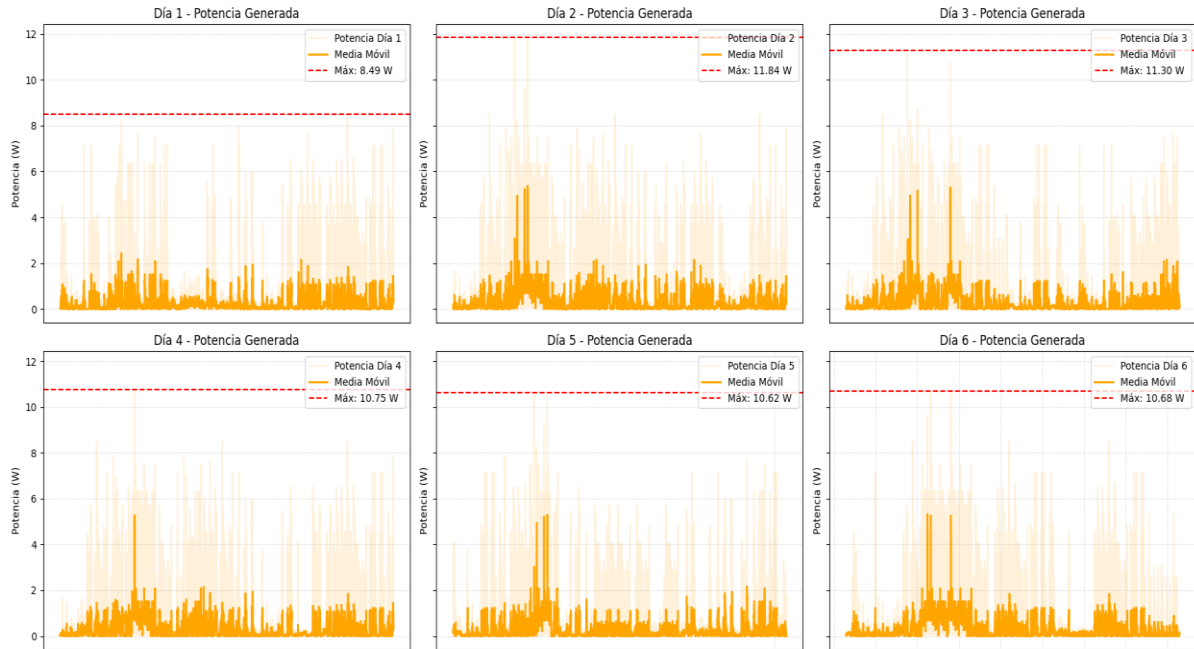
Expresamos nuestro especial reconocimiento al **MSc. Ing. Henry Oswaldo Pinedo Nava**, nuestro asesor, cuyo acompañamiento, orientación técnica y compromiso académico fueron esenciales para la adecuada conducción y culminación de esta investigación.

Finalmente, extendemos nuestra gratitud a los amigos, compañeros y a todas las personas que, de manera directa o indirecta, contribuyeron a este proceso. Cada aporte, consejo, asistencia técnica y gesto de apoyo contribuyó significativamente a la consolidación de este proyecto.

ANEXOS

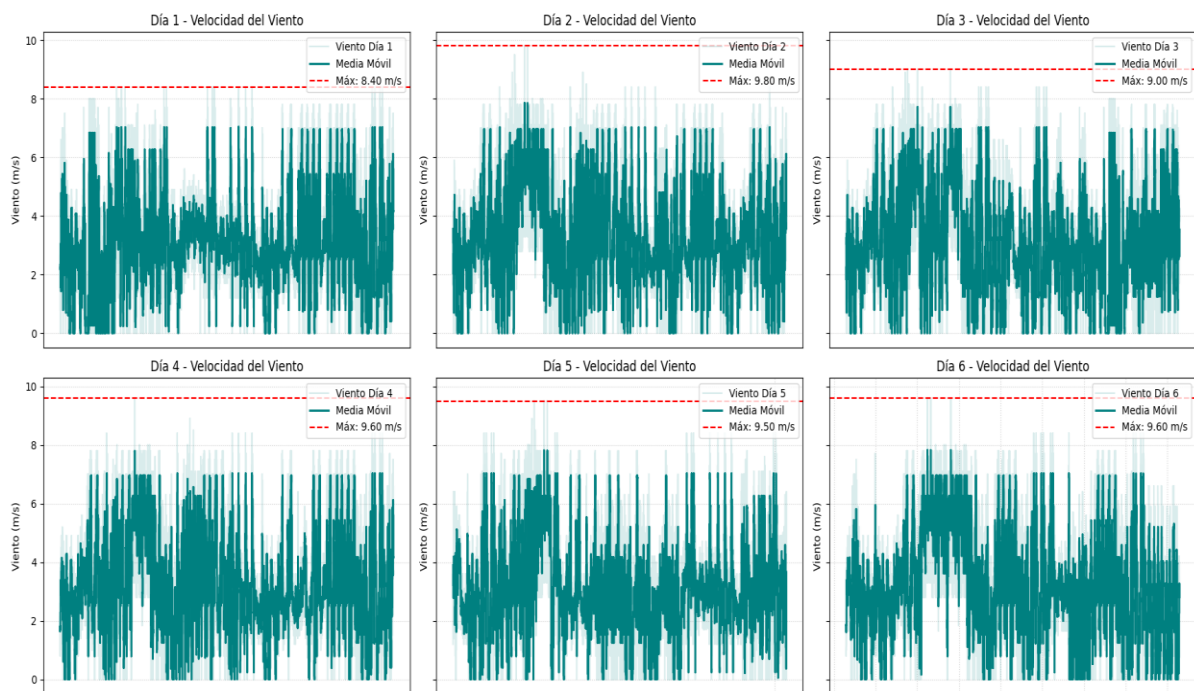
Anexo 1

Análisis de la potencia del día 1 al día 6



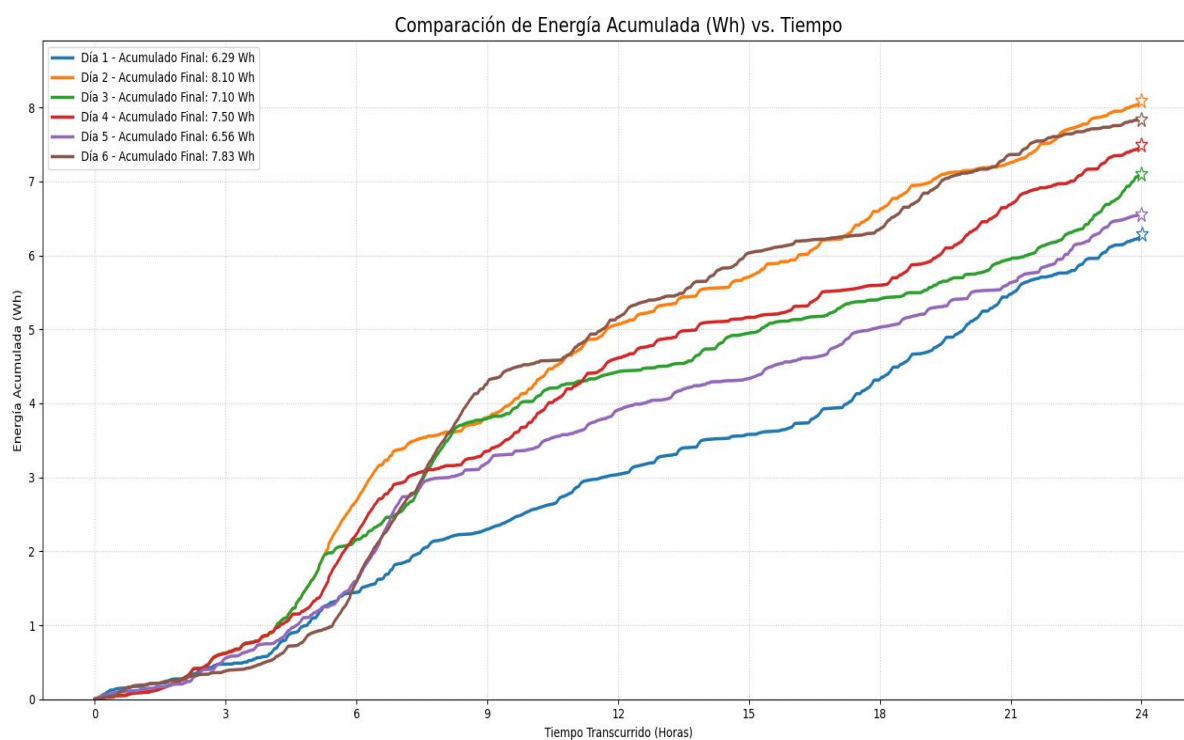
Anexo 2

Análisis de la velocidad de viento (Día 1 – Día 6)



Anexo 3

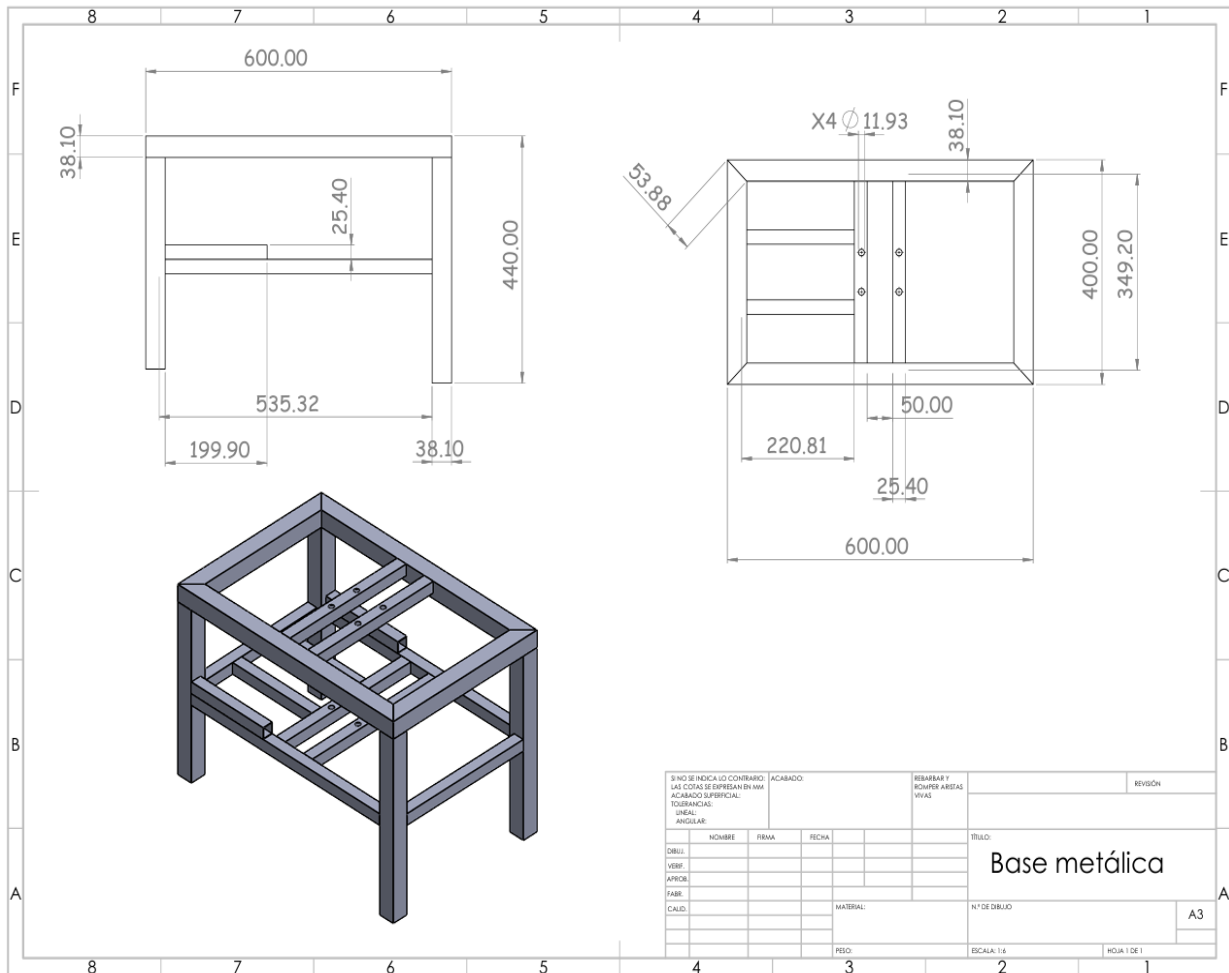
Análisis comparativo de la energía acumulada (Día 1 - Día 6)



- Planos de la estructura de la turbina eólica Savonius

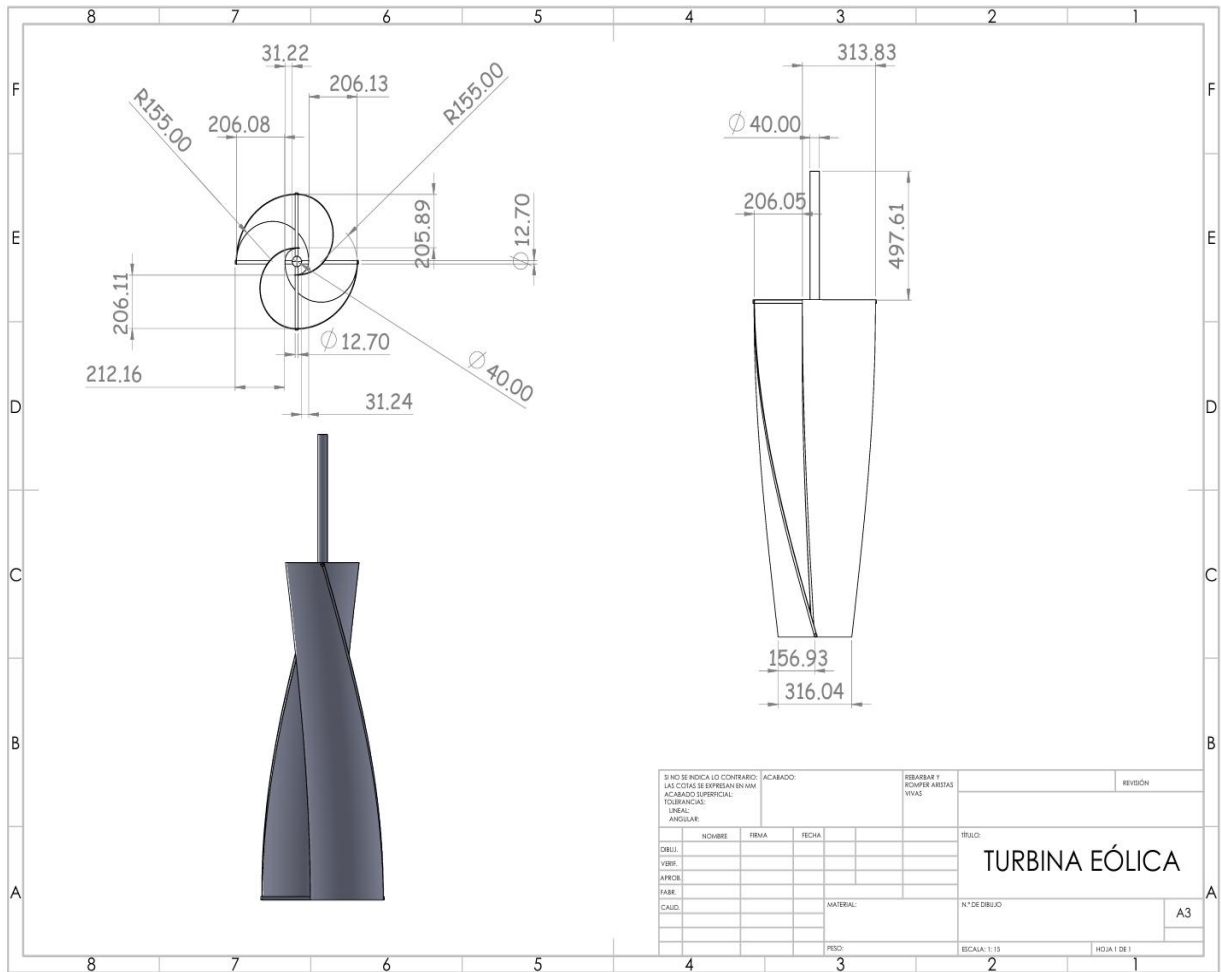
Anexo 4

Dimensiones de la base de la turbina eólica Savonius



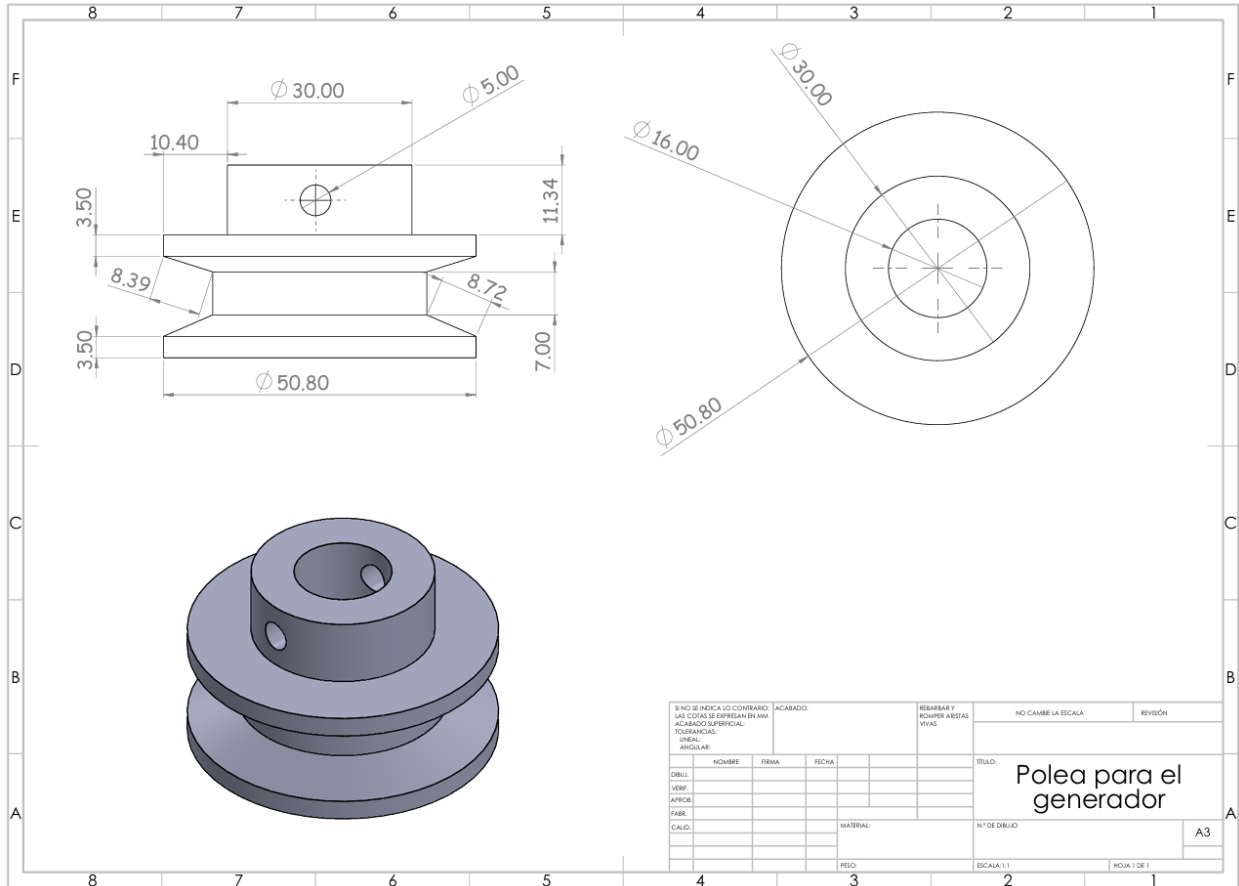
Anexo 5

Dimensiones de la turbina eólica Savonius



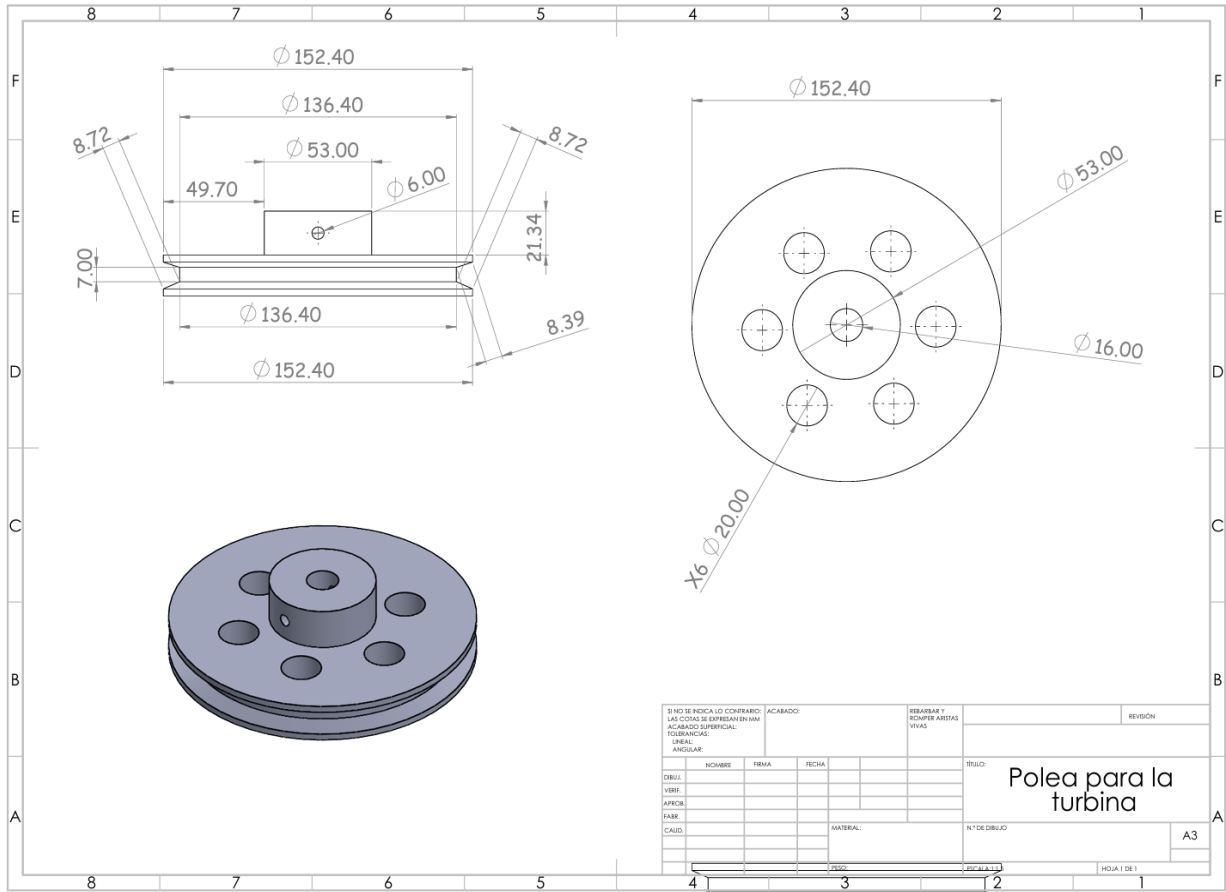
Anexo 6

Dimensiones de la polea para el generador



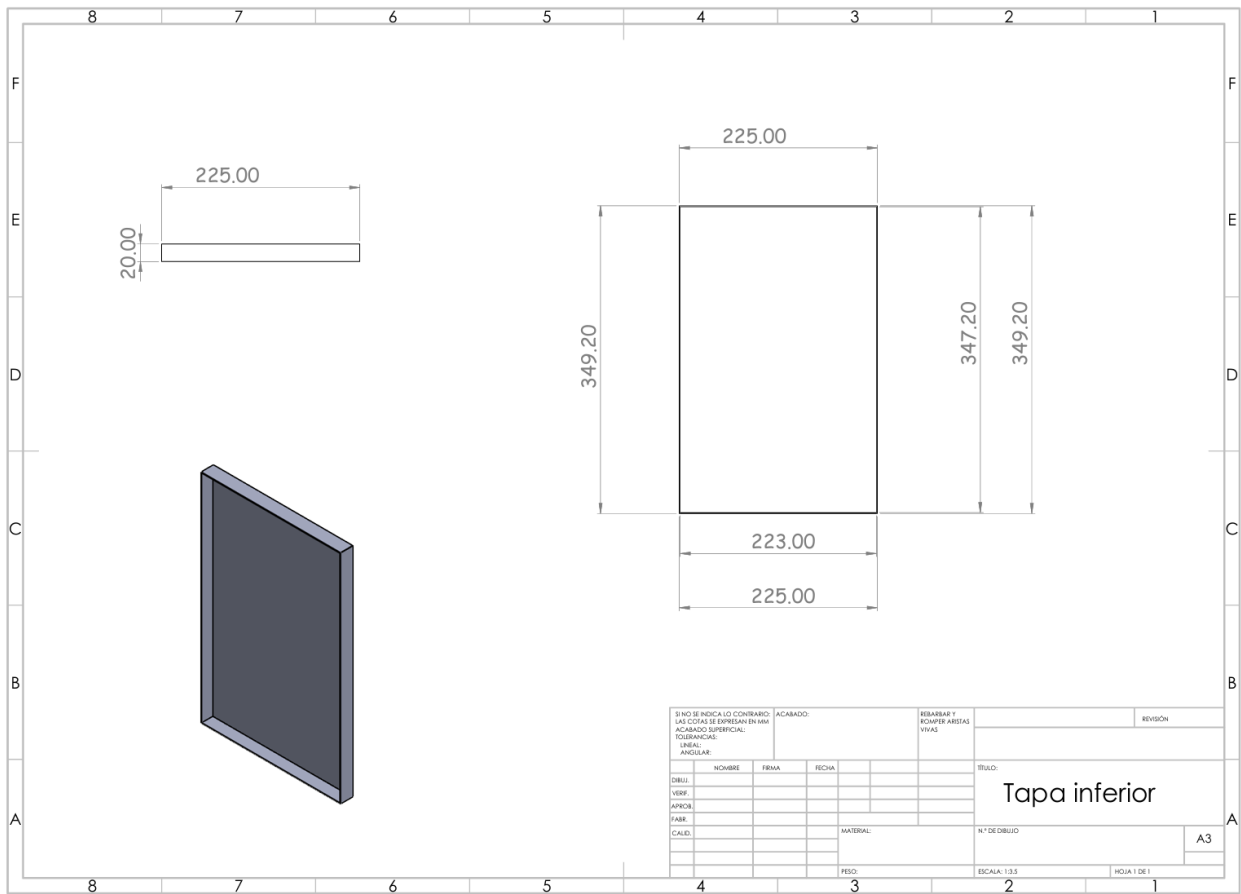
Anexo 7

Dimensiones de la polea para el eje de la turbina Savonius



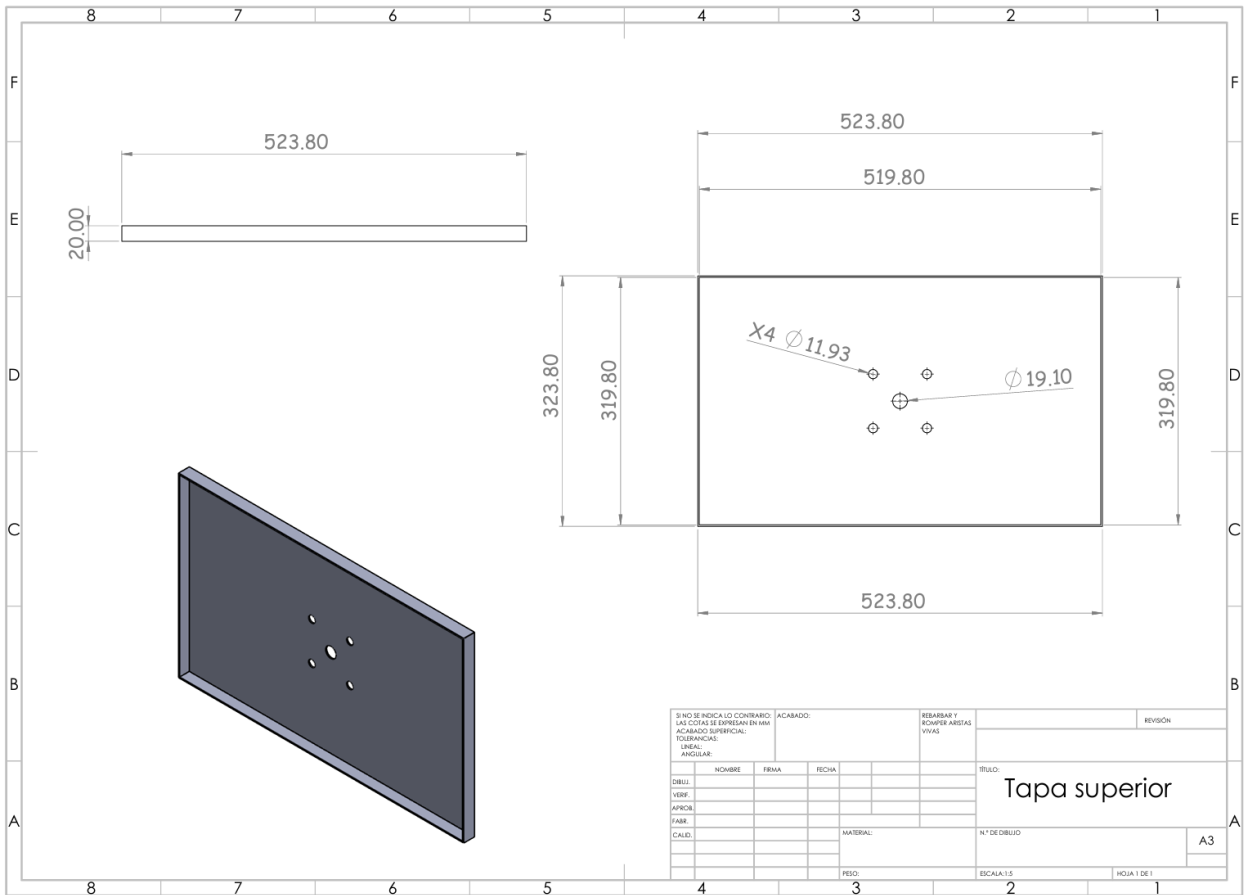
Anexo 8

Dimensiones de la tapa inferior de la estructura



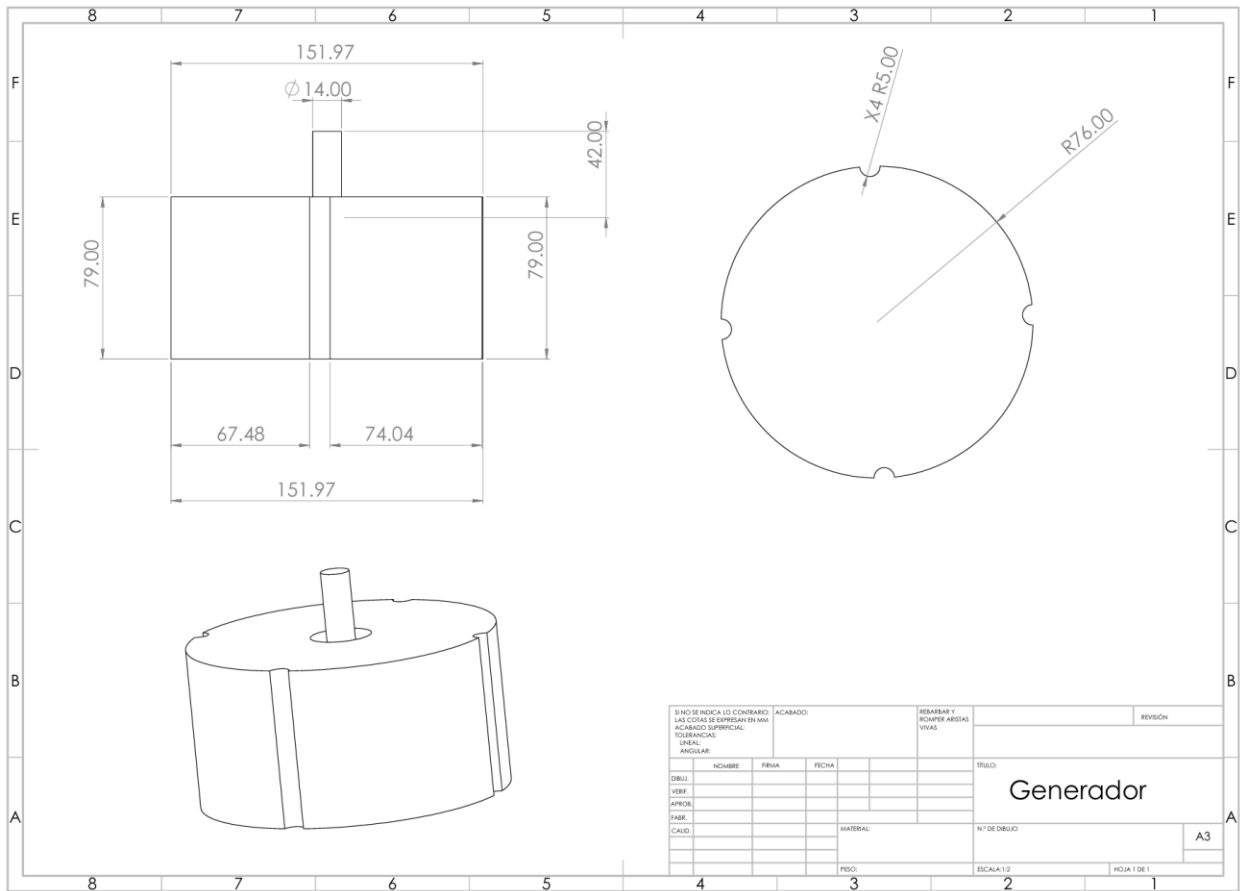
Anexo 9

Dimensiones de la tapa superior de la estructura



Anexo 10

Dimensiones del generador



Código para extraer datos de la medición

```
// 1. INCLUSIÓN DE BIBLIOTECAS

#include <Wire.h>           // Para comunicación I2C (LCD, RTC, INA219)
#include <SPI.h>            // Para comunicación con la tarjeta SD
#include <SD.h>             // Para manejar la tarjeta SD
#include <RTCLib.h>        // Para el módulo RTC DS3231
#include <Adafruit_INA219.h> // Para el sensor de corriente/voltaje
#include <LiquidCrystal_I2C.h> // Para la pantalla LCD I2C

// 2. CONFIGURACIÓN DE PINES Y PARÁMETROS

// --- Tarjeta Micro SD ---
const int SDCARD_CS_PIN = 10;

// --- Sensor de RPM (LDR) ---
const int RPM_SENSOR_PIN = 2; // Debe ser un pin de interrupción (D2 o D3 en
Nano)

// --- Anemómetro (Módulo MAX485) ---
const int RS485_CTRL_PIN = 3; // Pin para controlar el modo
Transmisión/Recepción
const uint8_t ANEMOMETER_ID = 0x02; // ID del esclavo Modbus (Anemómetro)
const uint16_t REG_ADDR = 0x0000; // Dirección del registro para leer la
velocidad

// --- Pantalla LCD ---
// Dirección I2C (comúnmente 0x27 o 0x3F) y tamaño (16x2)
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);

// --- Intervalo de Medición ---
const long LOG_INTERVAL = 1000; // Intervalo para leer y guardar datos (1
segundo)

// 3. CREACIÓN DE OBJETOS Y VARIABLES GLOBALES

// --- Objetos de Sensores ---
RTC_DS3231 rtc;
Adafruit_INA219 ina219;
File dataFile;

// --- Variables para RPM ---
volatile int pulseCounter = 0; // Contador de pulsos (volátil para uso en ISR)
int rpm = 0;
unsigned long lastRpmCalcTime = 0;
const long debounceDelay = 50; // Anti-rebote para el sensor LDR
volatile unsigned long lastPulseTime = 0;
```

```

// --- Variables para Datalogging ---
unsigned long lastLogTime = 0;

// 4. FUNCIONES PARA EL ANEMÓMETRO (MODBUS RTU)

/**
 * @brief Pone el módulo MAX485 en modo Transmisión o Recepción.
 * @param enable Si es true, se activa el modo Transmisión; si es false,
Recepción.
 */
void setTxEnable(bool enable) {
    digitalWrite(RS485_CTRL_PIN, enable ? HIGH : LOW);
    delayMicroseconds(150); // Pausa para que el chip cambie de modo
}

/**
 * @brief Calcula el CRC-16 para la validación de tramas Modbus.
 * @param data Puntero al array de bytes.
 * @param length Número de bytes en el array.
 * @return El valor del CRC calculado.
 */
uint16_t calculateCRC(uint8_t *data, uint8_t length) {
    uint16_t crc = 0xFFFF;
    for (uint8_t i = 0; i < length; i++) {
        crc ^= data[i];
        for (uint8_t j = 0; j < 8; j++) {
            if (crc & 0x0001) {
                crc >>= 1;
                crc ^= 0xA001;
            } else {
                crc >>= 1;
            }
        }
    }
    return crc;
}

/**
 * @brief Lee la velocidad del viento del anemómetro.
 * @return La velocidad del viento en m/s. Retorna -1.0 si hay un error.
 */
float readWindSpeed() {
    uint8_t request[8];
    uint8_t response[7];

    // Construir trama de solicitud Modbus
    request[0] = ANEMOMETER_ID;
    request[1] = 0x03; // Función: Leer Registro

```

```

request[2] = (REG_ADDR >> 8) & 0xFF;
request[3] = REG_ADDR & 0xFF;
request[4] = 0x00;
request[5] = 0x01; // Pedir 1 solo registro
uint16_t crc = calculateCRC(request, 6);
request[6] = crc & 0xFF;
request[7] = (crc >> 8) & 0xFF;

// Limpiar buffer de entrada antes de enviar
while (Serial.available()) Serial.read();

// 1. Enviar Solicitud
setTxEnable(true);
Serial.write(request, sizeof(request));
Serial.flush();
setTxEnable(false);

// Retardo VITAL para dar tiempo al sensor a responder
delay(35);

// 2. Esperar y Leer la Respuesta
unsigned long startTime = millis();
int bytesRead = 0;
while (bytesRead < 7 && (millis() - startTime) < 500) {
    if (Serial.available()) {
        response[bytesRead++] = Serial.read();
    }
}

// 3. Validar y Procesar la Respuesta
if (bytesRead == 7) {
    uint16_t receivedCRC = response[5] | ((uint16_t)response[6] << 8);
    uint16_t calculatedCRC = calculateCRC(response, 5);

    if (receivedCRC == calculatedCRC) {
        uint16_t rawValue = ((uint16_t)response[3] << 8) | response[4];
        return rawValue * 0.1; // Convertir a m/s
    }
}

return -1.0; // Retornar valor de error
}

// 5. RUTINA DE SERVICIO DE INTERRUPCIÓN (ISR) PARA RPM
/**
 * @brief Esta función se ejecuta cada vez que el sensor LDR detecta un flanco
de subida.

```

```

* Incrementa el contador de pulsos y aplica un anti-rebote por software.
*/
void countPulseISR() {
  if (millis() - lastPulseTime > debounceDelay) {
    pulseCounter++;
    lastPulseTime = millis();
  }
}

// 6. FUNCIÓN DE CONFIGURACIÓN (SETUP)

void setup() {
  // --- INICIALIZACIÓN DE COMUNICACIONES ---
  Serial.begin(9600);
  Wire.begin(); // Iniciar bus I2C

  // --- INICIALIZACIÓN DE PANTALLA LCD ---
  lcd.init();
  lcd.backlight();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Iniciando...");

  // --- INICIALIZACIÓN DE RTC ---
  if (!rtc.begin()) {
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Error: RTC");
    while (1);
  }
  // Descomentar la siguiente línea para ajustar la hora del RTC una vez:
  // rtc.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__)));

  // --- INICIALIZACIÓN DE INA219 ---
  if (!ina219.begin()) {
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Error: INA219");
    while (1);
  }

  // --- INICIALIZACIÓN DE TARJETA SD ---
  if (!SD.begin(SDCARD_CS_PIN)) {
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Error: SD");
    while (1);
  }

  // --- CONFIGURACIÓN DE PINES Y PERIFÉRICOS ---
  // Anemómetro
  pinMode(RS485_CTRL_PIN, OUTPUT);
}

```

```

setTxEnable(false); // Iniciar en modo recepción

// Sensor RPM
pinMode(RPM_SENSOR_PIN, INPUT);
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(RPM_SENSOR_PIN), countPulseISR,
RISING);

// --- CREAR ENCABEZADO Y ABRIR ARCHIVO CSV ---
dataFile = SD.open("datalog.csv", FILE_WRITE);

if (dataFile) {
  if (dataFile.size() == 0) {
    dataFile.println("Timestamp;Voltaje,V;Corriente,A;Potencia,W;RPM;Velocid
ad_Viento,m/s");
    dataFile.flush(); // Asegurarse que el encabezado se escriba
  }
}
else {
  lcd.clear();
  lcd.print("Error: Abrir SD");
  while(1);
}

lcd.clear();
lcd.print("Sistema Listo");
delay(1000);
lcd.clear();
}

// 7. FUNCIÓN PRINCIPAL (LOOP)

void loop() {
  // Ejecutar el código principal cada 'LOG_INTERVAL' milisegundos
  if (millis() - lastLogTime >= LOG_INTERVAL) {

    // --- A. LECTURA DE SENSORES ---
    DateTime now = rtc.now();
    float busVoltage = ina219.getBusVoltage_V();
    float current_mA = ina219.getCurrent_mA();
    float power_mW = ina219.getPower_mW();
    float windSpeed = readWindSpeed();

    // --- B. CÁLCULO DE RPM ---
    noInterrupts();
    long deltaTime = millis() - lastRpmCalcTime;

    if (deltaTime > 0) { // Evitar división por cero
      rpm = (pulseCounter * 60000L) / deltaTime;
    }
  }
}

```

```

} else {
    rpm = 0;
}

pulseCounter = 0; // Reiniciar contador para el próximo intervalo
lastRpmCalcTime = millis();
interrupts(); // Reactivar interrupciones

// --- C. CONVERSIÓN DE UNIDADES ---
float current_A = current_mA / 1000.0;
float power_W = power_mW / 1000.0;

// --- D. VISUALIZACIÓN EN MONITOR SERIAL ---
String serialData = String(now.year()) + "-" + String(now.month()) + "-" +
String(now.day()) + " " +
                    String(now.hour()) + ":" + String(now.minute()) + ":"
+ String(now.second());
Serial.print(serialData);
Serial.print("\t;\tV: "); Serial.print(busVoltage, 2);
Serial.print("\t;\tA: "); Serial.print(current_A, 3);
Serial.print("\t;\tW: "); Serial.print(power_W, 2);
Serial.print("\t;\tRPM: "); Serial.print(rpm);
Serial.print("\t;\tViento: "); Serial.print(windSpeed, 2);
Serial.println(" m/s");

// --- E. ACTUALIZACIÓN DE LA PANTALLA LCD ---
lcd.clear();
// Línea 1: Potencia y RPM
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("P:");
lcd.print(power_W, 2);
lcd.print("W");
lcd.setCursor(9, 0);
lcd.print("RPM:");
lcd.print(rpm);
// Línea 2: Velocidad del Viento
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("Viento:");
lcd.print(windSpeed, 2);
lcd.print("m/s");

// --- F. GUARDADO DE DATOS EN TARJETA SD ---
String dataString = "";
dataString += String(now.year()) + "-" + String(now.month()) + "-" +
String(now.day());
dataString += " " + String(now.hour()) + ":" + String(now.minute()) + ":"
+ String(now.second());
dataString += ";";

```

```

    dataString += String(busVoltage);
    dataString += ";";
    dataString += String(current_A);
    dataString += ";";
    dataString += String(power_W);
    dataString += ";";
    dataString += String(rpm);
    dataString += ";";
    dataString += String(windSpeed);

    // <-- CAMBIO: Optimizamos el guardado en SD
    if (dataFile) {
        dataFile.println(dataString);
        dataFile.flush(); // Mucho más rápido que .close()
    }

    // Actualizar el tiempo del último registro
    lastLogTime += LOG_INTERVAL;
}
}
// 1. INCLUSIÓN DE BIBLIOTECAS

#include <Wire.h> // Para comunicación I2C (LCD, RTC, INA219)
#include <SPI.h> // Para comunicación con la tarjeta SD
#include <SD.h> // Para manejar la tarjeta SD
#include <RTCLib.h> // Para el módulo RTC DS3231
#include <Adafruit_INA219.h> // Para el sensor de corriente/voltaje
#include <LiquidCrystal_I2C.h> // Para la pantalla LCD I2C

// 2. CONFIGURACIÓN DE PINES Y PARÁMETROS

// --- Tarjeta Micro SD ---
const int SDCARD_CS_PIN = 10;

// --- Sensor de RPM (LDR) ---
const int RPM_SENSOR_PIN = 2; // Debe ser un pin de interrupción (D2 o D3 en
Nano)

// --- Anemómetro (Módulo MAX485) ---
const int RS485_CTRL_PIN = 3; // Pin para controlar el modo
Transmisión/Recepción
const uint8_t ANEMOMETER_ID = 0x02; // ID del esclavo Modbus (Anemómetro)
const uint16_t REG_ADDR = 0x0000; // Dirección del registro para leer la
velocidad

// --- Pantalla LCD ---
// Dirección I2C (comúnmente 0x27 o 0x3F) y tamaño (16x2)
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);

```

```

// --- Intervalo de Medición ---
const long LOG_INTERVAL = 1000; // Intervalo para leer y guardar datos (1
segundo)

// 3. CREACIÓN DE OBJETOS Y VARIABLES GLOBALES

// --- Objetos de Sensores ---
RTC_DS3231 rtc;
Adafruit_INA219 ina219;
File dataFile;

// --- Variables para RPM ---
volatile int pulseCounter = 0; // Contador de pulsos (volátil para uso en ISR)
int rpm = 0;
unsigned long lastRpmCalcTime = 0;
const long debounceDelay = 50; // Anti-rebote para el sensor LDR
volatile unsigned long lastPulseTime = 0;

// --- Variables para Datalogging ---
unsigned long lastLogTime = 0;

// 4. FUNCIONES PARA EL ANEMÓMETRO (MODBUS RTU)

/**
 * @brief Pone el módulo MAX485 en modo Transmisión o Recepción.
 * @param enable Si es true, se activa el modo Transmisión; si es false,
Recepción.
 */
void setTxEnable(bool enable) {
    digitalWrite(RS485_CTRL_PIN, enable ? HIGH : LOW);
    delayMicroseconds(150); // Pausa para que el chip cambie de modo
}

/**
 * @brief Calcula el CRC-16 para la validación de tramas Modbus.
 * @param data Puntero al array de bytes.
 * @param length Número de bytes en el array.
 * @return El valor del CRC calculado.
 */
uint16_t calculateCRC(uint8_t *data, uint8_t length) {
    uint16_t crc = 0xFFFF;
    for (uint8_t i = 0; i < length; i++) {
        crc ^= data[i];
        for (uint8_t j = 0; j < 8; j++) {
            if (crc & 0x0001) {
                crc >>= 1;
                crc ^= 0xA001;
            }
        }
    }
}

```

```

        } else {
            crc >>= 1;
        }
    }
}
return crc;
}

/**
 * @brief Lee la velocidad del viento del anemómetro.
 * @return La velocidad del viento en m/s. Retorna -1.0 si hay un error.
 */
float readWindSpeed() {
    uint8_t request[8];
    uint8_t response[7];

    // Construir trama de solicitud Modbus
    request[0] = ANEMOMETER_ID;
    request[1] = 0x03; // Función: Leer Registro
    request[2] = (REG_ADDR >> 8) & 0xFF;
    request[3] = REG_ADDR & 0xFF;
    request[4] = 0x00;
    request[5] = 0x01; // Pedir 1 solo registro
    uint16_t crc = calculateCRC(request, 6);
    request[6] = crc & 0xFF;
    request[7] = (crc >> 8) & 0xFF;

    // Limpiar buffer de entrada antes de enviar
    while (Serial.available()) Serial.read();

    // 1. Enviar Solicitud
    setTxEnable(true);
    Serial.write(request, sizeof(request));
    Serial.flush();
    setTxEnable(false);

    // Retardo VITAL para dar tiempo al sensor a responder
    delay(35);

    // 2. Esperar y Leer la Respuesta
    unsigned long startTime = millis();
    int bytesRead = 0;
    while (bytesRead < 7 && (millis() - startTime) < 500) {
        if (Serial.available()) {
            response[bytesRead++] = Serial.read();
        }
    }
}

```

```

// 3. Validar y Procesar la Respuesta
if (bytesRead == 7) {
    uint16_t receivedCRC = response[5] | ((uint16_t)response[6] << 8);
    uint16_t calculatedCRC = calculateCRC(response, 5);

    if (receivedCRC == calculatedCRC) {
        uint16_t rawValue = ((uint16_t)response[3] << 8) | response[4];
        return rawValue * 0.1; // Convertir a m/s
    }
}

return -1.0; // Retornar valor de error
}

// 5. RUTINA DE SERVICIO DE INTERRUPCIÓN (ISR) PARA RPM

/**
 * @brief Esta función se ejecuta cada vez que el sensor LDR detecta un flanco
 de subida.
 * Incrementa el contador de pulsos y aplica un anti-rebote por software.
 */
void countPulseISR() {
    if (millis() - lastPulseTime > debounceDelay) {
        pulseCounter++;
        lastPulseTime = millis();
    }
}

// 6. FUNCIÓN DE CONFIGURACIÓN (SETUP)

void setup() {
    // --- INICIALIZACIÓN DE COMUNICACIONES ---
    Serial.begin(9600);
    Wire.begin(); // Iniciar bus I2C

    // --- INICIALIZACIÓN DE PANTALLA LCD ---
    lcd.init();
    lcd.backlight();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Iniciando...");

    // --- INICIALIZACIÓN DE RTC ---
    if (!rtc.begin()) {
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print("Error: RTC");
        while (1);
    }
    // Descomentar la siguiente línea para ajustar la hora del RTC una vez:

```

```

// rtc.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__)));

// --- INICIALIZACIÓN DE INA219 ---
if (!ina219.begin()) {
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("Error: INA219");
  while (1);
}

// --- INICIALIZACIÓN DE TARJETA SD ---
if (!SD.begin(SDCARD_CS_PIN)) {
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("Error: SD");
  while (1);
}

// --- CONFIGURACIÓN DE PINES Y PERIFÉRICOS ---
// Anemómetro
pinMode(RS485_CTRL_PIN, OUTPUT);
setTxEnable(false); // Iniciar en modo recepción

// Sensor RPM
pinMode(RPM_SENSOR_PIN, INPUT);
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(RPM_SENSOR_PIN), countPulseISR,
RISING);

// --- CREAR ENCABEZADO Y ABRIR ARCHIVO CSV ---
dataFile = SD.open("datalog.csv", FILE_WRITE);

if (dataFile) {
  if (dataFile.size() == 0) {
    dataFile.println("Timestamp;Voltaje,V;Corriente,A;Potencia,W;RPM;Velocid
ad_Viento,m/s");
    dataFile.flush(); // Asegurarse que el encabezado se escriba
  }
}
else {
  lcd.clear();
  lcd.print("Error: Abrir SD");
  while(1);
}

lcd.clear();
lcd.print("Sistema Listo");
delay(1000);
lcd.clear();
}

```

```

// 7. FUNCIÓN PRINCIPAL (LOOP)

void loop() {
  // Ejecutar el código principal cada 'LOG_INTERVAL' milisegundos
  if (millis() - lastLogTime >= LOG_INTERVAL) {

    // --- A. LECTURA DE SENSORES ---
    DateTime now = rtc.now();
    float busVoltage = ina219.getBusVoltage_V();
    float current_mA = ina219.getCurrent_mA();
    float power_mW = ina219.getPower_mW();
    float windSpeed = readWindSpeed();

    // --- B. CÁLCULO DE RPM ---
    noInterrupts();
    long deltaTime = millis() - lastRpmCalcTime;

    if (deltaTime > 0) { // Evitar división por cero
      rpm = (pulseCounter * 60000L) / deltaTime;
    } else {
      rpm = 0;
    }

    pulseCounter = 0; // Reiniciar contador para el próximo intervalo
    lastRpmCalcTime = millis();
    interrupts(); // Reactivar interrupciones

    // --- C. CONVERSIÓN DE UNIDADES ---
    float current_A = current_mA / 1000.0;
    float power_W = power_mW / 1000.0;

    // --- D. VISUALIZACIÓN EN MONITOR SERIAL ---
    String serialData = String(now.year()) + "-" + String(now.month()) + "-" +
String(now.day()) + " " +
String(now.hour()) + ":" + String(now.minute()) + ":"
+ String(now.second());
    Serial.print(serialData);
    Serial.print("\t;\tV: "); Serial.print(busVoltage, 2);
    Serial.print("\t;\tA: "); Serial.print(current_A, 3);
    Serial.print("\t;\tW: "); Serial.print(power_W, 2);
    Serial.print("\t;\tRPM: "); Serial.print(rpm);
    Serial.print("\t;\tViento: "); Serial.print(windSpeed, 2);
    Serial.println(" m/s");

    // --- E. ACTUALIZACIÓN DE LA PANTALLA LCD ---
    lcd.clear();
    // Línea 1: Potencia y RPM
    lcd.setCursor(0, 0);

```

```

    lcd.print("P:");
    lcd.print(power_W, 2);
    lcd.print("W");
    lcd.setCursor(9, 0);
    lcd.print("RPM:");
    lcd.print(rpm);
    // Línea 2: Velocidad del Viento
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Viento:");
    lcd.print(windSpeed, 2);
    lcd.print("m/s");

    // --- F. GUARDADO DE DATOS EN TARJETA SD ---
    String dataString = "";
    dataString += String(now.year()) + "-" + String(now.month()) + "-" +
String(now.day());
    dataString += " " + String(now.hour()) + ":" + String(now.minute()) + ":"
+ String(now.second());
    dataString += ";";
    dataString += String(busVoltage);
    dataString += ";";
    dataString += String(current_A);
    dataString += ";";
    dataString += String(power_W);
    dataString += ";";
    dataString += String(rpm);
    dataString += ";";
    dataString += String(windSpeed);

    // <-- CAMBIO: Optimizamos el guardado en SD
    if (dataFile) {
        dataFile.println(dataString);
        dataFile.flush(); // Mucho más rápido que .close()
    }

    // Actualizar el tiempo del último registro
    lastLogTime += LOG_INTERVAL;
}
}

```

Anexo 11

Corte de la plancha lisa galvanizada



Anexo 12

Colocación de los alabes en el eje de la turbina



Anexo 13

Fabricación de la base de la turbina



Anexo 14

Instalación final del prototipo



Anexo 15

Reunión con los representantes del centro vulcanológico

