



Implementación un banco de prueba tipo eólico para realizar mediciones con base en aerogenerador espiral de Arquímedes

Erik Farley Poveda Guatama

Osneider de Jesus Martinez Martinez

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Puerto Colombia, Colombia

2023

Implementación un banco de prueba tipo eólico para realizar mediciones con base en aerogenerador espiral de Arquímedes

Erik Farley Poveda Guatama

Osneider de Jesus Martinez Martinez

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Mecánico

Director:

Dr. Willman Orozco Lozano

Línea de Investigación:

Energías renovables y transición energética.

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Puerto Colombia, Colombia

2023

A mis amados Paula y Juan Jose,

A mi querida esposa,

A mi adorada familia,

Este logro no hubiera sido posible sin su inquebrantable apoyo, paciencia y amor. Cada página de esta tesis lleva impresa la fuerza de su aliento y la luz de su inspiración. A ustedes, que han sido mi pilar inamovible en las noches de estudio y mi refugio en los días de desafío, dedico con profundo agradecimiento este trabajo. Gracias por ser mi constante fuente de motivación y por compartir conmigo el viaje de alcanzar este sueño académico. Este logro es tan suyo como mío. Con todo mi amor y gratitud.

Con cariño,

Erik Poveda

Agradecimientos

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a los ingenieros Willman Orozco Lozano y José Daniel Hernández Vásquez por su invaluable ayuda y significativa contribución a esta tesis. Su orientación y conocimientos han sido fundamentales para el desarrollo de este trabajo.

Agradezco también a la Universidad Antonio Nariño, donde he tenido el privilegio de estudiar y crecer académicamente. El apoyo brindado por esta institución ha sido crucial en mi formación como profesional.

Asimismo, quiero extender mi reconocimiento a la empresa Relianz por su respaldo a lo largo de mi carrera. La oportunidad de aplicar los conocimientos adquiridos en un entorno práctico ha sido fundamental para mi desarrollo.

Finalmente, agradezco a Dios por guiar mis pasos y brindarme la fortaleza y sabiduría necesarias para completar este proyecto. A todos ellos, mi más sincero agradecimiento.

Resumen

Las turbinas eólicas son una de las fuentes de energía renovable más importantes y prometedoras en la actualidad., la energía eólica es limpia y no produce emisiones de gases de efecto invernadero, lo que la convierte en una alternativa sostenible frente a las fuentes de energía fósiles y abarca iniciativa para la transición energética en Colombia.

El objetivo general del proyecto consiste en diseñar y construir un banco de pruebas de laboratorio para realizar mediciones eólicas a través de un aerogenerador espiral de Arquímedes. Esta iniciativa que permitirá a los estudiantes de la Universidad Antonio Nariño Sede Puerto Colombia hacer uso del banco de pruebas la cual será una herramienta fundamental para el aprendizaje de los estudiantes, quienes podrán realizar experimentos y análisis de los datos obtenidos a partir de las mediciones eólicas.

Con la aplicación de este proyecto, se construye una turbina eólica tipo Arquímedes para ejercer una vocación e interés en las nuevas generaciones del Campus de Ingeniería de la Universidad Antonio Nariño Sede Puerto Colombia.

Como resultado, se obtuvo un banco que cuenta una turbina eólica de Arquímedes con sus respectivas instrumentaciones para realizar la medición de factores que permiten la caracterización y obtención de sus curvas de rendimiento.

Palabras clave: Eólicas, Arquímedes, energías renovables, proyectos energéticos.

Abstract

Wind turbines are one of the most important and promising renewable energy sources today. Wind energy is clean and produces no greenhouse gas emissions, making it a sustainable alternative to fossil energy sources. and covers an initiative for the energy transition in Colombia.

The general objective of the project is to design and build a laboratory test bench to carry out wind measurements through an Archimedean spiral wind turbine. This initiative will allow the students of the Antonio Nariño University Puerto Colombia Campus to use the test bank which will be a fundamental tool for the learning of the students, who will be able to carry out experiments and analyze the data obtained from the wind measurements.

With the application of this project, an Archimedes-type wind turbine is built to exercise a vocation and interest in the new generations of the Engineering Campus of the Antonio Nariño University Puerto Colombia Campus.

As a result, a bench was obtained that has an Archimedes wind turbine with its respective instrumentation to measure factors that allow the characterization and obtaining of its performance curves.

Keywords: Wind power, Archimedes, renewable energies, energy projects.

Contenido

1. Introducción	15
1.1 Formulación del problema	17
1.2 Objetivos.....	18
1.2.1 Objetivo general	18
1.2.2 Objetivos específicos.....	19
1.3 Justificación	19
2. Fundamentos Teóricos	21
2.1 Recurso eólico.....	21
2.2 Energía eólica	21
2.3 Origen de los vientos	21
2.4 Aerogenerador	22
2.5 Aerogenerador de Arquímedes.....	23
2.6 Medición de corrientes de viento	25
2.7 Anemómetro.....	25
2.8 Tacómetro.....	26
2.9 Multímetro.....	28
3. Diseño metodológico	30
3.1 Descripción de proceso.....	31
3.2 Bases de cálculo	34
3.3 Dimensiones de la turbina	36
3.3.1 Diámetro del rotor.....	36
3.3.2 Largo de los álabes	37
3.3.3 Material para la turbina.....	39
3.3.4 Dimensión del eje	41
3.5 Análisis estático.....	44
3.5.1 Suposiciones análisis estático	44
3.5.2 Información del modelo	46

3.5.3	Propiedades del estudio	46
3.5.4	Unidades de medición	47
3.5.5	Propiedades del material.....	48
3.5.6	Cargas y sujeciones	49
3.5.7	Información de malla	50
3.5.8	Detalles del sensor	51
3.5.9	Fuerzas resultantes	52
3.5.10	Resultados del estudio	53
3.6	Análisis de fatiga	56
3.6.1	Suposiciones análisis fatiga	56
3.6.2	Información del modelo	57
3.6.3	Propiedades del estudio	58
3.6.4	Unidades de medición	59
3.6.5	Propiedades del material.....	60
3.6.6	Cargas y sujeciones	61
3.6.7	Resultados del estudio	61
4.	Pruebas resultados y análisis.....	64
4.1	Condiciones para el uso del banco y la realización de pruebas	64
4.1.1	Tacómetro.....	64
4.1.2	Anemómetro:	65
4.1.3	Multímetro Digital.....	66
4.1.4	Soplador de viento.....	67
4.1.5	Análisis de incertidumbre	67
4.2	Pruebas y resultados	69
5.	Conclusiones y recomendaciones	79
5.1	Conclusiones	79
5.2	Recomendaciones	80
	Bibliografía	82

Lista de figuras

Figura 1. Origen del viento.....	22
Figura 2. Aerogenerador de eje horizontal y eje vertical	23
Figura 3. Diseño del rotor en forma de espiral de Arquímedes	24
Figura 4. Anemómetro	26
Figura 5. Tacómetro.....	27
Figura 6. Multímetro	29
Figura 7. Parámetros geométricos del ASWT.....	33
Figura 8. Perfil de torneado de la hélice long.....	37
Figura 9. Simulación de las medidas.....	38
Figura 10. Operación Matriz creación de los Alabes	38
Figura 11. impresión turbina	39
Figura 12. Impresión 3D	40
Figura 13. Impresión final	40
Figura 14. Elaboración del eje	41
Figura 15. Cilindro elaborado	42
Figura 16. Eje Mecanizado	42
Figura 17. Perforación de la hélice.....	43
Figura 18. Armado del aerogenerador	44
Figura 19. Plano del eje.....	45

Lista de tablas

Tabla 1. Valoración de las turbinas según sus características	34
Tabla 2. Rubrica de evaluación.....	35
Tabla 3. Información del modelo.....	46
Tabla 4. Propiedades del estudio.....	46
Tabla 5. Unidades de medición.....	47
Tabla 6. Propiedades del material	48
Tabla 7 Cargas y sujeciones.....	49
Tabla 8. Información de malla.....	50
Tabla 9. Detalles del sensor.....	51
Tabla 10. Fuerzas resultantes.....	52
Tabla 11. Tensiones	53
Tabla 12. Desplazamiento.....	54
Tabla 13. Deformaciones unitarias	54
Tabla 14. Factor de seguridad	54
Tabla 15. Información del modelo.....	57
Tabla 16. Propiedades del estudio	58
Tabla 17. Unidades de medición.....	59
Tabla 18. Propiedades del material	60
Tabla 19. Cargas y sujeciones.....	61
Tabla 20. Resultado 1	61
Tabla 21. Resultado 2	62
Tabla 22. Resultado 3	62
Tabla 23. Características del tacómetro	65
Tabla 24. Características del anemómetro.....	66
Tabla 25. Características Multímetro	66
Tabla 26. Características soplador	67
Tabla 27. Mediciones del tacómetro y anemómetro.....	73
Tabla 28. Relación RPM/Velocidad del viento.....	77

1. Introducción

El presente trabajo de investigación nace de la necesidad que existe entre los estudiantes de Ingeniería de la Universidad Antonio Nariño Sede Puerto Colombia en el laboratorio de pruebas para realizar mediciones eólicas con base al aerogenerador de Arquímedes buscando enseñarles el uso la energía eólica que es la energía obtenida a partir del viento, por efecto de las corrientes de aire, y que es convertida en otras formas útiles de energía para las actividades cotidianas.

En el proyecto llamado Diseño conceptual de una turbina eólica espiral de Arquímedes con potencia mecánica máxima de 1 kw[1]. aplicaron los conocimientos adquiridos durante la formación en varios campos de la ingeniería electromecánica para modelar y simular el funcionamiento de una turbina eólica espiral de Arquímedes, la misma se ha sometido a los fenómenos meteorológicos que existen en la zona urbana del cantón Latacunga. Con el uso de la estación meteorológica fue posible calcular la velocidad media de 3,89 m/s y la velocidad máxima medida de 9,6 m/s, en la zona el viento se presenta en mayor cantidad por el sur este. Tras el análisis del potencial eólico, se deduce que no se logró generar 1 kW de energía mecánica debido a que en el lugar de recopilación de datos, la

velocidad del viento no es suficiente para alcanzar dicha potencia, otra opción fue aumentar el diámetro del rotor, pero esto no es viable debido a que el proyecto está enfocado para la zona urbana, mediante los cálculos de generación de potencia se especificó los parámetros de diseño que permite aprovechar al máximo la energía cinética del viento, el diámetro del rotor es de 1,5 m con un largo de 1,18 m y un ángulo de ataque de 45°. Estas medidas permiten generar una potencia de 33,25 W con la velocidad media y 485,73 W con la velocidad máxima medida. Para alcanzar la potencia máxima de 1 kW bajo los mismos parámetros de diseño, es necesaria una velocidad del viento igual o mayor a 15 m/s.

El proyecto "Diseño, simulación y construcción de un prototipo de aerogenerador de eje horizontal [2]" tiene como objetivo la creación de un aerogenerador de eje horizontal para la producción de energía eléctrica. Este equipo, mediante la capacidad de ajustar el ángulo de inclinación y el tipo de aspa, pretende determinar los parámetros aerodinámicos que influyen en la eficiencia del sistema. Dada la tendencia global de los países desarrollados hacia la generación de electricidad a partir de fuentes renovables, y considerando que Colombia carece de suficientes datos sobre la energía eólica, resulta crucial iniciar diversos estudios para fomentar el uso de energías limpias en el país.

Es por ello, que el interés investigativo del proyecto, se enfatiza en implementar un Banco de Pruebas para realizar mediciones eólicas con base al aerogenerador tipo espiral de Arquímedes, debido a la necesidad de poseer un banco de laboratorio instrumentado necesario para la adquisición de saberes en el nuevo

contexto de la transición energética, La Universidad Antonio Nariño Sede Puerto Colombia con la adecuación de espacios de práctica coloca a prueba los conocimientos adquiridos durante los periodos lectivos en los campus de Ingeniería.

1.1 Formulación del problema

Como lo indica Anderson y Adalberto Bermúdez en su proyecto Implementación de un banco de pruebas de laboratorio con rotores savonius[12] que permita la caracterización de curvas de rendimiento enfocándose en la problemática que había en la UAN Sede Puerto Colombia, debido a que no cuenta con un banco que permita realizar prácticas con rotores savonius, enfocándose en el área de estudio del comportamiento fluido dinámico y rendimiento de estas; siendo una problemática bastante importante que de solucionarla con la formulación del presente proyecto sería un aporte muy importante llegando al punto de enriquecer a la UAN sede Puerto Colombia con este tipo de herramientas para sus estudiantes.

Entonces se puede afirmar que el problema que aborda este proyecto es la falta de dispositivos que posibiliten la aplicación práctica de los principios y habilidades teóricas y prácticas relacionadas con los aerogeneradores espiral de Arquímedes, en los cursos pertinentes de los programas de Ingeniería Mecánica y Tecnología en Mantenimiento Electromecánico Industrial en la sede de la UAN en Puerto Colombia.

Naturaleza y Magnitud del Problema

La naturaleza del problema radica en la necesidad de promover y desarrollar tecnologías sostenibles en el ámbito de la generación de energía. Las turbinas eólicas, en particular, representan una solución clave para avanzar hacia fuentes de energía más limpias y renovables. La magnitud del problema se manifiesta en la dependencia actual de fuentes de energía no sostenibles, lo que contribuye a problemas medioambientales y climáticos. La transición hacia la energía eólica, como se propone en el proyecto, busca abordar esta magnitud al proporcionar una alternativa más respetuosa con el medio ambiente.

Población Objetivo

La población objetivo de este proyecto se centra en los estudiantes de la Universidad Antonio Nariño Sede Puerto Colombia, específicamente aquellos matriculados en programas de ingeniería, con un enfoque principal en el Campus de Ingeniería. Estos estudiantes representan la próxima generación de profesionales en el campo y serán los beneficiarios directos del banco de pruebas de laboratorio para mediciones eólicas.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Diseñar y construir un banco de pruebas de laboratorio a través de un aerogenerador espiral de Arquímedes para la aplicación de mediciones eólicas

como medio educativo para los estudiantes de la Universidad Antonio Nariño Sede Puerto Colombia.

1.2.2 Objetivos específicos

- Identificar diferentes diseños de turbinas estilo Arquímedes, enfoques tradicionales, y métodos de cálculo utilizados para evaluar la eficiencia mecánica de estas variantes de turbinas.
- Elegir los materiales adecuados para la construcción de los modelos de turbinas y los equipos necesarios para llevar a cabo las mediciones y análisis en la creación y recolección de datos del banco de pruebas de laboratorio.
- Evaluar el diseño turbina eólicas con base al aerogenerador espiral de Arquímedes.

1.3 Justificación

El proyecto de Diseño y construcción de un banco de laboratorio para realizar mediciones eólicas con base al aerogenerador espiral de Arquímedes de un 1 kw [1]se realiza con el motivo principal de brindarles a los estudiantes de la Universidad Antonio Nariño Sede Puerto Colombia un banco de pruebas que permitirá a los estudiantes de Ingeniería Mecánica y otras áreas relacionadas que tengan acceso a tecnologías de vanguardia y aprendan de manera práctica sobre el uso de energías renovables.

Responde a las necesidades de contar con herramientas de medición eficientes y precisas para evaluar el desempeño de dicho aerogenerador. Este proyecto es de gran relevancia en el contexto actual, dado que la búsqueda de soluciones energéticas sostenibles se ha convertido en una prioridad a nivel mundial.[7]

Con esta solución se busca generar datos fiables que permitan optimizar el diseño y la operación de este tipo de aerogeneradores, contribuyendo así a la investigación y desarrollo de energías renovables.

2. Fundamentos Teóricos

2.1 Recurso eólico.

El potencial eólico ha estado presente a lo largo de la historia, siendo su utilización más antigua registrada como un medio de transporte. Se han encontrado representaciones en dibujos egipcios con 5000 años de antigüedad, que ilustran el uso de velas en embarcaciones para desplazarse por el río Nilo.[13]

2.2 Energía eólica

La energía eólica se deriva de la fuerza generada por las corrientes de viento y forma parte de las energías renovables, que son respetuosas con el medio ambiente. Su denominación se origina en Eolo, el dios griego del viento. Para convertir esta energía en una forma utilizable, se emplean molinos de viento o, más comúnmente en la actualidad, aerogeneradores. Estos dispositivos, mediante aspas, transforman la corriente de aire en un movimiento mecánico circular. [14]

2.3 Origen de los vientos

La principal causa de la generación de vientos es el calentamiento desigual de la superficie terrestre debido a la radiación solar, pues, esta absorción de radiación

se concentra principalmente en las regiones ecuatoriales. El aire cálido que asciende en los trópicos es sustituido por masas de aire más fresco que se desplazan desde las zonas polares.[13]

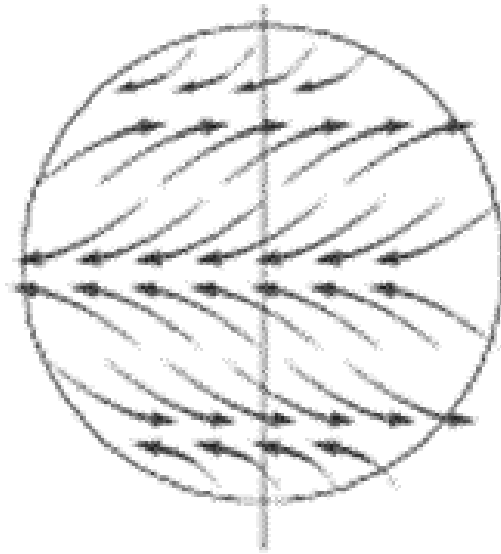


Figura 1. Origen del viento

2.4 Aerogenerador

La principal causa de la generación de vientos es el calentamiento desigual de la superficie terrestre debido a la radiación solar, pues, esta absorción de radiación se concentra principalmente en las regiones ecuatoriales. El aire cálido que asciende en los trópicos es sustituido por masas de aire más fresco que se desplazan desde las zonas polares.[14]

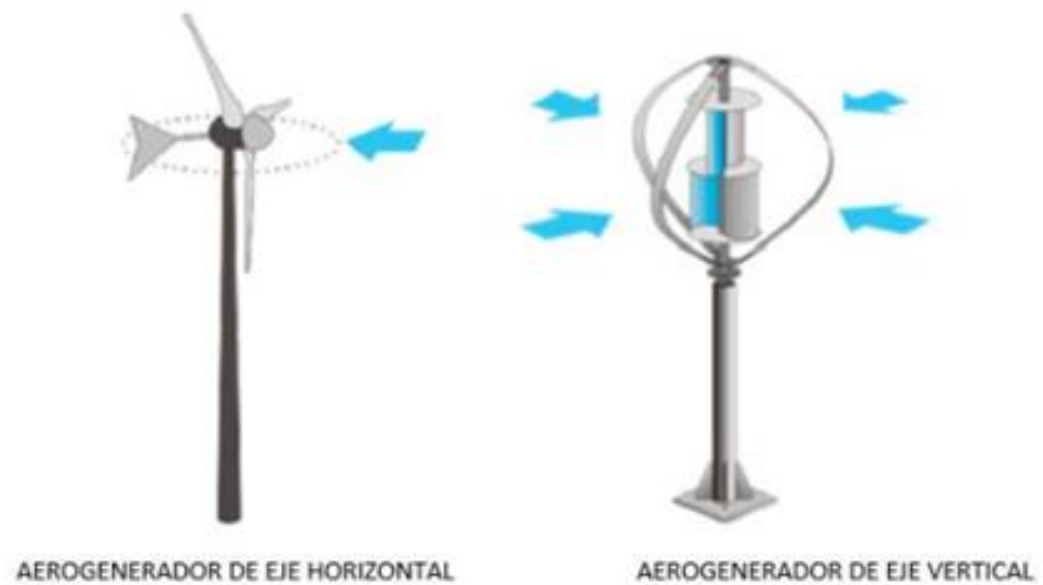


Figura 2. Aerogenerador de eje horizontal y eje vertical

2.5 Aerogenerador de Arquímedes

El Aerogenerador de Arquímedes presenta una turbina de rotor en espiral, inspirada en el diseño del matemático griego Arquímedes basado en la concha del molusco nautilus. Este tipo de turbina eólica, lanzada por la empresa holandesa LIAM F1 UWT, se caracteriza por su eficiencia elevada, arranque a baja velocidad para un rendimiento óptimo, operación silenciosa, resistencia a turbulencias, bajos requerimientos de mantenimiento y una estética orgánica. Está diseñado para instalarse en diversos lugares, incluyendo techos de edificios y casas, tiene un diámetro de rotor de 1,5 metros y un peso inferior a los 100 kilos. Con una velocidad de viento de 5 m/s, esta turbina espiral de Arquímedes genera aproximadamente 1500 kilovatios-hora de energía al año. La empresa continúa desarrollando una nueva generación, la LIAM F1 UWT, que promete mayor eficiencia y mínimo ruido para uso doméstico.[1]

La figura exhibe la configuración en espiral de la turbina, lo cual le confiere la capacidad de aprovechar y recolectar hasta un 88% de la energía cinética del viento, convirtiéndola en energía mecánica. Debido a su diseño en forma de tornillo, es necesario que la turbina esté orientada hacia la dirección donde el viento sea más fuerte para lograr un rendimiento óptimo. [1]



Figura 3. Diseño del rotor en forma de espiral de Arquímedes

2.6 Medición de corrientes de viento

La medición de corrientes de viento se refiere al proceso de cuantificar y registrar la velocidad y dirección del viento en un lugar específico. Esta medición es crucial en diversos campos, como la meteorología, la climatología, la ingeniería ambiental, la aviación y la energía eólica. Las mediciones de corrientes de viento proporcionan información valiosa para entender el comportamiento atmosférico y tomar decisiones en áreas como diseño de estructuras, planificación urbana, pronóstico del tiempo y aprovechamiento de la energía eólica.

Para llevar a cabo la medición de corrientes de viento, se utilizan instrumentos llamados anemómetros y veletas. Estos dispositivos registran la velocidad y dirección del viento respectivamente. Las estaciones meteorológicas suelen estar equipadas con estos instrumentos, y en aplicaciones más avanzadas, se utilizan torres meteorológicas o mástiles en diferentes alturas para obtener perfiles verticales del viento.[3]

2.7 Anemómetro.

Es un dispositivo utilizado para medir tanto la dirección como la intensidad del viento. En el ámbito marino, las olas son evaluadas en una escala de Douglas que va desde el mar en calma hasta olas de gran envergadura. El anemógrafo registra de manera continua la velocidad del viento en metros por segundo, así como su dirección, almacenando ambos datos en función del tiempo y del trayecto del

viento. Con base en estos registros, se puede fácilmente calcular la velocidad promedio para cada intervalo de observación.[15]



Figura 4. Anemómetro

2.8 Tacómetro.

Un tacómetro es un instrumento de medición diseñado para medir la velocidad de rotación de un objeto en movimiento, generalmente expresada en revoluciones por minuto (RPM). Este dispositivo es ampliamente utilizado en diversos contextos, como la industria, la ingeniería, la automoción, la aviación y otros campos donde es esencial conocer la velocidad de rotación de una máquina, motor o componente.[13]

Hay varios tipos de tacómetros, pero los dos tipos principales son:

Tacómetro Mecánico:

Utiliza componentes mecánicos, como cables y engranajes, para medir la velocidad de rotación. Este tipo de tacómetro puede conectarse directamente a la máquina o motor que se está monitoreando.[13]

Tacómetro Electrónico:

Emplea tecnología electrónica para detectar la velocidad de rotación. Puede utilizar diferentes métodos, como sensores magnéticos, ópticos o inductivos, para recopilar datos sobre la frecuencia de rotación y luego convertirlos en RPM.[13]



Figura 5. Tacómetro

2.9 Multímetro.

Un multímetro, también conocido como tester o polímetro, es una herramienta eléctrica utilizada para medir diferentes magnitudes eléctricas en un circuito eléctrico. Estas magnitudes pueden incluir voltaje (tensión), corriente, resistencia, y en algunos casos, otras variables como la capacidad y la frecuencia.

El multímetro típico consta de tres funciones principales:

- **Medición de Voltaje (Tensión):** Permite medir la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos de un circuito. Esta función es fundamental para determinar si hay energía presente en una parte del circuito y cuánta.
- **Medición de Corriente:** Se utiliza para medir el flujo de corriente eléctrica en un circuito. Se debe intercalar en serie con el componente o el conductor a través del cual se quiere medir la corriente.
- **Medición de Resistencia:** Mide la resistencia eléctrica de un componente o un tramo específico de un circuito. Esto es útil para verificar la integridad de los componentes o identificar posibles problemas como cortocircuitos o resistencias abiertas.



Figura 6.Multímetro

3. Diseño metodológico

La metodología tipo cascada es un enfoque secuencial y lineal para el desarrollo de software que sigue una serie de fases claramente definidas. Comienza con la recopilación y documentación exhaustiva de los requisitos del sistema, seguida de las fases de diseño, implementación, pruebas, despliegue y mantenimiento. Cada fase debe completarse antes de pasar a la siguiente, y se enfoca en la planificación detallada y la documentación integral en cada etapa del proceso.

En la aplicación de la metodología tipo cascada a la construcción de un banco para la evaluación de aerogeneradores, se sigue un enfoque secuencial y lineal que abarca cuatro etapas distintas. La primera etapa se centra en la Caracterización de los parámetros mecánicos relacionados con el rendimiento y particularidades del aerogenerador. Aquí, se establecen los requisitos y características esenciales que guiarán el diseño del banco.

Una vez completada la caracterización, se avanza a la segunda etapa, que implica el Diseño del banco utilizando software CAD para visualizarlo de manera gráfica, analizar su funcionamiento y seleccionar los materiales adecuados para su construcción. Esta fase está dedicada a la planificación detallada y a la toma de decisiones fundamentales para la implementación del banco.

La tercera etapa se enfoca en la Construcción del banco y la evaluación de su operatividad. Durante esta fase, se lleva a cabo la construcción física del banco de pruebas, y se realiza una evaluación exhaustiva para verificar si se ajusta a las condiciones previstas y si los resultados obtenidos concuerdan con las expectativas establecidas en las etapas anteriores.

Finalmente, en la cuarta etapa, se lleva a cabo la recopilación de resultados obtenidos durante la construcción y evaluación del banco. Esta información se utiliza para crear guías específicas destinadas al laboratorio y al manejo práctico del banco. Cada etapa se completa antes de pasar a la siguiente, siguiendo la secuencia lógica característica de la metodología tipo cascada.

3.1 Descripción de proceso

Recientemente, se ha observado un incremento en la utilización de turbinas eólicas para aprovechar la energía del viento, como es el caso de la turbina eólica en espiral de Arquímedes (ASWT). En este estudio, se llevaron a cabo investigaciones tanto experimentales como numéricas con el objetivo de analizar cómo el grosor de las palas y los ángulos de estas afectan el rendimiento de la ASWT. Se empleó el solver ANSYS Fluent para obtener resultados numéricos, los cuales fueron validados mediante comparación con resultados experimentales recientes.

La parte experimental del trabajo se desarrolló en una ASWT convencional que presentaba un espesor de hoja de 3,5 mm y ángulos de hoja de 30°, 45° y 60° para la primera, segunda y tercera hoja, respectivamente. Se utilizaron velocidades del viento de 6, 8, 10 y 12 m/s. Los resultados revelaron que los ángulos óptimos para las palas del rotor de la ASWT modificada fueron 25°, 50° y 60°, respectivamente. A una velocidad del viento de 10 m/s, el rendimiento máximo de la ASWT convencional y modificada fue del 24,3% y 28,6% con una relación de velocidad de punta (TSR) de 1,5 y 2, respectivamente. Se observó un aumento porcentual del rendimiento máximo del 17,7% en comparación con la ASWT convencional. A TSR = 2 y una velocidad de viento de 10 m/s, el rendimiento (CP) de la ASWT convencional y modificada fue del 23,3% y 28,6%, respectivamente, con un aumento porcentual del 22,75%. Además, se evidenció que tanto el rendimiento máximo como el rango de operación aumentan al reducir el grosor de la hoja.[16]

Se ha generado un modelo de turbina eólica en espiral de Arquímedes (ASWT) convencional mediante el uso del software Solid-Works, con el propósito de evaluar el desempeño de la ASWT y validar el modelo numérico. Es crucial destacar la distinción entre los ángulos de la espiral y los de la pala. Mientras que el ángulo de la espiral está restringido a un rango de 0° a 360°, el ángulo de la pala no está vinculado al ángulo de la espiral. Los ángulos de la pala se identifican como α_1 , α_2 y α_3 , medidos entre la pala en un determinado ángulo de espiral y el eje del rotor. En el caso de una pala, α_3 representa el ángulo de la pala en cero grados, α_2 es

el ángulo de la pala en un plano angular desplazado en 120° y α_1 es el ángulo de la pala en un plano determinado.[16]

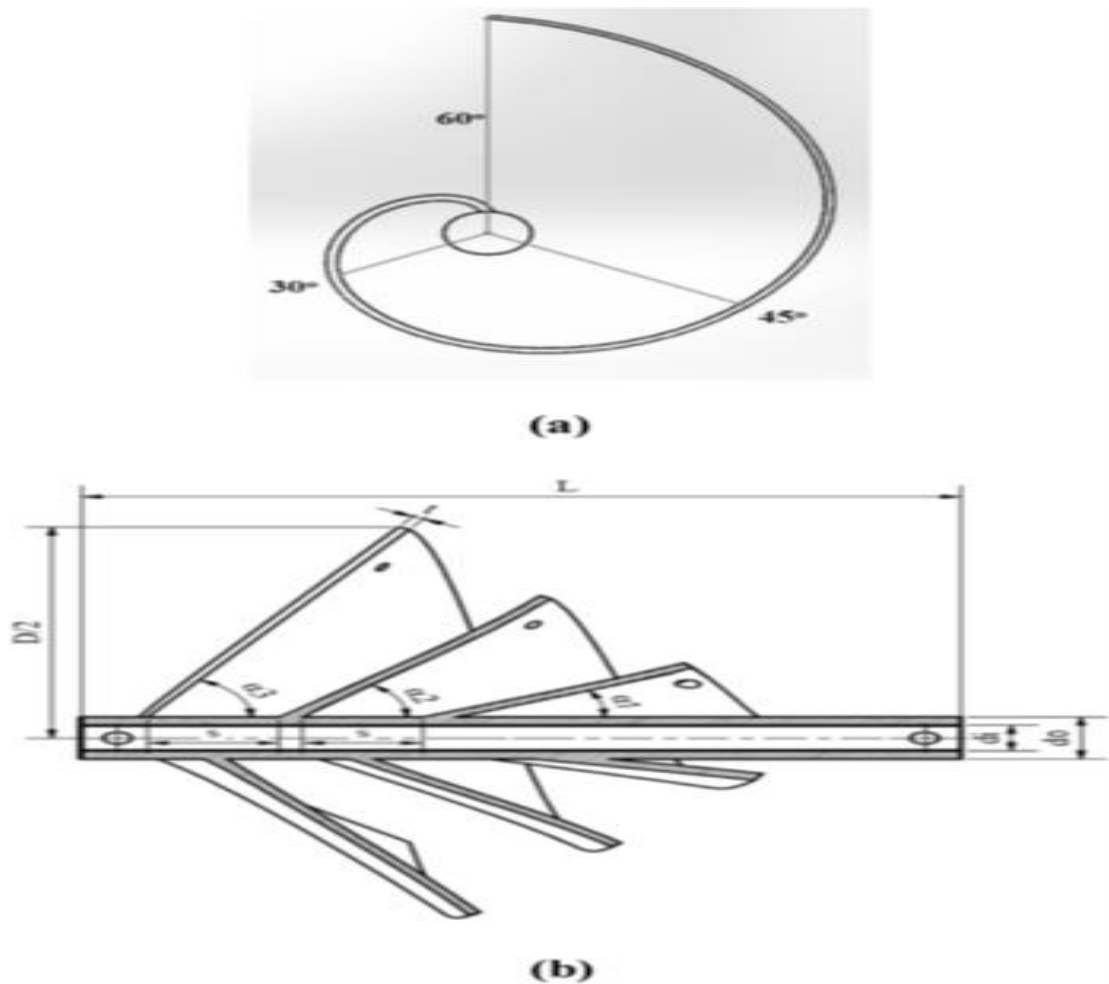


Figura 7. Parámetros geométricos del ASWT

3.2 Bases de cálculo

Para orientar el desarrollo del proyecto, se llevó a cabo una revisión exhaustiva de la literatura de investigación y científica existente que abordara aspectos vinculados a la geometría y caracterización de aerogeneradores de Arquímedes. Este proceso incluyó la recopilación de información de diversas fuentes especializadas en el tema.

Para evaluar cuál de las alternativas disponibles para este proyecto es más rentable y conveniente, se lleva a cabo un análisis comparativo de beneficios, utilizando una escala de puntajes como referencia:

Tabla 1. Valoración de las turbinas según sus características

Características de las turbinas de eje horizontal	Bipala	Tripala	Tornillo de Arquímedes	Molinos de viento
Eficiencia Energética	4	5	5	4
Estabilidad y Vibraciones	3	4	5	3
Altura de la Torre	3	3	5	5
Mantenimiento y Durabilidad	3	3	5	3
Adaptabilidad al Entorno	4	4	5	4
Costo de Instalación y Operación	4	4	5	3

Nivel de Ruido	3	3	5	3
Compatibilidad Ambiental	5	4	4	3
Mantenimiento	5	5	5	4
Puntaje	34	35	44	32

Tabla 2. Rubrica de evaluación

Escala	Descripción
1	Cumple 0% con la funcionalidad y características planteadas.
2	Cumple 25% con la funcionalidad y características planteadas.
3	Cumple 50% con la funcionalidad y características planteadas.
4	Cumple 75% con la funcionalidad y características planteadas.
5	Cumple 100% con la funcionalidad y características planteadas.

La elección del Tornillo de Arquímedes como la opción preferida se fundamentó en una evaluación exhaustiva de sus características clave. Este tipo de turbina demostró un rendimiento excepcional en eficiencia energética, estabilidad, altura de la torre y durabilidad, destacando en áreas cruciales para el éxito del proyecto. Además, su capacidad para adaptarse a diferentes entornos, su bajo nivel de ruido y facilidad de mantenimiento contribuyeron significativamente a su superioridad. Aunque el costo inicial de instalación puede ser ligeramente más alto, se consideró justificado por su rendimiento global y eficiencia, convirtiéndolo en la elección más equilibrada y efectiva para cumplir con los objetivos del proyecto.

3.3 Dimensiones de la turbina

3.3.1 Diámetro del rotor

El ASWT convencional se fabrica con los siguientes parámetros: espesor de la hoja (t) de 4 mm, relación de aspecto (L/D) de 0,88, ángulo de la primera hoja $\alpha_1 = 30^\circ$, ángulo de la segunda hoja $\alpha_2 = 45^\circ$, ángulo de la tercera hoja $\alpha_3 = 30^\circ$, un paso fijo (2s) equivale a 240mm, un diámetro exterior del eje (do) de 40 mm y un diámetro interior (di) de 19,05 mm, como se muestra en la Fig. 7.

Od = Diámetro exterior del tubo (mm).

Oi = Diámetro interior de tubo (mm).

$$A1 = \pi * r^2$$

(40mm)

Donde.

A1 = Área exterior del tubo (mm^2).

r = Radio exterior del tubo (mm).

$$A2 = \pi * r^2$$

(19,05mm)

Donde:

A2 = Área interior del tubo (mm^2).

r = Radio interior del tubo (mm).

$$At = A1 - A2$$

Donde:

At = Área total (mm^2).

$A1 = \text{Área exterior del tubo (mm}^2\text{)}.$

$A2 = \text{Área interior del tubo (mm}^2\text{)}.$

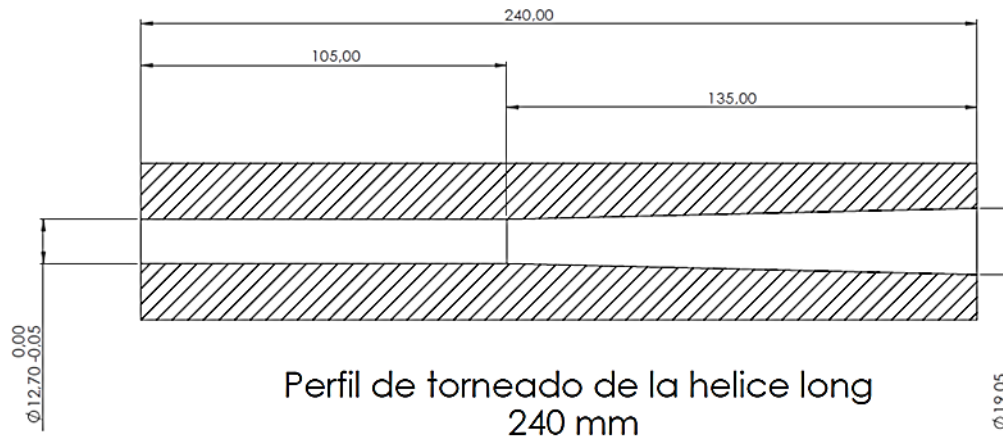


Figura 8. Perfil de torneado de la hélice long

3.3.2 Largo de los álabes

El modelo ASWT convencional tiene 220 mm de diámetro, y la sección de prueba es de 220 mm X 250 mm.

El ángulo de incidencia se mantiene constante y se forma entre la línea de referencia del alabe y el eje horizontal. En este caso de estudio en particular, se ha establecido un ángulo de incidencia fijo de 60°.

$$L = r + \frac{r}{\tan\theta}$$

Donde

$r = \text{Radio del rotor (m)}.$

$\theta = \text{Ángulo de incidencia del sotavento del álabes}$

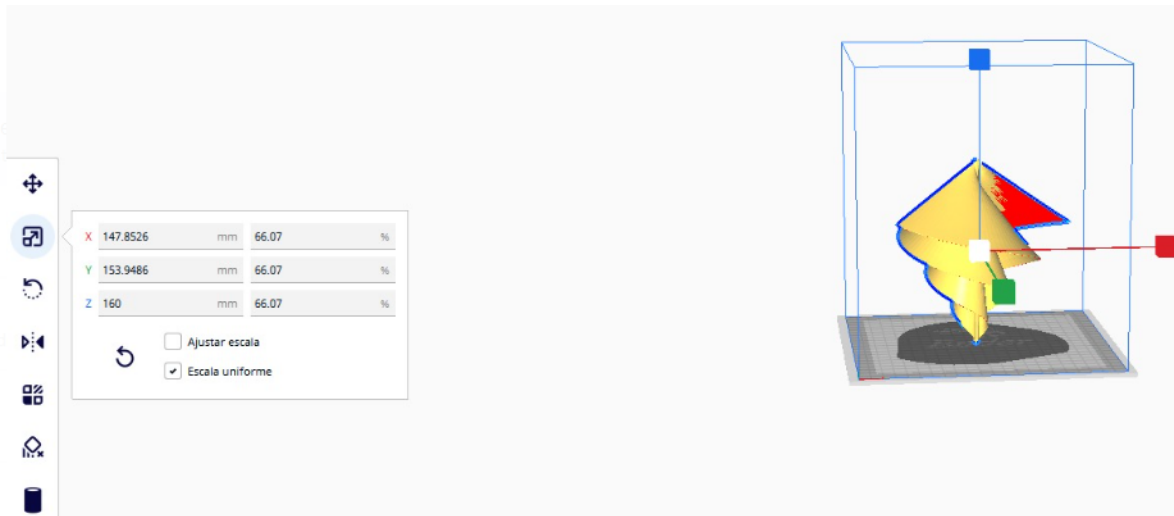


Figura 9. Simulación de las medidas

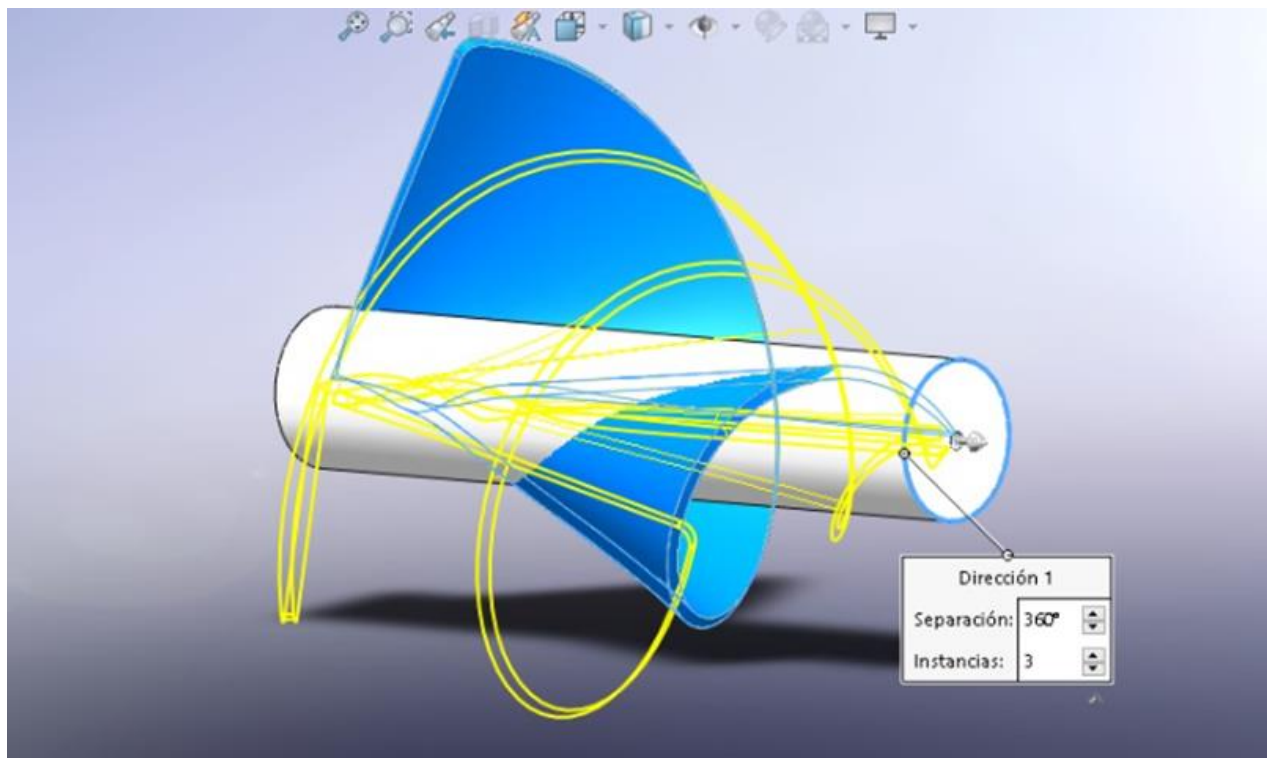


Figura 10. Operación Matriz creación de los Alabes

3.3.3 Material para la turbina.

Se realizó con una impresora 3D Open source (permite cualquier tipo de modificación) modelo Ender 3 de la marca Creality. El Filamentos usado fue PLA de 1.75mm de la marca BIMEK. La pieza como tal demoró 2d 8h y 2m imprimiendo. Con una boquilla de 0.4mm, una altura de capa de 0.26. Densidad del relleno de 15% y soportes verticales con una densidad de 10%, para que la pieza no se cayera ni deformara. La temperatura de extrusión del filamento fue de 200°C y la temperatura de la cama estuvo en 60°C. La pieza consumió aproximadamente 400gr de filamento.

En cuanto a las especificaciones técnicas de la impresora, cuenta con un tipo de extrusión FDM (Sistema tipo Bowden). Volumen de construcción de la cama de 220 x 220 x 250 mm. Con precisión de +/-0.1 mm.

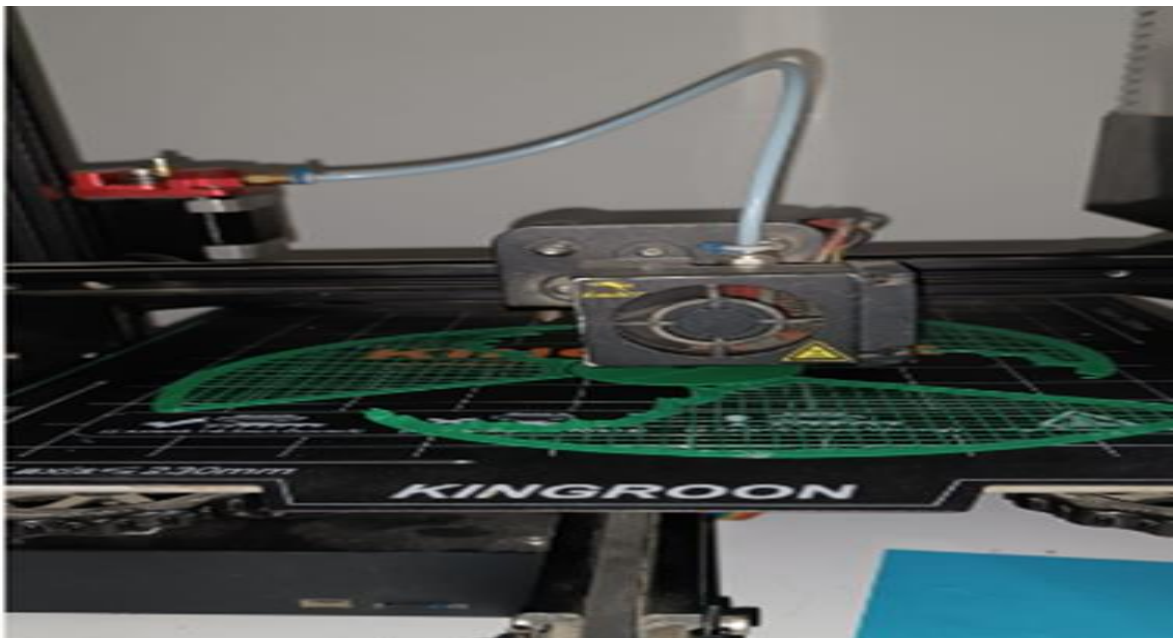


Figura 11. impresión turbina

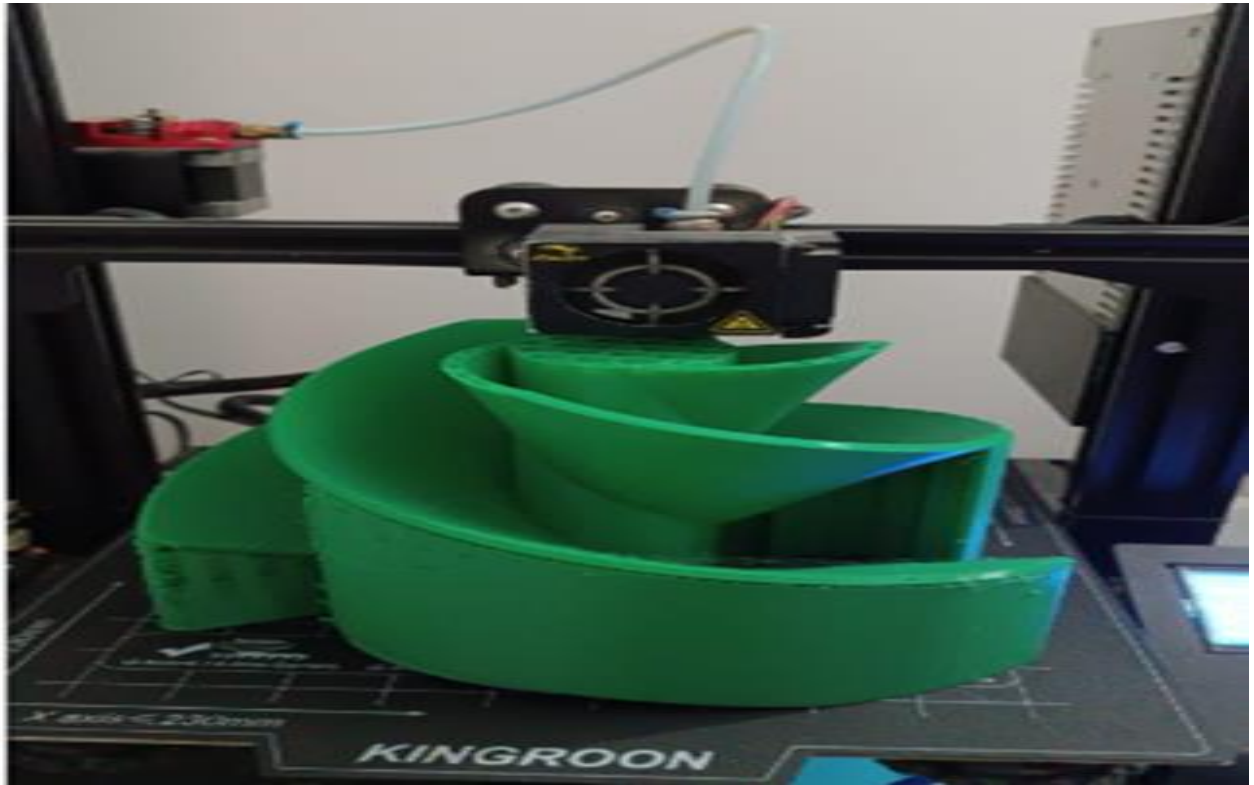


Figura 12. Impresión 3D

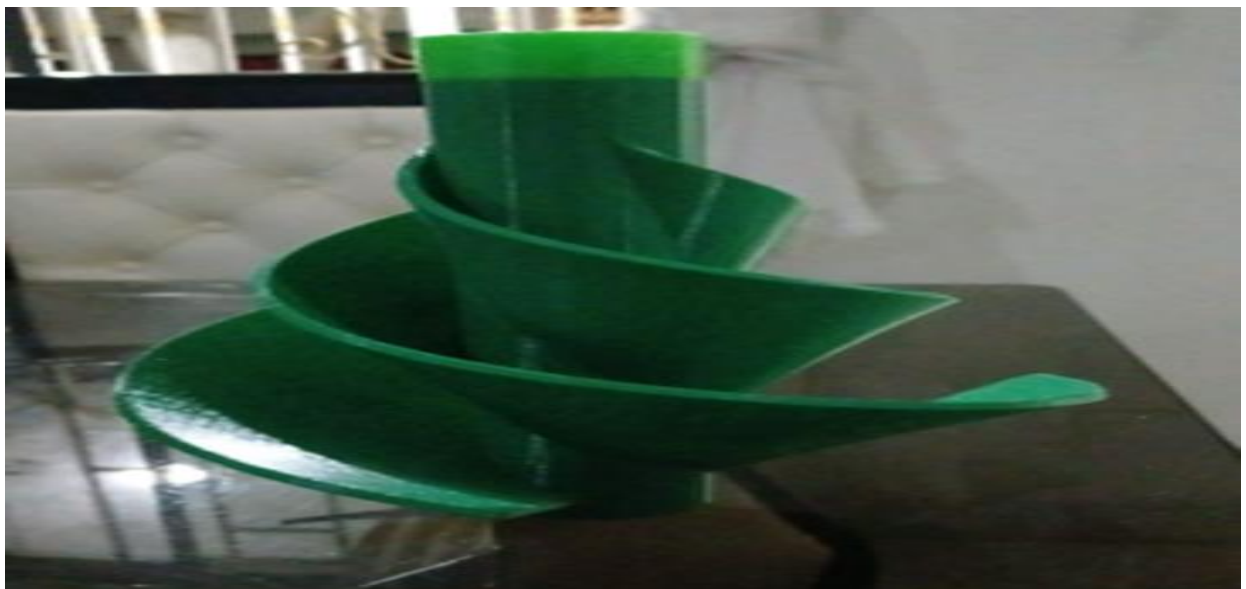


Figura 13. Impresión final

3.3.4 Dimensión del eje

Se inicia fabricación de base para generador de corriente por intermedio turbina plástica en torno convencional utilizando materiales en acero 1045 (barra perforada de 2"1/2x1"x 270.0 mm de largo, eje de 7/8"x 560.0 mm y platinas de 3"x5", la turbina plástica y rodamientos 6204-2RSH SKF

Se inicia con el mecanizado de la barra perforada refrentando, cilindrado del diámetro exterior quedando 63.0 mm se continúa con la caja en ambos extremos de 47.0 mmx14.0 lgtd según plano.



Figura 14. Elaboración del eje



Figura 15. Cilindro elaborado

Se continúa con el mecanizado del eje de 7/8 de diámetro mecanizado ambos extremos a 20.0 mm que es el diámetro interno de los rodamientos 6204, una distancia cónica cuyo diámetro mayor es de 20.0 mm y diámetro menor de 1/2(12.7 mm) x 155.2. una punta de 1/2 x 105.0 mm de largo



Figura 16. Eje Mecanizado

Finalmente se perfora la hélice con broca de 1/2" y se utiliza una barra de interiores con punta de acero rápido para la construcción del cono que va a ajustar en el eje este cono es de 1.5 grado de inclinación



Figura 17. Perforación de la hélice

Se inicia armado del banco para aereogenerador tipo Arquímedes se acopla el rodamiento en uno de los extremos del cilindro porta rodamientos se embona el eje luego se acopla el otro rodamiento en el otro extremo y finalmente el rotor turbina en la parte cónica



Figura 18. Armado del aerogenerador

3.5 Análisis estático

Análisis de esfuerzos por el método de elementos finitos con el software SolidWorks al eje usado para el banco de pruebas de un aerogenerador eólico.

3.5.1 Suposiciones análisis estático

1. Se selecciono como cara fija las zonas donde hace contacto el eje con los rodamientos en el armado con la base.
2. La calidad del material del eje es AISI 1045 / 540 MPa.
3. El peso máximo de la hélice acoplada al eje es de 0.12 Kg.

4. Se presenta una distribución de carga en la zona delantera donde se ubica la hélice.
5. Los rodamientos utilizados son 6204-2RSH SKF.
6. Las condiciones del análisis de esfuerzo en los materiales son ideales, ya que partimos que el software acoge las propiedades del material como Nuevo (sin: deterioro, fatiga, corrosiones, etc.)
7. Dado que la rigidez suele ser el factor más crítico en el diseño de los árboles, se utilizarán aceros principalmente, dado su elevado módulo elástico ($E=207$ GPA), y se utilizarán de bajo coste, ya que el módulo elástico no varía entre ellos.
8. La longitud del eje se seleccionó lo más corta posible para evitar flexiones elevadas.

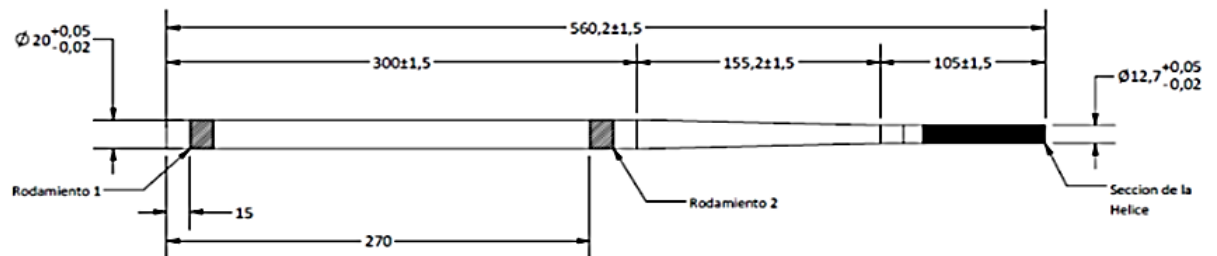
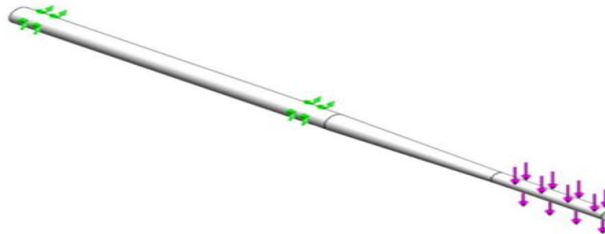


Figura 19. Plano del eje


3.5.2 Información del modelo

Tabla 3. Información del modelo

Información de modelo



Nombre del modelo: Eje
Configuración actual: FEA Eje

Sólidos			
Nombre de documento y referencia	Tratado como	Propiedades volumétricas	Ruta al documento/Fecha de modificación
Línea de partición1 	Sólido	Masa: 1,1043 kg Volumen: 0,000140675 m ³ Densidad: 7,850 kg/m ³ Peso: 10,8221 N	-

3.5.3 Propiedades del estudio

Tabla 4. Propiedades del estudio

Propiedades de estudio

Nombre de estudio	FEA Hta Izaje
Tipo de análisis	Análisis estático
Tipo de malla	Malla sólida
Efecto térmico:	Activar
Opción térmica	Incluir cargas térmicas
Temperatura a tensión cero	298 Kelvin
Incluir los efectos de la presión de fluidos desde SOLIDWORKS Flow Simulation	Desactivar
Tipo de solver	Automático
Efecto de rigidización por tensión (Inplane):	Desactivar
Muelle blando:	Desactivar
Desahogo inercial:	Desactivar
Opciones de unión rígida incompatibles	Automático
Gran desplazamiento	Desactivar
Calcular fuerzas de cuerpo libre	Activar
Fricción	Desactivar
Utilizar método adaptativo:	Desactivar
Carpeta de resultados	--

Estas configuraciones se utilizan para simular el comportamiento estructural de un modelo específico bajo condiciones de carga y temperatura. Dependiendo de los detalles del modelo y los requisitos específicos del análisis, estas opciones pueden ajustarse para obtener resultados más precisos.

3.5.4 Unidades de medición

Tabla 5. Unidades de medición

Unidades	
Sistema de unidades:	Métrico (MKS)
Longitud/Desplazamiento	mm
Temperatura	Kelvin
Velocidad angular	Rad/seg
Presión/Tensión	N/m ²

Sistema de Unidades:

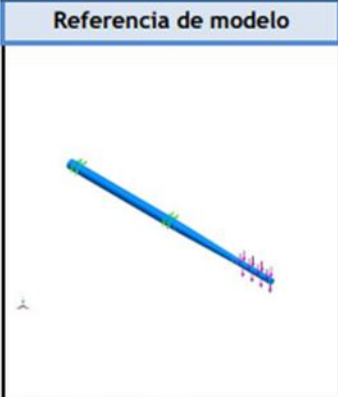
- Métrico (MKS): Sistema de unidades métricas que incluye metros (longitud), kilogramos (masa) y segundos (tiempo).
- Longitud/Desplazamiento: mm (milímetros): La longitud se mide en milímetros, lo que indica que las dimensiones del aerogenerador de Arquímedes se expresan en esta unidad métrica.
- Temperatura: Kelvin: La temperatura se mide en Kelvin, una unidad de temperatura absoluta.
- Velocidad Angular: Rad/seg (radianes por segundo): La velocidad angular se mide en radianes por segundo, lo que indica la rapidez con la que se están moviendo ciertos componentes del aerogenerador.
- Presión/Tensión: N/m² (Newton por metro cuadrado): La presión o tensión se

mide en Newton por metro cuadrado, una unidad de presión o tensión en el sistema métrico.

3.5.5 Propiedades del material

Tabla 6. Propiedades del material

Propiedades de material


Referencia de modelo	Propiedades	Componentes
	<p>Nombre: AISI 1045 Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal Criterio de error predeterminado: Desconocido Límite elástico: 3,45e+08 N/m² Límite de tracción: 5,4e+08 N/m² Módulo elástico: 2,05e+11 N/m² Coeficiente de Poisson: 0,29 Densidad: 7.850 kg/m³ Módulo cortante: 8e+10 N/m² Coeficiente de dilatación térmica: 1,15e-05 /Kelvin</p>	Sólido 1(Línea de partición1)(EJE)
Datos de curva:N/A		

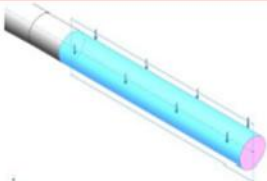
Este modelo de eje utiliza el material AISI 1045, caracterizado por su comportamiento isotrópico elástico lineal, lo que significa que sus propiedades mecánicas son uniformes en todas las direcciones y que sigue un comportamiento elástico lineal. El material exhibe un límite elástico de 3,45e+08 N/m², un límite de tracción de 5,4e+08 N/m² y un módulo elástico de 2,05e+11 N/m². Además, se especifican otras propiedades como el coeficiente de Poisson (0,29), la densidad (7.850 kg/m³), el módulo cortante (8e+10 N/m²), y el coeficiente de dilatación térmica (1,15e-05 /Kelvin).

3.5.6 Cargas y sujeciones

Tabla 7 Cargas y sujeciones

Cargas y sujeciones

Nombre de sujeción	Imagen de sujeción	Detalles de sujeción			
Sobre caras cilíndricas (ubicaciones rodamientos)		Entidades: 2 cara(s) Tipo: Sobre caras cilíndricas Traslación: 0; 0 rad.; --- Unidades: mm			
Fuerzas resultantes					
Componentes	X	Y	Z	Resultante	
Fuerza de reacción(N)	0	1,17689	-0,000131358	1,17689	
Momento de reacción(N.m)	0	0	0	0	

Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga			
Fuerza-1		Entidades: 1 cara(s) Referencia: Cara 1 Tipo: Aplicar fuerza normal Valores: 0.24 kgf			

3.5.7 Información de malla

Tabla 8. Información de malla

Información de malla

Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado:	Malla basada en curvatura
Puntos jacobianos para malla de alta calidad	16 Puntos
Tamaño máximo de elemento	2,73124 mm
Tamaño mínimo del elemento	0,910405 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden

Información de malla - Detalles


Número total de nodos	102871
Número total de elementos	68385
Cociente máximo de aspecto	3,7189
% de elementos cuyo cociente de aspecto es < 3	99,9
El porcentaje de elementos cuyo cociente de aspecto es > 10	0
Porcentaje de elementos distorsionados	0
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss):	00:00:02
Nombre de computadora:	RELGALBPMGCW3

Para garantizar una malla de alta calidad, se han empleado "Puntos jacobianos para malla de alta calidad", con un total de 16 puntos. El "Tamaño máximo de elemento" en la malla se ha limitado a 2,73124 mm, mientras que el "Tamaño mínimo del elemento" es de 0,910405 mm. Estos parámetros influyen en la resolución y precisión de la malla, ajustando el nivel de detalle en diferentes regiones del modelo.

3.5.8 Detalles del sensor

Tabla 9. Detalles del sensor

Detalles del sensor

Nombre del sensor	Ubicación	Detalles del sensor
Masa1		Valor: 1,1 kg Entidades : Resultado :Tensión Componente :VON: Tensión de von Mises Criterio :Máx. de modelos Criterio de paso: En todos los pasos Paso n°:1 Valor de aviso: NA

El sensor denominado Masa1 tiene una masa de 1,1 kg y está ubicado en una posición específica. Este sensor está configurado para medir la Tensión, específicamente la Tensión de von Mises (VON). El criterio utilizado para evaluar esta tensión es el Máx. de modelos, lo que implica que se busca el valor máximo de tensión en el modelo en cada paso del análisis.

3.5.9 Fuerzas resultantes

Tabla 10. Fuerzas resultantes

Fuerzas resultantes

Fuerzas de reacción

Conjunto de selecciones	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N	0	1,17689	-0,000131358	1,17689

Momentos de reacción

Conjunto de selecciones	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N.m	0	0	0	0

Fuerzas de cuerpo libre

Conjunto de selecciones	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N	0,00140225	0,000580058	-0,00146824	0,00211152

Momentos de cuerpo libre

Conjunto de selecciones	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N.m	0	0	0	1e-33

Fuerzas Resultantes.

- La primera sección muestra las fuerzas resultantes en el modelo. Se esta calculando las fuerzas de reacción. La suma de las fuerzas en las direcciones X, Y y Z es 1.17689.

Momentos de Reacción.

- La segunda sección trata sobre los momentos de reacción. En este caso, la suma de los momentos en todas las direcciones es cero, lo que indica un equilibrio.

Fuerzas de Cuerpo Libre.

- La tercera sección muestra las fuerzas de cuerpo libre, que son las fuerzas

internas en las partes del modelo. La suma de las fuerzas en las direcciones X, Y y Z es 0.00211152.

Momentos de Cuerpo Libre.

- La última sección trata sobre los momentos de cuerpo libre, que son los momentos internos en las partes del modelo. La suma de los momentos es $1e-33$, que es prácticamente cero y puede deberse a aproximaciones numéricas.

3.5.10 Resultados del estudio

Tabla 11. Tensiones

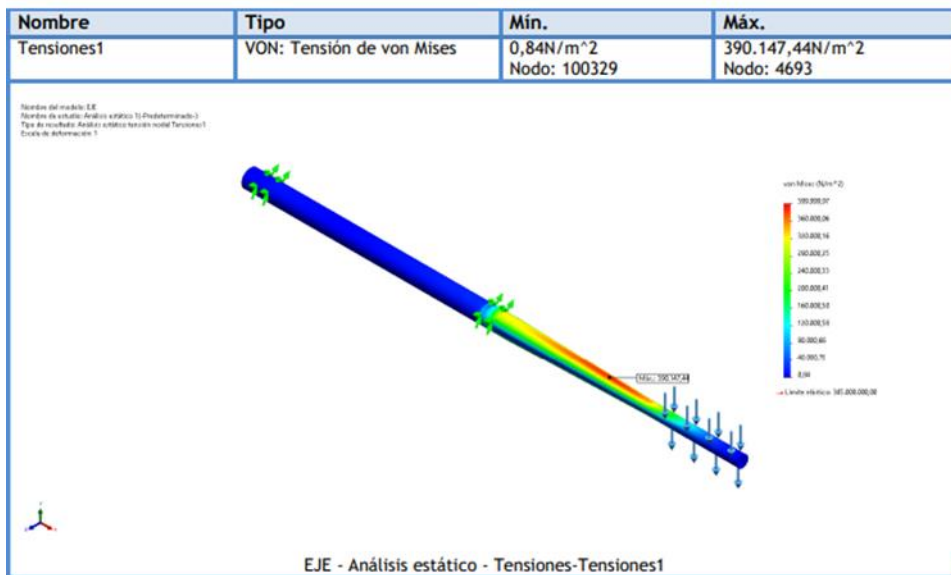


Tabla 12. Desplazamiento

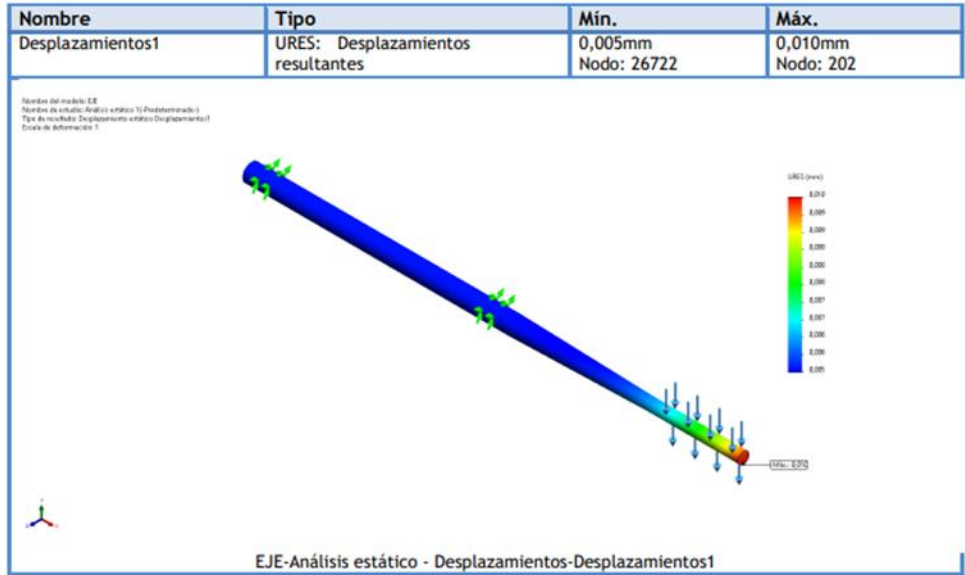


Tabla 13. Deformaciones unitarias

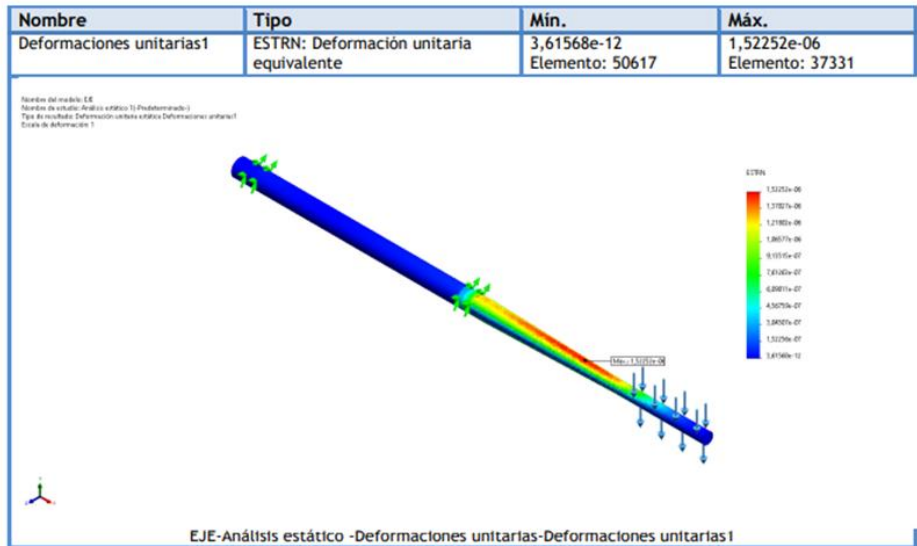
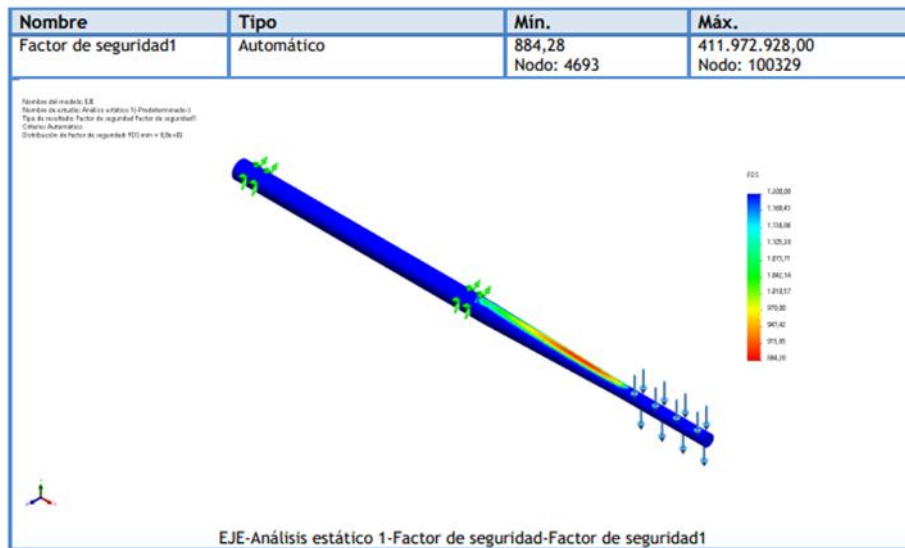


Tabla 14. Factor de seguridad



Luego de aplicar la carga de 0.24 kgf estáticamente sobre la zona especificada con una dirección vertical sobre el eje Y, el estudio nos arroja un esfuerzo máximo de 390 MPa, marcando con rojo la zona donde más se afectaría nuestro material, el análisis nos da un Factor de seguridad de 884. Podemos concluir que el factor de seguridad es confiable, el eje se encuentra sobredimensionado para las cargas que le son aplicadas, por tanto al aplicar una carga de 0.24 kgf la herramienta no sufrirá y no superara el punto máximo de fluencia del material, este no alcanzara a deformarse plásticamente y no llegara al punto de rotura.

*El máximo desplazamiento presentado en la herramienta según el estudio de deformaciones es de 0.0010mm

3.6 Análisis de fatiga

Análisis de fatiga con el software SolidWorks al eje usado para el banco de pruebas de un auto generador eólico.


3.6.1 Suposiciones análisis fatiga

1. La calidad del material del eje es AISI 1045 / 540 Mpa
2. Se realiza el análisis con el método de la teoría de la falla de distorsión de la energía (teoría de von mises) y el criterio de Goodman el cual nos proporciona una estimación más conservadora del fallo por fatiga.
3. Se determina la ubicación de los rodamientos según planos de ensamblaje
4. Se asume un K_f de 0.58 según la geometría de la pieza.
5. Se utiliza un numero de ciclos alto para realizar el análisis de tensiones y esfuerzos.
6. Se hace uso de la curva S-N para el material AISI 1045
7. El tipo de carga se selecciona $r = -1$ debido a que el eje se somete a torsión de manera frecuente.


3.6.2 Información del modelo

Tabla 15. Información del modelo

Información de modelo



Nombre del modelo: EJE
Configuración actual: Predeterminado

Sólidos			
Nombre de documento y referencia	Tratado como	Propiedades volumétricas	Ruta al documento/Fecha de modificación
Línea de partición1 	Sólido	Masa: 1,1043 kg Volumen: 0,000140675 m ³ Densidad: 7.850 kg/m ³ Peso: 10,8221 N	-

3.6.3 Propiedades del estudio

Tabla 16. Propiedades del estudio

Propiedades de estudio

Nombre de estudio	Fatiga
Tipo de análisis	Fatiga (Amplitud constante)
Interacción entre sucesos	Aleatoria
Calcular tensiones alternas usando	Tensión equivalente (von Mises)
Cara de elemento SHELL	Cara superior
Corrección de la tensión media	Goodman
Factor de reducción de resistencia a la fatiga	0,58
Vida infinita	Desactivar
Carpeta de resultados	-

El estudio titulado Fatiga se centra en el análisis de fatiga bajo condiciones de amplitud constante. La interacción entre los eventos se modela de manera aleatoria, reflejando la variabilidad inherente en el comportamiento del material sometido a cargas cíclicas. Las tensiones alternas se evalúan utilizando el método de Tensión Equivalente, específicamente la fórmula de von Mises, aplicada a la cara superior de elementos de tipo SHELL. Se considera la corrección de la tensión media mediante el método Goodman. Para ajustar la resistencia a la fatiga, se utiliza un factor de reducción del 58%. La desactivación de la vida infinita indica que el análisis aborda las condiciones de fatiga hasta el punto de fallo.

3.6.4 Unidades de medición

Tabla 17. Unidades de medición

Unidades


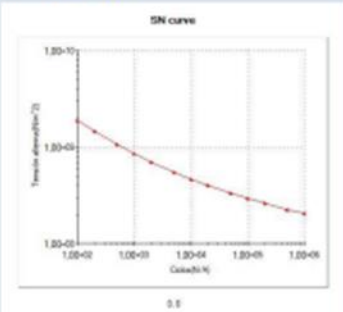
Sistema de unidades:	Métrico (MKS)
Longitud/Desplazamiento	mm
Temperatura	Kelvin
Velocidad angular	Rad/seg
Presión/Tensión	N/m ²

Sistema de Unidades:

- Métrico (MKS): Sistema de unidades métricas que incluye metros (longitud), kilogramos (masa) y segundos (tiempo).
- Longitud/Desplazamiento: mm (milímetros): La longitud se mide en milímetros, lo que indica que las dimensiones del aerogenerador de Arquímedes se expresan en esta unidad métrica.
- Temperatura: Kelvin: La temperatura se mide en Kelvin, una unidad de temperatura absoluta.
- Velocidad Angular: Rad/seg (radianes por segundo): La velocidad angular se mide en radianes por segundo, lo que indica la rapidez con la que se están moviendo ciertos componentes del aerogenerador.
- Presión/Tensión: N/m² (Newton por metro cuadrado): La presión o tensión se mide en Newton por metro cuadrado, una unidad de presión o tensión en el sistema métrico.

3.6.5 Propiedades del material

Tabla 18. Propiedades del material

Propiedades de material		
Referencia de modelo	Propiedades	Componentes
	<p>Nombre: AISI 1045 Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal Criterio de error predeterminado: Tensión de von Mises máx.</p>	Sólido 1(Línea de partición1)(EJE)
<p>Datos de curva:</p>  <p>SN curve</p>		

El modelo utilizado para describir las propiedades del material es el AISI 1045, caracterizado como un modelo isotrópico elástico lineal. En este contexto, la isotropía implica que las propiedades mecánicas del material son uniformes en todas las direcciones. Se emplea el criterio de error predeterminado basado en la tensión de von Mises máxima, que es una medida efectiva de la intensidad de las tensiones en el material. Este modelo se aplica específicamente al sólido 1, identificado como la línea de partición 1 en el eje correspondiente (EJE), proporcionando una descripción detallada de cómo se comporta el material AISI 1045 en condiciones específicas de carga y deformación.

3.6.6 Cargas y sujeciones

Tabla 19. Cargas y sujeciones

Opciones de carga

Nombre del evento	N.º de ciclos	Tipo de carga	Asociación de estudios		
			Nombre de estudio	Factor de escala	Incremento
Suceso-1	10000000000	Completamente invertida (LR=-1)	Análisis estático 1	1	0

3.6.7 Resultados del estudio

Tabla 20. Resultado 1

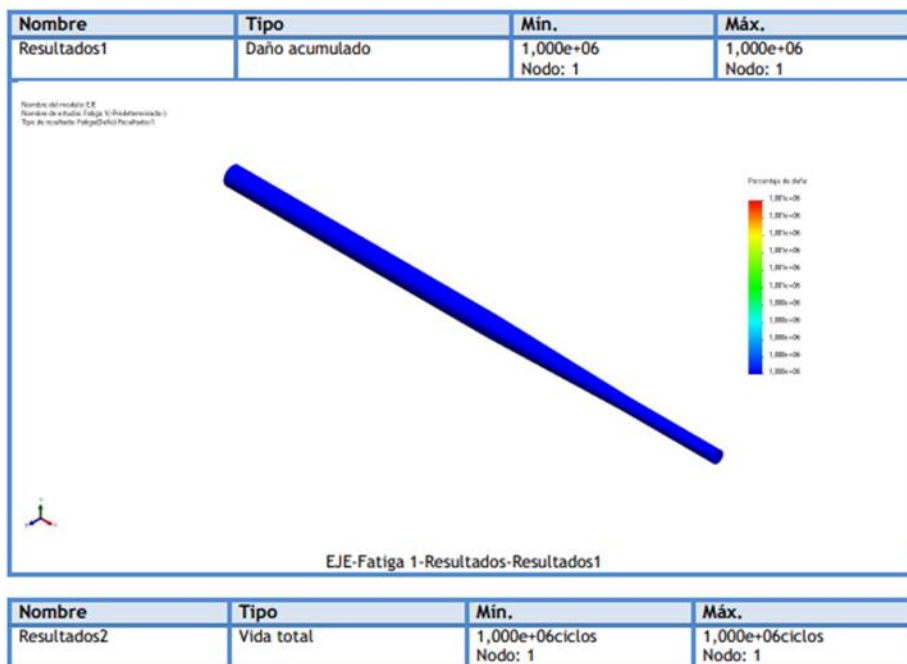


Tabla 21. Resultado 2

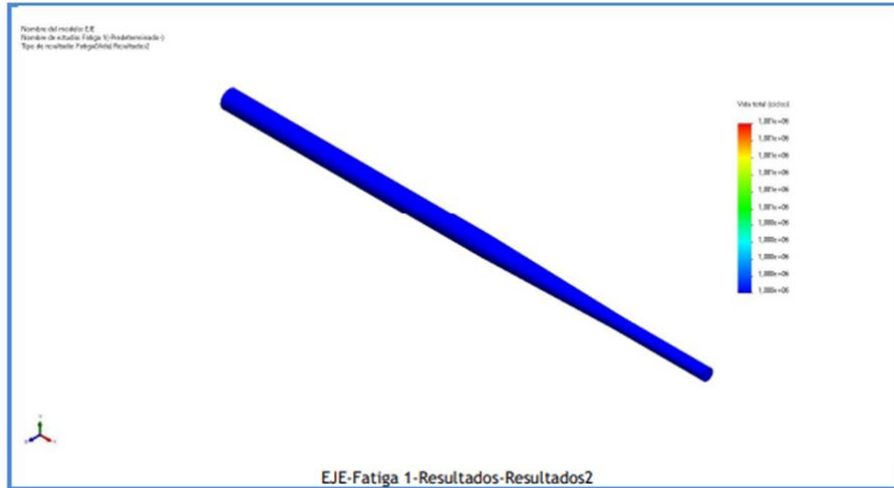
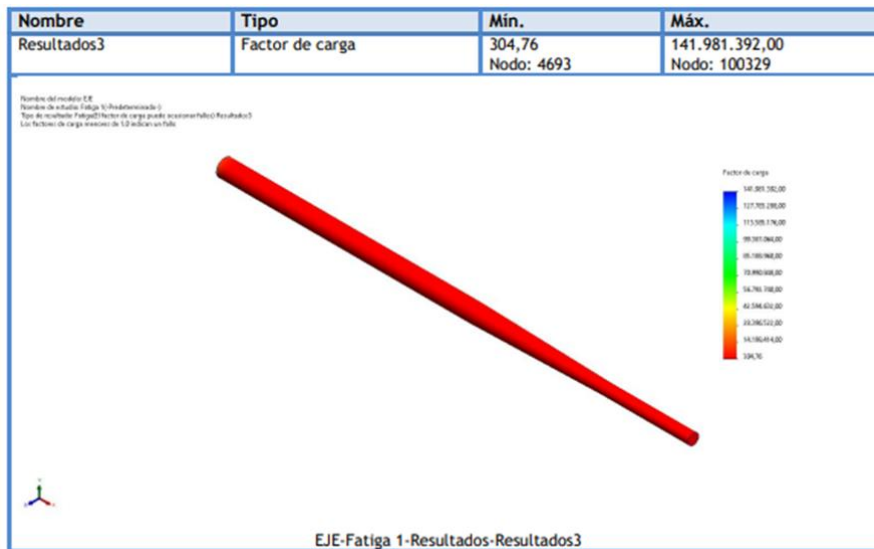


Tabla 22. Resultado 3



Luego de seleccionar el método von mises y el criterio de Goodman, se aplica un numero de ciclos elevados sobre la zona del eje a evaluar, Podemos concluir que el eje no va a fallar debido a que el factor de seguridad a tensión (SSF) se encuentra por encima de 1.0 que son valores aceptables para los criterios de tensión (Limite elástico del material) y de tensión efectiva (Von mises), además el factor de seguridad a fatiga (FSF) nos indica que el eje no fallara debido a cargas cíclicas puesto que el factor de carga se encuentra en 384. El eje se encuentra sobredimensionado con el fin de reducir los niveles de tensión

*Valores de factor de carga por debajo de 1 nos indican fallo.

4. Pruebas resultados y análisis

4.1 Condiciones para el uso del banco y la realización de pruebas

Para llevar a cabo la prueba en el laboratorio de máquinas eléctricas de la Universidad Antonio Nariño con el banco aerogenerador tipo Arquímedes, se emplearon diversas herramientas para asegurar la precisión y el control del experimento. Entre las herramientas utilizadas se incluyen:

4.1.1 Tacómetro

Se utilizó un tacómetro para medir la velocidad de rotación de los alabes del banco aerogenerador, esta herramienta es esencial para evaluar el rendimiento y la eficiencia del sistema.


Tabla 23. Características del tacómetro

Tabla característica del tacómetro		
	Datos	
	Rango de prueba	(0 - 30 m/s); (0-65 Mph); etc
	Precisión de medida	2,5 a 99999 RPM (r/min)
	Resolución	0,1 RPM (2,5 a 999,9 RPM) 1 RPM (más de 1,000 RPM)
	Precisión	(0.05% + 1 dígito)
	Tiempo de muestreo	0,8 segundos (más de 60 RPM)
	Pantalla	LCD digital de 5 dígitos
	Memoria	Si, (Último valor, valor máximo, Mm. Valor)
	Distancia de detección	50 a 500mm
	Referencia	Tacómetro digital DT-2234C+

4.1.2 Anemómetro:

Un anemómetro fue empleado para medir la velocidad del viento generado por el soplador. Esta medición es crucial para correlacionar los resultados obtenidos con las condiciones ambientales y evaluar el comportamiento del banco aerogenerador en diferentes velocidades de viento.


Tabla 24. Características del anemómetro

Tabla característica del anemómetro		
	Datos	
	Rango velocidad del aire	(0 - 30 m/s); (0-65 Mph); etc
	Precisión de medida	± 5%
	Rango temperatura aire	-10°C - +45°C (14F - 113F)
	Precisión de medida	± 2°C (3.6F)
	Tipo de fuente de poder	CR2032 - 3V
	Peso	52 g
	Pantalla	LCD digital retroiluminada
	Termómetro	Termómetro NTC
	Consumo	3 mA aprox.
Tipo de medición	Manual	
Referencia	Anemómetro portátil GM816	

4.1.3 Multímetro Digital

Se empleó un multímetro digital para realizar mediciones eléctricas precisas de los voltajes de batería de los elementos utilizados.


Tabla 25. Características Multímetro

Tabla característica del multímetro digital		
	Datos	
	Voltaje DC	200/2000 m - 20/200/1000V ±0.5%
	Voltaje AC	200/750 V ±1,0 %
	Corriente continua	200µ-2000µ-20m-200m-10A ±1,8 %
	Resistencia	200-2000-20K-200K-2000K ohm ±1.0%
	Pantalla	LCD digital 46x16 mm
	Valor máximo de visualización LCD	1999
	Protección sobrecarga	Si
	Referencia	Multímetro digital DT-830D

4.1.4 Soplador de viento

Se implementó un soplador de viento como fuente de flujo de viento artificial. Este dispositivo permitió simular condiciones de viento realistas en el laboratorio, asegurando que los alabes del aerogenerador se movieran bajo condiciones controladas y reproducibles.

Tabla 26. Características soplador

Tabla característica de soplador		
	Datos	
	Voltaje	110 V AC
Frecuencia	60 HZ	
Potencia	1200 W	
Flujo Max de aire	4.5 m ³ /min	
Velocidad ajustable	Si	
Revoluciones Max	17000 RPM	
Presion del aire	5.5 Kpa	
Volumen de aire Max.	3.8 m ³ /min	
Marca	UP - Universal Power	
Modelo	0027B	
Funcion de aspirado	Si	

4.1.5 Análisis de incertidumbre

La implementación de un banco de prueba tipo eólico para realizar mediciones con base en un aerogenerador espiral de Arquímedes es un proceso complejo que implica considerar diversos factores para garantizar mediciones precisas y confiables. El cálculo de la incertidumbre juega un papel crucial en este contexto,

ya que proporciona una evaluación cuantitativa de la confiabilidad de los resultados obtenidos.

En primer lugar, la incertidumbre asociada con la geometría y diseño del aerogenerador espiral de Arquímedes fue cuidadosamente analizada. Esto incluye la variabilidad en las dimensiones, la rugosidad de las superficies y otros aspectos que podrían influir en el rendimiento del dispositivo. Además, es esencial considerar la incertidumbre en las condiciones ambientales, como la velocidad y dirección del viento, que pueden afectar directamente las mediciones.

El proceso de calibración del banco de prueba también introduce fuentes potenciales de incertidumbre, como la precisión de los instrumentos de medición utilizados y posibles errores sistemáticos. Otro aspecto crítico es la evaluación de la incertidumbre en el proceso de adquisición y análisis de datos. La selección adecuada de algoritmos y métodos de procesamiento de señales, junto con la consideración de la precisión de los instrumentos de medida, son componentes esenciales para garantizar resultados confiables.

Así, la implementación de un banco de prueba tipo eólico para mediciones con un aerogenerador espiral de Arquímedes requiere un enfoque integral en la estimación de la incertidumbre. La comprensión detallada de los factores que afectan las mediciones, la implementación de prácticas de calibración robustas y la utilización de métodos de adquisición y análisis de datos precisos son fundamentales para garantizar la fiabilidad de los resultados obtenidos en este contexto. Además, la

documentación adecuada de todas las fuentes de incertidumbre permitirá a los usuarios y diseñadores del sistema tener una comprensión completa de la confiabilidad de las mediciones realizadas, facilitando la toma de decisiones informadas en futuras investigaciones y aplicaciones prácticas.

4.2 Pruebas y resultados

En primera instancia, fue fundamental el uso del multímetro para verificar la carga de las baterías de cada herramienta utilizada; seguidamente se aplicó un flujo constante de aire en la parte frontal del aerogenerador a través de un soplador de viento, por un tiempo estimado de dos minutos, con el fin de mover la turbina para obtener 10 mediciones de RPM y de la velocidad del viento que arrojaban el tacómetro y el anemómetro al mismo tiempo; cabe resaltar que la distancia entre el soplador y la turbina fue de 400mm para tener un flujo efectivo de aire.



Figura 20. Medición con el multímetro digital



Figura 21. Configuración del tacómetro



Figura 22. Prueba inicial con el tacómetro y anemómetro

Se resalta, la posición y el uso de las herramientas a la vez para tomar las 10 mediciones, por un lado, el anemómetro se ubica en la parte lateral de la turbina, con el fin de que el aire que pase por esta, sea medido por dicho instrumento; mientras que el tacómetro se colocó en la parte posterior, dirigiéndose hacia la turbina, para poder tomar las RPM.



Figura 23. Toma de datos



Figura 24. Medición con ambas herramientas

En este sentido, el siguiente cuadro expresa las mediciones obtenidas en el tacómetro y el anemómetro:

Tabla 27. Mediciones del tacómetro y anemómetro

Tacómetro	Anemómetro
10112,9	2
10335,1	2,4
11115,7	2,8
11208,6	2,3
11354,1	3,3
11479,8	3,4
11547,3	3,5
11729,1	3,7
11994,2	3,8
11830	3,5

Incertidumbre Tipo A asociada a la medición	0,2033
--	--------

Al tener en cuenta estos datos, se inicia utilizando la mediana como medida de tendencia central debido a su capacidad para resistir la influencia de valores extremos, brindando así una estimación más robusta del comportamiento central de las RPM y la velocidad del viento. Al centrarse en el valor medio de las observaciones ordenadas, puesto que, la mediana proporciona una representación más equilibrada de la distribución de los datos, lo que resulta crucial al considerar posibles variaciones en el rendimiento de la turbina en diferentes condiciones de velocidad del viento. De esta forma el valor central de las RPM en consecuencia con la velocidad del viento es:

A una velocidad de 3,35 la RPM es de 11416,5

Este resultado refleja el punto central de la distribución, indicando que, en condiciones típicas de viento proporcionado por el soplador, la turbina opera a esa velocidad con una RPM mediana de referencia.

Ahora bien, se necesitaron de otros análisis que permitieran comprender profundamente la relación de las RPM en función de la velocidad del viento, para ello, fue necesario aplicarla siguiente tabla de dispersiones en la que se muestra la variación de las RPM vs la velocidad del tiempo.

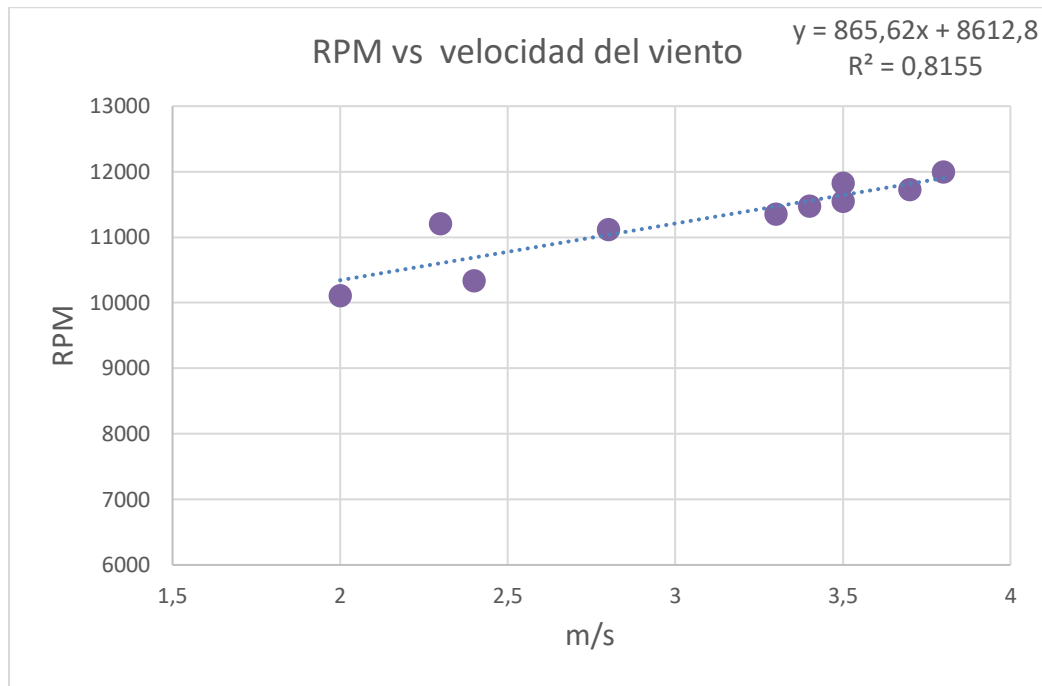


Figura 25. RPM vs Velocidad del viento

El resultado se expresa en una ecuación lineal

$$Y = mx + b$$

Donde:

$$Y = rpm$$

$m =$ Pendiente de la recta

$x =$ Velocidad del aire

$b =$ Constante

$$y = 865,62x + 8612,8$$

En este sentido, la ecuación se hace con el fin de, extrapolar los valores del rpm si aumenta la velocidad del aire, es decir, es una ecuación matemática que permite entender la relación entre el rpm y la velocidad del aire. En ese mismo orden, se halla la correlación estadística que indicará como es la relación entre las RPM y la velocidad del viento; dicha constante es:

$$r^2 = 0,8155$$

Este valor es cercano a 1; lo que según la constante de Pearson indica una correlación positiva fuerte, es decir, que a medida que la velocidad del viento aumenta, las RPM tienden a aumentar también.

Esta relación se explica más detalladamente a partir de la siguiente fórmula aplicada a cada uno de los datos obtenidos.

$$\frac{RPM}{Velocidad\ Del\ Viento} * 60$$

La relación RPM/Velocidad del viento se calculó mediante la división porque estas dos cantidades tienen unidades diferentes y la división proporciona una medida significativa. La velocidad angular (RPM) se mide en revoluciones por minuto, mientras que la velocidad del viento se mide en metros por segundo, esta relación es útil para comprender cuántos giros se producen por cada unidad de distancia avanzada por el viento. Se resalta, la conversión de la velocidad angular de

revoluciones por minuto (RPM) a revoluciones por segundo (RPS), puesto que, es necesaria para que la relación RPM/Velocidad del viento, tenga unidades de medida coherentes. La siguiente tabla expresa los resultados obtenidos en esta relación:

Tabla 28. Relación RPM/Velocidad del viento

Tacómetro	Anemómetro	Relación RPM/Velocidad del viento
10112,9 rpm	2 m/s	303360 rpm/ ^m /s
10335,1 rpm	2,4 m/s	258375 rpm/ ^m /s
11115,7 rpm	2,8 m/s	238178,571 rpm/ ^m /s
11208,6 rpm	2,3 m/s	292382,609 rpm/ ^m /s
11354,1 rpm	3,3 m/s	206436,364 rpm/ ^m /s
11479,8 rpm	3,4 m/s	202570,588 rpm/ ^m /s
11547,3 rpm	3,5 m/s	197948,571 rpm/ ^m /s
11729,1 rpm	3,7 m/s	190200 rpm/ ^m /s
11994,2 rpm	3,8 m/s	189378,947 rpm/ ^m /s
11830 rpm	3,5 m/s	202800 rpm/ ^m /s
Incertidumbre Tipo A asociada a la medición	0,2033 m/s	13507,38 rpm/ ^m /s

De tal forma, las mediciones obtenidas del aerogenerador espiral de Arquímedes, revela su eficacia y capacidad para cumplir con su función de manera adecuada,

pues, la elección de la mediana como medida de tendencia central resalta la estabilidad y resistencia a valores extremos, proporcionando así una estimación robusta del comportamiento central de la turbina. Mientras que, la relación lineal establecida entre las RPM y la velocidad del viento, expresada por la ecuación $y = 865,62x + 8612,8$, evidencia la capacidad de la turbina para ajustarse y aumentar su rendimiento en relación con el incremento de la velocidad del viento. A su vez, el coeficiente de determinación $r^2 = 0,8155$ sugiere una correlación positiva fuerte, respaldando la consistencia de la relación establecida. La relación RPM/Velocidad del viento y los cálculos adicionales refuerzan la eficiencia del diseño, proporcionando una métrica cuantitativa que respalda la capacidad del aerogenerador para aprovechar eficientemente la energía eólica disponible. Todos estos resultados, respalda que el aerogenerador implementado demuestra ser una herramienta efectiva y confiable para medir las RPM en función del viento y convertir la energía eólica en energía mecánica.

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

Los resultados obtenidos del aerogenerador espiral de Arquímedes revelan aspectos significativos sobre su rendimiento en condiciones de laboratorio. La elección de la mediana como medida de tendencia central resalta la estabilidad del sistema, proporcionando una evaluación robusta frente a valores extremos. Este factor es esencial para garantizar mediciones precisas en condiciones variables.

1. Se logra concluir que las propuestas para la mejora continua, como la realización de pruebas en entornos más variables, la optimización del diseño y la exploración de materiales avanzados, se alinean de manera coherente con el objetivo de evaluar y perfeccionar el aerogenerador a lo largo del tiempo, lo que apunta a un enfoque proactivo hacia la evolución y adaptación constante del sistema.
2. Implementar materiales más ligeros y resistentes es una posibilidad para mejorar la portabilidad e instalación en diferentes ubicaciones, pues, si se

realiza un seguimiento a largo plazo para evaluar el desempeño y la durabilidad del aerogenerador en comparación con otros diseños de turbinas eólicas, se podrían anexar mejoras y verificar la viabilidad de esta turbina.

3. De igual forma, se concluye que, la relación lineal establecida entre las RPM y la velocidad del viento indica la capacidad del aerogenerador para adaptarse y mejorar su rendimiento a medida que aumenta la velocidad del viento. Esta característica sugiere una respuesta dinámica del diseño ante cambios en las condiciones ambientales, lo cual es crucial para su eficiencia.
4. Por último, se resalta la adaptabilidad del aerogenerador a diferentes condiciones climáticas y su capacidad para ajustarse dinámicamente a variaciones en la velocidad del viento, todo ello, posibilita a los estudiantes una experiencia práctica y realista; de esta manera, se consolidan los conceptos teóricos que permitirán comprender cómo los principios de la energía eólica se aplican en entornos variables.

5.2 Recomendaciones

- Se recomienda realizar evaluaciones periódicas del banco de pruebas para identificar posibles mejoras y actualizaciones. Esto garantizará su eficacia a lo largo del tiempo y permitirá adaptarse a avances tecnológicos.
- Fomentar la colaboración entre diversas disciplinas dentro de la universidad para abordar de manera integral aspectos teóricos y prácticos relacionados con la energía eólica y sus aplicaciones.

- Considerar la posibilidad de extender el acceso al banco de pruebas a otros programas académicos dentro de la universidad, promoviendo un enfoque interdisciplinario y enriquecedor.
- Incentivar la investigación continua en el ámbito de las energías renovables, explorando nuevas tecnologías y enfoques que puedan integrarse en futuras etapas del proyecto.

Bibliografía

- [1] A. M. Castro niza and D. F. Melendrez Sinchiguano, *DISEÑO CONCEPTUAL DE UNA TURBINA EÓLICA ESPIRAL DE ARQUÍMEDES CON POTENCIA MECÁNICA MÁXIMA DE 1 KW*. 2022.
- [2] J. R. Rodríguez, “Estudio del potencial eólico en Colombia, viabilidad de un parque eólico,” p. 307, 2019.
- [3] C. Garcia Arbelaez, “Atlas de Viento y Energia Eolica en Colombia,” p. 32, 2015.
- [4] E. Mucha, “Diseño del álabe para incrementar la potencia eléctrica del aerogenerador tipo espiralDiseño del álabe para incrementar la potencia eléctrica del aerogenerador tipo espiral,” 2021.
- [5] C. Robles Algarin and O. Rodríguez Álvarez, “Un panorama de las energías renovables en el Mundo, Latinoamérica y Colombia,” *Espacios*, vol. 39, no. 34, 2018.
- [6] W. A. Castro Sanchez, “VENTAJAS DEL APROVECHAMIENTO DEL VIENTO EN LA REALIZACIÓN DE PROYECTOS EÓLICOS EN COLOMBIA,” 2019.
- [7] G. Charris Romero, S. Pérez Albor, and P. Sánchez Pastrana, “Transición De Las Energías Tradicionales a Las Renovables Y Su Impacto En Los

- Derechos De Tercera Generación,” *Retos del Derecho frente al Desarro. Sosten. y la Responsab. Soc. Empres. en Colomb. en el Siglo XXI*, 2020, doi: 10.21892/9789585547865.2.
- [8] L. M. Aristizábal, J. A. R. Macías, J. C. Correa, and D. A. Flórez, “Implementación De Ayudas Didácticas Para El Estudio Y La Enseñanza De Mecanismos,” 2019.
- [9] L. Vite Teran, “Resumen Principio de Arquímedes,” p. 9, 2011.
- [10] K. J. F. R. J. S. Gamboa baquero, “Diseño de un banco didáctico para ensayos de transmisión de potencia,” no. Mi, pp. 5–24, 1967.
- [11] J. A. Murillo Rincón and C. C. Cabezas Porras, “EVALUACIÓN DE MATERIALES ALTERNOS PARA LA FABRICACIÓN DE PEQUEÑAS TURBINAS EÓLICAS EN COLOMBIA,” 2022.
- [12] A. D. ; B. O. A. A. Torres Davila, “Implementación de un banco de pruebas de laboratorio con rotores savonius que permita la caracterización de curvas de rendimiento”.
- [13] R. S. Quintero Ramirez and G. E. Siza, “DISEÑO, SIMULACIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL,” pp. 1–100, 2009.
- [14] J. C. R. DÍAZ, “DESARROLLO DE UN BANCO DIDÁCTICO PARA MODELO DE TURBINA EÓLICA DE EJE VERTICAL,” *Ind. High. Educ.*, vol. 3, no. 1,

pp. 1689–1699, 2021.

- [15] L. E. A. Pineda¹, B. W. C. G. W. Alexander, Granados¹, and Jorge Iván Cifuentes², “INSTRUMENTACION INDUSTRIAL - ANEMOMETRO,” no. March, p. 664, 1997.
- [16] A. M. Kamal, M. A. A. Nawar, Y. A. Attai, and M. H. Mohamed, “Blade design effect on Archimedes Spiral Wind Turbine performance: Experimental and numerical evaluations,” *Energy*, vol. 250, p. 123892, 2022, doi: 10.1016/j.energy.2022.123892.