

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN ENERGÍA**



UNS
UNIVERSIDAD
NACIONAL DEL SANTA

**Evaluación de un aerogenerador de eje vertical instalado en un vehículo
eléctrico para mejorar su autonomía**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO EN ENERGÍA**

Autores:

Bach. Asian Jara, Diego Alejandro

Bach. Villanueva Torrealva, Kerly Wily

Asesor:

Ms. Castillo Ventura, José Luis

DNI N° 32781530

Código ORCID: 0000-0002-0905-3024

NUEVO CHIMBOTE – PERÚ

2025-07-17

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN ENERGÍA



CARTA DE CONFORMIDAD DEL ASESOR

La presente Tesis para Título ha sido revisada y desarrollada en cumplimiento del objetivo propuesto y reúne las condiciones formales y metodológicas, estando en cuadrado dentro de las áreas y líneas de investigación conforme al reglamento general para obtener el Título Profesional en la Universidad Nacional del Santa (R.D: N°492-2017-CU-R-UNS) de acuerdo a la denominación siguiente

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO EN
ENERGÍA**

**EVALUACIÓN DE UN AEROGENERADOR DE EJE VERTICAL INSTALADO EN UN
VEHÍCULO ELÉCTRICO PARA MEJORAR SU AUTONOMÍA**

AUTORES :

- Bach. ASIAN JARA DIEGO ALEJANDRO
- Bach. VILLANUEVA TORREALVA KERLY WILY

Ms. JOSÉ LUIS CASTILLO VENTURA
DNI: 32781530
CÓD. ORCID: 0000-0002-09053024

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN ENERGÍA



CONFORMIDAD DEL JURADO EVALUADOR

El presente Jurado Evaluador da la conformidad del presente informe, desarrollado en cumplimiento del objetivo propuesto y presentado con forme al Reglamento General para obtener el Título Profesional en la Universidad Nacional del Santa, titulado:

**EVALUACIÓN DE UN AEROGENERADOR DE EJE VERTICAL INSTALADO EN UN
VEHÍCULO ELÉCTRICO PARA MEJORAR SU AUTONOMÍA**

AUTORES :

- Bach. ASIAN JARA DIEGO ALEJANDRO
- Bach. VILLANUEVA TORREALVA KERLY WILY

Revisado y evaluado por el siguiente Jurado Evaluador

Mg. AMANCIO RAMIRO ROJAS FLORES

PRÉSIDENTE

DNI: 32806031

CÓD. ORCID: 0000-0003-4897-7585

M.Sc. HUGO ROLANDO CALDERÓN TORRES

SECRETARIO

DNI: 32913914

CÓD. ORCID: 0000-0002-0210-5565

Mg. JOSÉ LUIS CASTILLO VENTURA

INTEGRANTE

DNI: 32781530

CÓD. ORCID: 0000-0002-0905-3024

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Siendo las 10:00 a.m., del día jueves 17 del mes de julio del año dos mil veinticinco, en el Aula E-4 de la Escuela Profesional de Ingeniería en Energía, en cumplimiento al Art. 68 del Reglamento General de Grados y Títulos, aprobado con Resolución N°337-2024-CU-R-UNS de fecha 12.04.24, se instaló el Jurado Evaluador designado mediante **Resolución N° 146-2025-UNS-CFI** de fecha 24.04.2025., integrado por los siguientes docentes:

- | | | |
|--|---|-------------|
| ➤ Mg. Amancio Ramiro Rojas Flores | : | Presidente |
| ➤ M.Sc. Hugo Rolando Calderón Torres | : | Secretario |
| ➤ Mg. José Luis Castillo Ventura | : | Integrante |
| ➤ M.Sc. Ricardo Antonio Cedrón Maguiña | : | Accesitario |

Y según la **Resolución Decanal N°428-2025-UNS-FI de fecha 11.07.2025.**, se **DECLARA EXPEDITO** a los bachilleres para dar inicio a la sustentación y evaluación de la Tesis, titulada: **"EVALUACIÓN DE UN AEROGENERADOR DE EJE VERTICAL INSTALADO EN UN VEHÍCULO ELÉCTRICO PARA MEJORAR SU AUTONOMÍA"**, perteneciente los bachilleres: **ASIAN JARA DIEGO ALEJANDRO**, código de matrícula N° **0201411020** y **VILLANUEVA TORREALVA KERLY WILY**, código de matrícula N° **0201411006**, teniendo como asesor al docente **Mg. José Luis Castillo Ventura**, según Resolución Decanal N° 032-2023-UNS-FI de fecha 18.01.2023.

Terminada la sustentación del bachiller, respondió las preguntas formuladas por los miembros del jurado y el público presente.

El Jurado después de deliberar sobre aspectos relacionados con el trabajo, contenido y sustentación del mismo y con las sugerencias pertinentes, en concordancia con el artículo 73° del Reglamento General de Grados y Títulos de la Universidad Nacional del Santa, declara:

BACHILLER	PROMEDIO	PONDERACIÓN
ASIAN JARA DIEGO ALEJANDRO	17,0	Bueno

Siendo las 11:00 a.m. del mismo día, se da por terminado el acto de sustentación, firmando los integrantes del jurado en señal de conformidad.


Mg. Amancio Ramiro Rojas Flores
PRESIDENTE


M.Sc. Hugo Rolando Calderón Torres
SECRETARIO


Mg. José Luis Castillo Ventura
INTEGRANTE

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Siendo las 10:00 a.m., del día jueves 17 del mes de julio del año dos mil veinticinco, en el Aula E-4 de la Escuela Profesional de Ingeniería en Energía, en cumplimiento al Art. 68 del Reglamento General de Grados y Títulos, aprobado con Resolución N°337-2024-CU-R-UNS de fecha 12.04.24, se instaló el Jurado Evaluador designado mediante **Resolución N° 146-2025-UNS-CFI** de fecha 24.04.2025., integrado por los siguientes docentes:

- | | | |
|--|---|-------------|
| ➤ Mg. Amancio Ramiro Rojas Flores | : | Presidente |
| ➤ M.Sc. Hugo Rolando Calderón Torres | : | Secretario |
| ➤ Mg. José Luis Castillo Ventura | : | Integrante |
| ➤ M.Sc. Ricardo Antonio Cedrón Maguiña | : | Accesitario |

Y según la **Resolución Decanal N°428-2025-UNS-FI de fecha 11.07.2025.**, se **DECLARA EXPEDITO** a los bachilleres para dar inicio a la sustentación y evaluación de la Tesis, titulada: **"EVALUACIÓN DE UN AEROGENERADOR DE EJE VERTICAL INSTALADO EN UN VEHÍCULO ELÉCTRICO PARA MEJORAR SU AUTONOMÍA"**, perteneciente los bachilleres: **ASIAN JARA DIEGO ALEJANDRO**, código de matrícula N° 0201411020 y **VILLANUEVA TORREALVA KERLY WILY**, código de matrícula N° 0201411006, teniendo como asesor al docente **Mg. José Luis Castillo Ventura**, según Resolución Decanal N° 032-2023-UNS-FI de fecha 18.01.2023.

Terminada la sustentación del bachiller, respondió las preguntas formuladas por los miembros del jurado y el público presente.

El Jurado después de deliberar sobre aspectos relacionados con el trabajo, contenido y sustentación del mismo y con las sugerencias pertinentes, en concordancia con el artículo 73° del Reglamento General de Grados y Títulos de la Universidad Nacional del Santa, declara:

BACHILLER	PROMEDIO	PONDERACIÓN
VILLANUEVA TORREALVA KERLY WILY	17,0	Bueno

Siendo las 11:00 a.m. del mismo día, se da por terminado el acto de sustentación, firmando los integrantes del jurado en señal de conformidad.


Mg. Amancio Ramiro Rojas Flores
PRESIDENTE


M.Sc. Hugo Rolando Calderón Torres
SECRETARIO


Mg. José Luis Castillo Ventura
INTEGRANTE



Recibo digital

Este recibo confirma que su trabajo ha sido recibido por **Turnitin**. A continuación podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega: Alejandro Asián
Título del ejercicio: Tesis Asian
Título de la entrega: Evaluación de un aerogenerador de eje vertical instalado en u...
Nombre del archivo: INFORME_FINAL_AEROGENERADOR_VEHICULAR_-_2025.pdf
Tamaño del archivo: 3.73M
Total páginas: 110
Total de palabras: 25,269
Total de caracteres: 109,846
Fecha de entrega: 02-oct-2025 08:04p. m. (UTC-0500)
Identificador de la entrega: 2769308333

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN ENERGÍA



UNS
UNIVERSIDAD
NACIONAL DEL SANTA

Evaluación de un aerogenerador de eje vertical instalado en un vehículo
eléctrico para mejorar su autonomía

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO EN ENERGÍA

Autores:

Bach. ASIAN JARA DIEGO ALEJANDRO
Bach. VILLANUEVA TORREALVA KERLY WILY

Asesor:

Ms. JOSÉ LUIS CASTILLO VENTURA
DNI N° 32781530
Código ORCID: 0000-0002-0905-3024

NUEVO CHIMBOTE – PERÚ
2025-07-17

Evaluación de un aerogenerador de eje vertical instalado en un vehículo eléctrico para mejorar su autonomía

INFORME DE ORIGINALIDAD

15%

INDICE DE SIMILITUD

14%

FUENTES DE INTERNET

1%

PUBLICACIONES

7%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	docplayer.es Fuente de Internet	2%
2	dspace.ups.edu.ec Fuente de Internet	2%
3	hdl.handle.net Fuente de Internet	2%
4	repositorio.uns.edu.pe Fuente de Internet	2%
5	gdocu.upv.es Fuente de Internet	1%
6	repositorio.utn.edu.ec Fuente de Internet	1%
7	repositorio.uisek.edu.ec Fuente de Internet	<1%
8	www.coursehero.com Fuente de Internet	<1%

Submitted to EDEM Escuela de Empresarios

DEDICATORIA

A Dios, por ser mi guía y fuente de fortaleza en cada paso de este camino. Gracias por las bendiciones y por darme la sabiduría y el coraje necesarios para superar los desafíos.

A mis padres, por su amor incondicional, su apoyo inquebrantable y su constante inspiración. Gracias por creer en mí y en mis sueños, y por enseñarme el valor de la perseverancia y el esfuerzo.

A mi hermana, por ser mi compañera de vida y por su apoyo incondicional en cada paso de este viaje.

A mi pareja, por su paciencia, comprensión y por estar a mi lado en los momentos difíciles y en los triunfos. Gracias por ser mi roca y mi motivación constante.

Diego Alejandro Asian Jara

DEDICATORIA

A Dios, por brindarme la sabiduría y fortaleza para enfrentar cada desafío, sin su amor y dirección este logro no habría sido posible.

A mis padres, por su sacrificio y confianza depositadas en mí, y a mis hermanos, por su compañerismo y ánimo durante este proceso.

A mi esposa por su apoyo y motivación, y a mis amigos que de alguna forma contribuyeron a que alcanzara esta meta.

Finalmente, agradezco a todos los profesores y mentores que me guiaron con su conocimiento y sabiduría, ayudándome a crecer tanto personal como profesionalmente.

Kerly Wily Villanueva Torrealva.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradecer a Dios, mis padres, mi hermana y mi pareja que confiaron en mi crecimiento profesional motivándome para cumplir la meta que me tracé.

A la Universidad Nacional del Santa y mis profesores, que con su conocimiento y pasión por la enseñanza fueron muy importantes en mi formación académica y profesional.

A mi tutor de tesis, Ms. José Luis Castillo Ventura, por su guía, sabiduría y apoyo a lo largo de este proyecto. Sus valiosos consejos y su dedicación han sido fundamentales para la culminación de este trabajo.

A mi compañero de investigación, por su colaboración, sus ideas y por los momentos compartidos que hicieron más enriquecedor este proceso.

Finalmente, a todas las personas que de una u otra manera han formado parte de este camino y han contribuido a mi crecimiento personal y académico. A todos ustedes, ¡muchas gracias!

Diego Alejandro Asian Jara

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, quiero expresar mi agradecimiento a Dios, por ser mi guía y fuente de inspiración en todo momento, gracias por darme la sabiduría y la paciencia necesaria para culminar este proyecto.

A mi familia, especialmente a mis padres, por su amor incondicional, apoyo constante y por siempre creer en mí, a mis hermanos, por su apoyo incondicional en este largo camino.

A mis profesores, quienes, con su conocimiento, dedicación y paciencia me brindaron el apoyo necesario para llevar a cabo este trabajo, gracias por orientarme y desafiarme a dar lo mejor de mí.

Finalmente, a todas las personas que, de alguna manera, ya sea con una palabra de aliento, un consejo o un gesto de apoyo, hicieron posible que alcance este importante logro.

Kerly Wily Villanueva Torrealva.

INDICE

INDICE	viii
RESUMEN	xiii
I. Introducción.....	15
1.1. Realidad Problemática:.....	15
1.2. Objetivos.....	16
1.3. Formulación de la hipótesis.....	16
1.4. Justificación.....	17
II. Marco Teórico.....	18
2.1. Antecedentes.....	18
2.2. Marco conceptual	22
2.2.1. Energía Eólica	22
2.2.2. Aerogeneradores.....	26
2.2.3. La Minieólica.....	31
2.2.4. Vehículos Eléctricos	32
2.2.5. Autonomía de un vehículo eléctrico.....	34
2.2.6. Componentes de un sistema de aerogeneración.	36
III. Metodología.....	40
3.1. Enfoque y tipo de investigación	40
3.2. Método y diseño experimental	40
3.3. Población y muestra	40
3.4. Proceso metodológico	41
3.4.1. Determinación del recurso eólico.....	41
3.4.2. Diseño y modelado de los aerogeneradores	42
3.4.3. Construcción y montaje	45
3.4.4. Instrumentos de medición.....	45
3.4.5. Recolección de datos experimentales.....	46
3.4.6. Procesamiento de datos:	46
IV. Resultados y discusión.....	47
4.1. Resultados experimentales del aerogenerador tipo Savonius.....	47
4.2. Resultados experimentales del aerogenerador híbrido Savonius-Darrieus	50
4.3. Análisis comparativo de ambos modelos	52
4.4. Discusión de resultados	58
CONCLUSIONES	59
RECOMENDACIONES	61
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	62
ANEXOS.....	66

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Energía del viento	23
Figura 2 Rendimiento respecto al límite de Betz.....	25
Figura 3 Partes de un aerogenerador.....	26
Figura 4 Aerogenerador de eje horizontal	28
Figura 5 Aerogenerador de eje vertical tipo Savonius.....	30
Figura 6 Aerogenerador de eje vertical tipo Darrieus.....	31
Figura 7 Descripción comparativa entre vehículos eléctricos e híbridos	34
Figura 8 Generador de imanes permanentes sin escobillas	37
Figura 9 Controlador de generador de turbina eólica MPPT	38
Figura 10 Batería para uso en sistemas eólicos	39
Figura 11 Modelo 3D del aerogenerador Savonius	43
Figura 12 Modelo 3D del aerogenerador híbrido Savonius-Darrieus.....	44
Figura 13 Sistema de medición de Voltaje y Amperaje	46
Figura 14 Comparación de potencia generada según sentido de circulación (Savonius)	48
Figura 15 Comparación de energía generada según sentido de circulación (Savonius).....	49
Figura 16 Comparación de potencia generada según sentido de circulación (Savonius-Darrieus)	51
Figura 17 Comparación de energía generada según sentido de circulación (Savonius-Darrieus)	51
Figura 18 Potencia generada por ambos modelos en función de la velocidad del vehículo.....	53
Figura 19 Energía generada por minuto a cada velocidad del vehículo	54
Figura 20 Comparación del comportamiento del C_p de ambos aerogeneradores	55
Figura 21 Mediciones de velocidad de viento en el capó	70

Figura 22 Mediciones de velocidad de viento en el techo	70
Figura 23 Mediciones de velocidad de viento en la sección trasera	70
Figura 24 Dibujo tridimensional del soporte de las palas en Tinkercad.....	78
Figura 25 Corte de ranuras a las palas del rotor.....	78
Figura 26 Fijación de las palas del rotor al soporte	79
Figura 27: Construcción de la carcasa y conductos de direccionamiento de aire.....	79
Figura 28: Montaje del sistema eólico Savonius	80
Figura 29: Comprobación de funcionamiento del sistema eólico Savonius	80
Figura 30 Perfil aerodinámico NACA 0018	81
Figura 31 Fabricación de los álabes de madera	81
Figura 32 Fijación de los álabes al generador eléctrico	82
Figura 33: Montaje del Sistema Eólico híbrido Savonius-Darrieus	82

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Autonomía Real Comparada con la Autonomía Homologada WLTP	35
Tabla 2 Carga Real Comparada con la Capacidad Teórica Neta de la Batería.....	35
Tabla 3 Promedio de velocidad de viento en capó, techo y sección trasera	41
Tabla 4 Promedio de velocidades de viento para cálculo de potencia disponible	42
Tabla 5 Cálculo de la potencia eólica disponible para el modelo Savonius	43
Tabla 6 Cálculo de la potencia eólica disponible para el modelo Savonius-Darrieus	45
Tabla 7 Promedios de voltaje y corriente generados por el aerogenerador Savonius según velocidad del vehículo – Dirección Norte-Sur.....	47
Tabla 8 Promedios de voltaje y corriente generados por el aerogenerador Savonius según velocidad del vehículo – Dirección Sur-Norte.....	48
Tabla 9 Cálculo del Cp máximo para cada velocidad vehicular (Savonius)	49
Tabla 10 Promedios de voltaje y corriente generados por el aerogenerador híbrido según velocidad del vehículo – Dirección Norte-Sur.....	50
Tabla 11 Promedios de voltaje y corriente generados por el aerogenerador híbrido según velocidad del vehículo – Dirección Sur-Norte.....	50
Tabla 12 Cálculo del Cp máximo para cada velocidad vehicular (Savonius-Darrieus)	52
Tabla 13 Comparación de desempeño eléctrico de ambos aerogeneradores (Norte-Sur)	53
Tabla 14 Comparación del Cp de ambos aerogeneradores (Norte-Sur)	54
Tabla 15 Autonomía ganada durante la ruta de prueba a 100km/h	57

INDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: Medición de velocidad de viento en capó, techo y sección trasera del vehículo.....	67
ANEXO 2 Imágenes de cómo se realizó la medición de viento en las 3 zonas del vehículo.....	70
ANEXO 3 Medición de velocidad de viento para cálculo de potencia disponible.....	71
ANEXO 4 Plano de diseño del aerogenerador Savonius.....	74
ANEXO 5 Plano de diseño del aerogenerador híbrido Savonius-Darrieus	75
ANEXO 6 Datos técnicos de los componentes eléctricos	76
ANEXO 7 Construcción y montaje de los aerogeneradores.....	78
ANEXO 8: Datos de voltaje y corriente obtenidos con el aerogenerador Savonius	83
ANEXO 9 Datos de voltaje y corriente obtenidos con el aerogenerador híbrido.....	101

RESUMEN

La limitada autonomía de los vehículos eléctricos (VE) constituye una barrera para su adopción masiva. Esta investigación aborda este desafío mediante el estudio de la viabilidad de integrar un aerogenerador de eje vertical (VAWT) para generar energía suplementaria durante el desplazamiento. El objetivo principal fue diseñar, construir y evaluar experimentalmente el rendimiento de un sistema eólico móvil para extender el rango operativo de los VE y reducir su dependencia de la red eléctrica. Se aplicó un método cuantitativo y experimental, desarrollando dos prototipos: un aerogenerador tipo Savonius y un modelo híbrido que combina las geometrías Savonius y Darrieus con un perfil alar NACA 0018. Ambos sistemas fueron montados en el techo de un vehículo de prueba y sometidos a evaluación en condiciones reales de carretera, a velocidades controladas entre 60 y 100 km/h. Durante las pruebas, se recolectaron datos de voltaje, corriente y velocidad del viento, que fueron la base para calcular la potencia de salida y el coeficiente de potencia (C_p) de cada diseño. Los resultados demostraron la superioridad del prototipo híbrido Savonius-Darrieus en todo el rango de velocidades. A una velocidad máxima de 100 km/h, este diseño generó 27.41 W, alcanzando un C_p de 0.0593, mientras que el modelo Savonius solo produjo 8.87 W con un C_p máximo de 0.0155. Aunque la generación de energía se validó técnicamente, su contribución a la autonomía del vehículo fue modesta, aportando una extensión de 30 metros en una prueba de 10 minutos a 100km/h. Se concluye que la generación eólica a bordo es técnicamente factible, y que el diseño híbrido representa una base prometedora para futuras optimizaciones y desarrollos en el campo de la energía renovable móvil, con gran potencial para mejorar la sostenibilidad del transporte en trayectos largos y autopistas.

Palabras clave: Aerogenerador de eje vertical, Energía eólica móvil, Vehículos eléctricos, Diseño híbrido Savonius-Darrieus, extensión de autonomía.

ABSTRACT

The limited autonomy of electric vehicles (EVs) is a significant barrier to their mass adoption, creating pervasive range anxiety. This research addresses this critical challenge by studying the feasibility of integrating a vertical-axis wind turbine (VAWT) to generate supplementary energy during movement. The main objective was to design, build, and experimentally evaluate the performance of a mobile wind energy system to extend the operational range of EVs and reduce their persistent grid dependency. A quantitative, experimental method was rigorously applied, developing two distinct prototypes: a Savonius-type turbine and an hybrid model combining Savonius and Darrieus geometries with a NACA 0018 airfoil. Both systems were mounted on a test vehicle's roof and evaluated under real-world road conditions at speeds between 60 and 100 km/h. Voltage, current, and wind speed data were meticulously collected to calculate the power output and power coefficient (C_p) of each design. The results demonstrated the hybrid Savonius-Darrieus prototype's marked superiority across all speeds. At 100 km/h, this design generated 27.41 W, reaching a C_p of 0.0593, while the Savonius model produced only 8.87 W with a maximum C_p of 0.0155. Although power generation was technically validated, its direct contribution to the vehicle's autonomy was modest, providing a 30-meter extension in a 10-minute test at 100km/h. It is concluded that onboard wind generation is technically feasible. The hybrid design represents a promising basis for future optimizations and developments in mobile renewable energy, with potential to improve transport sustainability, especially on long-distance highway journeys, where consistent airflow can maximize energy capture, contributing to a more resilient and versatile charging ecosystem for electric mobility, ultimately enhancing driver confidence and vehicle utility. This work provides empirical data and a practical proof-of-concept for mobile energy recovery systems, paving the way for further research.

Keywords: Vertical-axis wind turbine (VAWT), Mobile wind energy, Electric vehicles (EV), Hybrid Savonius-Darrieus design, extension of autonomy.

I. Introducción

1.1. Realidad Problemática:

Es evidente en nuestro tiempo que la situación mundial referida a la contaminación ambiental provocada por el uso de combustibles fósiles, la pandemia, la guerra, ha conllevado al encarecimiento de los combustibles, dejando como alternativa el empleo de vehículos que hagan uso de las energías renovables, una de esas opciones la constituyen, los vehículos impulsados por energía eléctrica, solar o buscando el apoyo necesario que permita el aprovechamiento de la energía eólica. En este proyecto planteamos esta alternativa, con el cual se pretende mejorar la autonomía de un vehículo eléctrico, promoviendo la mini eólica en situaciones cotidianas, como es en este caso el transporte personal.

En Perú, el sector del transporte es una de las principales fuentes de emisión de gases de efecto invernadero y contaminación del aire, especialmente en grandes ciudades como Lima, Arequipa y Trujillo. La creciente demanda de movilidad y el uso predominante de vehículos con motores de combustión interna incrementan estos problemas ambientales. En este contexto, la transición hacia vehículos eléctricos (VE) se presenta como una solución viable para reducir la huella de carbono y mejorar la calidad del aire.

En la actualidad la normativa apoya al desarrollo de este tipo de instalaciones de energías renovables con aerogeneradores cada vez más eficientes, pero en la mini eólica, donde se hallan las turbinas de eje vertical, no está siendo aprovechada en su máximo potencial, situación que dificulta su desarrollo tecnológico.

El reto reside en determinar en qué medida la instalación de un aerogenerador de eje vertical en un automóvil eléctrico puede contribuir a mejorar su autonomía. Es fundamental evaluar la eficiencia de la conversión de energía eólica en energía eléctrica y su impacto real en la autonomía del vehículo.

Con esta iniciativa adaptamos un aerogenerador de eje vertical al cuerpo de un automóvil eléctrico con la finalidad de utilizar la energía cinética del viento que impacta con el auto en su movimiento por la carretera. Bajo este sistema se busca alimentar de forma directa el sistema eléctrico del vehículo, y el excedente (en caso de existir) para recargar las baterías y mejorar su autonomía.

Por lo tanto, la presente investigación se enfocó en analizar la viabilidad de la instalación del aerogenerador de eje vertical en el automóvil eléctrico. Se exploró cómo esta tecnología puede integrarse efectivamente en los vehículos para mejorar su autonomía y contribuir a la reducción de emisiones, ofreciendo una solución sostenible y práctica para el futuro del transporte en Perú.

En esa medida, formulamos el siguiente problema:

¿En qué medida la instalación de un aerogenerador de eje vertical permitirá mejorar la autonomía en un automóvil eléctrico?

1.2. Objetivos.

Objetivo general

Establecer el estudio de un aerogenerador de eje vertical para mejorar la autonomía de un vehículo eléctrico.

Objetivos específicos

- Revisar la bibliografía existente sobre diseño y construcción de aerogeneradores de eje vertical y su aplicación en vehículos eléctricos.
- Diseñar y construir un aerogenerador para establecer la mejora de autonomía en un vehículo eléctrico.
- Cuantificar la cantidad de energía que producirá el aerogenerador.
- Evaluar la eficiencia del aerogenerador en función de la velocidad del automóvil.

1.3. Formulación de la hipótesis.

Considerando el consumo promedio diario de un automóvil eléctrico, la instalación de un aerogenerador permitirá mejorar la autonomía del vehículo en un 10%.

1.4. Justificación.

El uso de energías renovables, contribuye a la disminución de los factores de contaminación ambiental producida principalmente por los combustibles fósiles, en este sentido, nuestra propuesta hace uso de un aerogenerador para la producción de energía eléctrica, la cual favorecería el estado de autonomía en un vehículo eléctrico, evitando el mayor consumo de combustibles fósiles y por consiguiente el incremento de la contaminación ambiental.

A través de este proyecto pretendemos incursionar en los temas referentes a la minieólica, y su contribución a la solución de problemas cotidianos, como en este caso involucrado con la autonomía de un automóvil eléctrico.

Desde el punto de vista económico, el proyecto está orientado a generar ahorro al emplear un aerogenerador, al comparar los costos generados por automóviles que consumen combustibles fósiles, y en el caso de vehículos eléctricos, generar cierta autonomía en cuanto a sus recargas.

Facilitar el estado de recarga de un vehículo eléctrico. Por eso, el propósito de este estudio es determinar si dicho generador incorporado al automóvil es suficiente para cubrir la demanda del sistema eléctrico del mismo, lo que conllevaría a que el consumo de energía de las baterías se centre en los motores del automóvil para su movilidad.

II. Marco Teórico

2.1. Antecedentes.

- (Hincapié Niño & Jaimes Hernández, s. f.), evaluaron la eficiencia energética de un aerogenerador elaborado a partir de material reciclado, con la finalidad de aprovechar la energía cinética generada por el movimiento del vehículo transformándolo en energía eléctrica. Determinaron que la mejor ubicación del aerogenerador sería en la parte del techo, en esta zona se registraron velocidades más altas en función de la velocidad del vehículo. Concluyeron que el sistema genera corriente y tensión suficiente para recargar una batería de baja tensión y corriente, esto se obtiene a partir de una velocidad de 80 Km/h, a partir de esta velocidad encontraron valores de mayor producción energética, sin embargo, el sistema no es factible para rangos de velocidades inferiores a 80km/h.
- (Camilo Andrés, 2013), estudió y determinó la posición de mayor incidencia de aire en un vehículo, para montar un sistema capaz de aprovechar la energía cinética, para adquirir energía del tipo mecánica y convertirla en energía tipo eléctrica, con la finalidad de almacenar esta energía en baterías ubicadas dentro del vehículo eléctrico. Su diseño muestra que se necesita velocidades constantes de 80 Km/h y largos periodos de tiempo (23h) para poder suministrar la autonomía completa del vehículo. Concluye que la autonomía que ofrece su diseño es baja, pero muy significativo según los datos obtenidos. su diseño resulta algo ostentoso y poco confiable además de presentar desventajas como es el ruido generado por las hélices del aerogenerador y el peligro que representan las aspas ya que alcanzan grandes revoluciones por minuto debido a la ubicación de este.
- (Guzmán Cajiao, 2017), estudió la factibilidad, parámetros y competencias, que posee un sistema con aerogeneradores para recargar un vehículo. Analizó dos opciones de aerogeneradores de la misma potencia, para determinar cuál de estos posee mejores características, considerando un valor de la densidad del aire de 0,892 (Kg/m³) para la ciudad de Quito el cual fue tomado del Instituto Meteorología e Hidrología (INAMHI). El proyecto en mención de recargar un vehículo eléctrico por medio de energía eólica en dicha ciudad, resulta viable, debido a que la energía producida es suficiente para abastecer

la demanda del vehículo KIA SOULEV utilizado en el proyecto, siempre y cuando la velocidad del viento sea superior a 2,5 m/s, en promedio diario puesto que, esta velocidad es la de arranque de los aerogeneradores.

- (Chauca Pozo, 2018), Instaló un aerogenerador de tipo Savonius a un vehículo con la finalidad de transformar la energía cinética del viento en energía eléctrica y mejorar la eficiencia energética del vehículo. Este aerogenerador tipo Savonius consigue esta transformación mediante un dínamo que es solidario a su eje. Mediante un optimizador eólico de carga se logró recargar las baterías con 24 V. Este aerogenerador se avaluó a distintas velocidades siendo la velocidad mínima de funcionamiento del aerogenerador 50km/h. Con esta velocidad se logra los siguientes resultados de la energía eléctrica de las baterías. Voltaje en la batería 24,8 V, con una intensidad eléctrica de 0,1 A. Una potencia eléctrica de 1,6W, permitiendo cargar las baterías; y la velocidad más alta evaluada es de 100 Km/h. logrando un resultado de la energía eléctrica de las baterías. Voltaje en la batería 26,1 V, intensidad. eléctrica de 3,1 A, una potencia. eléctrica de 79.9 W, permitiendo cargar las baterías. Por tanto, el voltaje generado por el Savonius es directamente proporcional a la velocidad del vehículo. Finalmente concluye que el aerogenerador implementado es ideal, ya que recupera 1932,52 W, de potencia del viento lo cual equivale a 79 W de potencia eléctrica, a velocidades de 100Km/h, lo cual no supera los límites de velocidad establecidas para vehículos livianos.
- (Aparicio Romero et al., 2022). Este estudio presenta el diseño de una turbina eólica de eje vertical tipo Savonius, específicamente una VAWT, destinada a recolectar energía eólica generada por la estela de vehículos en movimiento en el sector de Quebrada Honda, Huancayo. Los parámetros aerodinámicos considerados en el diseño incluyen un diámetro externo del rotor de 1.36 m, una altura del rotor de 1.2 m y un aspect ratio de 0.88. La velocidad promedio del viento en la zona se determinó en 5.15 m/s, alcanzando un máximo de 6.9 m/s, condiciones adecuadas para el funcionamiento eficiente de la turbina. La superficie proyectada del VAWT se calculó en base a estos parámetros, con un área aproximada de 1.36 m de ancho y una altura total de 2.1 m, considerando la altura del bastidor y la estructura de soporte. Según los cálculos de caudal, con un flujo

volumétrico de $11.316 \text{ m}^3/\text{s}$ y una densidad del aire de $0.851 \text{ kg}/\text{m}^3$, la potencia máxima extraída del viento fue estimada en aproximadamente 150 W , considerando las pérdidas y eficiencia del diseño. En conclusión, este trabajo demuestra que el diseño de una VAWT Savonius basada en las condiciones del flujo vehicular en Quebrada Honda puede aprovechar eficientemente la energía eólica generada en la vía, contribuyendo al aprovechamiento de energías renovables. La implementación de esta tecnología puede tener un impacto positivo en la generación de energía local y en la promoción de soluciones sostenibles, complementando la matriz energética regional.

- (Castro et al., 2015). En su estudio, desarrollaron e integraron una máquina eólica de doble turbina de eje vertical tipo Savonius en un vehículo eléctrico, con el objetivo de generar energía durante su desplazamiento. Los resultados indicaron que la turbina alcanzó un coeficiente de potencia del 10.2% y un TRS de 0.29 , operando en condiciones que permiten aproximarse al límite de Betz en su desempeño. La potencia eléctrica generada en las pruebas fue de 168 W , mientras que la potencia teórica calculada fue de aproximadamente 1645.78 W . Estos datos, junto con parámetros como la velocidad del vehículo ($77 \text{ km}/\text{h}$), revoluciones de la turbina (215 RPM) y la densidad del aire ($0.95 \text{ kg}/\text{m}^3$), evidencian el potencial del sistema para aumentar la autonomía de los autos eléctricos y contribuir a su eficiencia energética durante la conducción. En conclusión, el desarrollo de sistemas eólicos integrados en vehículos eléctricos, aunque aún en etapa de optimización, muestra un gran potencial para mejorar la sustentabilidad y el rendimiento de la movilidad eléctrica, destacando la importancia de seguir perfeccionando estos sistemas para obtener mayores niveles de eficiencia y viabilidad práctica.
- (Alave-Vargas et al., 2022). En su investigación buscaron analizar las características principales de los aerogeneradores de eje vertical (VAWT's), incluyendo clasificaciones y recientes avances en su uso, con el objetivo de evaluar su potencial para aplicaciones urbanas y microgeneración. Para ello, utilizaron un enfoque que abarcó la revisión bibliográfica de publicaciones relevantes, incluyendo estudios numéricos, simulaciones CFD, y análisis de aplicaciones físicas y viabilidad, obteniendo como resultados una

visión actualizada de las tendencias y desafíos en el desarrollo de VAWT's. En cuanto a niveles de potencia, estas turbinas generan generalmente hasta 3 kW en aplicaciones de baja potencia, aunque con soluciones comerciales nuevas, este límite puede elevarse hasta aproximadamente 10 kW. El coeficiente de potencia (c_p), que refleja la eficiencia en la conversión de energía del viento, es inversamente proporcional a la velocidad de inicio (cut-in). Sin embargo, investigaciones recientes muestran que mediante componentes mecánicos innovadores, es posible mejorar esta relación, incrementando la eficiencia y, por lo tanto, la viabilidad económica de los VAWT's. La conclusión destaca que, aunque enfrentan ciertas limitaciones como bajo torque de inicio y eficiencia, los VAWT's representan una alternativa competitiva especialmente en áreas aisladas y urbanas, favorecidas por su fácil integración y menor impacto arquitectónico.

- (Cabrero Carabel, 2024). En su investigación, buscó evaluar la viabilidad de un sistema de recuperación de energía mediante aerogeneradores en vehículos eléctricos, con el objetivo principal de mejorar su eficiencia energética y autonomía. Para ello, utilizó un enfoque que abarcó análisis teóricos y simulaciones fluidodinámicas, centrados en un vehículo eléctrico basado en un modelo de furgoneta. El balance energético realizado, en un modelo Savonius de dos palas, con un área de aproximadamente 3.52 m². Revela que en conducción interurbana el sistema puede recuperar hasta un 15 % de la energía a una velocidad media de 60 km/h (16.67 m/s), lo que equivale a aproximadamente 10-15 kWh en trayectos de varias horas, contribuyendo a una extensión en la autonomía del vehículo en torno al 10 %. Además, los análisis económicos proyectan ahorros sustanciales a largo plazo, con beneficios económicos acumulados dependiendo de la variación del precio de la energía y la vida útil del vehículo, estimada en 10 años. En conclusión, los resultados sugieren que la integración de aerogeneradores en vehículos eléctricos, específicamente en la ubicación del parachoques delantero, donde afecta mínimamente la aerodinámica y aprovecha el viento generado por el movimiento del vehículo. puede ser una estrategia efectiva para incrementar la eficiencia energética, aprovechando la energía del viento generado en movimiento, y contribuyendo así a una movilidad más sostenible.

-

2.2. Marco conceptual

2.2.1. Energía Eólica

Este tipo de energía es renovable, obtenida al aprovechar la fuerza del viento. Se puede decir que es la capacidad de un equipo para transformar la energía cinética del viento en energía mecánica para posteriormente transformarla en energía eléctrica. La energía eólica es aprovechada a través de los aerogeneradores, cuyo componente principal es una turbina situada en lo alto de una torre de soporte y un generador eléctrico, el principio de funcionamiento es similar que el de los molinos de viento.

Los alabes son girados por el aire y generan energía mecánica que es aprovechada por un generador eléctrico que transforma esta energía mecánica de rotación de las palas en energía eléctrica. (admin, 2022)

Es energía limpia y también la fuente de energía más barata de producir, lo que explica el gran entusiasmo por su uso. Entre ellos, los más comunes y de mayor crecimiento son los parques eólicos, que se utilizan para generar electricidad. Un parque eólico es una instalación integrada de un grupo de aerogeneradores conectados eléctricamente. Los aerogeneradores pueden operar en parques eólicos terrestres, en el mar o incluso instalados sobre el agua a cierta distancia de la costa, los llamados parques eólicos marinos.

La energía eólica es renovable, limpia, inagotable y que reduce el uso de combustibles fósiles, que son las fuentes de emisión de gases de efecto invernadero que provocan el calentamiento global. Además, la energía eólica es una fuente de energía local que se extiende por todo el mundo y ayuda a reducir las importaciones de energía y generar prosperidad y empleos a nivel local. Por todo ello, la generación de electricidad a partir de la energía eólica y su uso eficiente contribuyen al desarrollo sostenible. (admin, 2022)

a) Medición del recurso eólico

El propósito de evaluar la energía del viento es determinar la potencia eólica disponible en el área de estudio. Depende de los parámetros medidos, los tipos de sensor, la cantidad de estaciones que registren la velocidad del viento, la altura de medición, la frecuencia de recopilación y el método de notificación. Los datos básicos a medir son: velocidad y

dirección del viento, los sensores básicos son la veleta y anemómetro. La altura ideal para que el sensor recopile datos a la altura del buje del aerogenerador a instalar, sin embargo, es permitido usar una altura más baja, lo que nos permite obtener información básica para decidir la profundidad del estudio. Finalmente, se debe determinar la frecuencia de recopilación, ya que la validación oportuna de datos puede reducir la pérdida de datos al alertar a los dispositivos de medición, almacenamiento o energía sobre posibles errores. (Rafael Vidal Herrera, s. f.)

b) Cálculo de la potencia disponible en el viento

La energía cinética del viento es energía limpia, causada por el flujo de aire en movimiento. Su ecuación matemática es:

$$E = \frac{1}{2}mv^2$$

Donde "m" es la masa de aire y "v" es la velocidad del viento.

Esta masa lo podemos expresar en función del volumen y de la densidad del aire

$$m = \rho V$$

Donde ρ es la densidad. del aire y V . el volumen barrido.

Al suponer un volumen de barrido de tipo cilíndrico, tenemos. $V = AxL$ donde A es el área barrida y L la longitud del cilindro como se muestra en la Figura 1. (Pardillos, 2017)

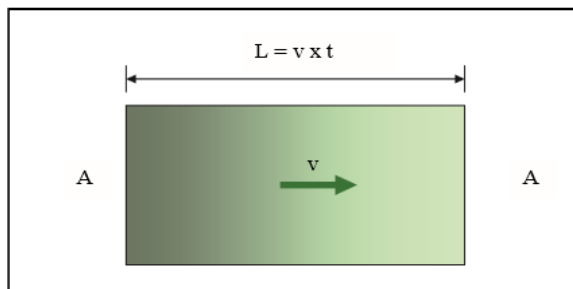


Figura 1 Energía del viento

Fuente: Reproducida de *Manual de Energía Eólica* (p.28), por Pardillos S. C. (2017)

Esta longitud del cilindro puede expresarse en función de la velocidad del aire

$$L = vxt$$

Con t que es considerado tiempo que tarda la corriente. de aire en atravesar el volumen cilíndrico de longitud L .

Por lo tanto, la energía quedaría expresado como sigue.

$$E = \frac{1}{2} \rho V v^2 = \frac{1}{2} \rho A L v^2 = \frac{1}{2} \rho A v t v^2 = \frac{1}{2} \rho A v^3 t$$

al dividir por el tiempo se obtiene la potencia disponible del viento, que atraviesa el volumen. de control cilíndrico.

$$P = \frac{E}{t} = \frac{1}{2} \rho A v^3$$

En donde:

ρ es la densidad del aire, que varía en función de su altura sobre el nivel del mar “presión”, su valor estándar a nivel del mar es de $1.225 \text{ Kg}/\text{m}^3$ y de la temperatura.

A es el área del volumen de control considerado

v es la velocidad. del viento.

Es vital observar que la superficie A es el área imaginaria del volumen de control considerado, que si se ve en un aerogenerador esta sería el área barrida por las palas, que es independiente del número de alavés del aerogenerador.

Si se varia la potencia con el cubo de la velocidad, implicará que esta última sea lo más alta posible (siempre y cuando la estructura mecánica y el control soporte). (Salvador Cucó Pardillos, 2017)

c) Límite de Betz

El Límite de Betz es un principio fundamental en la energía eólica que define la máxima eficiencia teórica con la que un aerogenerador puede transformar la energía cinética del viento en energía eléctrica. Propuesto en 1919 por el físico alemán Albert Betz, establece que no es posible aprovechar más del 59.3% de la energía cinética del viento. Esto se debe a la necesidad de permitir que el viento continúe fluyendo a través del aerogenerador. (Vennell, 2013)

En Figura 2 se puede observar las curvas características de los aerogeneradores más conocidos.

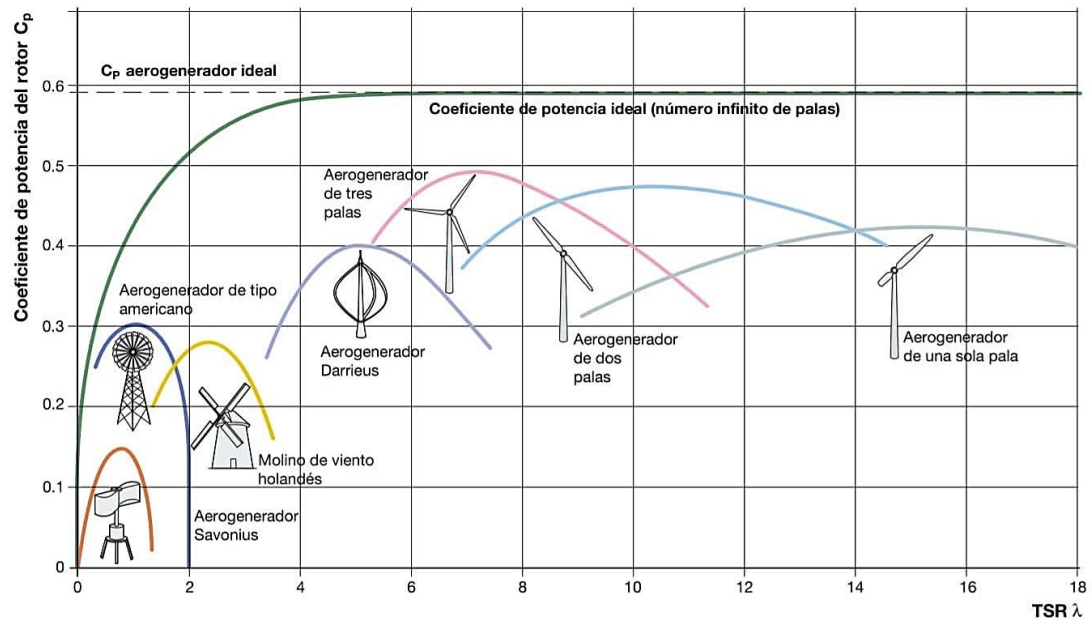


Figura 2 Rendimiento respecto al límite de Betz

Fuente: Adaptada de *Comparación entre turbinas eólicas de eje horizontal y vertical*, 2023. *Revista Internacional de Ingeniería de Energía Aplicada (IJAPE)*, Vol. 12. https://www.academia.edu/97992369/Comparison_between_horizontal_and_vertical_axis_wind_turbine

d) Cálculo del C_p de un aerogenerador

El cálculo del coeficiente de potencia (C_p) de un aerogenerador, representa la eficiencia en la conversión de energía eólica en energía mecánica, está limitado por el límite de Betz. En la práctica, los aerogeneradores reales con los diseños más eficientes pueden llegar a coeficientes de potencia entre 0.4 y 0.5.

La fórmula para calcular el C_p es:

$$C_p = \frac{P_{generada}}{P_{disponible}}$$

2.2.2. Aerogeneradores

Los aerogeneradores son los equipos o máquinas encargadas de aprovechar la energía cinética del viento y transformarla en energía eléctrica. Líneas abajo se describe de forma resumida sus principales partes, su clasificación y su principio de funcionamiento.

a) Partes de un aerogenerador

En esta parte se describen las partes más relevantes de los aerogeneradores como se muestra en la Figura 3: El buje, las palas, el eje, el equipo multiplicador de velocidad y el generador.

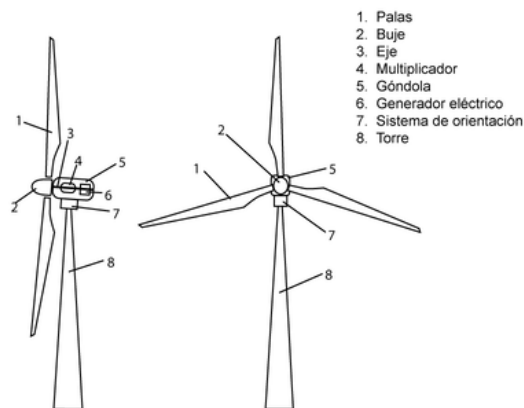


Figura 3 Partes de un aerogenerador

Fuente: Reproducida de *partes de un aerogenerador*, tecnología y proyecto integrado, 2014, blog spot, (<http://tecnologiajuliafernandez.blogspot.com/2014/04/cuestionario-aerogeneradores.html>).

- ✓ Los alabes o palas son las partes del aerogenerador que atrapan la energía cinética del viento con la cual se genera energía mecánica mediante la rotación de éstas. Todas las palas están unidas a un soporte denominado cubo o buje.
- ✓ El buje es donde se unen todas las palas del aerogenerador. Se ubica sobre el eje de baja velocidad, desde donde se transmite el par motriz al multiplicador de velocidad.
- ✓ El equipo que logra multiplicar la velocidad, adaptando el eje de baja velocidad, al eje de alta velocidad donde se acopla el generador recibe el nombre de multiplicador.
- ✓ Los ejes son los elementos de transmisión que acoplan el buje al multiplicador y éste con el generador. El eje de alta velocidad está equipado con un freno de disco

mecánico de emergencia que se utiliza en caso de fallo del freno aerodinámico, o durante las labores de mantenimiento de la turbina.

- ✓ El generador es una máquina eléctrica que transforma la energía mecánica de rotación en energía eléctrica. Al ser una máquina eléctrica se compone de un rotor (el que genera un campo magnético variable al girar las palas) y un estator (parte fija sobre la que se genera la corriente eléctrica inducida).

b) Funcionamiento de un aerogenerador

La energía del viento es capturada por los álabes del aerogenerador. Cuando el viento incide contra las palas, éstas rotan en torno al eje de baja velocidad que acopla el buje con el multiplicador, el cual hace rotar el eje de alta velocidad al que está unido el generador, produciendo energía eléctrica.

El rotor de una turbina eólica se mueve debido a la sustentación creada en las palas. Como todos los equipos de conversión de energía, las turbinas eólicas no pueden convertir toda la energía eólica disponible en el viento en energía mecánica, por lo que se debe considerar el rendimiento, denominado factor de potencia C_p . El factor de potencia es la relación entre la potencia eólica en un lugar determinado y la potencia mecánica alcanzada. El coeficiente depende de la velocidad del viento, ya que los aerogeneradores funcionan mejor a bajas velocidades que a altas velocidades.

c) Clasificación de los aerogeneradores

La principal clasificación de los aerogeneradores se da de acuerdo a la posición de su eje principal. Existen dos tipos de aerogeneradores: los de eje horizontal y los de eje vertical.

- Aerogeneradores de eje horizontal

Este tipo de aerogenerador tiene su eje de manera paralela al suelo como en la Figura 4. Estos aerogeneradores necesitan un sistema de control de orientación, debido a que la dirección del viento no es constante todo el tiempo y para el óptimo funcionamiento de este tipo de aerogeneradores el viento debe incidir de forma frontal al rotor. El multiplicador y generador se encuentran a la altura del rotor dentro de la góndola que es la cámara en la cima de la torre. Los aerogeneradores de eje horizontal pueden tener las

palas situadas a barlovento (frente al viento) o bien en sotavento (detrás del viento) siendo más provechosa la de barlovento puesto que la góndola no ejerce ningún tipo de distorsión en el paso del viento, pero su desventaja es que el rotor ha de ser lo más rígido posible. Por otro lado, los aerogeneradores de eje horizontal también se clasifican en función del número de palas. Tenemos las turbinas con perfiles alares o denominadas turbinas rápidas que generalmente son bipalas o tripalas; por otra parte, se tienen las eólicas multipalas que están compuestas por varias placas metálicas sin perfil aerodinámico y poseen un par de arranque que está en proporción a su número de palas y al diámetro. Éstas últimas tienen aplicaciones mecánicas de baja potencia como por ejemplo el bombeo de agua. (Mohamed R. Gomaa, 2023)

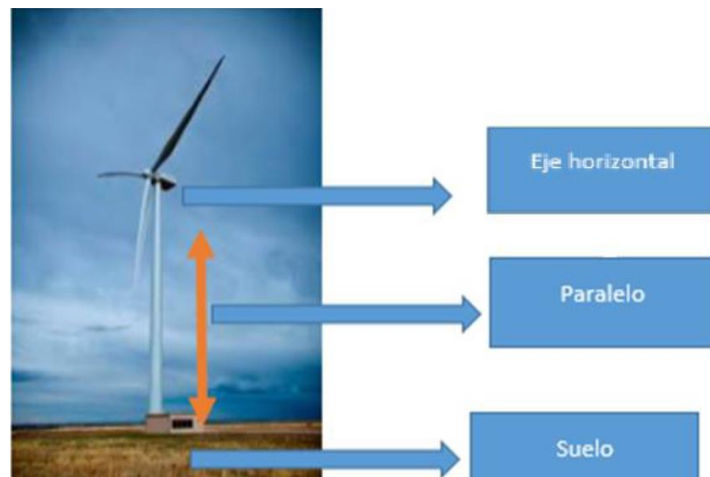


Figura 4 Aerogenerador de eje horizontal

Fuente: Reproducida de “Implementación del aerogenerador híbrido Darrieus-Savonius en un vehículo para la generación energética” (P.26), Por Andrés Mauricio y Oscar Julián, 2016.

- Aerogeneradores de eje vertical

Teniendo en cuenta que el prototipo a diseñar y construir en este proyecto es de eje vertical, aquí un rápido resumen respecto a este tipo de aerogeneradores.

Características de los aerogeneradores de eje vertical

Los aerogeneradores de eje vertical no necesitan de dispositivos de orientación debido a que pueden aprovechar el viento que venga desde cualquier dirección y por esto mismo son llamados panémonos. Trabajan por la diferencia de coeficiente de arrastre que les brinda su perfil alar entre las dos mitades de la sección expuesta al viento, lo que permite que el rotor gire sobre su eje en una dirección específica. Los aerogeneradores de eje vertical funcionan con vientos a baja velocidad donde difícilmente superan las 200rpm, excepto el Darrieus que puede trabajar a más revoluciones. Se emplean para generar potencias que van de los 200W hasta los 4MW. Estos equipos no necesitan de una torre normalmente tienen altos torques de partida. (Santiago Cuadros, 2014)

Otra ventaja de estos aerogeneradores es que por el mismo hecho de no tener torres son mucho más fácil de hacer mantenimiento, puesto que todos los elementos que lo componen se encuentran a nivel de suelo. La desventaja de este tipo de turbinas es que por no tener torres solo trabajan con viento a bajas velocidades puesto que la velocidad del viento crece de forma importante con la altura; debido a esto los aerogeneradores de eje vertical han sido desplazados por los de eje horizontal.

De todas formas, instalar un aerogenerador sobre una torre implica invertir en costos adicionales ligados a la seguridad del soporte del aerogenerador. (Santiago Cuadros, 2014)

Tipos de Aerogenerador de eje vertical

▪ Savonius

La turbina Savonius (Figura 5) le debe su nombre a su inventor, el Ing. Sigurd J. Savonius (1884 Finlandia - 1945 Alemania). En principios del siglo XX se empezó a utilizar el viento para generar electricidad. En 1924, Sigurd diseñó una turbina que ventajosamente podía operar a bajas velocidades de viento. Este rotor estaba formado por un eje rodeado por dos semicilindros.

Esta turbina está configurada para tener un arranque automático debido a sus características aerodinámicas y su regulación. Como se comentó anteriormente los

semicilindros funcionan utilizando la diferencia de la fuerza de arrastre del viento («Turbina Savonius», 2013).

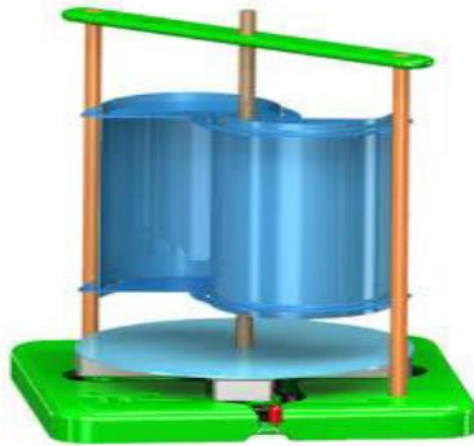


Figura 5 Aerogenerador de eje vertical tipo Savonius

Fuente: Reproducida de “*Implementación del aerogenerador híbrido Darrieus-Savonius en un vehículo para la generación energética*” (P.29), Por Andrés Mauricio y Oscar Julián, 2016.

El aerogenerador Savonius es uno de los de tipo vertical más utilizados para la producción de energía debido a la simplicidad de su diseño y las bajas de velocidades de trabajo a las que opera que te ofrece muchísimas ventajas en la minieólica.

▪ **Darrieus**

Diseñado por G.J.M. Darrieus en-1931, es el modelo de aerogenerador vertical que es más utilizado en la industria y la minieólica debido a sus bajos torques de arranque, su trabajo a bajas velocidades de viento pero que al mismo tiempo pueden trabajar a altas revoluciones, mucho mayores a las de otras turbinas de eje vertical pero no mayores que las de un aerogenerador de tipo horizontal. Su diseño consiste en un eje vertical con dos o más palas curvas como se muestra en la Figura 6. Los álabes tienen perfil alar simétrico similar a las alas de un avión.

Este diseño evita complejidad en la construcción de las palas como los necesarios en los generadores de eje horizontal. (Santiago Cuadros, 2014)

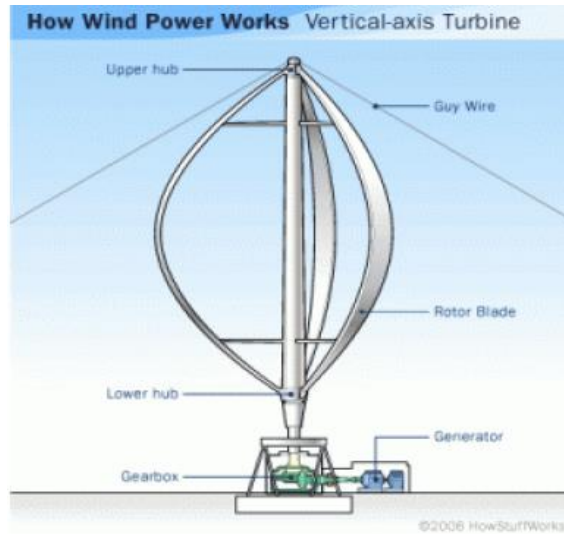


Figura 6 Aerogenerador de eje vertical tipo Darrieus

Fuente: Reproducida de “Implementación del aerogenerador híbrido Darrieus-Savonius en un vehículo para la generación energética” (P.29), Por Andrés Mauricio y Oscar Julián, 2016.

2.2.3. La Minieólica.

a) Contexto General

Un informe del Ministerio de Energía y Minas del Perú (MINEM) proporciona una visión general del potencial eólico del país. Puedes encontrar datos sobre la capacidad instalada y el desarrollo de proyectos eólicos en MINEM. La energía eólica en Perú ha tenido un desarrollo más enfocado en grandes parques eólicos en la región costera, como el Parque Eólico de Ventanilla y el Parque Eólico de Marcona. La minieólica, destinada a aplicaciones más pequeñas y locales, ha sido menos desarrollada en comparación con estos proyectos a gran escala. (MINEM, 2016)

b) Proyectos y Aplicaciones

Han surgido algunos proyectos piloto y experimentales que han permitido evaluar la viabilidad de la tecnología minieólica en diversas regiones del país. Estos proyectos suelen estar orientados a proporcionar energía a comunidades rurales o aisladas que no tienen acceso estable a la red eléctrica. (MINEM, 2016)

Aplicaciones en Zonas Rurales: Según estudios realizados por el Centro de Energías Renovables (CER) de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), en zonas rurales y comunidades aisladas, la minieólica ha demostrado ser una solución viable para la generación descentralizada de electricidad, complementando otras fuentes renovables como la solar. La instalación de pequeños aerogeneradores puede mejorar el suministro energético y contribuir al desarrollo local. (CER, 2024)

2.2.4. Vehículos Eléctricos

Los vehículos eléctricos son máquinas impulsadas por uno o más motores eléctricos que transforman la energía química de baterías en energía mecánica.

En la actualidad existen distintos tipos de vehículos eléctricos como los explicados a continuación.

Tipos de vehículos eléctricos

a) Vehículo eléctrico puro (BEV)

Son vehículos que trabajan al 100 % con energía eléctrica y son propulsados solo por motores eléctricos sin necesidad de usar otro tipo de combustible como se compara en la Figura 7. Acumulan energía eléctrica en baterías que son recargadas con la red eléctrica en una estación de recarga o en una casa diseñada para cargar este tipo de vehículos, por otro lado, hay diseños que aprovechan la energía del frenado para recargar las baterías, obviamente solo para prolongar un poco más la autonomía lo que los hace más eficientes y por lo consiguiente tienen menor consumo de energía. Estos vehículos además de no producir emisiones de gases contaminantes no generan ruidos excesivos ni vibraciones, también su mantenimiento a lo largo de su vida útil es menos que un vehículo de combustión.

Pero no todo son ventajas, uno de los puntos más negativos es su autonomía puesto que están limitadas a la capacidad de batería que tenga el vehículo, así como su alto coste y peso. Por esto, los vehículos eléctricos son útiles para cortas distancias (Chugchilan Aguilar, 2023)

b) Vehículo eléctrico híbrido (HEV)

Estos vehículos tienen 2 tipos de motores, un eléctrico y uno de combustión interna, pero tienen bajas emisiones debido a que no todo el tiempo trabajan con el motor de combustión interna (Figura 7). La desventaja es que al tener dos motores aumenta el peso del vehículo.

Este tipo de vehículo tiene la capacidad de trabajar con los motores conjuntamente o únicamente de modo eléctrico gracias a las baterías. Si las baterías están cargadas al 100% es el motor eléctrico el que mueve el carro hasta que se termine la autonomía de las baterías, luego de esto trabaja con el motor de combustión hasta que se vuelvan a cargar las baterías, esto es muy provechoso ya que reduce el consumo de combustible fósil y al mismo tiempo las emisiones de gases contaminantes con respecto a un vehículo convencional.

Las baterías que alimentan al motor eléctrico tienen menor capacidad que las de un vehículo eléctrico puro, ya que almacenan la energía que proviene del motor de combustión, de frenadas, aceleraciones y no de la energía de la red eléctrica.

Este vehículo tiene las mismas ventajas que el BEV, pero adicionalmente a eso es que la autonomía es mucho mayor, puesto que permite recorrer largas distancias sin necesidad de depender de centros de recarga ya que se las baterías se van recargando solas cuando el vehículo trabaja con el motor de combustión. Pero el hecho de necesitar un motor de combustión, hace que aumenten las emisiones de CO₂ frente a los vehículos eléctricos puros. (Chugchilan Aguilar, 2023)

c) Vehículo eléctrico híbrido enchufable (PHEV)

Tiene las características similares a las del vehículo híbrido normal a excepción de que las baterías deben ser cargadas con la red eléctrica ya que tienen una mayor capacidad de almacenamiento, que en cierta forma es un plus ya que la autonomía del motor eléctrico aumenta considerablemente minimizando así el uso del motor de combustión, pero al tener baterías de mayor capacidad hacen que el costo del vehículo sea más elevado.

En este caso de igual forma el vehículo puede trabajar con los motores en conjunto o independientemente, con la ventaja que motor eléctrico tiene un mayor protagonismo que en HEV, debido a su mayor capacidad de almacenamiento de sus baterías.

Todas estas características permiten que circule cortas y largas distancias con una disminución de emisiones de CO₂. Estos vehículos al ser más ecológicos disponen de etiqueta cero emisiones de la DGT al igual que los vehículos eléctricos puros y tienen acceso a una serie de ventajas-que aportan estas etiquetas, como acceder a zonas que están restringidas a la circulación y entrar a ciudades cuando están activos los protocolos anticontaminación (Díez González, 2019).

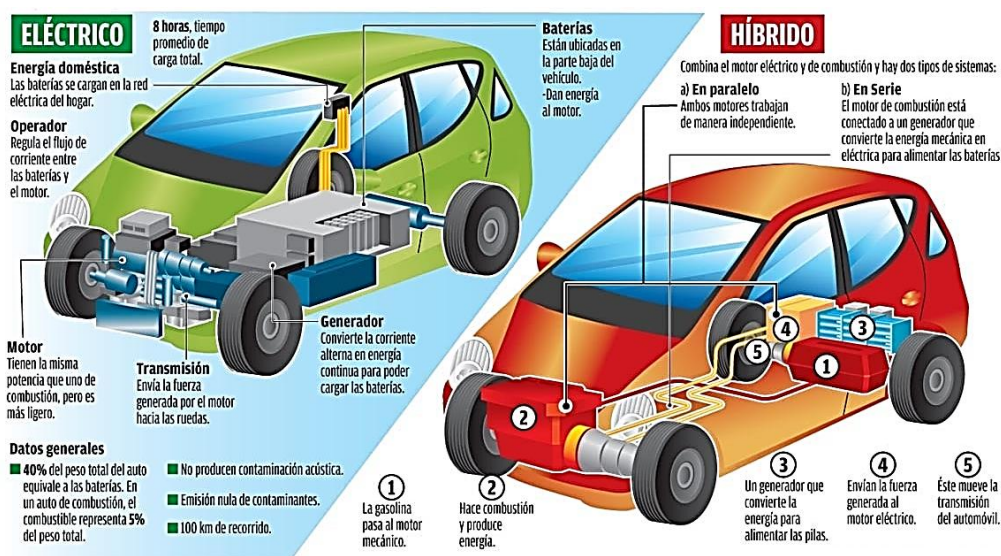


Figura 7 Descripción comparativa entre vehículos eléctricos e híbridos

Fuente: Reproducida de *Vehículos eléctricos e híbridos: aspectos conceptuales, legislación nacional y comparada* (P.7), Por Gabriel Duarte, 2018, DIDP

2.2.5. Autonomía de un vehículo eléctrico

La autonomía depende directamente de la capacidad de las baterías que tenga el vehículo eléctrico lo que permite el funcionamiento del motor eléctrico por una cierta cantidad de kilómetros hasta que tenga que recargarse nuevamente.

Existen procesos de medición ya estandarizados para saber cuál es la autonomía de un coche eléctrico, para esto se tiene como referencia dos tipos de pruebas, una de ellas la

EPA (Environmental Protection Agency) O “Agencia de Protección Ambiental”, norma que es utilizada para la evaluación de los vehículos eléctricos en USA, y las pruebas de ciclo WLTP cuyas siglas significan “Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure” o “Procedimiento Mundial Armonizado para Ensayos de Vehículos Ligeros”, esta-puede variar según ciertos factores clave que el conductor-de un vehículo eléctrico debe conocer para calcular la autonomía del vehículo. Los principales factores son el tamaño del vehículo, el peso, la capacidad de las baterías o el tipo de motor eléctrico. Por otro lado, hay elementos externos que modifican la autonomía del vehículo eléctrico, como el clima, el tipo de terreno o la forma de conducción. (Duarte Rodríguez, 2018)

Para la Tabla 1 y Tabla 2 se tomó como referencia el estudio realizado por coches.net, Autobest y otros medios de comunicación en los que ponen a prueba la autonomía de los coches eléctricos, de los cuales se extrajeron solo los modelos comerciales en nuestro país.

Tabla 1 Autonomía Real Comparada con la Autonomía Homologada WLTP

Modelo	Autonomía real (Km)	WLTP (Km)	WLTP (%)	Consumo medio (KWh)
Kia e-Niro	433,35	455	95,27	14,7
Hyundai Kona	446,64	484	92,28	14,3
Volkswagen ID3	338,53	421	80,41	17,1

Fuente: Adaptada de *¿Cuál es la autonomía real de los coches eléctricos?*, Coches.net.
(<https://www.coches.net/videos/ecobest-challenge-autonomia-real-ev>)

Tabla 2 Carga Real Comparada con la Capacidad Teórica Neta de la Batería

Modelo	Capacidad bruta (KWh)	Capacidad neta (KWh)	Energía cargada (KWh)	Consumo eléctrico (Wh/km)
Kia e-Niro	67,5	64	71,51	147.7
Hyundai Kona	67,5	64	73,33	143.3
Volkswagen ID3	62	58	61,41	171.3

Fuente: Adaptada de *¿Cuál es la autonomía real de los coches eléctricos?*, Coches.net.
(<https://www.coches.net/videos/ecobest-challenge-autonomia-real-ev>)

2.2.6. Componentes de un sistema de aerogeneración.

Los sistemas de aerogeneración se componen principalmente de los siguientes elementos:

a) La turbina de viento.

Es el elemento que recibe la energía cinética del viento y la transforma en energía mecánica rotatoria. Está compuesto por otros elementos, principalmente por las aspas que serán las encargadas de captar el viento y existen de dos tipos: (Castañeda Villamar & Jimenes Herrera, 2021)

- **Paso fijo:** Aquí la posición de las aspas no varía cuando existen velocidades de viento que sobrepasan el valor fijado y entonces lo que se hace es limitar la cantidad de energía captada. (Castañeda Villamar & Jimenes Herrera, 2021)
- **Paso variable:** En estas turbinas se varía la posición de las aspas, es decir, cuando las velocidades de viento son elevadas, el ángulo de inclinación de las aspas cambia para que la incidencia del viento sea menor. La variación de este ángulo permite controlar la cantidad de energía mecánica entregada al generador. (Castañeda Villamar & Jimenes Herrera, 2021)

b) El Generador

Los generadores de imanes permanentes sin escobillas son esenciales en los aerogeneradores contemporáneos, convirtiendo la energía del viento en electricidad. Estos dispositivos emplean imanes permanentes en lugar de electroimanes, lo que minimiza las necesidades de mantenimiento y maximiza la eficiencia. De acuerdo con la investigación en la industria eólica, estos generadores ofrecen una mayor confiabilidad y rendimiento en comparación con los modelos tradicionales.

Por ejemplo, un estudio reciente (Smith & Jones, 2019) resaltó la importancia de estos generadores para optimizar la eficiencia de los aerogeneradores y reducir los costos asociados con su operación y mantenimiento. Asimismo, la Asociación Americana de Energía Eólica (AWEA, 2023) enfatiza en su informe anual la relevancia de la tecnología de generadores de imanes permanentes sin escobillas para el progreso de la industria eólica.



Figura 8 Generador de imanes permanentes sin escobillas

Fuente: Reproducida de *Alternador de imán permanente vertical, generador Maglev sin núcleo*, AliExpress, (<https://es.aliexpress.com>).

c) Controlador

Es la unidad que verifica la adecuada calidad de la corriente que suministra el aerogenerador. Esta unidad es fundamental debido a que uno de los mayores desafíos de la energía eólica es el carácter fluctuante e impredecible del viento, puesto que, al fluctuar el viento también fluctúa la cantidad de energía disponible.

Incluso en sitios con vientos constantes existen variaciones en la velocidad y dirección del viento que afectan la capacidad del aerogenerador para suministrar energía. (Castañeda Villamar & Jimenes Herrera, 2021)



Figura 9 Controlador de generador de turbina eólica MPPT

Fuente: Reproducida de *Controlador de generador de turbina eólica MPPT, controlador de refuerzo de carga de bajo voltaje*, AliExpress, (<https://es.aliexpress.com>).

En las principales funciones de un controlador de energía eólica son:

- 1) Prevenir daños a la turbina eólica.
- 2) Prevenir daños a la carga.
- 3) Maximiza la producción de energía.

Para almacenar la energía producida por la turbina eólica es necesario emplear un convertidor que adecúe el voltaje del generador al de la batería. Dado que el generador entrega corriente alterna y la batería requiere corriente continua, el uso de este dispositivo resulta indispensable. El voltaje rectificado presenta variaciones en función de la velocidad de giro de la turbina; aunque un solo diodo rectificador puede ser suficiente para cargar la batería, este impone un voltaje fijo y, en consecuencia, una velocidad de

rotación determinada, lo que reduce de manera considerable la eficiencia del sistema. (Castañeda Villamar & Jimenes Herrera, 2021)

d) Baterías

Las baterías constituyen el elemento central en todo sistema de aerogeneración. Su función principal es mantener el equilibrio entre las demandas eléctricas de salida y la energía suministrada de entrada. Actúan como una fuente estable de energía cuando no hay disponibilidad de viento y también permiten entregar potencia en periodos cortos. Representan el medio de almacenamiento eléctrico más utilizado. Se distinguen tres tipos principales: plomo-ácido, níquel y litio. Cada uno está conformado por celdas que integran electrodos positivos y negativos, inmersos en un electrolito. (Castañeda Villamar & Jimenes Herrera, 2021)

De manera general, se aconseja cargar una batería con una corriente equivalente al 10%–20% de su capacidad nominal. Con base en esta recomendación es posible efectuar cálculos ilustrativos. Por ejemplo, si se dispone de una batería de 12 V y 100 amperios-hora (Ah) de capacidad nominal, la corriente de carga adecuada debería estar en el rango de 10 Ah a 20 Ah para asegurar un proceso de carga eficiente. (AutoSolar, 2024)



Figura 10 Batería para uso en sistemas eólicos

Fuente: Reproducida de *Batería 12v 100Ah de gel DG12-100 Solar Y Eólica Ritar*, Mercado Libre, (<https://listado.mercadolibre.com.pe/bateria-eolica>).

III. Metodología.

3.1. Enfoque y tipo de investigación

El presente estudio corresponde a una investigación cuantitativa de tipo experimental aplicada, ya que busca evaluar el comportamiento de aerogeneradores de eje vertical instalados en un vehículo en movimiento, mediante la recolección y análisis de datos medibles, cuyo objetivo fue evaluar su viabilidad como sistema de apoyo a la autonomía de los vehículos eléctricos.

3.2. Método y diseño experimental

Se aplicó el método experimental, diseñando, modelando e implementando dos prototipos funcionales: un aerogenerador tipo Savonius y un modelo híbrido Savonius-Darrieus. Cada uno fue evaluado de manera individual y secuencial, instalándolos por separado sobre el techo de un vehículo de prueba. Las mediciones se realizaron en condiciones reales de desplazamiento, y posteriormente se compararon los resultados obtenidos para determinar cuál diseño ofrecía un mejor rendimiento eléctrico.

3.3. Población y muestra

La población objetivo del estudio está constituida por los vehículos eléctricos, ya que el propósito de la investigación es explorar la factibilidad de incorporar un sistema de generación eólica auxiliar que contribuya a mejorar su autonomía energética.

La muestra experimental estuvo representada por un vehículo de prueba tipo SUV, marca JAC modelo JS2, de motor a combustión interna, sobre el cual se instalaron los aerogeneradores de eje vertical. Si bien el vehículo no es eléctrico, se utilizó como plataforma para validar la producción de energía del sistema en movimiento, simulando

las condiciones de flujo de aire que un vehículo eléctrico también generaría durante su desplazamiento.

3.4. Proceso metodológico

El proceso metodológico se desarrolló en las siguientes etapas:

3.4.1. Determinación del recurso eólico

Se midió la velocidad del viento en tres zonas del vehículo (capó, techo y parte posterior) mediante un anemómetro digital, determinando que el techo era la zona óptima para instalar el aerogenerador debido a la mayor velocidad de viento registrada.

Tabla 3 Promedio de velocidad de viento en capó, techo y sección trasera

Velocidad del Vehículo (Km/h)	Velocidad de viento en capó (m/s)	Velocidad de viento en el techo (m/s)	Velocidad de viento en la sección trasera (m/s)
30	5.10	8.20	1.38
40	5.54	7.71	1.78
50	6.65	6.96	1.85
60	9.92	12.53	1.90
70	9.60	13.34	8.53
80	9.55	16.04	9.55
90	12.94	17.99	7.96
100	14.86	21.47	10.89
PROMEDIO TOTAL	9.27	13.03	5.48

Fuente: Elaboración propia.

Los promedios de las mediciones de velocidad de viento presentadas en la Tabla 3 fueron extraídos del ANEXO 1. Para el cálculo de la potencia disponible de cada prototipo se realizaron mediciones de velocidad de viento, únicamente en el techo, sabiendo esto en la Tabla 4 se presentan los valores promedio de las velocidades de viento registradas en ambos sentidos de circulación, de Sur – Norte y Norte – Sur, de acuerdo con los datos obtenidos en el ANEXO 3.

Tabla 4 Promedio de velocidades de viento para cálculo de potencia disponible

Velocidad del Vehículo (Km/h)	Velocidad de viento SUR - NORTE (m/s)	Velocidad de viento NORTE - SUR (m/s)	Promedio (m/s)
60	9.22	10.66	9.94
65	10.83	12.01	11.42
70	11.53	12.96	12.25
75	11.85	14.78	13.32
80	12.64	15.58	14.11
85	13.21	16.61	14.91
90	13.66	19.32	16.49
95	14.38	20.51	17.45
100	16.14	22.55	19.35

Fuente: Elaboración propia.

3.4.2. Diseño y modelado de los aerogeneradores:

Se diseñaron dos tipos de aerogeneradores de eje vertical (VAWT): un modelo Savonius y un modelo híbrido Savonius-Darrieus, utilizando el software de diseño AutoCAD. En esta etapa se realizaron también cálculos teóricos de potencia eólica.

A continuación, se detallan las características de los dos aerogeneradores:

a) Aerogenerador Savonius

La turbina Savonius tiene un diámetro de 48 cm, compuesta por ocho álabes dispuestos uniformemente con una separación angular de 45° entre ellos. La altura de cada álabe es de 13.5 cm, la cuerda de 14 cm, y la flecha es de 4 cm. Para el diseño de la carcasa y conducto, se tomaron como referencia las dimensiones de la parrilla del vehículo de prueba, a fin de garantizar una integración adecuada del sistema. Las dimensiones detalladas de la turbina y su carcasa se encuentran en el ANEXO 4. En la Figura 11 se presenta el modelado 3D del sistema, elaborado en AutoCAD.

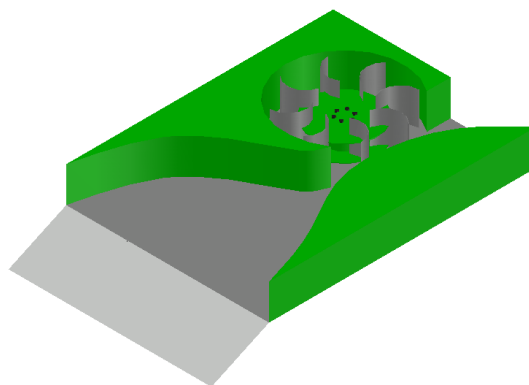


Figura 11 Modelo 3D del aerogenerador Savonius

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 5 se presenta la potencia eólica disponible para este diseño mejorado del aerogenerador Savonius que depende de la velocidad vehicular, utilizando los promedios de velocidad de viento calculadas en la Tabla 4.

Tabla 5 Cálculo de la potencia eólica disponible para el modelo Savonius

Velocidad Del Vehículo (km/h)	Velocidad Promedio Del Viento (m/s)	Potencia Disponible (W)
60	9.94	77.60
65	11.42	117.68
70	12.25	145.07
75	13.32	186.52
80	14.11	221.96
85	14.91	261.90
90	16.49	354.29
95	17.45	419.48
100	19.35	572.01

Fuente: Elaboración propia.

b) Aerogenerador Darrieus

Se optó por un aerogenerador tipo Giromill de tres álabes principales, distribuidos equidistantemente con una separación angular de 120° entre ellos. Entre cada par de álabes se incorporaron perfiles cóncavos tipo Savonius, con el objetivo de facilitar el arranque del rotor. El diámetro total de la turbina es de 70 cm, superior al del modelo Savonius, debido a que este diseño no requiere un conducto de guía de flujo. Los álabes principales utilizan el perfil aerodinámico NACA 0018, con una cuerda de 15 cm y una altura de 20 cm. Las dimensiones detalladas del diseño se presentan en el ANEXO 5 y en la Figura 12 se aprecia el modelo 3D de la turbina, también desarrollada en AutoCAD.

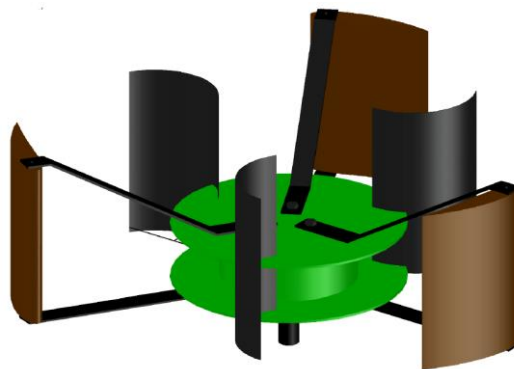


Figura 12 Modelo 3D del aerogenerador híbrido Savonius-Darrieus

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 6 se presenta la potencia eólica disponible para este diseño del aerogenerador híbrido Savonius–Darrieus que depende de la velocidad vehicular, utilizando los promedios de velocidad de viento calculadas en la Tabla 4.

Tabla 6 Cálculo de la potencia eólica disponible para el modelo Savonius-Darrieus

Velocidad Del Vehículo (km/h)	Velocidad Promedio Del Viento (m/s)	Potencia Disponible (W)
60	9.94	84.22
65	11.42	127.71
70	12.25	157.44
75	13.32	202.42
80	14.11	240.89
85	14.91	284.23
90	16.49	384.50
95	17.45	455.25
100	19.35	620.78

Fuente: Elaboración propia.

Las características de los componentes utilizados como el generador y el controlador de carga se localizan en el ANEXO 6.

3.4.3. Construcción y montaje:

Ambos prototipos fueron contruidos utilizando materiales ligeros y montados individualmente sobre el vehículo de prueba. Las evidencias del proceso constructivo (fotografías y planos), se encuentran en los Anexos de este documento.

3.4.4. Instrumentos de medición

Para la recolección de datos cuantitativos se utilizaron los siguientes instrumentos de medición esenciales:

- ✓ Anemómetro digital: Medición de la velocidad del viento durante el desplazamiento del vehículo.
- ✓ Multímetro digital: Registro del voltaje generado por cada prototipo.
- ✓ Pinza amperimétrica: Medición de la corriente generada.
- ✓ Velocímetro del vehículo: Registro de la velocidad durante las pruebas en ruta

A continuación, en la Figura 13, se presenta el diagrama del sistema de medición junto con la configuración de la conexión utilizada.

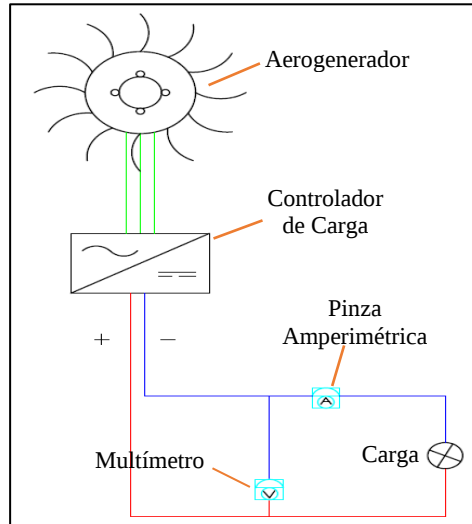


Figura 13 Sistema de medición de Voltaje y Amperaje
Fuente: Elaboración propia.

3.4.5. Recolección de datos experimentales:

Se realizaron las pruebas en ruta por separado para cada prototipo, manteniendo las mismas condiciones y rangos de velocidad (60 a 100 km/h). Se registraron los valores de voltaje y corriente eléctrica utilizando un multímetro digital y una pinza amperimétrica, diferenciando el sentido de circulación (Norte-Sur y Sur-Norte) para cada ensayo.

3.4.6. Procesamiento de datos:

Con los datos obtenidos se calcularon la potencia eléctrica, energía generada y el coeficiente de potencia (C_p) para cada diseño. Finalmente, se comparó el desempeño de ambos modelos para evaluar su viabilidad como fuente auxiliar de energía en vehículos eléctricos.

IV. Resultados y discusión

Una vez completado el diseño, modelado e instalación de los aerogeneradores verticales Savonius e híbrido Savonius-Darrieus sobre el vehículo de prueba, se desarrollaron pruebas experimentales independientes para cada modelo. Estas se realizaron en tramos rectos y en ambos sentidos de circulación, a fin de cuantificar la energía generada y comparar el rendimiento de ambos diseños.

4.1. Resultados experimentales del aerogenerador tipo Savonius

4.1.1. Análisis de voltaje, corriente, potencia y energía generada

Se evaluó el desempeño del aerogenerador Savonius en los sentidos Norte-Sur y Sur-Norte. Los valores de voltaje, corriente y potencia fueron registrados en diferentes velocidades del vehículo, entre 60 y 100 km/h. La energía fue estimada considerando 1 minuto de funcionamiento por velocidad.

Se presentan los promedios obtenidos en las Tablas 7 y 8. Se observa mayor generación en el sentido Norte-Sur, lo que indica una influencia favorable del viento en esa dirección.

Tabla 7 Promedios de voltaje y corriente generados por el aerogenerador Savonius según velocidad del vehículo – Dirección Norte-Sur

Velocidad (km/h)	Corriente eléctrica (A)	Voltaje (V)	Potencia (W)	Energía (Wh)
60	0.84	0.32	0.27	0.0045
65	0.97	0.45	0.44	0.0073
70	1.09	0.66	0.72	0.0120
75	1.24	0.98	1.22	0.0203
80	1.42	1.37	1.95	0.0325
85	1.58	1.89	2.99	0.0498
90	1.75	2.38	4.16	0.0693
95	1.96	3.01	5.9	0.0983
100	2.24	3.96	8.87	0.1478

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8 Promedios de voltaje y corriente generados por el aerogenerador Savonius
según velocidad del vehículo – Dirección Sur-Norte

Velocidad (km/h)	Corriente eléctrica (A)	Voltaje (V)	Potencia (W)	Energía (Wh)
60	0.39	0.11	0.04	0.0007
65	0.46	0.13	0.06	0.001
70	0.54	0.16	0.09	0.0015
75	0.67	0.21	0.14	0.0023
80	0.72	0.23	0.17	0.0028
85	0.83	0.3	0.25	0.0042
90	0.95	0.39	0.37	0.0062
95	1.03	0.47	0.48	0.008
100	1.18	0.69	0.82	0.0137

Fuente: Elaboración propia.

4.1.2. Comparación por sentido de circulación

Se elaboraron gráficos comparativos de potencia y energía generada por velocidad para ambos sentidos. La Figura 14 muestra que la dirección Norte-Sur permitió un mejor aprovechamiento del recurso eólico, siendo este sentido el elegido para los cálculos de eficiencia.

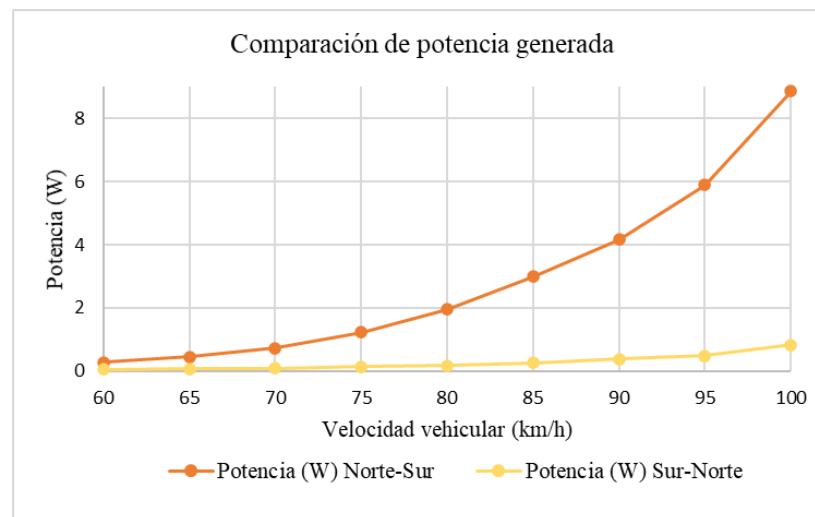


Figura 14 Comparación de potencia generada según sentido de circulación (Savonius)

Fuente: Elaboración propia.

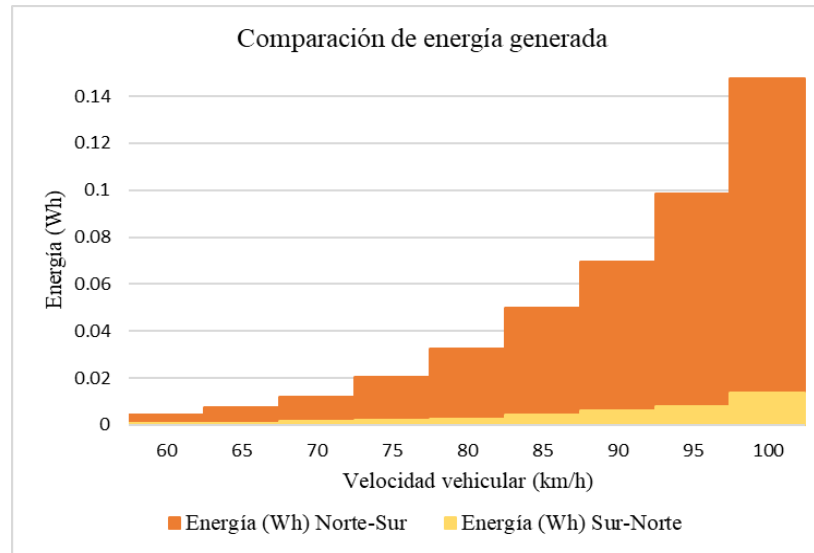


Figura 15 Comparación de energía generada según sentido de circulación (Savonius)

Fuente: Elaboración propia.

4.1.3. Cálculo del coeficiente de potencia (C_p)

Utilizando la potencia eólica disponible previamente calculada (Tabla 5), se determinó el coeficiente de potencia (C_p) a cada velocidad. Los resultados se muestran en la Tabla 9, con un valor máximo de 0.0155 a 100 km/h, indicando un rendimiento bajo pero progresivo con la velocidad.

Tabla 9 Cálculo del C_p máximo para cada velocidad vehicular (Savonius)

Velocidad (km/h)	Potencia Generada (W)	Potencia Eólica Disponible (W)	C_p
60	0.27	77.60	0.0035
65	0.44	117.68	0.0037
70	0.72	145.07	0.0050
75	1.22	186.52	0.0065
80	1.95	221.96	0.0088
85	2.99	261.90	0.0114
90	4.16	354.29	0.0118
95	5.90	419.48	0.0141
100	8.87	572.01	0.0155

Fuente: Elaboración propia.

4.2. Resultados experimentales del aerogenerador híbrido Savonius-Darrieus

4.2.1. a) Análisis de voltaje, corriente, potencia y energía generada

Las pruebas del modelo híbrido se realizaron bajo las mismas condiciones del modelo anterior. En las Tablas 10 y 11 se detallan los resultados promedio para cada sentido de circulación.

Tabla 10 Promedios de voltaje y corriente generados por el aerogenerador híbrido según velocidad del vehículo – Dirección Norte-Sur

Velocidad (km/h)	Corriente eléctrica (A)	Voltaje (V)	Potencia (W)	Energía (Wh)
60	1.73	1.91	3.31	0.0552
65	2.04	2.69	5.50	0.0916
70	2.20	3.08	6.79	0.1132
75	2.62	4.13	10.81	0.1802
80	2.72	4.67	12.67	0.2112
85	3.02	5.58	16.85	0.2808
90	3.22	6.26	20.18	0.3363
95	3.46	7.01	24.22	0.4037
100	3.60	7.62	27.41	0.4568

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11 Promedios de voltaje y corriente generados por el aerogenerador híbrido según velocidad del vehículo – Dirección Sur-Norte

Velocidad (km/h)	Corriente eléctrica (A)	Voltaje (V)	Potencia (W)	Energía (Wh)
60	0.71	0.43	0.30	0.0050
65	0.98	0.58	0.57	0.0095
70	1.03	0.66	0.68	0.0113
75	1.43	1.10	1.57	0.0262
80	1.54	1.35	2.07	0.0345
85	1.74	1.88	3.27	0.0545
90	1.98	2.42	4.79	0.0799
95	2.23	3.12	6.96	0.1160
100	2.41	3.59	8.63	0.1439

Fuente: Elaboración propia.

La energía generada fue notablemente superior respecto al modelo Savonius, especialmente en el sentido Norte-Sur, con una potencia máxima de 27.41 W a 100 km/h.

4.2.2. Comparación por sentido de circulación

Las gráficas comparativas de ambos sentidos (Figura 16 y 17) muestran una diferencia significativa a favor del trayecto Norte-Sur, por lo que también se consideró este sentido para el cálculo del C_p y el análisis comparativo.

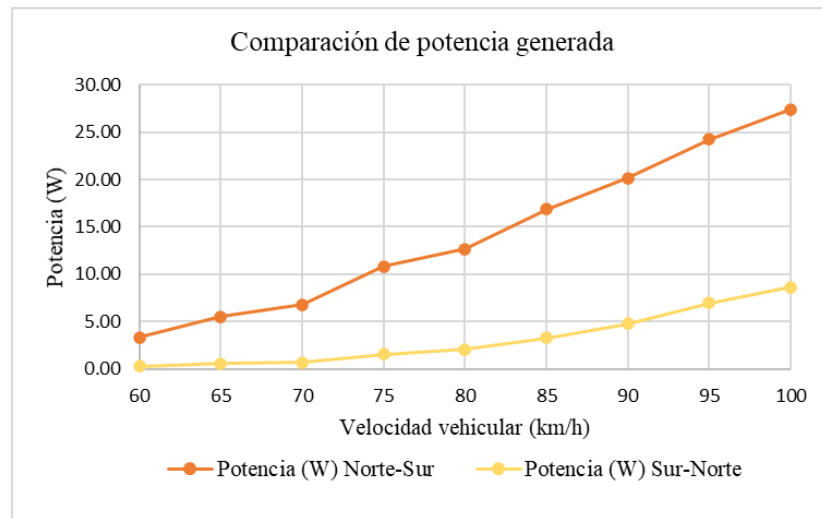


Figura 16 Comparación de potencia generada según sentido de circulación (Savonius-Darrieus)

Fuente: Elaboración propia.

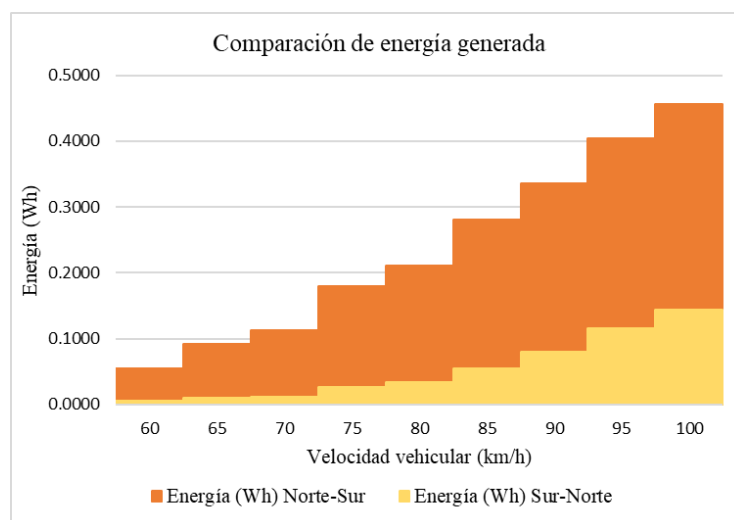


Figura 17 Comparación de energía generada según sentido de circulación (Savonius-Darrieus)

Fuente: Elaboración propia.

4.2.3. Cálculo del coeficiente de potencia (C_p)

A partir de la potencia eólica disponible (Tabla 6), se calculó el C_p del modelo híbrido. Los resultados (Tabla 12) indican un valor máximo de 0.0593 a 85 km/h, el más alto registrado en todo el estudio.

Tabla 12 Cálculo del C_p máximo para cada velocidad vehicular (Savonius-Darrieus)

Velocidad (km/h)	Potencia Generada (W)	Potencia Eólica Disponible (W)	C_p
60	3.31	84.22	0.0393
65	5.50	127.71	0.0430
70	6.79	157.44	0.0432
75	10.81	202.42	0.0534
80	12.67	240.89	0.0526
85	16.85	284.23	0.0593
90	20.18	384.50	0.0525
95	24.22	455.25	0.0532
100	27.41	620.78	0.0442

Fuente: Elaboración propia.

4.3. Análisis comparativo de ambos modelos

4.3.1. Comparación en condiciones similares

Se generó una tabla resumen donde se comparan los valores de potencia y energía generada por ambos modelos, bajo la misma velocidad y condiciones (sentido Norte-Sur). El modelo híbrido superó consistentemente al modelo Savonius en todos los rangos, lo que se evidencia en una mayor eficiencia, especialmente a velocidades superiores a 70 km/h, donde la potencia generada se incrementa exponencialmente.

Asimismo, se generaron las gráficas comparativas de potencia y energía generadas por ambos prototipos (Figuras 18 y 19)

Tabla 13 Comparación de desempeño eléctrico de ambos aerogeneradores (Norte-Sur)

Velocidad (km/h)	SAVONIUS				HÍBRIDO			
	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia (W)	Energía (Wh)	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia (W)	Energía (Wh)
60	0.32	0.84	0.27	0.0045	1.91	1.73	3.31	0.0552
65	0.45	0.97	0.44	0.0073	2.69	2.04	5.5	0.0917
70	0.66	1.09	0.72	0.0120	3.08	2.2	6.79	0.1132
75	0.98	1.24	1.22	0.0203	4.13	2.62	10.81	0.1802
80	1.37	1.42	1.95	0.0325	4.67	2.72	12.67	0.2112
85	1.89	1.58	2.99	0.0498	5.58	3.02	16.85	0.2808
90	2.38	1.75	4.16	0.0693	6.26	3.22	20.18	0.3363
95	3.01	1.96	5.9	0.0983	7.01	3.46	24.22	0.4037
100	3.96	2.24	8.87	0.1478	7.62	3.6	27.41	0.4568

Fuente: Elaboración propia.

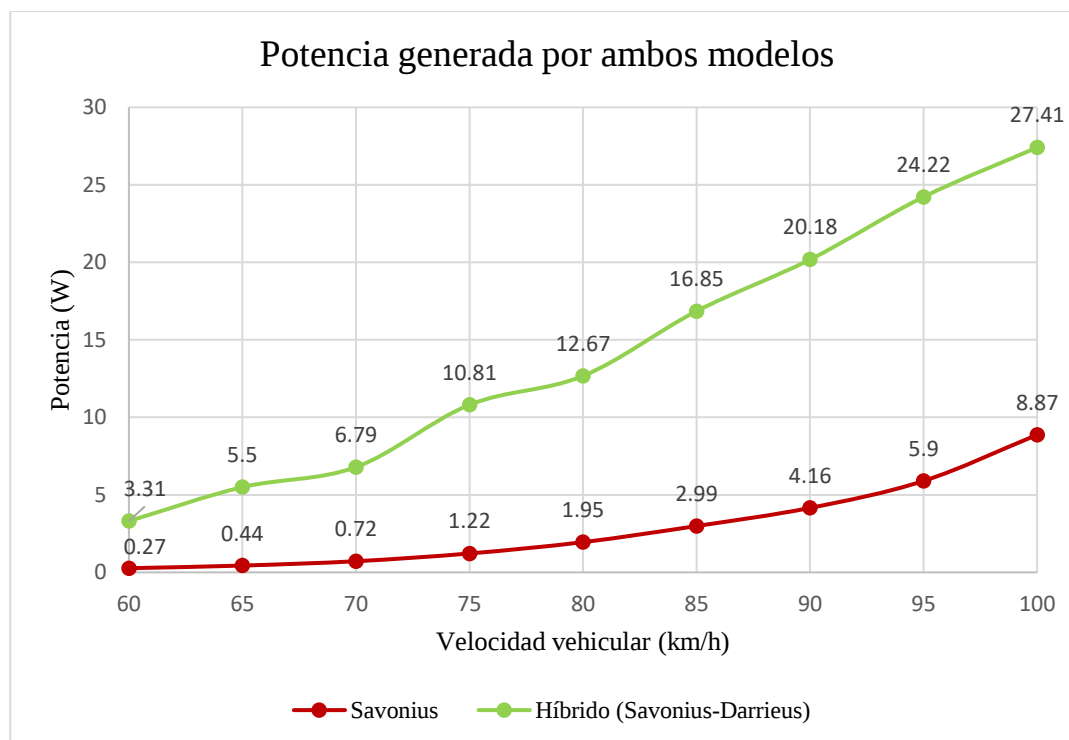


Figura 18 Potencia generada por ambos modelos en función de la velocidad del vehículo

Fuente: Elaboración propia.

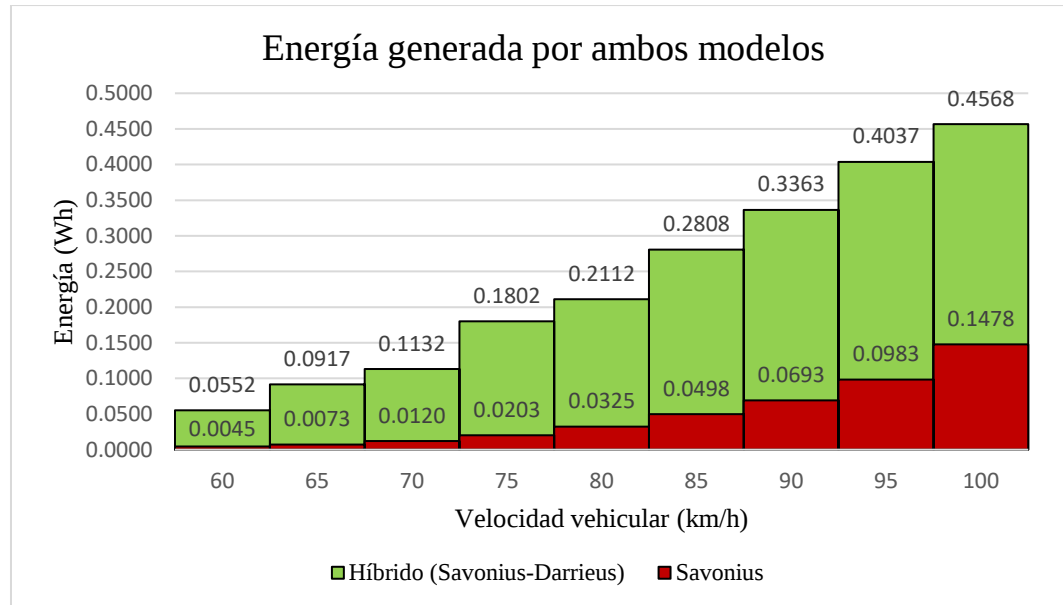


Figura 19 Energía generada por minuto a cada velocidad del vehículo

Fuente: Elaboración propia.

4.3.2. Comparación de Cp

El modelo híbrido no solo alcanzó mayor potencia, sino que también logró mayores eficiencias. El Cp promedio del híbrido fue casi el triple del registrado por el modelo Savonius.

Tabla 14 Comparación del Cp de ambos aerogeneradores (Norte-Sur)

Velocidad (km/h)	SAVONIUS			HÍBRIDO		
	Potencia Disponible (W)	Potencia Generada (W)	Cp	Potencia Disponible (W)	Potencia Generada (W)	Cp
60	77.6	0.27	0.0035	84.22	3.31	0.0393
65	117.68	0.44	0.0037	127.71	5.50	0.0431
70	145.07	0.72	0.0050	157.44	6.79	0.0431
75	186.52	1.22	0.0065	202.42	10.81	0.0534
80	221.96	1.95	0.0088	240.89	12.67	0.0526
85	261.9	2.99	0.0114	284.23	16.85	0.0593
90	354.29	4.16	0.0117	384.5	20.18	0.0525
95	419.48	5.90	0.0141	455.25	24.22	0.0532
100	572.01	8.87	0.0155	620.78	27.41	0.0442

Fuente: Elaboración propia.

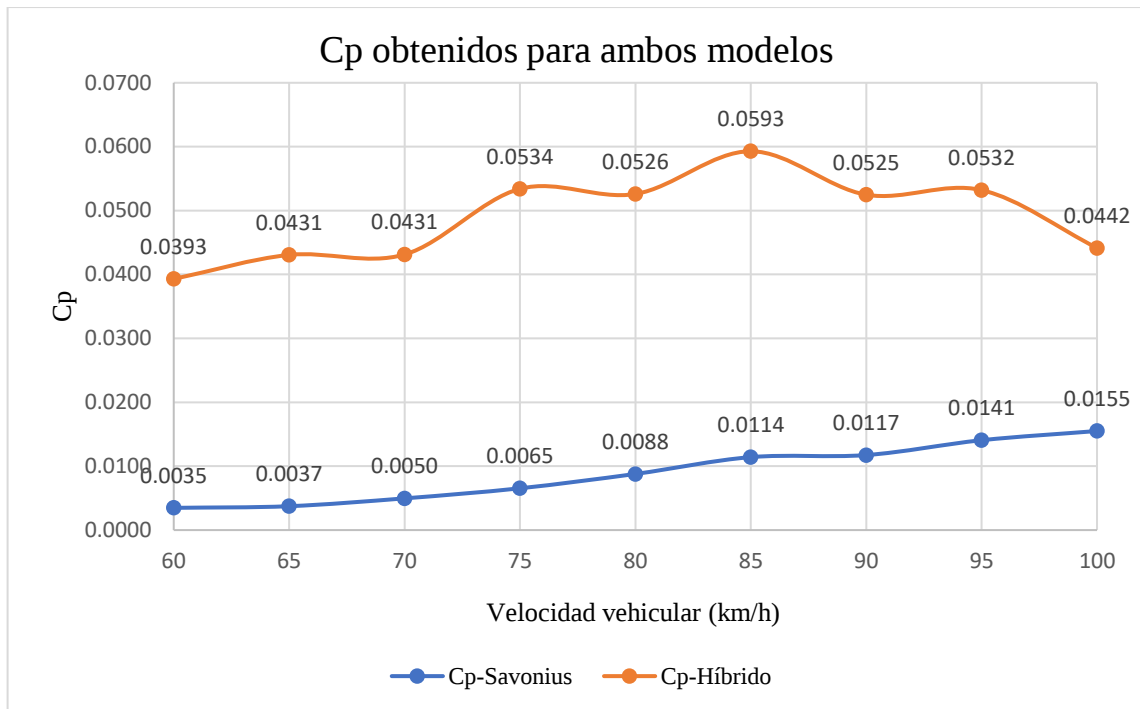


Figura 20 Comparación del comportamiento del Cp de ambos aerogeneradores

Fuente: Elaboración propia.

Los valores calculados de Cp demuestran que el modelo híbrido presenta un desempeño significativamente superior al modelo Savonius. Mientras que el Savonius alcanza un Cp máximo de aproximadamente 0.0155 a 100 km/h, el diseño híbrido logra un Cp máximo cercano a 0.0442, casi triplicando la eficiencia. Esta mejora se atribuye a la contribución del rotor Darrieus en el diseño híbrido, que permite un mejor aprovechamiento del flujo de aire a velocidades más altas, así como una reducción de las pérdidas por arrastre que caracterizan al modelo Savonius convencional.

4.3.3. Energía total generada en la ruta de prueba

Se realizó un cálculo de energía generada por cada aerogenerador en la ruta de prueba (Del km-455 al km-472 de la Panamericana Norte) a 100 km/h. El modelo híbrido produjo hasta 4.57 Wh, mientras que el Savonius alcanzó 1.48 Wh.

- **Cálculo de energía generada**

Para este cálculo utilizaremos la siguiente fórmula:

$$E = \frac{P \times t}{60}$$

Nota: Dividiremos entre 60 para que nuestro resultado esté en Wh, puesto que el tiempo está en minutos.

Para una velocidad de 100 km/h y 10 minutos de recorrido se tienen los siguientes resultados para cada aerogenerador:

✓ Savonius

$$E = \frac{8.87 \times 10}{60} = \frac{88.7}{60} = 1.48 \text{ Wh}$$

✓ Híbrido

$$E = \frac{27.41 \times 10}{60} = \frac{274.1}{60} = 4.57 \text{ Wh}$$

4.3.4. Estimación del incremento en la autonomía del vehículo

Utilizando un consumo promedio para los vehículos eléctricos de 150 Wh/km, se determinó la ganancia de autonomía. El modelo híbrido aportaría hasta 30 metros adicionales en un tiempo de 10 minutos, mientras que el modelo Savonius permitiría un incremento de hasta 10 metros, lo que indica un aporte útil pero aún limitado.

$$\text{Autonomía ganada} = \frac{\text{Energía generada (Wh)}}{\text{Consumo de energía del vehículo } (\frac{\text{Wh}}{\text{km}})}$$

Tabla 15 Autonomía ganada durante la ruta de prueba a 100km/h

Velocidad (km/h)	Tiempo (min)	Recorrido (Km)	Aerogenerador	Energía generada (Wh)	Autonomía ganada (km)
100	10	17	Savonius	1.48	0.010
100	10	17	Híbrido	4.57	0.030

Fuente: Elaboración propia.

Aunque la energía generada en una sola ruta de 17 km representa una fracción muy pequeña de la energía total consumida por un vehículo eléctrico, los resultados indican que el modelo híbrido Savonius-Darrieus ofrece una mayor eficiencia de conversión energética, especialmente a velocidades altas. A largo plazo, esta tecnología podría aportar un complemento energético útil, especialmente en condiciones de viento favorables.

Por otro lado, teniendo en cuenta que la autonomía promedio de los vehículos eléctricos es de 450km, se realizaron las estimaciones para calcular cuánto sería el aumento máximo de autonomía en las mismas condiciones que la ruta de prueba (100km/h, Norte-Sur), obteniendo que el aerogenerador Savonius aportaría 0.261km mientras que el híbrido Savonius-Darrieus aportaría 0.806km adicionales aumentando un 0.18% la autonomía del vehículo eléctrico.

4.4. Discusión de resultados

- Si bien la energía generada por los aerogeneradores instalados en el techo del vehículo es limitada, los resultados experimentales evidencian que sí existe una generación efectiva de energía, especialmente en el caso del modelo híbrido Savonius-Darrieus, que alcanzó una producción máxima de hasta 4.57 Wh en una ruta de 17 km. Sin embargo, comparada con el consumo típico de un vehículo eléctrico (150 Wh/km), esta generación representa un incremento mínimo en la autonomía. Por tanto, si bien no sustituye una fuente principal de carga, puede ser útil como aporte auxiliar o complementario, especialmente en trayectos largos o en combinación con otras fuentes renovables.
- El aerogenerador híbrido Savonius-Darrieus demostró un rendimiento superior en todos los aspectos: potencia, energía generada y coeficiente de potencia (C_p). Mientras que el modelo Savonius mostró un C_p máximo de 0.0155, el híbrido alcanzó 0.0593, triplicando su eficiencia. Su diseño combinó la capacidad de autoarranque del rotor Savonius con el mejor aprovechamiento aerodinámico del perfil Darrieus, lo cual permitió un desempeño más robusto a mayores velocidades.
- Una de las principales causas de la disminución del rendimiento del aerogenerador híbrido Savonius-Darrieus a partir de los 85 km/h fue la presencia de vibraciones en el sistema, originadas por los esfuerzos adicionales que ejerce el viento sobre la turbina a altas velocidades.
- También otro punto importante que influyó en el diseño de los aerogeneradores fue el espacio limitado, las dimensiones del vehículo condicionan el tamaño y el diseño de los aerogeneradores, restringiendo su capacidad de captación.

CONCLUSIONES

- De acuerdo con los resultados obtenidos, la autonomía proyectada del 10% no se alcanzó. No obstante, la energía generada, si bien no sustituye a las fuentes principales de carga, permitió implementar un sistema complementario capaz de alimentar el sistema de iluminación del vehículo, contribuyendo indirectamente a la autonomía al reducir el consumo de las baterías del vehículo eléctrico.
- Se cumplió con la revisión bibliográfica exhaustiva que permitió comprender los principios de funcionamiento, ventajas y limitaciones de los aerogeneradores de eje vertical, especialmente en contextos móviles. Esta revisión sirvió como base técnica para el diseño e implementación de los prototipos.
- Se diseñaron y construyeron dos modelos: un aerogenerador tipo Savonius con 50cm de diámetro y una altura de 13.5cm, y un modelo híbrido Savonius-Darrieus con diámetro de 70cm, un perfil NACA0018 de 15cm de cuerda y una altura de 20cm. Ambos fueron instalados sobre el vehículo de prueba, respetando restricciones de espacio y condiciones reales de operación.
- La energía generada fue cuantificada a distintas velocidades vehiculares. El modelo híbrido Savonius-Darrieus logró una generación máxima de 4.57 Wh, mientras que el Savonius alcanzó un máximo de 1.48 Wh en una ruta de 17 km a 100 km/h. Estos valores fueron empleados para calcular la contribución del sistema a la autonomía del vehículo.

- Se evaluó la eficiencia de ambos modelos en función de la velocidad del vehículo. El C_p alcanzó un valor máximo de 0.0593 para el modelo híbrido y 0.0155 para el modelo Savonius, destacando al diseño híbrido como el más eficiente en condiciones reales.
- Finalmente, se estimó el incremento en la autonomía del vehículo utilizando los valores de energía generada en las condiciones óptimas, obteniendo que el aerogenerador Savonius aportaría 0.261km mientras que el híbrido Savonius-Darrieus aportaría 0.806km adicionales a la autonomía del vehículo eléctrico. Aunque el incremento fue bajo, los resultados demuestran que, con mejoras en diseño y materiales, es posible aumentar el aporte energético del sistema eólico y avanzar hacia soluciones de energía renovable integrada a la movilidad eléctrica.
- El beneficio energético-ambiental que representa la contribución del aerogenerador de eje vertical a la autonomía del vehículo eléctrico mediante la generación de energía renovable, reduce la demanda de electricidad convencional utilizada para la carga vehicular y, consecuentemente, las emisiones contaminantes asociadas a la producción de ésta.

RECOMENDACIONES

- En cuanto al diseño del aerogenerador, sería indispensable considerar un área de barrido mayor, al igual que el tamaño del rotor para poder aumentar el torque producido por este, ya que el generador eléctrico al estar conectado a una carga genera una resistencia al giro, el cual podría mitigarse al aumentar el diámetro del rotor.
- Según nuestra experiencia en cuanto a la construcción del aerogenerador, se recomienda el uso de materiales de mayor resistencia mecánica y más ligeros, como la fibra de vidrio. Esto permitiría mejorar la durabilidad y estabilidad estructural de las palas del rotor, minimizando el riesgo de fractura debido a la fuerza del viento.
- Es necesario fomentar en el Perú el desarrollo de políticas públicas que promuevan la adopción de energías renovables para el abastecimiento de vehículos eléctricos, las cuales motiven a profesionales e investigadores a profundizar en estudios como el presente, para encaminarnos hacia una matriz energética más sostenible.
- Si bien los resultados obtenidos en este proyecto han evidenciado áreas de oportunidad para optimización, se espera que sirvan como base para futuras investigaciones en el campo de la minieólica aplicada a la electromovilidad. Se alienta a las próximas generaciones de investigadores a continuar explorando este tema, incorporando las recomendaciones aquí planteadas para mejorar la eficiencia y viabilidad de este tipo de sistemas eólicos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- admin. (2022, septiembre 2). ¿Qué es la Energía Eólica? Cómo funciona: ventajas y desventajas de la energía eólica. *Erenovable.com*. <https://erenovable.com/que-es-la-energia-eolica-como-funciona-ventajas-y-desventajas-de-la-energia-eolica/>
- Alave-Vargas, E. M., Lafuente, R. O., & Sempértegui-Tapia, D. F. (2022). ESTADO DEL ARTE SOBRE AEROGENERADORES DE EJE VERTICAL (Monografía). *Revista Investigación & Desarrollo*, 22(1). <https://doi.org/10.23881/idupbo.022.1-13i>
- Aparicio Romero, J. A., Meza Allpas, N. A., & Núñez Flores, P. R. (2022). Diseño de un vawt savonius para recolectar energía eólica de vehículos que se desplazan por la vía del sector de Quebrada Honda - Huancayo. *Universidad Continental*. <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/11988>
- Cabrero Carabel, M. (2024). *Contribución a la movilidad sostenible mediante la integración de un aerogenerador como sistema de recuperación de energía para vehículos eléctricos*. <https://repositorio.comillas.edu/xmlui/handle/11531/86608>
- Camilo Andrés, H. M. (2013). Diseño de un sistema de energía eólica para el uso y el almacenamiento de energía en la batería de un vehículo eléctrico. *Repositorio IUE*. <https://bibliotecadigital.iue.edu.co/handle/20.500.12717/447>
- Castañeda Villamar, E. E., & Jimenes Herrera, B. L. (2021). *Análisis del rendimiento de un sistema aerogenerador tipo horizontal en el edificio de la UPS sede Guayaquil*. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/20325/1/UPS-GT003225.pdf>

- Castro, N. J. R., Pareja, M. L. I., & Dávila, M. O. (2015). Desarrollo de una máquina eólica de doble turbina de eje vertical para la generación de energía en un auto eléctrico. *Ingeniare*, 19, 117-126. <https://doi.org/10.18041/1909-2458/ingeniare.19.529>
- Centro de Energías Renovables y Uso Racional de la Energía (CER-UNI). (2023, enero 27). <https://cybertesis.uni.edu.pe/handle/20.500.14076/5623>
- Chauca Pozo, J. F. (2018). *Aprovechamiento de la energía eólica transformada a energía eléctrica mediante la implementación de un Savonius en el automóvil* [BachelorThesis]. <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/7910>
- Chugchilan Aguilar, E. A. (2023, 2024). *Vehículos Híbridos y Eléctricos*. Scribd. <https://es.scribd.com/document/652486094/VEHICULOS-HIBRIDOS-Y-ELECTRICOS>
- DUARTE RODRÍGUEZ, G. (2018, octubre). *Vehículos Eléctricos e Híbridos: Aspectos Conceptuales, Legislación Nacional y Comparada*. [https://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con5_uibd.nsf/4B9CCE8B4906567405258330008187C1/\\$FILE/VEHICULOS-EL%C3%89CTRICOS-H%C3%8DBRIDOS.pdf](https://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con5_uibd.nsf/4B9CCE8B4906567405258330008187C1/$FILE/VEHICULOS-EL%C3%89CTRICOS-H%C3%8DBRIDOS.pdf)
- El Límite de Betz en la generación de Energía Eólica | ESingeniería Net. (2024, febrero 11). *ESingeniería*. <https://esingenieria.net/el-limite-de-betz-en-la-generacion-energia-eolica/>
- Guzmán Cajiao, K. (2017). *ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA UN SISTEMA DE RECARGA POR ENERGÍA EÓLICA PARA UN VEHÍCULO ELÉCTRICO EN LA CIUDAD DE QUITO*. <https://repositorio.uisek.edu.ec/handle/123456789/2646>

Hincapié Niño, A. M., & Jaimes Hernández, O. J. (s. f.). *Implementación del aerogenerador híbrido Darrieus-Savonius en un vehículo para la generación energética*. Recuperado 7 de junio de 2025, de <https://ciencia.lasalle.edu.co/items/83dfe70c-2249-4307-be6a-3794953e4db6>

MINEM. (2016). *SBCC-05/PROSEMER-MINEM Estudio para aprovechamiento eólico con fines energéticos y actualización del atlas eólico del Perú*. biblioteca.olade.org. <https://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/cg00367.pdf>

Mohamed R. Gomaa. (2023). Comparación entre turbinas eólicas de eje horizontal y vertical. *Revista Internacional de Ingeniería de Energía Aplicada (IJAPE)*, Vol. 12. https://www.academia.edu/97992369/Comparison_between_horizontal_and_vertical_axis_wind_turbine

Pérez Posse, Matías. (2023, junio 14). *Diseño y construcción del rotor de una turbina eólica tipo Savonius*. <http://rinfi.fi.mdp.edu.ar/xmlui/handle/123456789/764>

Rafael Vidal Herrera. (2014, octubre). *Item 1004/685* | Repositorio CIMAV. <https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1004/685>

Salvador Cucó Pardillos. (2017). *Producto: Manual de energía eólica. Desarrollo de proyectos e instalaciones* [Valencia]. universitat politècnica de Valencia. https://www.lalibreria.upv.es/portaEd/UpvGESTore/products/p_6330-1-1

- Santiago Cuadros, K. A. (2014). Diseño de aerogenerador tipo Darrieus helicoidal para su operación en el campus Palmas de la Universidad EIA. *Universidad EIA, Trabajo de grado-Pregrado*. <https://repository.eia.edu.co/entities/publication/97deea26-f79e-4e68-ba65-925752295df3>
- Turbina Savonius. (2013, septiembre 17). *La ayuda del viento*. <https://turbinasavonius.wordpress.com/turbina-savonius/>
- Vennell, R. (2013). Exceeding the Betz limit with tidal turbines. *Renewable Energy*, 55, 277-285. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.12.016>
- Zepeda-Cancino, R.-M., Vázquez-García, V., Zepeda-Cancino, R.-M., & Vázquez-García, V. (s. f.). *Potencial social y ambiental de la industria eólica para una transición energética en América Latina*. Recuperado 5 de junio de 2025, de http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1390-66312021000200066

ANEXOS

ANEXO 1: Medición de velocidad de viento en capó, techo y sección trasera del vehículo

CIUDAD			
Velocidad del Vehículo (Km/h)	Velocidad de viento en capó (m/s)	Velocidad de viento en el techo (m/s)	Velocidad de viento en la sección trasera (m/s)
30	7.40	10.30	0.80
	6.80	9.70	0.90
	5.40	7.80	1.20
	4.40	8.50	1.70
	3.10	8.20	2.00
	5.20	8.50	1.30
	4.80	6.70	1.50
	4.30	7.00	1.40
	4.70	8.40	1.20
	4.90	6.90	1.80
PROMEDIO	5.10	8.20	1.38
40	9.00	9.80	1.80
	6.90	8.80	1.70
	5.40	7.10	1.90
	4.70	6.90	2.00
	4.80	7.00	2.50
	4.90	7.30	1.80
	5.00	7.00	1.60
	5.20	8.00	1.40
	4.80	7.70	1.90
	4.70	7.50	1.20
PROMEDIO	5.54	7.71	1.78
50	8.20	6.10	2.70
	8.00	6.50	2.00
	6.70	6.70	2.10
	6.20	7.00	2.30
	6.30	6.90	1.90
	6.40	7.70	1.80
	6.60	7.30	1.50
	6.10	6.80	1.60
	5.80	6.50	1.40

	6.20	8.10	1.20
PROMEDIO	6.65	6.96	1.85
PANAMERICANA			
60	13.20	14.20	1.60
	9.90	13.80	2.00
	9.00	12.90	3.30
	9.50	11.40	2.40
	10.00	12.80	2.20
	10.60	12.40	1.30
	9.10	11.20	1.80
	9.30	12.10	1.90
	9.40	11.80	1.30
	9.20	12.70	1.20
PROMEDIO	9.92	12.53	1.90
70	8.30	13.70	8.00
	10.20	13.80	8.20
	9.70	13.60	9.20
	9.00	13.30	8.60
	10.20	13.80	8.50
	10.30	13.00	8.80
	9.30	12.90	8.90
	9.70	13.20	8.00
	10.10	13.30	8.40
	9.20	12.80	8.70
PROMEDIO	9.60	13.34	8.53
80	9.00	17.50	8.60
	9.50	14.70	9.50
	9.90	15.20	10.30
	10.20	16.30	9.50
	0.90	16.80	9.70
	11.80	15.80	10.70
	10.70	16.60	10.50
	11.20	15.70	9.40
	11.80	15.80	8.50
	10.50	16.00	8.80
PROMEDIO	9.55	16.04	9.55
90	12.90	18.50	8.60

	13.80	18.00	7.50
	12.80	19.00	7.70
	12.70	18.90	8.40
	12.50	18.00	8.10
	13.00	17.20	8.30
	12.80	16.70	7.50
	13.20	18.00	7.80
	11.80	17.90	7.70
	13.90	17.70	8.00
PROMEDIO	12.94	17.99	7.96
100	14.00	20.40	12.00
	15.90	22.10	9.20
	16.00	20.40	10.60
	16.80	21.50	9.50
	15.90	21.80	9.80
	15.00	22.00	11.00
	14.20	21.90	13.00
	14.00	22.20	14.00
	13.00	21.00	9.80
	13.80	21.40	10.00
PROMEDIO	14.86	21.47	10.89

Fuente: Elaboración propia

ANEXO 2 Imágenes de cómo se realizó la medición de viento en las 3 zonas del vehículo



Figura 21 Mediciones de velocidad de viento en el capó

Fuente: Elaboración propia.



Figura 22 Mediciones de velocidad de viento en el techo

Fuente: Elaboración propia.



Figura 23 Mediciones de velocidad de viento en la sección trasera

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO 3: Medición de velocidad de viento para cálculo de potencia disponible

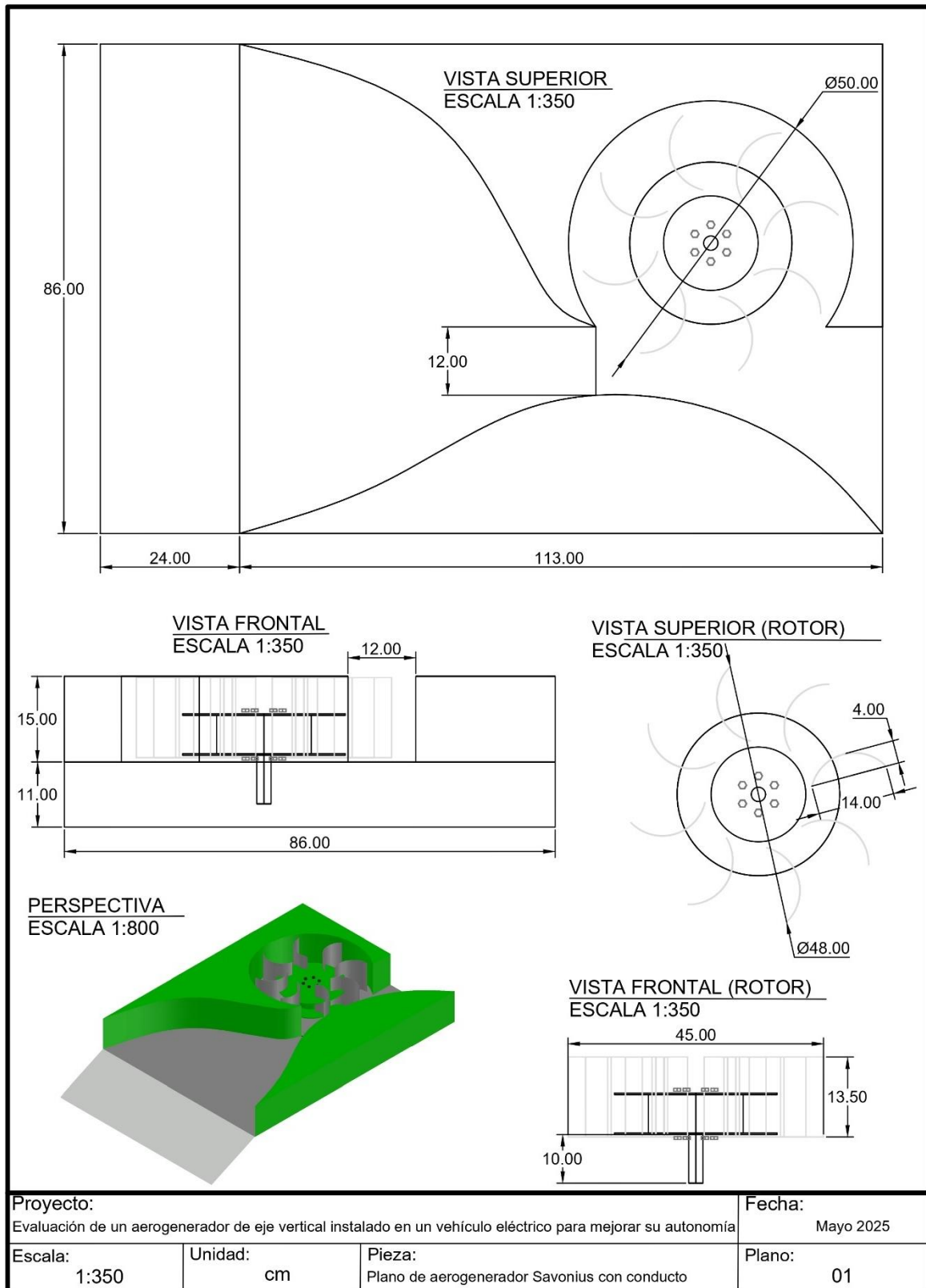
Velocidad del Vehículo (Km/h)	Velocidad de viento SUR - NORTE (m/s)	Velocidad de viento NORTE - SUR (m/s)
60	9.20	10.80
60	9.40	10.70
60	9.50	10.80
60	9.50	10.40
60	8.90	10.50
60	8.90	10.80
60	8.90	10.90
60	9.30	10.60
60	9.20	10.40
60	9.40	10.70
PROMEDIO	9.22	10.66
65	10.90	11.40
65	10.30	11.60
65	10.70	12.00
65	10.40	12.30
65	10.80	12.20
65	11.00	12.10
65	11.20	11.80
65	11.40	12.10
65	10.80	12.20
65	10.80	12.40
PROMEDIO	10.83	12.01
70	10.90	13.80
70	10.80	13.50
70	11.60	12.00
70	11.40	13.90
70	11.50	13.40
70	12.20	12.80
70	11.70	12.60
70	11.90	12.30
70	11.80	12.40
70	11.50	12.90

PROMEDIO	11.53	12.96
75	11.90	15.00
75	11.80	15.40
75	11.90	14.90
75	11.70	14.70
75	11.40	14.80
75	11.50	15.00
75	12.10	15.10
75	11.90	14.10
75	12.20	14.70
75	12.10	14.10
PROMEDIO	11.85	14.78
80	12.80	16.60
80	13.00	15.40
80	12.70	15.90
80	12.40	16.20
80	12.30	15.60
80	12.70	15.50
80	13.00	15.20
80	12.20	15.10
80	12.50	15.30
80	12.80	15.00
PROMEDIO	12.64	15.58
85	13.20	15.90
85	13.30	15.80
85	13.10	16.40
85	13.70	16.60
85	13.80	17.20
85	13.40	17.60
85	13.20	16.50
85	12.60	17.40
85	12.80	15.80
85	13.00	16.90
PROMEDIO	13.21	16.61
90	13.20	19.50
90	13.80	19.80
90	13.30	19.60

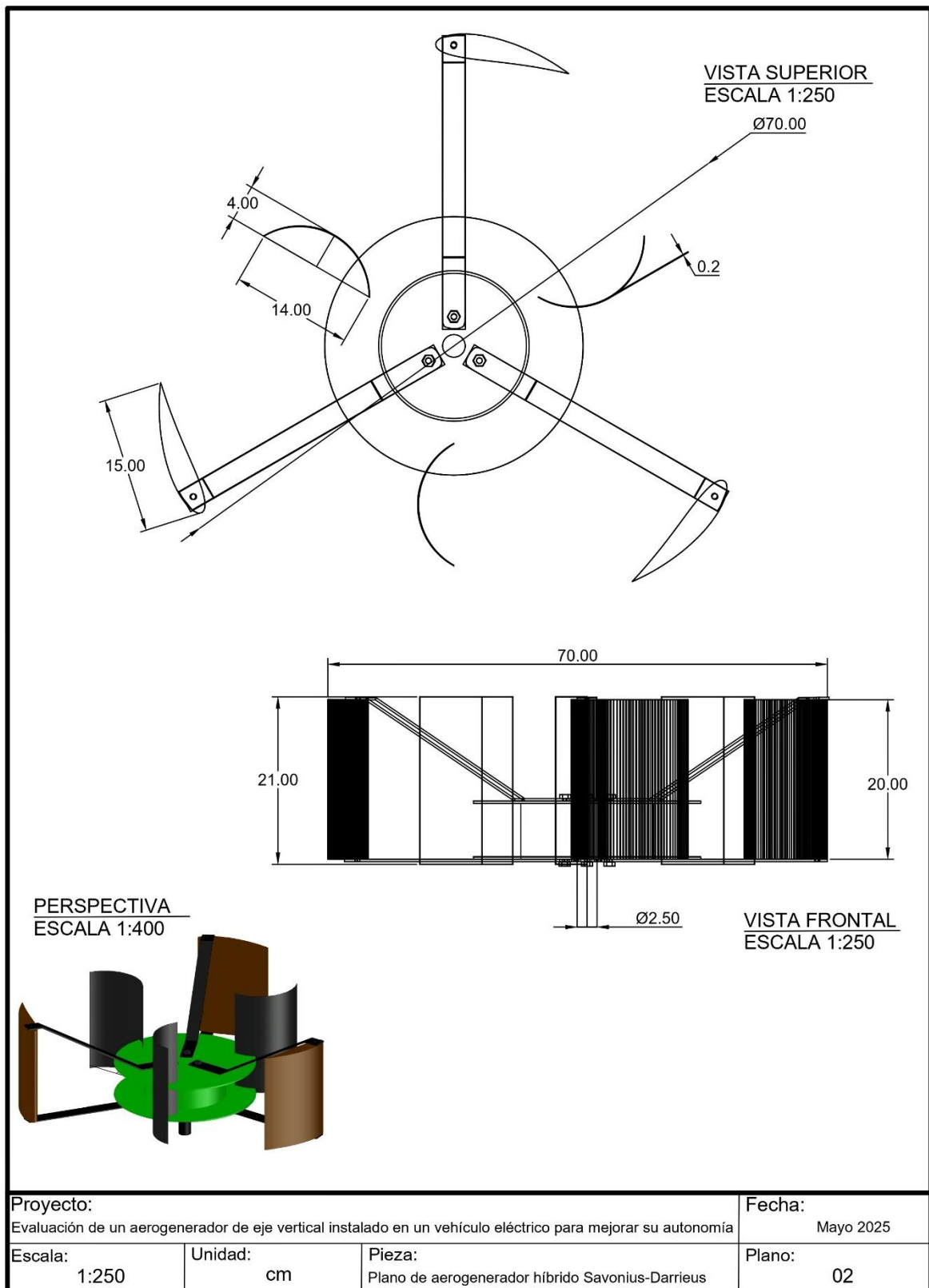
90	13.40	19.40
90	13.80	19.80
90	13.90	18.90
90	13.60	18.80
90	13.30	18.90
90	14.10	19.40
90	14.20	19.10
PROMEDIO	13.66	19.32
95	14.50	20.60
95	14.40	20.70
95	14.50	19.90
95	14.20	21.10
95	13.90	20.20
95	13.60	20.50
95	14.70	20.30
95	14.80	20.90
95	14.50	20.30
95	14.70	20.60
PROMEDIO	14.38	20.51
100	16.00	23.50
100	16.90	22.90
100	16.40	22.90
100	16.80	22.60
100	15.80	22.50
100	15.30	22.20
100	15.40	22.10
100	15.80	22.60
100	16.30	21.80
100	16.70	22.40
PROMEDIO	16.14	22.55

Fuente: Elaboración propia

ANEXO 4 Plano de diseño del aerogenerador Savonius



ANEXO 5 Plano de diseño del aerogenerador híbrido Savonius-Darrieus



ANEXO 6 Datos técnicos de los componentes eléctricos

a) Generador eléctrico.

Datos técnicos del Generador Eléctrico SH165

GENERADOR ELÉCTRICO	
Modelo	SH165-800
Potencia nominal	800W
Potencia máxima	830W
Velocidad nominal	500rpm
Tensión nominal	12V CC
Torque estrella	<0,1 Nm
Eficiencia	>80%
Tipo bobinado	Y
Fase	Hay fase
Estructura	Rotor exterior
Estator	Sin núcleo
Peso bruto	4,5 KG
Material del eje	Acero inoxidable
Material Shell	Aleación de aluminio
Procedencia	China

Fuente: Adaptada de *Generador de imán permanente, alternador de baja velocidad sin núcleo Maglev*, AliExpress, (<https://es.aliexpress.com>).

b) Controlador de carga

Datos técnicos del Controlador de Carga

CONTROLADOR DE CARGA	
Marca	HXCONTROLLER
Modelo	MPPT 800W Wind Turbine Generator Controller
Voltaje de arranque	- 8V (12V sistema) - 17V (24V Sistema)
Voltaje de la batería	Batería de 12V o 24V de combinación automática (batería de gel o plomo ácido)
Voltaje de frenado de la turbina eólica	- 14,5V (Sistema de 12V) - 29V (Sistema de 24V)
Voltaje de recuperación de turbina eólica	- 12,5V - 27V
Potencia del controlador	- 800W
Corriente máxima	- 50A
Aplicación	- Controlador de voltaje - Controlador de viento

Fuente: Adaptada de *Controlador de generador de turbina eólica MPPT, controlador de refuerzo de carga de bajo voltaje*, AliExpress, (<https://es.aliexpress.com>).

ANEXO 7 Construcción y montaje de los aerogeneradores

a) Construcción y montaje del Sistema Eólico Savonius.

Modelo tridimensional del soporte que unirá el generador eléctrico con las palas convexas, generado en formato STL mediante la plataforma Tinkercad.

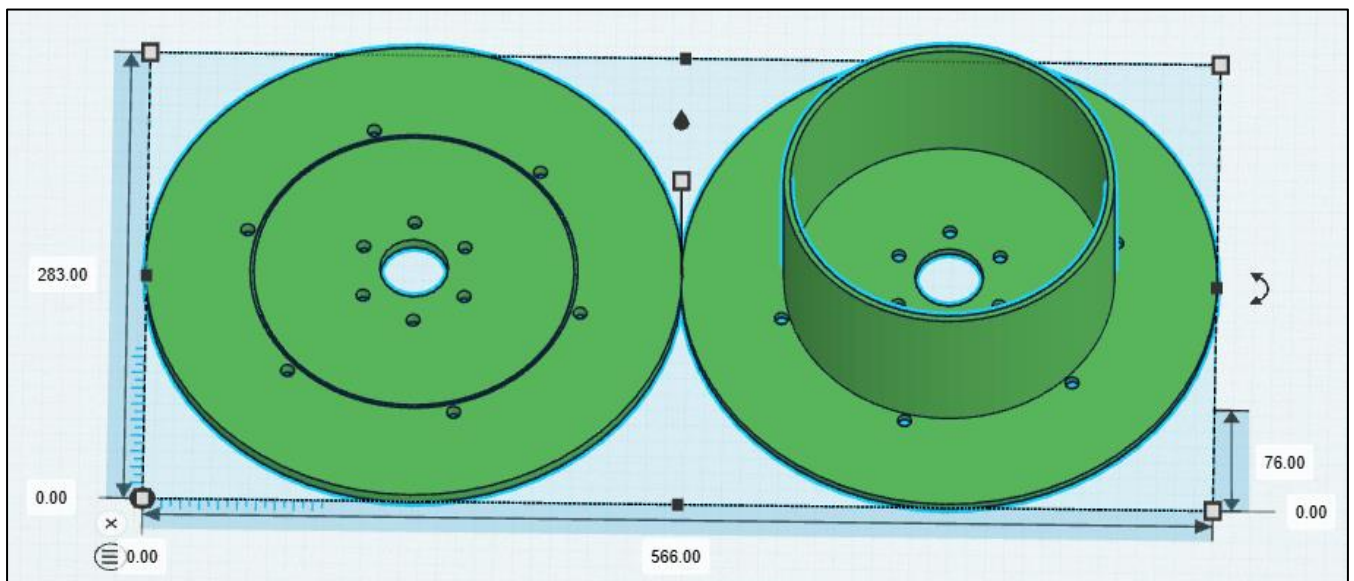


Figura 24 Dibujo tridimensional del soporte de las palas en Tinkercad

Fuente: Elaboración propia.

Las palas convexas fueron fabricadas a partir de una tubería de PVC de 6 pulgadas de diámetro.



Figura 25 Corte de ranuras a las palas del rotor

Fuente: Elaboración propia.

Para la correcta disposición de las palas en el soporte, se elaboró un plano sobre una base de triplay, permitiendo su distribución uniforme alrededor del soporte con una separación de 45° entre ellas. La fijación de las palas se llevó a cabo mediante soldadura en frío, garantizando una unión resistente y duradera. El proceso se ilustra en la Figura 26.

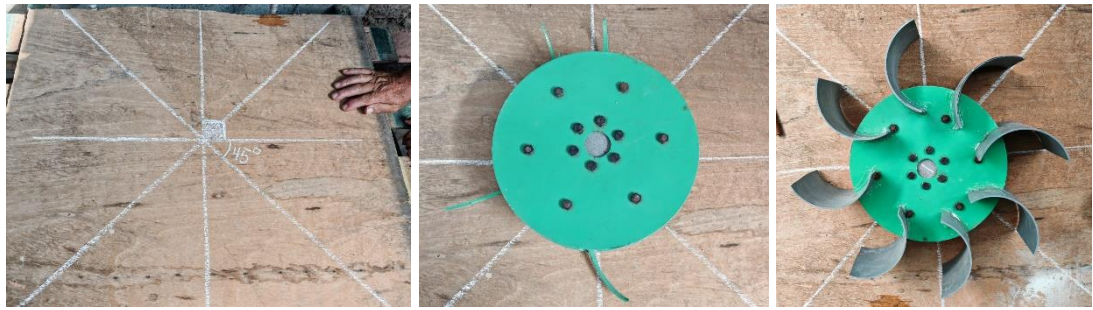


Figura 26 Fijación de las palas del rotor al soporte

Fuente: Elaboración propia.



Figura 27: Construcción de la carcasa y conductos de direccionamiento de aire

- a) Verificación de dimensionamiento de la carcasa al techo del vehículo
- b) Soldado de placas la carcasa que permitieron direccionar el aire de forma tangencial a los alabes del rotor.

Fuente: Elaboración propia.

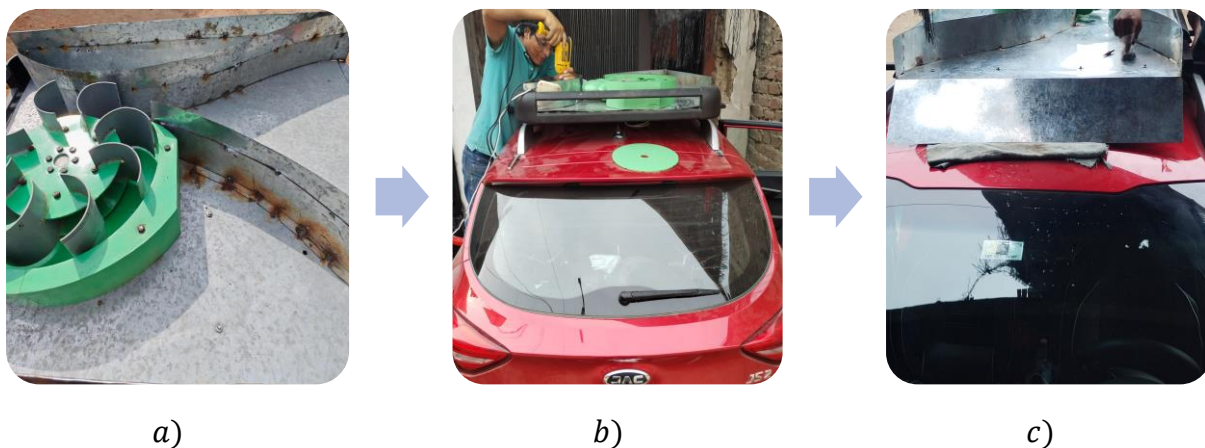


Figura 28: Montaje del sistema eólico Savonius

- a) Montaje de todo el sistema a la parrilla del automóvil.
- b) Vista posterior, de la instalación.
- c) Vista frontal con la rampa buscando que siga el perfil aerodinámico del vehículo.

Fuente: Elaboración propia.

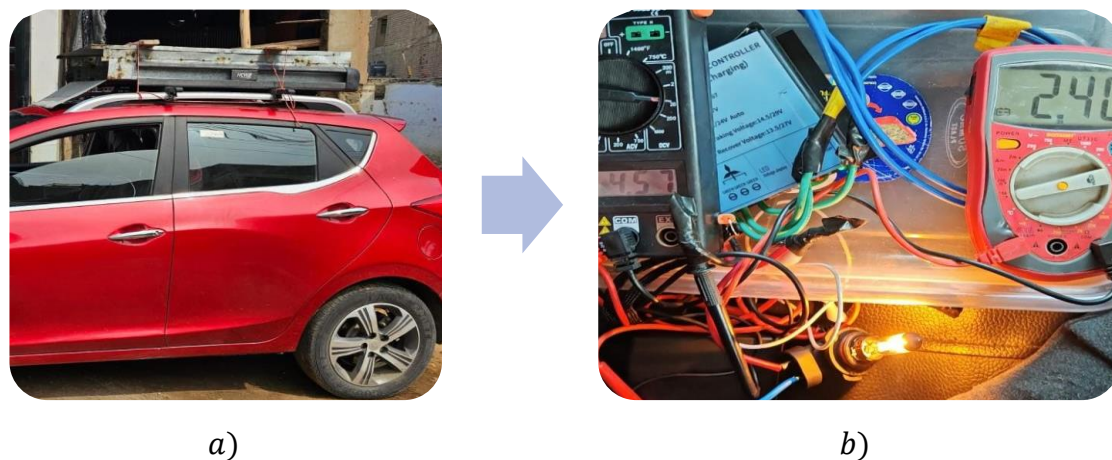


Figura 29: Comprobación de funcionamiento del sistema eólico Savonius

- a) Sistema eólico Savonius montado en el techo del vehículo.
- b) Verificación del correcto funcionamiento del aerogenerador encendiendo la carga.

Fuente: Elaboración propia.

b) Construcción y montaje del Sistema Eólico híbrido Savonius-Darrieus.

Para el diseño de los álabes principales, se empleó el recurso digital "Airfoil Tools", seleccionando el perfil aerodinámico NACA 0018, en la Figura 30 se presenta el perfil generado con sus respectivas dimensiones.

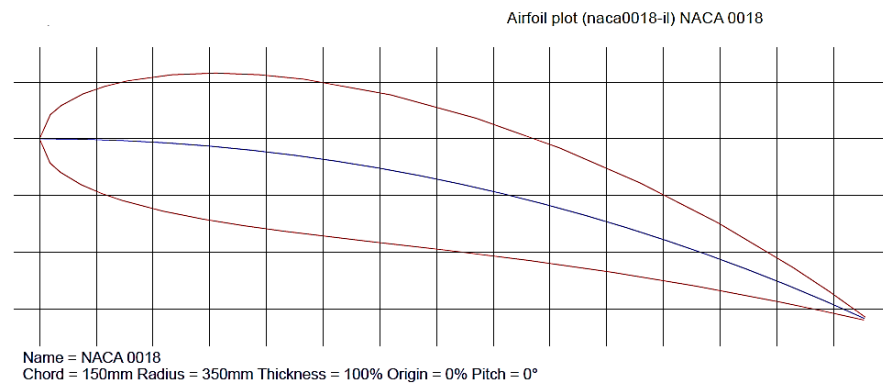


Figura 30 Perfil aerodinámico NACA 0018

Fuente: Reproducida de Airfoil plotter (naca0018-il), Airfoil Tools,
(<http://www.airfoiltools.com/plotter/index>).

Las palas principales fueron fabricadas en madera, respetando la geometría del perfil aerodinámico NACA 0018. Por su parte, las palas secundarias tipo Savonius se construyeron con tubos de PVC. Finalmente, se diseñaron y fabricaron brazos de platina metálica, cuya función es asegurar una unión estructural firme entre cada álabe de madera.



Figura 31 Fabricación de los álabes de madera

Fuente: Elaboración propia.



Figura 32 Fijación de los álabes al generador eléctrico

Fuente: Elaboración propia.



a)

b)

Figura 33: Montaje del Sistema Eólico híbrido Savonius-Darrieus

- c) Sistema eólico híbrido Savonius-Darrieus montado en el techo del vehículo.
- d) Verificación del correcto funcionamiento del aerogenerador encendiendo la carga.

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO 8: Datos de voltaje y corriente obtenidos con el aerogenerador Savonius

Datos tomados el 27 de febrero del 2025

Sur - Norte			Norte - Sur		
Velocidad (km/h)	Corriente eléctrica (A)	Voltaje (V)	Velocidad (km/h)	Corriente eléctrica (A)	Voltaje (V)
60	0.44	0.12	60	0.69	0.24
60	0.51	0.14	60	0.61	0.21
60	0.42	0.12	60	0.63	0.21
60	0.34	0.09	60	0.64	0.21
60	0.35	0.10	60	0.64	0.20
60	0.46	0.12	60	0.67	0.21
60	0.49	0.14	60	0.68	0.22
60	0.42	0.12	60	0.67	0.22
60	0.46	0.12	60	0.65	0.21
60	0.46	0.14	60	0.60	0.19
PROM	0.44	0.12	PROM	0.65	0.21
65	0.58	0.17	65	0.75	0.32
65	0.49	0.15	65	0.76	0.30
65	0.49	0.14	65	0.75	0.30
65	0.56	0.16	65	0.71	0.26
65	0.57	0.17	65	0.85	0.31
65	0.57	0.16	65	0.90	0.34
65	0.75	0.23	65	0.80	0.35
65	0.61	0.19	65	0.75	0.26
65	0.60	0.19	65	0.76	0.26
65	0.69	0.20	65	0.70	0.23
PROM	0.59	0.18	PROM	0.77	0.29
70	0.56	0.17	70	0.70	0.29
70	0.69	0.20	70	0.90	0.34
70	0.69	0.21	70	0.89	0.35
70	0.67	0.21	70	1.08	0.49
70	0.65	0.21	70	0.85	0.39
70	0.70	0.22	70	0.86	0.36
70	0.62	0.20	70	0.90	0.38
70	0.60	0.18	70	0.93	0.40
70	0.62	0.19	70	0.86	0.47
70	0.65	0.20	70	0.88	0.47
PROM	0.65	0.20	PROM	0.89	0.39
75	0.84	0.28	75	1.02	0.47

75	0.81	0.27	75	0.99	0.43
75	0.88	0.29	75	1.01	0.45
75	0.84	0.29	75	1.17	0.64
75	0.83	0.30	75	1.08	0.51
75	0.77	0.27	75	1.07	0.54
75	0.69	0.22	75	1.11	0.61
75	0.73	0.26	75	1.18	0.60
75	0.74	0.26	75	1.04	0.54
75	0.72	0.24	75	1.10	0.58
PROM	0.79	0.27	PROM	1.08	0.54
80	0.81	0.28	80	1.25	1.01
80	0.80	0.27	80	1.32	1.06
80	0.81	0.28	80	1.22	0.92
80	0.85	0.27	80	1.33	1.02
80	0.79	0.29	80	1.30	1.06
80	0.89	0.32	80	1.31	1.10
80	0.84	0.30	80	1.35	1.17
80	0.86	0.30	80	1.30	1.12
80	0.75	0.26	80	1.25	1.06
80	0.79	0.26	80	1.27	1.03
PROM	0.82	0.28	PROM	1.29	1.06
85	0.98	0.4	85	1.37	1.43
85	1.02	0.42	85	1.45	1.61
85	1.05	0.44	85	1.60	1.85
85	0.90	0.38	85	1.49	1.69
85	0.91	0.37	85	1.56	1.82
85	1.01	0.41	85	1.46	1.58
85	0.96	0.39	85	1.54	1.73
85	0.98	0.42	85	1.45	1.54
85	0.95	0.38	85	1.47	1.59
85	0.96	0.39	85	1.54	1.68
PROM	0.97	0.40	PROM	1.49	1.65
90	1.10	0.47	90	1.67	2.15
90	1.08	0.46	90	1.65	2.08
90	1.01	0.46	90	1.68	2.27
90	0.98	0.42	90	1.76	2.36
90	0.95	0.40	90	1.71	2.30
90	0.97	0.48	90	1.82	2.61
90	0.97	0.40	90	1.86	2.67
90	1.00	0.40	90	1.81	2.57

90	0.96	0.39	90	1.69	2.23
90	1.01	0.42	90	1.73	2.38
PROM	1.00	0.43	PROM	1.74	2.36
95	1.10	0.54	95	1.88	2.87
95	1.14	0.57	95	1.89	2.87
95	1.09	0.51	95	1.89	2.82
95	1.12	0.53	95	1.97	3.01
95	1.18	0.59	95	1.87	2.80
95	1.21	0.64	95	1.87	2.72
95	1.14	0.62	95	1.85	2.71
95	1.08	0.60	95	1.90	2.68
95	1.06	0.57	95	2.04	3.06
95	1.09	0.56	95	1.96	3.03
PROM	1.12	0.57	PROM	1.91	2.86
100	1.18	0.69	100	2.26	4.08
100	1.19	0.72	100	2.22	3.96
100	1.18	0.79	100	2.19	3.85
100	1.22	0.84	100	2.24	3.86
100	1.20	0.73	100	2.25	3.97
100	1.30	0.88	100	2.26	3.94
100	1.32	0.95	100	2.23	3.95
100	1.24	0.91	100	2.18	3.75
100	1.21	0.88	100	2.16	3.73
100	1.17	0.77	100	2.12	3.43
PROM	1.22	0.82	PROM	2.21	3.85

Fuente: Elaboración propia

Datos tomados el 28 de febrero del 2025

Sur - Norte			Norte - Sur		
Velocidad (km/h)	Corriente eléctrica (A)	Voltaje (V)	Velocidad (km/h)	Corriente eléctrica (A)	Voltaje (V)
60	0.47	0.13	60	0.95	0.37
60	0.49	0.14	60	0.94	0.37
60	0.35	0.10	60	0.88	0.34
60	0.43	0.12	60	0.94	0.36
60	0.38	0.11	60	0.92	0.38
60	0.36	0.10	60	1.01	0.40
60	0.41	0.10	60	0.97	0.40
60	0.42	0.12	60	1.10	0.48
60	0.39	0.11	60	0.94	0.42
60	0.44	0.12	60	0.92	0.40
PROM	0.41	0.12	PROM	0.96	0.39
65	0.60	0.17	65	1.00	0.41
65	0.45	0.13	65	1.06	0.45
65	0.49	0.14	65	1.15	0.52
65	0.51	0.15	65	1.10	0.52
65	0.53	0.15	65	1.20	0.59
65	0.54	0.16	65	1.17	0.62
65	0.51	0.15	65	1.04	0.55
65	0.44	0.13	65	1.15	0.62
65	0.45	0.13	65	1.07	0.60
65	0.52	0.19	65	1.03	0.56
PROM	0.50	0.15	PROM	1.10	0.54
70	0.54	0.16	70	1.23	0.74
70	0.51	0.15	70	1.34	0.85
70	0.52	0.15	70	1.29	0.87
70	0.52	0.15	70	1.21	0.82
70	0.61	0.18	70	1.21	0.81
70	0.57	0.17	70	1.18	0.80
70	0.65	0.19	70	1.18	0.79
70	0.54	0.16	70	1.14	0.76
70	0.51	0.15	70	1.30	0.94
70	0.64	0.19	70	1.26	0.92
PROM	0.56	0.17	PROM	1.23	0.83
75	0.78	0.28	75	1.30	1.17

75	0.80	0.26	75	1.40	1.05
75	0.85	0.30	75	1.24	0.97
75	0.85	0.30	75	1.33	1.03
75	0.82	0.29	75	1.29	1.04
75	0.82	0.28	75	1.47	1.28
75	0.68	0.23	75	1.46	1.35
75	0.78	0.25	75	1.40	1.30
75	0.68	0.23	75	1.44	1.34
75	0.70	0.22	75	1.34	1.23
PROM	0.78	0.26	PROM	1.37	1.18
80	0.75	0.25	80	1.50	1.57
80	0.87	0.30	80	1.43	1.45
80	0.74	0.24	80	1.43	1.51
80	0.84	0.28	80	1.68	1.79
80	0.77	0.27	80	1.65	1.91
80	0.72	0.24	80	1.55	1.72
80	0.82	0.28	80	1.43	1.55
80	0.82	0.28	80	1.51	1.57
80	0.82	0.29	80	1.47	1.45
80	0.85	0.30	80	1.49	1.48
PROM	0.80	0.27	PROM	1.51	1.60
85	0.89	0.31	85	1.62	1.96
85	0.87	0.29	85	1.59	1.85
85	0.92	0.32	85	1.57	1.84
85	0.91	0.34	85	1.53	1.80
85	0.90	0.33	85	1.54	1.78
85	0.89	0.34	85	1.72	2.05
85	0.86	0.32	85	1.62	2.02
85	0.85	0.33	85	1.67	2.15
85	0.89	0.32	85	1.58	1.84
85	0.92	0.34	85	1.66	1.93
PROM	0.89	0.32	PROM	1.61	1.92
90	1.04	0.45	90	1.80	2.58
90	1.09	0.50	90	1.83	2.60
90	1.11	0.52	90	1.72	2.48
90	1.05	0.49	90	1.79	2.50
90	1.02	0.49	90	1.79	2.42
90	0.92	0.44	90	1.84	2.52
90	0.93	0.40	90	1.83	2.60

90	0.97	0.42	90	1.82	2.62
90	1.00	0.44	90	1.78	2.55
90	0.95	0.41	90	1.78	2.53
PROM	1.01	0.46	PROM	1.80	2.54
95	1.17	0.59	95	1.94	3.02
95	1.16	0.56	95	1.93	2.91
95	1.15	0.58	95	1.96	3.03
95	1.08	0.55	95	2.03	3.16
95	1.09	0.54	95	1.85	2.88
95	1.05	0.51	95	1.96	3.10
95	1.16	0.60	95	1.95	3.01
95	1.12	0.54	95	1.76	2.56
95	1.16	0.59	95	2.00	3.12
95	1.13	0.59	95	1.98	3.05
PROM	1.13	0.57	PROM	1.94	2.98
100	1.19	0.74	100	2.10	3.45
100	1.28	0.73	100	2.08	3.48
100	1.23	0.78	100	2.17	3.69
100	1.21	0.81	100	2.20	3.68
100	1.22	0.75	100	2.18	3.84
100	1.19	0.71	100	2.11	3.61
100	1.21	0.74	100	2.05	3.44
100	1.21	0.77	100	2.09	3.56
100	1.20	0.78	100	2.06	3.44
100	1.20	0.79	100	2.14	3.62
PROM	1.21	0.76	PROM	2.12	3.58

Fuente: Elaboración propia

Datos tomados el 01 de marzo del 2025

Sur - Norte			Norte - Sur		
Velocidad (km/h)	Corriente eléctrica (A)	Voltaje (V)	Velocidad (km/h)	Corriente eléctrica (A)	Voltaje (V)
60	0.42	0.12	60	0.84	0.28
60	0.39	0.11	60	0.86	0.29
60	0.49	0.14	60	1.05	0.54
60	0.49	0.15	60	1.02	0.40
60	0.35	0.11	60	1.09	0.46
60	0.43	0.12	60	1.09	0.49
60	0.42	0.12	60	1.25	0.58
60	0.45	0.13	60	1.18	0.60
60	0.47	0.13	60	1.13	0.58
60	0.45	0.13	60	1.08	0.58
PROM	0.44	0.13	PROM	1.06	0.48
65	0.46	0.13	65	1.08	0.62
65	0.57	0.19	65	1.18	0.69
65	0.58	0.16	65	1.18	0.70
65	0.50	0.14	65	1.13	0.68
65	0.47	0.14	65	1.07	0.60
65	0.60	0.18	65	1.04	0.60
65	0.42	0.12	65	1.14	0.61
65	0.45	0.12	65	1.17	0.68
65	0.44	0.12	65	1.19	0.73
65	0.54	0.15	65	1.15	0.66
PROM	0.50	0.15	PROM	1.13	0.66
70	0.50	0.15	70	1.22	0.97
70	0.63	0.20	70	1.22	0.95
70	0.58	0.16	70	1.20	0.93
70	0.69	0.21	70	1.23	0.92
70	0.55	0.17	70	1.25	0.94
70	0.61	0.20	70	1.22	0.92
70	0.70	0.22	70	1.21	0.92
70	0.77	0.24	70	1.18	0.87
70	0.65	0.21	70	1.25	0.93
70	0.50	0.19	70	1.28	0.95
PROM	0.62	0.20	PROM	1.23	0.93
75	0.60	0.19	75	1.50	1.54

75	0.61	0.19	75	1.63	1.81
75	0.60	0.19	75	1.59	1.85
75	0.66	0.20	75	1.49	1.69
75	0.63	0.20	75	1.42	1.60
75	0.65	0.20	75	1.40	1.38
75	0.61	0.19	75	1.51	1.46
75	0.58	0.18	75	1.41	1.40
75	0.71	0.22	75	1.49	1.49
75	0.65	0.20	75	1.59	1.60
PROM	0.63	0.20	PROM	1.50	1.58
80	0.72	0.22	80	1.75	2.22
80	0.66	0.21	80	1.50	1.89
80	0.65	0.21	80	1.59	1.86
80	0.62	0.19	80	1.63	1.98
80	0.68	0.21	80	1.62	1.97
80	0.65	0.22	80	1.59	1.92
80	0.72	0.23	80	1.51	1.84
80	0.78	0.24	80	1.66	1.93
80	0.65	0.22	80	1.64	1.97
80	0.67	0.21	80	1.52	1.65
PROM	0.68	0.22	PROM	1.60	1.92
85	0.81	0.28	85	1.75	2.52
85	0.84	0.30	85	1.77	2.50
85	0.83	0.29	85	1.79	2.46
85	0.76	0.26	85	1.88	2.64
85	0.77	0.27	85	1.77	2.60
85	0.82	0.29	85	1.89	2.46
85	0.72	0.27	85	1.79	2.53
85	0.78	0.29	85	1.76	2.37
85	0.76	0.26	85	1.72	2.27
85	0.74	0.27	85	1.73	2.27
PROM	0.78	0.28	PROM	1.79	2.46
90	0.94	0.34	90	1.95	2.91
90	0.94	0.40	90	1.95	2.82
90	1.03	0.46	90	1.96	3.02
90	1.00	0.39	90	1.80	2.52
90	1.01	0.43	90	1.86	2.84
90	0.95	0.43	90	1.88	2.63
90	1.05	0.44	90	1.82	2.60

90	0.94	0.40	90	1.79	2.43
90	1.02	0.45	90	1.96	2.92
90	0.99	0.43	90	1.81	2.72
PROM	0.99	0.42	PROM	1.88	2.74
95	1.00	0.47	95	1.98	3.08
95	1.02	0.48	95	1.99	3.12
95	0.97	0.44	95	2.05	3.34
95	0.95	0.44	95	2.19	3.71
95	0.99	0.41	95	2.07	3.47
95	1.03	0.47	95	2.10	2.54
95	1.01	0.47	95	2.04	3.40
95	1.04	0.49	95	1.98	3.15
95	1.03	0.47	95	2.02	3.31
95	1.03	0.46	95	2.14	3.60
PROM	1.01	0.46	PROM	2.06	3.27
100	1.17	0.65	100	2.20	3.72
100	1.18	0.70	100	2.28	3.86
100	1.12	0.65	100	2.21	3.88
100	1.18	0.72	100	2.24	3.93
100	1.13	0.64	100	2.22	4.03
100	1.20	0.69	100	2.30	4.18
100	1.24	0.69	100	2.24	4.07
100	1.30	0.78	100	2.15	3.80
100	1.25	0.87	100	2.28	3.87
100	1.21	0.82	100	2.30	4.23
PROM	1.20	0.72	PROM	2.24	3.96

Fuente: Elaboración propia

Datos tomados el 02 de marzo del 2025

Sur - Norte			Norte - Sur		
Velocidad (km/h)	Corriente eléctrica (A)	Voltaje (V)	Velocidad (km/h)	Corriente eléctrica (A)	Voltaje (V)
60	0.36	0.1	60	0.76	0.28
60	0.33	0.09	60	0.62	0.26
60	0.35	0.10	60	0.63	0.25
60	0.33	0.09	60	0.77	0.30
60	0.35	0.09	60	0.93	0.38
60	0.38	0.10	60	0.82	0.33
60	0.40	0.11	60	0.87	0.35
60	0.41	0.12	60	0.78	0.32
60	0.36	0.10	60	0.79	0.31
60	0.35	0.10	60	0.62	0.25
PROM	0.36	0.10	PROM	0.76	0.30
65	0.38	0.11	65	0.80	0.38
65	0.33	0.09	65	0.76	0.34
65	0.35	0.10	65	0.80	0.36
65	0.39	0.11	65	0.94	0.42
65	0.38	0.10	65	0.90	0.41
65	0.42	0.12	65	0.82	0.36
65	0.39	0.11	65	0.83	0.37
65	0.45	0.13	65	0.98	0.45
65	0.42	0.12	65	0.95	0.48
65	0.36	0.10	65	1.03	0.50
PROM	0.39	0.11	PROM	0.88	0.41
70	0.39	0.11	70	0.86	0.45
70	0.45	0.13	70	0.86	0.44
70	0.40	0.11	70	0.92	0.47
70	0.46	0.13	70	1.02	0.52
70	0.47	0.13	70	0.88	0.56
70	0.44	0.12	70	0.90	0.47
70	0.51	0.14	70	1.04	0.56
70	0.48	0.14	70	0.97	0.52
70	0.45	0.13	70	0.97	0.53
70	0.44	0.13	70	1.13	0.63
PROM	0.45	0.13	PROM	0.96	0.52
75	0.59	0.17	75	1.14	1.06

75	0.54	0.16	75	1.08	0.91
75	0.63	0.19	75	0.95	0.72
75	0.67	0.21	75	0.99	0.70
75	0.65	0.20	75	1.18	0.80
75	0.56	0.17	75	1.08	0.79
75	0.49	0.14	75	0.94	0.65
75	0.43	0.12	75	1.05	0.71
75	0.48	0.14	75	1.06	0.71
75	0.58	0.17	75	0.95	0.60
PROM	0.56	0.17	PROM	1.04	0.77
80	0.62	0.19	80	1.26	1.38
80	0.59	0.18	80	1.36	1.23
80	0.61	0.20	80	1.39	1.35
80	0.50	0.14	80	1.47	1.51
80	0.53	0.16	80	1.31	1.35
80	0.63	0.18	80	1.33	1.32
80	0.58	0.18	80	1.36	1.33
80	0.60	0.19	80	1.49	1.41
80	0.65	0.20	80	1.49	1.63
80	0.66	0.21	80	1.50	1.66
PROM	0.60	0.18	PROM	1.40	1.42
85	0.74	0.25	85	1.54	1.98
85	0.69	0.23	85	1.55	1.90
85	0.73	0.24	85	1.60	2.00
85	0.62	0.20	85	1.60	1.98
85	0.56	0.18	85	1.86	2.41
85	0.84	0.28	85	1.57	2.06
85	0.74	0.25	85	1.74	2.22
85	0.65	0.24	85	1.61	1.85
85	0.78	0.28	85	1.39	1.61
85	0.81	0.28	85	1.30	1.42
PROM	0.72	0.24	PROM	1.58	1.94
90	0.72	0.26	90	1.69	2.56
90	0.89	0.32	90	1.62	2.15
90	0.86	0.34	90	1.72	2.35
90	0.90	0.35	90	1.79	2.42
90	0.88	0.34	90	1.66	2.26
90	0.85	0.33	90	1.53	1.98
90	0.83	0.32	90	1.56	1.93

90	0.83	0.31	90	1.52	1.77
90	0.82	0.29	90	1.66	1.95
90	0.80	0.29	90	1.68	2.12
PROM	0.84	0.32	PROM	1.64	2.15
95	0.89	0.35	95	1.77	2.65
95	0.88	0.34	95	1.80	2.67
95	0.81	0.32	95	1.73	2.36
95	0.83	0.32	95	1.73	2.36
95	0.78	0.30	95	1.63	2.21
95	0.93	0.39	95	1.88	2.67
95	0.89	0.33	95	1.84	2.75
95	0.90	0.34	95	1.79	2.63
95	0.93	0.36	95	1.94	2.80
95	0.94	0.38	95	1.86	2.89
PROM	0.88	0.34	PROM	1.80	2.60
100	1.00	0.44	100	2.34	4.39
100	1.12	0.51	100	2.27	4.32
100	1.04	0.50	100	2.16	3.79
100	1.13	0.68	100	2.15	3.63
100	1.16	0.56	100	2.17	3.76
100	1.11	0.67	100	2.15	3.74
100	1.14	0.60	100	2.23	3.97
100	1.20	0.70	100	2.31	4.28
100	1.22	0.76	100	2.38	4.10
100	1.23	0.66	100	2.25	4.12
PROM	1.14	0.61	PROM	2.24	4.01

Fuente: Elaboración propia

Datos tomados el 03 de marzo del 2025

Sur - Norte			Norte - Sur		
Velocidad (km/h)	Corriente eléctrica (A)	Voltaje (V)	Velocidad (km/h)	Corriente eléctrica (A)	Voltaje (V)
60	0.39	0.1	60	0.99	0.37
60	0.34	0.09	60	0.91	0.35
60	0.36	0.10	60	0.83	0.31
60	0.39	0.10	60	0.82	0.30
60	0.42	0.11	60	0.83	0.29
60	0.41	0.11	60	0.85	0.30
60	0.40	0.11	60	0.91	0.30
60	0.35	0.09	60	0.82	0.28
60	0.32	0.08	60	0.86	0.30
60	0.26	0.07	60	0.85	0.29
PROM	0.36	0.10	PROM	0.87	0.31
65	0.40	0.10	65	0.96	0.38
65	0.39	0.10	65	0.99	0.40
65	0.37	0.10	65	1.04	0.41
65	0.45	0.12	65	1.01	0.40
65	0.46	0.12	65	0.92	0.38
65	0.37	0.11	65	0.98	0.40
65	0.39	0.10	65	1.08	0.44
65	0.42	0.11	65	1.08	0.45
65	0.36	0.10	65	1.13	0.50
65	0.35	0.09	65	1.03	0.46
PROM	0.40	0.11	PROM	1.02	0.42
70	0.48	0.12	70	1.32	0.9
70	0.44	0.12	70	1.34	0.91
70	0.49	0.13	70	1.36	1.01
70	0.47	0.14	70	1.33	0.73
70	0.48	0.17	70	1.26	0.84
70	0.46	0.13	70	1.18	0.76
70	0.47	0.13	70	1.25	0.80
70	0.60	0.16	70	1.22	0.77
70	0.51	0.14	70	1.26	0.79
70	0.45	0.13	70	1.28	0.83
PROM	0.49	0.14	PROM	1.28	0.83
75	0.65	0.19	75	1.42	1.12

75	0.73	0.22	75	1.30	0.88
75	0.66	0.20	75	1.38	1.30
75	0.76	0.23	75	1.36	1.13
75	0.75	0.23	75	1.44	1.40
75	0.74	0.22	75	1.50	1.33
75	0.73	0.23	75	1.40	1.23
75	0.72	0.23	75	1.53	1.41
75	0.71	0.22	75	1.59	1.60
75	0.69	0.21	75	1.49	1.54
PROM	0.71	0.22	PROM	1.44	1.29
80	0.80	0.25	80	1.44	1.41
80	0.83	0.26	80	1.47	1.36
80	0.79	0.26	80	1.48	1.42
80	0.75	0.24	80	1.46	1.41
80	0.78	0.27	80	1.45	1.37
80	0.81	0.27	80	1.45	1.39
80	0.77	0.25	80	1.60	1.57
80	0.85	0.28	80	1.55	1.58
80	0.95	0.36	80	1.51	1.55
80	0.94	0.35	80	1.62	1.74
PROM	0.83	0.28	PROM	1.50	1.48
85	1.00	0.38	85	1.77	2.33
85	0.98	0.38	85	1.78	2.33
85	1.02	0.40	85	1.85	2.48
85	1.05	0.40	85	1.73	2.34
85	0.90	0.37	85	1.68	2.15
85	0.97	0.38	85	1.85	2.49
85	0.96	0.38	85	1.82	2.49
85	0.94	0.37	85	1.80	2.47
85	0.98	0.38	85	1.76	2.35
85	0.95	0.38	85	1.77	2.90
PROM	0.98	0.38	PROM	1.78	2.43
90	1.00	0.39	90	1.98	2.88
90	1.02	0.42	90	1.99	3.02
90	1.08	0.43	90	1.95	2.94
90	0.98	0.37	90	2.03	3.15
90	1.07	0.45	90	2.02	3.09
90	1.01	0.41	90	1.95	2.95
90	0.95	0.34	90	1.89	2.82

90	1.02	0.39	90	1.91	2.84
90	1.08	0.40	90	1.93	2.87
90	1.03	0.42	90	1.99	3.01
PROM	1.02	0.40	PROM	1.96	2.96
95	1.03	0.46	95	2.07	3.26
95	1.07	0.48	95	2.05	3.26
95	1.11	0.48	95	2.20	3.64
95	1.04	0.39	95	2.15	3.66
95	1.13	0.46	95	2.21	3.83
95	1.09	0.46	95	2.20	3.75
95	1.04	0.45	95	2.12	3.43
95	1.09	0.48	95	2.18	3.46
95	1.06	0.49	95	2.20	3.72
95	1.05	0.45	95	2.08	3.44
PROM	1.07	0.46	PROM	2.15	3.55
100	1.15	0.68	100	2.30	4.08
100	1.21	0.67	100	2.33	4.20
100	1.30	0.73	100	2.33	4.26
100	1.15	0.66	100	2.31	4.23
100	1.25	0.71	100	2.34	4.30
100	1.16	0.68	100	2.29	4.09
100	1.19	0.61	100	2.28	4.17
100	1.19	0.62	100	2.21	3.95
100	1.14	0.60	100	2.30	4.10
100	1.27	0.70	100	2.25	4.00
PROM	1.20	0.67	PROM	2.29	4.14

Fuente: Elaboración propia

Datos tomados el 04 de marzo del 2025

Sur - Norte			Norte - Sur		
Velocidad (km/h)	Corriente eléctrica (A)	Voltaje (V)	Velocidad (km/h)	Corriente eléctrica (A)	Voltaje (V)
60	0.47	0.11	60	0.80	0.29
60	0.33	0.08	60	0.77	0.26
60	0.26	0.07	60	0.73	0.25
60	0.32	0.08	60	0.73	0.25
60	0.32	0.08	60	0.68	0.23
60	0.33	0.09	60	0.73	0.24
60	0.37	0.08	60	0.72	0.29
60	0.28	0.07	60	0.70	0.24
60	0.29	0.07	60	0.69	0.22
60	0.30	0.08	60	0.65	0.21
PROM	0.33	0.08	PROM	0.72	0.25
65	0.40	0.10	65	0.87	0.37
65	0.37	0.10	65	0.91	0.37
65	0.39	0.10	65	0.93	0.38
65	0.37	0.10	65	0.93	0.37
65	0.39	0.10	65	0.86	0.35
65	0.44	0.12	65	1.03	0.44
65	0.48	0.13	65	0.96	0.42
65	0.44	0.12	65	0.93	0.41
65	0.38	0.10	65	0.89	0.38
65	0.41	0.11	65	0.92	0.39
PROM	0.41	0.11	PROM	0.92	0.39
70	0.55	0.15	70	1.04	0.54
70	0.52	0.15	70	1.03	0.53
70	0.54	0.15	70	1.01	0.58
70	0.48	0.13	70	1.00	0.47
70	0.48	0.13	70	0.96	0.46
70	0.46	0.13	70	0.93	0.42
70	0.48	0.13	70	0.91	0.43
70	0.51	0.14	70	0.90	0.40
70	0.48	0.14	70	0.91	0.40
70	0.51	0.14	70	0.93	0.43

PROM	0.50	0.14	PROM	0.96	0.47
75	0.51	0.14	75	0.94	0.49
75	0.68	0.18	75	0.99	0.50
75	0.57	0.17	75	1.07	0.54
75	0.51	0.15	75	1.02	0.50
75	0.48	0.19	75	0.88	0.46
75	0.54	0.15	75	1.07	0.51
75	0.59	0.18	75	1.09	0.50
75	0.57	0.17	75	1.11	0.54
75	0.55	0.17	75	1.03	0.51
75	0.54	0.15	75	1.12	0.55
PROM	0.55	0.17	PROM	1.03	0.51
80	0.55	0.16	80	1.11	0.67
80	0.58	0.17	80	1.08	0.63
80	0.62	0.18	80	1.12	0.65
80	0.57	0.17	80	1.15	0.68
80	0.55	0.16	80	1.18	0.70
80	0.59	0.17	80	1.25	0.76
80	0.61	0.18	80	1.19	0.75
80	0.57	0.17	80	1.36	0.89
80	0.65	0.19	80	1.32	0.93
80	0.64	0.20	80	1.43	1.02
PROM	0.59	0.18	PROM	1.22	0.77
85	0.55	0.16	85	1.48	1.03
85	0.64	0.18	85	1.34	1.04
85	0.69	0.18	85	1.12	0.92
85	0.56	0.18	85	1.23	0.89
85	0.69	0.21	85	1.20	0.86
85	0.66	0.21	85	1.25	0.89
85	0.69	0.21	85	1.27	0.91
85	0.68	0.21	85	1.17	0.84
85	0.66	0.20	85	1.23	0.86
85	0.67	0.20	85	1.30	0.91
PROM	0.65	0.19	PROM	1.26	0.92
90	0.84	0.32	90	1.65	2.08
90	0.76	0.28	90	1.49	1.76
90	0.74	0.27	90	1.39	1.51
90	0.83	0.28	90	1.45	1.50
90	0.80	0.28	90	1.39	1.41

90	0.85	0.29	90	1.44	1.47
90	1.00	0.35	90	1.49	1.51
90	0.99	0.36	90	1.38	1.42
90	0.88	0.33	90	1.50	1.52
90	0.90	0.33	90	1.39	1.38
PROM	0.86	0.31	PROM	1.46	1.56
95	1.01	0.46	95	1.89	2.62
95	0.92	0.41	95	1.89	2.64
95	0.96	0.41	95	1.96	2.90
95	1.02	0.45	95	1.95	3.01
95	1.04	0.45	95	1.95	3.01
95	0.98	0.43	95	1.88	2.80
95	0.94	0.40	95	1.91	2.88
95	0.96	0.40	95	1.90	2.94
95	0.96	0.39	95	1.91	2.88
95	0.97	0.40	95	1.82	2.59
PROM	0.98	0.42	PROM	1.91	2.83
100	1.15	0.56	100	2.38	4.32
100	1.11	0.55	100	2.34	4.33
100	1.10	0.55	100	2.34	4.34
100	1.09	0.54	100	2.40	4.57
100	1.15	0.54	100	2.42	4.64
100	1.19	0.60	100	2.29	4.23
100	1.18	0.59	100	2.29	3.91
100	1.08	0.55	100	2.21	3.89
100	1.08	0.54	100	2.24	3.95
100	1.24	0.66	100	2.32	4.28
PROM	1.14	0.57	PROM	2.32	4.25

Fuente: Elaboración propia

ANEXO 9 Datos de voltaje y corriente obtenidos con el aerogenerador híbrido

Datos tomados el 29 de mayo del 2025

Sur - Norte			Norte - Sur		
Velocidad (km/h)	Corriente eléctrica (A)	Voltaje (V)	Velocidad (km/h)	Corriente eléctrica (A)	Voltaje (V)
60	0.69	0.38	60	1.92	1.81
60	0.68	0.40	60	2.00	1.96
60	0.69	0.37	60	1.96	2.08
60	0.58	0.32	60	1.99	2.18
60	0.62	0.33	60	1.90	2.25
60	0.54	0.28	60	1.98	2.35
60	0.66	0.36	60	2.01	2.46
60	0.59	0.29	60	2.05	2.52
60	0.66	0.33	60	2.08	2.68
60	0.67	0.38	60	2.12	2.71
PROM	0.64	0.34	PROM	2.00	2.30
65	1.00	0.57	65	2.23	3.16
65	1.08	0.64	65	2.25	3.15
65	1.09	0.64	65	2.28	3.20
65	1.12	0.66	65	2.29	3.29
65	1.13	0.58	65	2.31	3.37
65	1.13	0.68	65	2.35	3.46
65	1.12	0.69	65	2.36	3.46
65	1.08	0.68	65	2.40	3.50
65	1.09	0.68	65	2.39	3.54
65	1.13	0.70	65	2.29	3.25
PROM	1.10	0.65	PROM	2.32	3.34
70	1.28	0.92	70	2.29	3.29
70	1.16	0.76	70	2.30	3.35
70	1.24	0.82	70	2.32	3.40
70	1.19	0.78	70	2.35	3.44
70	1.16	0.73	70	2.41	3.57
70	1.18	0.75	70	2.42	3.62
70	1.18	0.78	70	2.43	3.63
70	1.16	0.79	70	2.50	3.81
70	1.21	0.81	70	2.48	3.79
70	1.17	0.77	70	2.46	3.78
PROM	1.19	0.79	PROM	2.40	3.57

75	1.51	1.31	75	2.70	4.57
75	1.44	1.25	75	2.71	4.52
75	1.41	1.13	75	2.76	4.57
75	1.43	1.14	75	2.72	4.62
75	1.58	1.21	75	2.79	4.69
75	1.54	1.27	75	2.81	4.81
75	1.52	1.26	75	2.86	4.94
75	1.43	1.24	75	2.89	5.08
75	1.61	1.34	75	2.86	4.98
75	1.58	1.36	75	2.87	5.01
PROM	1.51	1.25	PROM	2.80	4.78
80	1.63	1.46	80	3.01	5.58
80	1.60	1.46	80	3.03	5.54
80	1.64	1.51	80	2.97	5.48
80	1.65	1.58	80	2.90	5.27
80	1.67	1.60	80	2.96	5.32
80	1.66	1.53	80	2.98	5.44
80	1.66	1.56	80	3.00	5.99
80	1.69	1.64	80	3.01	5.98
80	1.67	1.63	80	2.98	5.42
80	1.69	1.58	80	3.01	5.48
PROM	1.66	1.56	PROM	2.99	5.55
85	1.89	2.22	85	3.15	5.59
85	1.82	2.13	85	3.16	6.02
85	1.80	2.09	85	3.13	5.93
85	1.81	2.07	85	3.20	6.14
85	1.79	2.04	85	3.25	6.29
85	1.82	2.03	85	3.26	6.35
85	1.80	2.04	85	3.30	6.58
85	1.89	2.12	85	3.26	6.40
85	1.90	2.12	85	3.26	6.47
85	1.87	2.18	85	3.19	6.77
PROM	1.84	2.10	PROM	3.22	6.25
90	2.08	2.76	90	3.46	7.13
90	2.04	2.69	90	3.44	7.05
90	2.05	2.65	90	3.41	6.92
90	2.08	2.68	90	3.34	6.72
90	2.14	2.80	90	3.30	6.52
90	2.11	2.81	90	3.32	6.53

90	2.13	2.82	90	3.32	6.60
90	2.27	3.00	90	3.46	6.92
90	2.20	2.95	90	3.54	7.39
90	2.15	2.91	90	3.60	7.64
PROM	2.13	2.81	PROM	3.42	6.94
95	2.31	3.29	95	3.70	7.94
95	2.44	3.59	95	3.71	8.05
95	2.44	3.67	95	3.66	7.50
95	2.54	3.79	95	3.65	7.80
95	2.55	3.94	95	3.64	7.82
95	2.56	3.98	95	3.60	7.54
95	2.53	3.95	95	3.63	7.73
95	2.55	3.98	95	3.66	7.86
95	2.15	3.81	95	3.69	7.91
95	2.24	3.03	95	3.68	7.83
PROM	2.43	3.70	PROM	3.66	7.80
100	2.33	3.44	100	3.83	8.36
100	2.36	3.49	100	3.88	8.72
100	2.37	3.49	100	3.78	8.37
100	2.38	3.53	100	3.73	8.14
100	2.38	3.53	100	3.51	7.39
100	2.34	3.50	100	3.66	7.84
100	2.36	3.52	100	3.65	7.81
100	2.35	3.52	100	3.59	7.84
100	2.34	3.48	100	3.68	8.00
100	2.56	3.97	100	3.63	7.78
PROM	2.38	3.55	PROM	3.69	8.03

Fuente: Elaboración propia

Datos tomados el 30 de mayo del 2025

Sur - Norte			Norte - Sur		
Velocidad (km/h)	Corriente eléctrica (A)	Voltaje (V)	Velocidad (km/h)	Corriente eléctrica (A)	Voltaje (V)
60	0.78	0.46	60	1.40	1.24
60	0.79	0.43	60	1.35	1.31
60	0.77	0.44	60	1.38	1.33
60	0.75	0.45	60	1.42	1.89
60	0.73	0.42	60	1.51	1.99
60	0.67	0.57	60	1.56	1.52
60	0.78	0.58	60	1.55	1.52
60	0.81	0.57	60	1.52	1.50
60	0.87	0.58	60	1.50	1.43
60	0.82	0.58	60	1.47	1.47
PROM	0.78	0.51	PROM	1.47	1.52
65	0.77	0.41	65	1.76	1.99
65	0.85	0.48	65	1.80	2.04
65	0.87	0.54	65	1.78	2.08
65	0.92	0.54	65	1.79	2.14
65	0.91	0.55	65	1.81	2.05
65	0.96	0.58	65	1.77	1.94
65	0.86	0.53	65	1.78	2.04
65	0.87	0.51	65	1.73	2.03
65	0.80	0.50	65	1.75	2.02
65	0.81	0.46	65	1.77	2.06
PROM	0.86	0.51	PROM	1.77	2.04
70	0.86	0.5	70	2.03	2.74
70	0.84	0.48	70	2.07	2.75
70	0.86	0.55	70	2.03	2.66
70	0.85	0.49	70	2.03	2.61
70	0.84	0.58	70	1.99	2.54
70	0.93	0.51	70	1.99	2.58
70	0.86	0.52	70	1.95	2.57
70	0.90	0.51	70	2.08	2.57
70	0.93	0.56	70	1.98	2.50
70	0.89	0.53	70	1.97	2.46
PROM	0.88	0.52	PROM	2.01	2.60
75	1.33	0.85	75	2.34	3.48

75	1.36	0.88	75	3.38	3.55
75	1.42	0.94	75	2.35	3.52
75	1.45	1.03	75	2.36	3.55
75	1.47	1.01	75	2.38	3.59
75	1.38	1.01	75	2.35	3.53
75	1.36	1.00	75	2.31	3.45
75	1.31	0.97	75	2.28	3.38
75	1.27	0.93	75	2.29	3.39
75	1.22	0.82	75	2.33	3.40
PROM	1.36	0.94	PROM	2.44	3.48
80	1.49	1.18	80	2.46	3.76
80	1.48	1.11	80	2.42	3.65
80	1.41	1.19	80	2.40	3.61
80	1.49	1.20	80	2.42	3.83
80	1.48	1.19	80	2.46	3.82
80	1.38	1.18	80	2.45	3.80
80	1.39	1.09	80	2.49	3.90
80	1.35	1.05	80	2.52	3.91
80	1.36	1.06	80	2.44	3.75
80	1.40	1.10	80	2.41	3.77
PROM	1.42	1.14	PROM	2.45	3.78
85	1.60	1.65	85	2.80	4.77
85	1.66	1.60	85	2.76	4.84
85	1.62	1.62	85	2.79	4.91
85	1.63	1.62	85	2.83	4.90
85	1.65	1.64	85	2.79	4.92
85	1.67	1.70	85	2.84	4.47
85	1.70	1.77	85	2.83	5.00
85	1.65	1.74	85	2.89	5.15
85	1.62	1.52	85	2.86	5.05
85	1.65	1.66	85	2.85	5.03
PROM	1.65	1.65	PROM	2.82	4.90
90	1.86	1.89	90	3.13	5.82
90	1.89	2.11	90	3.07	5.61
90	1.88	2.13	90	3.01	5.58
90	1.78	2.02	90	3.03	5.57
90	1.72	1.88	90	2.95	5.49
90	1.82	1.99	90	2.91	5.37
90	1.84	1.99	90	3.01	5.50

90	1.78	2.03	90	3.00	5.51
90	1.86	2.04	90	3.04	5.54
90	1.95	2.23	90	3.10	5.86
PROM	1.84	2.03	PROM	3.03	5.59
95	2.02	2.55	95	3.21	6.29
95	2.09	2.50	95	3.19	6.22
95	2.02	2.54	95	3.24	5.41
95	2.01	2.53	95	3.27	6.48
95	1.97	2.40	95	3.30	6.56
95	2.08	2.71	95	3.31	5.55
95	1.97	2.48	95	3.28	6.51
95	2.03	2.50	95	3.28	6.47
95	2.02	2.56	95	3.23	6.34
95	2.07	2.61	95	3.23	6.29
PROM	2.03	2.54	PROM	3.25	6.21
100	2.28	3.13	100	3.47	7.09
100	2.36	3.28	100	3.46	7.10
100	2.42	3.46	100	3.46	7.15
100	2.43	3.61	100	3.44	7.12
100	2.47	3.78	100	3.57	7.56
100	2.53	3.86	100	3.46	7.18
100	2.49	3.86	100	3.58	7.26
100	2.45	3.78	100	3.51	7.36
100	2.45	3.74	100	3.53	7.29
100	2.48	3.77	100	3.48	7.13
PROM	2.44	3.63	PROM	3.50	7.22

Fuente: Elaboración propia