

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA



Tesis

**“Diseño Y Construcción De Un Aerogenerador Tripala De Tres
Metros De Diámetro Y De 500 Watts De Potencia”**

Para Obtener el Título Profesional de Ingeniero Mecánico

Elaborado Por

John Mario Segovia Chirinos

0009-0007-2959-6484

Asesor

MSc. Rafael Leonardo Espinoza Paredes

0000-0002-8281-8476

LIMA – PERÚ

2024

Dedicatoria

*Dedico y agradezco a mis padres por todo su apoyo
a lo largo de mi vida, este trabajo es en parte para
recompensar su esfuerzo y dedicación.*

*Gracias a mis hermanos y familia que siempre me
tuvieron en la mejor consideración, así como a mis
amigos y colegas que supieron sacar lo mejor de mí.*

John Mario Segovia Chirinos

Lista de Contenido

	Pág.
Lista de Contenidos	III
Lista de Tablas.....	V
Lista de Figuras.....	VI
Índice de Ecuaciones.....	VII
Resumen	VIII
Abstract	IX
Introducción	X
Prologo	XI
Capítulo I	1
Generalidades	1
1.1 Antecedentes de la Investigación.....	1
1.2 Identificación Descripción del Problema de Investigación.....	7
1.3 Formulación del Problema.....	8
1.3.1 Problema General.....	8
1.3.2 Problemas Específicos.....	8
1.4 Justificación e Importancia de la Investigación.....	8
1.5 Objetivo del Estudio.....	8
1.5.1 Objetivo General	8
1.5.2 Objetivos Específicos.....	9
1.6 Alcance.....	9
1.7 Exclusiones.....	9
1.8 Hipótesis.....	10
1.8.1 Hipótesis General.....	10
1.8.2 Hipótesis Específicas.....	10
1.9 Metodología de la Investigación.....	10
1.9.1 Tipo, Enfoque y Nivel de la Investigación.....	10
1.9.2 Diseño de investigación	11
1.10 Proceso Experimental.....	12
Capítulo II	14
Marco Teórico y Conceptual	14
2.1 Marco Teórico.....	14
2.2 Marco Conceptual.....	14
2.2.1 Aerogenerador.....	14
2.2.2 Potencia Contenida en el Viento.....	17
2.2.3 Coeficiente de Betz.....	18

2.2.4 Energía Eólica.....	19
2.2.5 Cortaviento.....	20
2.2.6 Potencia, Torque y Velocidad angular.....	21
CAPITULO III.....	35
Desarrollo del Trabajo de Investigación	35
3.1 Características Técnicas.....	35
3.1.1 Diseño del Rotor Eólico.....	35
CAPITULO IV	45
CONSTRUCCION Y MONTAJE DE LA TURBINA EOLICA	45
4.1 De Los Materiales.....	45
4.2 Construcción De Las Secciones De La Pala.....	45
4.3 Unión De Las Secciones.....	48
4.4 Forrado De Las Palas.....	51
4.5 Formación Del Rotor.....	53
CAPITULO V	56
PRUEBAS Y RESULTADOS	56
5.1 Cálculos Relacionados:.....	56
5.2 Potencia Eléctrica A La Salida Del Generador.....	57
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	64
ANEXOS.....	1
ANEXO 1 MATRIZ DE CONSISTENCIA.....	1

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1: Tabla de Selección del Número de Palas y Ratio de Velocidad	38
Tabla 2: Radio, Celeridad Local, Cuerda, Celeridad local, ángulo de flujo	43
Tabla 3: Resultados Potencia Ideal y Real, Eficiencia, Velocidad del viento	58

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1: Generador Eólico de Eje Horizontal.....	16
Figura 2: Capas de la Atmosfera	20
Figura 3: Torque a baja velocidad	23
Figura 4: Coeficiente de Potencia en Alta y Baja Velocidad	24
Figura 5: Coeficiente de Torque en Alta y Baja Velocidad	25
Figura 6: Interacción del Viento con un Perfil Aerodinámico.....	26
Figura 7: Geometría de un Perfil Aerodinámico	28
Figura 8: Efecto de Relación y Coeficiente Máximo de Potencia	29
Figura 9: Coeficiente de Potencia Ideal y Para Diferente Numero de Palas	30
Figura 10: Cd/ Cl (Coeficiente de Arrastre/ Coeficiente de Sustentación)	32
Figura 11: Cl/Cd Para Diferentes Perfiles en Función del Número de Reynolds.....	32
Figura 12: Numero de Reynolds en función del Ratio de Velocidad.....	34
Figura 13: Descripción Geométrica de Perfiles Aerodinámicos.....	36
Figura 14: Ratio de Velocidad vs Cp Para Distinto Numero de Helices o Palas.....	37
Figura 15: Cl y Cd Según el Angulo de Ataque (α).....	38
Figura 16: Coeficiente de Potencia Respecto del Ratio de Velocidad de Punta Para Diferentes Cd/Cl	40
Figura 17: Dibujo de los Perfiles en una Vista de Planta	46
Figura 18: Secciones Corte de Madera	47
Figura 19: Secciones Huecas.....	47
Figura 20: Secciones a lo Largo del Perfil de Acero	49
Figura 21: Sección a lo Largo del Perfil de Acero	50
Figura 22: Palas Aun sin Forrar	51
Figura 23: Pala Parcialmente Forrada	52
Figura 24: Tres Palas Forradas.....	53
Figura 25: Rotor Eólico	54
Figura 26: Turbina Eólica	55
Figura 27: Eficiencia de la Turbina en los Diferentes Días de Prueba	59
Figura 28: Potencia Real en los Diferentes Días de Prueba	59
Figura 29: Anemómetro con Velocidad de Viento 7.8 m/s.....	60
Figura 30: Anemómetro con Velocidad de Viento 7.4 m/s.....	60
Figura 31: Anemómetro con Velocidad de Viento 7.9 m/s.....	61

Índice de Ecuaciones

	Pág.
Ecuación 1: Ecuación de energía.....	17
Ecuación 2: Ecuación la Energía en función de la densidad	18
Ecuación 3: flujo de viento:	18
Ecuación 4: Potencia Traída por el Viento.	18
Ecuación 5: Coeficiente de Betz (Porcentaje máximo de Potencia).	19
Ecuación 6: Logarítmico del cortador de vientos.....	21
Ecuación 7: potencia P(W).....	22
Ecuación 8: Coeficiente de potencia.....	23
Ecuación 9: Coeficiente de Torque	24
Ecuación 10: Ratio de velocidad local:	25
Ecuación 11: Ratio de velocidad de punta:	25
Ecuación 12: Coeficiente de sustentación:	27
Ecuación 13: Coeficiente de arrastre:	27
Ecuación 14: El número de Reynolds es:.....	34
Ecuación 15: Cuerda (c):	42
Ecuación 16: Angulo de la cuerda	42
Ecuación 17: Potencia obtenida por voltaje y corriente.	57

Resumen

Mi presente trabajo de investigación tiene como título de Tesis: Diseño y construcción de un aerogenerador tripala de tres metros de diámetro y de 500 watts de potencia. Teniendo como objetivo general de esta investigación el diseño y construcción de un generador eólico tripala de eje horizontal con un diámetro de tres metros, capaz de generar una potencia mínima de 500 watts.

Este proyecto se basará en los conocimientos y la experiencia adquirida durante la carrera de Ingeniería Mecánica en la Universidad Nacional de Ingeniería, con una metodología de investigación aplicada, ya que se busca desarrollar una solución práctica y funcional a un problema real, el nivel de investigación del estudio es a nivel de pregrado, orientado a estudiantes de Ingeniería Mecánica, y el enfoque es experimental, lo que implica la realización de pruebas y experimentos para validar el diseño y la construcción del generador eólico.

El proyecto abordará la problemática de la falta de suministro eléctrico en áreas rurales de la provincia de La Unión, Arequipa, proporcionando una alternativa sostenible y económica mediante el uso de energía eólica. Se espera que este generador no solo brinde las comodidades básicas de la electricidad, sino que también potencie el desarrollo local al permitir el uso de herramientas y equipos eléctricos. La implementación de esta tecnología podría reducir la dependencia de combustibles fósiles y disminuir los costos asociados al transporte de estos combustibles a zonas remotas. En conclusión, el desarrollo y construcción de este generador eólico representa una contribución significativa al aprovechamiento de energías renovables, destacando sus beneficios ambientales y económicos, y promoviendo una mayor independencia energética en comunidades aisladas.

Abstract

My present research work has the title of Thesis: Design and construction of a three-blade wind generator with three meters in diameter and 500 watts of power. The general objective of this research is to design and build a three-blade horizontal axis wind generator with a diameter of three meters, capable of generating a minimum power of 500 watts.

This project will be based on the knowledge and experience acquired during the Mechanical Engineering degree at the National University of Engineering, with an applied methodology of Research, since it seeks to develop a practical and functional solution to a real problem, the level of research of the study is carried out at the undergraduate level, aimed at Mechanical Engineering students, the approach is experimental, which involves carrying out tests and experiments to validate the design and construction of the wind generator.

The project will address the problem of the lack of electricity supply in rural areas of the province of La Unión, Arequipa, providing a sustainable and economic alternative through the use of wind energy. This generator is expected to not only provide the basic amenities of electricity but also boost local development by enabling the use of power tools and equipment. The implementation of this technology could reduce dependence on fossil fuels and reduce the costs associated with transporting these fuels to remote areas. In conclusion, the development and construction of this wind generator represents a significant contribution to the use of renewable energy, highlighting its environmental and economic benefits, and promoting greater energy independence in isolated communities.

Introducción

Una de las fuentes de energía más abundantes y prácticamente inagotables es el viento, es decir la energía cinética del aire en movimiento, además es una de las primeras fuentes de energía en ser conocida por el hombre.

Los barcos de vela fueron por mucho tiempo la forma más común de utilización de la energía eólica, y en el siglo XX las formas más comunes fueron los molinos para moler granos y bombear agua.

En la actualidad y desde ya varios años la energía eólica se puede convertir a energía eléctrica mediante rotores eólicos acoplados a generadores. Estos se usan sobre todo para sitios apartados de las ciudades como granjas o estancias.

Por otro lado, hay un interés mundial en incrementar el uso de la energía eólica por ser una energía renovable y por qué el calentamiento global está presionando a los países a fijarse en este tipo de energía.

Prologo

La situación mundial respecto a la energía es preocupante, debido a que en la actualidad nuestras principales fuentes son los combustibles fósiles, que son finitos y por tanto serán más escasos cada vez y por ende también más caros, para evitar una dependencia tan fuerte sobre los combustibles fósiles debemos ir migrando a energías renovables, que además son limpias relativamente hablando.

Con la llegada de los autos eléctricos, la energía eléctrica será más demandada y por ende su precio se incrementará y en nuestro país tenemos un déficit de oferta energética, es decir no basta con la llegada de autos o tecnologías que nos permitan aprovechar más la electricidad, sino que también hace falta la infraestructura que nos permita satisfacer esa demanda energética.

Para tener como dato el porcentaje actual de la energía producida provenientes de fuentes renovables en nuestro país es de 6% aproximadamente, y no hay un avance significativo en este campo, es decir no está en marcha grandes proyectos que hagan que ese porcentaje suba, si bien es cierto sobre el papel ese porcentaje debería subir alrededor de 30% para el 2030, pero faltando solo 6 años, es inviable que esa meta se cumpla.

Este trabajo busca como resultado el diseño y construcción (fabricación) de un aerogenerador tripala con un diámetro de tres metros que produzca una potencia de 0.5 Kw. Con fines de cubrir necesidades de electricidad doméstica, la turbina (rotor eólico) estará acoplado a un generador monofásico que no será objeto de diseño en este trabajo.

En nuestro país lamentablemente no se está dando la debida importancia a la energía eólica, que puede significar la solución para zonas alejadas y rurales. Dado que es mucho más barato tener un generador eólico de capacidad doméstica que optar por el cableado hasta la red que está muy alejada de las comunidades y caseríos altoandinos.

El primer capítulo son las generalidades, este capítulo trata sobre la finalidad de este trabajo de tesis, en el cual se explica la situación actual con respecto a la energía y sus fuentes finitas en su mayoría.

El segundo capítulo es el marco teórico y conceptual, el cual contiene los conceptos, definiciones y teoría necesaria para el desarrollo y diseño del generador eólico, como por ejemplo el máximo aprovechamiento teórico que se puede obtener del viento, independientemente del tipo de máquina que se use, que viene a ser el llamado coeficiente de Betz.

El tercer capítulo es sobre el diseño del rotor eólico, el cual contiene el diseño de cada parte del rotor eólico, como por ejemplo las palas del rotor y sus distintas posiciones en sus secciones dependiendo de su alejamiento del eje, así como los parámetros iniciales de diseño, como velocidad del viento, densidad del aire, etc.

El cuarto capítulo es sobre la construcción y montaje de la turbina eólica, aquí se desarrolla los métodos aplicados en este trabajo para lograr unas palas de la turbina lo más cercanas a la teoría y que sean utilizables en el campo.

El quinto capítulo es sobre las pruebas y resultados, aquí se muestran los resultados obtenidos tanto de la construcción, es decir cómo queda el rotor montado y los resultados de los materiales, es decir de la uniformidad y resistencia de las hélices, como de los resultados de potencia obtenida de la turbina en funcionamiento.

Capítulo I

Generalidades

Este capítulo ofrece una introducción al fascinante mundo de la generación de electricidad a partir del viento. Se inicia con una mirada a los antecedentes y la evolución de los generadores eólicos, esos gigantes que transforman la brisa en energía. A continuación, se presenta un resumen de la energía eólica, explorando sus principios fundamentales y sus diversas aplicaciones. Finalmente, se profundiza en el tema central de este proyecto de titulación: los generadores eólicos de eje horizontal, una tecnología innovadora con un gran potencial para aprovechar la energía del viento de manera eficiente y sostenible.

1.1 Antecedentes de la Investigación

La reducción de las fuentes de energía tradicionales como el carbón y el petróleo está llevando a un aumento en los precios de los combustibles y otras energías que dependen de estos recursos. Desde la llegada de la tercera revolución industrial hace algunos años, el uso de energías alternativas ha crecido, incrementando así su demanda. Estas energías alternativas buscan limitar la emisión de gases de efecto invernadero. La principal ventaja de las energías alternativas es que no emiten CO₂, aunque tienen una capacidad de generación limitada. En resumen, las energías alternativas no contaminan la atmósfera ni consumen combustibles fósiles. (Cueva Barrozueta, 2015)

Tenemos como antecedentes internacionales:

Wang, et al (2024) en su artículo científico sostiene como objetivo general, revisar exhaustivamente el modelado de estela en turbinas eólicas (WT) para entender sus fortalezas y limitaciones, con el fin de desarrollar modelos más precisos y rentables que mejoren el diseño y control de parques eólicos. Metodología, la investigación realiza una

revisión exhaustiva del proceso de evolución de los modelos de estela de WT, analizando diferentes métodos de modelado y explorando sus leyes de evolución. Se categoriza y compara los modelos de estela en función de las características ambientales de parques eólicos complejos, tanto en terrenos montañosos como en aguas profundas, y las características estructurales de las WT. Además, se analizan las investigaciones recientes sobre la aplicación práctica de estos modelos en el diseño y construcción de parques eólicos, y se discuten posibles mejoras y estrategias para superar las limitaciones inherentes a los estudios actuales. Resultados, La revisión destaca la importancia del efecto de estela en el rendimiento de las WT y su impacto en el diseño y aplicación de parques eólicos. Se identifican las fortalezas y limitaciones de los modelos actuales y se proponen estrategias para mejorar la precisión y rentabilidad de los modelos de estela. Además, el análisis sistemático proporciona una comprensión más profunda de los efectos de estela, promoviendo un mayor desarrollo en la tecnología de la energía eólica.

Cheng, et.al , (2024) tiene como objetivo general El estudio tiene como objetivo desarrollar un marco de optimización inteligente para el diseño de torres de turbinas eólicas híbridas de acero y hormigón, que combine alta rigidez y bajo coste integral, enfrentando los desafíos de baja eficiencia de trabajo y trabajo repetitivo en el diseño actual. Metodología: Se desarrolló un marco de optimización inteligente basado en análisis de elementos finitos (FE) paramétricos y algoritmos evolutivos. Las variables de optimización incluyeron los radios de la torre, espesores, altura del segmento de hormigón y el área de cordones de acero pretensado. El modelo matemático de optimización consideró restricciones de diseño y factores de construcción, utilizando el programa OpenSees para establecer un modelo de FE refinado y un proceso de modelado paramétrico. Se implementaron algoritmos de optimización eficientes, específicamente el algoritmo genético y el algoritmo de evolución diferencial, y se desarrolló una interfaz gráfica de usuario (GUI) para conectar los diferentes módulos del modelo. Resultados: El estudio aplicó el marco de optimización a una torre híbrida de acero y hormigón de 5 MW con una

altura de buje de 160 m. El diseño de optimización inteligente logró reducir el coste total de construcción en aproximadamente un 11 % en comparación con el diseño de optimización manual convencional, cumpliendo todas las limitaciones de diseño. Los resultados demostraron que el marco de diseño de optimización inteligente puede proporcionar de manera eficaz y precisa un excelente diseño de la estructura de torre híbrida.

El estudio de **Gui et al. (2023)** se centra en el diseño de una pequeña turbina eólica de eje horizontal con conducto de aire, destinada a ser utilizada en entornos subterráneos de minas de carbón, Metodología: Se analizó el rendimiento aerodinámico del aerogenerador mediante la construcción de un modelo sólido tridimensional. La investigación evaluó cómo el flujo de aire se comporta al ingresar al conducto y cómo esto afecta la velocidad y presión cerca del impulsor. Resultados. los resultados indicaron que, bajo condiciones de baja velocidad del viento, el conducto de aire acelera y rectifica el flujo, aumentando la velocidad cerca del impulsor y creando una zona de presión negativa en el extremo trasero, lo cual es favorable para el funcionamiento de la turbina. Se observó que la presión en el extremo frontal de las palas es mayor que la presión atmosférica, lo que mejora la estabilidad del flujo de viento. Además, se determinó que la turbina con conducto de aire tiene una mejor conversión de energía y mayor potencia de salida en comparación con la turbina sin conducto de aire, especialmente en condiciones de bajo número de Reynolds. El perfil aerodinámico NACA5505 se destacó como el más adecuado para estos entornos. La investigación proporciona una base técnica para el suministro continuo de energía a sensores inalámbricos en minas y ofrece beneficios económicos y sociales a largo plazo.

Rubio, (2024) sostiene en su tesis como objetivo general ; Estudiar las tecnologías de producción de hidrogeno verde viable para su uso en el contexto ecuatoriano, utiliza un enfoque metodológico basado en el análisis de viabilidad técnica y económica de

diferentes tecnologías de producción de hidrógeno verde. Se llevan a cabo estudios de caso y se analizan experiencias internacionales exitosas en la implementación de sistemas de generación distribuida de energía. La investigación incluye la evaluación de recursos renovables disponibles en Ecuador, como la energía solar y eólica, y su potencial para la producción de hidrógeno verde. Se utiliza un enfoque interdisciplinario que combina técnicas de modelado energético, análisis de ciclo de vida y estudios de viabilidad económica para identificar las mejores prácticas y tecnologías aplicables al contexto ecuatoriano.

Antecedentes nacionales

Suárez (2021) sostiene en su tesis como objetivo general, Diseñar un aerogenerador eólico para cubrir la demanda eléctrica al laboratorio de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Nacional de Jaén.

Metodología, la investigación realizada es de tipo aplicada con un nivel descriptivo, utilizando un diseño de campo y gabinete, lo cual implica un enfoque no experimental .Ubicación: El proyecto se llevó a cabo en las instalaciones de la Universidad Nacional de Jaén, situada en Jr. Cuzco N° 250 – Esq. con Calle Antisuyo – Pueblo Libre – Jaén – Cajamarca – Perú, con coordenadas 5°42'00.6"S 78°48'35.1"W. Resultados, la velocidad promedio del viento en la zona es de 1.03 m/s, con una probabilidad del 70% de alcanzar 0.7 m/s. Durante un año, la demanda total de energía del laboratorio de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Nacional de Jaén se calcula en 423,198 kWh/año.

Medina (2023) establece como objetivo principal, determinar cómo el diseño y la construcción de un aerogenerador Savonius, modificado afecta la energía eléctrica proporcionada a un usuario residencial en el distrito de Ahuac durante el año 2021. La metodología empleada incluye el método científico deductivo, y se trata de una investigación aplicada y descriptiva de nivel descriptivo-correlacional,

con un diseño de investigación no experimental de tipo transversal correlacional. Se utilizó el software Solidworks para el diseño y la simulación, permitiendo observar el comportamiento del aerogenerador Savonius modificado bajo las velocidades de viento registradas por la estación Lamar, ubicada en el centro poblado de Huayao.

Los resultados mostraron que, al evaluar el aerogenerador construido, se obtuvieron datos del sistema de monitoreo como voltaje, corriente, RPM y velocidad del viento. La velocidad del viento promedio fue de 3.6 m/s, el promedio de RPM fue de 41.92 y la potencia útil promedio fue de 3.34. La energía generada varió entre 3.2 kWh y 3.9 kWh, siendo los meses de noviembre, diciembre y febrero los de mayor generación de energía, y junio el de menor.

La afirmación de que "el diseño y la construcción del aerogenerador Savonius modificado influye en la energía eléctrica suministrada a un usuario del distrito de Ahuac en 2021" se confirmó mediante la validación de las hipótesis alternativas específicas, demostrando que las variables evaluadas como rendimiento, RPM y velocidad del viento afectan la energía suministrada a un usuario en Ahuac.

River y Lizana (2022) plantean como objetivo principal diseñar un aerogenerador para suministrar energía eléctrica al sector El Pongo en la ciudad de Jaén, Perú, en el año 2020. La metodología de esta investigación es de tipo aplicada y básica en función del propósito, y se caracteriza por ser no experimental. La población estudiada corresponde a la demanda energética del sector El Pongo, con una muestra de 60 viviendas.

Los resultados revelan que la velocidad del viento en El Pongo es de 6.40 m/s. Se realizó un estudio detallado de la potencia eléctrica por hora de funcionamiento para cada vivienda, encontrando que el consumo promedio es de 4.47 kWh/día. La máxima demanda

de las 60 viviendas fue de 12,910 W, con un consumo total diario de energía eléctrica de 76,550 Wh/día. La producción de energía se sitúa en 27 kWh/día con una velocidad media del viento de 3.69 m/s. Basándose en estos resultados, se procedió a diseñar el aerogenerador, asegurando que cumpla con los estándares de calidad según la norma técnica peruana publicada en el Atlas eólico del Perú (MEM, 2016).

Cespedes & Vásquez, (2019) sostiene como objetivo general , diseñar un sistema de energía eólica para la electrificación de la localidad de Quinuabamba-Pomabamba – Ancash. Metodología, tipo de investigación, aplicada, experimental, descriptivo. Resultado, se toma como valor de densidad $1,20 \text{ kg/m}^3$ y como valor promedio la velocidad del viento en Quinubamba de 4,08 m/s, los cálculos de potencias varía según el diámetro del rotor de aerogenerador, energía promedio de los artefactos 533 wh/día consumo eléctrico requerido en un mes, 128.1 Kwh/me . hace referencia a que su promedio de consumo eléctrico por familia es 670 W, en la localidad de Ticaco, toma como dato 35 familias por lo se requiere un total de 24790w es decir 25KW. En el análisis obtenido del trabajo de investigación en el capítulo 3, mediante la recopilación de información de consumo y cálculo energético de una vivienda, se obtuvo 4 270 W por día, se asume el número de 20 casas en la localidad de Quinuabamba, se obtiene 85 400 W por día, con ello de forma anual como resultado es 30 744 kW al año.

Peña (2019) tiene como objetivo principal, en su tesis evaluar el diseño estructural de un álabe de turbina eólica de 5 kW utilizando materiales compuestos a base de fibras extraídas de *Stipa Obtusa* y una matriz polimérica. La metodología es experimental y descriptiva, centrada en el estudio del viento en la zona de Huancayo, donde se determinó una velocidad nominal de 5 m/s en la comunidad de Ayahuasán. El área de barrido es de 57 m^2 . Para el análisis aerodinámico, se utilizó el Método del Momento de Elemento de Álabe (BEM) para determinar los parámetros aerodinámicos de una sección de perfil. MATLAB se empleó en este análisis, junto con ANSYS FLUENT para el análisis

aerodinámico. El diseño de la geometría se realizó en SPACE CLAIM de ANSYS, importando las coordenadas de las secciones de los álabes para crear una superficie con un espesor determinado posteriormente, lo que simplificó los cálculos y redujo errores, permitiendo un cálculo más uniforme. En los resultados, se encontró que la velocidad del viento promedio era de 2.38 m/s. Se analizaron los perfiles aerodinámicos y la distancia promedio del eje de giro fue de 1.55 m. Utilizando la metodología BEM, se determinaron los coeficientes de inducción tangencial y axial, los cuales indican la relación entre la velocidad del flujo de aire incidente en el rotor y la velocidad local en las secciones de los álabes. Los factores de inducción axial finales mostraron valores máximos de 0.0205 y mínimos de -0.1599.

1.2 Identificación Descripción del Problema de Investigación

En la provincia de La Unión, en Arequipa, existen estancias y caseríos que carecen de suministro de energía eléctrica, lo que les impide disfrutar de las comodidades básicas que la electricidad ofrece, como la iluminación y el uso de aparatos eléctricos tales como televisores, radios y cables. Esta carencia no solo afecta la calidad de vida de los habitantes, sino que también limita sus posibilidades de utilizar herramientas eléctricas y cargar baterías de equipos esenciales.

Para satisfacer necesidades específicas de energía, los habitantes recurren a generadores eléctricos que funcionan con gasolina, una solución que resulta extremadamente costosa. Este costo no solo se debe al precio del combustible en sí, sino también a la logística involucrada en el transporte del combustible hasta estos lugares remotos.

Proveer una solución de energía eléctrica sostenible y accesible en estas áreas representaría una mejora significativa para la vida de los pobladores. No solo podrían beneficiarse de las comodidades domésticas, sino que también tendrían la oportunidad de

utilizar diversas herramientas y equipos que requieren energía eléctrica, lo que potenciaría sus actividades productivas y educativas.

1.3 Formulación del Problema

1.3.1 Problema General

¿Cómo puede generarse energía eléctrica de potencia de 500 watts para lugares alejados sin acceso a la red eléctrica?

1.3.2 Problemas Específicos

- ¿Cómo convertirse la energía mecánica atrapada en el eje en energía eléctrica?
- ¿Cuál será el perfil y diseño óptimo de las hélices del rotor eólico?
- ¿Qué potencia tendrá el viento a 10 metros de altura?
- ¿Qué forma debe tener el perfil de las hélices para captar mejor la energía cinética del viento?

1.4 Justificación e Importancia de la Investigación

Todo el trabajo aquí realizado tiene como justificación el apoyo a toda la población que carece de energía eléctrica o que tiene acceso a ella, pero a un muy alto costo, y la importancia de este proyecto radica en darles una mejor calidad de vida a esos pobladores.

1.5 Objetivo del Estudio

1.5.1 Objetivo General

- Diseñar y construir un generador eólico tripala de eje horizontal de tres metros de diámetro que produzca una potencia mínima de 500 watts utilizando los conocimientos y la experiencia obtenida en la Universidad Nacional de ingeniería, en la carrera de Ingeniería mecánica.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Determinar la potencia eólica aprovechable en el lugar a 10 metros de altura.
- Diseñar y construir las hélices del rotor eólico.
- Acoplar un generador monofásico al rotor eólico.
- Realizar las conexiones de salida eléctrica del generador para su uso y medición.
- Seleccionar el perfil aerodinámico a utilizar.

1.6 Alcance

- El alcance de este trabajo incluye el diseño y construcción de la turbina eólica, esto incluirá la determinación del diámetro del rotor eólico y de las condiciones de viento necesarias para obtener 500 W de potencia, teniendo en cuenta que la velocidad del viento varía conforme la altura del piso, así como la medición de los parámetros de salida de potencia eléctrica que se espera sea de al menos 0.5 Kw.

1.7 Exclusiones

- Este trabajo no incluirá el diseño del generador eléctrico que se acoplará a la turbina eólica y tampoco a su construcción, debido a que en el lugar donde se empleará no se cuenta con las herramientas ni recursos necesarios para la fabricación ad hoc.
- Este trabajo no incluirá el estudio, ni el diseño de los componentes auxiliares de la turbina eólica, como la cola de direccionamiento, o la torre donde será montada la turbina.
- Este trabajo no incluirá el análisis de la resistencia mecánica de los materiales empleados en la construcción de los alabes o del generador.

1.8 Hipótesis

1.8.1 Hipótesis General

Un generador eólico tripala de eje horizontal de 3 metros de diámetro generara una potencia mínima de 500 watts, realizando el diseño y la construcción según conocimientos y la experiencia obtenida en la Universidad Nacional de ingeniería, en la carrera de Ingeniería mecánica.

Esta hipótesis está fundamentada en la idea de que, al seguir rigurosamente los principios científicos y técnicos relacionados con el diseño de aerogeneradores, se logrará crear un dispositivo capaz de generar la cantidad de energía esperada en las condiciones específicas del entorno donde se implementará.

1.8.2 Hipótesis Específicas

- A diez metros de altura la potencia aprovechable será suficiente para obtener los 500 watts.
- El diseño y la construcción de las hélices del rotor se pueden realizar usando materiales al alcance de la zona de La Provincia de la Unión.
- El uso de un generador monofásico acoplado al eje del rotor nos permitirá recolectar la energía del viento transformada en energía eléctrica y por tanto medir la cantidad de energía recolectada.
- El perfil aerodinámico NACA 4412 proporcionara el desempeño requerido al rotor eólico.

1.9 Metodología de la Investigación

1.9.1 Tipo, Enfoque y Nivel de la Investigación

El enfoque de investigación tiene un enfoque Cuantitativo.

El enfoque cuantitativo se caracteriza por recolectar datos para verificar hipótesis basadas en mediciones numéricas y análisis estadísticos. Este enfoque busca establecer patrones de comportamiento y validar teorías (Hernández et al., 2014, p. 36).

La investigación aplicada consiste también en trabajos originales realizados para adquirir nuevos conocimientos, pero está dirigida fundamentalmente hacia un objetivo práctico específico. (Frascati, 2015, pág. 48)

Es Nivel Descriptivo porque la investigación a menudo implica describir y analizar fenómenos o situaciones existentes. Hernandez et.al, 2014 pág. 88). En este caso, en el Diseño y la construcción de un generador eólico tripala de eje horizontal de tres metros de diámetro que produzca una potencia mínima de 500 watts.

1.9.2 Diseño de investigación

Es el diseño experimental, porque el experimento de campo, Experimento en una situación más real o natural en la que el investigador manipula una o más variables. (Hernandez, et.al, 2014, pág. 182) El proyecto del diseño y construcción de un generador eólico tripala de eje horizontal de tres metros de diámetro, destinado a producir una potencia mínima de 500 watts, es considerado experimental por varias razones clave:

1. Innovación y Originalidad:

- El proyecto implica el desarrollo de un dispositivo nuevo que no se ha construido previamente con los parámetros y materiales aplicados en este caso. El diseño y construcción del generador eólico son originales, lo que contribuye a la creación de nuevos conocimientos en el campo de la energía eólica.

2. Aplicación de Conocimientos y Experiencia:

- Utiliza los conocimientos teóricos y prácticos adquiridos en áreas como la aerodinámica, mecánica de fluidos y diseño de maquinaria. La implementación de estos conocimientos en un proyecto real permite validar teorías y enfoques científicos en un entorno práctico.

3. Variables y Condiciones Específicas:

- Se consideran las propiedades del aire y las condiciones ambientales específicas del lugar donde se instalará el generador (15°C y 2800 msnm). Además, se utilizan datos específicos de diseño como la densidad del aire ($\rho_{air} = 0.87 \text{ Kg/m}^3$) y la velocidad del viento sin perturbar ($V^\infty = 7.6 \text{ m/s}$).

4. Selección y Prueba de Componentes:

- La elección del perfil aerodinámico, en este caso el perfil NACA 4412, se basa en su coeficiente de sustentación y rendimiento en condiciones similares. Esta selección es crucial para el diseño de las palas y se valida experimentalmente para asegurar que se cumplan los requisitos de rendimiento deseados.

5. Medición y Análisis:

- La producción de una potencia mínima de 500 watts es una hipótesis que se somete a prueba mediante la construcción y operación del generador eólico. El rendimiento del generador se medirá y analizará, permitiendo evaluar si el diseño cumple con los objetivos establecidos.

1.10 Proceso Experimental

1. Diseño Aerodinámico:

- Elegir el perfil aerodinámico adecuado (NACA 4412) y diseñar las palas del generador considerando los datos de entrada.

2. Construcción del Generador:

- Fabricar el generador eólico siguiendo el diseño especificado y utilizando los materiales adecuados.

3. Pruebas y Validación:

- Instalar el generador eólico en el entorno real y medir su rendimiento en términos de potencia generada (debe alcanzar al menos 500 watts).
Ajustar y optimizar el diseño en función de los resultados obtenidos.

Capítulo II

Marco Teórico y Conceptual

2.1 Marco Teórico

La investigación actual se centra en el desarrollo de la energía eólica y sus múltiples impactos en la sociedad, que son en su mayoría beneficiosos. Por ello, es crucial entender primero el concepto de energía renovable, que incluye este tipo de generación energética. La energía renovable se refiere a aquella que, debido a su abundancia en relación con el consumo humano, se considera inagotable y su uso no afecta negativamente al medio ambiente (Estrada Gasca, 2013). Ejemplos de fuentes de energía naturales y renovables incluyen el sol, el viento, el agua y el movimiento del mar. El uso de energías renovables reduce la dependencia de hidrocarburos y otros productos derivados del petróleo, fomenta la diversificación de las fuentes de suministro y disminuye significativamente la emisión de gases de efecto invernadero (Vásquez et .al, 2017).

2.2 Marco Conceptual

2.2.1 Aerogenerador

Es la herramienta o máquina que nos permite extraer la energía del viento, es decir extraer o aprovechar la energía cinética del aire para luego convertirla en energía eléctrica, esto haciendo que la energía cinética del aire se transfiera en parte a la maquina y salga con una velocidad menor. (Leal Rubio,et.al (2020)

Un aerogenerador es una máquina que transforma la energía cinética del viento en energía mecánica, que posteriormente se convierte en energía eléctrica. Se clasifica en función de la dirección de su eje central, que puede ser vertical u horizontal (Acciona, 2023).

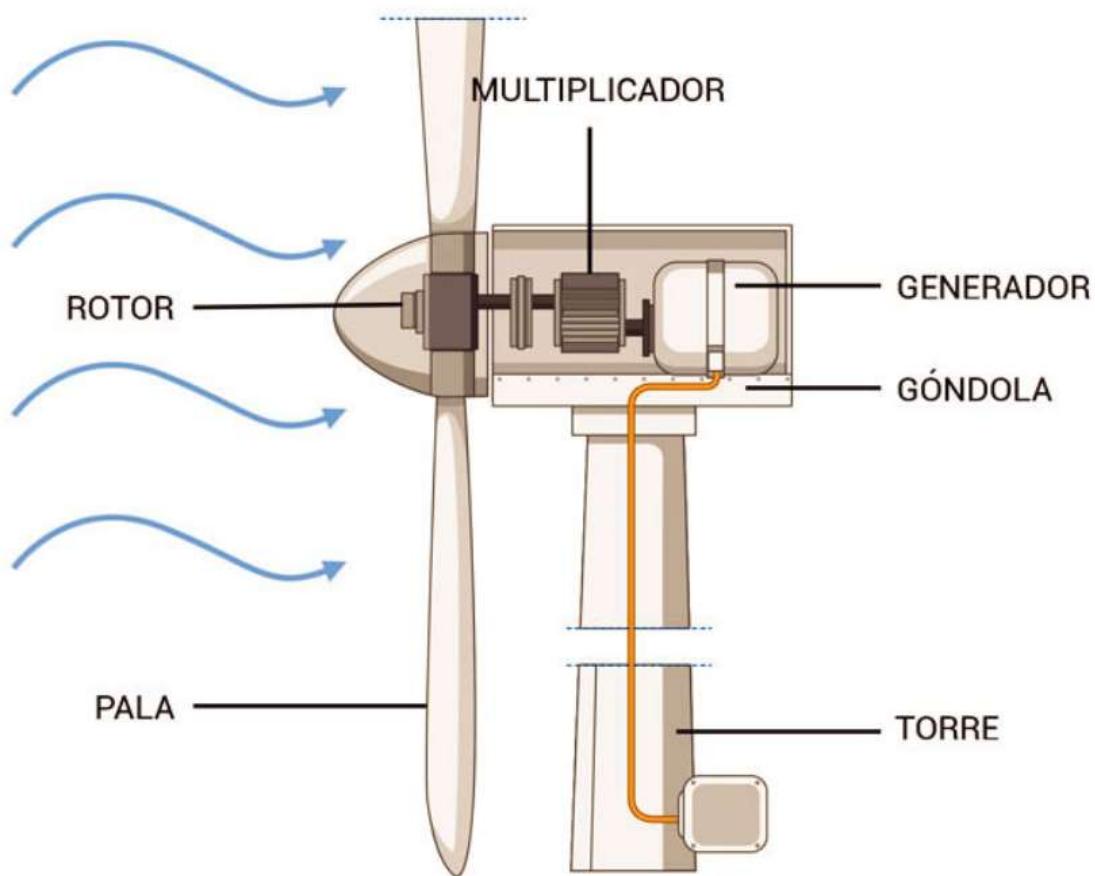
Los aerogeneradores eólicos, dispositivos para la generación de energía a partir del viento, presentan una variedad de características y opciones que los hacen adaptarse a diferentes condiciones y necesidades. En primer lugar, la disposición del eje de giro puede ser horizontal o vertical, lo que afecta su diseño y funcionamiento. Además, el número de palas varía, desde monopalas o bipalas hasta turbinas multipala, cada una con sus ventajas y desventajas (Talayero y Telmo, 2011). (Rubio Rodriguez, 2024)

Se mencionan los generadores síncronos y asíncronos, y se analiza la clasificación de los generadores eólicos con máquinas de eje vertical, que es el aspecto principal de este proyecto Zurita & Arbolea, (2012). Los aerogeneradores más completos constan de los siguientes componentes esenciales: la góndola, que es la carcasa que protege las partes fundamentales del aerogenerador; las palas del rotor o álabes, que transmiten la potencia del movimiento al buje; el buje, que conecta las palas del rotor con el eje de baja velocidad; el eje de baja velocidad, que une el buje del rotor al multiplicador; el multiplicador, que permite que el eje de alta velocidad gire mucho más rápido que el eje de baja velocidad; el eje de alta velocidad, que gira a gran velocidad, permitiendo la transmisión de energía mecánica y el funcionamiento del generador eléctrico; y el generador eléctrico, que convierte la energía mecánica en energía eléctrica. Los controladores electrónicos monitorean las condiciones del viento y gestionan el mecanismo de orientación; la unidad de refrigeración enfriá el generador eléctrico; la torre sostiene la góndola; y el mecanismo de orientación, activado por los controladores electrónicos, coloca el generador para obtener la máxima potencia (Cueva Barrozueta, 2015).

Un aerogenerador es un molino de viento capaz de convertir la energía cinética del viento en energía en forma de electricidad. Los más comunes son los de eje horizontal, si bien existen también turbinas de eje vertical.

Figura 1

Generador Eólico de Eje Horizontal.



Nota: fuente <https://ronergy.com/funcionamiento-de-un-aerogenerador/>

2.2.1.1 Clasificación Según la Posición del Aerogenerador

2.2.1.1.1 De Eje Vertical. Son aquellos cuyo eje de la turbina eólica es perpendicular al suelo, entre los principales modelos de este tipo de generadores están los darrieus, panemonas y sabonius.

2.2.1.1.2 De eje horizontal. Son aquellos cuyo eje de la turbina eólica es paralelo al suelo, es decir horizontal como su nombre lo dice, pero en este tipo de aerogenerador lo que se busca realmente es que el eje sea coaxial con la dirección del viento, pero dado que la dirección del viento no siempre es paralela al piso, entonces hay una pequeña porción del tiempo que el eje y el viento no son paralelos.

2.2.1.2 Clasificación Según el Número de Palas. Por el número de palas tenemos básicamente a los de una sola pala, los cuales necesitan un contrapeso para hacer la que rotación de la turbina sea balanceada, luego están los de dos palas que no necesitan contrapeso pero que de igual forma no son muy usados, además están los de 3 palas que son los más usados para la generación de electricidad, y por ultimo están los multipala que normalmente se usan directamente en un equipo (es decir sin convertir la energía en eléctrica primero). (Leal et.al, 2020, pág. 8)

En cuanto al mayor desarrollo de soluciones de energía eólica, este estudio explora la idea de transformar el viento

palas de turbina como medio para mejorar sus ventajas aero-estructurales. Para ello, se evalúa mediante simulación numérica la aerodinámica de una sección representativa de pala de aerogenerador transformable, realizándose esto para un rango significativo de condiciones de flujo (velocidad, incidencia), con varios niveles de transformación aplicados. (Redonnet, et.al, 2024)

2.2.2 Potencia Contenida en el Viento

El viento viene a ser aire en movimiento como ya se había explicado, por tanto, la energía que contiene es la energía cinética de la masa del aire en movimiento, por tanto, dependerá de la masa y de la velocidad del viento de la siguiente manera:

Ecuación 1 Ecuación de energía

$$E = \frac{1}{2} m \cdot V^2$$

Debemos tener en cuenta que la densidad del aire es muy baja, expresaremos la ecuación en energía por unidad de volumen para poder mostrar la densidad en la ecuación:

Ecuación 2 *Ecuación la Energía en función de la densidad*

$$E_v = \frac{1}{2} \rho \cdot volumen \cdot V^2$$

Considerando un área circular perpendicular a la dirección del viento, se puede determinar el volumen por segundo de viento que atraviesa dicha área de la siguiente manera:

Ecuación 3 flujo de viento:

$$\phi_v = V \cdot A$$

Teniendo las ecuaciones anteriores, podemos decir que la potencia traída por el viento se expresa de la siguiente manera:

Ecuación 4 Potencia Traída por el Viento.

$$P_{Air} = \frac{1}{2} \rho \cdot V^3 \cdot A$$

Esa es la potencia total disponible en el aire en movimiento, pero como es de imaginar, una maquina no podrá extraer el cien por ciento de esa potencia.

2.2.3 Coeficiente de Betz

La fracción o porcentaje máximo que se puede extraer del aire se conoce como el coeficiente de Betz, la razón por la que no se puede extraer toda la potencia que se transporta en el aire es que de ser así, querría decir que la maquina es capaz de absorber toda la energía cinética del aire, por tanto en ese caso la velocidad de salida sería cero, entonces el aire ya no podría fluir a través de la turbina eólica. Pero si por el otro extremo la velocidad de salida del aire es la misma a la del ingreso, querría decir que no se extrajo nada de su energía cinética.

Betz encontró que la máxima potencia teórica que se puede extraer es cuando la velocidad de salida es un tercio de la velocidad de ingreso, lo cual nos da un porcentaje máximo de extracción de potencia que es:

Ecuación 5 *Coeficiente de Betz (Porcentaje máximo de Potencia).*

$$C_{Pmax} = \frac{16}{27}$$

Pero aun así este porcentaje máximo de extracción es en una turbina ideal, con infinito número de palas y con un coeficiente de arrastre igual a cero, y dado que no se pueden alcanzar dichos parámetros, cada uno de las variables de la construcción de una turbina real disminuirá aún más el porcentaje de potencia extraíble del viento

2.2.4 Energía Eólica

Se refiere a la energía que se aprovecha del aire, es decir la energía cinética debido al aire en movimiento, esta se produce por los desplazamientos de masa de aire debido a los cambios de temperatura a lo largo del día, el aire que este cerca del suelo se calienta y se eleva mientras que el aire frío desciende y así se forman las corrientes de aire (viento), como es energía cinética entonces mientras más rápidos los vientos mayor energía eólica habrá disponible para aprovechar. (Alvarez, 2006, pág. 28)

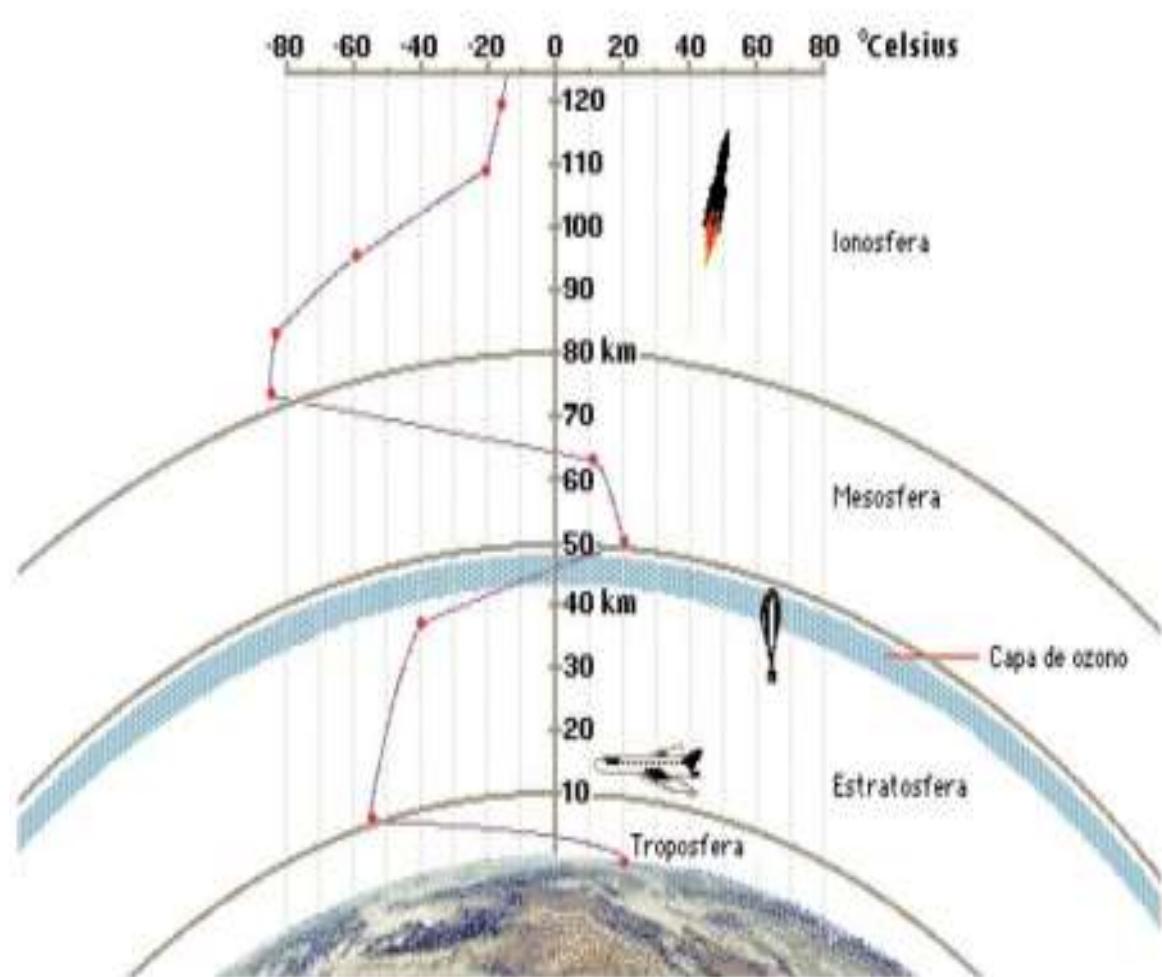
La energía eólica es una fuente limpia, inagotable y ayuda a conservar los combustibles fósiles, lo que contribuye a mitigar el cambio climático. Esta tecnología está completamente desarrollada y optimizada para su uso. (Leal,et.al, 2020, pág. 4) (Medina Socualaya, 2023)

ENEL Perú describe la energía eólica como “una fuente renovable de energía obtenida a partir de la energía cinética del viento” Saad,et.al (2014)

En términos de energía eólica, esta capa es de gran importancia, ya que es en ella donde se instalan los aerogeneradores. (Minem, 2016)

Figura 2

Capas de la Atmosfera



Nota: fuente SENAMHI

2.2.5 Cortaviento

El aire fluye más lentamente mientras más cerca del suelo este, es decir a mayor altura mayor será la velocidad del aire y por tanto mayor la energía cinética que contenga.

Dependiendo del terreno en que se encuentre la velocidad del aire se incrementara con la altura pero con distinta rapidez, para lo cual se define “altura de rugosidad” Z_0 , que varía de la siguiente manera según el terreno:

En terreno Plano (playa, hielo, nieve, pradera) $Z_0 = 0,005$ m

En terreno abierto (pasto corto, aeropuertos, glebas vacías) $Z_0 = 0,03$ m

En terreno abierto (cosecha baja, obstáculos a 20 H) $Z_0 = 0,10$ m

En terreno áspero (cosecha alta, árboles, obstáculos a 15 H) $Z_0 = 0,25$ m

En terreno muy áspero (bosque, huerto, obstáculos a 10 H) $Z_0 = 0,50$ m

En terreno cerrado (pueblos, suburbios) $Z_0 = 1,00$ m

En Ciudad (centro de la ciudad, espacios abiertos en el bosque) $Z_0 > 2,00$ m

Estos valores pueden ser utilizados en las fórmulas estándar para el perfil logarítmico del cortador de vientos:

Ecuación 6 Logarítmico del cortador de vientos

$$\frac{V_z}{V_{zr}} = \frac{\ln(\frac{Z}{Z_0})}{\ln(\frac{Z_r}{Z_0})}$$

2.2.6 **Potencia, Torque y Velocidad angular**

Un rotor eólico puede extraer potencia del viento porque reduce su velocidad y esa potencia no se pierde, sino que pasa al rotor, proceso que se realiza en un rango de velocidad que va de un mínimo a un máximo. Cuando está parado obviamente no genera potencia y a velocidades muy altas de rotación el aire es más o menos bloqueado por el

rotor y nuevamente no genera potencia. Entre esos 2 extremos hay una velocidad de rotación óptima donde la potencia extraída es máxima. (Arribas de Paz, 2020)

Algunas veces es interesante conocer la curva “torque-velocidad” de un rotor eólico, por ejemplo, cuando se acopla un rotor a una bomba de pistón con torque constante. La potencia $P(W)$, el torque $Q(Nm)$ y la velocidad de rotación Ω (rad/s) están relacionados por una ley simple:

Ecuación 7 *potencia P(W)*

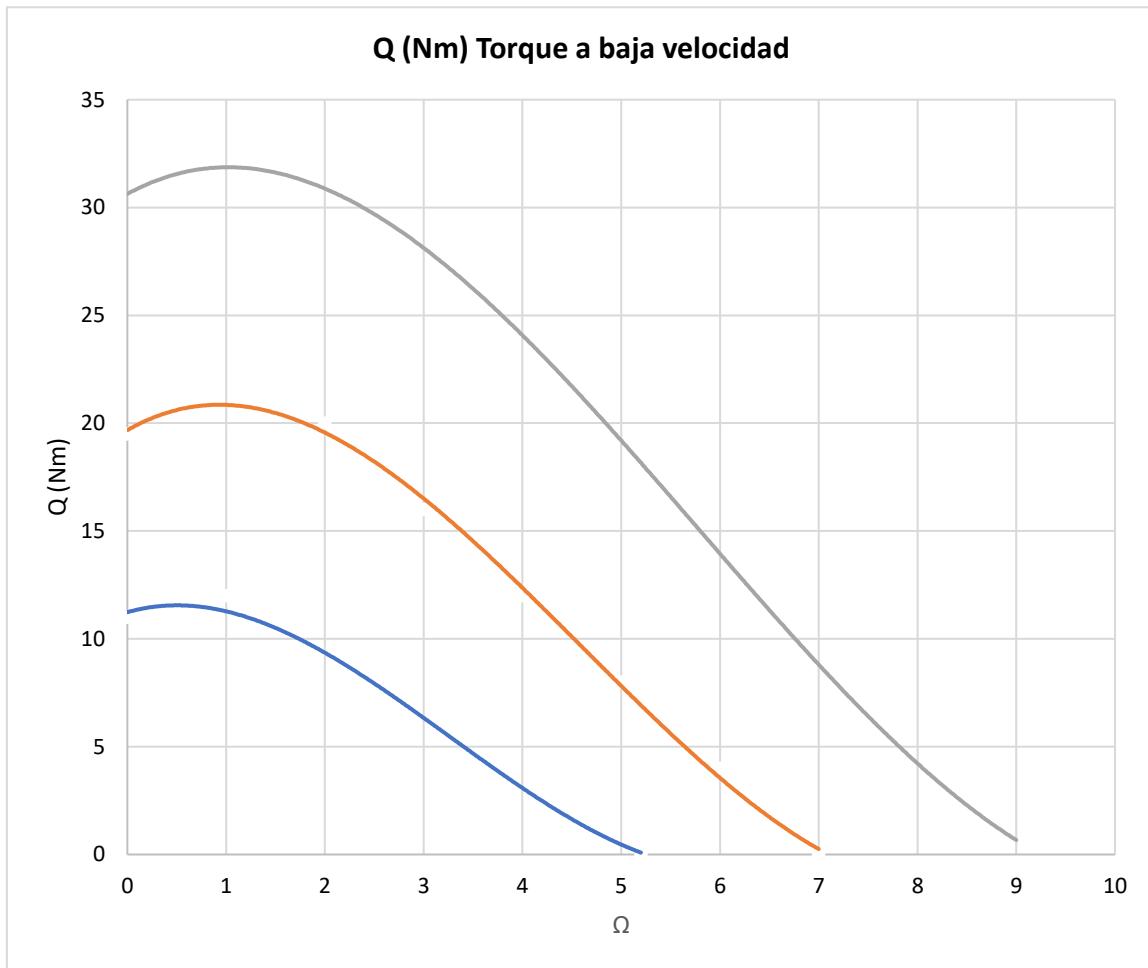
$$P=Q*\Omega$$

Se puede concluir que, como $Q = P/\Omega$, el torque es igual a la tangente de una línea que parte del origen y toca algún punto de la curva $P - \Omega$. Esto es debido a que el máximo de la curva de torque es alcanzado a una velocidad menor que el máximo de la curva de potencia.

Si la velocidad del viento aumenta, la potencia y el torque aumentan, de modo que para cada velocidad de viento se tiene que dibujar una curva por separado, tanto para la potencia como para el torque. (Arribas de Paz, 2020, pág. 7)

Figura 3

Torque a Baja Velocidad



Nota: adaptado de (W.A.M. Jansen & P.T. Smulders, 1977).

Ese grupo de curvas son inconvenientes de manejar porque varían con la velocidad del viento V , el radio R del rotor y aún la densidad ρ . La potencia, el torque y la velocidad angular se hacen adimensionales con las siguientes expresiones:

Coeficiente de potencia:

Ecuación 8 *Coeficiente de potencia*

$$C_p = \frac{P}{1/2\rho AV^3}$$

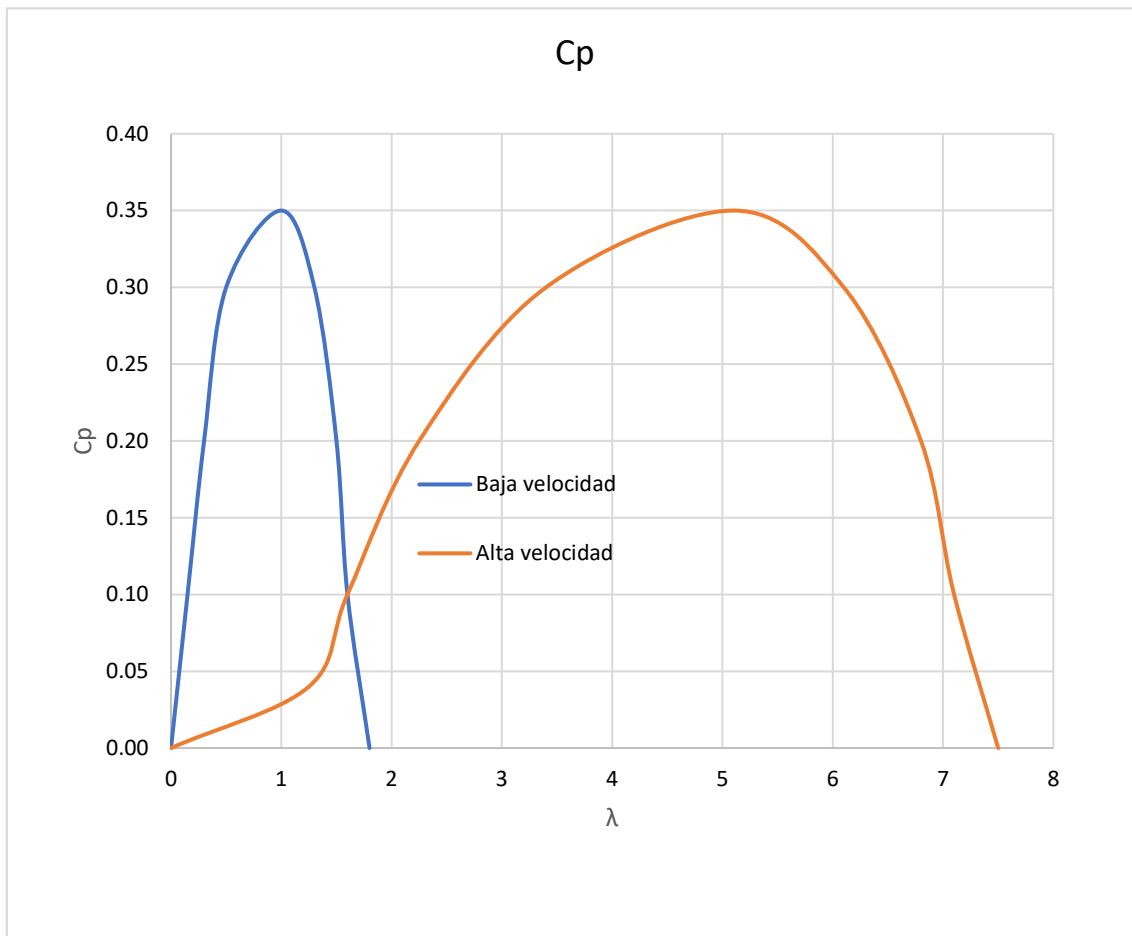
Coeficiente de torque:

Ecuación 9 *Coeficiente de Torque*

$$Cq = \frac{Q}{1/2 \rho A V^3}$$

Figura 4

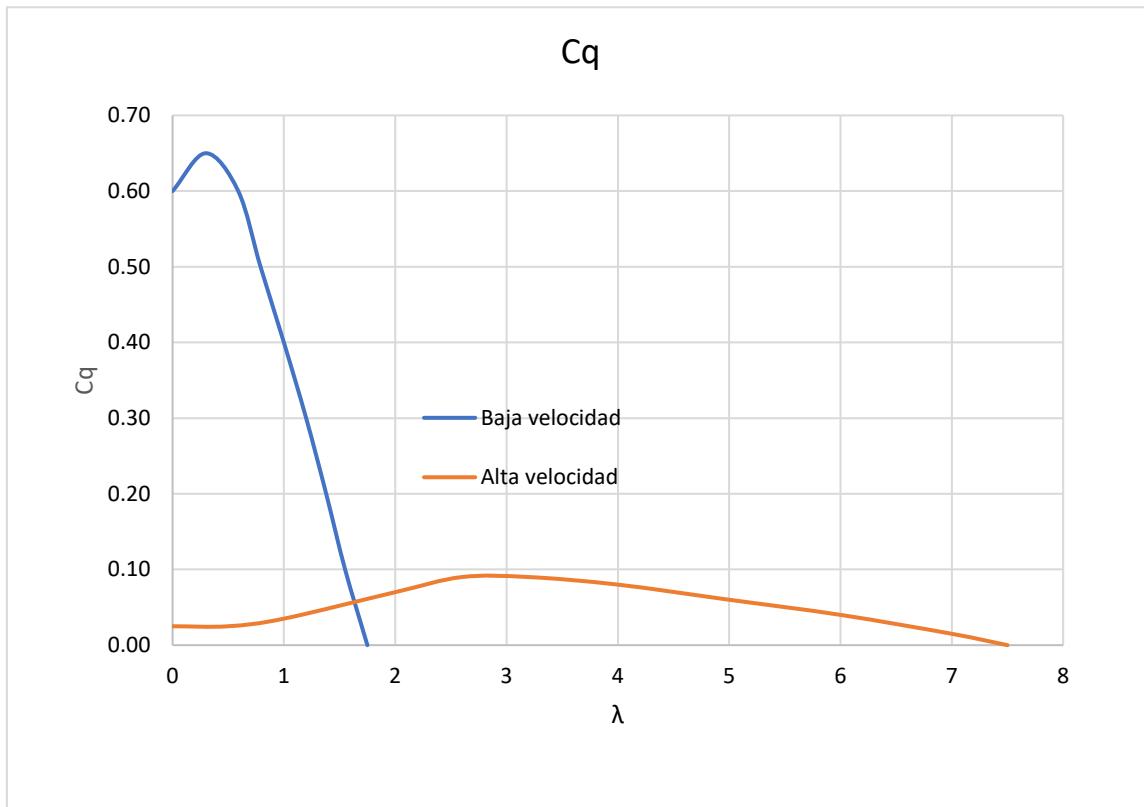
Coeficiente de potencia en Alta y Baja velocidad



Nota: adaptado de (W.A.M. Jansen & P.T. Smulders, 1977).

Figura 5

Coeficiente de Torque en Alta y Baja velocidad



Nota: adaptado de (W.A.M. Jansen & P.T. Smulders, 1977).

2.2.7 Ratio De Velocidad De Punta

La velocidad de punta se refiere a la velocidad tangencial del punto o sección más alejada del centro de la turbina, es decir la velocidad tangencial de la punta de cada pala, ya que la velocidad tangencial varía conforme el radio, se define al ratio de velocidad como, la velocidad tangencial sobre la velocidad del viento sin perturbación.

$$\text{Ecuación 10 Ratio de velocidad local: } \lambda_r = \frac{\Omega \cdot r}{V_\infty}$$

$$\text{Ecuación 11 Ratio de velocidad de punta: } \lambda = \frac{\Omega \cdot R}{V_\infty}$$

Donde R es el radio máximo de la pala.

2.2.8 Perfiles Aerodinámicos

La turbina eólica consiste en una o más palas que están sujetas al eje del rotor, dicha pala está formada por secciones transversales, que son los perfiles aerodinámicos, y pueden tener muchas formas.

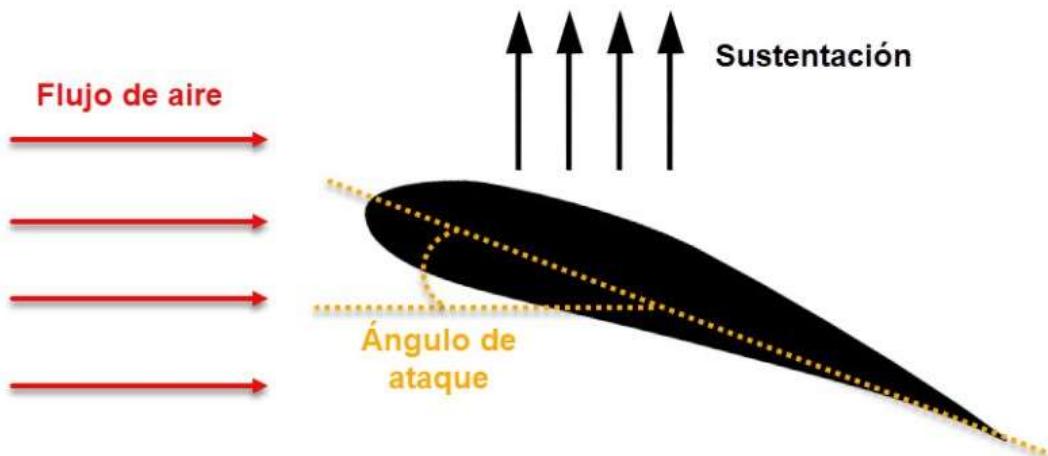
2.2.9 Sustentación Y Arrastre De Perfiles

En efecto, no sólo en las formas aerodinámicas sino sobre cualquier cuerpo colocado en una corriente de aire se ejerce una fuerza cuyo sentido generalmente no es paralela a la dirección del flujo no perturbado. Esto último es crucial pues explica por qué una parte de esta fuerza llamada sustentación, es perpendicular al sentido del flujo no perturbado. El otro componente de la fuerza en la misma dirección del flujo es llamado arrastre.

Se muestra la interacción del viento con un cuerpo con un perfil aerodinámico liso.

Figura 6

Interacción del Viento con un Perfil Aerodinámico.



Nota: fuente <https://blogaero.com/sustentacion-por-que-vuelan-los-aviones/>

En términos físicos, la fuerza sobre un cuerpo (tal como una forma aerodinámica), es causada por los cambios en las velocidades del flujo (y dirección) alrededor del perfil. En el lado superior de la aeroforma, las velocidades son mayores que en la parte inferior. El resultado es que la presión en la parte superior es menor que la presión en la parte inferior y entonces se crea la fuerza F.

Para la descripción de las propiedades de la sustentación y arrastre de diferentes perfiles, generalmente se hace referencia a los coeficientes de sustentación y arrastre adimensionales, los cuales son definidos como:

$$\text{Ecuación 12 Coeficiente de sustentación: } C_l = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho A V^2}$$

$$\text{Ecuación 13 Coeficiente de arrastre: } C_d = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho A V^2}$$

Donde:

ρ = densidad del aire (Kg/m3)

V = velocidad del aire no perturbado (m/s)

A = área proyectada de la pala (cuerda*longitud) (m2)

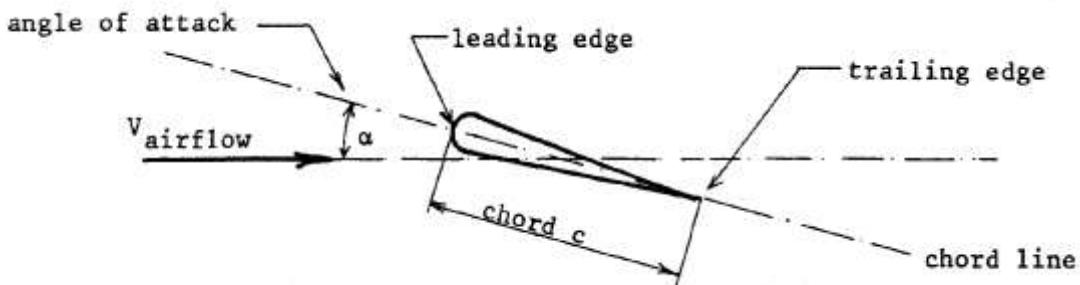
Estos coeficientes adimensionales de sustentación y arrastre, son medidos en túneles de viento para un rango de ángulos de ataque α . Este es el ángulo entre la dirección de la velocidad del viento no perturbada y una línea de referencia del perfil. Para una placa curva la línea de referencia es simplemente la que conecta los extremos de entrada y salida, mientras que para un perfil es la línea que conecta el punto de salida con el centro del radio de curvatura más pequeño en el extremo de salida.

2.2.10 Geometría de un Perfil Aerodinámico.

En esta parte se define las diferentes partes geométricas de un perfil aerodinámico con sus nombres:

Figura 7

Geometría de un Perfil Aerodinámico.



Nota: fuente (W.A.M. Jansen & P.T. Smulders, 1977).

2.2.11 Efecto de la Rotación de la Estela Detrás del Rotor Sobre el Coeficiente

Máximo de Potencia.

El coeficiente de BETZ indica que podemos esperar un coeficiente de potencia máximo de 0.593, sin embargo, esto solo es válido para altas velocidades de punta, para bajas velocidades de punta hay que decir que hay un notable descenso en el coeficiente de potencia.

Esto se debe a que el torque que se produce debido a la interacción de aire con las palas de la turbina eólica, en dicha interacción el rotor desvía las partículas de aire y salen en una dirección distinta, este cambio de dirección hace que la estela gire detrás del rotor en dirección opuesta al giro del rotor, es decir el choque de las partículas de aire con las palas del rotor impulsan a este en un sentido de giro pero las partículas al chocar salen en sentido contrario por el principio de acción y reacción, esta rotación de la estela implica una pérdida de energía dado que el aire sale con una velocidad y por tanto con energía cinética.

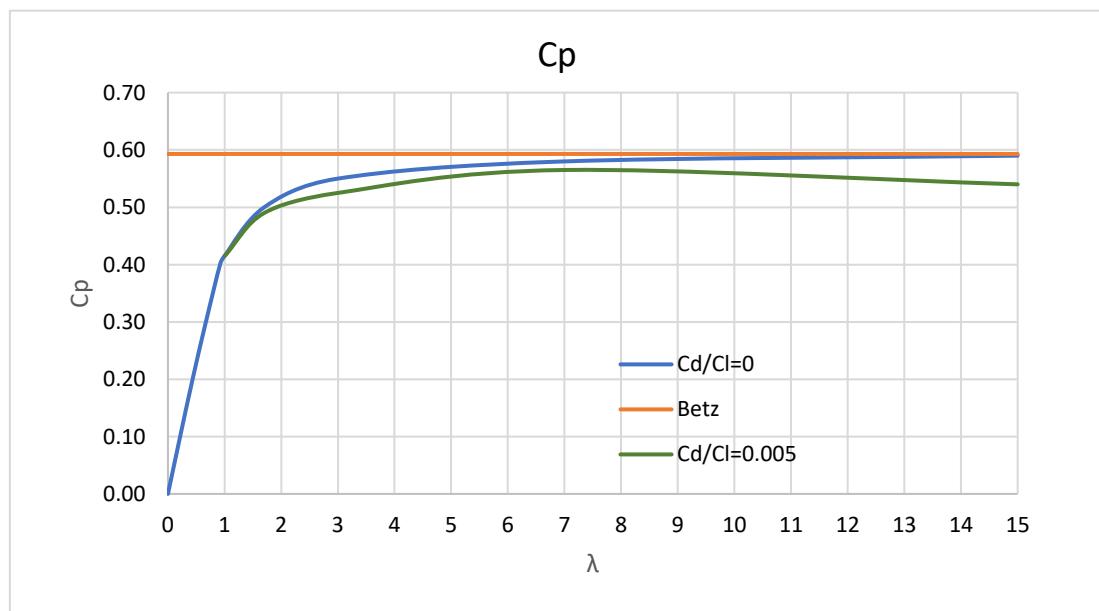
Por otra parte, una baja velocidad de punta implica una baja velocidad angular, esto a su vez significa un torque elevado y esto último quiere decir que habrán altas velocidades tangenciales en la estela detrás del rotor ergo mayor cantidad de energía cinética desaprovechada, entonces se puede decir que mientras menor sea la velocidad de punta menor será la potencia aprovechada y mayor la energía perdida (no aprovechada).

2.2.12 Efecto de la Relación de C_d/C_l Sobre el Coeficiente Máximo de Potencia

El factor C_d (coeficiente de arrastre) mide la resistencia de las palas o aspas del rotor a moverse a través del aire, C_d/C_l es el ratio que determina las perdidas debido a dicha resistencia.

Figura 8

Efecto de Relación y Coeficiente Máximo de Potencia



Nota: adaptado de (W.A.M. Jansen & P.T. Smulders, 1977).

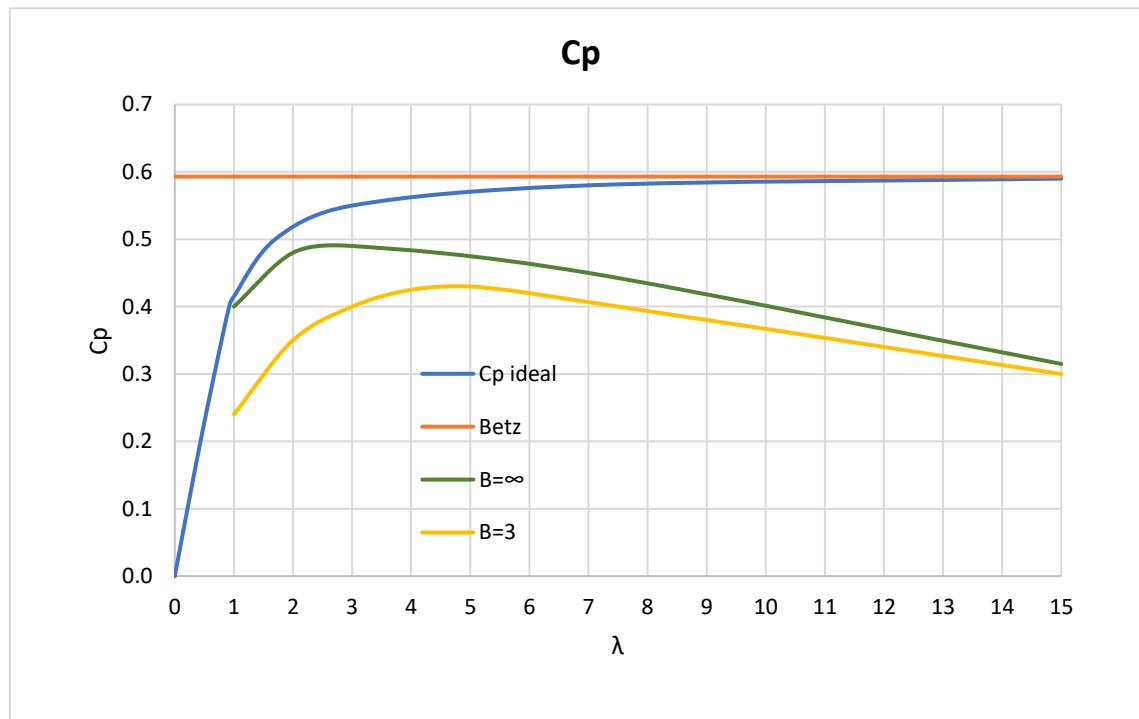
2.2.13 Efecto del Número de Palas Sobre el Coeficiente Máximo de Potencia

El coeficiente máximo de potencia también se ve afectado por el número de palas o aspas de la turbina, esto es debido a las perdidas por las puntas, que ocurren en las

puntas de las palas, dichas perdidas dependen del número de palas y en la relación de velocidad de punta. Lo cual es lógico si pensamos en un extremo en el que solo haya una pala, esta solo abarcaría una pequeña parte de toda el área circular barrida por la pala, y por tanto mientras la pala aprovecha la energía del viento en un punto, en los demás puntos el aire estaría pasando con casi el total de su energía cinética, es decir sin que se le quite nada de velocidad y por tanto sin aprovechar dicha energía.

Figura 9

Coeficiente de Potencia Ideal y Para Diferente Número de Palas



Nota: adaptado de (W.A.M. Jansen & P.T. Smulders, 1977).

2.2.14 Cálculo de la Cuerda del Perfil y Configuración de la Pala.

Como se vio antes el número de palas afecta el coeficiente de potencia máximo, y aunque el número de palas no influye en el ratio de velocidad de punta, se suele escoger un mayor número de palas mientras menor sea el ratio de velocidad de punta, esto debido

a que el número de palas afecta mucho más al coeficiente de potencia máximo mientras menor es el ratio de velocidad de punta.

Otro factor importante que afecta el coeficiente de potencia es el arrastre, el arrastre afecta el coeficiente de potencia esperado a través de ratio C_d/C_l , esto influirá en el tamaño e incluso en el ratio de velocidad del diseño.

Un coeficiente muy grande de C_d/C_l restringe el ratio de la velocidad de punta de diseño, mientras mas bajo sea el ratio de velocidad de punta se requiere mayor cantidad de palas o aspas para compensar la perdida de potencia debida al arrastre.

Debido a las desviaciones como por ejemplo de la geometría ideal y perdidas mecánicas el coeficiente de potencia máximo esta entre 0.3 y 0.4, este resultado muestra la importancia que tiene la elección de la velocidad de punta de diseño.

Sin embargo hay otros dos factores que limitan la elección de la velocidad de punta de diseño, uno de ellos es la característica de la carga del aerogenerador, es decir que uso se le dará al aerogenerador, por ejemplo si es una bomba de pistón o alguna otra carga de movimiento lento se necesitará un torque inicial muy alto y en ese caso la velocidad de giro del rotor eólico será lento usualmente, pero cuando se usa para cargas de movimiento rápido como para bombas centrifugas se necesitará una velocidad de giro alta también. El segundo factor que interviene es la tecnología local para la fabricación de las palas, puesto que los perfiles aerodinámicos no son una forma sencilla de conseguir.

2.2.15 Efecto del Número de Reynolds

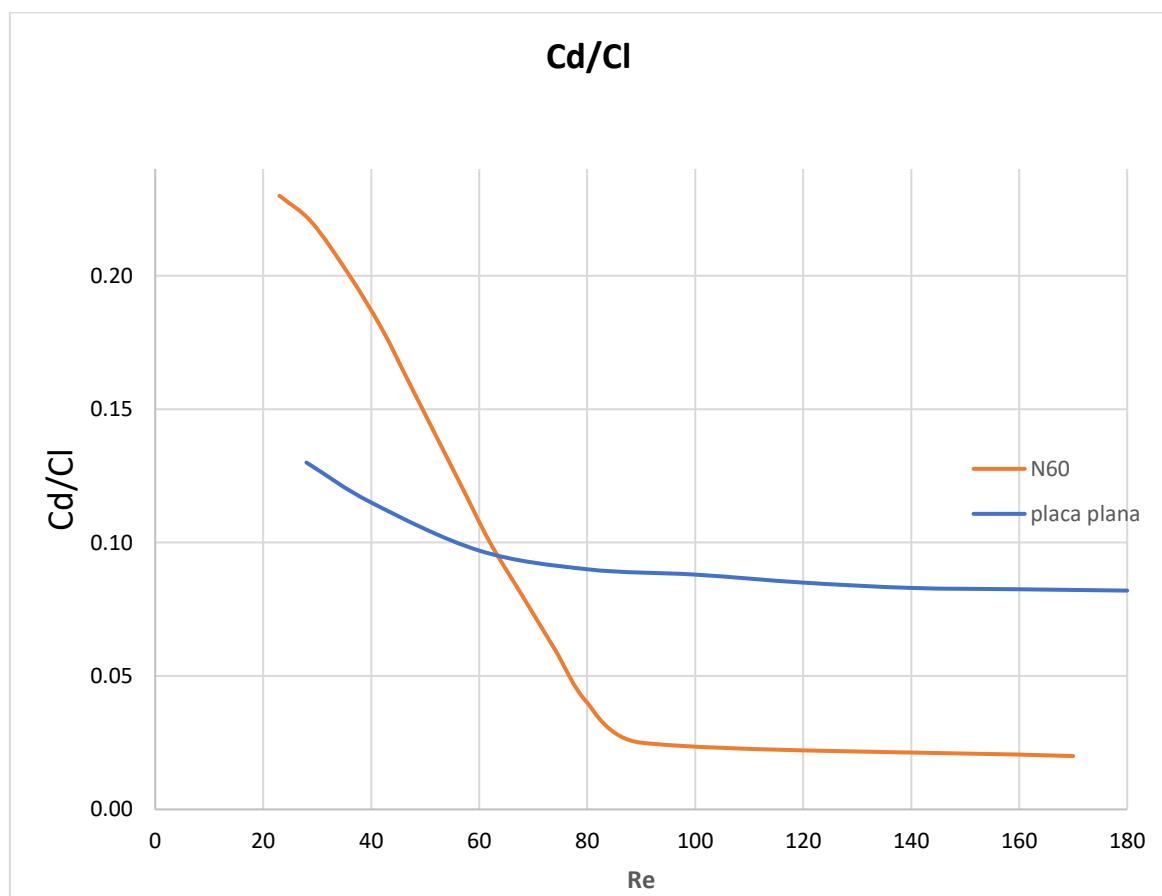
2.2.14.1 Dependencia de las Características del Perfil Aerodinámico del Número de Reynolds. Las características del perfil aerodinámico dependen del número de Reynolds del fluido que pasa a través del perfil, para un perfil el numero de Reynolds

(Re) está definido como el producto de la velocidad relativa del perfil con la cuerda divididos por la viscosidad cinemática del aire para este caso.

Todos los perfiles aerodinámicos tienen un numero de Reynolds crítico, si el número de Reynolds está por debajo del crítico, entonces C_l será pequeño mientras que el C_d será mayor, por el contrario, si el número de Reynolds está por encima del crítico, entonces el desempeño será mucho mejor, ya que crece el coeficiente de levantamiento y baja el coeficiente de arrastre.

Figura 10

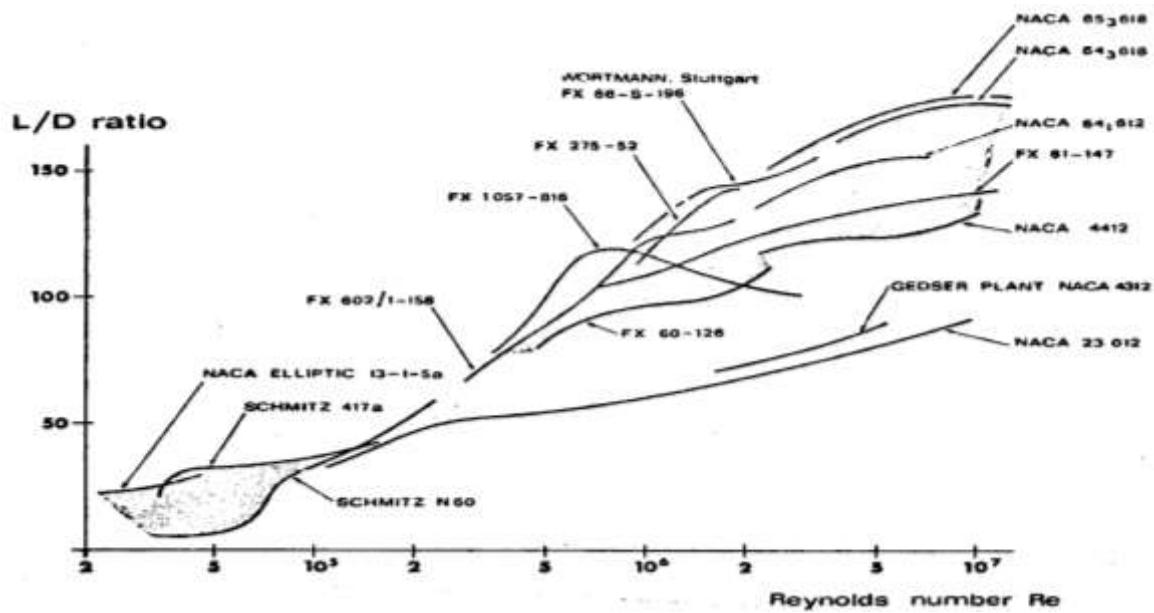
Cd/C_l (Coeficiente de Arrastre/ Coeficiente de Sustentación).



Nota: adaptado de (W.A.M. Jansen & P.T. Smulders, 1977).

Figura 11

C_l/C_d Para Diferentes Perfiles en Función del Número de Reynolds



Nota: fuente (W.A.M. Jansen & P.T. Smulders, 1977).

En general el número de Reynolds crítico para perfiles puntaagudos será de alrededor de 10^4 , mientras que para perfiles más convencionales como los NACA será de alrededor de 105, incluso algunos perfiles más modernos tienen un numero de Reynolds critico de alrededor de 10^6 .

2.2.14.2 Calculo del Número de Reynolds Para las Palas del Rotor Eólico. Para la condición en la que el rotor gira con un ratio de velocidad (λ) igual al ratio de velocidad optimo (λ_{optimo}), el número de Reynolds del flujo alrededor del perfil se puede determinar de la siguiente manera:

Si B = número de palas

r = radio = distancia del elemento de la pala bajo análisis al centro del rotor,

λ_r = ratio de velocidad del elemento de la pala bajo análisis.

C_l = coeficiente de levantamiento de diseño del elemento bajo análisis.

V_∞ = velocidad del viento sin perturbar.

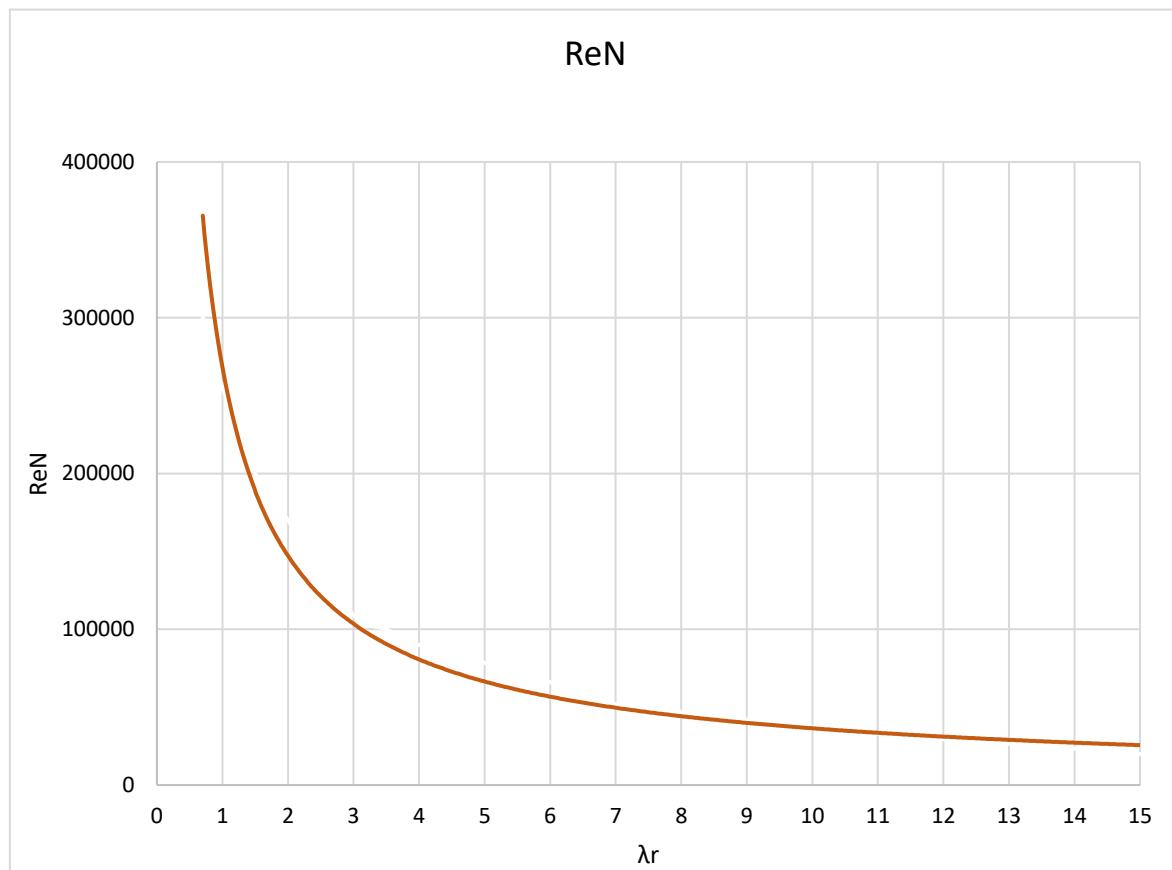
Ecuación 14 El número de Reynolds es:

$$Re = \frac{V_\infty \cdot r}{B \cdot C_l} \cdot Re_N$$

Re_N se puede leer del siguiente grafico (valido solo para el aire: viscosidad cinemática $\nu = 15 \cdot 10^{-6} [\text{m}^2\text{s}^{-1}]$)

Figura 12

Número de Reynolds en función del Ratio de Velocidad



Nota: adaptado de (W.A.M. Jansen & P.T. Smulders, 1977).

CAPITULO III

Desarrollo del Trabajo de Investigación

3.1 Características Técnicas

3.1.1 Diseño del Rotor Eólico

Como datos de entrada se tiene las propiedades del aire para las condiciones ambientales del lugar (15°C y 2800 msnm), datos requeridos de diseño, velocidad del viento.

$$\rho_{\text{air}} = 0.87 \text{ Kg/m}^3$$

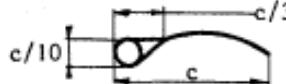
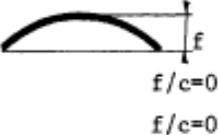
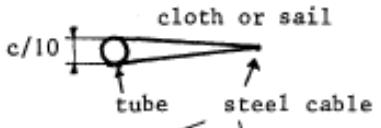
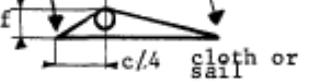
$$V \text{ viento sin perturbar} = V_{\infty} = 7.6 \text{ m/s}$$

$$\text{Potencia deseada} = 500 \text{ W}$$

Como primer paso elegiremos el perfil aerodinámico a usar, como vemos en el grafico el perfil NACA 4412 es uno de los que mejor se comporta con su coeficiente de sustentación, por tanto será el perfil que usaremos.

Figura 13

Descripción Geométrica de Perfiles Aerodinámicos.

airfoil name	geometrical description	$(C_d/C_{l\min})$	α^o	C_l
sail and pole		0.1	5	0.8
flat steel plate		0.1	4	0.4
arched steel plate		0.02 0.02	4 3	0.9 1.25
arched steel plate with tube on concave side		0.05 0.05	5 4	0.9 1.1
arched steel plate with tube on convex side		0.2	14	1.25
sail wing		0.05	2	1.0
sail trouser		0.1	4	1.0
NACA 4412	see appendix II	0.01	4	0.8
NACA 23015	see Lit(1) in appendix I	0.01	4	0.8

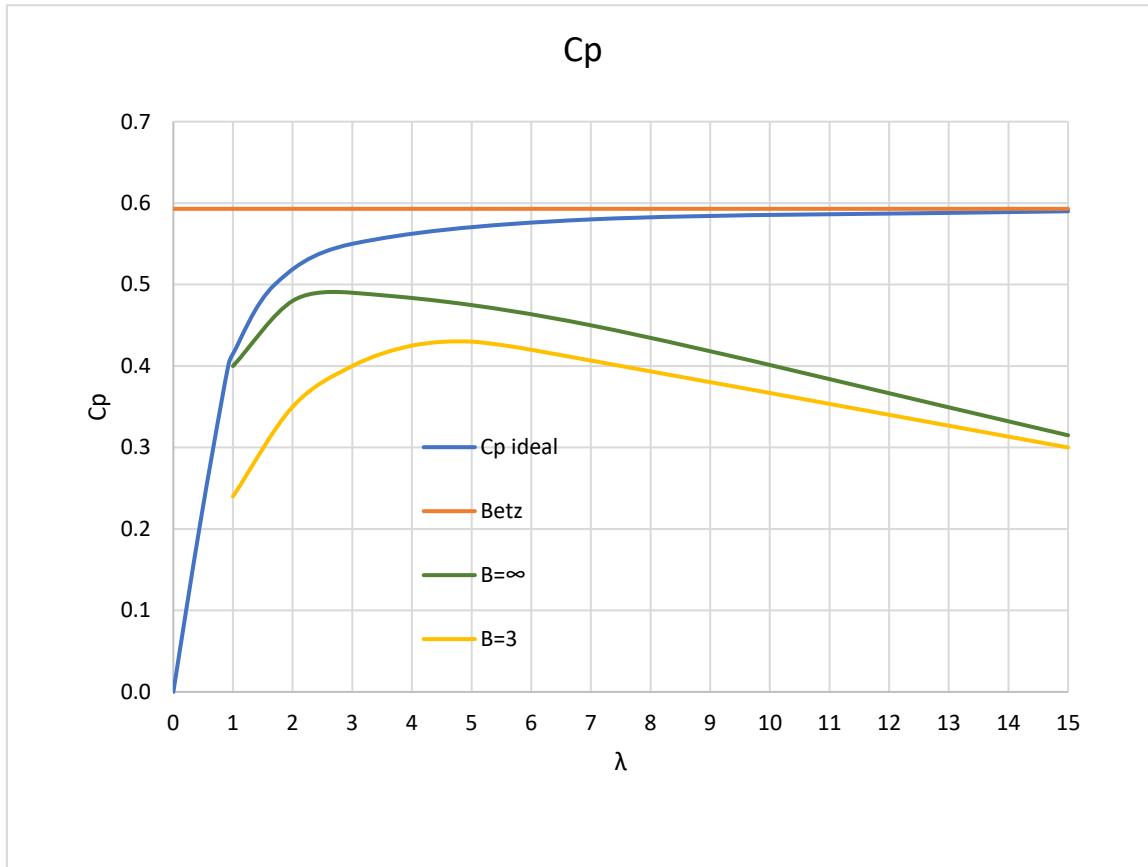
Nota: fuente (W.A.M. Jansen & P.T. Smulders, 1977).

Como segundo paso elegiremos el número de hélices o palas de la turbina eólica, en el grafico se observa que para un numero de palas igual a 3 se obtiene un buen rendimiento en el coeficiente de potencia máximo, y aunque no es el máximo podemos ver

que esta muy cerca, y para efectos de ahorro de material y costos elegiremos 3 hélices para el rotor eólico.

Figura 14

Ratio de Velocidad vs Cp Para Distinto Numero de Helices o Palas



Nota: adaptado de (W.A.M. Jansen & P.T. Smulders, 1977).

Como tercer paso elegiremos el ratio de velocidad de punta (λ) que aunque no esta limitado por el número de palas o el perfil escogido si esta limitado por la construcción de la pala, ya que un número muy grande de λ indicaría una pala muy larga que para compensar la energía recogida a lo largo de la pala, esta tendría que ser muy delgada, o bien si λ es muy pequeño se tendría que compensar con palas muy gruesas y robustas.

Así también se puede ver en los siguientes gráficos como afecta el λ a los diferentes coeficientes, para un numero de palas elegido (3) se ve que el mayor coeficiente de potencia esta para un λ entre 4 y 5, por lo que nosotros escogeremos un λ de 4

Tabla 1

Tabla de Selección del Número de Palas y Ratio de Velocidad.

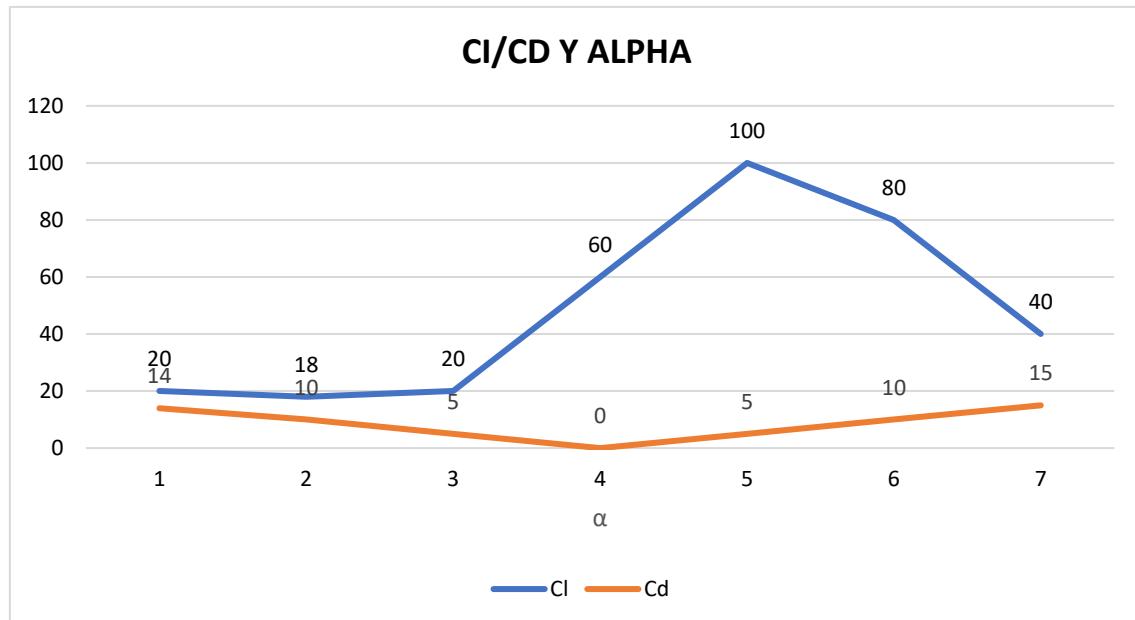
λ_0	B
1	6-20
2	4-12
3	3-6
4	2-4
5-8	2-3
8-15	1-2

Nota: fuente (W.A.M. Jansen & P.T. Smulders, 1977).

Como cuarto paso elegiremos el ángulo de ataque del perfil (α), aquí contamos con un gráfico que nos muestra para que ángulo de ataque el que coeficiente de levantamiento sobre el coeficiente de arrastre es máximo:

Figura 15

C_l y C_d Según el Angulo de Ataque (α)



Nota: adaptado de (W.A.M. Jansen & P.T. Smulders, 1977).

Como se observa el ángulo de ataque optimo es de entre 4 y 6 grados, nosotros elegiremos 6 grados de ángulo de ataque ($\alpha=6$)

Ahora que están todos los datos iniciales empezaremos con el cálculo de los otros elementos para nuestra turbina eólica.

Como quinto paso calculamos el área necesaria para captar la energía que requerimos, según la formula de la ecuación 4:

$$P_{Air} = \frac{1}{2} \rho \cdot V^3 \cdot A$$

Para una potencia de 500 w, una velocidad sin perturbación del viento de 7 metros por segundo y una densidad del aire de 0.87 Kg/m³ el área nos saldría:

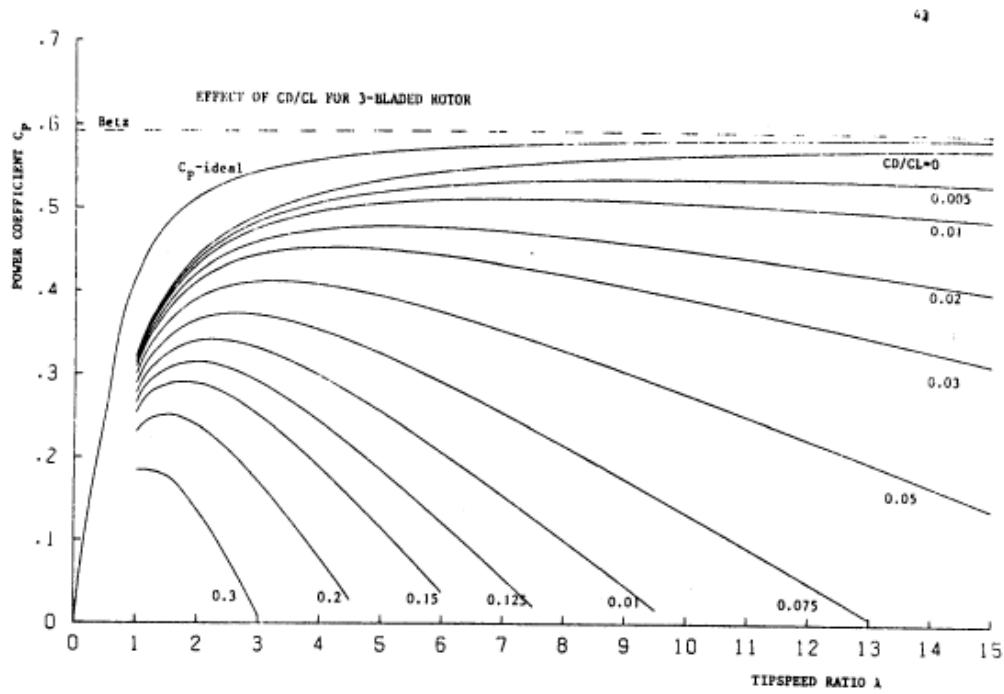
$$500 = \frac{1}{2} 0,87 \cdot 7,6^3 \cdot A$$

$$A_i = 2.62 \text{ m}^2$$

2.62 metros cuadrados sería el área ideal de la turbina, pero ya que tenemos un coeficiente de aprovechamiento máximo, en este caso nuestro Cp dado por el ratio de velocidad de punta y el número de palas para el perfil naca 4412 es de 48% como máximo, pero se considerara un diseño conservador en el que no lleguemos al 48 % sino solo a un 80 % de dicho valor, por tanto esta área deberá crecer de la siguiente manera:

Figura 16

Coeficiente de Potencia Respecto del Ratio de Velocidad de Punta Para Diferentes Cd/Cl



Nota:

fuente (W.A.M. Jansen & P.T. Smulders, 1977).

Esta imagen muestra un gráfico que ilustra la eficiencia aerodinámica de un rotor de tres palas en función de la relación de velocidad de punta (λ) y la razón de arrastre a sustentación (Cd/Cl).

Partes Clave del Gráfico:

- **Eje Y (Coeficiente de Potencia, C_p):** Representa la eficiencia con la que el rotor convierte la energía del viento en potencia mecánica. Un C_p más alto indica una mejor eficiencia.
- **Eje X (Relación de Velocidad de Punta, λ):** Esta es la relación entre la velocidad de la punta de la pala y la velocidad del viento libre. Valores más altos de λ indican que las palas están girando más rápido en relación con la velocidad del viento.
- **Curvas Representativas:** Cada curva corresponde a un valor específico de la razón Cd/Cl , que es la relación entre el coeficiente de arrastre (Cd) y el

coeficiente de sustentación (CL). Valores más bajos de CD/CL son deseables ya que indican un perfil aerodinámico más eficiente.

Interpretación:

- **Coeficiente de Potencia Ideal (C_p)**: La curva más alta corresponde al valor máximo teórico de C_p, también llamado C_p ideal. Esto ocurre cuando el CD/CL es cercano a 0, lo que implica un rotor altamente eficiente con un perfil aerodinámico óptimo.
- **Efecto de CD/CL** : A medida que el CD/CL aumenta, las curvas de C_p se desplazan hacia abajo, mostrando que la eficiencia disminuye. Esto significa que un mayor arrastre relativo a la sustentación reduce la eficiencia del rotor.
- **λ Óptimo**: El punto donde cada curva alcanza su máximo representa la relación óptima de velocidad de punta para ese CD/CL. Despues de este punto, aumentar λ no mejora la eficiencia y puede incluso reducirla.

En resumen, este gráfico se utiliza para determinar la eficiencia máxima que puede obtenerse de un rotor de tres palas en función del diseño aerodinámico de las palas (reflejado en Cd/C_l) y cómo debe operarse en diferentes condiciones de viento (λ). Para maximizar la potencia generada, se debe diseñar un rotor que opere cerca del C_p ideal y dentro de la relación de velocidad de punta óptima.

$$A = \frac{2.62}{0.48 \times 0.8} = 6.83 \text{ m}^2$$

Ya con el área definida pasaremos a calcular el radio de la turbina como sexto paso:

$$R = \sqrt{\frac{A}{\pi}} = 1.47 \approx 1.5 \text{ metros de radio}$$

Una vez conocemos el radio, como séptimo paso definiremos la geometría de la pala con las siguientes formulas:

$$\lambda r = \frac{\Omega \cdot r}{V_\infty} = \lambda * r/R$$

Ecuación 15 Cuerda (c): $c = \frac{8\pi r}{B \cdot C_l} * (1 - \cos\theta)$

Ecuación 16 Angulo de la cuerda $\beta = \theta - \alpha$

$$\lambda r = \frac{\sin\theta * (2 * \cos\theta - 1)}{(1 - \cos\theta) * (2 * \cos\theta + 1)}$$

Con estas fórmulas dividiremos en tramos de 18 milímetros a nuestra pala, y comenzaremos a calcula la geometría de cada sección de la pala iniciando desde un radio $r = 0.2$ metros.

Para muestra de cálculo se muestra la geometría de la sección de la pala a 0.2 metros de radio.

$$\lambda r = 4 * \frac{0.2}{1.5} = 0.533$$

Resolviendo la siguiente ecuación: $0.533 = \frac{\sin\theta * (2 * \cos\theta - 1)}{(1 - \cos\theta) * (2 * \cos\theta + 1)}$; $\theta = 0.72$ rad.

$$\beta = 0.72 - 0.105 = 0.615 \text{ rad.}$$

$$c = \frac{8 * \pi * 0.2}{3 * 0.9} * (1 - \cos 0.72) = 0.46 \text{ metros}$$

Con ayuda del excel ahora se tabularán los datos para cada sección de la pala:

Tabla 2

Radio, Celeridad Local, Cuerda, Celeridad local, ángulo de flujo

Radio (m)	Celeridad local λ_r	cuerda c	Celeridad local λ_r	ángulo de flujo φ°	ángulo de la cuerda β°
0.200	0.533	0.465	0.530	41.388	35.386
0.218	0.581	0.472	0.581	39.888	33.887
0.236	0.629	0.478	0.630	38.527	32.525
0.254	0.677	0.482	0.677	37.258	31.257
0.272	0.725	0.484	0.726	36.023	30.021
0.290	0.773	0.484	0.774	34.842	28.841
0.308	0.821	0.483	0.821	33.736	27.735
0.326	0.869	0.480	0.869	32.664	26.663
0.344	0.917	0.476	0.918	31.640	25.639
0.362	0.965	0.471	0.966	30.662	24.661
0.380	1.013	0.466	1.013	29.748	23.747
0.398	1.061	0.460	1.061	28.865	22.864
0.416	1.109	0.454	1.109	28.023	22.022
0.434	1.157	0.447	1.157	27.220	21.219
0.452	1.205	0.441	1.205	26.454	20.453
0.470	1.253	0.434	1.253	25.723	19.722
0.488	1.301	0.426	1.301	25.026	19.025
0.506	1.349	0.419	1.350	24.360	18.359
0.524	1.397	0.412	1.398	23.724	17.723
0.542	1.445	0.405	1.445	23.119	17.119
0.56	1.493	0.398	1.493	22.539	16.539
0.578	1.541	0.392	1.540	21.996	15.995
0.596	1.589	0.384	1.589	21.457	15.457
0.614	1.637	0.378	1.637	20.945	14.944
0.632	1.685	0.371	1.685	20.457	14.456
0.65	1.733	0.365	1.733	19.993	13.992
0.668	1.781	0.358	1.782	19.534	13.533
0.686	1.829	0.352	1.829	19.112	13.112
0.704	1.877	0.346	1.876	18.705	12.704
0.722	1.925	0.340	1.925	18.299	12.298
0.74	1.973	0.334	1.973	17.922	11.922
0.758	2.021	0.328	2.021	17.552	11.551
0.776	2.069	0.323	2.069	17.197	11.196
0.794	2.117	0.317	2.117	16.855	10.855
0.812	2.165	0.312	2.165	16.527	10.526
0.83	2.213	0.307	2.213	16.210	10.209
0.848	2.261	0.302	2.261	15.908	9.908
0.866	2.309	0.297	2.309	15.611	9.610
0.884	2.357	0.293	2.357	15.328	9.328

0.902	2.405	0.288	2.405	15.055	9.054
0.92	2.453	0.284	2.453	14.785	8.784
0.938	2.501	0.279	2.501	14.528	8.527
0.956	2.549	0.275	2.549	14.279	8.279
0.974	2.597	0.271	2.597	14.039	8.038
0.992	2.645	0.267	2.645	13.806	7.805
1.01	2.693	0.263	2.692	13.584	7.583
1.028	2.741	0.259	2.741	13.363	7.362
1.046	2.789	0.255	2.789	13.150	7.149
1.064	2.837	0.252	2.837	12.944	6.943
1.082	2.885	0.248	2.886	12.740	6.740
1.1	2.933	0.245	2.934	12.549	6.548
1.118	2.981	0.241	2.981	12.362	6.361
1.136	3.029	0.238	3.029	12.179	6.179
1.154	3.077	0.235	3.077	12.002	6.001
1.172	3.125	0.232	3.125	11.829	5.829
1.19	3.173	0.229	3.173	11.663	5.663
1.208	3.221	0.226	3.221	11.498	5.498
1.226	3.269	0.223	3.269	11.339	5.338
1.244	3.317	0.220	3.317	11.186	5.186
1.262	3.365	0.217	3.365	11.033	5.033
1.28	3.413	0.214	3.413	10.886	4.886
1.298	3.461	0.212	3.461	10.743	4.743
1.316	3.509	0.209	3.509	10.604	4.604
1.334	3.557	0.207	3.557	10.469	4.469
1.352	3.605	0.204	3.605	10.337	4.337
1.37	3.653	0.202	3.653	10.206	4.206
1.388	3.701	0.199	3.701	10.080	4.079
1.406	3.749	0.197	3.749	9.956	3.956
1.424	3.797	0.195	3.797	9.836	3.836
1.442	3.845	0.193	3.845	9.719	3.718
1.46	3.893	0.190	3.893	9.604	3.603
1.478	3.941	0.188	3.941	9.492	3.491
1.496	3.989	0.186	3.989	9.382	3.382

Nota: *fuente elaboración propia.*

CAPITULO IV

CONSTRUCCION Y MONTAJE DE LA TURBINA EOLICA

Ahora que tenemos la geometría de cada sección de la pala, pasaremos a construir las palas y acoplarlas para que formen la turbina eólica que buscamos.

4.1 De Los Materiales

Para definir los materiales necesitamos saber algunas cosas previas, la pala debe ser de un material no muy pesado pero que mantenga su forma al correr el viento, además las palas deben unirse para formar un rotor el cual se acoplara al generador eléctrico.

Por tanto, elegiremos los siguientes materiales, madera, fibra de vidrio y acero.

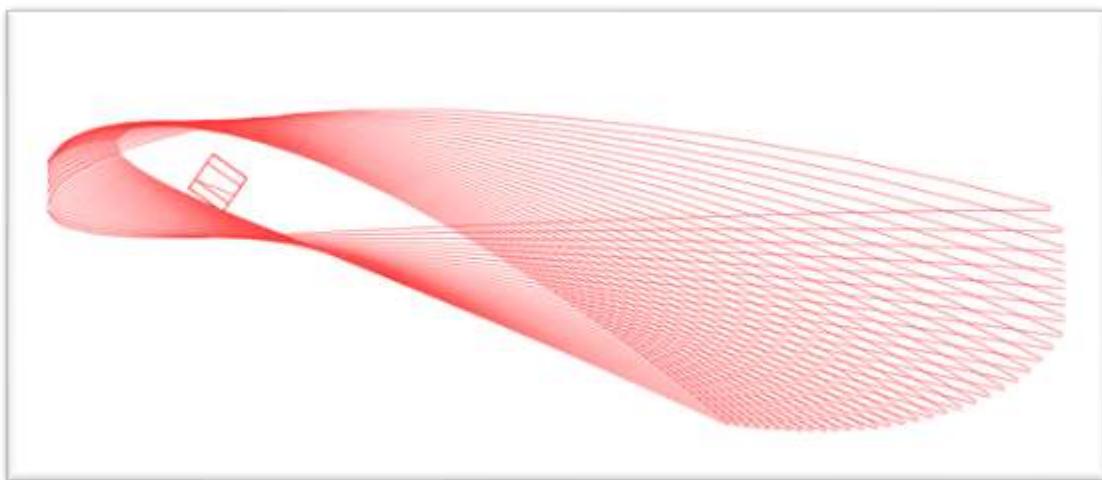
El acero lo usaremos como estructura de agarre de las palas y como manera de unir las 3 palas, la madera será para hacer los perfiles de cada sección que calculamos previamente y la fibra de vidrio será la darles un acabado y superficie uniforme a las palas.

4.2 Construcción De Las Secciones De La Pala

Para realizar la construcción de las secciones de la pala es necesario tener primero el plano de cada sección, es decir hacerlo en autocad u otro programa que permita hacer el dibujo de manera sencilla, en este caso con el autocad dibujamos cada sección para luego imprimir las secciones.

Figura 17

Dibujo de los Perfiles en una Vista de Planta.



Nota: fuente elaboración propia.

En la imagen se puede ver el dibujo de los perfiles ya colocados uno sobre otro, y con el pase o canal atravesando todos los perfiles.

Una vez impresas las secciones ahora nos queda hacer el corte en madera que es el material final a usar.

Figura 18

Secciones Corte de Madera.



Nota: fuente elaboración propia.

Figura 19

Secciones Huecas.



Nota: fuente elaboración propia.

En las imágenes se pueden ver algunos de los perfiles de madera que vienen a ser las secciones que calculamos previamente.

4.3 Unión De Las Secciones

Una vez tenemos las secciones nos queda unirlas, pero teniendo en cuenta que cada sección tiene un ángulo diferente, es decir como calculamos, cada sección tendrá una inclinación respecto del viento sin perturbación, para solucionar este problema lo que se hizo fue sacar cada sección de madera con un pase, dicho pase (similar al un canal o un agujero para eje) ya tiene la orientación deseada.

Entonces al ir apilando cada perfil en donde corresponde, es decir en el orden ya establecido para cada perfil, la hélice del rotor irá tomando forma, esta forma irá cambiando a lo largo de la hélice.

También debemos tener en cuenta que las secciones de madera no son totalmente llenas o sólidas, en cambio están huecas con el objetivo de disminuir su peso, por lo que hay que tener cuidado al momento de manipularlas, ya que si se rompen será difícil encontrarles su orientación inicial.

Figura 20

Secciones a lo Largo del Perfil de Acero



Nota: fuente elaboración propia

En esta imagen se aprecia como vamos colocando sección sobre sección a lo largo del perfil de acero. Usando un tubo cuadrado de acero atravesamos dicho pase, el tubo cuadrado funcionara ahora como un fijador de las secciones sin aumentar demasiado el peso

Figura 21

Sección a lo Largo del Perfil de Acero



Nota: fuente elaboración propia

En esta otra imagen podemos observar cómo están colocados ya todas las secciones de nuestra pala a lo largo del tubo cuadrado

Además, se puede ver como las secciones van girando conforme se disponen a lo largo del tubo.

4.4 Forrado De Las Palas

Una vez tenemos las secciones unidas formando las palas ahora las forraremos con fibra de vidrio para dar firmeza y uniformidad a las palas.

Figura 22

Palas Aun sin Forrar



Nota: fuente elaboración propia

En esa imagen se observa las palas aun sin forrar, y se pueden ver imperfecciones, aunque la forma ya este definida.

Figura 23

Pala Parcialmente Forrada



Nota: fuente elaboración propia

En esta otra imagen se ve una pala parcialmente forrada con fibra de vidrio, y se nota como la superficie forrada es mas uniforme y de mejor acabado.

Figura 24

Tres Palas Forradas.



Nota: fuente elaboración propia

4.5 Formación Del Rotor

Ya que las 3 palas de nuestro rotor están listas, ahora las uniremos para formar el rotor o turbina eólica, para esto aprovecharemos el tubo cuadrado que sobresale de cada pala y los uniremos en un disco metálico que posteriormente se acoplara al eje del generador eléctrico, pero debido a las dificultades del montaje en altura estos pasos se muestran ya hechos en el lugar.

Figura 25

Rotor Eólico.



Nota: fuente elaboración propia

Aquí se observa el rotor eólico ya acoplado y montado en el eje del generador.

Figura 26

Turbina Eólica.



Nota: fuente elaboración propia

Aquí la turbina eólica desde otra perspectiva.

CAPITULO V

PRUEBAS Y RESULTADOS

En este capítulo analizaremos las pruebas y los resultados obtenidos del generador eólico.

5.1 Cálculos Relacionados:

5.1.1. Potencia del Viento Capturado por el Rotor

$$\text{Potencia en el aire} = \frac{1}{2} * (\text{Densidad Aire}) * A * V_{\infty}^3$$

$$\text{Densidad Aire} = 0.87 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$V \propto = 7.6 \text{ m/s}$$

A es area barrida por el rotor

5.1.2. Ajuste del Área por Eficiencia (Cp):

Considerando que el coeficiente de potencia Cp máximo es de 48% y utilizando un diseño conservador al 80% de este valor:

$$A \text{ ajustada} = \frac{2.62}{0.48 * 0.8} \approx 6.83 \text{ m}^2$$

$$R \approx \sqrt{\frac{A \text{ajustada}}{\pi}} \approx \sqrt{\frac{6.83}{\pi}} \approx 1.47 \text{ m}$$

Lo que resulta en un radio de aproximadamente 1.5 metros, adecuado para un rotor de 3 metros de diámetro.

Estos cálculos demuestran que bajo las condiciones y suposiciones iniciales, es posible diseñar un generador eólico que cumpla con los requisitos de potencia, aplicando los principios aerodinámicos y estructurales correctos.

Ahora, para demostrar que el diseño puede lograr los 500 watts, revisaremos los cálculos clave:

5.1.3. Potencia del Viento Capturada por el Rotor:

Normalmente las pruebas se hacen en un túnel de viento, pero ya que no se cuenta con un túnel de viento en la zona, las pruebas se hicieron directamente con el rotor instalado.

5.1.4. Velocidad Angular

La velocidad angular medida de la turbina dio un resultado de:

$$\Omega = 6.28 \text{ radianes/segundo} = 60 \text{ rpm}$$

Como al ingreso del generador hay un multiplicador de velocidad de 1 a 10, la velocidad del generador eléctrico es de 600 rpm.

5.2 Potencia Eléctrica A La Salida Del Generador

Usando un banco de pruebas de resistencias en serie de un total de 800 ohmios, pondremos a prueba la potencia dada por el generador.

Como siguiente medición tenemos el voltaje a la salida del generador, este nos da:

Ecuación 17 Potencia obtenida por voltaje y corriente.

$$P = V \cdot I$$

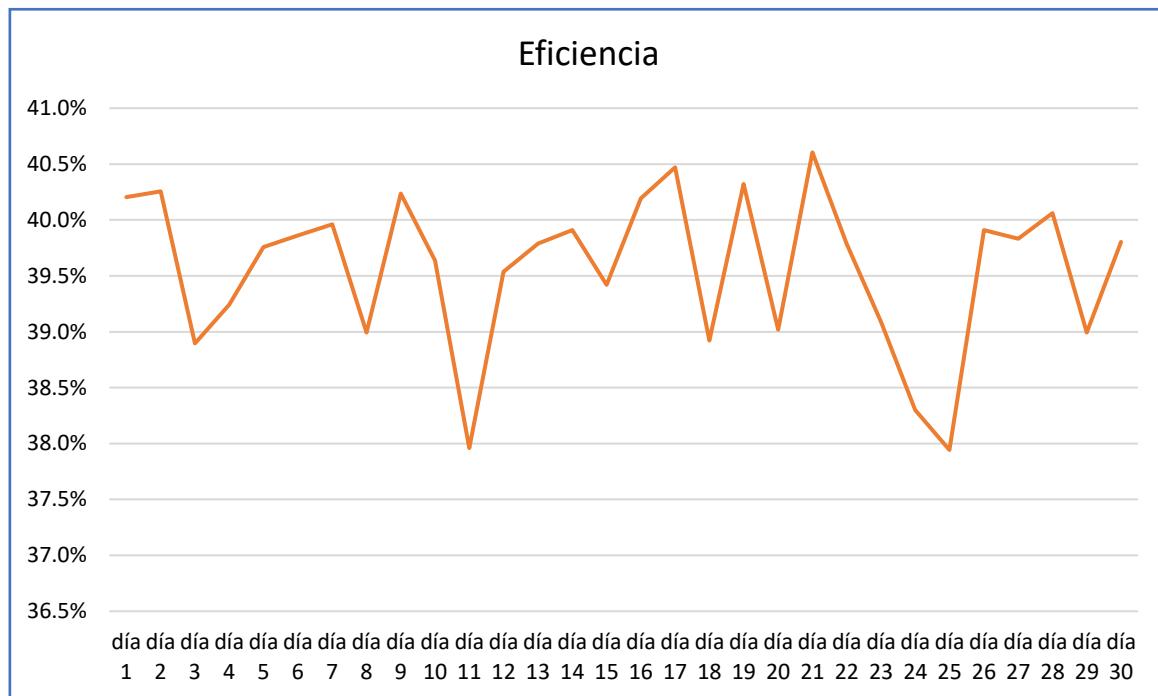
Tabla 3*Resultados Potencia Ideal y Real, Eficiencia, Velocidad del viento.*

	voltaje (V)	amperaje (A)	velocidad del viento (m/s)	potencia ideal (W)	potencia real (W)	eficiencia (%)
día 1	30.5	17.1	7.5	1297.2	521.6	40.2%
día 2	33	17.8	7.8	1459.2	587.4	40.3%
día 3	31.2	17.5	7.7	1403.8	546.0	38.9%
día 4	31.3	17.6	7.7	1403.8	550.9	39.2%
día 5	33.3	18.1	7.9	1516.0	602.7	39.8%
día 6	31.1	17.3	7.6	1349.8	538.0	39.9%
día 7	31	17.4	7.6	1349.8	539.4	40.0%
día 8	31.1	17.6	7.7	1403.8	547.4	39.0%
día 9	32.8	17.9	7.8	1459.2	587.1	40.2%
día 10	34.1	18.3	8	1574.3	624.0	39.6%
día 11	34.6	18.6	8.2	1695.4	643.6	38.0%
día 12	34.2	18.2	8	1574.3	622.4	39.5%
día 13	33.7	17.9	7.9	1516.0	603.2	39.8%
día 14	32.9	17.7	7.8	1459.2	582.3	39.9%
día 15	33.2	18	7.9	1516.0	597.6	39.4%
día 16	31	17.5	7.6	1349.8	542.5	40.2%
día 17	30.7	17.1	7.5	1297.2	525.0	40.5%
día 18	31.4	17.4	7.7	1403.8	546.4	38.9%
día 19	31.1	17.5	7.6	1349.8	544.3	40.3%
día 20	31.3	17.5	7.7	1403.8	547.8	39.0%
día 21	33.1	17.9	7.8	1459.2	592.5	40.6%
día 22	32.8	17.7	7.8	1459.2	580.6	39.8%
día 23	34	18.1	8	1574.3	615.4	39.1%
día 24	34.2	18.3	8.1	1634.1	625.9	38.3%
día 25	34.4	18.7	8.2	1695.4	643.3	37.9%
día 26	33.8	17.9	7.9	1516.0	605.0	39.9%
día 27	30.9	17.4	7.6	1349.8	537.7	39.8%
día 28	30.9	17.5	7.6	1349.8	540.8	40.1%
día 29	31.1	17.6	7.7	1403.8	547.4	39.0%
día 30	33.9	17.8	7.9	1516.0	603.4	39.8%

Nota: fuente elaboración propia

Figura 27

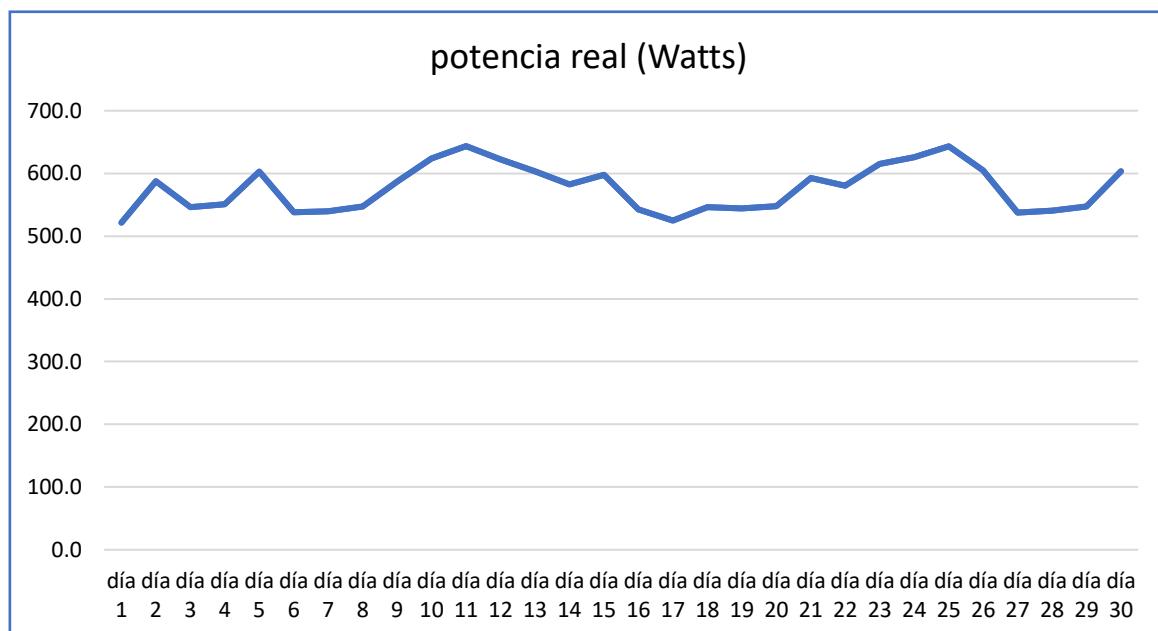
Eficiencia de la Turbina en los Diferentes Días de Prueba.



Nota: fuente elaboración propia

Figura 28

Potencia Real en los Diferentes Días de Prueba



Nota: fuente elaboración propia

Figura 29

Anemómetro con Velocidad de Viento 7.8 m7s.



Nota: fuente elaboración propia

Figura 30

Anemómetro con Velocidad de Viento 7.4 m/s



Nota: fuente elaboración propia

Figura 31

Anemómetro con Velocidad de Viento 7.9 m/s



Nota: fuente elaboración propia

CONCLUSIONES

1. Con la realización de mi presente trabajo puedo concluir que un generador eólico tripala de tres metros de diámetro si produce una potencia de 500 watts.
2. La potencia eólica aprovechable a 10 metros de altura es de más de 500 Watts para 2.62 metros cuadrados de área de la turbina eólica y 7.6 m/s de velocidad del viento sin perturbar.
3. Se realizo con éxito el diseño y la construcción de las hélices del rotor eólico, con un perfil aerodinámico adecuado.
4. Para la construcción de las hélices es necesario el uso de materiales livianos, como en este caso madera y fibra de vidrio para dar definición y consistencia al perfil a lo largo de la hélice
5. Se pudo acoplar con éxito un generador monofásico al eje del rotor eólico mediante un juego de engranajes.
6. Mediante las salidas incorporadas en el generador monofásico se logró tener las salidas eléctricas realizamos las mediciones.
7. Seleccionamos el perfil NACA 4412 por su uso en perfiles aerodinámicos y sus buenas características de sustentación.
8. El perfil NACA 4412 proporciona un desempeño adecuado para esta turbina eólica de 3 palas.
9. La potencia promedio producida por el generador eólico es de 532.5 watts.
10. La eficiencia ideal de un generador eólico es de 59.3%, que viene a ser el coeficiente de BETZ.
11. La eficiencia máxima para un rotor tripala de perfil NACA 4412 es de 48%.
12. La eficiencia real de este generador es de 39.2%.
13. Con 500 watts de potencia una casa típica rural podría tener iluminación y algún electrodoméstico como una radio o una televisión funcionando

permanentemente, adicionalmente almacenado en baterías el uso podría extenderse mucho más, como para el uso de licuadoras u otros electrométricos de mayor consumo energético.

14. Los perfiles de madera ayudan mucho en la consistencia del perfil aerodinámico a lo largo del ala de la turbina, sin embargo, sería mucho más fácil un perfil plástico, que se podría implementar con la tecnología de impresión 3D y así también se ahorraría el recubrimiento con fibra de vidrio que se usó en este proyecto.
15. La aplicación de la fibra de vidrio nos brinda una superficie uniforme y continua en el perfil lo cual es sumamente importante al momento de captar lo mejor posible la energía del viento, ya que, de no ser así, las aberturas de la madera antes de cubrirla con la fibra de vidrio dejarían pasar mucha cantidad de aire y por tanto no se aprovecharía bien la energía del viento.
16. Es imprescindible que los materiales que conforman el perfil sean ligeros para que sean más fácilmente impulsados por el viento.
17. La idea de usar perfiles unidos a lo largo de las hélices del rotor resultó ser muy útil y eficiente ya que se logró unas hélices muy uniformes y homogéneas y con el perfil requerido.
18. El dimensionamiento de las hélices fue el adecuado ya que se lograron los resultados planteados.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Acciona. (2023). *Que es un Aerogenerador*. Pagina Web. Obtenido de
https://www.accionia.com/es/energias-renovables/energia-eolica/aerogeneradores/?_adin=11205121600

Alvarez, C. (2006). *Energia Aeloica*. Madrid, España: Manuales de energia renovable.
Obtenido de
https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10374_Energia_eolica_06_2e6a15a7.pdf

Arribas de Paz, L. (2020). *Aerogeneradores de pequeña potencia*. Ministerio de Ciencia e Innovacion. Obtenido de
[file:///C:/Users/122782/Downloads/1078213862_281220208422%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/122782/Downloads/1078213862_281220208422%20(2).pdf)

Cespedes Coyollo, R., & Vásquez Mondragón, F. (2019). “*Diseño de un sistema de energía eólica para el suministro eléctrico de la localidad de Quinuabamba-Pomabamba Ancash*”. Lima, Peru: Univercidad Tecnologica del Peru UTP.
Obtenido de
https://repositorio.utp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12867/4857/R.Cespedes_F.Vasquez_Trabajo_de_Investigacion_Bachiller_2019.pdf?sequence=3&isAllowed=y

Cheng, Y., Yannan , Z., Hongtuo, Q., & Xuhong , Z. (2024). *Intelligent optimal design of steel-concrete hybrid wind turbine tower based on evolutionary algorithm* (Vols. Volume 218, July 2024, 108729). Journal of Constructional Steel Research.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2024.108729>

Cueva Barrozueta, L. (2015). *Diseño y construcción de un generador eólico de eje vertical tipo savonius para producir 20 watts*. Quito, Ecuador: Escuela Politecnica Naval. Obtenido de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/10538/1/CD-6238.pdf>

Estrada Gasca, C. (2013). *Transición energética, energías renovables y energía solar de potencia*. Mexico: Revista Mexicana de Física,. Obtenido de 4.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57030971010>

Frascati. (2015). *Manual de Frascati 2015 Guidelines for Collecting and Reporting Data on Research and*. (N. 057-17-100-0, Ed.) Madrid, España: Editorial OECD Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología encargada de la edición en español. Obtenido de https://www.oecd.org/es/publications/manual-de-frascati-2015_9789264310681-es.html

French, M. (1984). *Conceptual design for engineers*. Springer. (I. 978-1-84996-853-9, Ed.) Bailrigg, Reino Unido : Emeritus Professor of Engineering Design, Lancaster University,, doi:I 10.1007/978-1-4471-3627-9

Gui, X., Xue, H., Hu, Z., & Xu, Y. (2023). *Analysis on aerodynamic performance of mine horizontal axis wind turbine with air duct based on breeze power generation* (Vols. Volume 35, April 2023, e00553). Sustainable Materials and Technologies.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.susmat.2022.e00553>

Hernandez Sampieri, R., Fernandez Collado, C., & Baptista Collado, P. (2014). *Metodologia de la Investigacion Sexta Edicion*. Mg Graw Hill. Obtenido de https://periodicooficial.jalisco.gob.mx/sites/periodicooficial.jalisco.gob.mx/files/metodologia_de_la_investigacion_-_roberto_hernandez_sampieri.pdf

Leal Rubio, M., Dominguez Martin, A., Alvaro Leon, R., Marcos Barrio, A., Arbeteta Duran, A., & Lechosa Urquijo, E. (2020). *Diseño de Aurogeneradores*. ETSIL Maquinas Hidraulicas. Obtenido de <https://www.kimerius.com/app/download/5780377015/Dise%C3%B1o+de+Aerogeneradores.pdf>

Medina Socualaya, P. (2023). *Propuesta de diseño y construcción del aerogenerador Savonius modificado para suministrar energía eléctrica a un usuario residencial*

del distrito de Ahuac - 2021. Huancayo, Peru: Universidad Continental. Obtenido de

https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/13552/1/IV_FIN_109_TE_Medina_Socualaya_2023.pdf

Minem. (2016). *Atlas Eólico del Perú.* Ministerio de Energía y Minas. Obtenido de
<https://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/cg00367.pdf>

Mosfequr , R., Khandakar, N., & Ahsan Mian, M. (2015). *Aerodynamic Performance Analysis of Three Bladed Savonius Wind Turbine With Different Overlap Ratios and at Various Reynolds Number* (Vols. IMECE2010-40272).
doi:<https://doi.org/10.11115/IMECE2010-40272>

Peña Vicente, D. (2019). *Diseño estructural de un álabe de turbina eólica de 5 kw a base de material compuesto con refuerzo de fibras naturales de stipa obtusa.* Lima, Peru: Universidad de y Tecnología UTEC . Ingenieria Mecanica. Obtenido de
https://repositorio.utec.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12815/110/Diego%20Pe%20F1a_Tesis.pdf?sequence=1

Redonnet, S., Bach, A., Kunder, S., Schmidt, T., & Rahman, N. (2024). *Computational and experimental exploration of a morphable blade concept for wind turbines* (Vols. Volume 12, December 2024). (D. o. The Hong Kong University of Science & Technology, Ed.) Hong kong, China: Energy Reports.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.02.060>

River Valeriano , V., & Lizana Porras, E. (2022). *Diseño de un Aerogenerador para Suministro de energía electrica al sector el pongo de ,la ciudad de jaen Peru* 2022. Universidad Nacional de Jaen. Obtenido de
http://repositorio.unj.edu.pe/bitstream/UNJ/455/1/Vera_BRV_Lizana_PEP.pdf

Rubio Rodríguez , B. (2024). *Estudio de caso: energía eólica para generación de energía eléctrica a nivel urbano”.* Ecuador: Guayaquil. Obtenido de

https://www.researchgate.net/publication/379568651_ESTUDIO_DE_CASO_ENERGIA_EOLICA_PARA_GENERACION_DE_ENERGIA_ELECTRICA_A_NIVEL_URBANO

Rubio Rodriguez, B. (2024). *Estudio de Caso Energia Eolica para generacion de energia electrica a nivel urbano*. Guayaquil, Ecuador: Universidad de Guayaquil Ecuador.

Obtenido de

https://www.researchgate.net/publication/379568651_ESTUDIO_DE_CASO_ENERGIA_EOLICA_PARA_GENERACION_DE_ENERGIA_ELECTRICA_A_NIVEL_URBANO

Saad, M., Magedi, M., & Asmuni. (2014). *Comparison of Horizontal Axis Wind Turbines and Vertical Axis*. (Vols. Vol. 04, Issue 08 (August. 2014), ||V2|| PP 27-30). (I. (. 2250-3021, Ed.) IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN) . Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/284395706_Comparison_of_Horizontal_Axis_Wind_Turbines_and_Vertical_Axis_Wind_Turbines

Suárez Huamán, N. (2021). *Diseño de un aerogenerador eolico para cubrir la demanda electrica del laboratorio de ingenieria mecanica y electrica de la universidad nacional de jaen*. Universidad Nacional de Jaen. Obtenido de http://repositorio.unj.edu.pe/bitstream/UNJ/162/1/Su%C3%A1rez_HNJM.pdf

Wang, L., Yang, J., Wang, L., Chen , S., Duić , N., Hoon Joo, Y., & Song, D. (2024). *Wind turbine wakes modeling and applications: Past, present, and future* (Vols. Volume 309, Part 1, 1 October 2024, 118508). (I. 00298018, Ed.) Changsha, China: Ocean Engineering. doi:<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.118508>

Zurita Gabasa, J., & Arbolea Sola, L. (2012). *Diseño de un aerogenerador del eje vertical tipo savonius para la electrificacion rural, Ingenieria Industrial*. Navarra, España: Universidad Publica Navarra. Obtenido de <https://core.ac.uk/download/10851258.pdf>

Jansen, W. A. M., & Smulders, P. T. (1977). *Rotor design for horizontal axis windmills.*
(SWD publications; Vol.7701). Stuurgroep Windenergie Ontwikkelingslanden.

Bent Sorensen,(2007). *Renewable energy conversion, transmision and storage.*

ANEXOS

ANEXO 1 MATRIZ DE CONSISTENCIA

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	
			METODOLOGÍA
¿Cómo puede generarse energía eléctrica de potencia de 500 watts para lugares alejados sin acceso a la red eléctrica?	O.G. Diseñar y construir un generador eólico tripala de eje horizontal de tres metros de diámetro que produzca una potencia mínima de 500 watts utilizando los conocimientos y la experiencia obtenida en la Universidad Nacional de ingeniería, en la carrera de Ingeniería mecánica.	Un generador eólico tripala de eje horizontal de 3 metros de diámetro generara una potencia mínima de 500 watts, realizando el diseño y la construcción según conocimientos y la experiencia obtenida en la Universidad Nacional de ingeniería, en la carrera de Ingeniería mecánica.	<p>Tipo, Enfoque: investigación aplicada, aplicación del conocimiento científico El enfoque de investigación es cuantitativo</p> <p>Muestra La selección de la muestra se basará en criterios como el acceso a recursos naturales (viento), la distancia a la red eléctrica más cercana, y las necesidades energéticas de la comunidad.</p> <p>Instrumento: Software de Diseño (CAD): Función: Utilizado para diseñar y optimizar las hélices del rotor.</p> <p>Aplicación: Permite verificar que el diseño propuesto puede generar la potencia esperada bajo diferentes condiciones de viento.</p> <p>Anemómetro: Función: Medir velocidad del viento en la ubicación seleccionada para la instalación del generador.</p> <p>Aplicación: Determina la viabilidad de la instalación del generador en el lugar.</p> <p>Tacómetro: Función: Medir la velocidad de rotación del rotor eólico.</p> <p>Aplicación: Ayuda a analizar la relación entre la velocidad del viento y la velocidad de rotación del rotor para asegurar que el generador funcione dentro de los parámetros de diseño.</p>
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPÓTESIS ESPECÍFICAS	
¿Qué potencia tendrá el viento a 10 metros de altura?	Determinar la potencia eólica aprovechable en el lugar a 10 metros de altura	A diez metros de altura la potencia aprovechable será suficiente para obtener los 500 watts.	
¿Cuál será el perfil y diseño óptimo de las hélices del rotor eólico?	Diseñar y construir las hélices del rotor eólico.	El diseño y la construcción de las hélices del rotor se pueden realizar usando materiales al alcance de la zona de La Provincia de la Unión.	

<p>¿Cómo convertirse la energía mecánica atrapada en el eje en energía eléctrica?</p>	<p>Acoplar un generador monofásico al rotor eólico.</p>	<p>El uso de un generador monofásico acoplado al eje del rotor nos permitirá recolectar la energía del viento transformada en energía eléctrica y por tanto medir la cantidad de energía recolectada.</p>	
<p>¿Qué forma debe tener el perfil de las hélices para captar mejor la energía cinética del viento?</p>	<p>Seleccionar el perfil aerodinámico a utilizar</p>	<p>El perfil aerodinámico NACA 4412 proporcionara el desempeño requerido al rotor eólico.</p>	