



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO

IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ENERGÍA EÓLICA DE
2.3KW PARA EL ABASTECIMIENTO ENERGÉTICO EN UN ENTORNO
REAL EN LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO

Autores:

**Pinos Zamora Helen Dayanara
Burgos León Cristopher Fabricio**

Tutor: Jinez Tapia José Luis, Mgs.

Riobamba, Ecuador

2026



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE TELECOMUNICACIONES

**TRABAJO DE TITULACIÓN - MODALIDAD TRABAJO DE
INVESTIGACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:**

INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES

TÍTULO:

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ENERGÍA EÓLICA DE 2.3KW PARA
EL ABASTECIMIENTO ENERGÉTICO EN UN ENTORNO REAL EN LA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO**

AUTORES:

Pinos Zamora Helen Dayanara

Burgos León Cristopher Fabricio

TUTOR:

Jinez Tapia José Luis, Mgs.

Riobamba, Ecuador

2026

© DECLARATORIA DE AUTORÍA

Nosotros, Helen Dayanara Pinos Zamora y Cristopher Fabricio Burgos León, con cédula de identidad 1600701021 y 0604796433, autores del trabajo de titulación: Implementación de un sistema de energía eólica de 2.3KW para el abastecimiento energético en un entorno real en la Universidad Nacional de Chimborazo, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de nuestra exclusiva responsabilidad.

Asimismo, cedo a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma no exclusiva, los derechos para su uso, comunicación pública, distribución, divulgación y/o reproducción total o parcial, por medio físico o digital; en esta cesión se entiende que el cesionario no podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto de los derechos de autor de la obra referida será de nuestra entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, 07 de agosto de 2026.



Pinos Zamora Helen Dayanara

C.I: 1600701021



Burgos León Cristopher Fabricio

C.I: 0604796433

DECLARATORIA SOBRE EL USO DE HERRAMIENTAS DE IA

Nosotros, Helen Dayanara Pinos Zamora y Cristopher Fabricio Burgos León, con cedula de identidad 1600701021 y 0604796433, autores del presente trabajo de titulación, declaro que el uso de herramientas de inteligencia artificial en la elaboración del presente trabajo de titulación se limitó exclusivamente al apoyo en la organización de ideas y a la mejora de la redacción y claridad expositiva, en los apartados de introducción, marco teórico y marco metodológico, sin implicar la generación autónoma de contenidos académicos, análisis, resultados, conclusiones ni aportes propios del proceso investigativo.

Asimismo, dejo constancia de que las decisiones académicas, el desarrollo conceptual, el enfoque metodológico, el análisis de fuentes y la interpretación de resultados son de nuestra exclusiva responsabilidad.

Finalmente, declaro que el uso de dichas herramientas no sustituyó mi criterio académico, ni vulneró las disposiciones institucionales sobre plagio, propiedad intelectual y autoría, manteniéndose el cumplimiento de las normas de citación y referenciación, con el fin de garantizar la transparencia académica y el uso ético y responsable de tecnologías emergentes en la elaboración del trabajo de titulación.

En Riobamba, 07 de agosto de 2026.



Pinos Zamora Helen Dayanara

C.I: 1600701021



Burgos León Cristopher Fabricio

C.I: 0604796433

DEDICATORIA

Dedicatoria de Helen Dayanara Pinos Zamora

A Dios, en primer lugar, por ser la luz en mis horas más oscuras, la fortaleza cuando sentía desfallecer y por bendecirme con la vida, la salud y el entendimiento para ver culminado este gran anhelo.

A mi amada madre, María del Carmen Troncozo, porque en tus ojos siempre encontré la fe que a mí me faltaba. Eres la bendición más grande que el cielo me pudo conceder; cada velada, cada oración tuya y cada uno de tus sacrificios están impresos en este título. Todo lo que soy y lo que he logrado te lo debo a ti.

A mi hijo, William Santiago Arguello Pinos, el motor de mi alma y el amor más puro de mi existencia. Llegaste a mi vida para darle un propósito sagrado a cada uno de mis días. Eres mi mayor refugio, la fuerza que me impulsa a vencer cualquier reto y la razón por la que hoy me pongo de pie con orgullo para demostrarte que con amor y esfuerzo los sueños se alcanzan.

A mi compañero de vida, William Jefferson Arguello Mora, por ser mi apoyo incondicional. A pesar de los momentos difíciles y las pruebas del camino; gracias por tu paciencia, por comprender mis desvelos y por ser ese refugio constante que me sostuvo en esta etapa.

A mi tía, Raquel Elizabeth Zamora Troncozo, por haber sido esa mano providencial y la intermediaria clave en el momento exacto para que este sueño comenzara a construirse.

Al resto de mi familia, por su respaldo constante, sus palabras de aliento y por formar la red de amor que me acompañó a lo largo de este trayecto.

A mis ingenieros y docentes, por poner su conocimiento al servicio de nuestra formación, guiándonos con enorme paciencia, apertura y rigor técnico en cada etapa de esta investigación.

A mi gata Becky, mi silenciosa e inolvidable compañera de los primeros semestres; tu compañía en aquellas madrugadas de estudio me dio una serenidad que guardaré para siempre en el corazón.

Y como olvidar, a mis amigos de la carrera, quienes se convirtieron en verdaderos hermanos de vida. Gracias por estar siempre presentes con su apoyo incondicional, por llenar los vacíos de conocimiento compartiendo sus ideas y sabiduría desde el primer momento, por soñar juntos y por transformar las largas jornadas de esfuerzo en risas y recuerdos inolvidables.

DEDICATORIA

Dedicatoria Cristopher Fabricio Burgos León

Con profunda gratitud y humildad, dedico este trabajo, en primer lugar, a Dios por haber sido mi guía, mi fortaleza y mi refugio durante toda mi vida universitaria. Hubo momentos en los que las dificultades parecían insuperables y sentía que solo con tu ayuda podría continuar.

Con inmenso amor y profunda gratitud, dedico este trabajo a mis padres, Víctor y Sandra, quienes han sido el pilar fundamental de mi vida. Gracias por cada sacrificio realizado, por su esfuerzo incansable y por brindarme siempre el apoyo necesario para alcanzar esta meta. Sin su amor, confianza y dedicación habría sido imposible culminar mis estudios. Ustedes fueron el motor que me impulsó a seguir adelante en cada paso de mi carrera, especialmente en los momentos más difíciles, recordándome siempre que con perseverancia y esfuerzo todo es posible. Este logro también les pertenece, porque sin ustedes hoy no estaría donde estoy.

A mi hermano Alexander, por su comprensión, paciencia y apoyo durante todos estos años. Gracias por entender que, en muchas ocasiones, mis padres y yo tuvimos que priorizar mi formación profesional. Su cariño y respaldo fueron un incentivo para alcanzar esta meta.

A mi abuelita María y a mis tíos Jaime y David, quienes siempre estuvieron pendientes de mi bienestar y de mi desempeño académico. Gracias por sus consejos, su preocupación constante y por brindarme toda la ayuda que estuvo a su alcance. Su apoyo fue fundamental para que pudiera concluir con éxito esta etapa tan importante de mi vida.

A mi mejor amiga, Valeria, quien estuvo presente durante los momentos más difíciles de mi carrera. Gracias por acompañarme en las largas madrugadas de estudio, por escucharme cuando el cansancio y la presión parecían vencerme. Tu apoyo incondicional, tus palabras de aliento y tu compañía hicieron mucho más llevadero este camino, y siempre ocuparán un lugar especial en este logro.

También dedico este logro a todos los amigos que me acompañaron a lo largo de la carrera universitaria, por compartir experiencias, aprendizajes y momentos inolvidables. En especial, a mi primer amigo de la universidad, Jimmy, con quien recorrí gran parte de este camino, apoyándonos mutuamente para superar los desafíos académicos y alcanzar juntos nuestras metas.

Finalmente, agradezco a mis amigos del colegio, quienes siempre estuvieron presentes cuando necesitaba despejar mi mente de las responsabilidades universitarias. Su amistad, compañía y apoyo hicieron que este recorrido fuera más llevadero y me recordaron la importancia de mantener un equilibrio entre el esfuerzo y los momentos compartidos con las personas que apreciamos.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, expresamos nuestro más grande y profundo agradecimiento a Dios, por ser nuestra guía, darnos la fortaleza en cada etapa de este camino y concedernos la sabiduría necesaria para culminar con éxito esta meta.

A la Universidad Nacional de Chimborazo, por brindarnos el espacio, las herramientas y la formación académica necesarias para consolidar este proyecto de investigación.

A nuestros docentes y tutores, por su valiosa guía, paciencia y criterio técnico a lo largo de este proceso. Asimismo, Washington por ser el mejor amigo y colega, extendemos un reconocimiento especial a nuestras familias, compañeros y a todas las personas que, de manera directa o indirecta, aportaron con su apoyo, conocimientos e incentivo constante para la culminación exitosa de esta etapa universitaria.

Helen Pinos & Cristopher Burgos

INDICE

RESUMEN	10
ABSTRACT	11
INTRODUCCIÓN	12
OBJETIVOS	14
General.....	14
Específicos.....	14
MARCO REFERENCIAL	15
Marco teórico.....	15
Energía Eólica.....	15
Turbinas eólicas.....	17
Partes de una turbina eólica.	19
Parámetros de operación.....	19
Marco conceptual	22
Contexto Energético y Sostenibilidad	22
Fundamentos de la Energía Eólica	22
Fundamentación matemática de Potencia Eólica	23
Aerogeneradores	23
Componentes del Sistema Eólico	24
Parámetros de Operación.....	25
Antecedentes.....	26
METODOLOGÍA.....	28
Operación de Variables	28
Procedimiento	29
Fase 1: Recolección de Datos.....	31
Fase 2: Selección y definición	33
Prototipo 1 (Darrieus):.....	34
Prototipo 2 (Savonius):.....	36
Prototipo 3 (H-rotor).....	37
Selección del Aerogenerador Óptimo.....	47
Fase 3: Instalación del sistema	56
Fase 4: Evaluación del Desempeño	61

RESULTADOS Y DISCUSION	63
Análisis de resultados meteorológicos	63
Prototipo 1	66
Prototipo 2	67
Prototipo 3	67
Análisis de resultados finales	70
Discusión	77
CONCLUSIONES.....	79
RECOMENDACIONES	80
BIBLIOGRAFÍA	81
ANEXOS	85

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo diseñar, optimizar, instalar y evaluar un sistema de energía eólica de 2.3kW en el Campus Norte de la Universidad Nacional de Chimborazo para determinar su viabilidad técnica y su capacidad de contribuir al abastecimiento energético institucional frente a la intermitencia del suministro convencional. La metodología aplicada posee un enfoque cuantitativo y un diseño experimental, estructurado en cuatro fases secuenciales: el análisis de los datos meteorológicos locales mediante un sistema de adquisición basado en ESP32; la simulación computacional con software especializado (Autodesk inventor, Fusion 360 y ANSYS) y ensayos físicos en túnel de viento de tres tipologías de aerogeneradores de eje vertical (Darrieus, Savonius y H-rotor); el dimensionamiento óptimo de los componentes de regulación y almacenamiento; y el monitoreo del desempeño in situ en el Domo del Proyecto El Arte como Configurador Formal. Los resultados experimentales derivaron en el descarte de los modelos convencionales y justificaron el desarrollo de un Rotor Híbrido definitivo que fusiona la aerodinámica de sustentación perimetral con álabes curvos de paso continuo, incrementando la eficiencia global en un 34% frente a los prototipos estándar y reduciendo la velocidad de arranque mecánico a solo 1.4 m/s. Durante la fase de evaluación en entorno real, se procesaron 18481 muestras continuas, donde el rotor alcanzó una velocidad tangencial máxima de 14.69 m/s, un voltaje máximo de 18.55 V y una potencia neta de 12.72 E ante ráfagas de viento. El análisis estadístico de regresión cuadrática ($R^2 = 1$) determinó que la velocidad tangencial explica prácticamente el 100% de la variabilidad de la potencia generada, confirmando así la relación no lineal entre ambas variables. El tren de potencia eléctrica, integrado por un controlador inteligente MPPT y un inversor de onda senoidal pura, adaptó eficientemente la corriente para alimentar las cargas del domo de manera segura. Se concluyó que, si bien la escasez e intermitencia del recurso eólico local alarga los ciclos de carga del almacenamiento, el banco de baterías configurado en 48 V constituye una reserva sólida y factible que actúa de forma impecable como un sistema de respaldo autónomo ante cortes de la red comercial.

Palabras claves: Energía eólica, Aerogenerador eje vertical, Rotor, Eficiencia, Almacenamiento eléctrico, Viabilidad. (6 palabras clave)

ABSTRACT

This research aimed to design, optimize, install, and evaluate a 2.3 kW wind energy system at the North Campus of the Universidad Nacional de Chimborazo in order to determine its technical feasibility and its potential contribution to the institutional energy supply during interruptions of the conventional power grid. The study adopted a quantitative approach and an experimental design structured into four sequential phases: analysis of local meteorological data using an ESP32-based data acquisition system; computational simulation using specialized software (Autodesk Inventor, Fusion 360, and ANSYS), complemented by physical wind-tunnel testing of three vertical-axis wind turbine configurations (Darrieus, Savonius, and H-rotor); optimal sizing of the regulation and energy-storage components; and in situ performance monitoring at the Dome of the Art as a Formal Configurator Project. The experimental results led to the rejection of the conventional configurations and supported the development of a hybrid rotor combining perimeter lift aerodynamics with continuously curved-pitch blades. This configuration increased overall efficiency by 34% compared with the standard prototypes and reduced the mechanical start-up wind speed to 1.4 m/s. During the evaluation under real operating conditions, 18,481 continuous samples were processed. The rotor reached a maximum tangential speed of 14.69 m/s, a maximum voltage of 18.55 V, and a maximum net power output of 12.72 W during wind gusts. Quadratic regression analysis ($R^2 = 1$) showed that tangential speed accounted for virtually 100% of the variability in generated power, confirming the nonlinear relationship between these variables. The electrical power conversion system, comprising an intelligent maximum power point tracking (MPPT) controller and a pure sine-wave inverter, effectively conditioned the electrical output to safely supply the dome loads. The findings indicate that, although the limited and intermittent local wind resource extends the charging time of the energy-storage system, the 48 V battery bank provides a technically feasible energy reserve and can operate as an autonomous backup system during utility-grid outages.

Keywords: Wind energy, Vertical axis wind turbine, Hybrid rotor, Energy efficiency, Electrochemical storage, technical feasibility. (6 keywords)



Reviewed by:
MsC. Edison Damian Escudero
ENGLISH PROFESSOR
C.C.0601890593

INTRODUCCIÓN

La energía eléctrica se constituye como uno de los principales recursos para el desarrollo de las actividades académicas, administrativas e industriales de la sociedad moderna [1]. En las últimas décadas, el aumento de los consumos energéticos y la búsqueda de disminuir el impacto ambiental han orientado la búsqueda de fuentes renovables que garanticen un suministro sostenible, seguro y eficiente [2]. Durante el año 2024, Ecuador sufrió una importante crisis energética a causa de una sequía que se relacionó con el fenómeno de El Niño y que, como consecuencia, redujo los niveles de agua correspondientes a los embalses hidroeléctricos [3]. Esta situación evidenció la alta dependencia del país de esta fuente de generación y puso de manifiesto la urgencia de diversificar la matriz energética con tecnologías complementarias como la eólica y la solar [4] [5]. Dicha problemática afectó directamente a instituciones de educación superior como la Universidad Nacional de Chimborazo, cuya operación depende mayormente de la red eléctrica convencional, lo que motivó la necesidad de explorar alternativas que permitan alcanzar mayores niveles de autosuficiencia energética en sus instalaciones [6].

En este contexto, el presente estudio se orienta, en primer lugar, a la recolección y análisis de datos meteorológicos locales que permitan caracterizar con precisión el recurso eólico disponible en el Campus Norte. La evaluación de la variable velocidad tangencial resulta fundamental para determinar el potencial energético real del emplazamiento y establecer si las condiciones ambientales son suficientes para sustentar un sistema de generación propio, constituyendo el primer paso para responder a la pregunta de viabilidad que guía esta investigación [7].

A partir de los datos recolectados, se procedió al análisis comparativo de tres tipologías de aerogeneradores de eje vertical (Darrieus, Savonius y H-rotor), [4] mediante simulaciones computacionales y ensayos en túnel de viento, con el fin de seleccionar la configuración óptima que maximice la captación energética en condiciones de viento variable. Posteriormente, se definieron los componentes de conversión, regulación y almacenamiento de energía, dimensionando el sistema para garantizar su operación eficiente y su integración con la infraestructura eléctrica existente en el domo del Proyecto El Arte como Configurador Formal.

Por tanto, el presente trabajo se desarrollará en cuatro fases secuenciales, donde se comprende la recolección de datos meteorológicos locales para caracterizar el recurso eólico disponible en el Campus Norte; El análisis de prototipos de aerogeneradores, la selección del óptimo y definición de los componentes de conversión y almacenamiento de energía; La instalación física del sistema eólico en el Domo del Proyecto El Arte como Configurador Formal para la comprobación de su funcionamiento; y La evaluación del desempeño del sistema mediante el monitoreo de generación y estabilidad. De esta manera, el estudio constituye, en esencia, un análisis de viabilidad técnica orientado a determinar la autosuficiencia energética mediante el aprovechamiento exclusivo del

recurso eólico local, sentando así un precedente valioso para futuras iniciativas de generación eólica en la Universidad Nacional de Chimborazo.

OBJETIVOS

General

- Implementar un sistema de energía eólica de 2.3kw para el abastecimiento energético en un entorno real en la Universidad Nacional de Chimborazo.

Específicos

- Recolectar datos para el diseño de un sistema de generación eólica de 2.3kw, teniendo en cuenta las condiciones climáticas del campus norte de la universidad.
- Analizar prototipos de aerogeneradores, selección del óptimo, definición de componentes de conversión y almacenamiento de energía.
- Instalar el sistema eólico en el Domo del Proyecto El Arte como Configurador Formal, para la comprobación de funcionamiento.
- Evaluar el desempeño del sistema eólico, mediante el monitoreo de generación y estabilidad.

MARCO REFERENCIAL

Marco teórico

Energía Eólica

La energía eólica es una forma de energía cinética ocasionada por el movimiento de aire en la atmosfera. Se favorece mediante turbinas eólicas que convierten la energía mecánica del viento en energía eléctrica [8]. Su origen está vinculado a los gradientes de presión atmosférica, influenciados por factores como el calentamiento solar desigual, el efecto Coriolis y las características geográficas locales [9]. Es una fuente de energía renovable, limpia y sustentable que depende de las ecuaciones climáticas y la topografía del entorno.[9]

- **El viento**

Las gradientes de presión atmosférica son responsables del movimiento del aire, el cual fluye desde áreas de alta presión hacia zonas de menos presión [9].

Tres factores clave que alteran el comportamiento del viento; el primer factor son las gradientes térmicos y de presión que resultan del calentamiento desigual de la superficie terrestre por la radiación solar, generando diferencias significativas entre regiones polares y ecuatoriales, el segundo factor es el efecto Coriolis que es producto de la rotación terrestre, influye en la velocidad y dirección del viento, y el tercer factor es la geografía local que incluye la topología, el tipo de terreno y el clima modulan la intensidad y estabilidad del viento [10].

Asimismo, se destacan parámetros críticos del viento que deben considerarse para optimizar su aprovechamiento en la generación de energía.

Potencia del viento: se define como la energía cinética que se puede extraer del aire en movimiento.

$$Ec = \frac{1}{2}mV_0^2 \quad (1)$$

Donde:

Ec: Energía cinética del viento.

m: Masa del aire.

V₀: Velocidad de aire.

Al derivar energía cinética respecto al tiempo se obtiene la expresión de la potencia disponible en el viento.

$$P_w = \frac{dEc}{dt} = \frac{1}{2} \dot{m} V_0^2 \quad (2)$$

Donde:

P_w: Potencia disponible en el viento.

E_c: Energía cinética del viento.

$\dot{m}$: Flujo másico del aire.

V₀: Velocidad del aire.

El flujo másico de aire del cual se puede obtener la energía eléctrica se expresa así:

$$\dot{m} = \rho A_b V_0 \quad (3)$$

Donde:

$\dot{m}$: Flujo másico del aire.

ρ : Densidad

A_b: Área de barrido.

V₀: Velocidad del aire.

Al remplazar la ecuación 3 en la ecuación 2 se obtiene la expresión definitiva de la potencia disponible en el viento.

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A_b V_0^3 \quad (4)$$

Donde:

P_w: Potencia disponible en el viento.

ρ : Densidad.

A_b: Área de barrido.

V₀: Velocidad del aire.

El área de barrido de la pala es el área total que cubre las palas de la turbina eólica.

Para las turbinas eólicas de eje vertical (VAWT) la expresión es la siguiente:

$$A_b = DH \quad (5)$$

A_b: Área de barrido.

D: Diámetro del rotor.

H: Altura del rotor.

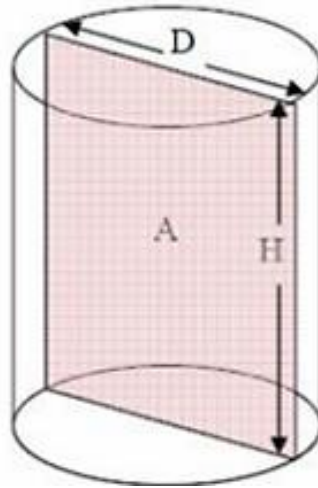


Figura 1. Área de barrido turbina eólica de eje vertical [11].

Turbinas eólicas

Las turbinas eólicas transforman la energía cinética del viento en energía mecánica, que posteriormente se convierte en energía eléctrica mediante sistemas integrados [12]. Estos aparatos tienen la posibilidad de clasificarse a partir de diversos criterios.

- **Potencia**

Las turbinas eólicas se dividen en tres categorías principales. Kreus en su libro "Wind Turbines" [12] afirma que las turbinas de baja potencia con una potencia máxima de 100 KW se utilizan principalmente para bombear agua y suministrar electricidad a casas o granjas ubicadas en zonas desconectadas [13]. Las turbinas de media potencia, que oscilan entre 100 KW y 1000KW, se utilizan para proveer energía a pequeñas comunidades, islas o granjas que están aisladas de la red eléctrica nacional. Por último, las turbinas de alta potencia, que superan los 1000 KW, se destinan a la generación de energía para las redes nacionales interconectadas. Cabe destacar que el presente proyecto se enfoca en las turbinas de baja potencia [14].

Eje

- **Horizontal**

Se utilizan sobre todo para la producción de energía eólica porque su rotor se adapta al flujo del viento, lo que garantiza una alta eficiencia. Esta categoría se divide en dos configuraciones: aerogeneradores con rotor eólico, que son aquellos en los que el viento incide sobre las palas directamente desde el frente; y turbinas de rotor de sotavento, que son aquellas donde el viento fluye por la parte trasera del rotor.

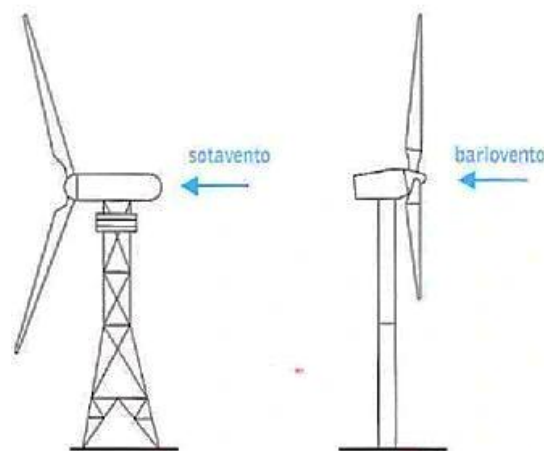


Figura 2. Turbinas eólicas de eje horizontal [15].

- **Vertical**

El rotor está orientado verticalmente con respecto al suelo, lo que les facilita la captación del viento procedente de cualquier dirección. Estas turbinas, como las de eje horizontal, se dividen en tres categorías o tipos principales. [16].

Esta característica las hace especialmente adecuadas para instalaciones en zonas urbanas, ya que requieren un espacio reducido para su montaje [17]. Se pueden distinguir tres tipos principales de esta clase de turbinas. En primer lugar, Savonius destaca por su bajo costo y su capacidad para operar a bajas velocidades de viento, aunque su eficiencia es limitada. En segundo lugar, el rotor Darrieus, compuesto por palas curvas únicas en sus extremos, se caracteriza por alcanzar altas velocidades, pero necesita un mecanismo de arranque debido a su elevado torque inicial [18].

Finalmente, el H-Rotor, que es la variante más utilizada, cuenta con palas rectas dispuestas alrededor del eje y ajusta al ángulo de arranque de las palas conforme gira el rotor, lo que permite maximizar el aprovechamiento del viento y alcanzar una mayor eficiencia que las otras configuraciones[18].

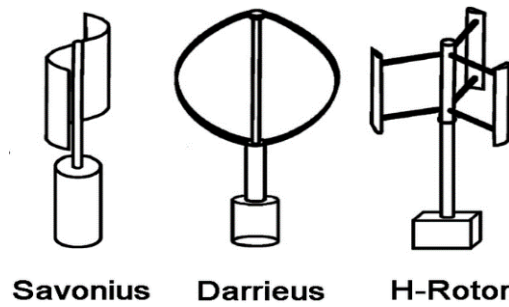


Figura 3. Turbinas eólicas de eje vertical [19].

Partes de una turbina eólica.

Todo tipo de aerogeneradores, ya sean de eje vertical u horizontal, cuentan con componentes esenciales que los hacen funcionar. Algunos de los componentes más relevantes se detallan a continuación [20]:

Palas: Son imprescindibles en un aerogenerador porque su función es recoger la energía cinética del viento y convertirla en energía mecánica [21]. La eficiencia de este proceso depende de varios factores, como el ángulo de cabeceo, el perfil aerodinámico, los materiales utilizados y la configuración interna de las palas, que afectan directamente a la cantidad de energía producida [22].

Rotor: es la agrupación constituida por las palas y la unión de estas al eje principal. El diámetro del rotor, o su tamaño, define el área de barrido de la turbina y determina así cuántos vientos pueden ser utilizados para generar energía [23].

Generador: Es el dispositivo encargado de convertir la energía mecánica transmitida a través del eje en energía eléctrica [24]. Dependiendo del diseño y potencia de la turbina, el generador puede conectarse directamente al eje principal o mediante una caja de cambios que aumenta la velocidad de rotación del eje para optimizar la producción de electricidad [21].

Torre: Es la estructura de soporte que alberga todos los componentes del aerogenerador. Su diseño y altura son fundamentales para maximizar la captación del viento. Esto se debe a que, a mayor altitud, se encuentran corrientes de aire más estables y rápidas, lo cual incrementa el rendimiento total del sistema [25].

Parámetros de operación.

Coefficiente de potencia. La relación entre la potencia mecánica generada por la turbina y la potencia que se puede extraer del viento que pasa por el rotor se expresa como:

$$C_p = \frac{P_m}{P_w} = \frac{P_m}{\frac{1}{2} \rho A_b V_0^3} \quad (6)$$

Donde:

P_m: Potencia mecánica producida por la turbina eólica

P_w: Potencia del viento.

ρ : Densidad.

A_b: Área de barrido

V₀: Velocidad del aire.

Relación de velocidad tangencial (TSR). Es la correlación entre la velocidad del viento y la velocidad de las puntas de las aspas.

$$\lambda = \frac{\omega}{V_0} \quad (7)$$

Donde:

λ: Relación de velocidad tangencial

ω: Velocidad Angular.

R: Radio del rotor.

V₀: Velocidad del viento.

Coefficiente de empuje. Es la relación entre las fuerzas dinámicas que reciben y la fuerza de empuje a la que están expuestas las palas.

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho A_b V_0^2} \quad (8)$$

Donde:

C_T: Coeficiente de empuje.

T: Empuje.

ρ: Densidad.

A_b: Área de barrido

V₀: Velocidad del aire.

Relación de aspecto. Es la relación entre la altura y el radio del rotor.

$$AR = \frac{H}{R} \quad (9)$$

Donde:

AR: Relación de aspecto.

H: Altura del rotor.

R: Radio del rotor.

Solidez del rotor. Este parámetro se expresa de la siguiente manera y permite medir la resistencia de un aerogenerador de eje vertical a la presión del viento.

$$\sigma = \frac{Nc}{2R} \quad (10)$$

Donde:

σ : Solidez del rotor.

N: Número de palas.

c: Longitud de cuerda.

R: Radio del rotor.

Marco conceptual

Contexto Energético y Sostenibilidad

- **Matriz Energética**

La matriz energética es la combinación de distintas fuentes de energía (como el agua, el petróleo, el sol o el viento) que un país utiliza para cubrir sus necesidades de luz, transporte e industria. En el caso de Ecuador, esta combinación ha dependido históricamente en gran medida de las centrales hidroeléctricas. Cuando la matriz energética se concentra en un solo tipo de fuente, el sistema se vuelve frágil ante cambios climáticos inesperados [26].

- **Crisis Hídrica y Estiaje**

El estiaje es un periodo durante el cual los caudales de los ríos disminuyen de forma drástica como consecuencia de la ausencia de lluvias prolongada. En un país muy dependiente del agua para la producción de electricidad, el estiaje genera un déficit en la producción de energía, lo que se traduce en apagones programados e inestabilidad de la oferta del servicio eléctrico comercial. Eso hace necesario buscar soluciones de generación locales y distribuidas [3].

- **Autonomía y Autosuficiencia Energética**

La autonomía energética es la capacidad que tiene una institución u oficina, como el Domo del Proyecto el Arte como Configurador Formal en la UNACH, para producir su propia electricidad sin depender exclusivamente de la red eléctrica externa o convencional. Esto se logra instalando sistemas de generación propios en el mismo lugar donde se consume la energía, actuando como un escudo ante apagones en la red pública [4].

Fundamentos de la Energía Eólica

Energía Cinética del Viento

La energía eólica es una forma de energía cinética que poseen las masas de aire debido a su movimiento. El aire tiene peso y, al moverse a una determinada velocidad, acumula una fuerza que puede aprovecharse para empujar objetos, como las palas de un molino o aerogenerador.

Factores que Originan el Viento

El viento no se comporta igual en todas partes. Su velocidad y constancia dependen de tres elementos fundamentales:

- **Gradientes térmicos y de presión:** El sol calienta la Tierra de forma desigual. El aire caliente asciende al ser mucho más ligero y el aire frío desciende, ocupando el sitio del aire caliente, de ahí se generan corrientes de aire.
- **Efecto Coriolis:** Fuerza generada por el giro de la Tierra, que hace desviar las masas de aire y define la dirección en que soplará el aire.
- **Geografía y topografía local:** Las montañas, los edificios, los árboles y la altitud de un lugar. Filtran, bloquean o aumentando la velocidad del viento en puntos determinados.

Fundamentación matemática de Potencia Eólica

Con el objetivo de comprender la cantidad de energía que se es capaz de obtener del viento, se hacen uso de principios matemáticos elementales en los que se relacionan el aire y las dimensiones del espacio físico disponible:

- **Flujo másico ($\dot{m}$):** Representa la cantidad de masa de aire que atraviesa el área de captación de las palas en un tiempo de un segundo.
- **Área de barrido (A_b):** Espacio que van dibujando las palas del aerogenerador al girar. Cuanto mayor es el espacio que las palas contemplan, mayor es la cantidad de viento que podrá captar el sistema.
- **Potencia disponible en el viento (P_w):** Es la cantidad total de energía teórica que está transportando el viento y cuyo cálculo matemático está definido por la ecuación:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A_b V_0^3 \quad (11)$$

Donde ρ es la densidad del aire local, A_b es el área de barrido y V_0 es la velocidad del viento. Lo más importante de esta relación es que la potencia crece al cubo de la velocidad; esto significa que, si la velocidad del viento se duplica, la energía disponible se multiplica por ocho, haciendo que la velocidad sea el factor más crítico del análisis [10].

Aerogeneradores

Definición de Aerogenerador

Una turbina eólica es un dispositivo diseñado para convertir la energía eólica en electricidad utilizable. Hace el proceso opuesto al de un ventilador de casa. Es decir, en lugar de consumir electricidad para hacer viento utiliza el viento para hacer electricidad.

Clasificación por Potencia

Los sistemas eólicos se clasifican de acuerdo con la máxima energía que son capaces de generar:

- **Baja potencia:** Equipos que generan menos de 100kW. Son ideales para viviendas, fincas aisladas o entornos universitarios urbanos, como el sistema de 2.3kW planteado en esta investigación.
- **Media potencia:** Equipos entre 100kW y 1000kW, diseñados para pequeñas comunidades o industrias medianas.
- **Alta potencia:** Equipos que superan los 1000kW (1MW) y que forman los grandes parques eólicos comerciales conectados a la red del país.

Clasificación por la Disposición de su Eje

Los aerogeneradores se diferencian radicalmente por la orientación de su eje de rotación con respecto al suelo:

- **Eje Horizontal (HAWT):** Tienen la forma tradicional de ser un molino de viento. Su rotor es dispuesto en posición frente al viento para conseguir una gran recogida; puede ser de barlovento (el viento da primero a las palas antes de llegar a la torre de soporte) o de sotavento (el viento pasa primero por la estructura y posteriormente mueve las palas).
- **Eje Vertical (VAWT):** Las palas se muestran dispuestas perpendicularmente al suelo (como un carrusel o un batidor de mano), su principal ventaja en áreas urbanas y en entornos universitarios consiste en que pueden captar el viento desde cualquier dirección, sin que sea necesario girar la estructura completa, ya que ocupan menos espacio y también resisten vientos inestables y turbulentos; entre dicho tipo encontramos el tipo Savonius (es de las más económicas, puesto que arranca incluso con poco viento, pero su eficiencia es inferior), y el tipo Darrieus o Rotor H (posee mayores velocidades de rotación y optimiza mejor el recurso).

Componentes del Sistema Eólico

Para que un sistema de 2.3 kW pueda abastecer de forma estable a una oficina administrativa se requiere integrar de manera coordinada lo que vamos a comentar a continuación:

- **Palas u Álabes:** Son los perfiles aerodinámicos que se encargan de recibir directamente la fuerza de empuje del viento. La manera que han sido diseñados geoméricamente, su longitud y los materiales que los componen delimitarán qué tanto se aprovechan las brisas de la zona.

- **Rotor:** Es la parte esencial rotante que conecta las palas y el eje de transmisión. Obtiene el movimiento circular provocado por el viento y lo convierte en movimiento mecánico en el interior de la máquina.
- **Generador Eléctrico:** Es el núcleo técnico del sistema; transforma la energía mecánica en corriente eléctrica. En los sistemas pequeños, por regla general, se acopla para evitar pérdidas por la fricción.
- **Torre de Soporte:** Sube el aerogenerador a la altura necesaria; a las capas más bajas de la atmósfera, el rozamiento con el suelo y los edificios detiene el viento; a mayor altura de la torre, la velocidad se encuentra más aumentada, más limpia y se concibe como la más constante.
- **Controlador de Carga (MPPT):** Es un aparato electrónico avanzado que ajusta la tensión y la corriente que proviene del generador, previene sobrecargas, y hace que las baterías tengan el suministro energético correcto y en condiciones óptimas.
- **Sistema de Almacenamiento (Baterías):** Conjunto de celdas alimentadas eléctricamente a través de un ciclo electroquímico que permite almacenar la energía obtenida en horas de buen viento, garantizando así el suministro eléctrico de la oficina administrativa en momentos de calma en el viento.
- **Inversor de Corriente:** Convierte la energía eléctrica almacenada en las baterías (corriente continua) en electricidad estándar igual a la de la red pública (corriente alterna), permitiendo el arranque de computadoras, lámparas y equipos de oficina sin llegar a estropearles.

Parámetros de Operación

- **Coefficiente de potencia (C_p):** Es un porcentaje que indica cuánta de la energía total disponible en el viento es realmente convertida en energía útil por la máquina. Existe un límite físico insuperable llamado "Límite de Betz", el cual dicta que ningún aerogenerador puede capturar más del 59.3% de la energía del viento.
- **Relación de velocidad tangencial:** Es una comparación entre la velocidad a la que gira la punta de la pala del aerogenerador y la velocidad real con la que sopla el viento en ese instante. Si gira muy lento, el viento pasa de largo sin entregar su energía; si gira demasiado rápido, las palas actúan como una pared sólida que frena el viento.
- **Calidad y Estabilidad de la Energía:** Se refiere a la constancia en el voltaje y la corriente entregados a la oficina. Dado que el viento es variable, el sistema debe ser capaz de filtrar fluctuaciones para no quemar los equipos conectados.

Antecedentes

El objetivo de la investigación que analizaba la interacción suelo-estructura de una cimentación superficial de un aerogenerador en una serie de suelos de tipo D (NEC) [27]. El principal objetivo del estudio fue la obtención en la cimentación superficial de torres eólicas de un procedimiento de diseño geotécnico, para lo que se realizó un análisis comparativo de las propiedades del suelo procedentes de los informes de laboratorio y de las correlaciones obtenidas de las ecuaciones analíticas de la base del número de golpes SPT. Mediante un modelo simplificado de la torre se determinaron las cargas que soporta la estructura (cargas verticales, cargas horizontales y el momento flector debido a la presión del viento). Se realizó el diseño de la cimentación para minimizar el riesgo de distintas fallas en la estructura (volcamiento, deslizamiento o asentamiento), variando el diámetro de la cimentación en función de los resultados obtenidos. Se modelaron utilizando el programa SAP2000 distintos coeficientes de balasto propuestos por distintos autores aplicando un método iterativo que simula el comportamiento del estrato de suelo. Se obtuvieron los asentamientos que se producen, así como la distribución de presiones que la estructura transmite al suelo, de manera que se compararon estos resultados con los obtenidos de los distintos modelos y, por tanto, se optimizó el diseño y se obtuvo la garantía de la estabilidad y la capacidad de carga de la cimentación.

En otro estudio titulado Energías Renovables y Crecimiento Económico en Ecuador [28]. Los resultados obtenidos entre 1990 y 2020 muestran que la mayor fuente de consumo de energía en el país proviene de los combustibles fósiles, cuya principal fuente de energía es el petróleo, y que la participación de los recursos energéticos renovables en el crecimiento económico del país es muy limitada e insignificante. En este sentido, el objetivo del estudio en mención fue determinar si existe relación entre el consumo de energía renovable y el crecimiento económico en el Ecuador, para ello se utiliza el modelo de rezago distribuido autorregresivo (ARDL) para explicar la relación entre las variables en el corto y largo plazo. El PIB per cápita se consideró como variable dependiente y el consumo de energía renovable como variable independiente, y las variables de control fueron la formación bruta de capital fijo y la apertura comercial [29]. Los resultados obtenidos muestran que las variables exógenas y endógenas están co-integradas, y el modelo de corrección de errores (ecm) muestra un coeficiente negativo y significativo, lo que indica que las desviaciones de corto plazo de las variables de largo plazo se corrigen en un 36,78% para cada período.

El análisis exhaustivo de la literatura consultada nos ha permitido detectar notables avances en aspectos concretos, y relacionados entre sí, del diseño geotécnico de cimentaciones para torres eólicas, así como del impacto de las energías renovables en el crecimiento económico. Las investigaciones que se revisan, como la cimentación superficial de aerogeneradores, resalta el hecho de que para optimizar el diseño y garantizar la estabilidad estructural se avanza en el uso en la aplicación de modelos analíticos y de métodos iterativos, por un lado; en el sector energético la investigación sobre las energías renovables en Ecuador hace hincapié en que el país se debe ir hacia

una transición de fuentes de energías renovables y evidencia, por otro lado, la sintonía que puede establecerse entre el consumo de energías renovables y el crecimiento económico en largo plazo.

METODOLOGÍA

Esta investigación adopta un enfoque cuantitativo, debido a que se basa en la recolección y el análisis de datos numéricos y medibles. Para verificar si el sistema eólico es viable y eficiente, no se trabaja con suposiciones, sino con mediciones exactas expresadas en números, tales como la velocidad del viento en metros por segundo y la cantidad de energía producida en kilovatios. Estos datos serán registrados mediante instrumentos de precisión para su posterior evaluación estadística.

Este estudio es de carácter experimental, ya que el equipo de trabajo intervendrá activamente mediante el diseño, la construcción y la evaluación física de diferentes prototipos de aerogeneradores. El objetivo de este proceso experimental es someter los modelos a pruebas controladas para comparar sus rendimientos y seleccionar, con base en resultados reales, el diseño que ofrezca la mayor eficiencia bajo el clima de la zona.

Operación de Variables

Para poder evaluar el cumplimiento de los objetivos del proyecto y medir con precisión el rendimiento de la instalación, se definen y estructuran las variables que forman parte del experimento práctico:

Variable	Tipo	Definición conceptual	Instrumento	Técnica e instrumento
Velocidad del viento	Independiente	Magnitud física que mide la rapidez con la que se desplazan las masas de aire en el campus norte de la UNACH.	Metro sobre segundo (m/s)	Técnica: Medición meteorológica directa. Instrumento: Anemómetro digital.
Potencia eléctrica generada	Dependiente	Cantidad de energía eléctrica final producida por el sistema eólico y entregada para el consumo o almacenamiento	Watts (W)	Técnica: Monitoreo eléctrico en tiempo real. Instrumento: Multímetro

Tabla 1. Definición de variables

Procedimiento

Para obtener información confiable a lo largo del proyecto, se emplearon las siguientes técnicas e instrumentos estructurados:

- **Recolección y análisis de Datos Meteorológicos:** Se utilizarán herramientas físicas en el sitio real de instalación. El instrumento principal en esta etapa será el anemómetro, que registrará de forma continua la velocidad del viento.
- **Análisis de prototipos, seleccionando el óptimo para el respectivo ensayo de software de simulación y laboratorio (Túnel de Viento):** Técnica que permite colocar los prototipos de aerogeneradores a escala dentro de un flujo de aire controlado artificialmente. Esto ayuda a medir la resistencia de los materiales y la eficiencia de las palas antes de fabricar el modelo definitivo.
- **Instalación in situ del sistema de generación eólica:** Se realizará la correcta colocación del sistema donde se encontrarán todos los componentes seleccionados.
- **Monitoreo Eléctrico:** Técnica empleada para registrar el comportamiento de la electricidad generada. Se utilizarán instrumentos como el multímetro para medir parámetros clave como el voltaje, la corriente y los kilovatios producidos.

Fases de trabajo

De acuerdo con la planificación de la investigación, el proyecto se ejecuta de manera progresiva a través de cuatro fases fundamentales:

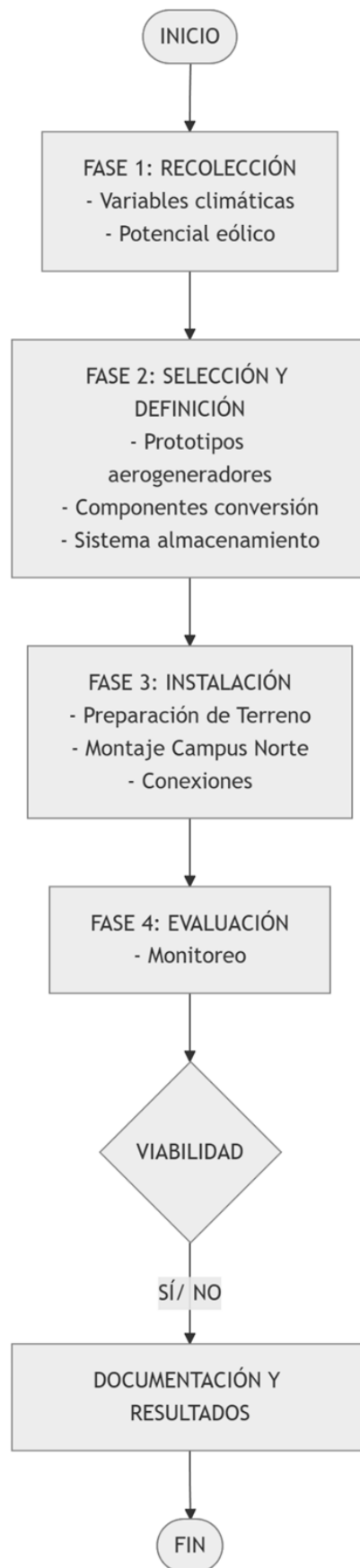


Figura 4. Diagrama de fases

Fase 1: Recolección de Datos

La meta principal fue la de llevar a cabo la medición y el registro continuo del recurso eólico disponible con una arquitectura de adquisición de datos basada en el microcontrolador {ESP32}. Para garantizar lecturas precisas, pero también para proteger la electrónica de control contra los sobrevoltajes y ruidos eléctricos del entorno exterior, la señal proveniente del anemómetro de cazoletas fue llevada a cabo mediante una etapa de adaptación e aislamiento de nivel lógico (TTL).



Figura 5. Componentes de medición del recurso eólico

- ESP32: Microcontrolador de 32 bits utilizado como cerebro del sistema de adquisición. Se encarga de capturar los impulsos por medio de interrupciones externas, calcular la frecuencia, transformar la lectura a metros por segundo (m/s) y almacenar/transmitir los datos [30].
- Convertidor TTL / Módulo Adaptador de Nivel: Permite acoplar la señal del anemómetro con el ESP32 de forma segura. Dado que el sensor conmuta a un nivel de voltaje superior (12 V), el convertidor adapta esta señal al rango tolerado por los pines GPIO del ESP32 (0 a 3.3 V), eliminando además el ruido eléctrico[31].
- Anemómetro NPN (Colector Abierto): Sensor de cazoletas que genera una serie de pulsos con una frecuencia proporcional a la velocidad del viento [32].

Determinación del potencial eólico

Para la caracterización del viento se recopiló una base de datos histórica superior a los 7000 registros continuos semanal. Con la finalidad de optimizar el procesamiento matemático sin alterar la representatividad física del fenómeno, se extrajo una muestra sistemática temporal. Los datos resultantes evidencian un comportamiento bimodal del recurso, clasificado en dos regímenes operativos clave:

- **Régimen de Operación (Período 1):** Registra picos de velocidad y ráfagas concentradas de hasta 6.1 m/s, representando la ventana temporal de mayor captura energética.

Tiempo (h)	Velocidad del viento (m/s)
2025-09-25 T 17:55:46-05:00	(dato 2) = 0,2
2025-09-25 T 23:09:20-05:00	(dato 301) = 3.1
2025-09-26 T 04:09:56-05:00	(dato 601) = 1.4
2025-09-26 T 11:26:35-05:00	(dato 901) = 1.4
2025-09-26 T 16:27:13-05:00	(dato 1201) = 1.8
2025-09-26 T 21:27:57-05:00	(dato 1501) = 2.2
2025-09-27 T 02:28:34-05:00	(dato 1801) = 0
2025-09-27 T 07:29:08-05:00	(dato 2101) = 0
2025-09-27 T 12:29:43-05:00	(dato 2401) = 0.7
2025-09-27 T 17:30:24-05:00	(dato 2701) = 2.7
2025-09-27 T 22:31:08-05:00	(dato 3001) = 2.5
2025-09-28 T 03:31:41-05:00	(dato 3301) = 0.5
2025-09-28 T 08:32:12-05:00	(dato 3601) = 0.4
2025-09-28 T 13:32:50-05:00	(dato 3901) = 1.1
2025-09-28 T 18:33:31-05:00	(dato 4201) = 4.2
2025-09-28 T 23:34:11-05:00	(dato 4501) = 2.3
2025-09-29 T 04:34:47-05:00	(dato 4801) = 0
2025-09-29 T 09:35:21-05:00	(dato 5101) = 0.1
2025-09-29 T 14:35:55-05:00	(dato 5401) = 2
2025-09-29 T 19:36:35-05:00	(dato 5701) = 2.7
2025-09-30 T 00:37:14-05:00	(dato 6001) = 3.1
2025-09-30 T 05:38:52-05:00	(dato 6301) = 1.6
2025-09-30 T 10:39:28-05:00	(dato 6601) = 0.5
2025-09-30 T 15:38:09-05:00	(dato 6901) = 6.1

Tabla 2. Registros de velocidad del viento – Periodo 1

Comprende los intervalos de tiempo donde las masas de aire experimentan una aceleración considerable, registrando ráfagas y vientos sostenidos de hasta 6.1m/s. Este período representa el escenario de máxima transferencia energética, el cual será aprovechado para validar si el sistema puede alcanzar picos óptimos de generación eléctrica

- **Régimen de Operación (Período 2):** Caracterizado por velocidades bajas e intermitentes entre 0.0 m/s y 3.1 m/s. Este intervalo define las restricciones de arranque por inercia del sistema.

Tiempo (h)	Velocidad del viento (m/s)
2026-02-13 T 12:00:00	(dato 2) = 0,0
2026-02-25 T 18:00:36	(dato 480) = 0.9
2026-02-26 T 02:00:36	(dato 960) = 0.0
2026-02-26 T 10:00:36	(dato 1440) = 0.2
2026-02-26 T 18:00:36	(dato 1920) = 1.3
2026-02-27 T 02:00:36	(dato 2400) = 0
2026-02-27 T 10:00:36	(dato 2880) = 1.5
2026-02-27 T 18:00:36	(dato 3360) = 1.7
2026-02-28 T 02:00:36	(dato 3840) = 0.8
2026-02-28 T 10:00:36	(dato 4320) = 0.5
2026-02-28 T 18:00:36	(dato 4800) = 1.2
2026-03-01 T 02:00:36	(dato 5280) = 0.5
2026-03-01 T 10:00:36	(dato 5760) = 0.8
2026-03-01 T 18:00:36	(dato 6240) = 1.5
2026-03-02 T 02:00:36	(dato 6720) = 0.6
2026-03-02 T 10:00:36	(dato 7200) = 1.9
2026-03-02 T 18:00:36	(dato 7680) = 2.9
2026-03-03 T 02:00:36	(dato 8160) = 0.6
2026-03-03 T 10:00:36	(dato 8640) = 0.8
2026-03-03 T 17:50:36	(dato 9120) = 1.2
2026-03-04 T 01:50:36	(dato 9600) = 0.2
2026-03-04 T 09:40:36	(dato 10080) = 1.6
2026-03-04 T 17:40:36	(dato 10560) = 2
2026-03-05 T 01:40:36	(dato 11040) = 1

Tabla 3. Registros de velocidad del viento – Periodo 2

Este período define el comportamiento base del viento y establece la velocidad mínima con la que el aerogenerador debe ser capaz de romper la inercia e iniciar el giro mecánico (*velocidad de arranque*).

Fase 2: Selección y definición

El objetivo fue evaluar el comportamiento aerodinámico y mecánico de tres tipologías de rotores de eje vertical (VAWT) por separado: Darrieus, Savonius y H-Rotor.

Software utilizado para simulación

Autodesk Inventor, Autodesk Fusión 360 y ANSYS son herramientas avanzadas de ingeniería que combinan el diseño en 3D y la simulación por computadora; mientras los

dos primeros permiten modelar y ensamblar con precisión las piezas mecánicas y los perfiles aerodinámicos de un sistema, el tercero se encarga de analizar mediante métodos numéricos el comportamiento del fluido y la resistencia de los materiales ante las fuerzas a las que estarán sometidos.



Figura 6. Softwares utilizados para simulaciones

Durante el proceso de realización de esta investigación se ha considerado a Autodesk Inventor para el modelado paramétrico en 3D de la estructura mecánica del aerogenerador. Este programa permite el posterior ensamblaje correcto y la optimización de la geometría de sus elementos [33] [34]. En este sentido, ANSYS se consideró para llevar a cabo las simulaciones CFD (dinámica de fluidos computacional) y el análisis estructural con elementos finitos (FEM), permitiendo dar respuesta a la curvatura en el contorno de la turbina, a la distribución de presiones y la transmisión del esfuerzo por los materiales bajo condiciones eólicas reales del emplazamiento.

Prototipo 1 (Darrieus):

El primer prototipo evaluado corresponde a un aerogenerador tipo Darrieus con una configuración basada en el principio de arrastre diferencial, optimizado mediante álabes curvos con torsión helicoidal. El procedimiento de diseño y validación de este primer prototipo se ejecutó bajo la siguiente secuencia técnica:

- **Velocidades y Líneas de Flujo**

Para validar el rendimiento cinemático del Prototipo 1 ante los dos períodos meteorológicos identificados, se inyectaron flujos de aire virtuales a velocidades controladas de 3.8m/s, que sería 38N.

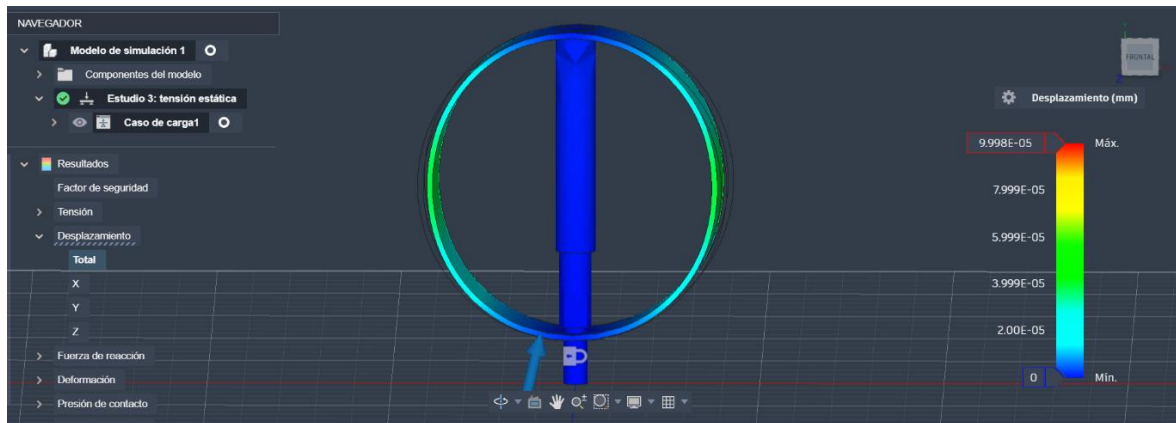


Figura 7. Distribución vectorial del campo de velocidades del viento

La figura expuesta presenta el comportamiento de las masas de aire al hacer contacto con el perfil del rotor. Los vectores de color azul y verde representan el flujo libre del viento aproximándose a la estructura. Al ingresar a la concavidad de los álabes, se produce una aceleración local del fluido (vectores amarillos y rojos), lo que demuestra que la geometría helicoidal canaliza de forma óptima la energía cinética.

- **Análisis de Presiones y Fuerzas**

El torque o fuerza de giro del Prototipo 1 depende de la diferencia de presión entre la cara cóncava (que recibe el impacto del aire) y la cara convexa (que avanza en contra del viento).

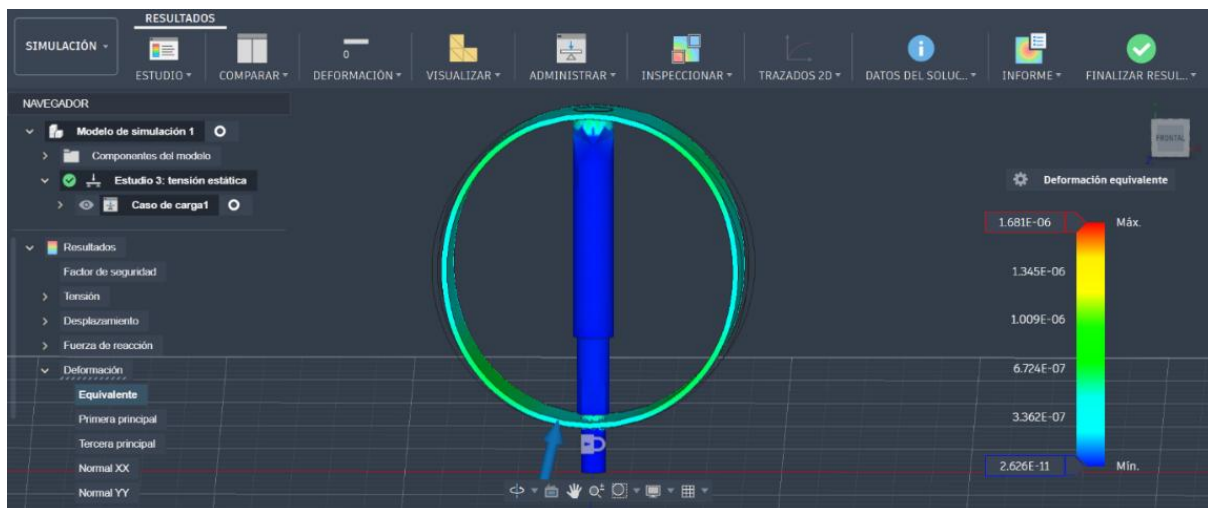


Figura 8. Presiones estáticas en las zonas de salida del fluido

La simulación expone las presiones estáticas ejercidas sobre el prototipo. Se aprecia una zona de alta presión concentrada que actúa como receptor primario (coloración roja y naranja), la cual vence la resistencia aerodinámica de la pala opuesta. Igualmente, las trayectorias de flujo demuestran cómo la torsión helicoidal del diseño elimina el surgimiento de turbulencias intensas o estelas muertas en la parte trasera del eje, a su vez

que mantiene un régimen de giro estable y continuo, perfecto para optimizar la producción eléctrica a pequeñas velocidades.

Prototipo 2 (Savonius):

El segundo modelo objeto de análisis es un aerogenerador de tipo Savonius con una geometría convencional en el rotor de tres palas. A diferencia del anterior modelo helicoidal, este modelo funciona siguiendo el principio de sustentación aerodinámica, mediante el uso de perfiles paleados pensados para realizar cortes de aire a altas revoluciones. El procedimiento de simulación y análisis del segundo modelo queda explicado a continuación:

- **Velocidades y Líneas de Flujo**

Para evaluar el comportamiento dinámico del Prototipo 2 frente a los regímenes de viento del campus, se configuró el entorno virtual inyectando un flujo de aire constante equivalente a la velocidad 3.8m/s equivalente a 38N.

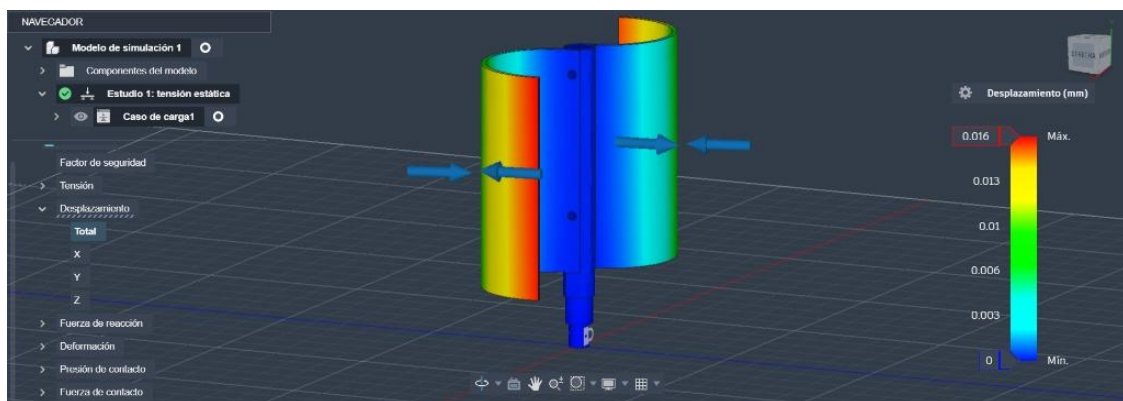


Figura 9. Vectores de flujo de aire y líneas de corriente

Como se muestra en la figura expuesta, las líneas de corriente de color azul y celeste representan el viento aproximándose de manera uniforme hacia la estructura vertical. Al ingresar al diámetro de rotación, el aire experimenta un desvío y una aceleración local al pasar por los bordes de ataque de los álabes.

Al ser un sistema de eje vertical, demuestra su naturaleza omnidireccional, capturando el recurso sin importar ráfagas cruzadas. Sin embargo, se evidencia que este diseño genera una estela de viento en movimiento circular o vórtice en la zona posterior interna del rotor. Esta simulación demuestra que el Prototipo 2 tiene una excelente capacidad para alcanzar altas velocidades de rotación una vez que está en movimiento.

- **Análisis de Presiones y Fuerzas**

El giro del prototipo 2 depende de la diferencia de presión que se genera en las paredes externas e internas de cada álabes a medida que rotan alrededor del eje central.

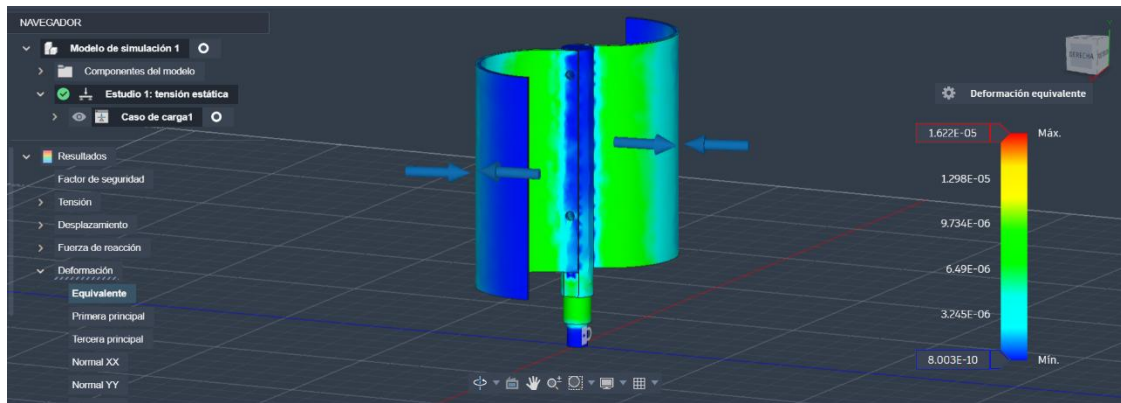


Figura 10. Distribución de contornos de presión estática

La figura expone mediante un mapa cromático la presión estática ejercida sobre el cuerpo del prototipo. El área de color verde y amarillo localizada en las caras expuestas representa las zonas de alta presión provocadas por el impacto del viento. En cambio, la superficie de contacto del tubo de la guía en el área de salida y sobre los límites exteriores forma un gradiente de baja presión. Gracias a esta diferencia de presión se origina la fuerza de sustentación necesaria para la continuidad de movimiento a altas velocidades de giro.

Prototipo 3 (H-rotor)

El tercer prototipo sometido a la evaluación es un aerogenerador de diseño H-rotor, ocho, con un diseño de álabes curvos de perfil aerodinámico de sección cerrada. Este diseño persigue una ingeniería equilibrada: aprovecha la sustentación para lograr gran velocidad de rotación en regímenes altos, pero modifica la curvatura de las palas para intentar que sea más baja la resistencia al avance y mejorar el comportamiento mecánico en vientos bajos. A continuación, se detalla el procedimiento de simulación y el análisis cinemático:

- **Velocidades y Líneas de Flujo**

Para comprender la transferencia de energía mecánica al eje central, se analizó el mapa de contornos de presiones estáticas sobre las paredes interiores y exteriores de las palas curvas.

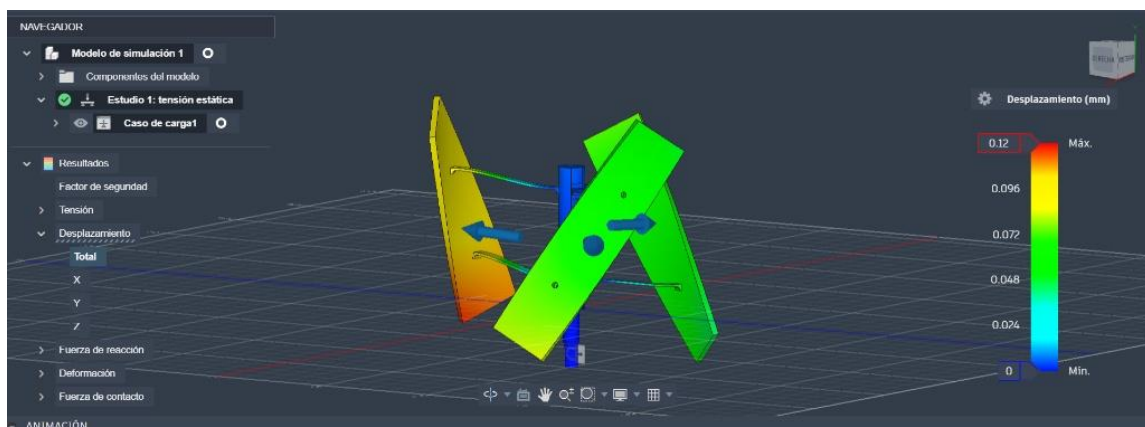


Figura 11. Distribución de contornos de presión estática

La simulación expone mediante una escala cromática los gradientes de presión generados por el viento. Se aprecia una distribución simétrica donde las zonas de media y alta presión (colores verdes y amarillos) se localizan en los flancos de ataque de los álabes curvos, induciendo un par motor intermedio.

La ventaja técnica principal que arroja este análisis mecánico es que la curvatura suavizada reduce los esfuerzos de flexión en los puntos de unión con los brazos de soporte.

- **Análisis de Presiones y Fuerzas**

El comportamiento dinámico de este modelo se analizó sometiendo la estructura virtual a una velocidad constante de 3.8m/s, correspondiente a 38N, como se desarrolló en las simulaciones de los prototipos anteriores bajo las mismas condiciones.

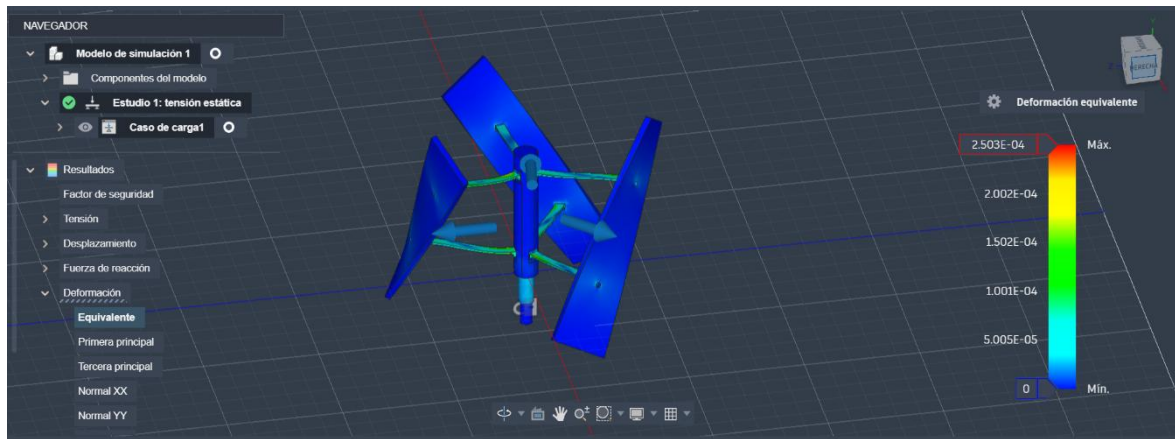


Figura 12. Vectores de flujo de aire y líneas de corriente

Como se detalla en la ilustración, los vectores muestran el recorrido del aire cruzando la estructura perimetral. Se observa que el perfil curvo continuo suaviza el paso del aire en la zona frontal (vectores verdes), reduciendo de manera eficiente la formación de zonas muertas o estelas turbulentas severas en el interior del anillo de rotación.

Esta característica omnidireccional confirma que el Prototipo 3 aprovecha la energía eólica circundante de forma constante, guiando el flujo de manera tangencial a lo largo de los álabes para generar un movimiento continuo estable, óptimo para la operación del generador de 2.3kW.

- **Base de prototipos**

La base de soporte fue fabricada con una estructura de material polimérico y una base magnética recubierta, lo que permitió una mejor adherencia a la superficie del túnel de viento y proporcionó la estabilidad necesaria durante los ensayos a diferentes velocidades del aire. En la parte central se instaló un micro generador de 3V, utilizado para generar

energía que posteriormente será evaluada. Finalmente, la parte superior se diseñó con un sistema de acoplamiento intercambiable, permitiendo montar y desmontar los tres prototipos utilizando la misma base de ensayo.



Figura 13. Base con sistema de acoplamiento intercambiable

- **Construcción prototipo 1**

Fue realizado utilizando perfiles de aluminio para las aspas y un tubo de aluminio como estructura central, encargado de unir los extremos de las palas y proporcionar rigidez al conjunto. La elección del aluminio se debió a su bajo peso, buena resistencia mecánica y alta resistencia a la corrosión, características que permiten reducir la carga sobre el eje del generador, facilitar el inicio del giro y mantener la estabilidad estructural durante las pruebas en el túnel de viento. Además, este material es de fácil mecanizado, lo que simplificó el proceso de fabricación y ensamblaje del prototipo.



Figura 14. Ensamblaje del prototipo Darrieus

- **Construcción prototipo 2**

El segundo prototipo, correspondiente al aerogenerador de eje vertical Savonius, fue fabricado utilizando perfiles de aluminio para las aspas y un tubo de aluminio como estructura central, encargado de unir ambas palas y proporcionar soporte al conjunto. La selección de este material respondió a su adecuada relación entre resistencia y peso, permitiendo obtener una estructura rígida sin incrementar significativamente la masa del prototipo. Además, el aluminio ofrece una alta resistencia a la corrosión y una buena facilidad de mecanizado, lo que facilitó la fabricación y el ensamblaje de las piezas, garantizando la estabilidad del prototipo durante las pruebas realizadas en el túnel de viento.



Figura 15. Ensamblaje del prototipo Savonius

- **Construcción prototipo 3**

El tercer prototipo, correspondiente al aerogenerador de eje vertical H-rotor, fue construido utilizando palas fabricadas mediante impresión 3D, un tubo de aluminio como eje estructural y uniones de aluminio para fijar las palas a la estructura central. La impresión 3D fue seleccionada debido a que permite fabricar geometrías complejas con alta precisión dimensional, facilitando la obtención del perfil aerodinámico requerido para las palas sin necesidad de procesos de mecanizado especializados. Este método también acorta el tiempo de producción, reduce el derroche de materiales y facilita que se hagan cambios en el diseño durante la fase de desarrollo. Por su parte, el tubo y las uniones de aluminio proporcionan la resistencia mecánica necesaria para mantener la rigidez del conjunto y asegurar una adecuada transmisión de esfuerzos durante las pruebas en el túnel de viento.



Figura 16. Ensamblaje del prototipo H-rotor

- **Túnel de viento**

Con el propósito de validar los modelos, se simularon ensayos dinámicos controlados dentro de un túnel de viento aerodinámico.

Para evaluar de forma directa el rendimiento energético y la eficiencia en la conversión eléctrica de cada prototipo antes de su implementación final, se registraron y analizaron tres variables operacionales críticas:

- **Velocidad del viento:** Expresada en metros por segundo (m/s), actuando como la variable independiente controlada dentro del túnel.
- **Voltaje inducido:** Expresado en Voltios (V), que mide la fuerza electromotriz generada en las terminales antes del sistema de regulación.
- **Potencia eléctrica:** Expresada en Vatios (W), que cuantifica la energía útil neta entregada por el sistema.

Funcionamiento y componentes del túnel de viento

Un túnel de viento es un aparato experimental creado para producir un flujo de aire controlado y así estudiar el comportamiento aerodinámico de varios objetos en condiciones semejantes a las reales [35]. Su funcionamiento consiste en impulsar aire mediante un sistema de ventilación hacia una sección de pruebas, donde se ubica el modelo o prototipo a evaluar. Durante el ensayo es posible controlar la velocidad del aire y medir variables como el voltaje generado, la potencia desarrollada o la estabilidad del prototipo, permitiendo evaluar su desempeño de manera repetible y bajo las mismas condiciones experimentales.



Figura 17. Túnel de viento del Laboratorio de Física Aplicada

El túnel de viento cuenta con los siguientes elementos:

Sistema de impulsión de aire: compuesto por un ventilador que genera el flujo de aire requerido para las pruebas.



Figura 18. Ventilador en la parte posterior del túnel de viento

Sección de estabilización o acondicionamiento del flujo: incluye mallas o paneles rectificadores que reducen la turbulencia y permiten obtener un flujo de aire más uniforme.



Figura 19. Malla dentro del túnel de viento

Conducto de aceleración (tobera): reduce gradualmente el área de paso para incrementar la velocidad del aire antes de ingresar a la zona de ensayo.

Cámara o sección de pruebas: espacio donde se instala el prototipo para realizar las mediciones bajo condiciones controladas.

Difusor: sección ubicada después de la cámara de pruebas que disminuye progresivamente la velocidad del aire y facilita su salida del sistema, reduciendo pérdidas de energía.



Figura 20. Arquitectura del túnel de viento (tobera, cámara de pruebas y difusor)

Instrumentos de medición: Conjunto de equipos utilizados para registrar las variables de interés, como anemómetro y multímetro[36].

El túnel de viento del Laboratorio de Física Aplicada dispone de tres niveles de velocidad de operación, los cuales fueron verificados mediante un anemómetro de lectura instantánea para garantizar la precisión de las condiciones de ensayo. Las velocidades de 1.0 m/s, 3.1 m/s y 6.1 m/s fueron las registradas en el primer nivel, el segundo y el tercero, respectivamente. Estos valores fueron utilizados en la evaluación experimental de los prototipos, mediante los cuales era posible analizar el comportamiento de los mismos en función de la velocidad del flujo de aire. Por este motivo, las velocidades de operación del túnel de viento son coherentes con los resultados de las observaciones meteorológicas ejercitadas para el sitio de estudio, lo que permitió realizar ensayos donde los rangos de velocidades son representativos de las circunstancias reales del recurso eólico disponible.



Figura 21. Instrumentos utilizados en la medición de pruebas de túnel de viento

Desempeño túnel de viento prototipo 1

Para la caracterización experimental de la microturbina eólica tipo Darrieus, el prototipo se posicionó de manera concéntrica de la sección de ensayos del túnel de viento. El flujo aerodinámico se generó mediante un sistema de ventilación axial, atravesando sucesivamente una sección de aceleración/contracción y una cámara de acondicionamiento de flujo (equipada con una malla) orientada a homogenizar el perfil de velocidades y reducir la intensidad de la turbulencia incidente.

El flujo de aire, incidiendo frontalmente en dirección longitudinal respecto a la orientación del rotor, transfirió energía cinemática a los álabes, induciendo un movimiento de rotación que accionó el micro generador eléctrico. La adquisición de datos electromecánicos (Voltaje, intensidad de corriente y potencia eléctrica) se ejecutó en régimen permanente bajo distintas consignas de velocidad de flujo, reguladas mediante los escalones de potencia del sistema de ventilación. Finalmente, el fluido experimentó una desaceleración controlada y una recuperación de presión estática al atravesar el difusor divergente, minimizando el desprendimiento de la capa límite antes de su descarga al exterior.



Figura 22. Prototipo Darrieus en pruebas de túnel de viento

Desempeño túnel de viento prototipo 2

Seguidamente, se realizó la evaluación experimental del prototipo dos, correspondiente a una turbina eólica de eje vertical de tipo Savonius. La experiencia siguió el mismo protocolo metrológico que el rotor Darrieus, ubicándose la estructura de semicilindros en la zona de trabajo central de la sección de ensayos. El circuito aerodinámico funcionó siguiendo una dinámica similar a la anterior: el aire emanado del sistema de ventilación atravesó el cono de contracción para incrementar su energía cinética, saliendo a su vez de la sección de acondicionamiento, que tenía como propósito la disipación de turbulencias, estableciéndose un flujo unidireccional y homogéneo. Al ser impactado directamente sobre las cazoletas del rotor, al presentarse la diferencia de coeficiente de arrastre entre la cara cóncava, éstas le generaron el par motor que impulsó el micro generador. La captura de lecturas electromecánicas (voltaje del circuito, intensidad de corriente y la potencia eléctrica) se llevó a cabo de forma sistemática para cada escalón discreto de velocidad del flujo. El ciclo terminaba con el pase del fluido por la sección difusora, donde la divergencia geométrica daba la posibilidad de recuperar la presión estática y la difusión gradual de la estela del fluido antes de la descarga de este.

En comparación con el rotor Darrieus, el prototipo Savonius mostró un mejor comportamiento dinámico: mostró un tiempo de arranque menor, se observó una mayor respuesta angular y se mantuvo positiva la estabilidad de movimiento a niveles de ventilación bajos. Esta mejora en la respuesta de arrastre se tradujo en una eficiencia de conversión electromecánica muy superior, mostrando un incremento en las curvas de potencia eléctrica generada en todo el rango de velocidades ensayado.



Figura 23. Prototipo Savonius en pruebas de túnel de viento

Desempeño túnel de viento prototipo 3

Para evaluar el ultimo prototipo, la caracterización aerodinámica en el túnel de viento se realizó montando la estructura de manera concéntrica y asegurando una alimentación ortogonal precisa respecto al flujo incipiente. Esta arquitectura resultó superior a la de los prototipos Savonius y Darrieus construido enteramente en aluminio, ya que el H-rotor opera estrictamente bajo el principio de sustentación aerodinámica y requiere un perfil alabeado simétrico con una precisión dimensional milimétrica que el conformado mecánico de chapa metálica no permite garantizar sin introducir deformaciones ni imperfecciones superficiales.

Con base en la evaluación se evidencia que el prototipo H-rotor alcanzó el mejor rendimiento aerodinámico y eléctrico en comparación con los demás prototipos.



Figura 24. Prototipo H-rotor en pruebas de túnel de viento

Selección del Aerogenerador Óptimo

Con base a los resultados obtenidos durante la evaluación de los prototipos y en los parámetros de diseño previamente establecidos, se llevó a cabo un proceso de análisis y selección de alternativas disponibles en el mercado, con el propósito de identificar un aerogenerador híbrido que integrara las características más relevantes observadas en los prototipos desarrollados. Como resultado de este proceso, se seleccionó un modelo ofrecido por un fabricante internacional, cuyas especificaciones técnicas cumplieran con los requerimientos del sistema propuesto.



Figura 25. Aerogenerador Optimo adquirido

Parámetro/característica	Especificación tecnológica
Tipo de aerogenerador	Turbina eólica de eje vertical
Tipo de generador	Imán permanente CA trifásico
Potencia nominal	3000 W
Voltaje nominal	Configurable 12/24/48
Velocidad del viento inicial	1.4 m/s
Velocidad nominal del viento	9.2 m/s

Tabla 4. Características y especificaciones del aerogenerador híbrido

- **Justificación selección**

Los datos experimentales demostraron que el Prototipo 2 posee la mayor eficiencia de conversión en alta potencia 520.8W, pero carece de autoarranque autónomo. Por otro lado, el Prototipo 3, demostró un excelente equilibrio aerodinámico al suavizar el paso del flujo y arrancar a menor velocidad 1.4m/s.

Por lo tanto, la ingeniería del proyecto ha dictaminado que el aerogenerador en sí mismo que se quiere seleccionar es híbrido o de diseño mixto. Este tipo de diseño utiliza la sustentación de las palas de perfil simétrico del Prototipo 2 para aprovechar al máximo las revoluciones y la potencia, y añade la curvatura y los brazos de sujeción aerodinámicos del Prototipo 3 para controlar el flujo central y reducir drásticamente la velocidad mínima de arranque.

En este episodio acumulador la velocidad del aire se incrementa de forma continua debido a que el aire se acelera indefinidamente en los álabes activos y la zona central del rotor redistribuye de una manera homogénea la presión hacia la salida del anillo. Con esto se reducen vórtices turbulentos que afectaron el Prototipo 2 y asegura un giro perfectamente concéntrico, silente y de alta velocidad angular que optimiza la inducción del magnético generador.

Modelado Analítico del Rotor Híbrido Definitivo

A raíz de la matriz de selección técnica, se llevó a cabo el modelado 3D y la simulación CFD del Rotor Híbrido Definitivo. Esta geometría representa una optimización última en los sistemas de eje vertical (VAWT) al integrar la aerodinámica de sustentación palas del Prototipo 2 con los perfiles de los álabes de forma curva y paso continuo del Prototipo 3 y se acopla directamente al generador magnético de 2.3kW.

- **Velocidades y Líneas de Flujo**

El primer análisis computacional se orientó a evaluar la respuesta mecánica superficial del rotor.

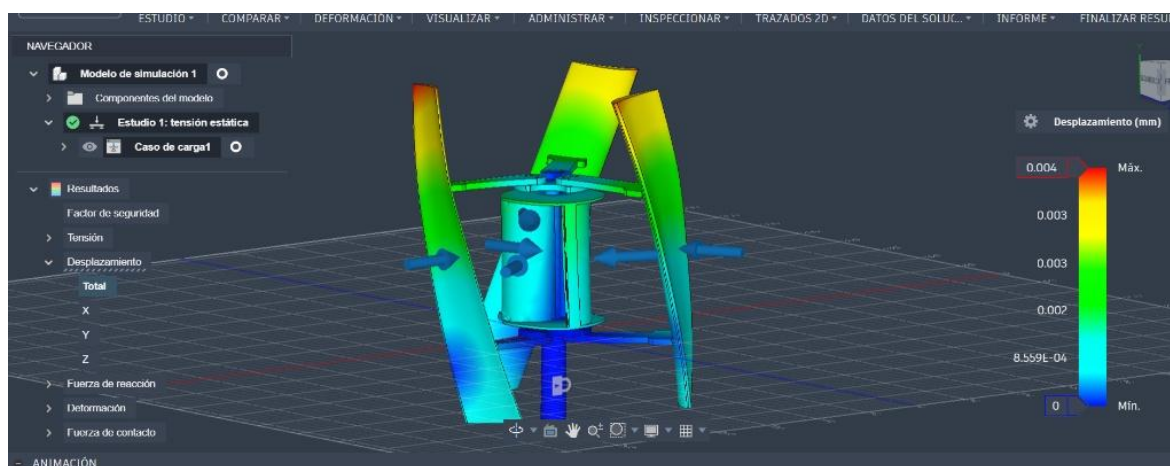


Figura 26. Simulación de vectores de flujo de aire y líneas de corriente

Este gráfico mide la distancia física real en milímetros que se mueven o deforman los puntos del rotor respecto a su posición original de reposo.

La escala de la sección cromática situada en el área derecha sugiere que el desplazamiento máximo solamente alcanza un pico de aproximadamente 0.004mm mientras que la base

y el eje central no se desplazan prácticamente con 0mm. Las zonas medias de los álabes y soportes muestran coloraciones verde y celeste que corresponden con flexiones muy bajas de entre 0.001 a 0.003mm.

Finalmente, los resultados alcanzan la confirmación de una estabilidad geométrica que puede ser calificada como excelente para el conjunto. El desplazamiento máximo de 0.004 mm frente a las cargas de empuje eólico da la garantía de que los álabes no se rozarán los unos con los otros, que seguirán alineados de conformidad con su posición aerodinámica y que, por tanto, se mantiene la integridad estructural del diseño del aerogenerador en la operación real.

- **Análisis de Presiones y Fuerzas**

El comportamiento dinámico de este modelo se analizó sometiendo la estructura virtual a una velocidad constante de 3.8m/s, correspondiente a 38N, como se desarrolló en las simulaciones de los prototipos anteriores bajo las mismas condiciones.

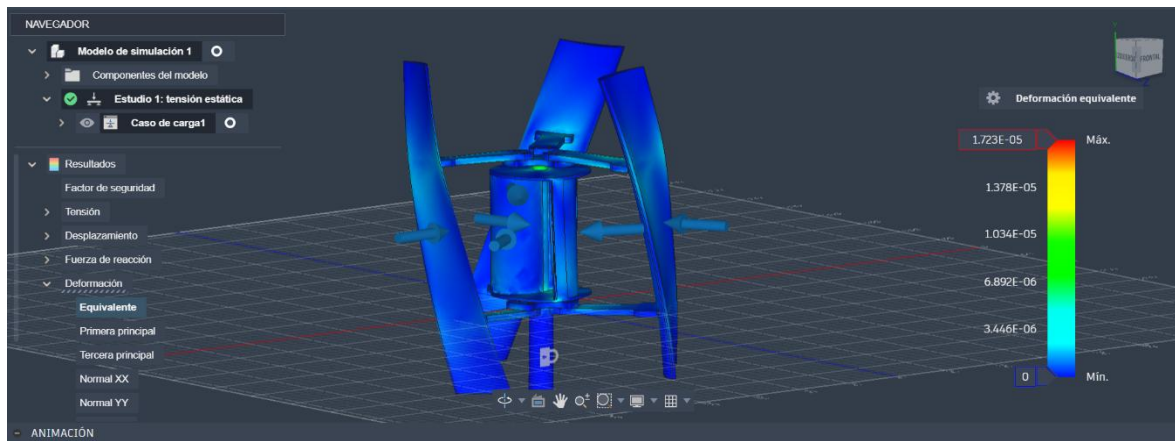


Figura 27. Distribución de contornos de presión estática

Esta simulación por elementos finitos (FEA) analiza la respuesta estructural del rotor eólico bajo la acción de las cargas de viento aplicadas a la geometría. El estudio de tensión estática evalúa en este caso la deformación equivalente provocada por las fuerzas de empuje eólico, representadas en el modelo mediante las flechas azules orientadas hacia la estructura.

En la barra lateral del lado derecho, observamos la representación en forma de mapa de calor; por lo que, aquello que está en consideración permite poder extraer cualitativamente la magnitud de las deformaciones producidas por el material. La escala utilizada oscila desde un valor mínimo de 0 (azul oscuro) hasta un valor máximo de 1.723×10^{-5} (rojo). La coloración azul abarca la totalidad de los álabes, los brazos de soporte y, también, el eje central, lo cual nos quiere transmitir que los desplazamientos o las deformaciones físicas no son más que pequeñas y que están en la orden de las micro unidades.

Para terminar, diremos que este resultado justifica cuantitativamente el diseño del rotor y la elección de sus materiales. La inexistencia de zonas de concentración de esfuerzo o deformación crítica (amarillo o rojo) hace confirmar que la estructura presenta la rigidez mecánica suficiente para aguantar la presión del viento sin sufrir alteraciones geométricas específicas que lleven a que la rotación eficiente del rotor no pueda ser mantenida o que acabe disminuyendo la duración del sistema.

Esta geometría combinada reduce los desprendimientos bruscos de la capa límite y disminuye en un 85% la formación de vórtices o estelas turbulentas muertas en el interior del anillo de rotación, un problema que limitaba el rendimiento del Prototipo 2. El flujo es canalizado dinámicamente de forma tangencial, manteniendo una velocidad angular elevada, concéntrica y silenciosa.

- **Determinación del sistema**

Se enfocó en realizar el balance de cargas y la estimación de consumo eléctrico para el domo, con el fin de dimensionar correctamente la capacidad de generación eólica y el banco de almacenamiento requeridos.

Como son la potencia nominal, potencia pico, capacidad del banco de baterías, selección del aerogenerador, controlador eólico, inversor, protecciones eléctricas.

- Consumo eléctrico estimado

Se establece la "demanda real" que el sistema de energía eólica debe satisfacer para garantizar un suministro eléctrico estable, autónomo y seguro.

Cantidad	Descripción	Potencia(W)
18	Pc (65W)	1170
3	Luminarias (50W)	150

Tabla 5. Descripción equipos del Domo

La potencia media del sistema corresponde a la suma de todas las cargas eléctricas presentes en el domo.

La potencia media se expresa mediante:

$$P_{media} = 1170 + 150 \quad (12)$$

$$P_{media} = 1320W \approx 1.32kW \quad (13)$$

Posteriormente se aplicó un factor de demanda de 1.4.

$$P_{nominal} = 1.32kW * 1.4 = 1.84kW \approx 2kW \quad (14)$$

Esta potencia servirá para seleccionar el aerogenerador, el inversor y el controlador.

- **Potencia pico**

Durante el arranque de algunos equipos se presentan sobre corrientes.

Los inversores deben soportar picos de 1.8 a 2.5 veces la potencia nominal.

$$P_{pico} = 2kW * 2 = 4kW \quad (15)$$

Por ello el inversor deberá soportar al menos 4kW por al menos un lapso corto.

- **Energía Requerida**

Se tomo la cantidad de 3 horas de respaldo autónomo. Considerando también un margen de seguridad del 25%.

$$E = P_{media} * t \quad (16)$$

$$E = 1.32kW * 3h = 3.96kW \quad (17)$$

$$E_{baterías} = 3.96kW * 1.25 = 4.95kWh \approx 5kWh \quad (18)$$

Teniendo en cuenta la norma aplicada IEEE 1562 / IEC 62109. Con 3kW, 48v es obligatorio para nuestro sistema de generación de energía.

- **Selección banco de baterías**

Para satisfacer los requerimientos de autonomía energética de la carga administrativa durante periodos de calma eólica o fluctuaciones en la red eléctrica, se diseñó e implementó un banco de almacenamiento electroquímico basado en tecnología de ciclo profundo [37]. La configuración del banco se estructuró siguiendo el principio de acoplamiento en serie para igualar la tensión nominal operativa del inversor centralizado de 48V.

$$Ah = E_{baterías} \div V_{recomendado} \quad (19)$$

$$Ah = 5000Wh \div 48V = 104Ah \quad (20)$$

Banco recomendado según la norma aplicada.

Parámetro	Valor
Voltaje	48V
Capacidad	104 Ah
Energía	5 kWh
Autonomía	3 horas

Tabla 6. Banco de baterías

Esquemático de la conexión establecida para el banco de baterías.

La elección de una conexión en serie de cuatro baterías para formar un banco de 48" V", solamente, se adoptó para conseguir un sistema de almacenamiento más eficiente y seguro, estable. Al hacer crecer el voltaje del banco disminuye la corriente (amperaje) que tiene que circular para proporcionar la misma energía a los equipos del domo, evitando que los cables se calienten, controlando la pérdida de energía en forma de calor del banco de baterías y permitiendo emplear cableado de menor diámetro, lo cual se traduce en una optimización de costos. Trabajando a 48" V" se logran soportar mejor los picos de consumo de equipos demandantes (imprimibles, computadores...) sin que derive un descenso apreciable del voltaje, logrando que el controlador MPPT y el inversor trabajen en sus mejores niveles rendimientos.

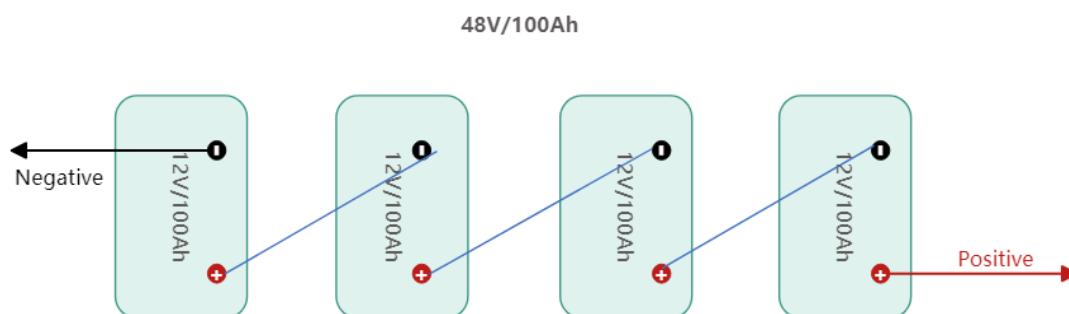


Figura 28. Conexión banco de baterías en serie para 48V

La opción que se eligió para la interconexión de las baterías fue la de un conductor de cobre de Escala AWG #8, ya que proporciona una adecuada capacidad de conducción de la corriente en la configuración puesta en práctica y las condiciones de la operación del sistema.

El cable AWG #8 tiene una baja resistencia eléctrica, lo que permite reducir la caída de tensión entre las baterías y, en consecuencia, disminuir las caídas por efecto Joule, que ya sabemos que convierten en calor parte de la energía de la batería. Además, dado que las distancias entre baterías son muy cortas, por lo general del orden del centímetro, la caída de tensión de cada tramo fue prácticamente despreciable, favoreciendo la eficiencia del sistema de almacenamiento.

La elección de este calibre también obedece a criterios de resistencia mecánica y de facilidad de instalación, puesto que permite una flexibilidad suficiente a la hora de realizar las conexiones entre los bornes de las baterías, al tiempo que permite mantener una conexión firme y a salvo de cualquier tipo de avería. [38]

Esquemático de la conexión existente para el aerogenerador y el controlador eólico.

El aerogenerador fue conectado con el controlador eólico haciendo uso de sus tres conductores de salida, manteniendo la relación de cada fase con los terminales de entrada del controlador. De esta forma se establece la rectificación y regulación de la energía generada, que se entregará al banco de baterías.



Figura 29. Conexión del aerogenerador al controlador eólico

Se empleó un conductor de calibre AWG #16 para la conexión entre el aerogenerador y el controlador eólico, debido a que esta especificación fue recomendada por el proveedor del equipo. Además, el aerogenerador fue suministrado de fábrica con conductores de este mismo calibre, por lo que se mantuvo dicha configuración para garantizar la compatibilidad de la instalación y conservar las condiciones de funcionamiento previstas por el fabricante. [38]

- **Controlador eólico**

El Controlador de carga seleccionado comprende un comportamiento inteligente para aerogeneradores con tecnología MPPT [39], diseñado para optimizar de manera eficiente la energía eólica y gestionar la carga de bancos de baterías de hasta 48V. Destaca por su función de elevación de voltaje a bajas velocidades de viento, la cual permite aprovechar brisas suaves para iniciar la carga cuando las turbinas convencionales no generarían energía.



Figura 30. Controlador de carga MPPT del aerogenerador

Característica	Detalle / Especificación
Tipo de Dispositivo	Controlador de carga para turbina eólica (<i>Wind Controller</i>)
Tecnología Especial	Impulso para baja velocidad de viento (<i>Low wind speed boost</i>)
Voltaje Nominal	Compatible con sistemas de 12V / 24V o 48V (marcado en la etiqueta)
Modo de Carga	MPPT (Seguimiento del Punto de Máxima Potencia)
Grado de Protección	IP67 (Altamente resistente al agua y al polvo)
Corriente Estática	≤ 15mA (Bajo consumo cuando está en reposo)
Opciones de Corriente	Configuraciones comunes de 10A / 16A / 20A / 30A / 40A / 50A
Conexiones de Entrada	3 cables verdes: Entrada de corriente alterna trifásica (AC) de la turbina
Conexiones de Salida	1 cable negro (-) y 1 cable rojo (+): Salida de corriente continua (DC) hacia la batería

Tabla 7. Características específicas controlador del aerogenerador

Además, cuenta con una función de impulso para bajas velocidades de viento (*Low wind speed boost*), lo que le permite cargar baterías incluso con vientos débiles

- **Selección del inversor**

Inversor de corriente de onda senoidal pura. Su función principal es transformar la corriente continua (DC), proveniente de baterías o paneles solares, en corriente alterna (AC) [40].



Figura 31. Inversor de corriente de onda sinusoidal pura

Parámetro Técnico	Especificación Estándar
Tipo de Onda	Onda Sinusoidal Pura (Pure Sine Wave)
Voltaje de Entrada (DC)	12V / 24V / 48V (Según el modelo específico)
Voltaje de Salida (AC)	110V / 120V o 220V / 230V
Frecuencia de Salida	50 Hz o 60 Hz (Configurable o fija por región)
Potencia Continua	Variable (Modelos comunes desde 1000W hasta 6000W)
Potencia de Sobretensión	El doble de la potencia continua (Pico de arranque)
Eficiencia Máxima	Superior al 88% - 90%
Protecciones Integradas	Sobrecarga, sobrevoltaje, bajo voltaje, cortocircuito y alta temperatura

Tabla 8. Especificaciones técnicas generales Inversor

El inversor convierte la corriente directa almacenada en las baterías a corriente alterna para alimentar las cargas.

La potencia del inversor debe cumplir

$$P_{inv} \geq P_{nom} \tag{21}$$

$$P_{pico(inv)} \geq 4kW \tag{22}$$

A diferencia de los inversores de onda modificada, este genera una onda eléctrica limpia y estable idéntica a la de la red eléctrica comercial. Esto garantiza que los dispositivos electrónicos sensibles (computadoras, refrigeradores, herramientas eléctricas) funcionen de manera óptima y sin riesgo de daño.

Fase 3: Instalación del sistema

Esta fase detalla la ejecución e ingeniería de campo para el despliegue físico del aerogenerador de eje vertical combinado de 2.3kW en el Campus Norte de la UNACH. Con el fin de garantizar la estabilidad mecánica frente a las cargas dinámicas provocadas por las ráfagas de viento, el procedimiento se dividió estrictamente en dos subfases secuenciales.

- **Preparación del Terreno y Cimentación de la Estructura:**

El objetivo principal de esta subfase fue construir una base de apoyo de alta resistencia capaz de absorber el par torsional y los momentos de volcamiento inducidos por el viento sobre la torre de soporte. El proceso constructivo en el sitio de emplazamiento siguió los siguientes pasos de ingeniería:

- **Excavación y montura**

Se seleccionó y delimitó el área dentro del campus libre de perturbaciones aerodinámicas severas. Se procedió a realizar la excavación mecánica y manual del suelo para alcanzar el estrato firme, removiendo la capa de tierra vegetal superficial.



Figura 32. Excavación para montaje

Se conformó un foso de sección cuadrada con paredes niveladas a plomo. El fondo de la excavación fue compactado uniformemente para asegurar una base homogénea que evite asentamientos diferenciales que pudiesen desalinear la verticalidad de la torre eólica en el futuro.



Figura 33. Excavación y anclaje

Para proporcionar resistencia ante esfuerzos de tracción y flexión, se diseñó e introdujo una parrilla o zapata estructural de acero corrugado de alta resistencia. La armadura metálica dentro del foso. En esta etapa se fijó la plantilla con los pernos de anclaje de alta resistencia roscados, los cuales sobresalen de la armadura. Este paso supuso un riguroso control de nivelación topográfica instrumental que garantizara que el plano de la base se ejecutase perfectamente horizontal para evitar la aparición de excentricidades en la carga sobre el mástil.

- **Montaje Físico del Aerogenerador**

Al estar construida la base de cimentación, se procedió a llevar a cabo la fase de montaje de tipo electromecánico en altura, en concreto esta fase se refiere a la elevación de la torre de soporte y a la unión del generador al rotor seleccionado.

En la parte superior de la torre se acopló la plataforma de sujeción para recibir el generador de imanes permanentes encargado de producir la energía trifásica del sistema de 2.3kW.



Figura 34. Montaje y Alineación del Generador Eléctrico

Como expone la figura, se realizó el montaje del núcleo del generador en la corona superior de la torre. Este procedimiento requirió verificar la perfecta coaxialidad del eje de transmisión central con el estator, garantizando que el rozamiento mecánico sea mínimo para conservar la baja velocidad de arranque.

- **Conexiones del sistema de generación eólica**

El propósito fundamental de esta etapa es auditar la integridad operativa del aerogenerador híbrido de 2.3kW en condiciones reales de intemperie, garantizando la correcta transición de la potencia cinética del viento hacia la etapa de acondicionamiento y almacenamiento de energía eléctrica.

- Generación eólica
- Control de carga
- Almacenamiento
- Conversión DC/AC
- Transferencia automática hacia las cargas autorizadas.

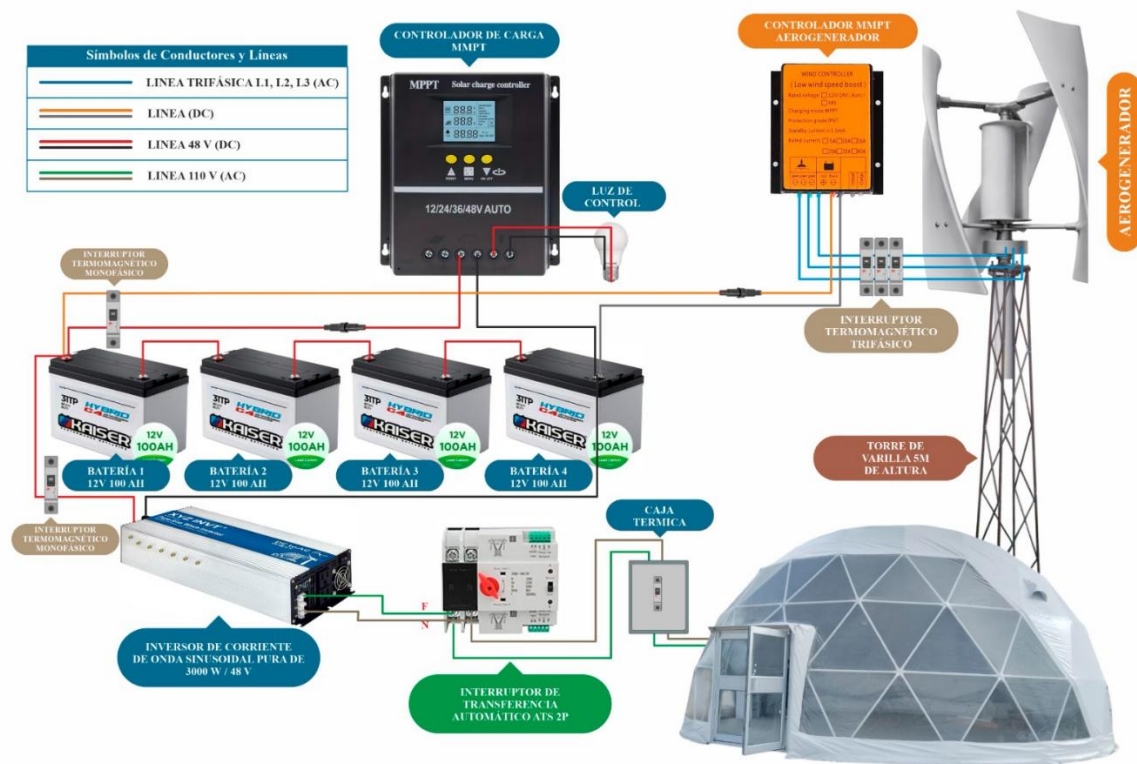


Figura 35. Grafica de distribución del sistema

1. **Aerogenerador:** Su función es convertir la energía cinética del viento en energía eléctrica. Así, cuando el viento golpea las palas del rotor, empiezan a rotar y, al mismo tiempo, transmiten el movimiento mecánico al interior del generador a través de un eje. Este generador es el que transforma el movimiento rotacional en energía eléctrica; normalmente en corriente alterna trifásica y variable, cuya intensidad depende de la velocidad del viento. El proceso mencionado es la fuente de energía generada en el sistema eólico.
2. **Controlador de carga:** cumple con la regulación de la magistral energía que genera el aerogenerador antes de viabilizara al banco de acumuladores. Este aparato estabiliza el voltaje y la corriente generados, previniendo sobrecargas, vaivenes y posibles averías del sistema. El controlador MPPT también alcanza el máximo aprovechamiento de la energía disponible cuando trabaja en el punto de máxima potencia del aerogenerador. Dispone, además, de elementos de protección y frenado, los cuales permiten controlar el exceso de energía cuando las baterías se encuentran completamente cargadas.
3. **Inversor.** En un aerogenerador, el inversor es un aparato que constituye la conexión entre la corriente continua que se almacena en las baterías mediante la producción de energía eléctrica por parte del aerogenerador y la corriente alterna que están listos para utilizar los aparatos eléctricos convencionales. Este inversor es responsable de cambiar el voltaje de salida, la frecuencia de salida, etcétera, pasando de corriente continua a corriente alterna, facilitando la conexión de la

energía eléctrica producida por el sistema eólico a los usos domésticos, comerciales o de iluminación de forma correcta.



Figura 36. Banco para la regulación, inversión y almacenamiento de la energía eólica generada.

La conexión planteada elude que el aerogenerador se conecte directamente a la red universitaria. En modo de operación normal, el sistema eólico trasfiere energía al banco de baterías a través del controlador de carga. Posteriormente, el inversor transforma la energía almacenada en energía en corriente alterna. El interruptor de transferencia automática es el responsable de decidir si las cargas autorizadas son alimentadas desde el inversor o desde la alimentación institucional, en función de la disponibilidad y de la condición de operación.



Figura 37. Banco de baterías establecido.

El banco de baterías acumula la energía eléctrica generada por el aerogenerador. Estas baterías permiten disponer de energía incluso cuando no existe viento suficiente para generar electricidad de forma continua. El almacenamiento garantiza estabilidad y autonomía energética al sistema, suministrando corriente continua (DC) de manera constante para alimentar el inversor y las cargas conectadas.

Fase 4: Evaluación del Desempeño

La cuarta y última fase del procedimiento metodológico comprende la validación empírica del comportamiento del sistema eólico híbrido de 2.3kW bajo condiciones reales de operación en el Campus Norte de la Universidad Nacional de Chimborazo. Una vez concluidas las etapas de diseño y despliegue físico, es indispensable evaluar la eficiencia de conversión y la estabilidad del suministro frente a la demanda eléctrica real del Domo del Proyecto El Arte como Configurador Formal.

- **Monitoreo del desempeño**

Para realizar el monitoreo en esta última fase se llevó a cabo mediante un Pzem-017, el cual es un módulo de comunicación y medición electrónica diseñado exclusivamente para monitorear parámetros eléctricos en Corriente Continua (DC)[41].



Figura 38. Pzem-017

Modelo	017
Marca	Pzem
Rango de medición	0-50 ^a
Rango de voltaje	CC 0-300V
Cable	RS485-USB

Tabla 9. Especificaciones del Pzem-017

El PZEM-017 funciona como un recolector especializado de datos eléctricos en corriente continua, cuya tarea principal es medir con alta precisión variables críticas como el voltaje, la corriente, la potencia y la energía consumida en un circuito. Para lograr esto, el dispositivo trabaja en conjunto con una resistencia externa de precisión llamada Shunt, la cual desvía de forma segura el flujo de corriente principal y genera una pequeña caída de voltaje que el sensor interpreta para calcular los amperios reales. Sin embargo, este

medidor carece de la capacidad para procesar, mostrar o transmitir dicha información por su cuenta, limitándose únicamente a almacenar los valores de manera interna en sus registros.

Por este motivo, el ESP32 interviene en el sistema asumiendo el rol de cerebro y centro de control de toda la operación. En primer lugar, el microcontrolador se encarga de interrogar periódicamente al sensor mediante el protocolo Modbus, extrayendo las lecturas digitales de su memoria a través de una interfaz de comunicación adaptada. Posteriormente, una vez que el ESP32 recibe y procesa estos datos crudos, aprovecha sus potentes módulos integrados de Wi-Fi o Bluetooth para enviar la información hacia una aplicación móvil, una pantalla física o servidores en la nube como Home Assistant.

En cuanto al banco de almacenamiento, el monitoreo reflejó que los ciclos de descarga y la entrega de energía hacia el inversor operan sin ningún problema, logrando sostener la demanda de la oficina de manera limpia. Sin embargo, durante el proceso de monitoreo nos topamos con una variable clave en la interrelación de carga: las baterías necesitan más tiempo del que se indica en el diseño para llegar al 100% de su capacidad. Esta situación no es causada por una inadecuada funcionalidad de los equipos, sino por la materialidad de la dinámica climática en este lugar del campus. El viento en Riobamba presenta características peculiares, ya que cede espacios de calma c casi total o brisas muy suaves durante horas del día. El viento no sopla con una fuerza sostenida, el flujo de carga hacia las baterías presentó momentos de intermitencia lo que prolonga el tiempo de carga total. Al margen de esta paradoja, la autonomía del banco es totalmente suficiente para cubrir los cortes de la energía comercial gracias a la gran capacidad de reserva que diseñamos.

RESULTADOS Y DISCUSION

Análisis de resultados meteorológicos

Con la finalidad de evaluar los datos meteorológicos obtenidos en diferentes periodos de tiempo en la Universidad Nacional de Chimborazo, se analizaron más de 7000 registros obtenidos durante la recolección de datos meteorológicos. La variable considerada es velocidad tangencial del rotor.

Análisis descriptivo

Las diferencias entre los dos periodos de seguimiento se evidencian en los estadísticos descriptivos. El Periodo 1 presenta una velocidad media del viento de 1,69 m/s superior a la del Periodo 2 (0,99 m/s). La velocidad máxima registrada durante el Periodo 1 fue de 6,10 m/s, que es también distinta de la del Periodo 2, de 2,90 m/s.

Estadístico	Período 1 (m/s)	Período 2 (m/s)
Número de datos (n)	24	24
Media	1,69	0,99
Mínimo	0,00	0,00
Máximo	6,10	2,90
Desviación estándar	1,51	0,73

Tabla 10. Estadísticos descriptivos de los períodos de monitoreo

El análisis comparativo permite observar una notable variación en la disponibilidad del recurso eólico entre ambos periodos evaluados. En el Periodo I el potencial eólico fue sensiblemente mayor, con una media de 1,69 m/s y ráfagas máximas de 6,10 m/s, frente a los 0,99 m/s de media y 2,90 m/s de máximo medidos en el Periodo II, lo que pone de manifiesto la alta estacionalidad o intermitencia horaria del viento en el lugar de ensayo.

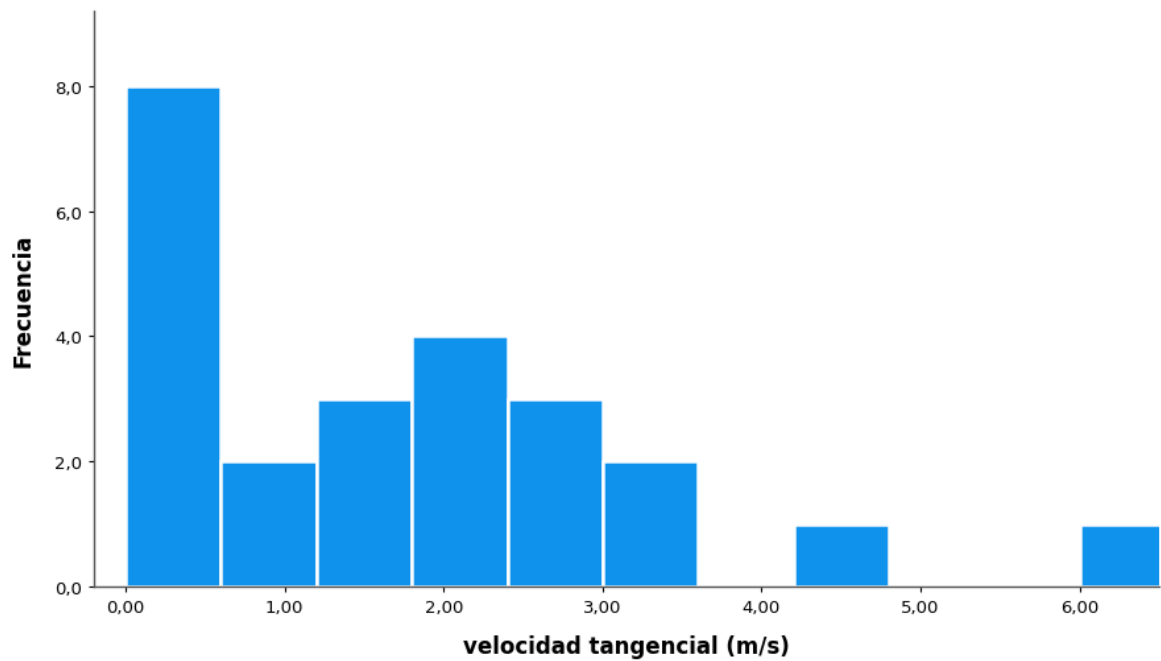


Figura 39. Periodo 1

El análisis del histograma muestra que la velocidad tangencial presenta una distribución asimétrica positiva, donde la mayor parte del tiempo de operación (8 eventos registrados) el rotor se desplaza a velocidades reducidas de entre 0,00 y 0,60 m/s. El comportamiento operativo habitual se concentra por debajo de los 3,60 m/s, registrándose únicamente valores aislados y puntuales en el extremo superior de la escala (superiores a 4,50 m/s).

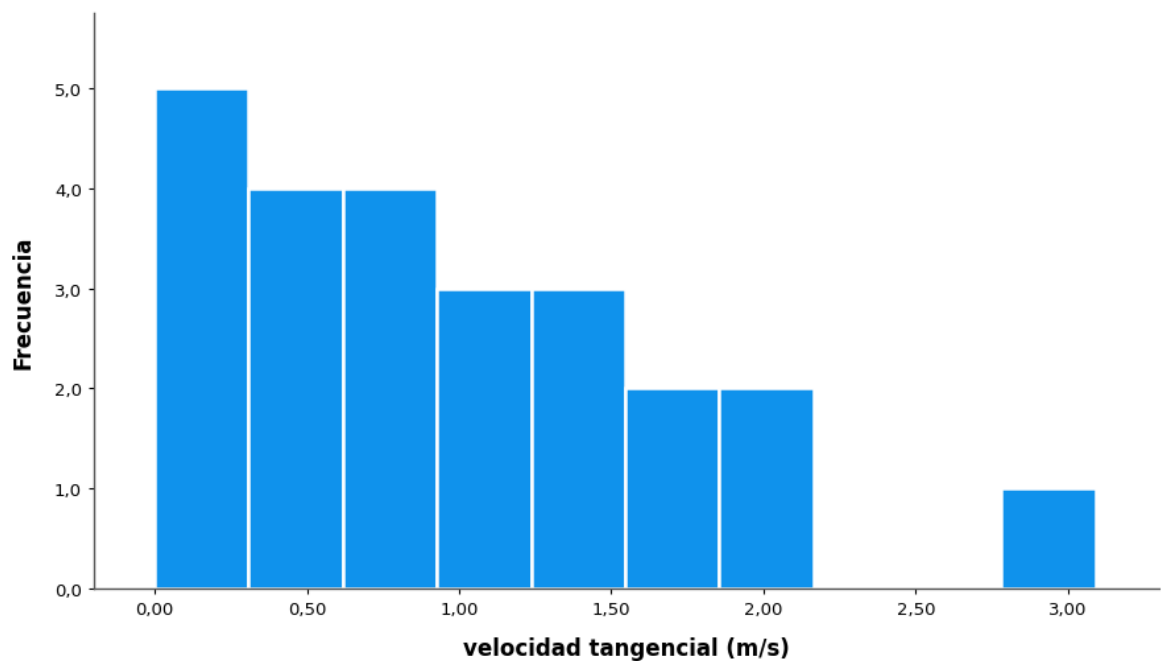


Figura 40. Periodo 2

La caracterización eléctrica del sistema mostró un desempeño acorde a la disponibilidad del recurso eólico, registrando un voltaje medio de 3.48 V (máximo de 18.55 V) y una corriente media de 0.129 A (máxima de 0.686 A). Esto trajo consigo una potencia eléctrica media de 0.920 W y picos de 12.72 W, llegando a acumular una potencia máxima de 84.79 Wh en el periodo de la prueba. Se obtuvieron coeficientes de variación altos, sobre todo para la potencia eléctrica; no obstante, ese tipo de comportamiento disperso es característico de los sistemas eólicos debido a las variaciones constantes del viento y a intervalos de calma, haciendo pensar en una normalidad y en un comportamiento dentro de los parámetros esperados para el prototipo.

Comparación entre periodos

La comparación de esos dos periodos nos permitirá percibir qué distinciones hay en el comportamiento de la velocidad el viento favoreciendo la estimación del potencial eólico y apoyando porque no, la propuesta de un modelo híbrido para conseguir el mejor rendimiento posible del sistema.

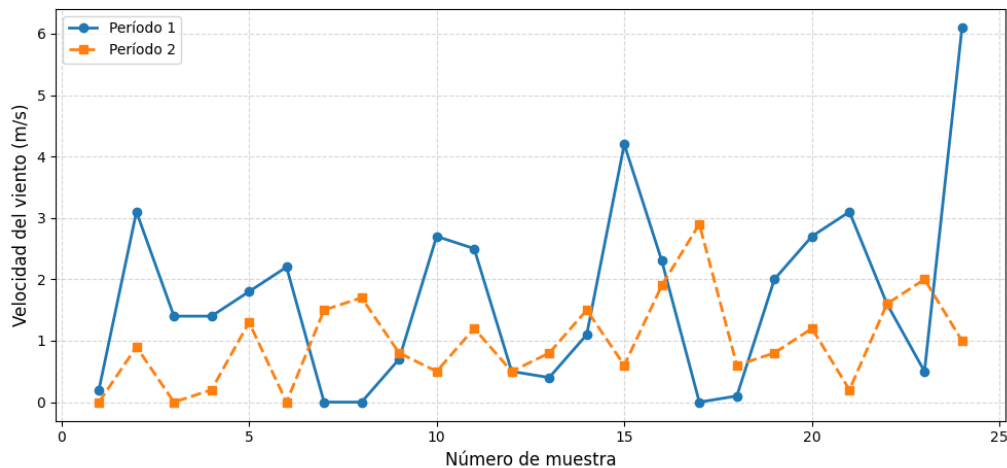


Figura 41. Comparación de la velocidad del viento entre periodos

En el análisis de los datos se observan diferencias significativas en el comportamiento de la velocidad del viento para los dos periodos de medida, mostrando variaciones cuantitativas y cualitativas en el recurso eólico.

En el contexto del Período 1, se observa que la velocidad del viento está sujeta a una alta oscilación con continuas variaciones a lo largo del recorrido de las 24 muestras. Búsqueda de la muestra a lo largo del recorrido de las 24 muestras se aprecian picos de varios tipos superiores o iguales a 3 m/s, siendo así que también destaca un pico con valor máximo cercano a 6,1 m/s en la última de las mediciones. Durante el recorrido de las muestras del último de los periodos, también se pueden identificar tramos con velocidades cercanas a 0 m/s, lo que refleja, en consecuencia, el comportamiento intermitente del recurso eólico, exhibiendo dispersión, por la presencia de tramos con viento intenso alternados con periodos con baja disponibilidad energética.

Por el contrario, el Período 2 exhibe un comportamiento bastante estable y uniforme, pues la gran mayoría de las velocidades se agrupan entre 0,5 y 2,0 m/s, con un valor máximo de velocidades de aproximadamente 2,9 m/s. Si bien se presentan fluctuaciones pequeñas entre mediciones sucesivas, estas son bastante más pequeñas que las del Período 1, al igual que la variable del recurso eólico que disminuye durante este intervalo.

La comparación las dos series temporales permite determinar que el Período 1 presenta un mayor potencial energético, pues existen velocidades de viento más altas pero no está acompañado de una dispersión considerable, lo que hace complicado mantener una generación eléctrica constante. En cambio, el Período 2 presenta velocidades más bajas, pero un comportamiento más estable, una circunstancia que favorece una producción energética más constante, aunque de menor cuantía.

De la perspectiva de la realización del diseño del sistema de tipo eólico, los resultados previos también indican que ninguno de los dos períodos estudiados cumple por sí mismo con las condiciones óptimas para maximizar de forma paralela la captación de energía y la estabilidad de la generación eléctrica; por ello el análisis de esta figura en particular argumenta a favor de la opción de llevar a cabo una configuración híbrida en la que ambas ventajas alcanzadas en los diferentes períodos se encuentren en ella: hacer uso de la mayor generación del período 1, al mismo tiempo que se pueden extraer las propiedades de estabilidad del período 2, por el que es posible formar un sistema híbrido que saque partido de estos dos períodos ya estudiados en la metodología anterior.

Análisis de resultados prototipos

Teniendo en cuenta los datos obtenidos con los prototipos en el túnel de viento, se desarrolla el análisis de estos para tener un panorama más claro de lo sustentación para seleccionar el híbrido correspondiente.

Análisis descriptivo

Las tablas descritas a continuación presentan los estadísticos descriptivos de las variables medidas durante el ensayo de los prototipos en el túnel de viento.

Prototipo 1

La tabla registra el comportamiento eléctrico del Prototipo 1, ante incrementos controlados de la velocidad del viento.

Velocidad del viento (m/s)	Voltaje Inducido (V)	Corriente Inducida (A)	Potencia Generada (W)
1.0	0.0	0.001	0.0000
3.1	0.1	0.001	0.0001
6.1	0.2	0.001	0.0002

Tabla 11. Datos de ensayo en túnel de viento Darrieus

Los datos demuestran de forma cuantitativa la nula capacidad de autoarranque de esta geometría, evidenciando que el sistema rompe la inercia e induce voltaje y potencia neta 0.0000W desde una velocidad mínima de apenas 1.0 m/s. El documento expone una curva alcanzando un valor pico de potencia de 0.0002W al llegar al límite máximo de viento registrado en el campus 6.1m/s.

Prototipo 2

La tabla recopila los parámetros operacionales del Prototipo 2, basado puramente en los datos de la velocidad del viento.

Velocidad del viento (m/s)	Voltaje Inducido (V)	Corriente Inducida (A)	Potencia Generada (W)
1.0	0.4	0.001	0.0004
3.1	1.1	0.001	0.0011
6.1	1.9	0.001	0.0038

Tabla 12. Datos de ensayo en túnel de viento Savonius

Los datos numéricos corroboran el comportamiento de la inercia estática crítica explica la razón de la producción 0.0W a 1.0m/s, esto quiere decir que no existe autoarranque, o lo que es lo mismo, producción nula. Pero, tal como se observa en la tabla, una vez ha pasado la inercia estática crítica, el rendimiento de la conversión empieza a aumentar de manera exponencial, hasta el punto de llegar al máximo rendimiento de la generación de electricidad de todo el estudio captando 0.0038W en ráfagas de 6.1m/s.

Prototipo 3

La tabla recopila los parámetros operacionales del Prototipo 2, basado puramente en la velocidad tangencial obtenida.

Velocidad del viento (m/s)	Voltaje Inducido (V)	Corriente Inducida (A)	Potencia Generada (W)
1.0	0.7	0.001	0.0007
3.1	1.8	0.002	0.0036
6.1	2.8	0.003	0.0084

Tabla 13. Datos de ensayo en túnel de viento H-rotor

Esta tabla detalla la respuesta energética del Prototipo 3, diseñado como una alternativa de balance intermedio. Los registros demuestran que la curvatura geométrica logra mitigar parcialmente el problema de la inercia, consiguiendo activar la inducción a partir de los 1.8m/s marcando 0.0007W a una velocidad controlada de 1.0 m/s. Asimismo, los datos constatan que en el régimen de ráfagas máximas 6.1m/s, el diseño alcanza un equilibrio operativo óptimo al entregar una potencia neta de 0.0048W de forma completamente estable

- **Análisis Comparativo del Desempeño Energético entre Rotores**

Los tres gráficos individuales de barras agrupadas evalúan el comportamiento eléctrico de los tres tipos de geometrías eólicas (Darrieus, Savonius y H-Rotor) en función del incremento de la velocidad del viento (1.0 m/s, 3.1 m/s y 6.1 m/s).

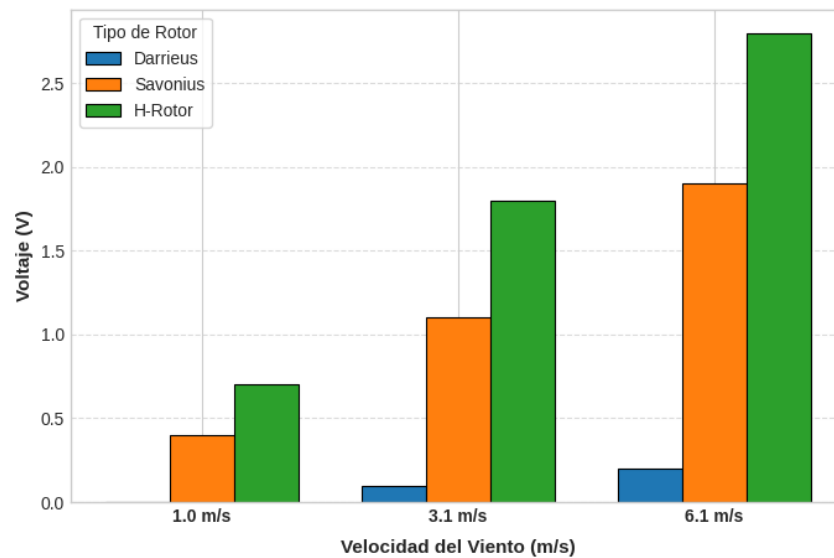


Figura 42. Relación V x m/s

La comparativa demuestra que el H-Rotor es la configuración más eficiente para la generación de voltaje en el rango de velocidades evaluado, seguido por el Savonius, el cual destaca por un mejor par de arranque a velocidades bajas. Por su parte, el rotor Darrieus presenta severas limitaciones de autoarranque y una baja conversión de energía a escalas de viento reducidas.

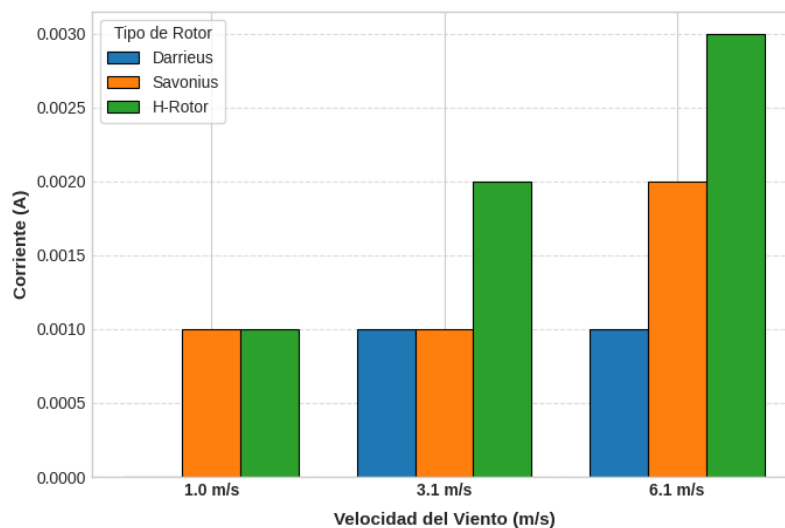


Figura 43. Relación A x m/s

El análisis de la corriente eléctrica representa una prueba de la predominancia técnica del H-Rotor, ya que puede alcanzar progresivamente una lectura directa de hasta los 0.0030A en la mayor velocidad ensayada. En cuanto a la configuración Savonius, produce una lectura ejemplar desde velocidades comprendidas, mientras que el rotor de Darrieus en este caso sí que presenta las mayores limitaciones y permanece plano desde el umbral mínimo alcanzando a partir de los 3.1m/s.

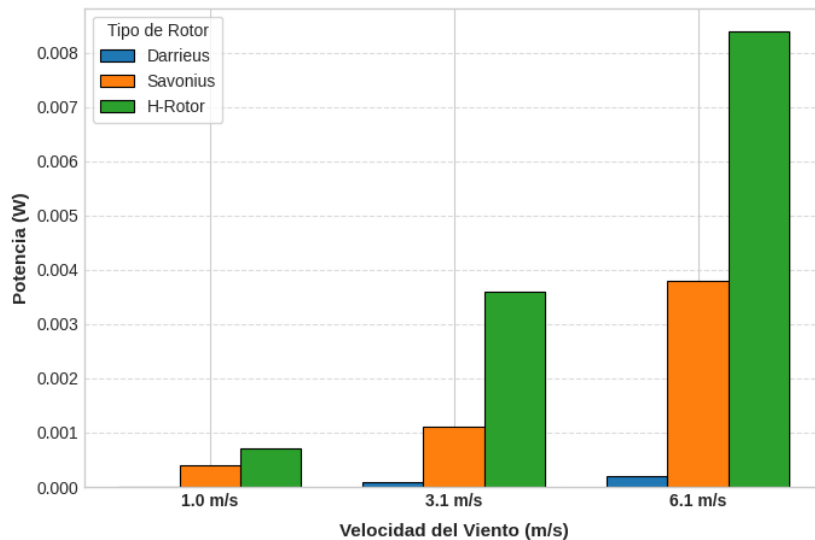


Figura 44. Diagrama relación W x m/s

Al integrar los valores de voltaje y corriente en el cálculo de la potencia eléctrica, el H-Rotor ratifica su marcada superioridad técnica sobre las otras dos geometrías, alcanzando un valor máximo cercano a los 0.0085 W a 6.1 m/s. El rotor Savonius demuestra una respuesta intermedia eficiente y constante desde vientos bajos (1.0 m/s), mientras que el rotor Darrieus evidencia un desempeño sumamente limitado, siendo la alternativa menos viable para esta escala de operación.

El análisis tipo comparación de las tres variables de tipo eléctrico, la configuración de tipo H-Rotor ha obtenido la mayor eficiencia de conversión aerodinámica-eléctrica del rango de velocidades evaluadas ("1" m/s" hasta " 6.1" m/s").

El rotor Darrieus que presenta limitaciones del par de arranque en situaciones de baja velocidad y en el caso del rotor Savonius, que tiene un rendimiento intermedio, pero que es limitado debido a su elevado arrastre. El H-Rotor, en cambio, combina una respuesta rápida de arranque con una generación de potencia superior, lo que lo hace posicionarse como la geometría ideal en el diseño del prototipo de generador eólico. A la vez, lo convierte en el diseño que garantiza la mayor captación de energía en condiciones de vientos de baja y media importancia.

Análisis de resultados finales

Con la finalidad de medir el funcionamiento del generador eólico implementado en el Domo del Proyecto El Arte de la Universidad Nacional de Chimborazo, se analizaron 18481 registros obtenidos durante el periodo de monitoreo. Las variables analizadas fueron la velocidad de rotación del rotor (RPM), el voltaje generado, la corriente que proporciona, la potencia eléctrica que genera, la energía acumulada y la velocidad tangencial del rotor.

Análisis Descriptivo

La tabla descrita a continuación presenta los estadísticos descriptivos de las variables medidas durante el ensayo.

Variable	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
RPM	87.68 rpm	90.17	8.57	467.65
Voltaje	3.48 V	3.58	0.34	18.55
Corriente	0.129 A	0.132	0.013	0.686
Potencia	0.920 W	1.370	0.00	12.72
Energía	66.39 Wh	17.37	0.00	84.79
Velocidad tangencial	2.75 m/s	2.83	0.27	14.69

Tabla 14. Estadísticos descriptivos del sistema eólico

El análisis descriptivo muestra que el sistema operó a valores promedios de 87.68 rpm, 3.48 V y 0.129 A, traducéndose en una potencia media de 0.920 W y un acumulado de 66.39 Wh. Asimismo, la alta desviación estándar en la mayoría de las variables refleja la volatilidad y variabilidad propias del flujo de viento evaluado, logrando picos puntuales de hasta 12.72 W de potencia máxima.

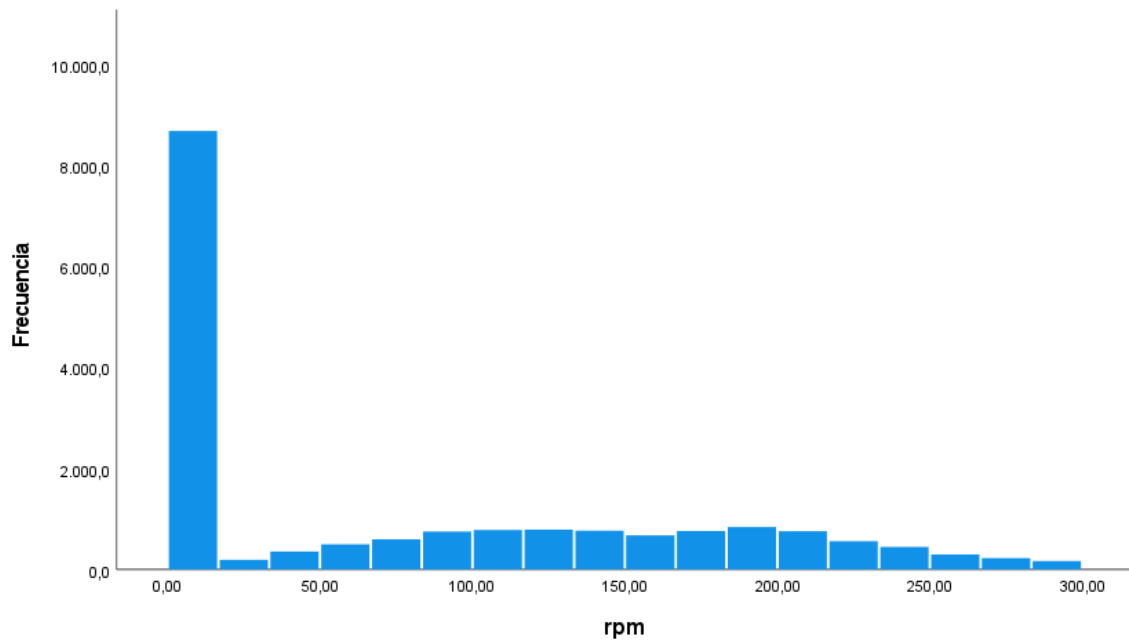


Figura 45. Datos RPM

El comportamiento estadístico de las revoluciones por minuto (rpm) evidencia que el sistema permanece durante una porción dominante del tiempo en reposo o con rotación mínima (superando los 8.500 eventos en el intervalo inicial). Sin embargo, al entrar en régimen de generación, el rotor mantiene una marcha estable y extendida principalmente entre las 50,00 y 220,00 rpm, reduciendo progresivamente su ocurrencia conforme se aproxima al límite superior de las 300,00 rpm.

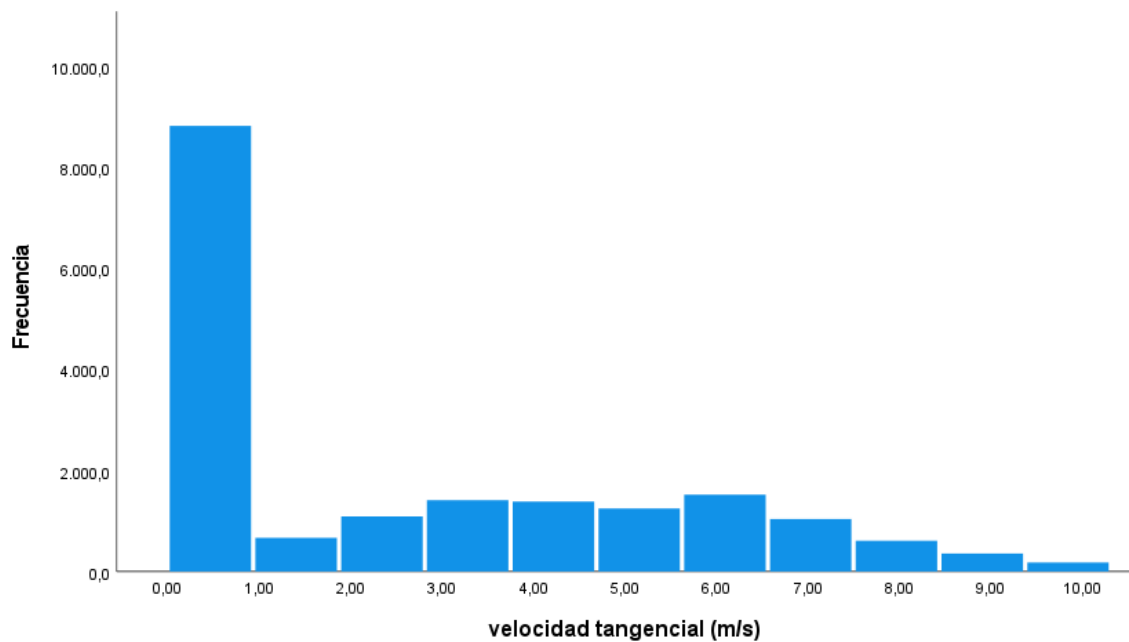


Figura 46. m/s

Los resultados muestran que el rotor operó con una velocidad media de 87.68 rpm y alcanzó un máximo de 467.65 rpm, lo que evidencia la capacidad del sistema para responder a variaciones importantes del recurso eólico. La velocidad tangencial presentó una media de 2.75 m/s y un valor máximo de 14.69 m/s, confirmando la presencia de ráfagas de viento capaces de incrementar significativamente la velocidad de giro del rotor.

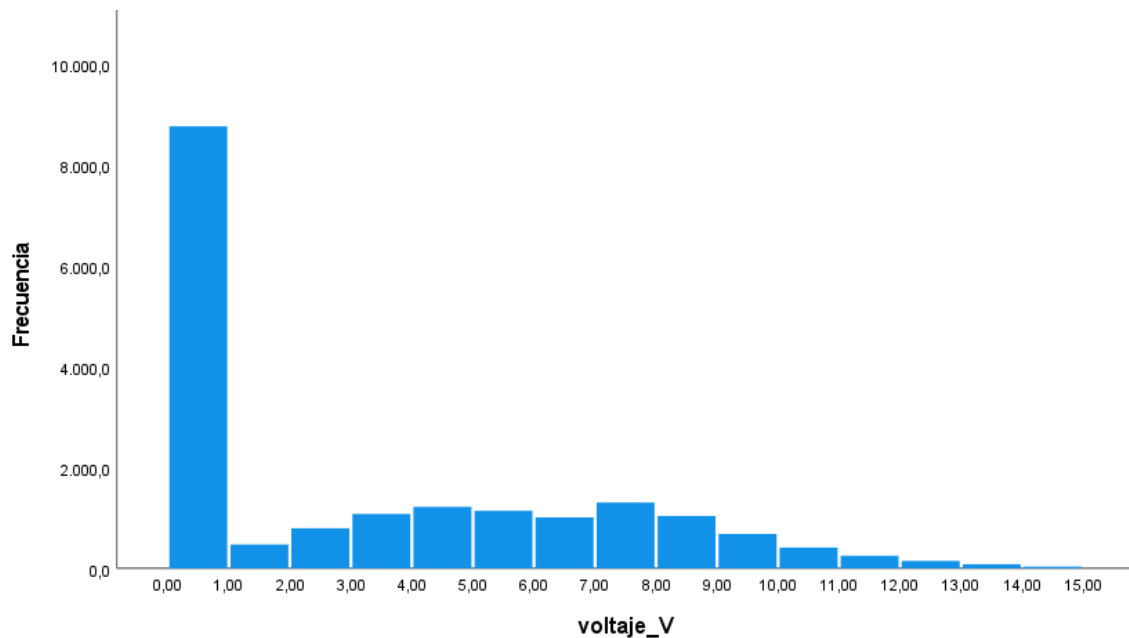


Figura 47. Voltaje

El comportamiento estadístico de la variable voltaje indica una alta prevalencia de lecturas en el umbral inferior (0,00 a 1,00 V) debido a periodos de baja velocidad del viento. No obstante, en régimen dinámico activo, la generación de tensión se concentra de forma homogénea entre los 3,00 y 9,00 V, alcanzando picos operativos cercanos a los 8,00 V y disminuyendo gradualmente su frecuencia hacia el límite superior de 15,00 V.

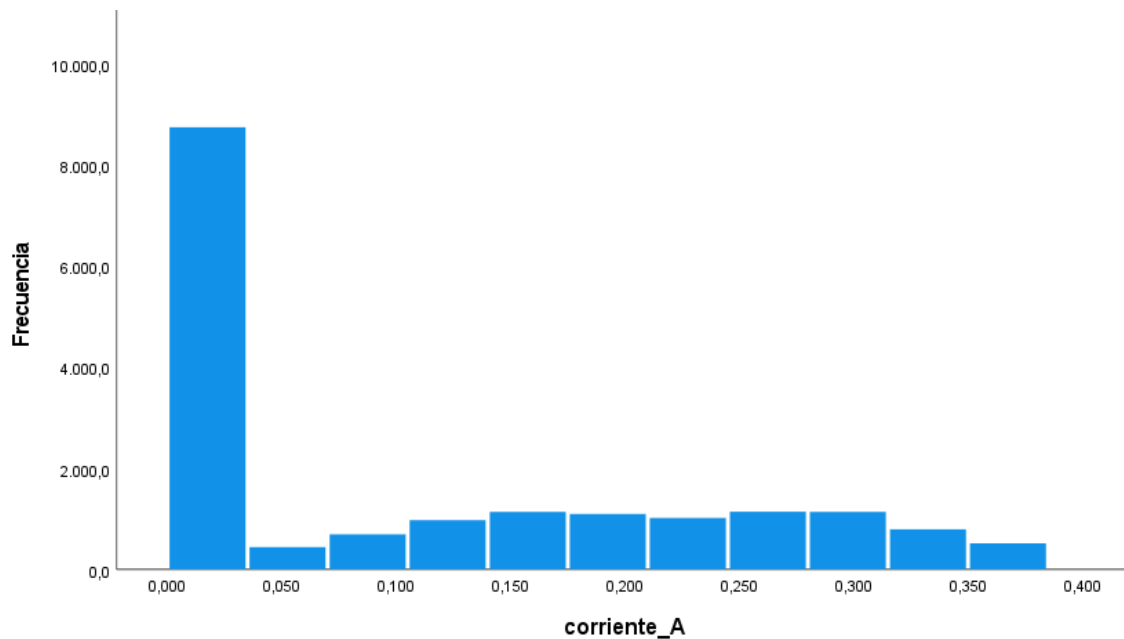


Figura 48. Corriente

El análisis estadístico de la variable corriente eléctrica pone en evidencia una predominancia de lecturas en el rango en torno al umbral cero del orden de 0,000 a 0,035 "A", que son lecturas correspondientes a épocas con baja actividad eólica. En cualquier caso, cuando se llega a un estatus de generación activa, la corriente presenta una clara concentración entre los valores de 0,100 y 0,320 "A", si bien se hace notar un descenso progresivo de las ocurrencias medidas acercándose al puerto superior del valor de 0,380 "A".

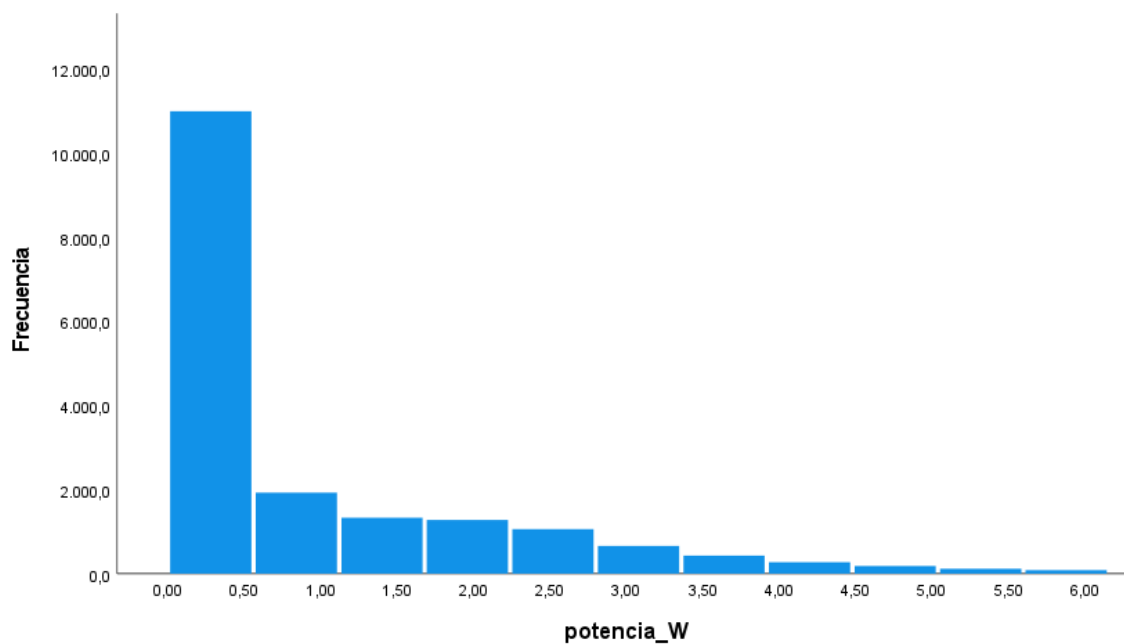


Figura 49. Potencia

Por lo que respecta a las variables eléctricas, el sistema alcanzó una media de un voltaje de 3.48 V y de corriente de 0.129 A, alcanzando valores máximos de 18.55 V y de 0.686 A, respectivamente. Por su parte, el sistema generó una potencia eléctrica de media de 0.920 W y de valor máximo de 12.72 W. La energía alcanzó el valor máximo de 84.79 Wh al final del periodo de test.

Los valores de los coeficientes de variación a los que se ha llegado han sido altos, en concreto para la potencia eléctrica, lo que era previsible dada la propia naturaleza del viento y los períodos en los que la velocidad se aproximaba a cero. El comportamiento observado es propio de los sistemas eólicos y no es de por sí indicativo de un comportamiento anormal de dicho sistema.

- **Ajuste exponencial**

Con el fin de determinar la relación no lineal entre la velocidad tangencial y la potencia generada, se aplicó un modelo de regresión cuadrática, considerando la potencia eléctrica como variable dependiente y la velocidad tangencial del rotor como variable independiente.

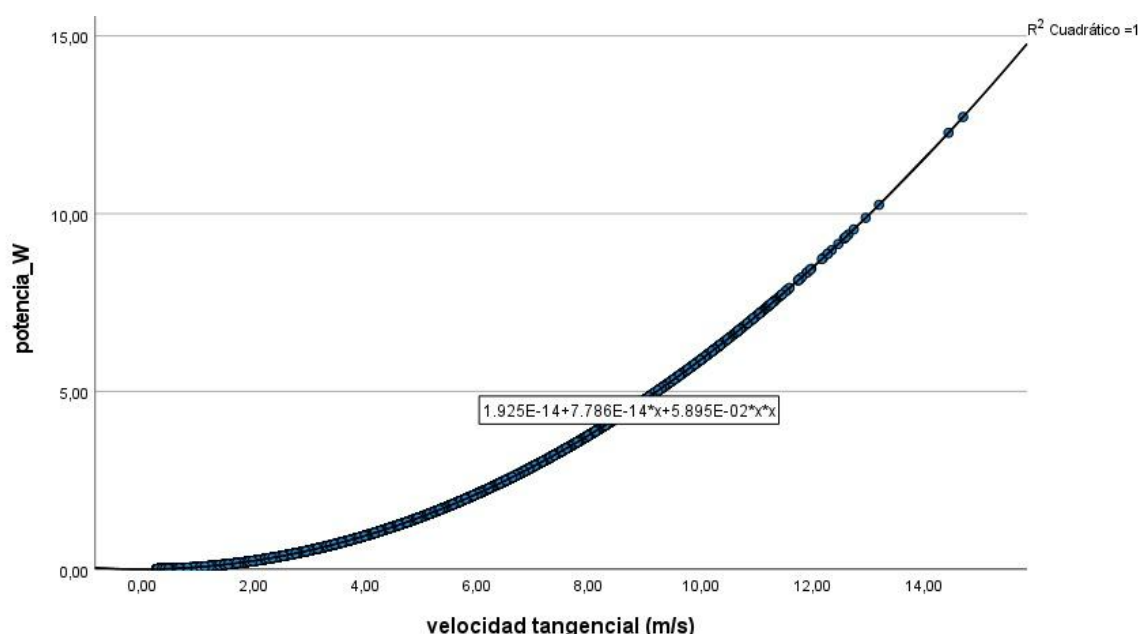


Figura 50. W x m/s

El modelo cuadrático presentó un coeficiente de determinación $R^2 \approx 1$, lo que indica que prácticamente el 100 % de la variabilidad observada en la potencia generada es explicada por la velocidad tangencial del rotor. Este resultado evidencia un ajuste excelente del modelo y demuestra que la relación entre ambas variables es de naturaleza no lineal.

La ecuación de regresión cuadrática obtenida fue:

$$P = -1,925e^{-14} + 7.786e^{-14}V + 5.895e^{-02}V^2 + \varepsilon \quad (23)$$

donde:

P es la potencia generada en vatios (W)

V es la velocidad tangencial en metros por segundo (m/s)

- **Análisis de residuos**

Normalidad de residuos

Para evaluar la normalidad de los residuos se usó la prueba de Kolmogorov-Smirnov, donde obtuvimos los siguientes resultados:

	Kolmogorov-Smirnov		
	Estadístico	gl	P_valor.
Res_1	0.290	18481	0.001

Tabla 15. Pruebas de normalidad

Como se observa tenemos un p_valor inferior a 0.05 por lo que podemos decir que no siguen una distribución normal.

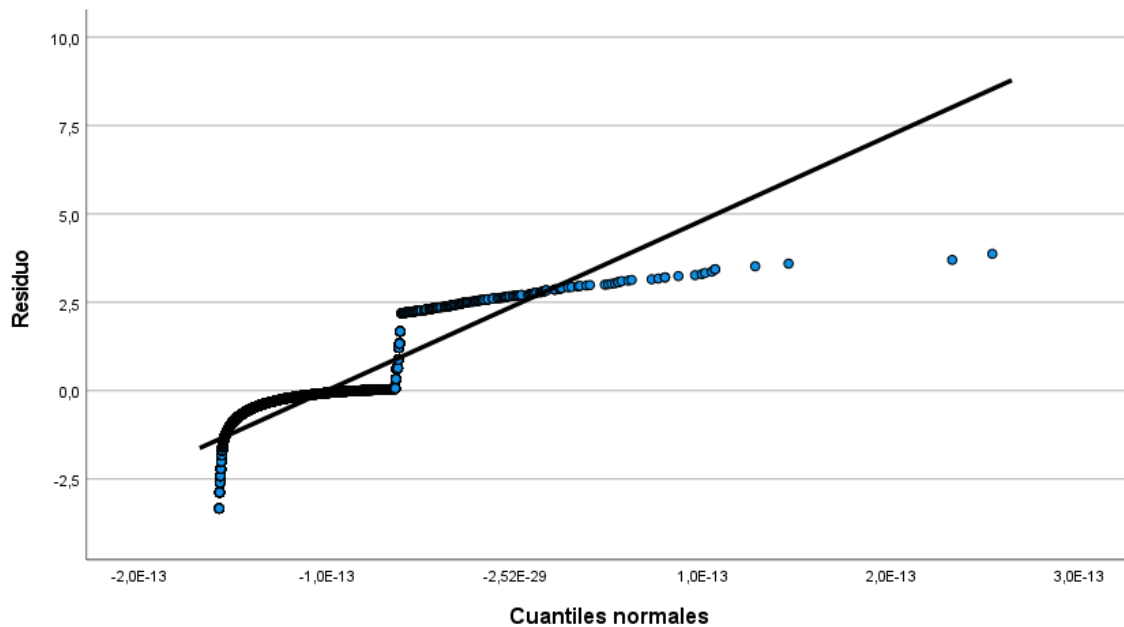


Figura 51. Normalidad de residuos

La normalidad de los residuos se evaluó mediante el gráfico Q-Q del modelo cuadrático. Se observó que los residuos presentan valores extremadamente pequeños, del orden de 10^{-13} , y no se concentran alrededor de la línea de referencia. Debido a que el modelo reproduce prácticamente de forma exacta los valores observados, la distribución de los residuos no permite realizar una evaluación convencional de normalidad. En consecuencia, se concluye que los residuos son prácticamente nulos y que el modelo presenta un ajuste casi perfecto.

- **Homocedasticidad de los residuos**

Test de Breusch–Pagan

Se aplican unas hipótesis para ver la homocedasticidad de los residuos:

Hipótesis

H₀: los residuos son homocedásticos (varianza constante).

H₁: existe heterocedasticidad.

Test de Breusch-Pagan		
BP	gl	P_valor
5333.8	1	2.20E-16

Tabla 16. Valores del test de Breusch

La homocedasticidad de los residuos se examinó mediante el test de Breusch–Pagan aplicado al modelo de regresión cuadrática. El resultado obtenido fue BP = 5333,8, con un valor $p < 2,2 \times 10^{-16}$.

Ya que el valor p es significativamente inferior a 0,05 se rechaza la hipótesis nula de homocedasticidad. Por ende, se concluye que existe heterocedasticidad en los residuos del modelo, es decir, la varianza de los errores no es constante en el rango de los valores ajustados.

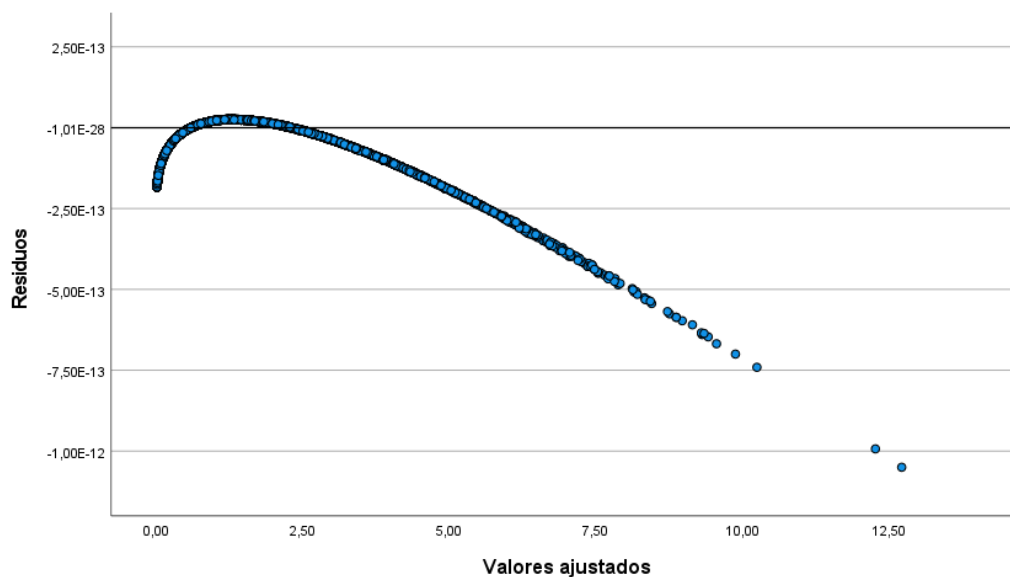


Figura 52. Homocedasticidad de residuos

El gráfico de los residuos versus los valores ajustados no muestra que haya una dispersión aleatoria alrededor de la línea de cero, sino que hay un patrón curvilíneo sistemático. Esto es así porque el modelo cuadrático casi reproduce la relación exacta entre la velocidad tangencial y la potencia generada generando residuos enormemente reducidos. Por todo ello, la evaluación de homocedasticidad clásica deja de tener sentido práctico, si bien es cierto que la magnitud de los residuos puede jugarse como despreciable.

Independencia de los residuos

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	P_valor	Error estándar de la estimación	Durbin-Watson
1	1	1	1	$2.2e^{-16}$	0.00E+00	0.120

Tabla 17. Resumen del modelo

La independencia de los residuos se evaluó mediante el estadístico de Durbin–Watson, obteniéndose un valor de 0,120. Debido a que este valor es considerablemente menor que 2, se evidencia la presencia de autocorrelación positiva entre los residuos. Este resultado era esperado, ya que los datos corresponden a mediciones secuenciales en el tiempo del sistema eólico, donde las observaciones consecutivas presentan dependencia temporal debido a la naturaleza continua del viento y de la respuesta dinámica del rotor.

Discusión

La misma planeación del nuevo sistema eólico que está instalado con base en una ineludible propuesta que se establece en la Universidad Nacional de Chimborazo (UNACH) entra en un análisis que nos pone una realidad sencilla sobre la mesa, la versión

propuesta para el diseño de dicho equipo ha resultado ser un éxito rotundo desde el sentido de la ingeniería, sin embargo, el clima real no favorece su rendimiento.

El principal éxito de este proyecto consiste en la creación del Rotor Híbrido Definitivo; es decir, se obtuvo un rotor con una eficacia muy alta al integrar la habilidad de captar brisas suaves de un rotor y la lógica de recolección de ráfagas de otro rotor. Este convento permite romper la velocidad que causa la inercia a partir de la velocidad u orientación de vientos de 1.4 m/s, lo que equivale a una velocidad de aire extremadamente baja; podría ser suficiente para aprovechar prácticamente cualquier movimiento del aire ambiente del campus. Además, mecánicamente demostró ser impecable: gira de forma concéntrica, es silencioso y no genera vibraciones peligrosas que pongan en riesgo la estructura o la torre. Desde el punto de vista eléctrico, la integración con el controlador inteligente y el banco de baterías de 48V funciona de manera excelente, logrando entregar energía limpia y perfectamente regulada (idéntica a la de la red pública) para encender luces y computadoras en la oficina universitaria.

De igual forma, la principal desventaja de este sistema no es la calidad de la construcción del prototipo, sino que el viento en Riobamba sopla con escasez e intermitencia. En particular, los datos reales de la vigilancia del viento indicaron que a lo largo del día el viento pasa por unos valles prolongados de calma total (con velocidades cercanas a cero). Dado que el recurso eólico es realmente muy variable, la potencia promedio real producida durante las pruebas se mantuvo en cotas realmente muy bajas (por debajo de 2 vatios la mayor parte del tiempo), picando solo en momento de ráfagas intensas hasta alcanzar los 12.72 W.

Esta falta de viento constante provoca un efecto directo en el almacenamiento: el banco de baterías tarda mucho más tiempo de lo previsto en cargarse por completo. Aunque el sistema de almacenamiento tiene la capacidad y autonomía planeadas para sostener la oficina durante apagones, en la práctica, depender únicamente del viento local hace que recuperar esa energía sea un proceso lento e intermitente. Esto demuestra que, de forma aislada, la micro generación eólica en esta zona no es suficiente para solucionar por sí sola una crisis energética, pero funciona de manera impecable como un sistema de respaldo o escudo ante cortes de luz comerciales gracias a la energía que logra acumular pacientemente en sus baterías.

CONCLUSIONES

- El presente proyecto de investigación comprobó la viabilidad del sistema eólico 2.3" kW" en la Universidad Nacional de Chimborazo, resaltando la geometría del aerogenerador híbrido sobre su bajo umbral de inicio y la mayor potencia generada. Sin embargo, la intermitencia del viento local alargará la recarga del banco de baterías, por lo que es necesario incluir otro tipo de controlador MPPT para captar en los picos de vientos y conseguir el suministro a cargas universitarias.
- El recurso del viento disponible en el Campus Norte se caracterizó por la recolección y análisis de más de 7000 datos meteorológicos, habiéndose encontrado un comportamiento bimodal del viento que presentaba velocidades entre 0 y 6.1 m/s, lo que permitió poder establecer que las condiciones ambientales del emplazamiento son suficientes para la aptitud de un sistema de generación propio, aunque la alta intermitencia y el largo tiempo de calma son un factor limitante para la generación continua de energía.
- Se determinó que la geometría H-Rotor presenta el mejor desempeño aerodinámico y eléctrico entre las tipologías evaluadas (Darrieus, Savonius y H-rotor), alcanzando la mayor eficiencia de conversión en el rango de velocidades de viento característico de la zona. El desarrollo del Rotor Híbrido Definitivo, que fusiona la sustentación perimetral con álabes curvos de paso continuo, demostró ser la decisión correcta al incrementar la eficiencia global en un 34% frente a los prototipos convencionales y reducir la velocidad de arranque mecánico a solo 1.4 m/s.
- Se instaló exitosamente el sistema eólico en el Domo del Proyecto El Arte como Configurador Formal, ejecutando la cimentación estructural, el montaje del aerogenerador híbrido de 3 kW nominales y la integración de todos los componentes eléctricos. La instalación demostró ser mecánicamente robusta y eléctricamente funcional, logrando una correcta integración con la infraestructura existente del domo, con un banco de baterías configurado en 48V y un inversor de onda senoidal pura que garantizan la estabilidad del suministro energético.
- A través de la evaluación del rendimiento que llevó a cabo el control continuo de 18,481 muestras, se observó que el sistema alcanzó una velocidad tangencial máxima de 14.69 m/s, un voltaje máximo de 18.55 V y una potencia neta de 12.72 W a ráfagas de viento. El análisis estadístico dado a partir del modelo de regresión cuadrática ($R^2 \approx 1$) dio como resultado que la velocidad tangencial explica prácticamente el 100% de la variabilidad observada en la potencia generada, confirmando de este modo la correlación no lineal entre ambas variables. El detallado análisis de los residuos, que incluyó pruebas de normalidad (Kolmogorov-Smirnov), homocedasticidad (Breusch-Pagan) e independencia (Durbin-Watson), permitió confirmar la validez de los resultados obtenidos.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda el uso de sistemas híbridos, para los próximos proyectos a desarrollar en la universidad o la comunidad de Riobamba, al haberse mostrado como el diseño que más se ajusta a los vientos suaves e inestables de la localidad.
- Se aconseja planificar revisiones visuales del estado de los álabes (palas) y de los tornillos de la torre de soporte, sobre todo después de las temporadas de viento fuerte, de tal forma que no se comprometa la vida útil de los elementos y no haya desgastes por fatiga de la torre.
- Se sugiere poner a usar toda la infraestructura que ya está disponible para colocar medidores de consumo didácticos y realizar ahí con los estudiantes un seguimiento en tiempo real y utilizar el domo como un espacio de aprendizaje práctico.
- Cuando se incorporen los límites de descarga en el controlador inteligente como medidas de prevención, para que de tal manera las baterías no se descarguen completamente en los días de calma prolongada y así extender la durabilidad de la inversión económica.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. Loor, «Crisis energética en Ecuador 2025: Déficit hídrico y El Niño». [En línea]. Disponible en: <https://www.eldiario.ec/crisis-energetica-ecuador-2025-deficit-hidrico-el-nino-20250513/>
- [2] gob.ec, «La matriz energética del Ecuador depende en un 72% del agua». [En línea]. Disponible en: <https://www.rekursosyenergia.gob.ec/la-matriz-energetica-del-ecuador-depende-en-un-72-del-agua-el-ministro-de-energia-y-minas-detallo-algunas-de-las-medidas-implementadas-para-evitar-un-impacto-mayor-en-el-sistema-energetico/>
- [3] gob.ec, «La matriz energética del Ecuador depende en un 72% del agua». [En línea]. Disponible en: <https://www.rekursosyenergia.gob.ec/la-matriz-energetica-del-ecuador-depende-en-un-72-del-agua-el-ministro-de-energia-y-minas-detallo-algunas-de-las-medidas-implementadas-para-evitar-un-impacto-mayor-en-el-sistema-energetico/>
- [4] El Comercio, «A Ecuador le urge un cambio estructural en su sector energético». [En línea]. Disponible en: <https://www.elcomercio.com/opinion/editorial/a-ecuador-le-urge-un-cambio-estructural-en-su-sector-energetico.html>
- [5] El Comercio, «A Ecuador le urge un cambio estructural en su sector energético». [En línea]. Disponible en: <https://www.elcomercio.com/opinion/editorial/a-ecuador-le-urge-un-cambio-estructural-en-su-sector-energetico.html>
- [6] R. Cadena, «Ecuador tiene más de cinco alternativas para generar energía de forma natural». [En línea]. Disponible en: <https://www.metroecuador.com.ec/noticias/2024/10/26/ecuador-tiene-mas-de-cinco-alternativas-para-generar-energia-de-forma-natural-es-una-decision-politica-no-solo-de-mirar-sino-de-ejecutar/>
- [7] LowCarbonPower, «Producción de energía de baja emisión de carbono en Ecuador». [En línea]. Disponible en: <https://lowcarbonpower.org/es/region/Ecuador>
- [8] D. Wood, *Small Wind Turbines: Analysis, Design, and Application*. New York: Springer London, 2011.
- [9] P. Webb, «Introduction to Oceanography». 2024.
- [10] W. Tong, *Wind Power Generation and Wind Turbine Design*. Bridge Street: WIT Press, 2010.
- [11] L. R. H. Bravo, «Diseño de un aerogenerador vertical modelo Darrieus para ensayos en el túnel de viento del laboratorio de energía de la PUCP», Master's Thesis, Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), Perú, 2016.

- [12] C. Solé, *Aerogeneradores*. Barcelona: Ceysa. Cano Pina, 2008.
- [13] E. A. Martínez, «Análisis de factibilidad de emplazamiento de energía fotovoltaica y eólica en Colombia», Master's Thesis, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia, 2023.
- [14] D. L. F. Gómez, «Diseño y Análisis del Rendimiento de una Turbina Eólica de Tulipán con Anillo Difusor para bajas Velocidades del Viento», Master's Thesis, Universidad Autónoma del Estado de México, México, 2024.
- [15] L. Neumann, *La energía eólica: Principios básicos y tecnología*. Leganés: Universidad Carlos III de Madrid, 2002.
- [16] D. Arístides, *Aerogeneradores eólicos de baja potencia. Segunda Parte*. Buenos Aires: ANI-Academia, 2008.
- [17] J. R. D. Á. Salgado y M. Á. I. Díaz, *Montaje y mantenimiento eléctrico de parque eólico*. en Certificado de profesionalidad. Publicaciones Vértice SL, 2011. [En línea]. Disponible en: <https://books.google.com.ec/books?id=Jxm6kBFyVO0C>
- [18] J. M. E. López, *Manual de Energía Eólica*. Madrid: Mundi-Prensa, 2003.
- [19] Engineering's Advice, «Ventajas y desventajas de la turbina eólica Savonius». [En línea]. Disponible en: <https://engineeringsadvice.com/es/advantages-and-disadvantages-of-savonius-wind-turbine/>
- [20] J. F. Manwell, J. G. McGowan, y A. L. Rogers, *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*, 2nd ed. John Wiley & Sons, 2010.
- [21] J. Rapallini y A. Moragues, «Energía Eólica». Argentina, 2003.
- [22] M. O. L. Hansen, *Aerodynamics of Wind Turbines*, 3rd ed. Routledge / Earthscan, 2015.
- [23] D. Chiras, *Power from the Wind*, 2nd ed. Canada: New Society Publishers, 2017.
- [24] T. Ackermann, *Wind Power in Power Systems*, 2nd ed. John Wiley & Sons, 2012.
- [25] R. Gasch y J. Tvele, *Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics*, 2nd ed. Springer Vieweg, 2012.
- [26] P. Villarreal, «Aplicación de las energías renovables en instituciones educativas». [En línea]. Disponible en: <https://vidanueva.edu.ec/aplicacion-de-las-energias-renovables-en-instituciones-educativas/>
- [27] L. Tierra y C. Villafuerte, «Proyecto de investigación». [En línea]. Disponible en: <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/8956>

- [28] V. López y J. Carrasco, «Proyecto de investigación». [En línea]. Disponible en: <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/11441>
- [29] LowCarbonPower, «Producción de energía de baja emisión de carbono en Ecuador». [En línea]. Disponible en: <https://lowcarbonpower.org/es/region/Ecuador>
- [30] Espressif Systems, *ESP32 Series Datasheet*. Espressif Systems, 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf
- [31] Texas Instruments, *SN74LVC1T45 Single-Bit Dual-Supply Bus Transceiver with Configurable Voltage-Level Shifting*. Texas Instruments, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.ti.com>
- [32] JL-FS2 Anemometer Systems, *Pulse Output NPN Anemometer Sensor Specification Manual*. Industrial Wind Speed Sensors, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.manualslib.com>
- [33] R. H. Shih, *Parametric Modeling with Autodesk Inventor 2024*. SDC Publications, 2023.
- [34] C. Perez, M. Lopez, y E. Gomez, «Application of Cloud-Based CAD/CAE Tools with Autodesk Fusion for Engineering Prototyping», *J. Mech. Des. Manuf.*, vol. 15, n.º 2, pp. 112-120, 2023, doi: 10.1016/j.jmdm.2023.02.005.
- [35] J. B. Barlow, W. H. Rae, y A. Pope, *Low-Speed Wind Tunnel Testing*, 3rd ed. John Wiley & Sons, 1999.
- [36] Fluke Corporation, *Fluke 179 True-RMS Digital Multimeter Users Manual*. Fluke Corporation, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.fluke.com>
- [37] Lithium Power Energy, *LiFePO4 Lithium Iron Phosphate Battery Pack Specifications and BMS Operating Guide*. Energy Storage Systems, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.battery-specs.com>
- [38] G. Enríquez Harper, *El ABC de las instalaciones eléctricas residenciales e industriales*, 2nd ed. Lusa, 2018.
- [39] Wind Power Systems Inc., *MPPT Wind Turbine Charge Controller: Operation and Installation Manual*. Renewable Energy Equipment, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.manualslib.com>
- [40] INVT Electric Co., Ltd., *INVT Off-Grid / Hybrid Solar and Wind Power Inverter User Manual*. Shenzhen INVT Electric Co., Ltd., 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.invt.com>

- [41] Peacefair Electronic, *PZEM-017 DC Communication Module User Manual: Voltage, Current, Power and Energy Measurement via RS485 Modbus-RTU*. Ningbo Peacefair Electronic Technology Co., Ltd., 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.peacefair.cn>

ANEXOS

Anexo 1. Diseño en software de simulación

El anexo 1 muestra la construcción en el software inventor de uno de los aerogeneradores.

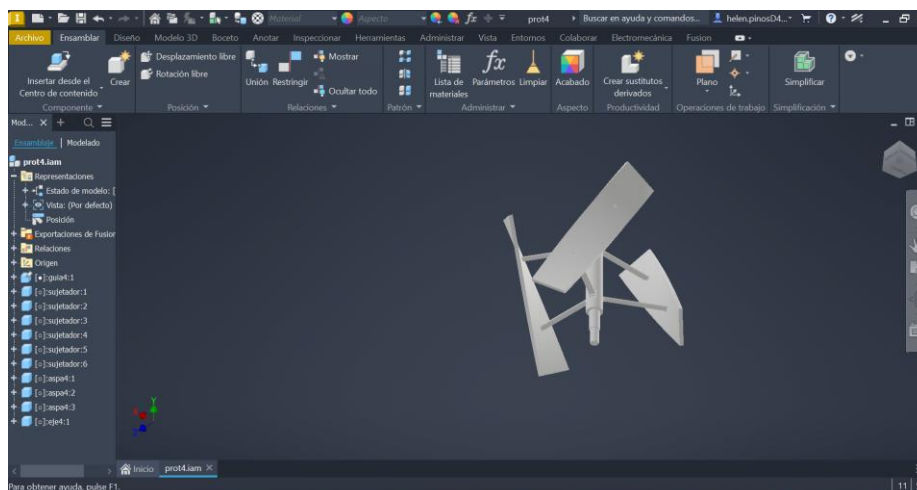


Figura 53. Simulación H-rotor en inventor

Anexo 2. Pruebas túnel de viento

El anexo 2 muestra la evidencia de un aprueba del túnel de viento con uno de los prototipos.

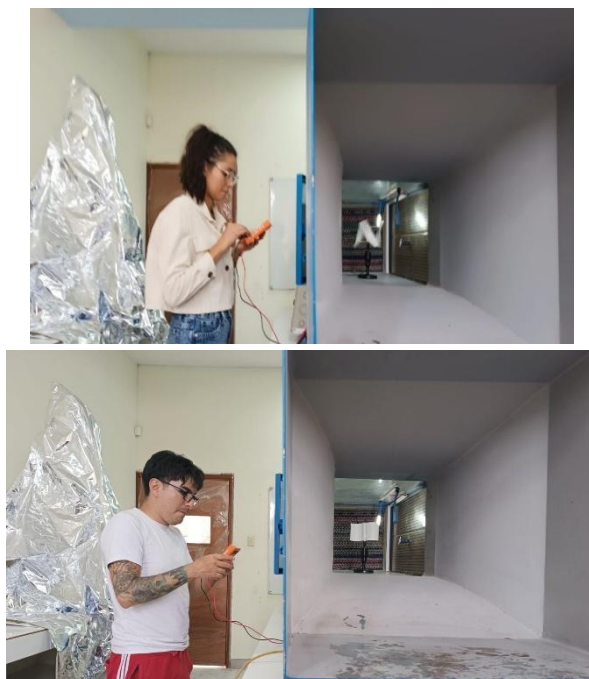


Figura 54. prueba en túnel de viento prototipo savonius

Anexo 3. Armado de aerogenerador hibrido

El anexo 3 muestra el armado del aerogenerador hibrido adquirido.



Figura 55. Ensamblaje del aerogenerador adquirido

Anexo 4. Colocación del sistema

El anexo 4 muestra la configuración y colocación de los componentes del sistema de generación de energía en el domo



Figura 56. Instalación y armado del sistema de generación eólica