

Universidad Nacional de Ingeniería

Facultad de Ingeniería Mecánica



TESIS

Diseño de un Aerogenerador de Eje Vertical Mixto de 0.5 Kw para incrementar el tiempo de abastecimiento de Energía Eléctrica a Viviendas Unifamiliares en Zonas Rurales

Para obtener el Título Profesional de Ingeniero Mecánico Electricista.

Elaborado por

Claudio Sebastian Romero Diaz

 [0009-0007-7776-2926](https://orcid.org/0009-0007-7776-2926)

Asesor

MSc. Ing. Bernabé Alberto Tarazona Bermúdez

 [0000-0002-0960-448](https://orcid.org/0000-0002-0960-448)

LIMA – PERÚ

2025

Citar/How to cite	(Romero, 2025)
Referencia/Reference	Romero, C. (2025). <i>Diseño de un Aerogenerador de Eje Vertical Mixto para incrementar el tiempo de abastecimiento de Energía Eléctrica a Viviendas Unifamiliares en Zonas Rurales</i> . [Tesis, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Lista de Contenidos

Lista de Contenidos	iii
Lista de Tablas	vi
Lista de Figuras	vii
Resumen	ix
Abstract	x
Introducción	xi
CAPÍTULO I. Generalidades	1
1.1. Antecedentes de la investigación	1
1.1.1. Antecedentes nacionales	1
1.1.2. Antecedentes internacionales	3
1.2. Identificación y Descripción del Problema de Estudio	5
1.3. Formulación del problema	11
1.3.1. Problema General	11
1.3.2. Problemas Específicos	11
1.4. Justificación e Importancia	12
1.4.1. Justificación de la investigación	12
1.4.2. Importancia de la Investigación:	13
1.5. Objetivos	13
1.5.1. Objetivo General	13
1.5.2. Objetivos Específicos	13
1.6. Hipótesis	14
1.6.1. Hipótesis General	14
1.6.2. Hipótesis Específicas	14
1.7. Variables y Operacionalización de Variables	14
1.7.1. Variables	14
1.7.2. Operacionalización de Variables	15
1.8. Metodología de la Investigación	17

1.8.1. Unidad de Análisis	17
1.8.2. Tipo, Enfoque y Nivel de investigación	18
1.8.3. Diseño de la Investigación	18
1.8.4. Fuentes de Información	19
1.8.5. Población y Muestra	19
1.8.6. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos.....	20
1.8.7. Análisis y Procesamiento de Datos.....	20
CAPÍTULO II. Marco Teórico y Marco Conceptual	22
2.1. Bases Teóricas.....	22
2.1.1. Historia del uso de la energía eólica	22
2.1.2. Energía eólica.....	24
2.1.3. Aerogenerador.....	24
2.1.4. Potencia y energía cinética del viento, ley de Betz	41
2.1.5. Escala de Beaufort	45
2.1.6. Longitud de rugosidad	46
2.1.7. Rosa de viento.....	48
2.2. Marco conceptual	49
CAPÍTULO III. Desarrollo del Trabajo de Investigación	51
3.1. Estado actual de la electrificación en Piura	51
3.2. Alternativas de electrificación en Piura	52
3.2.1. Energía Solar (Paneles Solares).....	52
3.2.2. Gas Natural	53
3.2.3. Biomasa (Biogás y Combustión de Residuos Orgánicos)	53
3.2.4. Interconectarse al SEIN a las poblaciones rurales	54
3.2.5. Energía eólica (Aerogeneradores)	54
3.3. Propuesta de diseño de aerogenerador mixto Darrieus-Savonius	56
3.3.1. Diseño RD	56
3.3.2. Diseño RS:	73
3.3.3. Diseño Solidworks aerogenerador mixto Darrieus-Savonius:.....	76

3.3.4. Matlab:.....	85
CAPÍTULO IV. Resultados, Contrastación de Hipótesis y Discusión de Resultados	88
4.1. Resultados	88
4.2. Contrastación de hipótesis	89
4.3. Discusión de Resultados	91
CONCLUSIONES	93
RECOMENDACIONES.....	94
REFERENCIAS	95
ANEXOS.....	100

Lista de Tablas

<i>Tabla 1.1</i>	<i>Operacionalización de variables</i>	<i>16</i>
<i>Tabla 2.1.</i>	<i>Ventajas y Desventajas de los aerogeneradores HAWT y VAWT.....</i>	<i>26</i>
<i>Tabla 2.2</i>	<i>Clases y Longitudes de rugosidad</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 3.1</i>	<i>Velocidad promedio del viento (Vmv)</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 3.2</i>	<i>Tabulación de los parámetros R, R_m, Z_m, $d_{\text{máx}}$, R_j y Z_j para las curvas adaptadas a las Troposkiens.....</i>	<i>63</i>
<i>Tabla 3.3</i>	<i>Variaciones de torques de partida</i>	<i>76</i>

Lista de Figuras

Figura 1.1	<i>Evolución en las emisiones globales de CO₂ por origen</i>	6
Figura 1.2	<i>Aprovechando al máximo la energía del Sol</i>	7
Figura 1.3	<i>La Energía y el Desarrollo de la Humanidad</i>	10
Figura 1.4	<i>Model 1 isometric on left, top on middle, and side view on right</i>	17
Figura 1.5	<i>Etapas de la Investigación</i>	21
Figura 2.1	<i>Molino de Viento</i>	22
Figura 2.2	<i>Ejemplos de aerogeneradores de eje horizontal (HAWT) y vertical (VAWT)</i>	25
Figura 2.3	<i>Tipos de aerogenerador vertical</i>	28
Figura 2.4	<i>Turbina de Viento de Tipo Savonius tradicional</i>	29
Figura 2.5	<i>Componentes del rotor H-Darrieus</i>	31
Figura 2.6	<i>Aerogenerador de eje horizontal</i>	33
Figura 2.7	<i>Mapa de velocidad media anual del viento a 100 m</i>	39
Figura 2.8	<i>Gráfico Eficiencia (C_p) vs. Relación de Velocidad de Punta (TSR)</i>	40
Figura 2.9	<i>Ley de Betz</i>	42
Figura 2.10	<i>Diagrama representando el flujo de aire a través del disco actuador</i>	43
Figura 2.11	<i>Escala de Beaufort</i>	46
Figura 2.12	<i>Rosa de Vientos en un proyecto eólico</i>	49
Figura 3.1	<i>Rendimiento aerodinámico en función de la relación de velocidad (TSR)</i>	57
Figura 3.2	<i>Área de la parábola</i>	59
Figura 3.3	<i>Forma Troposkien</i>	61
Figura 3.4	<i>Sistema coordenado usado para describir la Troposkien y la Curva adaptada</i>	62
Figura 3.5	<i>Velocidad angular del rotor</i>	65
Figura 3.6	<i>Longitud de álabe - 1</i>	66
Figura 3.7	<i>Longitud de álabe - 2</i>	68
Figura 3.8	<i>Secciones del Área Barrida</i>	69

Figura 3.9	<i>Efecto de la Solidez sobre el Rendimiento Aerodinámico.....</i>	71
Figura 3.10	<i>Aerogenerador mixto Darrieus-Savonius.....</i>	77
Figura 3.11	<i>Túnel de viento</i>	78
Figura 3.12	<i>Dominio computacional mediante Túnel de viento</i>	79
Figura 3.13	<i>Cilindro que envuelve a los alerones del aerogenerador mixto</i>	79
Figura 3.14	<i>Rotación del cuerpo y tipo de análisis interno</i>	80
Figura 3.15	<i>Tipo de fluido</i>	81
Figura 3.16	<i>Presión y velocidad promedio</i>	81
Figura 3.17	<i>Selección de eje.....</i>	82
Figura 3.18	<i>Número de mallados y celdas</i>	83
Figura 3.19	<i>Presión atmosférica que influye en el aerogenerador.....</i>	83
Figura 3.20	<i>Viento a través del aerogenerador</i>	84
Figura 3.21	<i>125 RPM.....</i>	84
Figura 3.22	<i>Velocidad promedio del aerogenerador.....</i>	85
Figura 3.23	<i>Variación de la curva Tip Speed Ratio (TSR) vs. Eficiencia (η)</i>	86
Figura 3.24	<i>Curva Tip Speed Ratio (TSR) vs. Eficiencia (η).....</i>	86

Resumen

En las zonas rurales, el acceso a la energía eléctrica es limitado debido a la falta de infraestructura y a la dependencia de fuentes de energía poco eficientes. En este contexto, la presente investigación tuvo como objetivo diseñar un aerogenerador de eje vertical mixto tipo Darrieus-Savonius para incrementar el tiempo de abastecimiento de energía eléctrica en viviendas unifamiliares en la ciudad de Piura.

Para ello, se realizó una evaluación de la velocidad del viento en la zona del proyecto, utilizando anemómetros, veletas y datos históricos, determinando un promedio de 4 m/s a lo largo del año. Con base en esta información, se dimensionó un aerogenerador capaz de generar 0.5 kW de potencia, asegurando un suministro continuo sin necesidad de baterías, lo que optimiza costos y espacio. Mediante simulaciones en SolidWorks, se obtuvo la curva de eficiencia en función del coeficiente de velocidad de punta (TSR), evidenciando un buen rendimiento tanto en bajas como en altas velocidades dentro del rango de 4.019 m/s a 6 m/s. Además, se confirmó que el aerogenerador es capaz de operar de manera continua, garantizando el abastecimiento energético en viviendas rurales.

Los resultados obtenidos demuestran que el diseño propuesto cumple con la hipótesis del estudio, asegurando un suministro eléctrico eficiente y sostenible. La eliminación del uso de baterías debido a la constancia del viento representa una ventaja significativa en términos económicos y operativos, facilitando la implementación del sistema en comunidades rurales con recursos limitados. De esta manera, el aerogenerador mixto Darrieus-Savonius se presenta como una alternativa viable para mejorar el acceso a la energía en zonas rurales, contribuyendo al desarrollo sostenible y la mejora en la calidad de vida de sus habitantes.

Palabras clave: aerogenerador mixto, Darrieus-Savonius, energía eólica, zonas rurales, abastecimiento eléctrico.

Abstract

In rural areas, access to electricity is limited due to a lack of infrastructure and dependence on inefficient energy sources. In this context, the present research aimed to design a mixed vertical-axis wind turbine of the Darrieus-Savonius type to increase the electricity supply time for single-family homes in the city of Piura.

To achieve this, a wind speed assessment was conducted using anemometers, weather vanes, and historical data, determining an average wind speed of 4 m/s throughout the year. Based on this information, a wind turbine was dimensioned to generate 0.5 kW of power, ensuring a continuous supply without the need for batteries, thereby optimizing costs and space. Through simulations in SolidWorks, the efficiency curve as a function of the tip speed ratio (TSR) was obtained, demonstrating good performance at both low and high speeds within the range of 4.019 m/s to 6 m/s. Additionally, it was confirmed that the wind turbine operates continuously, guaranteeing a stable energy supply for rural households.

The results show that the proposed design meets the study's hypothesis, ensuring an efficient and sustainable electricity supply. The elimination of battery usage due to the consistency of wind speeds presents a significant advantage in economic and operational terms, facilitating system implementation in rural communities with limited resources. Thus, the mixed Darrieus-Savonius wind turbine emerges as a viable alternative to improve energy access in rural areas, contributing to sustainable development and improving the quality of life of its inhabitants.

Keywords: mixed wind turbine, Darrieus-Savonius, wind energy, rural areas, electricity supply.

Introducción

En las áreas rurales, contar con suministro eléctrico continúa siendo un reto debido a la insuficiencia de infraestructura y a la dependencia de fuentes energéticas irregulares. La generación de electricidad a partir del viento surge como una opción factible y sustentable para optimizar el acceso a la energía en estas regiones, contribuyendo a disminuir la desigualdad energética y a elevar el nivel de bienestar de la población. No obstante, los aerogeneradores tradicionales no siempre logran un desempeño eficiente en zonas donde los vientos son de baja velocidad o presentan fluctuaciones en su dirección e intensidad.

En este marco, la investigación tiene como finalidad desarrollar un aerogenerador de eje vertical mixto del tipo *Darrieus – Savonius*, con el objetivo de prolongar el suministro de electricidad en viviendas unifamiliares ubicadas en zonas rurales. Este modelo híbrido integra las características favorables de ambos rotores: el *Darrieus*, reconocido por su eficiencia aerodinámica en condiciones de viento medio y alto, y el *Savonius*, destacado por su capacidad de autoarranque y su aprovechamiento de corrientes de baja velocidad.

Para cumplir con el propósito general, se establecen tres objetivos específicos. En primer lugar, se realizará una evaluación para establecer un diseño óptimo del aerogenerador mixto, priorizando su eficiencia en el abastecimiento de energía. En segundo lugar, se analizará la curva de eficiencia en función del coeficiente de velocidad de punta (TSR), lo que permitirá determinar el desempeño del aerogenerador en distintas condiciones de viento. Finalmente, se verificará si el aerogenerador diseñado es capaz de generar y almacenar energía suficiente para garantizar un suministro estable a las viviendas beneficiadas.

La importancia de esta investigación reside en su aporte al desarrollo de alternativas energéticas renovables accesibles para comunidades rurales. Además, el diseño de un aerogenerador mixto o híbrido puede representar una alternativa eficiente y

adaptable a distintos escenarios climáticos, impulsando el uso de fuentes limpias y promoviendo la autosuficiencia energética en zonas de difícil acceso.

CAPÍTULO I.

Generalidades

1.1. Antecedentes de la investigación

1.1.1. Antecedentes nacionales

Cubas (2021) llevó a cabo un estudio comparativo sobre la aerodinámica de las turbinas *Darrieus* y *Savonius* con el propósito de generar energía eléctrica (EE) en la Universidad Señor de Sipán (USS). La investigación se desarrolló bajo un enfoque descriptivo y empleó una metodología retrospectiva. Para la recopilación de información, se aplicaron técnicas como la observación, además del uso de guías y fichas de recolección de datos. Los resultados mostraron que la velocidad promedio del viento (V_m) fue de $3,39\text{ m/s}$, mientras que la demanda máxima alcanzó los $13,2\text{ kW}$, generando un total de $66\text{ kW} - h$ diarios. En cuanto al análisis aerodinámico comparativo de ambas turbinas, se evidenció que la *Darrieus* presentó un factor de potencia de 0,21, mientras que la *Savonius* obtuvo un valor de 0,36. Asimismo, con la implementación de una turbina *Savonius* “P” se logró una producción de 5 kW , requiriendo una inversión inicial de 42 890 *soles*, cuya recuperación se estima en un período de 21 *años*.

Caballero & Gallardo (2022) llevaron a cabo un estudio cuyo propósito fue el diseño de un prototipo de aerogenerador capaz de cubrir la demanda eléctrica. Para ello, se realizó una simulación del prototipo utilizando herramientas de diseño asistido por computadora, como SOLIDWORKS y ANSYS, además de una simulación del sistema híbrido mediante el software HOMER Pro. La investigación siguió un enfoque aplicado e hizo uso de diversos recursos, entre ellos un anemómetro, programas de diseño computacional y Excel. Los resultados indicaron que tanto el prototipo como el sistema híbrido cumplieron con los requerimientos

del proyecto, según las simulaciones efectuadas en los softwares correspondientes.

Medina (2023) desarrolló una investigación con el propósito de diseñar y construir un aerogenerador *Savonius* modificado que contribuya al suministro de EE en una vivienda del distrito de *Ahuac*, considerando una velocidad de viento de 4 m/s . El estudio empleó un enfoque descriptivo correlacional y se clasificó como una investigación aplicada con un diseño no experimental de tipo transversal correlacional. Para el análisis, se utilizaron datos meteorológicos del 2021 proporcionados por Senamhi, junto con la recopilación de información en campo, el uso de *Excel* y la simulación mediante el software *SolidWorks*. Los hallazgos demostraron que tanto el diseño como la construcción del aerogenerador tienen un impacto en la EE suministrada a los usuarios del distrito, evidenciándose que la potencia generada mantiene valores consistentes a lo largo del año.

Berna (2020) llevó a cabo una investigación en la que propuso un procedimiento para el diseño del rotor de un aerogenerador vertical tipo *Savonius*, enfocado en su implementación en zonas rurales y de difícil acceso. Para ello, se realizaron cálculos numéricos con el objetivo de desarrollar un aerogenerador adecuado para la localidad de *Tanaka*, planteando una solución viable para la generación de EE a través de esta tecnología. La metodología empleada en el estudio correspondió a un diseño experimental. Como parte del trabajo, se estableció un procedimiento detallado para la creación y evaluación de proyectos de este tipo, facilitando su aplicación en comunidades con necesidades energéticas.

Paredes (2022) en su trabajo de investigación, tuvo como objetivo principal diseñar un aerogenerador capaz de suministrar $66.88\text{ kW} \cdot \text{h}$ de energía al mes a una vivienda unifamiliar en una zona rural. El tipo de investigación fue aplicada, enfocada en desarrollar una solución técnica y económica para enfrentar la falta de

acceso a electricidad en comunidades alejadas de la ciudad de Arequipa. Se diseñó un aerogenerador de 2.8 *metros* de diámetro con álabes *NACA 2410*, generador de imanes permanentes y un sistema de almacenamiento basado en baterías de 12V. Se demostró que el aerogenerador diseñado podía generar hasta $120.39 \text{ kW} \cdot \text{h}$ al mes, lo cual cubría ampliamente las necesidades energéticas de la vivienda, con un costo de producción de $0.5808 \text{ S/.por kW} \cdot \text{h}$, siendo un 20% más económico que la electricidad convencional de red. Como conclusión, se comprobó que el uso de energía eólica en zonas rurales es viable y más económico, proporcionando una fuente de energía continua y confiable para las comunidades alejadas, especialmente en áreas con recursos eólicos favorables.

1.1.2. Antecedentes internacionales

Franco & Moncada (2020) desarrollaron un modelo de turbina eólica híbrida de baja potencia, combinando las configuraciones geométricas de *Savonius* y *Darrieus*. Su principal objetivo se basa en facilitar la obtención de energía limpia con un potencial eólico bajo, favoreciéndose los diferentes rangos de velocidades encontrados en Bolivia. El método utilizado en esta investigación es el diseño experimental. Por ende, se determinaron las características del sistema para su respectivo dimensionamiento, procediendo así en la fabricación del prototipo de la turbina híbrida con la finalidad de realizar pruebas y evaluar distintos comportamientos, obteniendo como resultado las curvas de rendimiento.

Hernández (2021) llevó a cabo un proyecto cuyo propósito principal fue diseñar y construir un prototipo de micro aerogenerador de baja potencia, con el fin de demostrar que es posible transformar una cantidad reducida de energía cinética del viento en energía mecánica mediante el movimiento de las hélices y, posteriormente, en electricidad. La investigación se basó en un diseño experimental y concluyó que, si bien este prototipo no alcanza la capacidad de suministro de la red eléctrica en España, puede ser una alternativa viable para áreas sin acceso a

la red general. Sin embargo, no fue posible construir el generador Savonius con las mejoras planteadas en la tesis.

desarrolló un aerogenerador de bajo costo con el propósito de generar electricidad dentro del campus, abarcando tanto su diseño como su construcción. El tipo de investigación fue experimental y aplicada, enfocada en el análisis de costos de materiales, diseño y construcción del prototipo, con el fin de implementar una tecnología sostenible dentro de una institución educativa. Se seleccionó un aerogenerador de eje vertical por su simplicidad y eficiencia en entornos de baja velocidad de viento. Los resultados mostraron que la turbina eólica construida logró generar electricidad suficiente para alimentar un salón de clases. Las pruebas de funcionabilidad, realizadas con el anemómetro y el tacómetro conectados a un Arduino, demostraron la eficiencia del prototipo al medir la velocidad del viento y las revoluciones por minuto (RPM) de la turbina. Como conclusión, la investigación verificó que es posible implementar aerogeneradores de bajo costo en entornos educativos, promoviendo el uso de energías renovables y contribuyendo a la sostenibilidad del campus.

Flores (2023) creó un modelo de aerogenerador de baja potencia destinado a aplicaciones en entornos residenciales dentro de la ciudad de Puebla. Este trabajo fue de tipo experimental, con un enfoque en la recopilación de datos meteorológicos, simulaciones de mecánica de fluidos y el diseño de la turbina Savonius. La investigación abarcó tanto la construcción del prototipo como su caracterización mediante comparaciones con otros dos modelos de aerogeneradores en condiciones de viento similares. Los resultados de las simulaciones indicaron que la turbina *Ehecatl* logró un coeficiente de potencia de 0.277, evidenciando su eficiencia en la generación de energía bajo las condiciones de viento en la ciudad de Puebla. Comparada con otros modelos como la turbina Savonius y la Icewind, la *Ehecatl* demostró un desempeño favorable en términos de eficiencia. Como conclusión, el estudio confirmó la viabilidad del diseño y la

importancia de seguir optimizando el modelo mediante simulaciones adicionales y pruebas en túneles de viento.

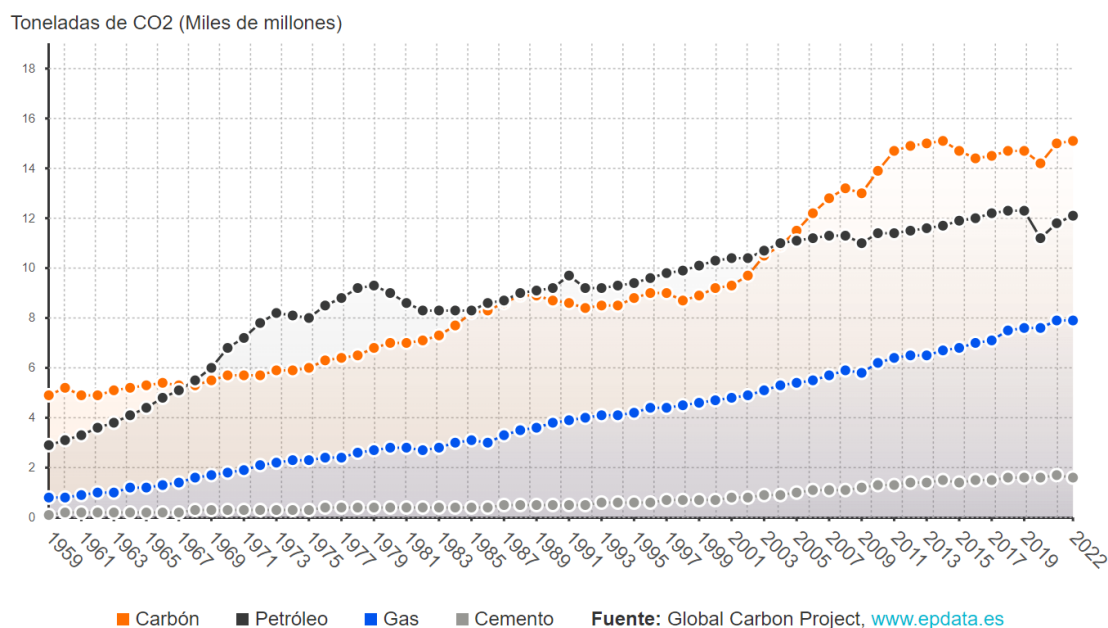
Hosseini & Goudarzi (2019) diseñó, simuló y evaluó el rendimiento de una turbina híbrida con capacidades mejoradas de autoarranque y un rango operativo ampliado. El tipo de investigación fue aplicada, y la muestra estuvo compuesta por un modelo híbrido de VAWT que incluyó un RS modificado de tipo Bach de dos palas y una turbina Darrieus (TD) de tres palas. Para lograr este propósito, se realizaron análisis teóricos, modelado CAD en SolidWorks, mallado en ANSYS y simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD) en ANSYS Fluent. Los resultados indicaron que, aunque la TD alcanzó un coeficiente de potencia (C_p) máximo del 48.4% a una relación de velocidad de punta (TSR) de 2.50, su requerimiento de alto par de arranque afectó su rendimiento inicial. En cambio, la turbina híbrida demostró capacidades de autoarranque y alcanzó un C_p máximo de 41.4% a una TSR de 2.5, operando hasta una TSR de 4.5. En comparación con diseños híbridos anteriores, esta configuración mostró mejoras en eficiencia y rango operativo, lo que apoya su potencial para la sostenibilidad energética. Por ello, el estudio concluyó que el diseño propuesto es una solución eficiente para capturar energía eólica en diversas condiciones operativas.

1.2. Identificación y Descripción del Problema de Estudio

La producción de EE depende en gran medida de fuentes no renovables, lo que provoca un impacto negativo significativo en el medio ambiente, contribuyendo al problema del calentamiento global, como se muestra en la figura 1.1.

Figura 1.1

Evolución en las emisiones globales de CO₂ por origen



Nota. La figura muestra las cifras de contaminación al medio ambiente por uso de recurso no renovable a través del tiempo. epdata (2023). <https://www.epdata.es/datos/cambio-climatico-datos-graficos/447>

Para el desarrollo de un país, es fundamental considerar un factor crucial: la reducción del número de comunidades que carecen de sistemas de generación eléctrica. Según datos de Jordán (2009, pág. 6), más de 6 millones de habitantes aún no tienen acceso a este suministro básico.

En caso de contar con suministro eléctrico, este suele presentar interrupciones constantes tanto en el día como en la noche, afectando el desarrollo de la población. Garantizar el acceso a la electricidad permite optimizar servicios esenciales como la educación, la salud y la comunicación, lo que favorece el bienestar general de la comunidad.

Como afirma Jordán (2009) “Es fundamental que todas las localidades cuenten con EE, ya que de lo contrario la calidad de vida de las personas sería mala, de tal manera afectaría la salud de los habitantes” (pág. 10).

El territorio peruano posee una gran variedad de recursos naturales adecuados para la producción de EE, resaltando el aprovechamiento de fuentes como la eólica, hidráulica y solar. No obstante, también se emplea energía térmica, cuyo costo ha aumentado debido al encarecimiento de los combustibles, mientras que la quema de hidrocarburos ha generado impactos ambientales considerables, como el efecto invernadero. Ante esta situación, las autoridades peruanas impulsan la diversificación de las fuentes energéticas en el país (Atlas eólico del Perú, 2016).

Figura 1.2

Aprovechando al máximo la energía del Sol



Nota. La figura muestra la vasta cantidad de terreno que usan los paneles solares para generar EE. Repsol (2024). <https://www.repsol.com/es/energia-futuro/futuro-planeta/energia-solar/index.cshtml>

Si bien también podríamos hacer uso de la energía solar (ES), Piura enfrenta varios desafíos que limitan su uso. Uno de los factores más importantes es la variabilidad climática. Máncora puede experimentar nublados estacionales y fenómenos como el "El Niño", que afectan la radiación solar y, por ende, la eficiencia de los sistemas solares (Mastrorillo et al., 2016). Además, los costos iniciales de instalación de paneles solares

son un obstáculo importante. La inversión requerida para la implementación de esta tecnología puede ser prohibitiva para muchos residentes y empresas locales, como se ha señalado en investigaciones sobre la accesibilidad de la energía renovable en regiones en desarrollo (IRENA, 2019).

La infraestructura desempeña un rol fundamental en este contexto. La falta de sistemas eficientes para almacenar y distribuir la ES puede dificultar su incorporación a la red eléctrica actual. De acuerdo con un informe de la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA, 2020), las deficiencias en la infraestructura de diversas regiones limitan la implementación efectiva de tecnologías sostenibles, entre ellas la ES.

El mantenimiento y la capacitación son otros aspectos que deben considerarse. Los sistemas solares requieren un mantenimiento regular y personal capacitado para su operación, lo que puede ser un desafío en áreas con recursos limitados (González et al., 2018). Además, la disponibilidad de terreno adecuado para la instalación de grandes plantas solares es un factor limitante, especialmente en áreas urbanizadas o protegidas. La presencia de otras fuentes energéticas, como la energía generada por el viento, también puede tener un impacto. Si estas opciones resultan más rentables o fáciles de implementar, es posible que la demanda de ES se vea reducida (López et al., 2021).

Por otro lado, la construcción de líneas de transmisión para conectar al SEIN a zonas remotas es costosa y requiere una inversión considerable. En muchas ocasiones, el costo por kilómetro de línea en zonas rurales es mucho más alto debido a la falta de acceso y a las condiciones geográficas, lo que puede desincentivar a las empresas eléctricas.

Otro aspecto importante es la baja densidad poblacional en estas áreas. Las comunidades rurales suelen tener pocos habitantes, lo que eleva el costo por conexión eléctrica por usuario. Esta situación puede hacer que la inversión no resulte rentable para las empresas de energía, dificultando así la expansión del servicio.

La falta de suministro eléctrico, en especial de las comunidades rurales que se encuentran alejadas del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN) conlleva diversos problemas significativos tales como:

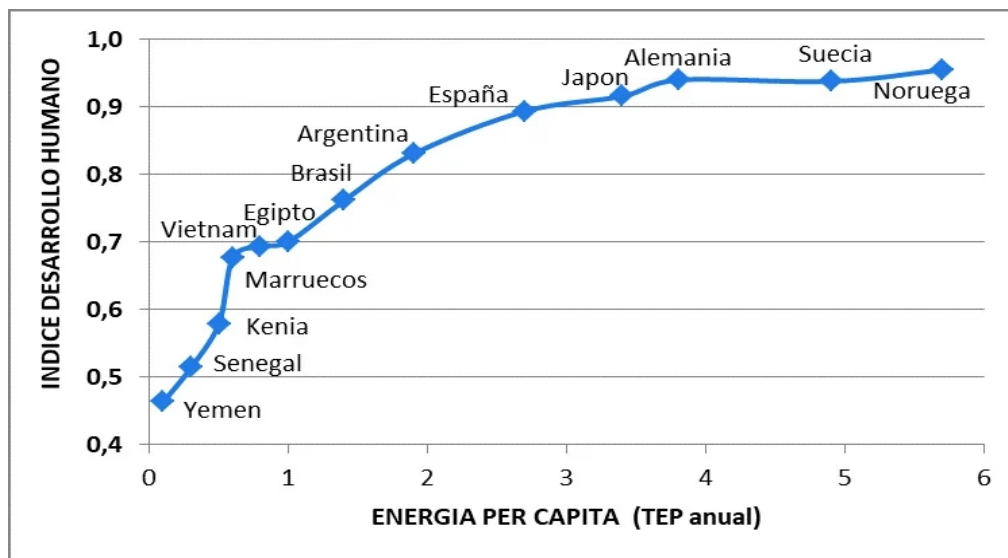
- **Falta de acceso a servicios básicos:** Sin electricidad, es difícil acceder a servicios esenciales como agua potable, salud y educación. Por ejemplo, las bombas de agua y los sistemas de saneamiento a menudo dependen de EE.
- **Limitaciones en la educación:** La ausencia de electricidad en el hogar complica las condiciones de estudio, lo que puede impactar negativamente en el desempeño escolar de los estudiantes y en su habilidad para realizar tareas y proyectos.
- **Dificultades en la atención médica:** Las instalaciones de salud necesitan electricidad para operar equipos médicos, mantener la cadena de frío para vacunas y suministros, y proporcionar atención adecuada.
- **Reducción de la productividad:** La falta de acceso a energía restringe el desarrollo de actividades económicas, como la agricultura y la pequeña industria, lo que impacta negativamente en la economía local y en la generación de ingresos.
- **Dependencia de fuentes de energía no sostenibles:** Las comunidades suelen recurrir a fuentes de energía alternativas, como combustibles fósiles, leña o queroseno, lo que puede ser costoso, poco saludable y perjudicial para el medio ambiente.
- **Inseguridad y criminalidad:** La ausencia de alumbrado público puede incrementar la inseguridad y la delincuencia en las comunidades, impactando negativamente en el bienestar de sus habitantes.
- **Aislamiento social:** La falta de electricidad puede dificultar la comunicación y el acceso a la información, lo que lleva a un mayor aislamiento social y cultural.
- **Limitaciones en el desarrollo económico:** Sin acceso a energía, es difícil atraer inversiones y desarrollar negocios locales, lo que perpetúa la pobreza y la falta de oportunidades.

- **Dificultades en la conservación de alimentos:** La falta de electricidad limita el uso de refrigeración, lo que provoca la pérdida de alimentos y recursos, especialmente en zonas rurales.
- **Impacto en la calidad de vida:** La ausencia de electricidad afecta el confort y bienestar de las personas, limitando actividades recreativas y sociales.

En la figura 1.2. se muestra la relación entre el Índice de Desarrollo Humano (IDH) y el consumo de energía primaria per cápita en diversos países, utilizando información proporcionada por la *ONU* y la Agencia Internacional de la Energía. Por otro lado, la figura 1.3. permite observar que existe una correlación directa entre el consumo energético y el nivel de vida de la población. No obstante, una vez que el IDH alcanza cierto umbral, un incremento en el consumo de energía por persona deja de generar mejoras significativas en dicho índice, lo cual es evidente en los países con economías más desarrolladas.

Figura 1.3

La Energía y el Desarrollo de la Humanidad



Nota. El gráfico indica una correlación positiva entre el consumo de energía y el nivel de calidad de vida de la población en distintos países, según lo reportado por Total Energies (2020).

<https://www.totalenergies.es/es/pymes/blog/la-energia-y-el-desarrollo-de-la-humanidad>

Por lo tanto, como se aprecia en la figura 1.2.3., se evidencia una correlación directa entre el consumo de energía y el bienestar de la población en distintos países.

Estos desafíos subrayan la relevancia del acceso a la electricidad como un elemento fundamental para el progreso sostenible y la calidad de vida de las comunidades, además de la importancia de emplear fuentes renovables para su generación.

Asimismo, es fundamental destacar que la electricidad durante la noche tiene un costo más elevado en comparación con el consumo diurno. En este contexto, los aerogeneradores se posicionan como una alternativa eficiente para complementar la red eléctrica, ya que su impacto ambiental es mínimo y no generan huella de carbono en el ecosistema.

El principal desafío que enfrentan muchas localidades es su ubicación remota y su aislamiento de las redes primarias y secundarias del sistema interconectado, lo que restringe su acceso a servicios esenciales como EE, agua potable y atención sanitaria. Esta falta de conectividad no solo impacta negativamente en la calidad de vida de la población, sino que también frena el crecimiento económico y social de la región, dificultando la atracción de inversiones y la ejecución de proyectos de infraestructura.

1.3. Formulación del problema

1.3.1. Problema General

¿Cómo diseñar un aerogenerador de eje vertical mixto tipo Darrieus - Savonius que sea adecuado para incrementar el tiempo de abastecimiento de EE a viviendas unifamiliares de zonas rurales?

1.3.2. Problemas Específicos

- ❖ ¿Cómo establecer el diseño óptimo de un aerogenerador de eje vertical mixto tipo Darrieus - Savonius para el abastecimiento de energía eléctrica a viviendas unifamiliares de zonas rurales?

- ❖ ¿Cuál es la relación entre la eficiencia del aerogenerador mixto y la relación de velocidad de punta (TSR) para garantizar un suministro constante de energía a viviendas unifamiliares?
- ❖ ¿El aerogenerador mixto es capaz de producir y almacenar la cantidad de energía eléctrica necesaria para abastecer viviendas unifamiliares?

1.4. Justificación e Importancia

1.4.1. Justificación de la investigación

Piura, en la costa norte del Perú, posee un notable potencial eólico debido a sus vientos constantes, lo que hace relevante la investigación de un aerogenerador mixto Darrieus - Savonius. De igual manera, la propuesta combinó dos tipos de aerogeneradores (Darrieus y Savonius) que aprovecharon eficazmente el recurso eólico en diversas condiciones de viento, garantizando una producción más constante y fiable. Los aerogeneradores Darrieus fueron conocidos por su alta eficiencia en vientos fuertes, mientras que los Savonius resultaron eficientes en vientos bajos y turbulentos. La combinación de estos dos tipos en un solo aerogenerador permitió un mejor aprovechamiento de las condiciones eólicas variables en Piura.

La instalación de estos aerogeneradores impulsó el desarrollo de energía renovable en la región, disminuyendo la dependencia de recursos no renovables y la emisión de gases contaminantes. Además, tuvo un impacto positivo en la economía y la sociedad, al fomentar la generación de empleo y reducir los costos de electricidad, lo que contribuyó a mejorar las condiciones de vida de la población. Como resultado, esta innovación tecnológica permitió que Piura se destacara como referente en sostenibilidad y en la implementación de soluciones innovadoras dentro del sector energético.

1.4.2. Importancia de la Investigación:

La incorporación de un aerogenerador híbrido Darrieus-Savonius en Piura impulsa la sostenibilidad y fomenta la adopción de energías limpias, maximizando el aprovechamiento del recurso eólico y fortaleciendo la estabilidad del sistema eléctrico en la región. Además, el éxito de esta investigación puede servir como modelo replicable para otras regiones con condiciones eólicas similares, fomentando el crecimiento del sector eólico en Perú y otros países con climas afines.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Diseñar un aerogenerador de eje vertical mixto tipo Darrieus - Savonius, para incrementar el tiempo de abastecimiento de energía eléctrica a viviendas unifamiliares en zonas rurales.

1.5.2. Objetivos Específicos

- ❖ Realizar una evaluación para poder establecer el diseño óptimo del aerogenerador mixto tipo Darrieus - Savonius para una mayor eficiencia en el abastecimiento de energía a viviendas unifamiliares en zonas rurales.
- ❖ Realizar una evaluación para hallar la curva Eficiencia vs TSR del aerogenerador mixto para abastecer de energía a viviendas unifamiliares en zonas rurales.
- ❖ Determinar si el aerogenerador mixto produce la energía para abastecer y almacenar de energía eléctrica a viviendas unifamiliares en zonas rurales.

1.6. Hipótesis

1.6.1. Hipótesis General

El diseño de un aerogenerador de eje vertical mixto tipo Darrieus - Savonius permitirá incrementar el tiempo de abastecimiento de energía eléctrica a viviendas unifamiliares en zonas rurales.

1.6.2. Hipótesis Específicas

- ❖ El diseño óptimo del aerogenerador de eje vertical mixto tipo Darrieus - Savonius, basado en parámetros aerodinámicos y estructurales, permitirá maximizar la eficiencia energética para el abastecimiento de viviendas unifamiliares en zonas rurales.
- ❖ Existe una curva óptima de eficiencia en función de la relación de velocidad de punta (TSR) que maximiza la generación de energía del aerogenerador mixto, adecuada para el suministro eléctrico de viviendas unifamiliares en zonas rurales.
- ❖ El aerogenerador mixto diseñado produce y almacena suficiente energía eléctrica para satisfacer las necesidades energéticas de viviendas unifamiliares en zonas rurales.

1.7. Variables y Operacionalización de Variables

1.7.1. Variables

- ❖ Variable Independiente (VI): Aerogenerador
- ❖ Variable Dependiente (VD): Tiempo de abastecimiento de energía eléctrica

1.7.1.1. Dimensiones

- ❖ Para la Variable Aerogenerador (VI): Diseño, Generación, Evaluación

- ❖ Para la Variable Tiempo de abastecimiento de energía eléctrica (VD): Condiciones Ambientales, Energía Consumida, Energía Almacenada.

1.7.1.2. Indicadores

- ❖ Para la Variable Aerogenerador:
 - ✓ Indicadores de la dimensión Diseño: Forma de álabes, fuerza de álabes, diámetro del rotor, altura de torre.
 - ✓ Indicadores de la dimensión Generación: Capacidad de generación real, capacidad de generación nominal.
 - ✓ Indicadores de la dimensión Evaluación: Evaluación de la eficiencia, evaluación del TSR.
- ❖ Para la Variable Tiempo de abastecimiento de energía eléctrica:
 - ✓ Indicadores de la dimensión Condiciones Ambientales: Velocidad del viento, dirección del viento, humedad, turbulencia.
 - ✓ Indicadores de la dimensión Energía Consumida: Consumo energético promedio de vivienda unifamiliar.
 - ✓ Indicadores de la dimensión Energía Almacenada: Número de baterías, capacidad de almacenamiento, eficiencia de carga y descarga, ciclo de vida.

1.7.2. Operacionalización de Variables

A continuación, se mostró las variables de investigación en la Matriz de Operacionalización de Variables, las cuales son:

Tabla 1.1

Operacionalización de variables

<i>Variables</i>		<i>Definición conceptual</i>	<i>Definición operacional</i>	<i>Dimensiones</i>	<i>Indicadores</i>
Variable Independiente	Aerogenerador	Se describe como un mecanismo capaz de transformar la fuerza del viento en movimiento mecánico, el cual puede ser aprovechado para generar electricidad o utilizarse en la ejecución de una tarea determinada.		Diseño	Forma de alabes
					Fuerza de alabes
					Diámetro del rotor
					Altura de torre
				Generación	Capacidad de generación real
					Capacidad de generación nominal
Variable Dependiente	Tiempo de abastecimiento de EE	El suministro de energía eléctrica consiste en la producción y distribución de electricidad con el propósito de cubrir las necesidades de los usuarios (Moreno, 2022).		Evaluación	Curva de la eficiencia
					Curva de TSR del nuevo modelo de aerogenerador
					Velocidad del viento
					Dirección del viento
				Condiciones Ambientales	Humedad
					Turbulencia
					Consumo energético promedio de vivienda unifamiliar
				Energía Consumida	Número de baterías
					Capacidad de almacenamiento
					Eficiencia de carga y descarga
				Energía Almacenada	Ciclo de vida

Nota. Este cuadro presenta las variables junto con su definición conceptual y operacional, así como sus dimensiones e indicadores.

1.8. Metodología de la Investigación

1.8.1. Unidad de Análisis

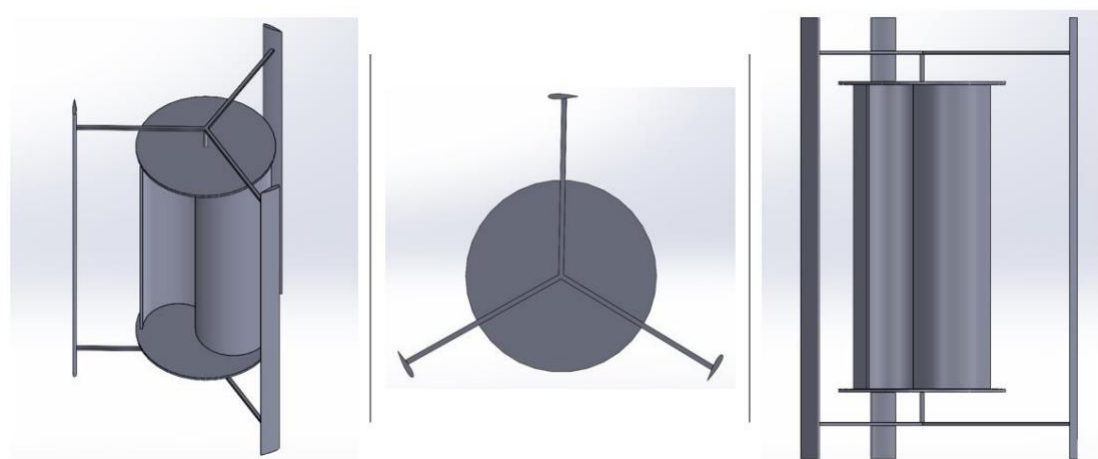
La unidad de análisis para el estudio fue el modelo de aerogenerador de eje vertical mixto de diseño Darrieus y Savonius, con una capacidad mínima de 0.5 kW de potencia para uso doméstico de EE, y dimensiones moderadas, ya que representó una solución innovadora para la generación de energía eólica en residencias.

Debía estar a una altura mínima de 3 m respecto al suelo, y el número de palas del modelo Savonius y Darrieus depende de los cálculos a realizarse. El material utilizado fue aluminio, elegido por su durabilidad y resistencia a las condiciones climáticas; además, las palas del Savonius se diseñaron cóncavas y las del Darrieus se dotaron de un perfil NACA, de acuerdo con el cálculo del diseño.

Estos sistemas aprovecharon las ventajas de ambos tipos de aerogeneradores verticales para mejorar la eficiencia y el rendimiento en distintas condiciones de viento.

Figura 1.4

Model 1 isometric on left, top on middle, and side view on right



Nota. El dibujo en 3D representa uno de los diseños de aerogenerador mixtos. Hesam Eftekhari et al 2023. Obtenido de Numerical Investigation of Hybrid SavoniusDarrieus Vertical Axis Wind Turbine at Low Wind Speeds

1.8.2. Tipo, Enfoque y Nivel de investigación

Según Burton & Steane (2004), una investigación se considera de enfoque cuantitativo cuando recopila y analiza datos numéricos para comprender fenómenos y identificar tendencias. En este estudio, se llevó a cabo la obtención y análisis de información esencial para diseñar un aerogenerador que satisfaga los requisitos de generación de energía.

A su vez, Ceroni (2010) señala que la investigación aplicada se caracteriza por enfocarse en la solución de problemas específicos mediante el uso del conocimiento. Esto se evidenció en la investigación al simular la propuesta de un aerogenerador de eje mixto bajo las condiciones del sector, con el fin de evaluar si cumplía con la demanda energética de la zona.

A partir de lo expuesto, se concluye que esta investigación es de tipo aplicada, pues busca solucionar problemas prácticos y atender necesidades específicas. Su enfoque es cuantitativo, ya que se fundamenta en la recopilación y análisis de datos numéricos para evaluar hipótesis, identificar patrones de comportamiento y contrastar teorías. En cuanto a su nivel o alcance, es correlacional, dado que pretende determinar la relación o el grado de asociación entre dos o más variables (Hernández-Sampieri et al., 2018), con el fin de prever el comportamiento de una variable a partir del conocimiento de otras relacionadas. En conclusión, la investigación sigue un diseño experimental, dado que requiere la manipulación deliberada de una o más variables independientes para evaluar su impacto y obtener resultados en una o varias variables dependientes.

1.8.3. Diseño de la Investigación

Se considera de diseño experimental, puesto que, según Agudelo & Aigner (2008), esta investigación operó directamente las variables para obtener resultados. Esto se representó en la simulación, en la que se buscó encontrar el aerogenerador que cumpliera con las condiciones para satisfacer la demanda

energética del sector. Para una clasificación más precisa de las investigaciones experimentales, esta perteneció, según el mismo autor, a las de diseño preexperimental, ya que buscó proporcionar datos exploratorios basados en el experimento realizado.

1.8.4. Fuentes de Información

En primer lugar, los artículos académicos disponibles en bases de datos como *Google Scholar* y *ScienceDirect* ofrecieron estudios detallados sobre el rendimiento y diseño de aerogeneradores verticales. Libros de texto sobre energía renovable y tecnologías eólicas proporcionaron fundamentos teóricos y prácticos sobre estos sistemas.

Las tesis y disertaciones en repositorios universitarios ofrecieron investigaciones relevantes que abordaron problemáticas similares en zonas rurales. Los informes técnicos de organizaciones como la *International Energy Agency (IEA)* y el *National Renewable Energy Laboratory (NREL)* fueron cruciales para entender las tendencias actuales y los desafíos en la implementación de energías renovables en áreas remotas. Además, la consulta de revistas especializadas como *Renewable Energy* y *Wind Energy* brindó acceso a estudios recientes sobre innovación en aerogeneradores. Por último, las actas de conferencias sobre energías renovables y el análisis de patentes en bases de datos como *Google Patents* proporcionaron información valiosa sobre desarrollos tecnológicos y tendencias en el sector.

1.8.5. Población y Muestra

La población que se tomó en este estudio fue seleccionada tomando en cuenta los parámetros para el funcionamiento del aerogenerador. Por ello, se eligió a las viviendas unifamiliares del AA.HH. Los Manglares de la ciudad de Piura, con el fin de mostrar una opción de energía sustentable a esta comunidad.

La muestra seleccionada en esta investigación, fueron hogares, tomando en cuenta su consumo y locación de las viviendas.

1.8.6. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

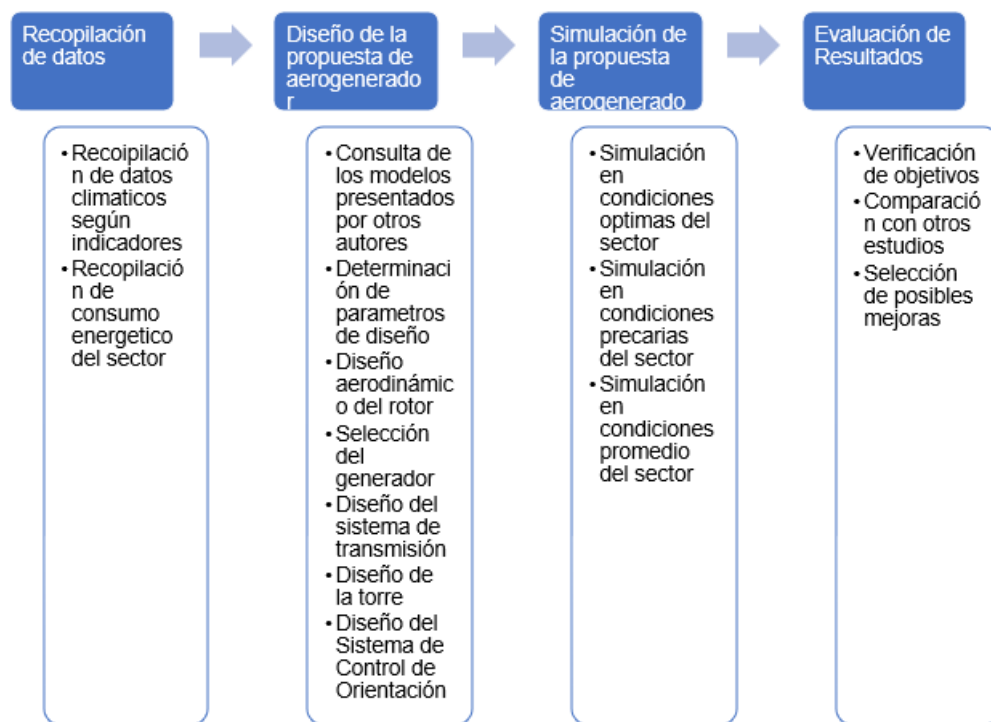
Para llevar a cabo este trabajo de investigación, fue fundamental utilizar una variedad de instrumentos de investigación. En primer lugar, se emplearon modelos computacionales y software de simulación como CFD, SolidWorks para el diseño y análisis aerodinámico del aerogenerador. Estos programas permitieron realizar simulaciones de flujo de aire y evaluar el rendimiento del diseño en diferentes condiciones. También fue crucial llevar a cabo experimentos de campo en zonas rurales para recolectar datos sobre la velocidad del viento y su variabilidad, utilizando anemómetros y sensores de temperatura. Además, se utilizaron cuestionarios y entrevistas para recoger información sobre las necesidades energéticas de la comunidad y su disposición a adoptar tecnologías renovables. Para el análisis de datos, herramientas estadísticas como Matlab o Excel fueron útiles para interpretar los resultados y validar la efectividad del diseño propuesto.

1.8.7. Análisis y Procesamiento de Datos

El tiempo de análisis fue de 3 meses para poder tener la información, solución necesaria y evaluación de resultados.

Figura 1.5

Etapas de la Investigación



Nota. Se muestra los pasos a seguir en el tiempo determinado. Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO II.

Marco Teórico y Marco Conceptual

2.1. Bases Teóricas

2.1.1. Historia del uso de la energía eólica

A lo largo de la historia, la humanidad ha aprovechado la fuerza del viento para diversas actividades, desde la navegación a vela hasta el uso de molinos para procesar granos. Estas estructuras, especialmente difundidas en Europa y Asia, desempeñaron un papel clave desde tiempos medievales hasta la Revolución Industrial, facilitando labores como la molienda, el bombeo de agua y otras funciones esenciales (Gipe & Möllerström, 2022).

Figura 2.1

Molino de Viento



Nota. La figura muestra los molinos utilizados en la antigüedad. Obtenido de Wirestock, s.f., Dreamstime. Tomado de *Molinos de Viento*.

<https://es.dreamstime.com/el-molino-de-viento-sigue-bombeando-agua-en-campo-un-contin%C3%B3-image259405636>

A lo largo del siglo XIX, se llevaron a cabo diversos progresos en el desarrollo tecnológico de los molinos de viento. En 1888, el inventor estadounidense Charles F. Brush construyó el primer aerogenerador de EE para alimentar las luces de su casa en Cleveland, Ohio. Este era un diseño a pequeña escala y solo proporcionaba energía para uso doméstico (Gipe & Möllerström, 2022).

El estudio y la innovación en el ámbito de la energía eólica cobraron mayor impulso durante el siglo XX. En los años 40, el científico alemán Albert Betz desarrolló teorías clave sobre la eficiencia óptima de los rotores eólicos, contribuyendo significativamente al fundamento del diseño contemporáneo de los aerogeneradores (Gipe & Möllerström, 2022). En la década de 1970, se produjo un renacimiento en la energía eólica, impulsado en parte por la crisis del petróleo. Se construyeron varios prototipos de aerogeneradores de gran tamaño en Estados Unidos y Europa (Gipe & Möllerström, 2023). En la década de 1980, se desarrollaron los primeros parques eólicos comerciales a gran escala en California, Dinamarca y otros lugares. Los avances en la tecnología de los aerogeneradores, como las aspas más largas y los sistemas de control más sofisticados, aumentaron significativamente la eficiencia y la confiabilidad de estos dispositivos (Gipe & Möllerström, 2023).

En los últimos años, los aerogeneradores se han vuelto cada vez más comunes en todo el mundo como una forma de generar energía renovable y sostenible. Se han desarrollado diversas tecnologías, como aerogeneradores marinos, turbinas eólicas flotantes y sistemas de almacenamiento de energía para mejorar aún más la eficiencia y la confiabilidad de la energía eólica (Gipe & Möllerström, 2023).

Hoy en día, los aerogeneradores son una parte importante de la infraestructura energética en muchos países, y se espera que desempeñen un

papel aún mayor en la transición hacia fuentes de energía más limpias y renovables en el futuro.

2.1.2. Energía eólica

La energía eólica proviene del movimiento del viento, siendo una fuente renovable. Su generación ocurre en aerogeneradores, donde el rotor convierte la energía cinética en mecánica y el generador la transforma en electricidad. Es una opción sostenible, eficiente y confiable, clave en la transición energética y en la reducción de emisiones de carbono (Iberdrola, s. f.).

2.1.2.1. Variabilidad del recurso eólico

La variabilidad del recurso eólico es un aspecto clave a considerar en la teoría de la energía eólica. Los vientos pueden ser intermitentes y cambiar de dirección, lo que afecta la producción de energía de una turbina eólica en diferentes momentos del día y del año. Por lo tanto, se utilizan técnicas de análisis del recurso eólico para evaluar la viabilidad de un sitio para la instalación de turbinas eólicas y maximizar su rendimiento. Colocar los aerogeneradores lo más apartados el uno del otro es beneficioso pues su eficiencia puede verse disminuida por la interferencia que el movimiento de los álabes causa en la velocidad del viento (Solís et al., 2019)

2.1.3. Aerogenerador

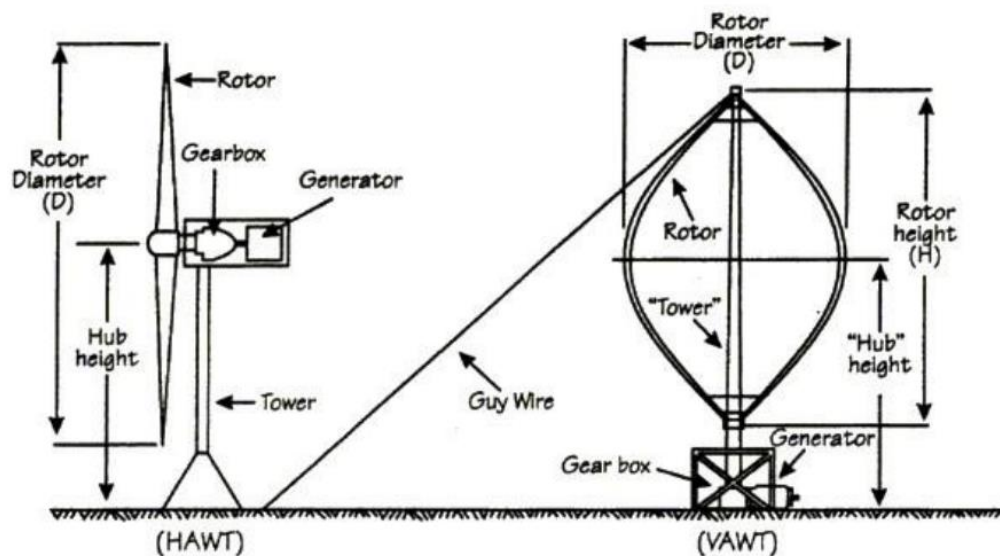
Un aerogenerador se define como un dispositivo que convierte la energía cinética del viento en energía mecánica, la cual puede ser posteriormente convertida en EE o empleada para realizar un trabajo específico (Gipe & Möllerström, 2023).

2.1.3.1. Clasificación de los aerogeneradores

La clasificación de los aerogeneradores puede basarse en su aerodinámica, ya que pueden aprovechar la potencia del aire mediante el arrastre sobre las palas de la turbina o mediante la generación de sustentación aerodinámica que impulsa el rotor. También se pueden clasificar según su diseño constructivo, que es la clasificación más comúnmente utilizada. En este contexto, Según Vidal (2019) existen dos tipos principales de turbinas según el eje de rotación: verticales (VAWT - Vertical Axis Wind Turbine) y horizontales (HAWT – Horizontal Axis Wind Turbine).

Figura 2.2

Ejemplos de aerogeneradores de eje horizontal (HAWT) y vertical (VAWT)



Nota. La imagen muestra 2 tipos de ejes de aerogeneradores. Tomado de *Diseño de un aerogenerador Savonius para uso doméstico*, por Vidal, 2019

Además, en la tabla 2.1., se presenta las ventajas y desventajas del HAWT y del VAWT:

Tabla 2.1*Ventajas y Desventajas de los aerogeneradores HAWT y VAWT*

	HAWT - Eje Horizontal	VAWT - Eje Vertical
VENTAJAS	Alta eficiencia	También funcionan incluso cuando la velocidad del viento es reducida
	Mayores potencias alcanzables	No necesitan gran altura
	Reciben vientos con mayores velocidades debido a su gran altura	Fácil y barata instalación y mantenimiento
	Captan vientos en flujo laminar a elevadas altitudes, lo que optimiza su desempeño	Bajas emisiones de ruido
	Dada la gran proyección de su área pueden recolectar mayor energía	Funcionan independientemente de la orientación del viento
	Gran altura, necesidad de una torre	Menores potencias alcanzables
DESVENTAJAS	Son ruidosos para estar cerca de una vivienda o población	Reciben vientos con menores velocidades
	Requieren mayores sistemas de seguridad, frenado y control	Reciben vientos con regímenes turbulentos debido a los obstáculos que encuentra el viento al recorrer por bajas alturas
	Necesitan orientarse hacia la dirección del viento	Menor eficiencia
	Instalación más costosa	Hay zonas aerodinámicamente muertas

Nota. Adaptado de *Diseño de un aerogenerador Savonius para uso doméstico*, por Vidal, 2019.

2.1.3.2. Eficiencia de un aerogenerador

La eficiencia de una turbina eólica depende de varios factores, incluyendo el diseño de las palas, la altura de la torre, la velocidad del viento y la densidad del aire. Las palas están diseñadas para capturar la mayor cantidad de energía posible del viento, mientras minimizan la

resistencia aerodinámica y las pérdidas por fricción. La altura de la torre es importante porque los vientos suelen ser más constantes y rápidos a mayores altitudes (Tanasheva et al., 2024).

2.1.3.3. Aerogenerador de eje vertical

Se denominan de esta manera porque su eje de rotación está dispuesto de forma vertical respecto al suelo, es decir, en posición perpendicular al flujo del viento. En la literatura, suelen ser referidos como VAWT (*Vertical Axis Wind Turbine*). Uno de los beneficios más destacados de estas turbinas es su capacidad para aprovechar el viento sin importar su dirección, eliminando la necesidad de mecanismos adicionales para su orientación, como sucede con las turbinas de eje horizontal. Asimismo, otro aspecto ventajoso es que tanto el generador como la caja de cambios pueden instalarse a nivel del suelo, lo que facilita su construcción y reduce los costos de mantenimiento (Vidal, 2019). Sin embargo, esta ubicación más baja también significa que estas turbinas reciben menos viento y están expuestas a flujos turbulentos, lo que puede afectar su rendimiento y provocar vibraciones que afecten la vida útil de los rodamientos del eje.

Una desventaja significativa de las turbinas de eje vertical es que no pueden iniciar la rotación por sí mismas, a diferencia de las turbinas de eje horizontal que pueden aprovechar la gravedad para comenzar a girar. Por lo tanto, se requiere un sistema externo para proporcionar el impulso inicial a la turbina. Además, durante la operación, estas turbinas pueden experimentar zonas de flujo aerodinámicamente muertas que generan fuerzas contrarias al sentido de rotación del eje. Es importante destacar que estas turbinas no cuentan con mecanismos de control en las palas para regular la potencia de salida (Vidal, 2019).

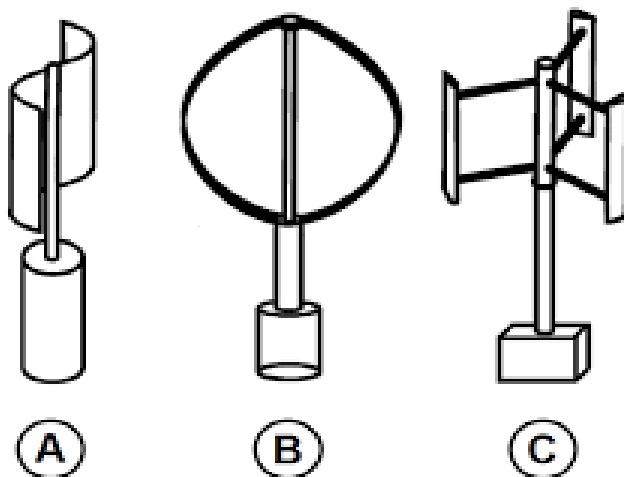
Desde el punto de vista ambiental, las turbinas de eje vertical generan un impacto inferior en comparación con las de eje horizontal. Esto se refleja en estudios de nivel sonoro, donde las turbinas de eje horizontal alcanzaron hasta 95 *dB*, mientras que las de eje vertical registraron únicamente 38 *dB*. Esta última cifra se asemeja al murmullo de una conversación en voz baja. Además, debido a sus velocidades de giro más reducidas y su proximidad al suelo, las turbinas de eje vertical presentan un riesgo menor para las aves (Khalid et al., 2022).

- **Tipos de aerogenerador Vertical**

Dentro de la categoría de turbinas de eje vertical, hay una variedad de diseños con palas dispuestas en diversas formas. Sin embargo, dos modelos destacan en este ámbito y la mayoría de los diseños son variaciones de estos dos modelos que se propusieron en la década de 1920. Estos modelos son los de tipo Savonius y Darrieus.

Figura 2.3

Tipos de aerogenerador vertical



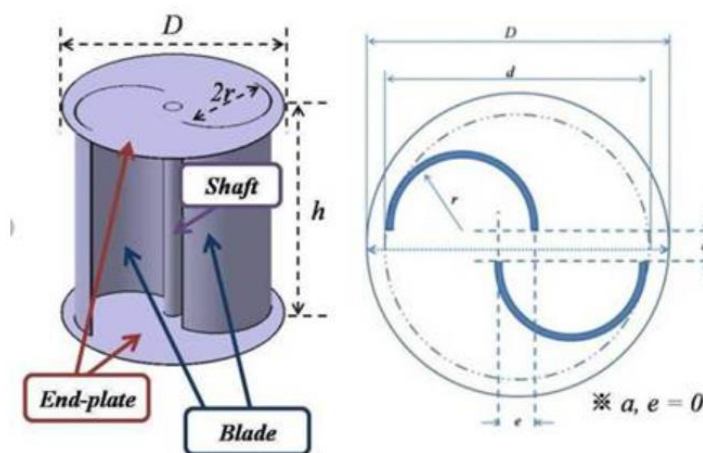
Nota. La imagen muestra los tipos de aerogenerador vertical más utilizados. (A) Savonius (B) Darrieus (C) Darrieus H. Fuente: Tomado de *Diseño de un aerogenerador Savonius para uso doméstico*, por Vidal, 2019

La turbina Savonius, ideada por el ingeniero Sigurd Savonius en 1922, se basa en la utilización de dos o más palas en forma de medio cilindro o cubo que giran en torno a un eje vertical. Savonius presentó su diseño como una solución simple y económica para aprovechar la energía del viento, especialmente en aplicaciones donde se requería un dispositivo de bajo costo y fácil mantenimiento (Letcher, 2022).

El diseño de la turbina Savonius se caracteriza por su simplicidad. Consta de dos o más palas que están dispuestas en forma de S, divididas en dos secciones opuestas. Cuando el viento impacta sobre estas palas, se crea una presión diferencial que genera un momento de torsión, haciendo girar el rotor. El diseño permite que la turbina funcione independientemente de la dirección del viento, lo que simplifica el sistema (Tiwari & Ghosal, 2005).

Figura 2.4

Turbina de Viento de Tipo Savonius tradicional



Nota. El gráfico representa las partes y el diseño modelo de la turbina Savonius. Tomado de *Numerical Analysis on the Low Noise Designs of Savonius Wind Turbines by Inducing Phase Difference in Vortex Shedding*, por Kim & Cheong, 2014

Si bien el aerogenerador Savonius no alcanza la misma eficiencia que otros modelos, como las turbinas Darrieus o las de eje horizontal, ha sido ampliamente empleado en aplicaciones específicas. Su estructura resistente y su capacidad para funcionar en entornos con vientos turbulentos lo hacen ideal para áreas urbanas y proyectos de pequeña escala. A lo largo del tiempo, se ha adaptado para diversos usos, desde la generación de energía en zonas rurales hasta la ventilación de edificaciones (Burton y Jenkins, 2011)

En los últimos años, el interés por este tipo de turbina ha resurgido debido a su diseño simple y su bajo costo de fabricación. Los investigadores han trabajado para mejorar su eficiencia y rendimiento, utilizando materiales modernos y técnicas de diseño avanzadas. Se han desarrollado variantes del diseño original para aumentar la eficiencia, como la turbina Savonius segmentada y las combinaciones de turbinas Savonius con otros tipos de aerogeneradores (Hau, 2013).

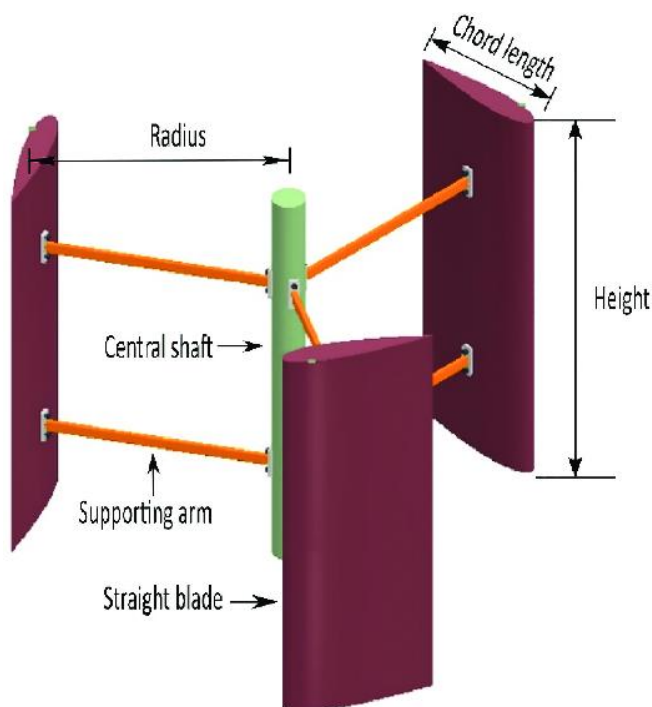
Por otro lado, el aerogenerador Darrieus fue desarrollado por el ingeniero francés Georges Darrieus. En su patente, denominada *Rotor pour appareils de transformation d'énergie cinétique*, se detalla una turbina eólica equipada con palas curvas que giran en torno a un eje vertical. El diseño de Darrieus se basa en el principio aerodinámico de elevación, similar al de un ala de avión, lo que permite una mayor eficiencia en la conversión de la energía eólica en energía mecánica (Darrieus, 1926).

El aerogenerador Darrieus se caracteriza por sus palas en forma de arco, dispuestas en una configuración vertical. El viento fluye sobre estas palas generando una diferencia de presión entre el lado

cóncavo y el lado convexo de cada pala. Esta diferencia de presión crea una fuerza de elevación que hace girar el rotor. La principal ventaja de este diseño es que el rotor puede capturar el viento desde cualquier dirección, eliminando la necesidad de mecanismos complejos para orientar la turbina hacia el viento (Hau & Renouard. H, 2013).

Figura 2.5

Componentes del rotor H-Darrieus



Nota. En la figura se observan los componentes completos que incluyen el rotor H-Darrieus. Tomado de *Numerical comparison and efficiency analysis of three vertical axis turbine of H – Darrieus type*, por Guevara et al., 2023

A pesar de su innovador diseño, el aerogenerador Darrieus enfrentó varios desafíos en sus primeras aplicaciones, como problemas de durabilidad y eficiencia en condiciones de viento turbulento. Sin embargo, en las décadas siguientes, el diseño fue objeto de múltiples investigaciones y mejoras. En la década de 1970, se realizaron importantes desarrollos en la tecnología y se llevaron a cabo pruebas

experimentales a gran escala, especialmente en Estados Unidos y Europa (Tiwari & Ghosal, 2005).

En tiempos recientes, el diseño Darrieus ha captado nuevamente la atención debido a su viabilidad en entornos urbanos y su aptitud para funcionar eficazmente incluso en escenarios donde el viento presenta turbulencias. Los investigadores han trabajado en mejorar la eficiencia y la durabilidad del diseño, explorando nuevas formas de optimizar el rendimiento del rotor (nr). Los avances en materiales y tecnología de control también han permitido que las turbinas Darrieus sean más competitivas frente a otras tecnologías de aerogeneradores.

2.1.3.4. *Aerogenerador de eje horizontal*

Las turbinas con eje horizontal, comúnmente denominadas HAWT (Horizontal Axis Wind Turbine) en la literatura, se caracterizan por tener su eje de giro orientado de manera paralela tanto al terreno como a la dirección del viento. Son ampliamente reconocidas y empleadas comercialmente en el ámbito de la energía eólica, siendo las preferidas en esta industria. Estas turbinas pueden clasificarse según distintos criterios, uno de los cuales es su orientación respecto a la dirección del viento. En este caso, se diferencian en dos tipos: aquellas que operan en dirección del viento (downwind) y las que lo enfrentan (upwind) (Hau, 2013).

Otra clasificación común se basa en el número de aspas, que puede variar desde una sola hasta varias. Las turbinas de una sola aspa son más económicas porque requieren menos material y experimentan menos pérdidas por arrastre. Sin embargo, tienden a tener desequilibrios aerodinámicos y a menudo no son consideradas

estéticamente atractivas. De manera similar, las turbinas de dos aspas presentan desafíos similares. Por estas razones, las turbinas de tres aspas son ampliamente preferidas en la generación de electricidad comercial debido a su mayor estabilidad aerodinámica (Hau, 2013).

Figura 2.6

Aerogenerador de eje horizontal



Nota. La imagen muestra un parque de aerogeneradores de eje horizontal de grandes dimensiones para la generación masiva de EE. Tomado de *La clave de la energía eólica*, por Repsol, 2023

2.1.3.5. Componentes de un aerogenerador

Como se ha mencionado los aerogeneradores son capaces de transformar la energía cinética del viento en energía mecánica para que haga girar un rotor y este a través de un sistema de transmisión que incluya un multiplicador pueda aumentar sus revoluciones y mediante el uso del movimiento rotatorio del generador se pueda generar EE.

- **Palas**

García (2010) menciona que las palas de los aerogeneradores están elaboradas con materiales de alta resistencia estructural y durabilidad frente a la fatiga, lo que garantiza su óptimo desempeño durante su vida útil promedio de 25 años. Esto es fundamental, ya que deben soportar condiciones climáticas adversas, fuertes ráfagas de viento e, incluso, en el caso de aerogeneradores offshore, la exposición a la salinidad. Asimismo, su fabricación debe permitir un mecanizado eficiente para lograr un diseño aerodinámico que reduzca las cargas sobre la estructura y optimice la captación de energía eólica. Para ello, se emplean materiales compuestos como fibra de vidrio combinada con resinas epoxi o poliéster, así como fibra de carbono, entre otros.

- **Tren de potencia**

García (2010) señala que este componente es responsable de transferir la energía generada por la rotación del rotor hacia el motor, permitiendo su aprovechamiento para la producción de electricidad. Su estructura está conformada por el eje principal, la caja multiplicadora y el eje secundario. El eje principal, una pieza tubular de acero macizo con un diámetro considerable, está conectado de manera solidaria al rotor y opera a velocidades que oscilan entre 22 y 64 *rpm*, dependiendo del modelo del aerogenerador y las condiciones de funcionamiento. No obstante, los motores eléctricos estándar requieren una velocidad de giro cercana a 1500 *rpm*, lo que hace necesario el uso de un sistema multiplicador para incrementar la velocidad transmitida. El multiplicador es un sistema de engranajes que aumenta la velocidad de giro del eje principal,

adaptándola al funcionamiento del motor, aunque con una reducción en la potencia. El movimiento generado por el multiplicador se transfiere al motor a través del eje secundario, el cual posee un diámetro menor en comparación con el eje principal. Este proceso de transmisión es análogo al que ocurre entre el rotor y la caja de engranajes mediante el eje principal.

- **Generador**

García (2010) señala que el generador convierte la energía mecánica del rotor en energía eléctrica. Usualmente, se utilizan generadores asíncronos de jaula de ardilla junto con baterías de condensadores para mejorar el factor de potencia. La conexión a la red puede ser directa o indirecta, según si la turbina funciona a velocidad constante o variable. La conexión indirecta permite aprovechar los picos de viento, pero genera energía con frecuencia variable, requiriendo equipos de adaptación para su integración. Por otro lado, en la conexión directa, la red eléctrica regula la velocidad de giro del generador, lo que impide beneficiarse de los picos de mayor intensidad del viento.

- **Sistema de Control**

- En un aerogenerador, los sistemas de control desempeñan un papel fundamental con dos propósitos esenciales. Por un lado, optimizan la captación de energía eólica ajustando la posición del rotor. Por otro, salvaguardan la estructura ante ráfagas de viento que podrían comprometer su integridad (García, 2010).

A su vez, García (2010) indica que la orientación del aerogenerador depende de equipos anemométricos y sensores de dirección del viento ubicados en la góndola. Los datos recopilados son

procesados por un ordenador de control, que, mediante un algoritmo, ajusta la posición de la góndola utilizando un sistema de corona dentada y motor de giro en su base. Es importante destacar que la orientación del rotor no se ajusta en tiempo real, sino que el algoritmo de control, basado en los datos recopilados, debe confirmar que el cambio en la dirección del viento es estable antes de girar la góndola. De lo contrario, se generaría un movimiento errático que afectaría negativamente la eficiencia del sistema.

- **Subsistema de captación**

Este subsistema consta del eje, los álabes y las tapas, cuya función principal es captar la energía del viento y transformarla en energía mecánica. (Bianchi et al., 2007). Este subsistema es fundamental, ya que su función es transformar la energía del viento en movimiento y producir el torque necesario para impulsar el eje.

- **Subsistema de transmisión**

El subsistema de transmisión en un aerogenerador eólico es el encargado de transferir la energía mecánica captada por las palas, a través del rotor, hacia el generador eléctrico a una velocidad óptima. Este sistema está compuesto por elementos como engranajes, ejes, cojinetes y mecanismos de control, los cuales operan en conjunto para asegurar una conversión eficiente y confiable de la energía cinética del viento en electricidad utilizable (Bianchi et al., 2007).

- **Subsistema de generación eléctrica**

El subsistema de generación eléctrica en un aerogenerador eólico se refiere a la parte del sistema que transforma la energía mecánica del viento en EE utilizable. Este subsistema consta principalmente

del generador eléctrico, que puede ser de tipo síncrono o asíncrono, y de los componentes asociados como el sistema de control de la velocidad y la dirección del rotor, así como los dispositivos de regulación de potencia. Además, depende de las revoluciones que necesita y del tipo de corriente que se desea manejar. Su función es convertir el movimiento rotativo del rotor impulsado por el viento en corriente eléctrica que pueda ser integrada a la red eléctrica o utilizada localmente (Bianchi et al., 2007).

- **Batería**

La función esencial de una batería es almacenar energía en forma química y transformarla en electricidad cuando se requiera. Este proceso se lleva a cabo mediante reacciones electroquímicas reversibles que tienen lugar en su interior durante las fases de carga y descarga (Bianchi et al., 2007). En esencia, una batería actúa como un depósito de energía que puede liberar esa energía en forma de electricidad cuando se conecta a un dispositivo o sistema que la requiere.

- **Inversor:**

El inversor en un aerogenerador eólico es un elemento clave dentro del sistema de generación de energía, ya que su función principal es transformar la corriente continua (DC) producida por el aerogenerador en corriente alterna (AC), permitiendo su integración a la red eléctrica o su uso directo en diversos dispositivos y equipos eléctricos. A su vez, el inversor también puede desempeñar funciones adicionales, como controlar la potencia generada por el aerogenerador y sincronizarla con la red eléctrica, así como proporcionar protección contra sobrecargas y otras condiciones anormales de funcionamiento (Bianchi et al., 2007). En resumen, el

inversor es un componente clave que facilita la integración de la energía generada por el aerogenerador en el sistema eléctrico general.

- **Controlador:**

El controlador de carga tiene la función de gestionar el suministro de energía del generador hacia el banco de baterías de forma regulada. Su diseño permite limitar la corriente máxima que ingresa a la batería, reducir la corriente de carga cuando el estado de carga es alto y mantener una carga de goteo durante todo el ciclo de carga (Bianchi et al., 2007).

- **Multiplicador:**

El sistema mecánico que aumenta la velocidad de rotación utiliza un conjunto de engranajes para transmitir al eje de salida una velocidad superior a la del eje de entrada o motor, permitiendo así que la turbina pase de una velocidad de 20 – 30 *rpm* a una velocidad de generación de 1000 – 1500 *rpm* (Bianchi et al., 2007).

Por otro lado, en el Perú, la generación de energía eólica se basa principalmente en el uso de aerogeneradores de eje horizontal para la producción de electricidad (ODS, 2016).

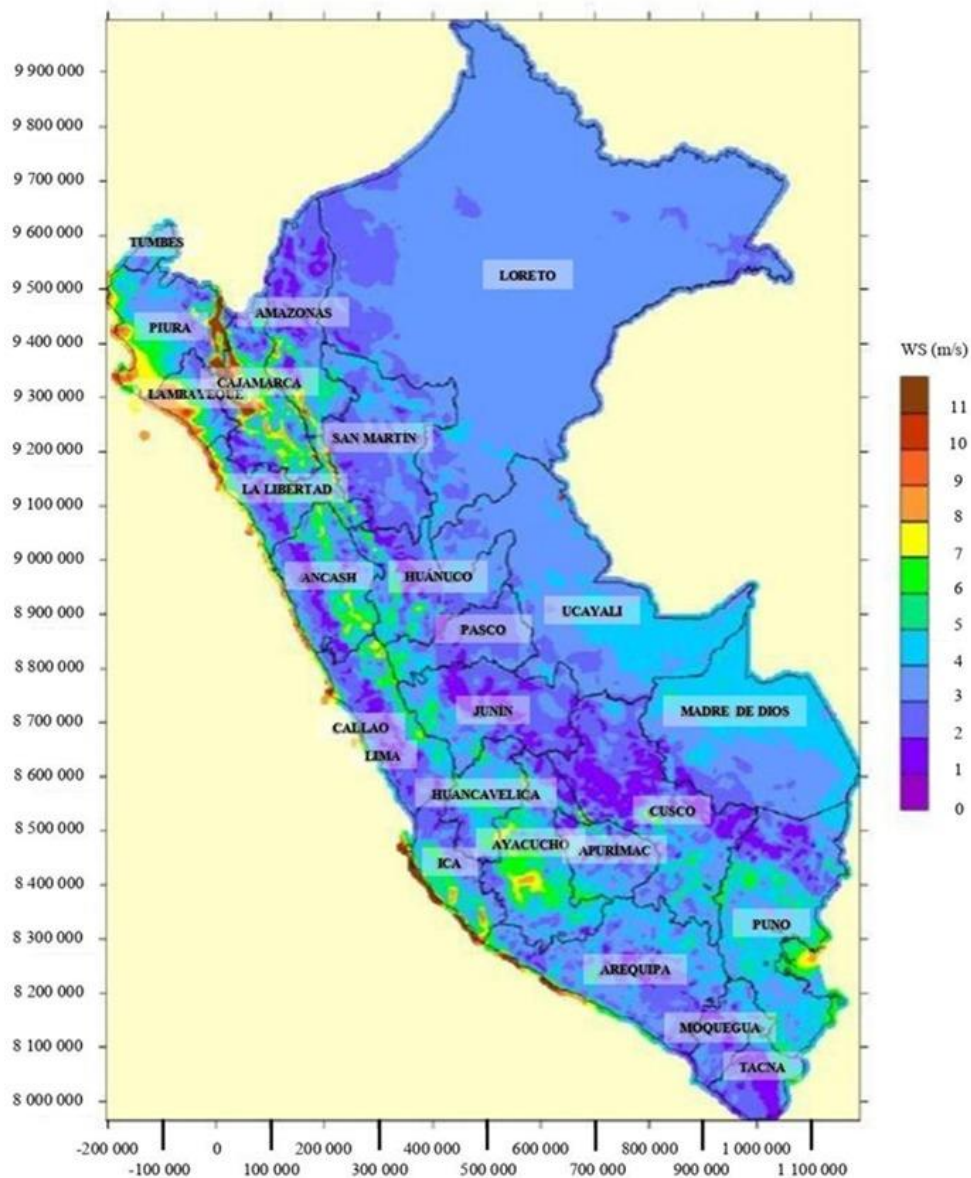
Los aerogeneradores de eje vertical no se impulsan para su producción a gran escala debido a la limitada eficiencia de sus rotores. No obstante, su diseño estructural los hace adecuados para ser utilizados en la generación de energía en entornos domésticos.

Por ello, se plantea suministrar electricidad a estas localidades aprovechando las condiciones ambientales de la zona, en este caso, la energía eólica como fuente principal.

Por ello, se escogió Piura como el lugar a aplicar este proyecto de investigación, ya que según el siguiente mapa eólico se puede observar que la velocidad media (V_m) anual del viento varía de 7-9 m/s.

Figura 2.7

Mapa de V_m anual del viento a 100 m

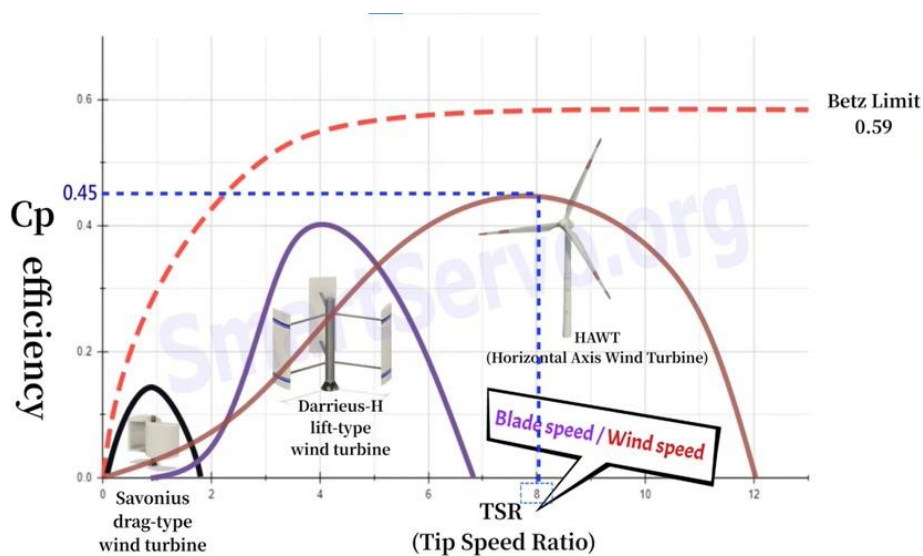


Nota. La figura muestra la V_m anual por departamento, con sus colores característicos para indicar una cierta cantidad de dicha V_m . Obtenido Del Ministerio de Energía y Minas (2016).

Es por esta razón, que se ideó en la construcción de un aerogenerador mixto tipo Darrieus H - Savonius con la finalidad de que influya en la eficiencia de la EE suministrada a un domicilio ya sea a bajas o a altas velocidades. El rotor de eje vertical Savonius fue diseñado para producir energía incluso a velocidades reducidas, desde 1 m/s , y generar un torque elevado para facilitar su arranque inicial. No obstante, sus álabes no garantizan la sustentación del movimiento a velocidades tan bajas. Como resultado, se desarrolló el RD H - Savonius, que mejora el torque gracias a un mayor número de puntos de contacto entre el viento y el rotor.

Figura 2.8

Gráfico Eficiencia (C_p) vs. Relación de Velocidad de Punta (TSR)



Nota. Gráfico que indica C_p (eficiencia) vs. Relación de Velocidad de Punta (TSR). Tomado de Comparación de la eficiencia de varios aerogeneradores, Darrieus, Savonius y HAWT, por Canal Smart Servo, 2022, Youtube

Como se puede observar en la Figura 2.1.8, el RS tiene una eficiencia alta a relación de velocidades bajas, lo que indica que tiene par alto a baja velocidad, por lo tanto, puede arrancar por sí solo. En cambio, la eficiencia máxima de una turbina eólica tipo Darrieus es de aproximadamente 0.4 y se produce con una Relación de Velocidad de Punta (TSR) de aproximadamente 4. Su eficiencia es mucho mayor que la de las turbinas eólicas de tipo arrastre, pero cuando la relación

de velocidad de punta (TSR) es de 0-2 su eficiencia es casi cero, por lo que no hay torque en ese rango lo que dificulta que arranque por si sola. Es por este motivo que se ideó en la construcción de un modelo híbrido Darrieus H - Savonius con la finalidad de que con el Savonius pueda arrancar solo y con el Darrieus H pueda mantener a altas velocidades una eficiencia mucho mayor.

2.1.4. Potencia y energía cinética del viento, ley de Betz

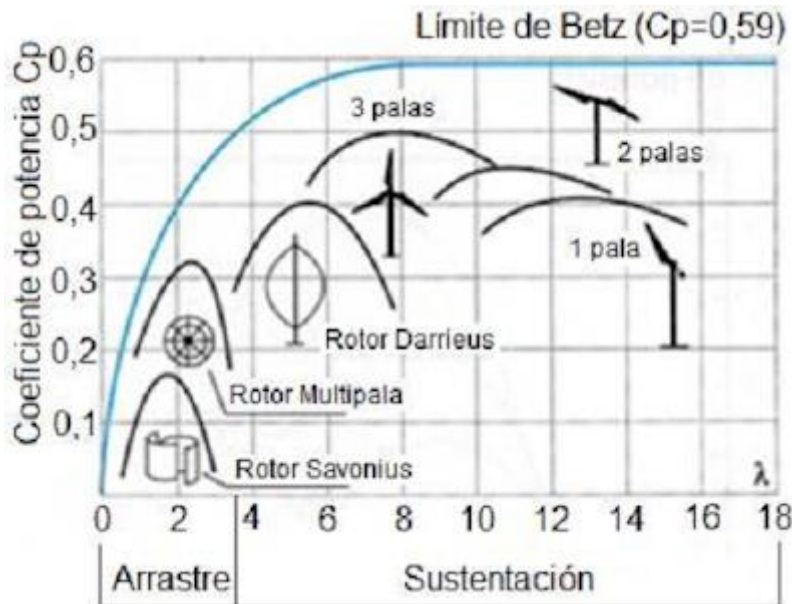
El principio formulado por el físico alemán Albert Betz en 1919 establece un límite teórico en la eficiencia de los aerogeneradores al transformar la energía cinética del viento en energía mecánica útil. Según esta ley, ningún sistema de conversión, como un aerogenerador, es capaz de aprovechar más del 59.3% de la energía cinética del viento que atraviesa el área cubierta por sus palas.

La fundamentación de este principio se basa en la conservación de la energía. Cuando el viento impacta las palas del aerogenerador, su velocidad disminuye y parte de su energía cinética se transforma en energía mecánica que impulsa el rotor. De acuerdo con la Ley de Betz, solo una porción de esta energía puede ser aprovechada por el aerogenerador, ya que, si se intentara capturar más del 59.3%, el flujo de aire posterior al dispositivo se detendría, reduciendo significativamente su eficiencia.

La Ley de Betz proporciona un límite práctico para el diseño y la operación de aerogeneradores, ayudando a los ingenieros a comprender y optimizar la eficiencia de estos dispositivos para maximizar la captura de energía eólica de manera realista.

Figura 2.9

Ley de Betz

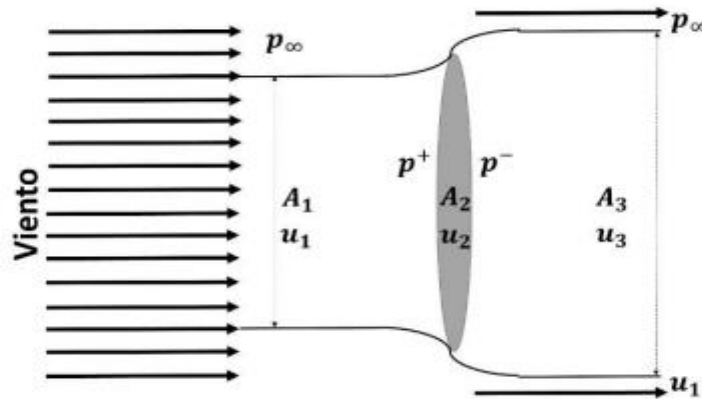


Nota. La imagen muestra las curvas de cada tipo de aerogenerador siguiendo el límite de Betz. Tomado de *Diseño de un aerogenerador Savonius para uso doméstico*, por Vidal, 2019

El límite de Lanchester-Betz establece la cantidad máxima de energía que una turbina eólica puede extraer de una corriente de viento. Su formulación se basa en la primera ley de la termodinámica y en los principios de conservación de la masa y el momento (Manwell et al., 2006). Según la Figura 2.10, cuando el viento atraviesa un disco actuador, presenta una velocidad inicial u_1 , una velocidad de salida u_2 y un área transversal A_1 . A medida que el disco captura parte de la energía cinética del viento, este se desacelera hasta alcanzar la velocidad u_2 . Dado que el flujo es incompresible, su área transversal se expande a A_2 para adaptarse a la menor velocidad. Además, la caída de presión estática a través del disco actuador provoca una expansión continua del flujo hasta equilibrarse con la presión atmosférica. A mayor distancia del disco actuador, el área transversal aumenta a A_3 y la velocidad del viento alcanza u_3 .

Figura 2.10

Diagrama representando el flujo de aire a través del disco actuador



Nota. La ilustración representa el comportamiento del flujo de viento al atravesar un disco actuador, utilizado para analizar la conversión de energía cinética en energía mecánica. Esta representación gráfica permite comprender cómo el viento interactúa con el disco, disminuyendo su velocidad a medida que transfiere parte de su energía. Tomado de *Diseño de un microaerogenerador de eje vertical*, por Ramos, 2018

2.1.4.1. Demostración del Límite de Betz:

La demostración se realizó en base a lo propuesto por (Pizaña & Hernández, s. f.)

La energía cinética de cualquier masa, siendo ésta sólida, líquida o gaseosa, es:

$$E_c = \frac{m * v^2}{2}$$

m: masa

v: velocidad

En este caso la masa es aire (fluido), por lo que el flujo de dicha masa se puede expresar de la siguiente manera:

$$\dot{m} = \rho * A * v$$

ρ : densidad del fluido

A: área a través del cual fluye la masa

v : velocidad

Dado que la potencia corresponde a la derivada temporal de la energía, y considerando que la velocidad del viento “ v ” se mantiene constante, la cantidad de potencia que el viento podría proporcionar se expresa como:

$$P_{viento} = \dot{E}_c = \frac{\dot{m} * v^2}{2} = \frac{\rho * A * v^3}{2}$$

$$P_{viento} = \frac{\rho * A * v^3}{2}$$

A partir de esta ecuación se infiere que un aumento en la velocidad del viento conlleva una mayor generación de potencia. Por esta razón, resulta fundamental seleccionar cuidadosamente los emplazamientos para las instalaciones de energía eólica, priorizando aquellos donde la velocidad del viento sea óptima para maximizar la eficiencia del sistema.

No obstante, el rotor del aerogenerador no logra captar la totalidad de la energía cinética contenida en el viento. Por esta razón, se establece una proporción ideal entre la velocidad del viento antes y después de atravesar el aerogenerador, con el objetivo de optimizar la cantidad de potencia capturada en el proceso:

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{3}$$

v_1 : velocidad de entrada

v_2 : velocidad de salida

Por lo que, reemplazando fórmulas, la máxima potencia extraíble del viento es:

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{16}{27} * \frac{\rho * A * v^3}{2} \approx 0.593 * \frac{\rho * A * v^3}{2} = 0.593 * P_{viento}$$

$$P_{m\acute{a}x} = 0.593 * P_{viento}$$

Es habitual, al evaluar la eficiencia de un aerogenerador, calcular la relación entre la máxima potencia efectiva y la energía contenida en el viento. Este indicador es conocido como *Coficiente de Potencia*:

$$C_p = \frac{P_{m\acute{a}x}}{P_{viento}}$$

De acuerdo con el principio establecido por el límite de *Betz*, el *Coficiente de Potencia* tiene un valor máximo teórico de 0.593, lo que significa que ningún aerogenerador puede convertir en energía útil más del 59.3% de la energía contenida en el viento

Además de esta variable fundamental, existe otra conocida como TSR ("Tip Speed Ratio" o Velocidad Específica del Viento, λ), la cual se define como la relación entre la velocidad lineal en los extremos de las palas y la velocidad del viento (Calle, 2018):

$$\lambda = \frac{v_{pala}}{v_{viento}} = \frac{w_{rotor} * r_{rotor}}{v_{viento}} = \frac{\frac{2 * \pi}{60} * n_{rpm,motor} * r_{rotor}}{v_{viento}}$$

2.1.5. Escala de Beaufort

La escala de Beaufort clasifica la intensidad del viento tomando en cuenta su fuerza, el estado del mar, así como la altura y forma de las olas.

La siguiente tabla presenta la categorización de la intensidad del viento en función de su velocidad y su medición en nudos. Esta escala es ampliamente empleada por los diseñadores de aerogeneradores para calcular las fuerzas de rotación que afectan su funcionamiento. La clasificación de Beaufort se compone de 12 niveles:

Figura 2.11
Escala de Beaufort

FUERZA	VELOCIDAD DEL VIENTO	DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	CONDICIÓN DE MAR	VELA DE CRUCERO
0	0 nudos	Calma	○	Mar en calma, llana como un espejo.	Barco a la deriva. Navegación a motor.
1	1 a 3 nudos	Ventolina	↗	Se riza la mar con pequeñas ondulaciones.	Barco a la deriva. Navegación a motor.
2	4 a 5 nudos	Flojito	↗	Olas pequeñas y cortas sin romper.	Mayor entera desplegada y génova 1.
3	7 a 10 nudos	Flojo	↗	Se forman pequeños borregos dispersos.	Mayor entera desplegada y génova 1.
4	11 a 16 nudos	Bonancible	↗	Olas pequeñas con borregos frecuentes.	Reducimos el tamaño del génova.
5	17 a 21 nudos	Fresquito	↗	Olas algo más largas con abundancia de borreguitos.	Primer rizo de la vela mayor.
6	22 a 27 nudos	Fresco	↗	Formación de olas más grandes y rompientes con crestas de espuma blanca.	Segundo rizo de la mayor y reducimos tamaño de la vela de proa.
7	28 a 33 nudos	Frescachón	↗	Mar gruesa con formación de espuma en la misma dirección del viento.	Mayor rizada al máximo. Foque pequeño.
8	34 a 40 nudos	Temporal	↗	Olas grandes, mar arbolada. De la parte superior de las crestas se desprenden rociadores de salpicaduras.	Mayor rizada al máximo. Tormentin de proa.
9	41 a 47 nudos	Temporal fuerte	↗	Olas muy grandes, poca visibilidad por las nubes de espuma arrastradas por el viento.	Mayor de capa. Tormentin de proa.
10	48 a 55 nudos	Temporal duro	↗	Olas muy altas con grandes crestas. Superficie del mar totalmente blanca por la espuma. Muy mala visibilidad.	Condición de supervivencia.
11	56 a 63 nudos	Temporal muy duro	↗	Olas enormes con rompientes, la mar totalmente blanca por las nubes de espuma blanca.	Tácticas de supervivencia.
12	Más de 64 nudos	Temporal huracanado	↗	Olas excepcionalmente enormes con rompientes. La mar está completamente blanca por la espuma. No hay visibilidad.	Tácticas de supervivencia.

Nota. El cuadro indica la descripción o tipo de viento respecto a la velocidad a la que se encuentra. Tomado de *Escala Beaufort. La Intensidad del Viento*, por Viento en Popa 365, 2020.

2.1.6. Longitud de rugosidad

En el contexto de los aerogeneradores, la teoría de longitud de rugosidad se refiere a cómo la rugosidad del terreno afecta el flujo de viento sobre las palas del aerogenerador y, por lo tanto, su rendimiento.

La rugosidad del terreno se refiere a la variabilidad y textura de la superficie del suelo en el área circundante al aerogenerador. Esta rugosidad puede variar desde terrenos muy lisos, como en el caso de áreas marinas, hasta terrenos muy rugosos, como zonas montañosas o boscosas.

La teoría de longitud de rugosidad en aerogeneradores establece que la velocidad y la dirección del viento experimentarán cambios significativos a medida que atraviesen diferentes tipos de terreno. Esto se debe a que la rugosidad del

terreno interfiere con el flujo de viento, creando áreas de alta y baja velocidad, así como cambios en la dirección del viento.

Para maximizar la eficiencia de un aerogenerador, es crucial tener en cuenta la rugosidad del terreno al seleccionar la ubicación del parque eólico y al diseñar las turbinas. Se realizan estudios detallados del terreno para evaluar su rugosidad y se utilizan modelos de simulación para predecir cómo el flujo de viento será afectado. Además, se pueden implementar estrategias de diseño de las palas del aerogenerador para optimizar su rendimiento en diferentes condiciones de rugosidad del terreno.

En resumen, la teoría de longitud de rugosidad en aerogeneradores es fundamental para comprender cómo la rugosidad del terreno afecta el flujo de viento y, por lo tanto, el rendimiento de los aerogeneradores en un parque eólico.

Como sabemos, la velocidad varía con la altura y el tipo de terreno.

Por esta razón, establecer el valor de la longitud de rugosidad resulta fundamental para estimar la velocidad del viento a una altura distinta de la utilizada para la instalación del equipo de medición. La ecuación para determinar dicha velocidad es la siguiente: (Ministerio de Energía y Minas del Perú, 2016).

$$V = \frac{V_o}{k} * \left(\ln \left(\frac{z}{z_o} \right) - \psi \left(\frac{z}{L} \right) \right)$$

Donde:

- V_o : velocidad de fricción
- k : constante
- z_o : longitud de rugosidad superficial
- Ψ : función correctora por estabilidad
- L : longitud de Monin – Obukhov
- Z : longitud de referencia

Tabla 2.3

Clases y Longitudes de rugosidad

Clase	Longitud de Rugosidad [m]	Índice de Energía (%)	Tipo de Terreno
0	0.0002	100	Superficie de agua. Terreno abierto. Superficie lisa.
0.5	0.0024	73	Pistas de hormigón (aeropuertos), césped.
1	0.0300	52	Campos abiertos sin cercado. Edificios dispersos. Colinas suavemente redondeadas.
1.5	0.0550	45	Campos con algunas casas y arbolado de hasta 8 m situado como mínimo a 1250 m.
2	0.1	39	Campos con algunas casas y arbolado de hasta 8 m situado como mínimo 500 m.
2.5	0.2	31	Campos con algunas casas y arbolado de hasta 8 m situado como mínimo 250 m.
3	0.4	24	Pueblos, bosques y terreno accidentado y desigual.
3.5	0.8	18	Ciudades con edificios altos.
4	1.6	13	Grandes ciudades con edificios muy altos.

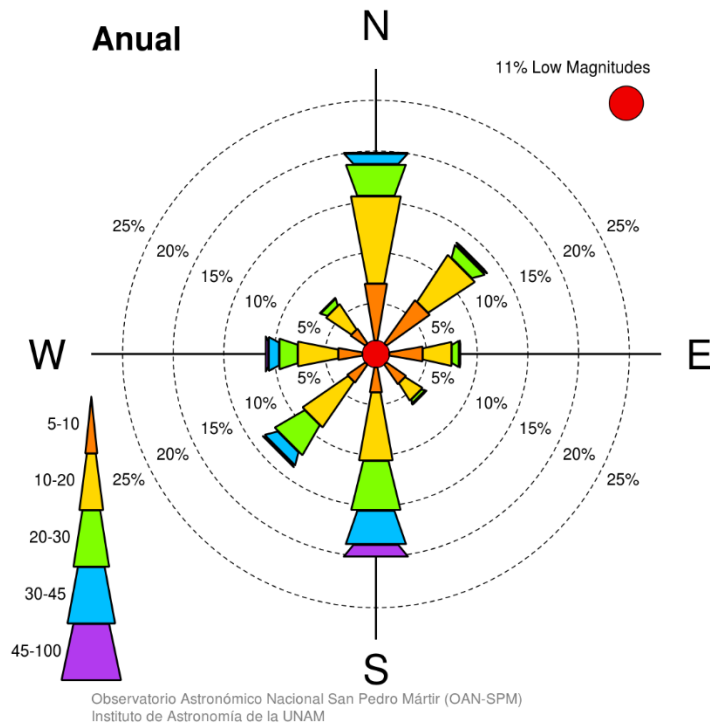
Nota. Esta tabla indica las clases y longitudes de rugosidad acorde al tipo de terreno en el que se encuentra. Adaptado de *Atlas Eólico*, por MINEM, 2016

2.1.7. Rosa de viento

El diagrama de rosa de vientos es una representación gráfica en forma radial que muestra la distribución de las direcciones del viento en una zona específica de estudio. Su utilidad radica en la posibilidad de identificar tanto la dirección predominante como su variación a distintas alturas, lo que se conoce como intervalo direccional. Además, existen dos variantes adicionales: la rosa de frecuencias, que refleja la distribución de la frecuencia de las direcciones del viento, y la rosa de energía, que combina la información de la rosa de vientos y la de frecuencias. Estas representaciones son clave para determinar la ubicación óptima de los aerogeneradores, asegurando que se orienten de manera perpendicular a la dirección del viento (Caballero & Gallardo, 2022).

Figura 2.12

Rosa de Vientos en un proyecto eólico



Nota. La imagen proporciona información sobre la dirección y la velocidad del viento en un área específica. Tomado de *Aerogenerador híbrido de eje vertical para el suministro de EE en el laboratorio general de biotecnología de la UNPRG -Caballero Gamarra, por Caballero & Gamarra, 2022*

2.2. Marco conceptual

a) Flujo: Se define como cualquier fenómeno que aparenta propagarse o desplazarse a través de una superficie o material.

b) Se mide en vatios (W) y representa la cantidad de energía eléctrica que un elemento genera o consume en un instante determinado dentro del S.I.

c) Cuerda: “Llamamos cuerda en un perfil aerodinámico, a la distancia que hay entre el extremo delantero del perfil y el extremo posterior” (Bernardo, 2008, p.16).

d) Rendimiento: Se describe como la relación entre la energía total generada y la energía útil aprovechada por una máquina en un periodo específico.

e) Demanda: La demanda eléctrica hace referencia al volumen de energía requerido por los consumidores de una nación para satisfacer sus necesidades,

incluyendo sectores como la industria, el comercio, los hogares y los servicios públicos (Twenergy, 2019).

f) Estabilidad: La estabilidad de un sistema eléctrico de potencia se refiere a su capacidad para restablecer un estado de equilibrio operativo luego de experimentar una alteración, partiendo de una condición inicial de funcionamiento (Garcés et al., 2023).

g) Conservación: El principio de conservación de la energía sostiene que la energía no se puede generar ni eliminar, sino que solo puede transformarse de una forma a otra. Esto implica que un sistema conserva la misma cantidad de energía, a menos que reciba un aporte externo (Enciclopedia de Energía, s. f.).

h) Perfil: Los perfiles se obtienen a partir de polinomios que definen la geometría de la línea de curvatura (camber line) y la distribución del espesor (thickness distribution) del aerogenerador.

i) Rugosidad: Se refiere a la medida de las irregularidades y la textura de la superficie del terreno donde se instalará el aerogenerador. Esta característica influye en el flujo del viento, afectando la velocidad y dirección del aire que llega al rotor del aerogenerador.

j) Consumo: se refiere a la cantidad de EE que utiliza un aparato, sistema o instalación durante un período de tiempo determinado. Se mide comúnmente en kilovatios-hora (kWh), que representa la cantidad de energía consumida si un dispositivo de 1 kilovatio funciona durante 1 hora.

CAPÍTULO III.

Desarrollo del Trabajo de Investigación

3.1. Estado actual de la electrificación en Piura

Muchos no cuentan con EE debido a que se encuentran alejados del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN) o porque son pueblos jóvenes. Las viviendas que no cuentan con EE suelen usar leña, vela o generadores con alto consumo de kerosene que funciona por horas, trayendo como consecuencia contaminación al medio ambiente, así como pocas horas de uso de electricidad. Por otro lado, algunas de las viviendas que, si cuentan con EE, esta es intermitente, es decir no es continuo el flujo eléctrico malogrando artefactos domésticos en su camino.

La Dirección General de *Electrificación Rural del Ministerio de Energía y Minas (DGERMEM)*, mediante el *Plan Nacional de Electrificación Rural 2016 – 2025*, cuenta con dos proyectos de electrificación rural en la región, implementados mediante el sistema convencional de redes. Estos proyectos son los siguientes:

- Expansión de las redes de distribución (Rd) en la *provincia de Ayabaca*, departamento de *Piura*, abarcando la electrificación de 335 *localidades*. Este proyecto beneficiará a una población de 12,997 *habitantes* de los distritos de *Ayabaca, Frías, Pacaipampa, Sapillica y Suyo*, con una inversión total de S/. 24,288,443.00.
- Ampliación de Rd en el *Departamento de Piura* que comprende la electrificación de localidades de la *provincia de Huancabamba, Morropón, Piura, Sullana, Sechura y Talara*, cuyo monto es de inversión de S/. 44 348 320.00, con 357 localidades a electrificarse con una población de 28 067 habitantes.

Como se puede observar, los montos de inversión son altos y el retorno de inversión sería a largo plazo por lo que estos proyectos no son tan atractivos para las empresas que podrían invertir.

3.2. Alternativas de electrificación en Piura

3.2.1. Energía Solar (Paneles Solares)

La ES es una de las alternativas más viables para la electrificación en *Piura* debido a su alta radiación solar durante todo el año, especialmente en la zona sur de la *región*, que incluye distritos como *Ayabaca, Pacaipampa y Huancabamba*. La instalación de sistemas solares fotovoltaicos aislados (off-grid) podría ser una solución ideal para las zonas rurales de difícil acceso. Además, la ES se adapta a la capacidad de los hogares para generar electricidad de manera autónoma, lo que permite reducir la dependencia de las redes eléctricas y los costos de transporte de combustibles.

Por otro lado, la inversión inicial es considerablemente alta. Además, este tipo de energía tiene dependencia de la luz solar generando electricidad durante el día y en condiciones de buen clima. Por último, requiere espacio tanto para la instalación de paneles solares como las baterías de almacenamiento para asegurar el suministro durante la noche o días nublados. Además, las desventajas del uso de batería son las siguientes:

- Costo de las baterías: Las baterías, especialmente las de litio, son caras, lo que hace que la inversión inicial sea alta.
- Durabilidad limitada: Las baterías tienen una vida útil limitada, lo que implica un reemplazo frecuente.
- Impacto ambiental: La fabricación y el reciclaje de baterías puede tener un impacto ambiental negativo.

3.2.2. Gas Natural

En las zonas cercanas a la costa de Piura, como Talara, donde se encuentra una industria extractiva de gas, se podría explorar la posibilidad de llevar gas natural a comunidades rurales cercanas, lo cual permitiría generar electricidad a través de pequeños generadores de gas. Esta opción es menos común, pero podría ser efectiva en áreas donde el gas está disponible.

Dentro de la ventaja es que es una fuente inmediata de energía, es decir, puede generar electricidad independientemente del clima u hora del día.

Por otro lado, las desventajas son que, requiere la construcción de infraestructura para transportar el gas, además del alto costo operativo no sostenible en el tiempo. Adicional a ello, la generación de EE por gas natural emite gases de efecto invernadero y contaminantes al aire. Por último, pueden ser peligrosos si no se usan correctamente, con riesgos de incendios o intoxicaciones por monóxido de carbono.

3.2.3. Biomasa (Biogás y Combustión de Residuos Orgánicos)

En algunas zonas rurales de Piura, especialmente en áreas agrícolas como Morropón y Chulucanas, se podrían aprovechar residuos de cultivos como caña de azúcar, arroz y palma aceitera para generar electricidad a través de la biomasa. La generación de energía a partir de residuos agrícolas no solo puede cubrir las necesidades energéticas locales, sino que también contribuye a la gestión de residuos.

Las desventajas son que, aunque la biomasa es más limpia que los combustibles fósiles, su combustión aún genera emisiones de CO₂, requiere una gestión adecuada en manejo de residuos y la producción de biogás deben realizarse con cuidado para evitar contaminación y malos olores. Adicional a ello, es que se necesitan espacio y recursos, es decir, una cantidad significativa de

material orgánico para funcionar eficientemente, lo cual puede no ser viable en algunas zonas.

3.2.4. Interconectarse al SEIN a las poblaciones rurales

La unión de una población rural de Piura alejada al SEIN puede ser una solución muy positiva a largo plazo, especialmente si se considera la mejora de la calidad de vida, el desarrollo económico y el acceso a servicios de salud y educación. Sin embargo, en Piura y otros lugares dentro de dicho departamento, cuenta con costos iniciales elevados y altos costos operativos, las dificultades de mantenimiento y la posible dependencia de la red son aspectos que requieren ser gestionados cuidadosamente. Además, la infraestructura necesaria para conectar estas zonas debe ser planeada de manera que minimice los impactos ambientales y sea económicamente viable tanto para los gobiernos como para las empresas de energía.

Por lo tanto, el éxito de este proyecto depende de una planificación adecuada, la involucración de las comunidades locales y la evaluación de las capacidades financieras y logísticas necesarias para mantener la infraestructura a largo plazo.

3.2.5. Energía eólica (Aerogeneradores)

Piura, especialmente en áreas cercanas al litoral como Parachique y Sechura, tiene un potencial significativo para aprovechar la energía eólica, debido a los vientos constantes en la región costera, al igual que la ES, la energía eólica no produce emisiones contaminantes, es decir, utiliza energía limpia y renovable para su funcionamiento. La energía eólica es adecuada para ofrecer una opción adicional en zonas con viento constante ya que brinda. Asimismo, es sostenible en el tiempo ya que los aerogeneradores pueden durar muchos años con un mantenimiento adecuado. Por último, brinda energía constante en áreas

adecuadas con viento constante como lo es Piura, puede generar electricidad de manera fiable.

Piura, una región en la costa norte del Perú, cuenta con un potencial eólico significativo debido a sus condiciones climáticas favorables, como vientos constantes y velocidad moderada. La investigación de un aerogenerador mixto Darrieus-Savonius es relevante porque combina dos tipos de aerogeneradores que pueden aprovechar eficazmente el recurso eólico en diversas condiciones de viento. El diseño mixto puede mejorar el rendimiento en zonas con variabilidad en la velocidad y dirección del viento.

Los aerogeneradores Darrieus y Savonius tienen características complementarias. Los Darrieus son conocidos por su alta eficiencia en vientos fuertes, mientras que los Savonius son eficientes en vientos bajos y turbulentos. La combinación de estos dos tipos en un solo aerogenerador permite un mejor aprovechamiento de las condiciones eólicas variables en Piura, lo que puede resultar en una generación de energía más constante y fiable.

La generación de EE a partir de fuentes renovables es crucial para reducir la dependencia de fuentes de energía no renovables y disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero. La implementación de aerogeneradores mixtos en Piura contribuiría al desarrollo de la energía eólica en la región, promoviendo un modelo sostenible y resiliente de generación de energía. Aprovechar de manera óptima el potencial eólico de Piura mediante la combinación de tecnologías de aerogeneradores puede maximizar la generación de energía y contribuir a una mayor estabilidad en el suministro eléctrico.

Por otro lado, algunas desventajas son las siguientes:

- Requiere viento constante: No es viable en todas las áreas, ya que necesita espacio abierto y vientos regulares.

- Costos de instalación elevados: La infraestructura inicial puede ser cara y no siempre rentable en zonas con bajo viento pero despues se recupera el monto del costo inicial ya que luego será autoconsumo.
- Impacto en la fauna local: Los aerogeneradores horizontales pueden afectar a aves y otros animales si no se colocan adecuadamente. Sin embargo, el tópico del tema son aerogeneradores verticales, por ende, esta desventaja no aplica para este caso en investigación.

3.3. Propuesta de diseño de aerogenerador mixto Darrieus-Savonius

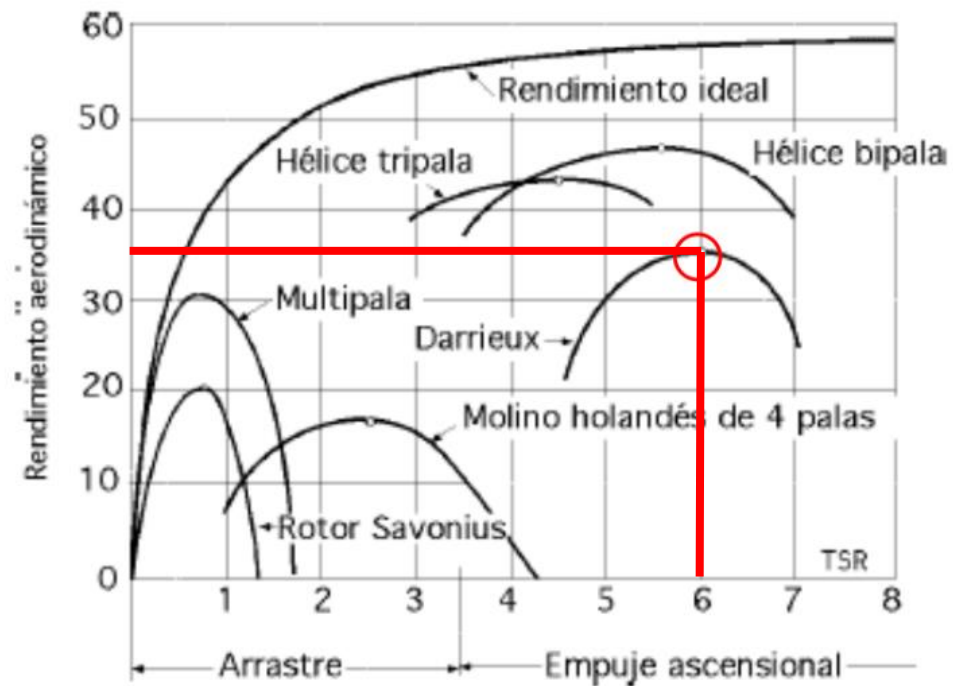
3.3.1. Diseño RD

3.3.1.1. *Cálculo de la potencia nominal (P_n)*

Considerando las distintas pérdidas de energía en el sistema, incluyendo las del rotor, generador y multiplicador, se calcula el rendimiento total. Para este análisis, se asume un rendimiento mecánico (η_m) del 80%, debido a pérdidas en descansos, acoplamientos y transmisión, mientras que el rendimiento eléctrico (η_e) se estima en 90%. Tras determinar el n_r , se procede a calcular la P_n de diseño de la turbina eólica, basada en la eficiencia global del sistema. El rendimiento aerodinámico máximo ($C_{p\text{máx}}$) del RD es del 35% para un TSR de 6, como se muestra en la figura 3.1. La turbina está diseñada para generar una potencia máxima útil de 0.5 kW, obtenida al sustituir los valores en la ecuación correspondiente:

Figura 3.1

Rendimiento aerodinámico en función de la relación de velocidad (TSR)



Datos:

$$n_m = 80\%$$

$$n_e = 90\%$$

$$c_p = 35\%$$

Hallando la eficiencia total:

$$n_t = n_m * n_e * c_p = 0.252 = 25.2\%$$

Sabemos que:

P_n : potencia nominal

$$P_n = \frac{P_u}{n_t} = 1.984 \text{ kW}$$

A partir de la P_n y los datos obtenidos en la evaluación eólica, se establecen los parámetros de la turbina.

3.3.1.2. **Determinación de la velocidad nominal del viento**

La velocidad nominal del viento puede estimarse de la siguiente tabla:

Tabla 3.1*Velocidad promedio del viento (V_m)*

Velocidad media del viento V_m	Velocidad nominal del viento V_∞
≤ 5	8
7	11
> 7	14

Como la V_m obtenida en base a los años de estudio, es de $V_m = 3,6 \sim 4$ m/s, por lo tanto, la velocidad del viento nominal será:

$$V_\infty = 8 \text{ m/s}$$

3.3.1.3. **Diseño del rotor**

El componente fundamental de un aerogenerador es el rotor, compuesto por una o más hélices o palas. La cantidad de palas varía según el diseño. En el caso de la TD, cada pala posee un perfil aerodinámico, caracterizado por un extremo romo denominado borde de ataque y un extremo afilado conocido como borde de salida.

A continuación, se presenta un método práctico para realizar este cálculo.

Determinación del diámetro del rotor. La potencia que produce un rotor eólico se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$P = \frac{1}{2} * \rho * A * V_\infty^3$$

Donde:

P : Potencia nominal o generada por el rotor (W).

ρ : Densidad del aire (kg/m^3).

A : Área barrida por el motor (m^2).

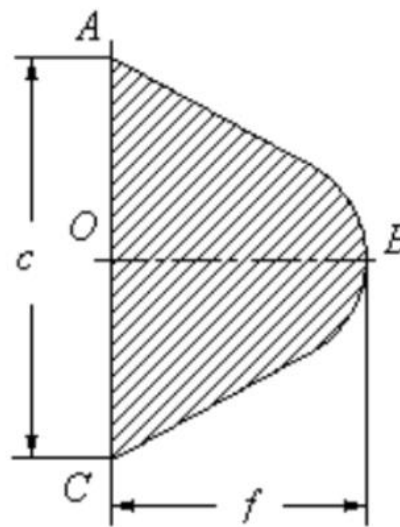
V_∞ : Velocidad del flujo libre del viento (m/s).

Cuando una turbina gira, genera un volumen conocido como volumen de barrido, el cual es simétrico respecto al eje de rotación. La intersección de este volumen con un plano que contenga dicho eje se denomina área barrida.

En el caso de una TD, el área se estima siguiendo una función parabólica, la cual se expresa de la siguiente forma:

Figura 3.2

Área de la parábola



Sabemos que el área de la parábola es:

$$A_{parábola} = \frac{2}{3} * c * f$$

Sabemos también que:

$$R = \frac{D}{2} = f$$

$$c = H$$

Donde:

R: radio del rotor

D: diámetro del rotor

H: altura del rotor

Procedemos a calcular el área de barrido (A_b) el cual es 2 veces el área de la parábola mostrado en la figura III.2.

Para este cálculo vamos a suponer una relación $H/D=1$, en posteriores cálculos hallaremos las dimensiones verdaderas de H y D:

$$A_{barrido} = 2 * \left(\frac{2}{3} * c * f \right) = 2 * \left(\frac{2}{3} * H * \frac{D}{2} \right) = \frac{2}{3} * H * D$$

$$A_{barrido} = \frac{2}{3} * D^2$$

Reemplazando la ecuación del Ab en la ecuación de la Pn:

$$P = \frac{1}{2} * \rho * A * V_{\alpha}^3$$

$$P = \frac{1}{2} * \rho * \frac{2}{3} * D^2 * V_{\alpha}^3$$

Despejando el diámetro:

$$D = \sqrt[2]{\frac{3 * P}{\rho * V_{\alpha}^3}}$$

Procedemos a copiar y reemplazar los datos ya obtenidos anteriormente:

$$\rho = 1.259 \text{ kg/m}^3$$

$$P = P_n = 1.984 \text{ kW}$$

$$V_{\alpha} = 8 \text{ m/s}$$

Reemplazando estos datos en la ecuación superior se halla el diámetro del RD:

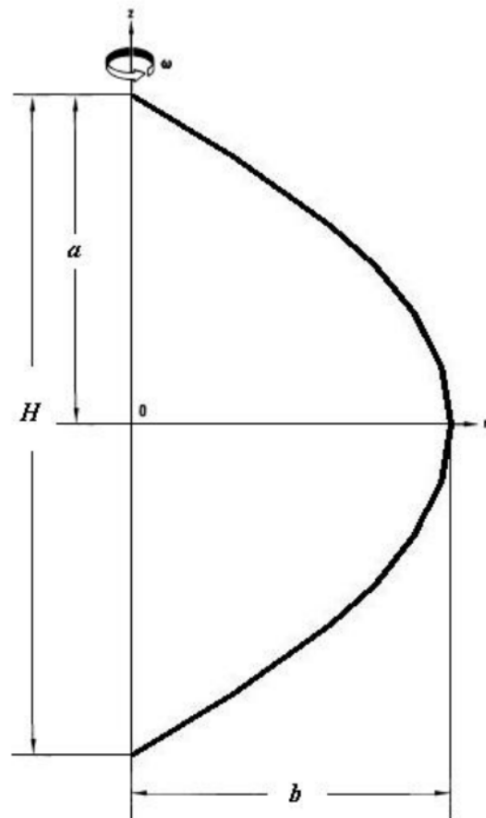
$$D = \sqrt[2]{\frac{3 * P}{\rho * V_{\alpha}^3}} = 3.039 \text{ m}$$

Determinación de la forma del rotor. Para definir la altura del álabe, es fundamental determinar su forma con el fin de minimizar las cargas oscilatorias, las cuales pueden hacerlo propenso a fallas por fatiga y al desgaste del eje. Además, una distribución inadecuada de las fuerzas centrífugas y gravitacionales influye significativamente en el daño por fatiga.

Para reducir tensiones y prolongar la vida útil, se recomienda una geometría Troposkien, que minimiza las flexiones causadas por fuerzas centrífugas y gravitacionales.

Figura 3.3

Forma Troposkien



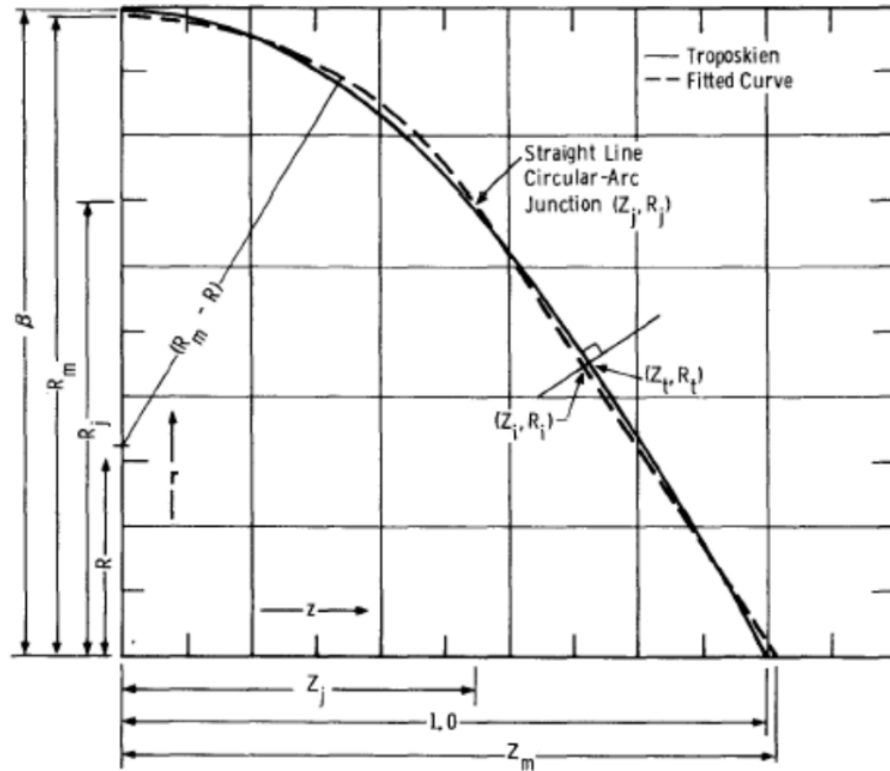
Desde un enfoque matemático, la forma Troposkien puede representarse mediante integrales elípticas. No obstante, su fabricación puede no ser viable económicamente, ya que posiblemente requeriría el uso de maquinaria de control numérico. Por esta razón, resulta beneficioso aproximar su geometría mediante una combinación de formas más sencillas de manufacturar.

El Laboratorio de Sandia desarrolló un método simplificado para aproximar la forma Troposkien, usando dos líneas rectas unidas por un arco circular, facilitando su fabricación. La figura 3.3 muestra esta aproximación, con

longitudes normalizadas respecto a "a", que indica la distancia entre el origen del sistema de coordenadas y la intersección de la curva con el eje z.

Figura 3.4

Sistema coordenado usado para describir la Troposkien y la Curva adaptada



Al analizar matemáticamente distintas aproximaciones de la combinación Línea recta-Arco circular para representar los Troposkiens, el Laboratorio de Sandia identificó un rango de β entre 0.8 y 1.2. Aquí, β representa el radio máximo del desplazamiento del álabe desde el eje de rotación en la mitad del espaciamiento del álabe, considerando que $a = 1$. El Troposkien que abarca la mayor área barrida para una longitud específica del álabe se encuentra en $\beta = 0.99458568$. Esta configuración óptima se toma como referencia para aproximar la curva Troposkien.

En la figura III.3, la Troposkien se representa con una línea continua, mientras que la curva adaptada se muestra con una línea segmentada. Si el desplazamiento máximo del Troposkien respecto al eje z, que ocurre en $z = 0$,

se designa como b , este se considera el radio de curvatura máxima. La siguiente ecuación establece la relación entre la altura y el radio:

$$\beta = \frac{b}{a}$$

En relación con la Curva Adaptada, el centro del arco circular se ubica a una distancia R del eje r , tomando como referencia el origen del sistema de coordenadas r, z . Las intersecciones de dicha curva con los ejes r y z se presentan en las posiciones R_m y Z_m , respectivamente. Asimismo, se considera que la pendiente de la Curva Adaptada mantiene continuidad en el punto de unión entre el arco circular y la línea recta.

Los resultados obtenidos en el Laboratorio de Sandia, que mostraron un mejor ajuste a la curva Troposkien con un β en el rango de 0,8 a 1,2, están presentados en la Tabla 3.2

Tabla 3.2

Tabulación de los parámetros $R, R_m, Z_m, d_{\text{máx}}, R_j$ y Z_j para las curvas adaptadas a las Troposkiens

β	R	Z_m	R_m	Diferencia Mínimo-Máximo (d)	Z_j	R_j
0,8	0,04755	1,01247	0,79046	0,00954	0,56763	0,52683
0,9	0,19378	1,01394	0,88882	0,01118	0,55612	0,61069
0,99459	0,32186	1,01536	0,98184	0,01274	0,54635	0,69210
1	0,32896	1,01544	0,98717	0,01283	0,54582	0,69681
1,1	0,45631	1,01697	1,08551	0,01449	0,53668	0,78475
1,2	0,57800	1,01843	1,18388	0,01612	0,52854	0,87419

Normalizadas con los β de 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2 y 0.99458568 por medio de 100 puntos.

Se identificó que la curva adaptada óptima se obtiene con un valor de $\beta a = 0.99458568$. A partir de los datos de la tabla superior, se calcula una curva adaptada considerando los parámetros R, R_m, Z_m, R_j y Z_j . Dado que en el cálculo previo el diámetro fue $D/2 = 3.039/2 \text{ m} = 1.519 \text{ m}$, este valor se

igual a β y se utiliza para determinar el resto de los parámetros mediante multiplicación. Los resultados se presentan en la tabla siguiente:

Datos de la curva adaptada:

βa	Ra	Zma	Rma	$Difa$	Zja	Rja
(<i>m</i>)	(<i>m</i>)	(<i>m</i>)	(<i>m</i>)	(<i>m</i>)	(<i>m</i>)	(<i>m</i>)
0.99458568	0.32186	1.01536	0.98184	0.01274	0.54635	0.69210

$$\beta r = \frac{3.039}{2} = 1.5195$$

Ahora procedemos a realizar la Tabulación de los parámetros R, Rm, Zm, dmax, Rj y Zj para las curvas adaptadas.

Se procederá a hallar los nuevos parámetros con el de la mejor curva adaptada:

$$R = Ra * \frac{\beta r}{\beta a} = 0.4917$$

$$Zm = Zma * \frac{\beta r}{\beta a} = 1.5512$$

$$Rm = Rma * \frac{\beta r}{\beta a} = 1.5$$

$$Dif = Difa * \frac{\beta r}{\beta a} = 0.01946$$

$$Zj = Zja * \frac{\beta r}{\beta a} = 0.8347$$

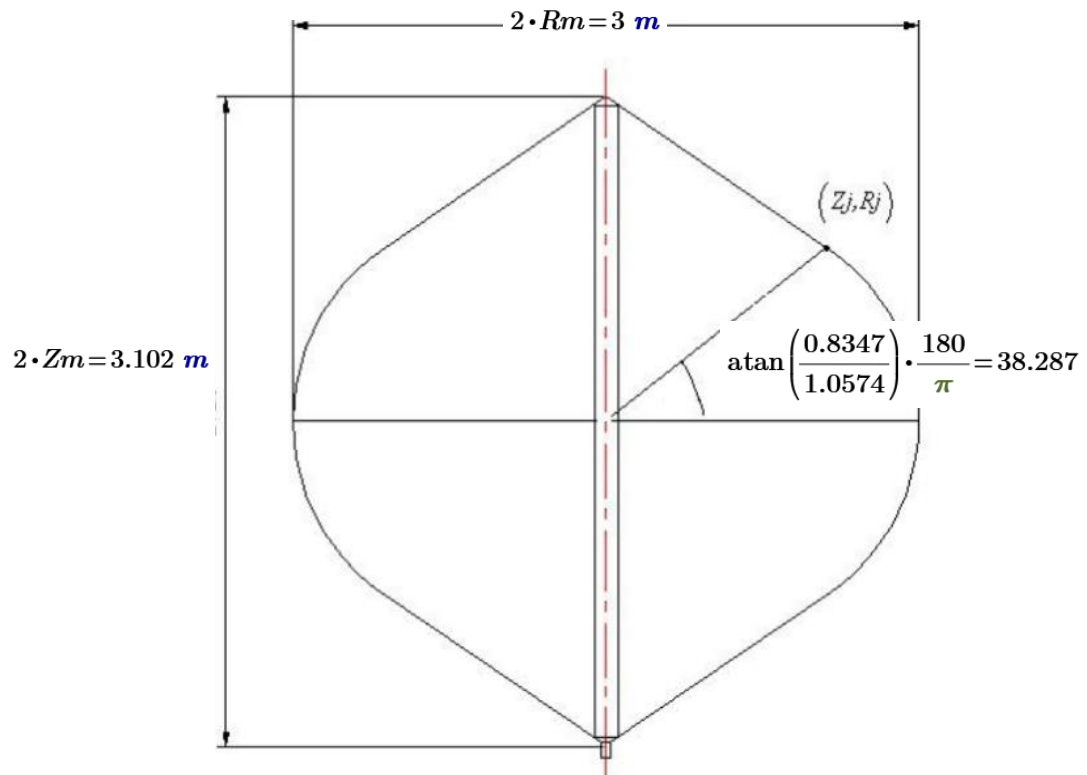
$$Rj = Rja * \frac{\beta r}{\beta a} = 1.0574$$

Ordenando los datos hallados anteriormente:

β	R	Zm	Rm	Dif	Zj	Rj
(<i>m</i>)	(<i>m</i>)	(<i>m</i>)	(<i>m</i>)	(<i>m</i>)	(<i>m</i>)	(<i>m</i>)
1.5195	0.4917	1.5512	1.5	0.01946	0.8347	1.0574

Una vez obtenidas las medidas se procede a modelar las medidas del RD:

Figura 3.5
Velocidad angular del rotor



Por lo tanto, la altura del RD es:

$$H = 3.102 \text{ m}$$

Cálculo de la velocidad angular del rotor. La relación de velocidad específica o periférica TSR se define de la siguiente manera:

$$TSR = \frac{\omega * R}{V_{\infty}}$$

Donde:

- TSR = Relación de Velocidades
- ω = Velocidad Angular (rad/s)

El término TSR reemplaza el número de revoluciones por minuto (n) del rotor y se utiliza para comparar el desempeño de distintas máquinas eólicas. Representa cuántas veces la periferia de la pala se desplaza a una velocidad superior a la del viento V_{∞} . Además, se define como la relación entre la

velocidad periférica $R\omega$, correspondiente al punto más externo desde el eje de rotación, y la velocidad del viento v .

Al considerar un rendimiento del 35 % para el aerogenerador Darrieus previamente determinado, se obtiene un TSR de 6. Al reemplazar estos valores en la ecuación correspondiente y despejar ω , se obtiene el siguiente resultado:

$$w = \frac{TSR * V_{\alpha}}{R} = \frac{6 * 8}{D/2} = \frac{6 * 8}{3.039/2} = 31.592 \text{ rad/s}$$

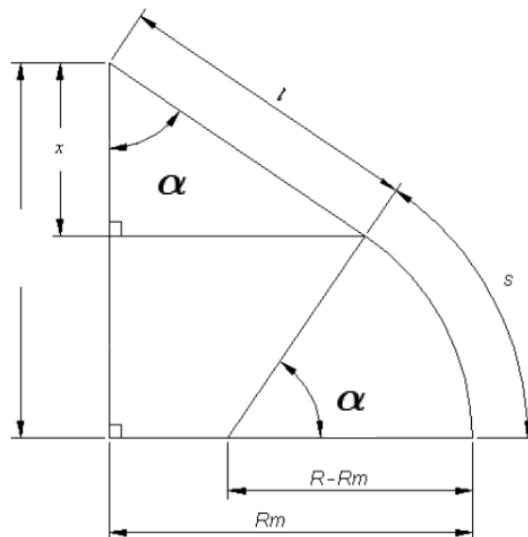
$$n = w * \frac{60}{2 * \pi} = 301.679 \text{ rpm}$$

3.3.1.4. Diseño de álabes

Largo de las palas. A partir de los datos obtenidos en el punto 3.3.6., se realiza el cálculo de la longitud del álabes.

Figura 3.6

Longitud de álabes - 1



Se aprecia que el largo del álabes es el siguiente:

$$L = 2 * (l + s) \dots \dots \dots \text{Ec. 3.3.1.4.1}$$

Además:

$$x = l * \cos(\alpha) \dots \dots \dots \text{Ec. 3.3.1.4.2}$$

También:

$$x = \frac{H}{2} - Z_j \dots \dots \dots Ec. 3.3.1.4.3$$

Procedemos a igualar las ecuaciones *Ec. 3.3.1.4.2* y *Ec. 3.3.1.4.3* :

$$l = \frac{H}{2 * \cos(\alpha)} - \frac{Z_j}{\cos(\alpha)} \dots \dots \dots Ec. 3.3.1.4.4$$

Al calcular el arco se obtiene lo siguiente:

$$s = (Rm - R) * \alpha \dots \dots \dots Ec. 3.3.1.4.5$$

Reemplazando la ecuación *Ec. 3.3.1.4.4* y la ecuación *Ec. 3.3.1.4.5* en la ecuación *Ec. 3.3.1.4.1*:

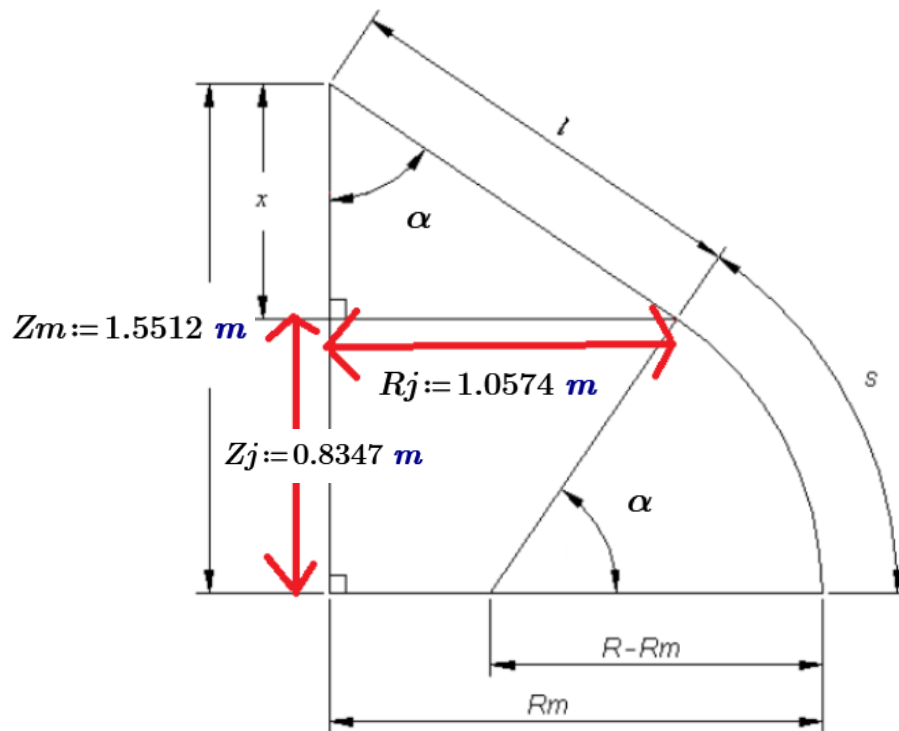
$$L = \frac{H}{\cos(\alpha)} - \frac{2 * Z_j}{\cos(\alpha)} + 2 * (Rm - R) * \alpha \dots \dots \dots Ec. 3.3.1.4.6$$

Ahora, para hallar el largo de las palas se procede a calcular los valores superiores para poder reemplazarlo en la *Ec. 3.3.1.4.6* y hallar dicho largo de las palas.

Procederemos a colocar los valores en el gráfico:

Figura 3.7

Longitud de álabe - 2



$$x = Z_m - Z_j = 0.717 \text{ m}$$

Para hallar " α " procederemos a hallarlo de la siguiente manera:

$$\alpha = \arctg\left(\frac{R_j}{x}\right) = 0.975 \dots \dots \dots \text{en radianes}$$

$$\alpha = 55.8782^\circ \dots \dots \dots \text{en grados sexagesimales}$$

$$\cos(\alpha) = 0.560957$$

Reemplazando los valores en la Ec. 3.3.1.4.6:

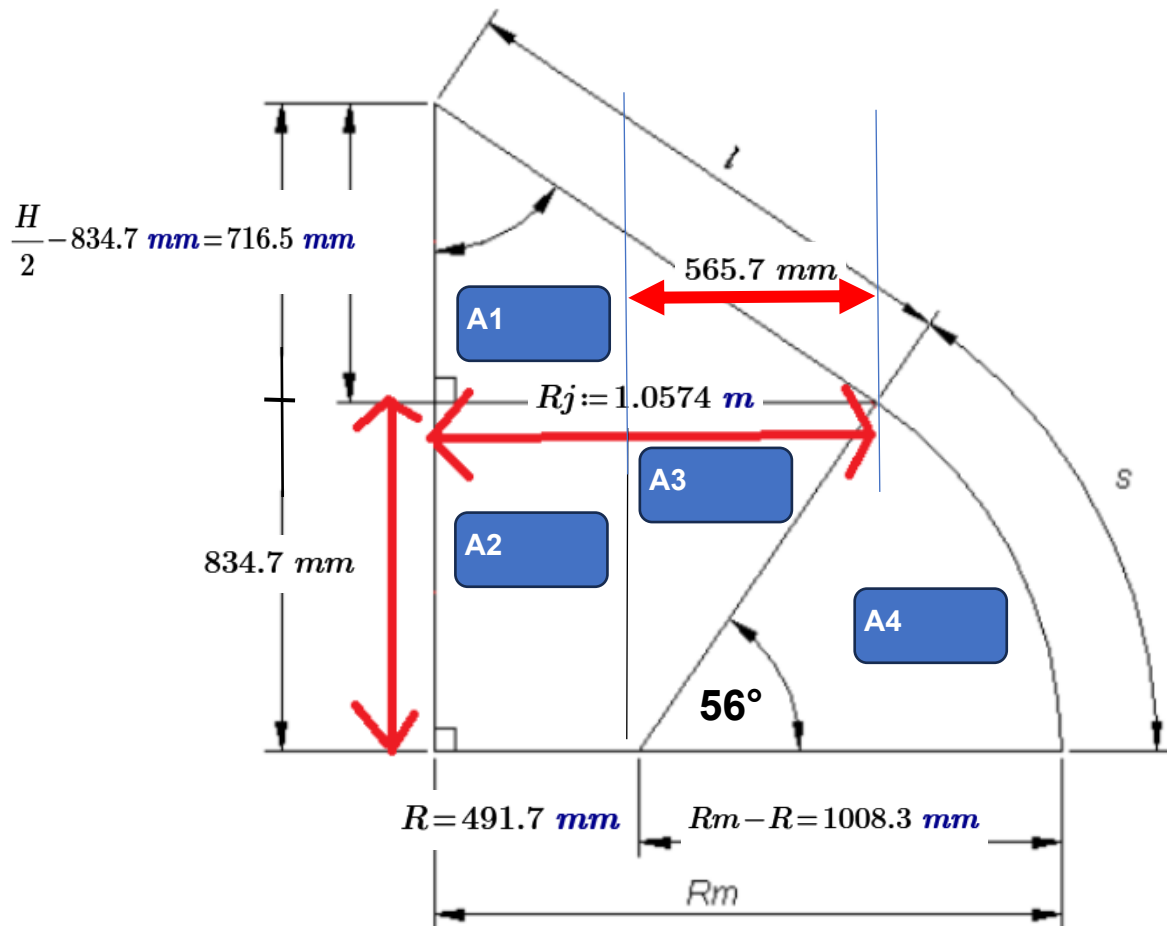
$$L = \frac{H}{\cos(\alpha)} - \frac{2 * Z_j}{\cos(\alpha)} + 2 * (R_m - R) * \alpha * \frac{\pi}{180} = 4.521 \text{ m}$$

Cálculo de área barrida. Dado que la forma del rotor ha sido modificada, es fundamental recalcular el área barrida. Para ello, se emplean formas geométricas en el álabe que permitan una estimación sencilla, como se ilustra en la siguiente figura para determinar dicha área.

β (m)	R (m)	Z_m (m)	R_m (m)	Dif (m)	Z_j (m)	R_j (m)
1.5195	0.4917	1.5512	1.5	0.01946	0.8347	1.0574

Figura 3.8

Secciones del Área Barrida



El A_b será:

$$A_b = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 \dots \dots \dots Ec. Barrido$$

Se procede a calcular las áreas barridas:

$$A_1 = \frac{716.5 \text{ mm} \cdot 1057.4 \text{ mm}}{2} = 378813.55 \text{ mm}^2$$

$$A_2 = 834.7 \text{ mm} \cdot 491.7 \text{ mm} = 410421.99 \text{ mm}^2$$

$$A_3 = \frac{565.7 \text{ mm} \cdot 834.7 \text{ mm}}{2} = 236094.895 \text{ mm}^2$$

$$A_4 = \frac{\pi \cdot (R_m - R)^2 \cdot \alpha}{360} = 495757.6944 \text{ mm}^2$$

Reemplazando en la Ecuación de Barrido (*Ec. Barrido*):

$$Ab = A1 + A2 + A3 + A4 = 1.521 \text{ m}^2$$

Si multiplicamos ese valor por 4 tendríamos el Área Barrida Total:

$$Abt = 4 * Ab = 6.084 \text{ m}^2$$

Cálculo de la cuerda de la sección del álabe. La cuerda de la sección representa la longitud característica en la que las fuerzas de empuje y sustentación actúan de manera horizontal y perpendicular, respectivamente. Se extiende desde el borde de ataque hasta el borde de salida del perfil y puede determinarse utilizando el parámetro conocido como solidez, el cual se define de la siguiente manera:

$$\sigma = \frac{N * C * L}{Abt}$$

Donde:

σ : Solidez (—)

N : Número de álabes (—)

C : Cuerda de perfil (m)

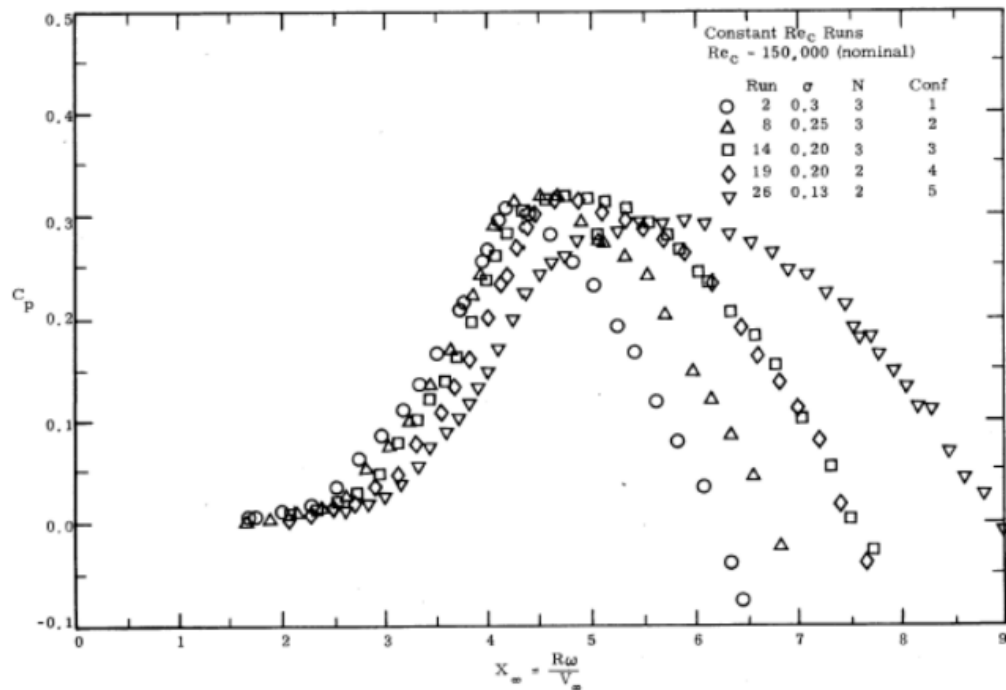
L : Longitud de los álabes (m)

Abt : Área barrida total (m²)

Se procede a iterar la ecuación ya descrita anteriormente con la finalidad de obtener la longitud de la cuerda y el número de álabes:

Figura 3.9

Efecto de la Solidez sobre el Rendimiento Aerodinámico



En la figura superior, se establece que el coeficiente de solidez debe estar en el rango de 0.2 a 0.3, ya que valores inferiores pueden generar un mayor grado de descontrol e inestabilidad.

Esto implica que el *coeficiente de potencia* se desplaza hacia valores más altos de TSR.

Los parámetros son determinados en base a:

$$\sigma = 0.25$$

$$A_{bt} = 6.084 \text{ m}^2$$

$$L = 4.521 \text{ m}$$

$$\sigma = \frac{N \cdot C \cdot L}{A_{bT}}$$

$$N \cdot C = \frac{A_{bt} \cdot \sigma}{L} = \frac{6.084 \text{ m}^2 \cdot 0.25}{4.521 \text{ m}} = 0.336 \text{ m}$$

Los valores obtenidos que se ajustan mejor al análisis son:

$$N = 2$$

$$C = 0.168 \text{ m}$$

Sección del álabe. Los perfiles más comunes para aerogeneradores, especialmente para aplicaciones de pequeña y mediana escala, son los perfiles de la serie NACA 4 dígitos o 6 dígitos, que ofrecen un buen compromiso entre sustentación y eficiencia.

NACA 2412

Descripción: El NACA 2412 es uno de los perfiles más populares y equilibrados para aerogeneradores de pequeña y mediana escala. Tiene una curvatura del 2% y un grosor del 12%.

Ventajas:

Buena eficiencia en una amplia gama de *velocidades del viento*.

Resistente al stall a bajas velocidades de viento.

Adecuado para aplicaciones con variaciones moderadas en la *velocidad del viento*.

Aplicación: Ideal para la sección media de las palas, donde el flujo es más complejo debido a la combinación de velocidad del viento y el ángulo de ataque variable.

NACA 4412

Descripción: El NACA 4412 tiene un 4% de curvatura y un grosor del 12%. Este perfil está diseñado para generar más sustentación a ángulos de ataque más elevados.

Ventajas:

Proporciona más sustentación a bajas velocidades de viento.

Puede ser útil en la raíz de las palas, donde el ángulo de ataque suele ser más alto.

Aplicación: Este perfil puede ser más adecuado en la base de la pala, donde el flujo de aire es más lento y se necesitan características de sustentación más altas.

NACA 0012

Descripción: El NACA 0012 es un perfil simétrico, con un grosor del 12%. Aunque es menos eficiente en términos de sustentación en comparación con otros perfiles de curvatura positiva, su simetría lo hace útil para aplicaciones donde se desea un comportamiento aerodinámico más predecible.

Ventajas:

Menor resistencia al stall.

Mejor comportamiento en condiciones de viento variable.

Aplicación: Este perfil podría utilizarse en las secciones externas de la pala, donde los ángulos de ataque tienden a ser menores y el control de la sustentación es crítico.

Finalmente, con un diámetro de 3 metros y una longitud de cuerda de 168 mm, se recomienda empezar con el NACA 2412 si se busca un perfil equilibrado para todo el rango de la pala. Si el aerogenerador operará principalmente en vientos más suaves o moderados, el NACA 4412 podría ser adecuado para las secciones cercanas a la raíz de la pala. El NACA 0012 podría ser útil en las secciones más externas de la pala, donde los ángulos de ataque son menores.

3.3.2. Diseño RS:

La función por cumplir por el RS es hacer de motor de arranque para la Turbina eólica, por lo que es necesario hacer el cálculo de ésta, determinando el torque en función del A_b , es fundamental considerar que un sobredimensionamiento

del *rotor Savonius* reducirá el rendimiento del equipo, mientras que un tamaño demasiado pequeño impedirá su arranque.

Partiremos de la siguiente ecuación:

$$F_{arr} = 1.08 * C_d * \rho * A * V_{\infty}^2 \dots \dots \dots Ec. 3.3.2.1.1.$$

Donde:

 F_{arr} : Fuerza de Arrastre (N)

 C : Coeficiente de Arrastre (adimensional)

Asimismo, haremos uso de la siguiente ecuación:

$$F_{arr} = \frac{2 * T_s}{r} \dots \dots \dots Ec. 3.3.2.1.2.$$

Combinando las Ecuaciones *Ec. 3.3.2.1.1* y *Ec. 3.3.2.1.2* se obtiene la siguiente ecuación:

$$A = \frac{1.85 * T_s}{r * C_d * \rho * V_{\infty}^2} \dots \dots \dots Ec. 3.3.2.1.3.$$

Donde:

 T_s : Torque Producido (N.m.)

 r : Radio del rotor *Savonius* (m)

Al combinar las ecuaciones y obtener la ecuación *Ec. 3.3.2.1.3* se logra obtener el cálculo del A_b manteniendo como única variable el T_s luego de hacer el cálculo del radio del RS.

Cálculo del radio del rotor:

Considerando un *generador* de 1Kw (*ver Anexo C*), que debe girar a 1500 rpm (N1) y un multiplicador de 6: 1, se obtiene lo siguiente:

$$N_2 = \frac{N_1}{Rt}$$

$$N_2 = \frac{1500}{6} = 250 \text{ rpm}$$

La ecuación Ec. 3.3.2.1.4 entrega una relación para el cálculo del *radio* “r” como:

$$r = \frac{TSR * 30 * V_{\infty}}{\pi * N_2}$$

$$r = \frac{1 * 30 * 8}{\pi * 250}$$

$$r = 0.3056 \text{ m}$$

En este análisis, se consideró un $TSR = 1$ para el RS, ya que es el valor recomendado. A partir de este, se hace referencia a la *Figura 3.1*, obteniendo un coeficiente de arrastre $Cd = 1.3$. Con esta información y aplicando las ecuaciones Ec. 3.3.2.1.1 y Ec. 3.3.2.1.2, se puede calcular el Ab en función de un torque específico.

Reemplazando valores en la Ecuación Ec. 3.3.2.1.3 se obtiene lo siguiente:

$$A = \frac{1.85 * Ts}{0.3056 \text{ m} * 1.259 \frac{kg}{m^3} * \left(11 \frac{m}{s}\right)^2} = \frac{1.85 * Ts}{32.009 \frac{kg}{s^2}}$$

Como vemos solo está el área y el torque como variables de la ecuación.

Para identificar la relación óptima del tamaño del rotor *Savonius*, se emplea el cálculo de áreas en función de distintos valores de torque de arranque en $N.m$, manteniendo fijo el radio “r”. La tabla 3.2 proporciona un enfoque detallado de este análisis.:

Tabla 3.3

Variaciones de torques de partida

r (m)	Ts (N.m)	A (m2)	Farr (N)	h (m)	Aperdida (m2)
0.3056	10	0.578	65.384	0.94568063	5.506
0.3056	15	0.867	98.077	1.41852094	5.217
0.3056	20	1.156	130.769	1.89136126	4.928
0.3056	25	1.445	163.461	2.36420157	4.639
0.3056	30	1.734	196.153	2.83704188	4.35

En la Tabla 3.3 se observa que, a medida que el torque de partida aumenta, el Ab del RD disminuye. Por esta razón, el área del RS no debe superar las dimensiones del RD. Así, se trabaja únicamente con torques entre 10 y 30 N·m, ya que minimizan el riesgo de un mal funcionamiento del equipo

Para establecer el Ab óptima del RS en relación con el RD, se diseña un modelo de análisis que permite obtener un resultado concreto sobre la mejor relación entre ambas áreas.

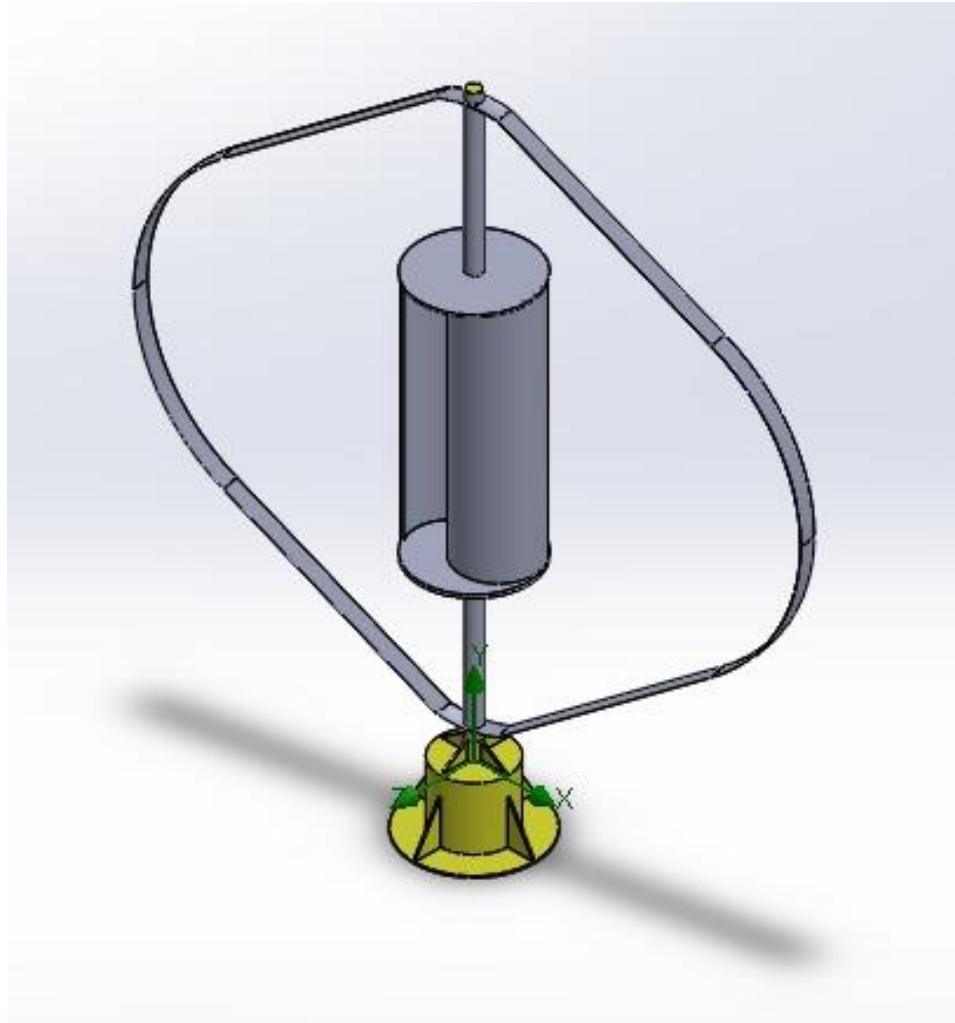
3.3.3. Diseño Solidworks aerogenerador mixto Darrieus-Savonius:

Para un mayor análisis y definición de medidas haremos uso del software SolidWorks.

En la figura 3.10 se observa el aerogenerador mixto Darrieus-Savonius ya dibujado, construido y ensamblado para el posterior estudio a realizarse.

Figura 3.10

Aerogenerador mixto Darrieus-Savonius



Para el estudio se va a hacer uso de la velocidad angular en RPM, por lo que con los datos ya conocidos procedemos a hallarlo:

Sabemos que el radio del Savonius es:

$$r = 0.3056 \text{ m}$$

Haremos uso de la ecuación de la velocidad tangencial en un movimiento circular:

$$v = \omega * r$$

Donde:

v: velocidad tangencial (m/s)

w : velocidad angular (rad/s)

r : radio o distancia al eje de rotación (m)

Reemplazando:

$$v = w * r$$

$$4 \text{ m/s} = w * 0.3056 \text{ m}$$

$$w = 13.09 \text{ rad/s}$$

Cambiamos de rad/s a RPM:

$$rpm = w * \frac{60}{2 * \pi}$$

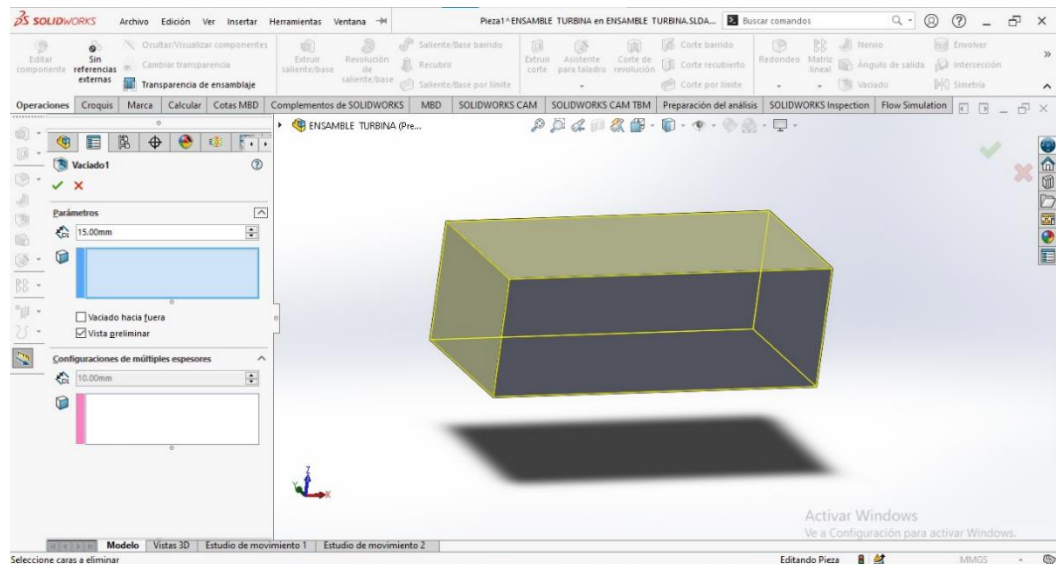
$$rpm = 13.09 \frac{\text{rad}}{\text{s}} * \frac{60}{2 * \pi}$$

$$rpm = 125 \text{ rpm}$$

Procederemos a realizar un tunel de viento para un mayor analisis como se muestra en la Figura 3.11

Figura 3.11

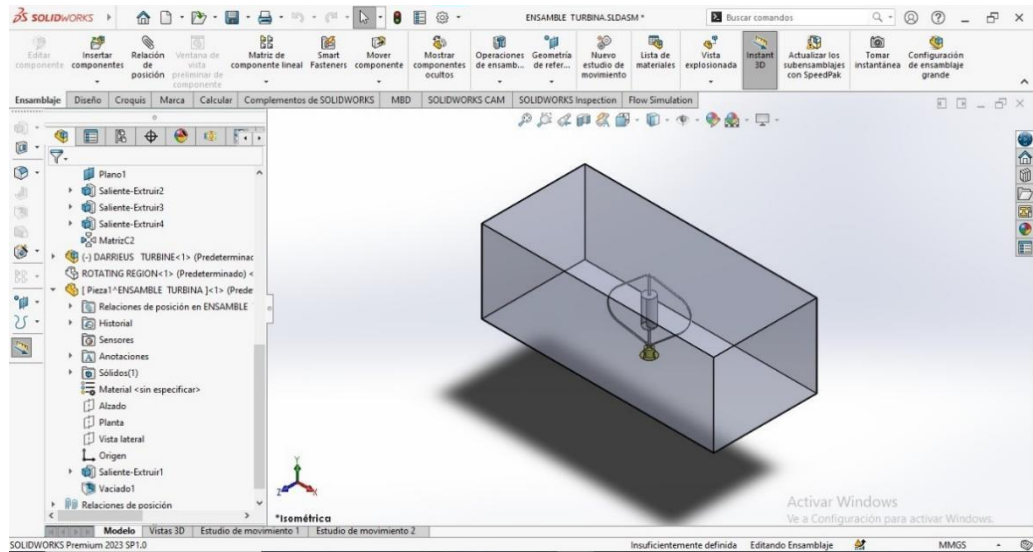
Túnel de viento



Luego le realizamos un vaciado para poder cambiar la transparencia y ver el aerogenerador que se encuentra dentro. Esta caja, que representa el Tunel de Viento (Figura 3.12), en la que esta encerrada va a servir para delimitar nuestro dominio computacional.

Figura 3.12

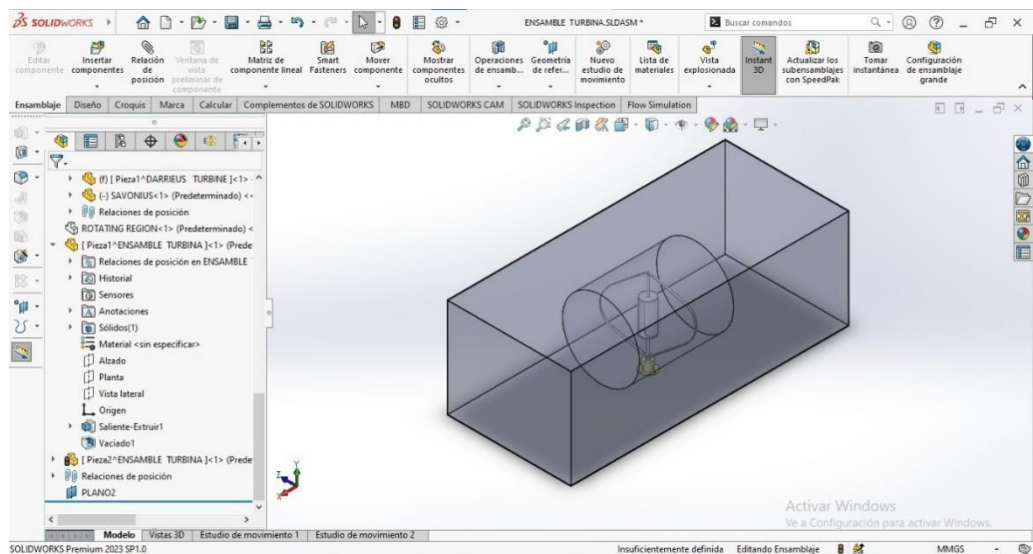
Dominio computacional mediante Túnel de viento



Ahora procederemos a crear un dominio o pieza tonta, se le llama así a una pieza que delimitara el lugar por donde pasara el viento, que en la Figura 3.13 está representado por un cilindro que envuelve a los alerones del aerogenerador mixto.

Figura 3.13

Cilindro que envuelve a los alerones del aerogenerador mixto



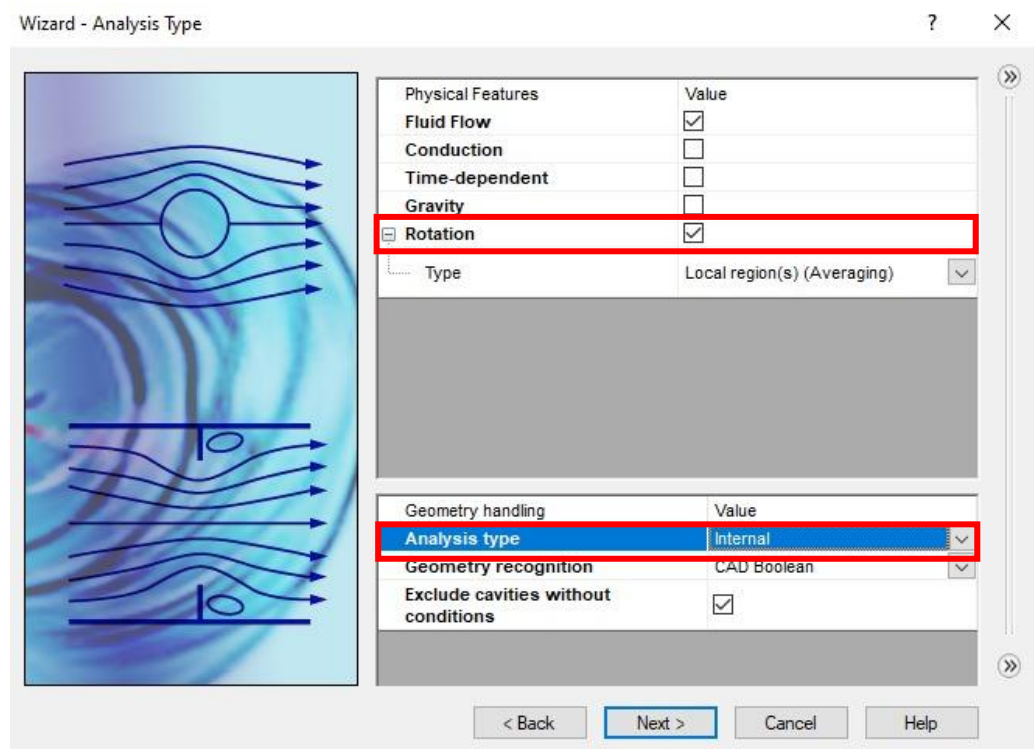
La caja de afuera o llamado Túnel de Viento sirve para dominio computacional y lo de adentro, es decir el cilindro, nos va a servir para realizar un estudio rotativo.

Por consiguiente, introduciremos los datos para realizar la evaluacion eolica del aerogenerador mixto en estudio.

Colocaremos que hay rotación del cuerpo sólido y que el tipo de análisis es interno tal y como se evidencia en la Figura 3.14.

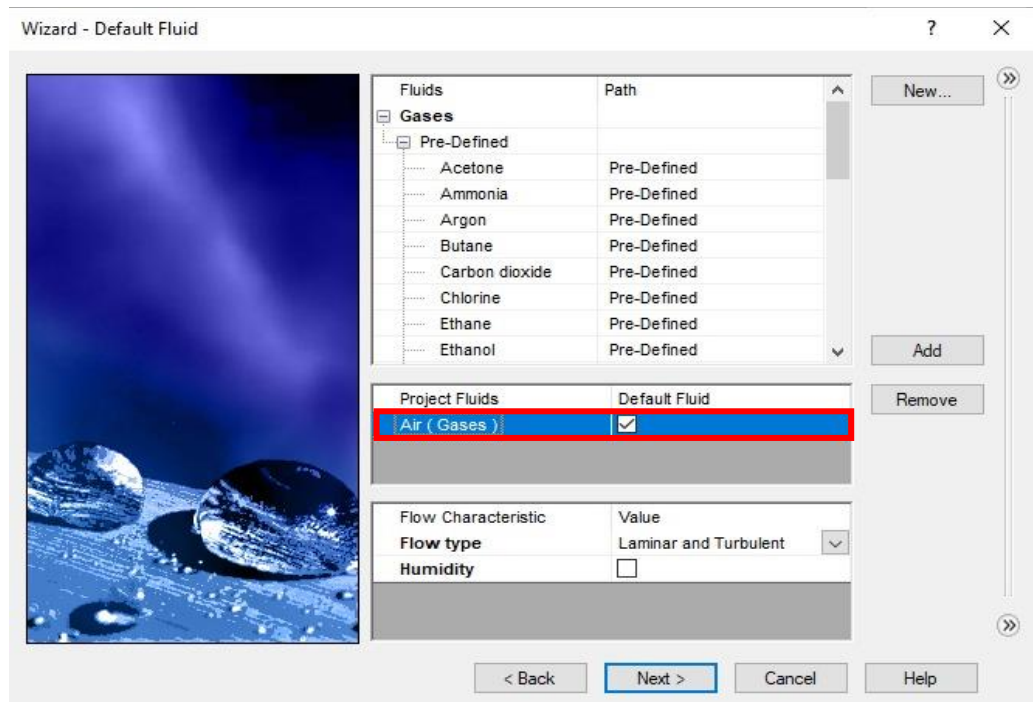
Figura 3.14

Rotación del cuerpo y tipo de análisis interno



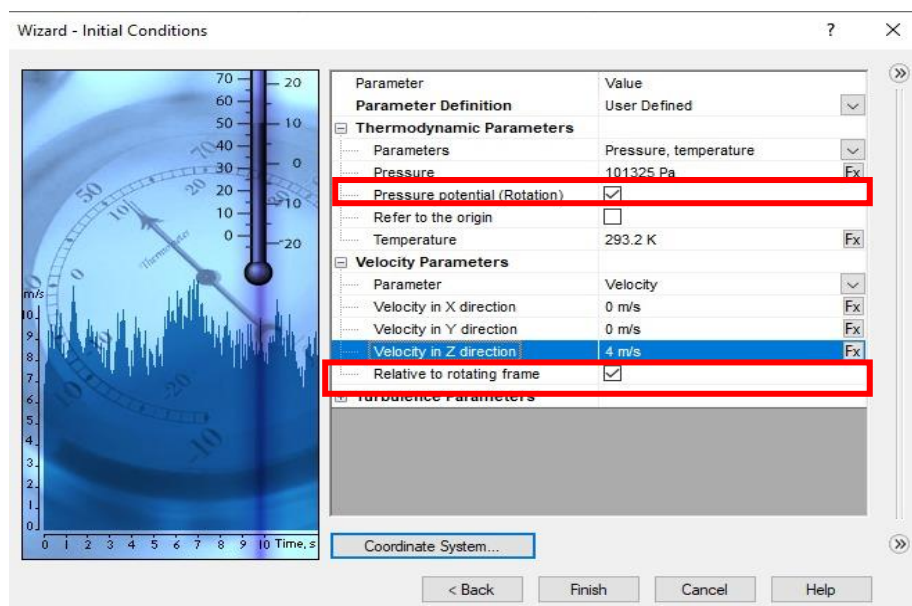
Asimismo, seleccionamos que el fluido es un gas y es el aire.

Figura 3.15
Tipo de fluido



Antes de finalizar, definimos la presión y la velocidad promedio del lugar a la que iría el aerogenerador, esto último con la finalidad de evidenciar el movimiento del aerogenerador en el video a representarse.

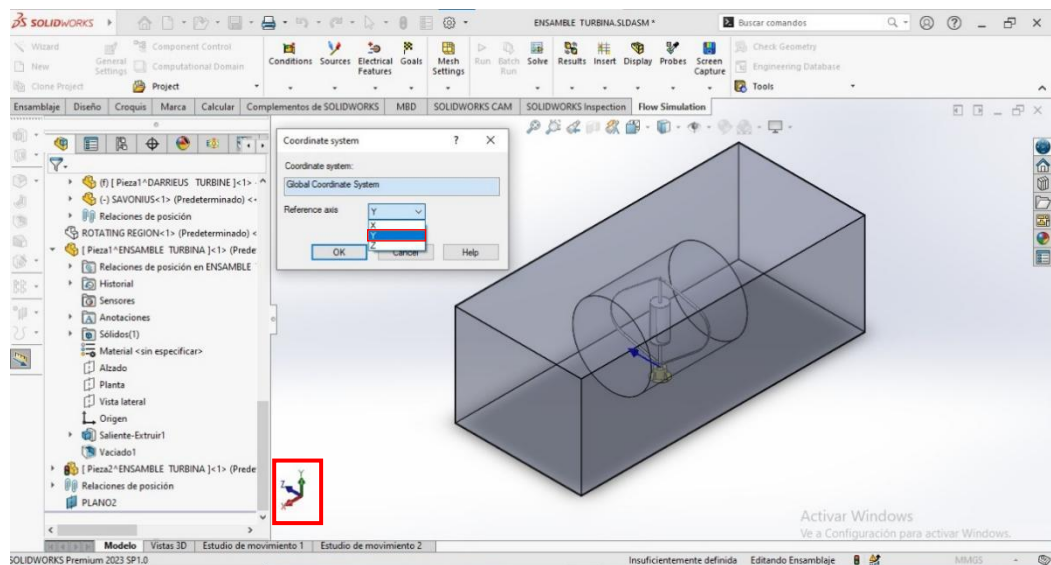
Figura 3.16
Presión y velocidad promedio



Por último, en sistema de rotación seleccionamos el eje “Y” debido a que según el sistema global de coordenadas en el que se encuentra el aerogenerador indica que va a rotar alrededor de dicho eje como se muestra en la Figura 3.17.

Figura 3.17

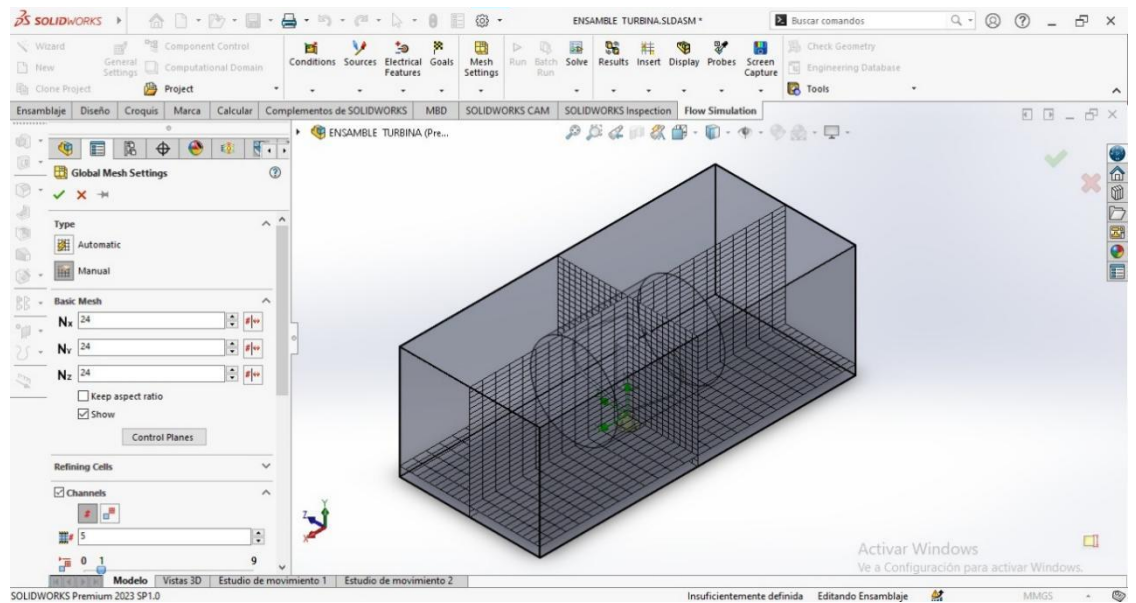
Selección de eje



En la Figura 3.18 se procede a aumentarle el número de mallados y cedulas para un mejor estudio representándolo con formas ortogonales. Esto determina la calidad de los resultados de una malla adecuada de los elementos geométricos.

Figura 3.18

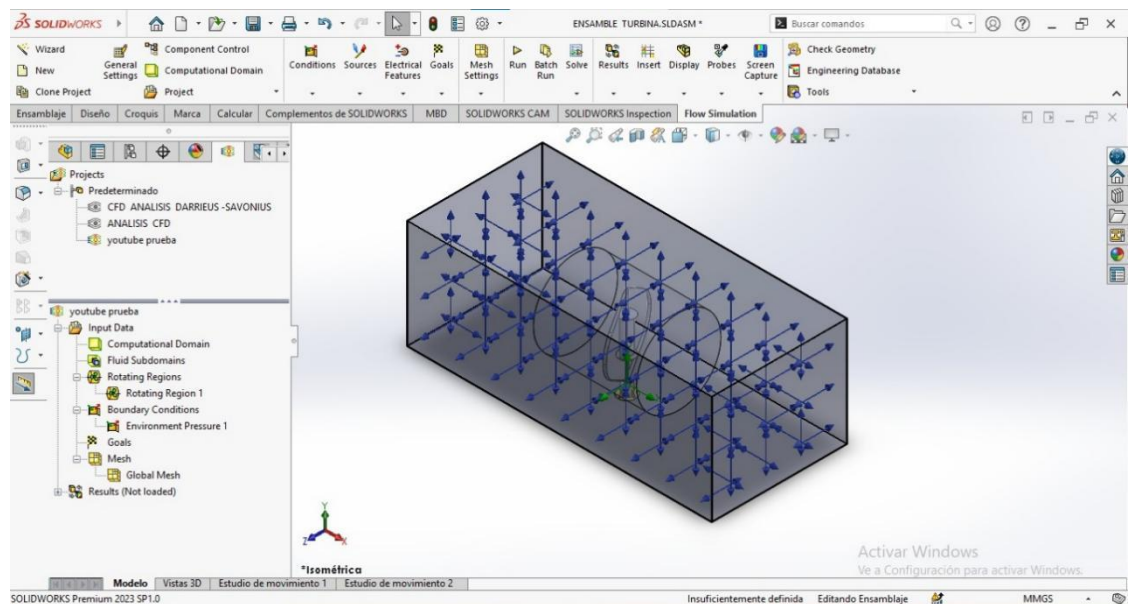
Número de mallados y cedulas



En la Figura 3.19 se muestra la presión atmosférica que influye en el aerogenerador.

Figura 3.19

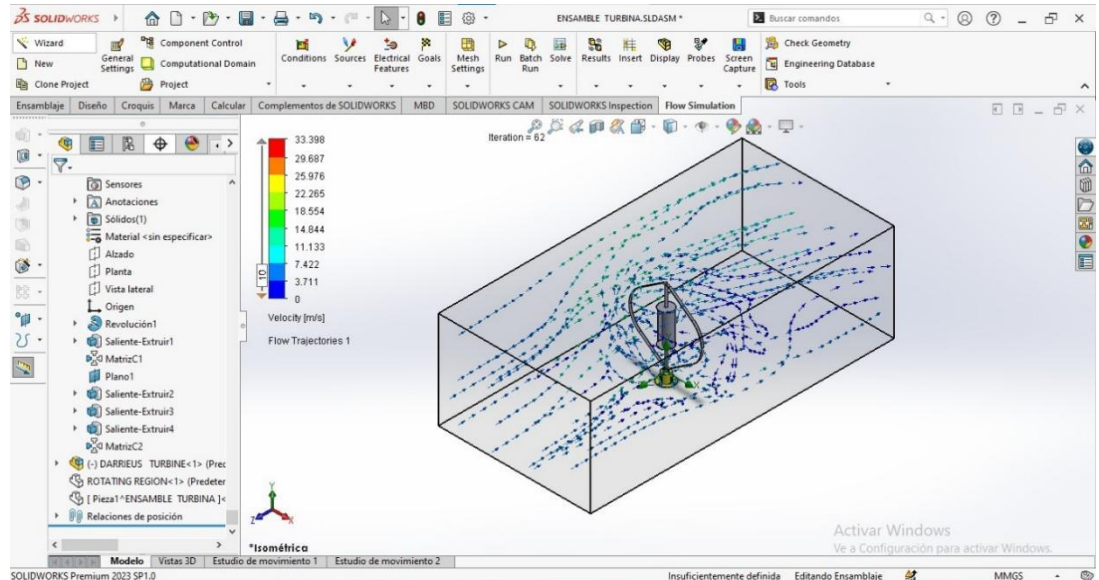
presión atmosférica que influye en el aerogenerador



Y en la Figura 3.20 se evidencia como el viento pasa a través del aerogenerador y la velocidad a la que transcurriría para su movimiento. Lo que indica que a

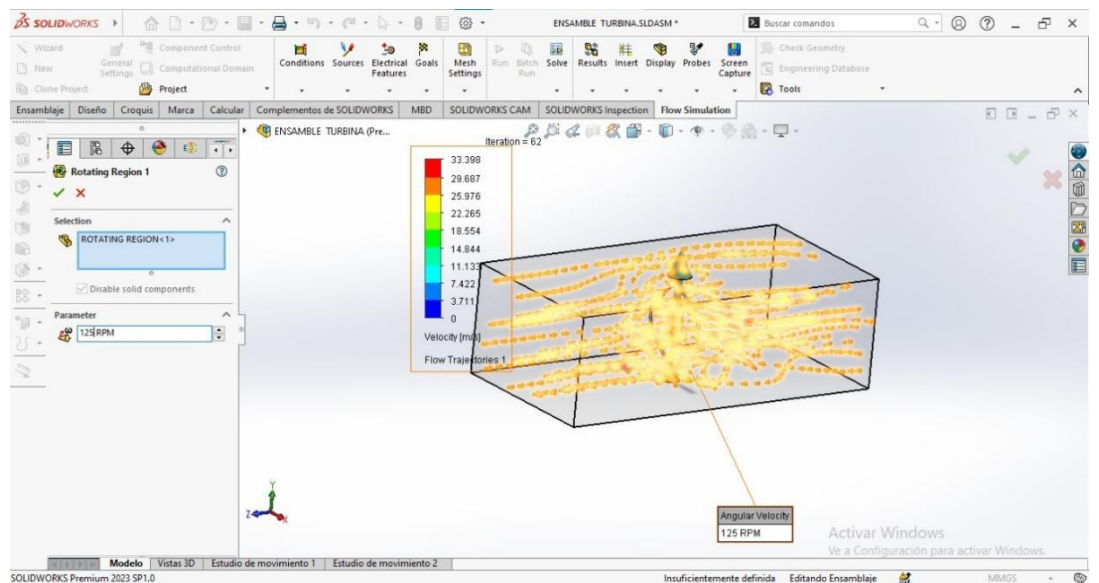
una velocidad promedio de 4 m/s, como se mencionó en la hipótesis, se movería sin inconveniente alguno y produciría la EE solicitada.

Figura 3.20
Viento a través del aerogenerador



La Figura 3.21 muestra los 125 RPM calculados anteriormente representados en la imagen.

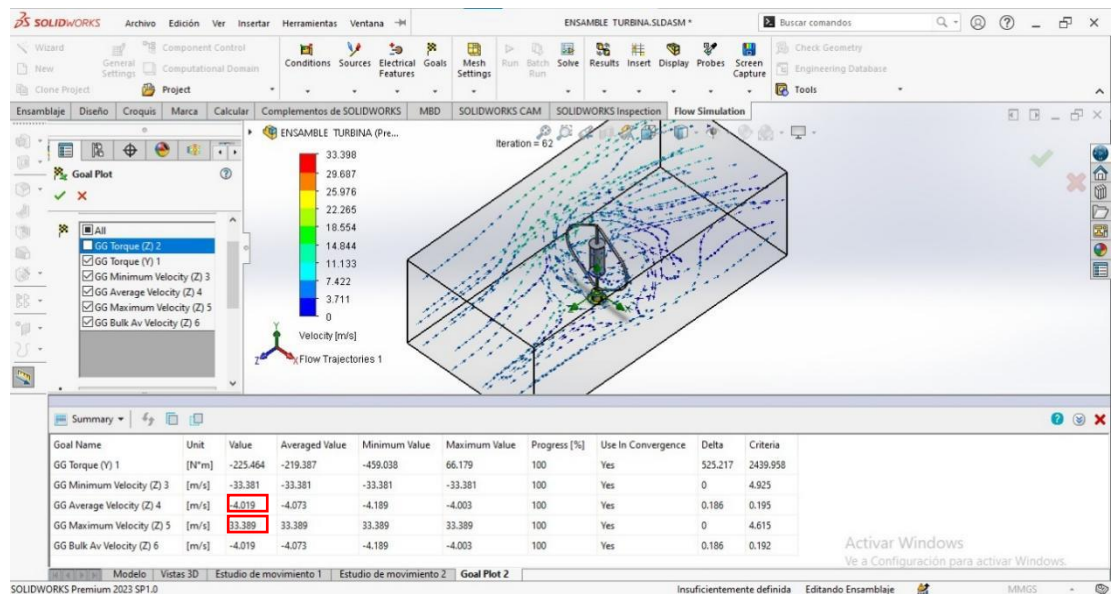
Figura 3.21
125 RPM



En la Figura 3.22 se evidencia que a una velocidad promedio de 4.019 m/s el aerogenerador sería capaz de moverse para producir la energía de 0.5 kW para la vivienda unifamiliar. Asimismo, indica que puede llegar a alcanzar la velocidad máxima de 33.389 m/s sin inconveniente alguno.

Figura 3.22

Velocidad promedio del aerogenerador

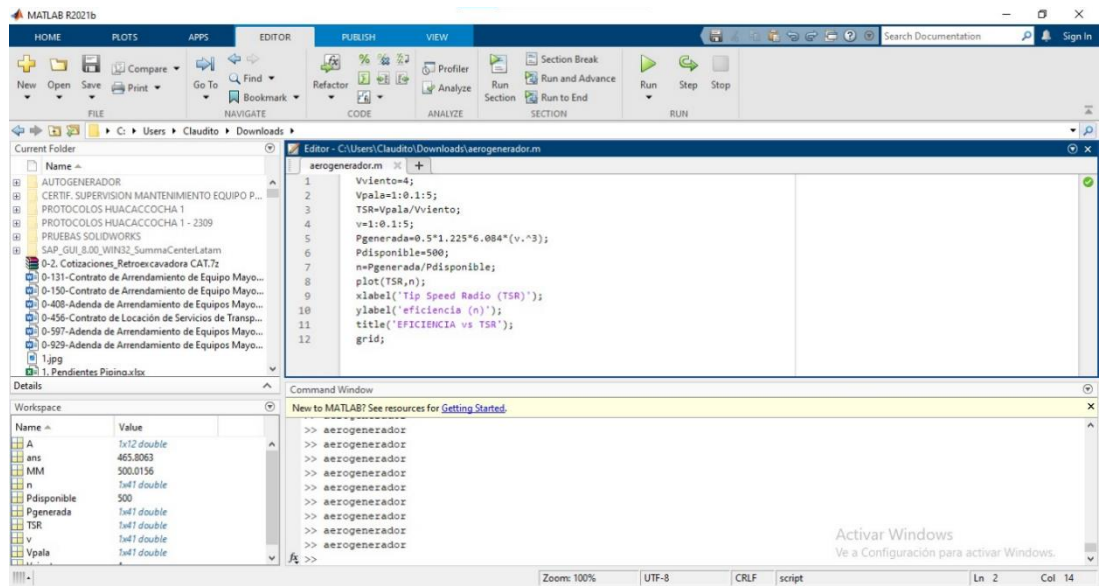


3.3.4. Matlab:

Por otro lado, haciendo uso del software MATLAB vemos como varía la curva Tip Speed Ratio (TSR) vs. Eficiencia (η) para el aerogenerador mixto Darrieus-Savonius mediante cálculos dentro del software como se muestra en la Figura 3.23.

Figura 3.23

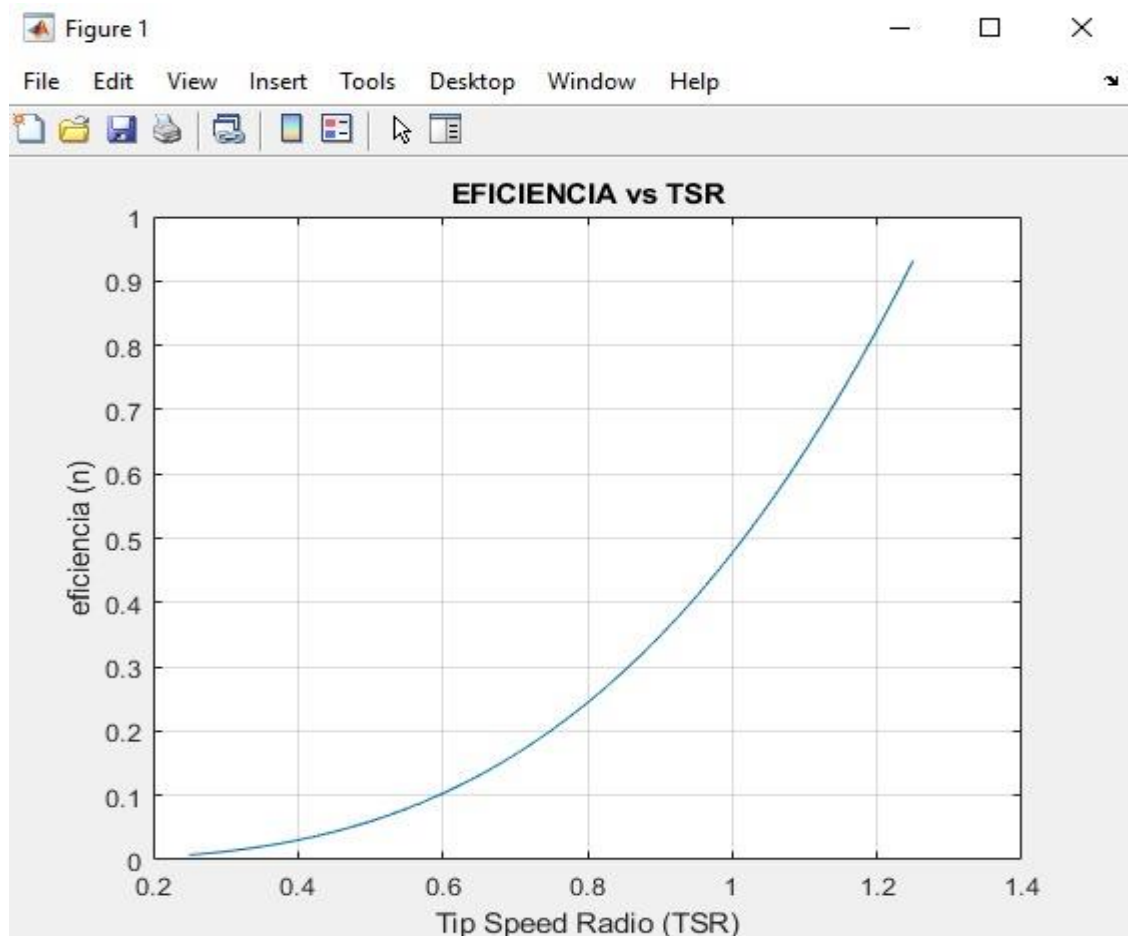
Variación de la curva Tip Speed Ratio (TSR) vs. Eficiencia (η)



Asimismo, en la Figura 3.24 veremos como varía el TSR vs Eficiencia (η):

Figura 3.24

Curva Tip Speed Ratio (TSR) vs. Eficiencia (η)



Como vemos en la Figura 3.3.24, para un TSR igual a 1, nuestra eficiencia es de aproximadamente 50% por lo que se podría decir que tenemos una buena eficiencia a bajas velocidad lo cual es adecuado para que la tecnología Savonius del aerogenerador mixto comience a rotar por si solo a bajas velocidades. Asimismo, se evidencia que a mayor velocidad incrementa su eficiencia, esto debido a que cuenta con la tecnología Darrieus que lo que hace es incrementar la potencia al girar a velocidades mayores.

CAPÍTULO IV.

Resultados, Contrastación de Hipótesis y Discusión de Resultados

4.1. Resultados

- Para la evaluación de la velocidad del viento en la zona del proyecto se utilizó elementos de medición como el anemómetro y la veleta, adicional a ello, una página web que mostraba el histórico de la velocidad del viento a lo largo de los años resultando en 4 m/s de velocidad promedio durante todo un año. La velocidad de 4 m/s es ideal para diseñar un aerogenerador mixto Darrieus - Savonius para cubrir demandas de energía de viviendas unifamiliares en la ciudad de Piura por un tiempo mayor al que actualmente poseen.
- Las dimensiones del aerogenerador eólico mixto Darrieus-Savonius para cubrir la demanda eléctrica a viviendas unifamiliares en la ciudad de Piura de 0.5 kW son:
 -  Altura de eje: 3.102 m
 -  Ancho de barrido: 3 m
- Usando la dinámica computacional haciendo uso del software SolidWorks, se evidencia que de manera permanente y como mínimo a una velocidad de 4.019 m/s siempre se moverá con la finalidad de que el aerogenerador mixto brinde EE de 0.5 kW por lo que se logra cumplir con la hipótesis general de incrementar el tiempo de abastecimiento a viviendas unifamiliares en zonas rurales estableciendo un diseño óptimo.
- Con las medidas del diseño del aerogenerador no va a ser necesario el uso de baterías debido a que la velocidad promedio de 4 m/s va a ser permanente durante el transcurso del día, reduciendo de esta manera los costos y el área a utilizar significativamente. El aerogenerador mixto es capaz de producir y

generar la cantidad de EE necesaria para incrementar el tiempo de abastecimiento a viviendas unifamiliares en zonas rurales.

- La evaluación para hallar la curva Eficiencia vs TSR del aerogenerador mixto para incrementar el tiempo de abastecimiento de energía a viviendas unifamiliares en zonas rurales resultó en la demostración de una buena eficiencia tanto en bajas como en altas velocidades dentro del rango de velocidades que existe en la ciudad de Piura, por lo que se llega a demostrar la hipótesis anteriormente mencionada.

4.2. Contrastación de hipótesis

Hipótesis específica 1

H₀: El diseño óptimo del aerogenerador de eje vertical mixto tipo Darrieus - Savonius, basado en parámetros aerodinámicos y estructurales, no permitirá maximizar la eficiencia energética para el abastecimiento de viviendas unifamiliares en zonas rurales

H_a: El diseño óptimo del aerogenerador de eje vertical mixto tipo Darrieus - Savonius, basado en parámetros aerodinámicos y estructurales, permitirá maximizar la eficiencia energética para el abastecimiento de viviendas unifamiliares en zonas rurales.

Los resultados obtenidos confirman la hipótesis alternativa (H_a) al demostrar que el diseño del aerogenerador mixto Darrieus-Savonius permite maximizar la eficiencia energética en el abastecimiento de viviendas unifamiliares en zonas rurales. Se registró una velocidad promedio del viento de 4 m/s, la cual es adecuada para el funcionamiento óptimo del aerogenerador, garantizando una producción constante de 0.5 kW. Además, la evaluación aerodinámica y estructural del diseño, realizada mediante simulaciones en SolidWorks, confirmó que el aerogenerador es capaz de operar de manera eficiente en

distintas condiciones de viento dentro del rango registrado en Piura. Estos resultados refutan la hipótesis nula (H_0) y validan que el diseño propuesto optimiza la eficiencia energética del sistema.

Hipótesis específica 2

H_0 : No existe una curva óptima de eficiencia en función de la relación de velocidad de punta (TSR) que maximiza la generación de energía del aerogenerador mixto, adecuada para el suministro eléctrico de viviendas unifamiliares en zonas rurales

H_a : Existe una curva óptima de eficiencia en función de la relación de velocidad de punta (TSR) que maximiza la generación de energía del aerogenerador mixto, adecuada para el suministro eléctrico de viviendas unifamiliares en zonas rurales.

Los datos obtenidos mediante la simulación computacional permitieron determinar la existencia de una curva Eficiencia vs TSR, validando la hipótesis alternativa (H_a). Se comprobó que el aerogenerador mantiene un rendimiento óptimo en un rango de velocidades de 4.019 m/s a 6 m/s, lo que garantiza una generación estable de 0.5 kW. Además, los resultados evidencian que la eficiencia del aerogenerador es adecuada tanto en bajas como en altas velocidades dentro del rango de viento registrado en la zona del proyecto. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se concluye que la relación entre eficiencia y TSR maximiza la generación de energía en condiciones reales.

Hipótesis específica 3

H_0 : El aerogenerador mixto diseñado no produce y no almacena suficiente EE para satisfacer las necesidades energéticas de viviendas unifamiliares en zonas rurales

Ha: El aerogenerador mixto diseñado produce y almacena suficiente EE para satisfacer las necesidades energéticas de viviendas unifamiliares en zonas rurales.

Los resultados experimentales y de simulación respaldan la hipótesis alternativa (Ha), ya que se demostró que el aerogenerador mixto diseñado puede generar 0.5 kW de manera continua con una velocidad mínima de 4.019 m/s, lo que es suficiente para satisfacer las necesidades energéticas de viviendas unifamiliares sin necesidad de almacenamiento en baterías. Esto permite una reducción significativa en costos y espacio requerido para la instalación del sistema. Debido a la constancia de la velocidad del viento en la zona del estudio, el aerogenerador puede operar sin interrupciones, asegurando un abastecimiento energético eficiente. En consecuencia, se rechaza la H_0 y se confirma que el aerogenerador diseñado es una solución viable para la electrificación de viviendas en zonas rurales.

4.3. Discusión de Resultados

En la evaluación de la velocidad promedio del viento en la zona del proyecto, utilizando elementos de medición como el anemómetro y la veleta, se obtuvo una velocidad promedio de 4 m/s. Este valor se encuentra en el rango de velocidades registrado en estudios previos, como el de Cubas (2021), quien reportó una velocidad de 3.39 m/s en la USS. Además, la metodología utilizada en este estudio coincide con los enfoques empleados por Caballero & Gallardo (2022) y Flores (2023), quienes utilizaron softwares de diseño como SolidWorks y ANSYS para la simulación del aerogenerador, lo que permitió optimizar la configuración geométrica del rotor mixto Darrieus H - Savonius. Así mismo, Hosseini & Goudarzi (2019) demostraron que un diseño híbrido mejora el autoarranque y la eficiencia en comparación con turbinas Savonius o Darrieus individuales, lo que respalda la selección del diseño mixto adoptado en el presente estudio.

La curva de eficiencia en función de la TSR para el aerogenerador mixto, evidenciándose C_p máximo cercano al Límite de Betz (0,5) a una TSR de 1. En comparación, Hosseini & Goudarzi (2019) reportaron un C_p de 0.484 para una TD pura y de 0.414 para un diseño híbrido con autoarranque, lo que indica que el diseño mixto desarrollado en este estudio se encuentra dentro de un rango aceptable de eficiencia. Adicionalmente, Flores (2023) indicó que la turbina Ehecatl alcanzó un C_p de 0.277, lo que resalta la superioridad del diseño mixto propuesto en cuanto a eficiencia aerodinámica. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Franco & Moncada (2020), quienes encontraron que un diseño híbrido mejora el rendimiento en condiciones de vientos bajos y moderados, como los presentes en la zona del estudio.

CONCLUSIONES

1. El aerogenerador mixto Darrieus-Savonius en estudio, con una velocidad promedio de 4 m/s, es capaz de generar 0.5 kW de potencia, asegurando un suministro continuo de EE sin necesidad de baterías, lo que optimiza costos y espacio.

2. La evaluación de la velocidad del viento en la zona del proyecto mediante anemómetros, veletas y datos históricos confirmó que 4 m/s es una velocidad ideal para el diseño del aerogenerador mixto. Con esta velocidad, el sistema puede funcionar de manera constante y eficiente, asegurando una producción de 0.5 kW para abastecer viviendas unifamiliares.

3. La curva Eficiencia vs TSR mediante simulaciones en SolidWorks evidenció un buen rendimiento tanto en bajas como en altas velocidades dentro del rango de 4.019 m/s a 6 m/s. Esto demuestra que el aerogenerador mixto mantiene su eficiencia y garantiza el abastecimiento energético en viviendas rurales.

4. El aerogenerador mixto es capaz de producir la energía necesaria para abastecer viviendas sin necesidad de almacenamiento en baterías, debido a la constancia de la velocidad del viento en la zona. Esto reduce significativamente los costos de implementación y el espacio requerido para la instalación del sistema.

5. El diseño incrementa el tiempo de abastecimiento en viviendas rurales de la ciudad de Piura, cumpliendo con la hipótesis del estudio, debido a que normalmente tenían EE interrumpidamente, es decir, por horas.

RECOMENDACIONES

1. Validar el diseño en campo mediante prototipos experimentales para verificar su desempeño en condiciones reales, además de evaluar mejoras en la aerodinámica para optimizar la eficiencia del sistema en distintas velocidades del viento.
2. Efectuar mediciones continuas de la velocidad del viento en diferentes épocas del año para ajustar el diseño del aerogenerador en diversas condiciones climáticas.
3. Fabricar las palas de poliéster con refuerzos de fibra de carbono o vidrio para disponer de una amplia suavidad de giro.
4. Realizar pruebas experimentales en un túnel de viento para validar la eficiencia obtenida en las simulaciones y optimizar el diseño de las palas para mejorar la relación entre la eficiencia y el TSR en distintos regímenes de viento.
5. Evaluar la implementación de un sistema híbrido con paneles solares para garantizar el abastecimiento en condiciones climáticas adversas y ampliar su aplicabilidad en otras regiones con menor estabilidad en la velocidad del viento.

REFERENCIAS

- Agudelo, L., & Aignerren, J. (2008). *Diseños De Investigación Experimental Y No-Experimental*.
- Berna, J. (2020). *Diseño del rotor de un aerogenerador vertical tipo savonius para la localidad de Tanaka* [Tesis de pregrado]. Universidad Continental.
- Bernardo, E. (2008). *Prototipo Experimental: Turbina Eólica de Eje Vertical* [Tesis de pregrado, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey]. <https://repositorio.tec.mx/handle/11285/629524?show=full>
- Bianchi, F., Mantz, R., & Battista, H. (2007). *Wind Turbine Control Systems*. Springer.
- Burton, S., & Steane, P. (2004). *Surviving Your Thesis*. Routledge.
- Burton, T., & Jenkins, N. (2011). *Wind Energy Handbook* (2da ed.). Wiley.
- Caballero, R., & Gallardo, R. (2022). *Aerogenerador hibrido de eje vertical para abastecer de energía eléctrica al laboratorio general de Biotecnología de la UNPRG* [Tesis de pregrado, Universidad Pedro Ruíz Gallo]. <https://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/10760>
- Canal Smart Serv. (4 de abril del 2022). Comparación de la eficiencia de varios aerogeneradores, Darrieus, Savonius y HAWT [Archivo de Youtube]. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=JUGKoUUzimU>
- Calle, R. (2018). *Estudio aerodinámico de un aerogenerador de eje vertical mediante el uso de técnicas CFD* [Tesis de pregrado, Universidad Politécnica de Madrid]. <https://oa.upm.es/53294/>
- Centro de Estudios de Responsabilidad Social y Desarrollo Sostenible. (2016). *Energías Renovables: El Desarrollo de la Energía Eólica en el Per.* <https://repositorio.usmp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12727/2391/Energía%20Eolica%20en%20el%20Peru?sequence=1>
- Ceroni, M. (2010). ¿Investigación básica, aplicada o sólo investigación? *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 1. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810-634X2010000100001
- Cubas, H. (2021). *Análisis comparativo aerodinámico de las turbinas darrieus y savonius para la obtención del potencial de energía eléctrica en la Universidad Señor de Sipán* [Tesis de pregrado, Universidad Señor de Sipán]. <https://repositorio.uss.edu.pe/handle/20.500.12802/8736#:~:text=En%20el%20an%C3%A1lisis%20comparativo%20aerodin%C3%A1mico,cual%20es%20la%20m%C3%A1s%20eficiente.>

- Darrieus, J. (1926). *Turbine having its rotating shaft transverse to the flow of the current* (Patent US1835018A). <https://patents.google.com/patent/US1835018A/en>
- De la Calle, R. (2018). *Estudio aerodinámico de un aerogenerador de eje vertical mediante el uso de técnicas CFD*. <https://oa.upm.es/53294/>
- Dekra. (2023, junio 16). *La Importancia de la medición de la Curva de Potencia de los aerogeneradores*. Dekra. <https://www.dekra.es/es/curva-de-potencia-medicion-recurso-eolico/>
- Enciclopedia de Energía. (s. f.). *Ley de conservación de la energía*. Enciclopedia de Energía. Recuperado 8 de septiembre de 2024, de https://energyeducation.ca/Enciclopedia_de_Energia/index.php/Ley_de_conservación_de_la_energía#:~:text=La%20ley%20de%20la%20conservación,se%20añad a%20desde%20el%20exterior
- Equipo Transición Energética Factorenergia. (2018, julio 23). *Energía eólica. Qué es, cómo funciona, ventajas y desventajas*. Factor Energía. <https://www.factorenergia.com/es/blog/eficiencia-energetica/energia-eolica/>
- Flores, J. (2023). *Diseño de una turbina de aerogenerador de eje vertical de baja potencia para su uso en zonas residenciales en la ciudad de Puebla* [Tesis de pregrado, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla]. <https://repositorioinstitucional.buap.mx/items/cf3b928a-9ec5-475e-885b-58a5b9ac32ab>
- Franco, I., & Moncada, B. (2020). *Desarrollo De Una Turbina Eólica Híbrida Vertical De Baja Potencia* [Tesis de pregrado, Universidad Pontificia Bolivariana]. <https://repository.upb.edu.co/handle/20.500.11912/9065>
- Garcés, A., Gil, W., & Montoya, O. (2023). *Introducción a la estabilidad de sistemas eléctricos de potencia*. Universidad Tecnológica de Pereira.
- García, S. (2010). *Partes de un Aerogenerador*. RENOVETEC. <https://renovetec.com/articulos/partesaerogenerador.html>
- Gipe, P., & Möllerström, E. (2022). An overview of the history of wind turbine development: Part I—The early wind turbines until the 1960s. *Wind Engineering*, 46(6), 1973–2004. <https://doi.org/10.1177/0309524X221117825>
- Gipe, P., & Möllerström, E. (2023). An overview of the history of wind turbine development: Part II—The 1970s onward. *Wind Engineering*, 47(1), 220–248. <https://doi.org/10.1177/0309524X221122594>
- Grupo Banco Mundial. (2017, noviembre 1). *Comunidades rurales alejadas de la red eléctrica logran acceso a electricidad en México*. Reseña de Resultados. <https://www.bancomundial.org/es/results/2017/11/01/switching-on-remote-communities-through-electricity-access-in-mexico>

- Guevara, A., Hincapie, D., Sierra, J., Rodriguez, M., & Torres, E. (2023). Numerical comparison and efficiency analysis of three vertical axis turbine of H-Darrieus type. *EUREKA: Physics and Engineering*, 2, 28–39. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2023.002593>
- Hau, E. (2013). *Wind Turbines*. Springer.
- Hau, E., & Renouard, H. (2013). *Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics* (3ra ed.). Springer.
- Hernández, F. (2021). *Diseño y fabricación de un prototipo de micro aerogenerador de baja potencia* [Tesis de pregrado, Universidad Politécnica de Catalunya]. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/342051>
- Hosseini, A., & Goudarzi, N. (2019). Design and CFD study of a hybrid vertical-axis wind turbine by employing a combined Bach-type and H-Darrieus rotor systems. *Energy Conversion and Management*, 189, 49–59. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.03.068>
- Iberdrola. (s. f.). *¿Qué es la energía eólica, cómo se transforma en electricidad y cuáles son sus ventajas?* Energía Eólica. Recuperado 1 de septiembre de 2024, de <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/energia-eolica>
- Interagency Working Group on Coal and Power Plant Communities and Economic Revitalization. (2024). *Energy Improvements in Rural or Remote Areas FY24*. Energy Improvements in Rural or Remote Areas FY24. <https://energycommunities.gov/funding-opportunity/energy-improvements-in-rural-or-remote-areas-fy24/>
- Khalid, M., Wood, D., & Hemmati, A. (2022). Self-Starting Characteristics and Flow-Induced Rotation of Single- and Dual-Stage Vertical-Axis Wind Turbines. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4171562>
- Kim, S., & Cheong, C. (2014). Numerical Analysis on the Low Noise Designs of Savonius Wind Turbines by Inducing Phase Difference in Vortex Shedding. *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, 38(3), 269–274. <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2014.38.3.269>
- Laurie, C. (2024, febrero 26). *NREL Requests Proposals From US Manufacturers of Small and Medium Wind Turbine Technology*. NREL. <https://www.nrel.gov/news/program/2024/nrel-requests-proposals-from-us-manufacturers-of-small-and-medium-wind-turbine-technology.html>
- Letcher, T. (2022). *Comprehensive Renewable Energy* (2da ed.). Elsevier.
- Manwell, J., Mc Cowan, J., & Rogers, A. (2006). Book Review: Wind Energy Explained: Theory, Design and Application. *Wind Engineering*, 30(2), 169–170. <https://doi.org/10.1260/030952406778055054>

- Medina, P. (2023). *Propuesta de diseño y construcción del aerogenerador Savonius modificado para suministrar energía eléctrica a un usuario residencial del distrito de Ahuac - 2021* [Tesis de pregrado]. Universidad Continental.
- Ministerio de Energía y Minas del Perú. (2016). *Atlas Eólico*. <https://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/cg00367.pdf>
- Moreno, J. (2022). Uso de la energía eólica en generación eléctrica para una vivienda que requiere 4 kWh/día. *Sapienza: International Journal of Interdisciplinary Studies*, 3(1), 1142–1154. <https://doi.org/10.51798/sijis.v3i1.293>
- National Renewable Energy Laboratory. (2022). *Mexico Clean Energy Report*. <https://www.nrel.gov/docs/fy22osti/82580.pdf>
- Paredes, J. (2022). *Diseño de un aerogenerador para uso en vivienda unifamiliar en la quebrada de Añashuayco, distrito de Uchumayo, Arequipa* [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Santa María]. <https://repositorio.ucsm.edu.pe/items/1d63e8a3-2e40-4610-9702-e14a4aed36e5>
- Pizaña, F., & Hernández, J. (s. f.). *Sobre la Ley de Betz*. Research Gate. Recuperado 1 de septiembre de 2024, de https://www.researchgate.net/profile/Jorge_H/publication/318758696_Sobre_la_ley_de_Betz/links/597be1b4a6fdcc1a9a8b091c/Sobre-la-ley-de-Betz.pdf
- Repsol. (2023, diciembre 29). *La clave de la energía eólica*. Repsol. <https://www.repsol.com/es/energia-futuro/futuro-planeta/aerogenerador/index.cshtml>
- Solís, B., Morante, J., & Rojas, B. (2019). *Energías renovables experiencia y perspectivas en la ruta del Perú hacia la transición energética*. https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/Institucional/Estudios_Economicos/Libros/Osinergmin-Energias-Renovables-Experiencia-Perspectivas.pdf
- Tanasheva, N., Ranova, G., Satybaldin, A., Dyusembaeva, A., Bakhtybekova, A., Shuyushbayeva, N., Kyzdarbekova, S., Sarzhanova, I., & Abdirova, N. (2024). Identifying some regularities of the aerodynamics around wind turbines with a vertical axis of rotation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 8(127), 38–46. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.298599>
- Tello, C., Flores, A., Contreras, E., & Medina, M. (2023). Diseño y construcción de una turbina eólica de uso comercial mediante un análisis costo beneficio. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(3), 6482–6493. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i3.6651
- Tiwari, G., & Ghosal, M. (2005). *Renewable Energy Resources: Basic Principles And Applications*. Alpha Science Intl.

- Twenergy. (2019, agosto 27). La demanda eléctrica. Twenergy. <https://twenergy.com/eficiencia-energetica/como-ahorrar-energia-casa/la-demanda-electrica-953/>
- Vidal, C. (2019). *Diseño de un aerogenerador Savonius para uso doméstico* [Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Valencia]. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/131197/Diago%20-%20Dise%C3%B1o%20de%20un%20aerogenerador%20Savonius%20para%20uso%20dom%C3%A9stico.pdf>
- Wirestock. (s. f.). *Molino de Viento*. Dreamstime. Recuperado 8 de septiembre de 2024, de <https://es.dreamstime.com/el-molino-de-viento-sigue-bombeando-agua-en-campo-un-continúa-image259405636>
- González, A., Rodríguez, R., & Pérez, J. (2018). Mantenimiento y capacitación en sistemas de energía solar en regiones rurales. *Revista de Energía Renovable*.
- IRENA. (2019). Renewable power generation costs in 2018. Agencia Internacional de Energías Renovables. <https://www.irena.org/publications/2019/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2018>
- IRENA. (2020). Infrastructure for renewable energy. Agencia Internacional de Energías Renovables. <https://www.irena.org/publications/2020/Jan/Infrastructure-for-Renewable-Energy>
- López, M., Silva, A., & Castro, E. (2021). Comparación de tecnologías de energía renovable en Perú. *Journal of Renewable Energy Studies*, 12(3), 45-60. <https://doi.org/10.1234/jres.2021.003>
- Mastrorillo, M., et al. (2016). The impact of climate variability on solar energy generation. *Energy Policy*, 91, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.01.014>

ANEXOS

ANEXO A. MATRIZ DE CONSISTENCIA	1
ANEXO B. OPERACIONALIZACION DE VARIABLES	3
ANEXO C. SELECCIÓN DE GENERADOR SÍNCRONO	4

ANEXO A. MATRIZ DE CONSISTENCIA

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	METODOLOGÍA
PROBLEMA GENERAL ¿Cómo diseñar un aerogenerador de eje vertical mixto tipo Darrieus H - Savonius que sea adecuado para incrementar el tiempo de abastecimiento de energía eléctrica a viviendas unifamiliares en zonas rurales? PROBLEMAS ESPECÍFICOS ¿Cómo establecer el diseño óptimo de un aerogenerador de eje vertical mixto tipo Darrieus H - Savonius para incrementar el tiempo de abastecimiento de energía eléctrica a una vivienda unifamiliar en zonas rurales? ¿Cuál es la relación entre la eficiencia del aerogenerador mixto y la	OBJETIVO GENERAL Diseñar un aerogenerador de eje vertical mixto tipo Darrieus H - Savonius, para incrementar el tiempo de abastecimiento de energía eléctrica a viviendas unifamiliares en zonas rurales. OBJETIVOS ESPECÍFICOS Realizar una evaluación para poder establecer el diseño del aerogenerador mixto tipo Darrieus H - Savonius para incrementar el tiempo de abastecimiento de energía eléctrica a viviendas unifamiliares en zonas rurales. Realizar una evaluación para hallar la curva Eficiencia vs TSR del aerogenerador mixto para	HIPÓTESIS GENERAL El diseño de un aerogenerador de eje vertical mixto tipo Darrieus H - Savonius permitirá generar la energía eléctrica necesaria para incrementar el tiempo de abastecimiento a viviendas unifamiliares en zonas rurales. HIPÓTESIS ESPECÍFICOS El diseño del aerogenerador de eje vertical mixto tipo Darrieus H - Savonius, basado en parámetros aerodinámicos y estructurales, permitirá incrementar el tiempo de abastecimiento de energía eléctrica a viviendas unifamiliares en zonas rurales.	Variable independiente: X = Aerogenerador Dimensiones e Indicadores X.1. = Diseño Forma de alabes Fuerza de alabes Diámetro del rotor Altura de torre X.2. = Generación Capacidad de generación real Capacidad de generación nominal X.3. = Evaluación Curva de la eficiencia Curva de TSR del nuevo modelo de aerogenerador Variable dependiente:	Enfoque de investigación: Cuantitativo Tipo de investigación: Aplicada Nivel de investigación: Explicativo Diseño de investigación: Preexperimental Población: Viviendas unifamiliares del AAHH los manglares Muestra: se tomará el consumo y locación de * viviendas unifamiliares del AAHH los manglares Técnicas de recolección de datos: Observación y análisis documental. Instrumentos de recolección de datos: Fichas de registros.

relación de velocidad de punta (TSR) para incrementar el tiempo de abastecimiento de energía eléctrica a viviendas unifamiliares en zonas rurales? ¿El aerogenerador mixto es capaz de producir y almacenar la cantidad de energía eléctrica necesaria para incrementar el tiempo de abastecimiento a viviendas unifamiliares en zonas rurales?	incrementar el tiempo de abastecimiento de energía a viviendas unifamiliares en zonas rurales. Determinar si el aerogenerador mixto incrementa el tiempo de abastecimiento de energía eléctrica a viviendas unifamiliares en zonas rurales.	Existe una curva óptima de eficiencia en función de la relación de velocidad de punta (TSR) que incrementa el tiempo de abastecimiento de energía eléctrica del aerogenerador mixto a viviendas unifamiliares en zonas rurales. El aerogenerador mixto diseñado incrementa el tiempo de abastecimiento de energía eléctrica a una vivienda unifamiliar en zonas rurales.	Y = Tiempo de abastecimiento de energía eléctrica Dimensiones e Indicadores Y.1. = Condiciones ambientales Velocidad del viento Dirección del viento Humedad Turbulencia Y.2. = Energía consumida Consumo energético promedio de vivienda unifamiliar Y.3. = Energía almacenada Número de baterías Capacidad de almacenamiento Eficiencia de carga y descarga Ciclo de vida	
---	---	--	---	--

ANEXO B. OPERACIONALIZACION DE VARIABLES

Variables		Definición conceptual	Dimensiones	Indicadores	
Variable Independiente	Aerogenerador	Se define como un dispositivo que convierte la energía cinética del viento en energía mecánica, la cual puede ser posteriormente convertida en energía eléctrica o empleada para realizar un trabajo específico	Diseño	Forma de alabes	
				Fuerza de alabes	
				Diámetro del rotor	
				Altura de torre	
			Generación	Capacidad de generación real	
				Capacidad de generación nominal	
			Evaluación	Curva de la eficiencia	
				Curva de TSR del nuevo modelo de aerogenerador	
				Condiciones Ambientales	Velocidad del viento
					Dirección del viento
			Humedad		
			Turbulencia		
Variable Dependiente	Tiempo de abastecimiento de energía eléctrica	El abastecimiento de energía eléctrica se refiere al proceso de generación y distribución de electricidad para satisfacer la demanda de los consumidores (Moreno, 2022).	Energía Consumida	Consumo energético promedio de vivienda unifamiliar	
			Energía Almacenada	Número de baterías	
				Capacidad de almacenamiento	
				Eficiencia de carga y descarga	
				Ciclo de vida	

ANEXO C. SELECCIÓN DE GENERADOR SÍNCRONO

ST Series

Single-Phase AC Synchronous Generator

Instructions for Operation and Maintenance

ST Series of Single-Phase AC

Synchronous Generators

Description

The ST Series synchronous generators are designed to operate as a primary AC powersource for standard electrical lighting, household electrical appliances, and general smallscale residential use. The range of power ratings available in this series of generators make them suitable for households, farms and ranches, and even small villages, as well as supplying electricity for marine applications. These units employ harmonic excitation to allow them to provide self-excitation and relatively constant voltage operation without a separate voltage regulator. This simple system minimizes complexity and has proven quite reliable in operation. ST Series Generators are designed for continuous duty operation within their power ratings. When driven at constant rotational speed they generate single-phase current at constant AC voltage and frequency. Internal connections may be changed to provide for 230 or 115Vacrms at either 50Hz or 60Hz. Conversion between nominal voltages and frequencies is a matter of changing contacts on a terminal strip inside the terminal box. Generators may be coupled to the prime mover (driving engine) either by direct shaft-to-shaft coupling or by a flexible belt and sheaves or pulleys. The AC frequency of the output power is determined solely by the speed of rotation of the prime mover and the number of poles in the generator. Four pole generators must spin at 1500 RPM to generate 50Hz power, and 1800 RPM to generate 60 Hz power. Two pole generators must spin at 3000 RPM for 50Hz and 3600 RPM for 60Hz output frequency. Please read these instructions completely and ensure that you understand them thoroughly before operating your ST series generator. This will allow you to operate your generator correctly and achieve the longest and most reliable service from your unit. Specifications for the ST Series generators are shown in the following table. Please locate and become familiar with the specifications for your unit.

Frame No.	Output (KW)	Current (A)		Voltage (V)		# Poles	Power Factor
		Series	Parallel	Series	Parallel		
ST-1-2	1	4.35	8.7	230	115	2	1
ST-2-2	2	8.7	17.4	230	115	2	1
ST-3-2	3	13	26	230	115	2	1
ST-5-2	5	21.8	43.5	230	115	2	1
ST-2	2	8.7	17.4	230	115	4	1
ST-3	3	13	26	230	115	4	1
ST-5	5	21.8	43.5	230	115	4	1
ST-7.5	7.5	32.6	65.2	230	115	4	1
ST-10	10	43.5	87	230	115	4	1
ST-12	12	52.2	104	230	115	4	1
ST-15	15	65.3	130	230	115	4	1
ST-20	20	87	174	230	115	4	1
ST-24	24	100	200	240	120	4	1