



# Restauración y puesta en funcionamiento de 2 turbinas eólicas verticales ubicados en la UAN sede Tunja-Boyacá

**Oscar Iván Castellanos Betancourt**  
[20452014065]  
**Jorge Alberto Pulido Garzón**  
[20452011844]

**Universidad Antonio Nariño**  
Programa Ingeniería Mecánica  
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica  
Tunja, Colombia  
2022



# Restauración y puesta en funcionamiento de 2 turbinas eólicas verticales ubicados en la UAN sede Tunja-Boyacá

**Oscar Iván Castellanos Betancourt**

[20452014065]

**Jorge Alberto Pulido Garzón**

[20452011844]

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

**Ingeniero Mecánico**

Director (a):

Ph.D. Carlos Ramón Batista Rodríguez

Línea de Investigación:

Desarrollo de Tecnología para el Aprovechamiento de las Fuentes de Energía Renovables

Grupo de Investigación:

Tecnologías para el aprovechamiento de fuentes de Energía Renovable.

**Universidad Antonio Nariño**

Programa Ingeniería Mecánica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Tunja, Colombia

2022

**NOTA DE ACEPTACIÓN**

El trabajo de grado titulado

\_\_\_\_\_.

Cumple con los requisitos para optar

Al título de \_\_\_\_\_.

\_\_\_\_\_  
Firma del Tutor

\_\_\_\_\_  
Firma Jurado

\_\_\_\_\_  
Firma Jurado

Tunja, Noviembre de 2022

## Contenido

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	18
<b>1. Capítulo I. Marco referencial.....</b>	<b>23</b>
1.1 Marco teórico .....	23
1.1.1 La energía eólica .....	23
1.1.4 Aerogenerador Vertical .....	24
1.1.5 Diseño y características del aerogenerador vertical.....	25
1.1.6 Tipos de turbinas de aerogenerador vertical .....	27
1.1.7 Características y diferencias entre turbinas de eje vertical. ....	28
1.1.7.1 Aerogenerador de eje vertical con turbina Darrieus.....	28
1.1.7.2 Aerogenerador Darrieus - Rotor H.....	29
1.1.7.3 Aerogenerador de eje vertical con turbina Savonius.....	30
1.2 Instrumentos de Medición para Pruebas de Funcionamiento.....	31
1.2.1. Multímetro (Multifunction Meter DO9847) .....	31
1.2.2. Anenómetro .....	33
1.2.3. Instrumento de Medición Prova RM-1501 Fototacómetro Digital.....	34
1.3 Estado del arte .....	36
1.4 Marco conceptual .....	39
1.4.1 Energías Renovables .....	39
1.4.2 Viento.....	40
1.4.3 Aerogenerador.....	40
1.4.4 Eólica .....	40
1.4.5 Energía mecánica .....	40
1.4.6 Poleas .....	40
1.4.7 Palas .....	41
1.4.8 Autoarranque.....	41
1.4.9 Potencial eléctrico.....	41

1.4.10	Combustión.....	41
2.	Capítulo II. Diagnóstico de las Turbinas Verticales.....	43
2.1	Identificación del Sistema de Turbinas Verticales.....	43
2.1.1	Diseño Mecánico y Características.....	43
2.2.	Diagnóstico de las Turbinas de Eje Vertical.....	47
3.	Capítulo III. Montaje del Sistema Eólico.....	52
3.1.	Mantenimientos Realizados.....	52
4.	Capítulo IV. Pruebas de Funcionamiento.....	61
4.1.	Pruebas de Medición del Sistema.....	61
4.1.1.	Pruebas de Velocidad de Viento, temperatura y caudal.....	61
4.1.2.	Comparativa de Rendimiento del Sistema.....	63
4.2.	Pruebas de Análisis Estructural de los Aerogeneradores Verticales.....	64
4.2.1.	Análisis de Estructura Soporte de las Turbinas.....	64
4.2.2.	Análisis de Eje Planetario.....	78
4.3.	Pruebas de Velocidad de las Turbinas.....	86
4.3.1.	Medición de Turbina de Acrílico.....	86
4.3.2.	Cálculos de velocidad en Rpm del Generador.....	88
4.3.3.	Medición de Velocidad.....	90
4.3.4.	Medición de Voltajes.....	92
	Conclusiones.....	95
	Recomendaciones.....	97
	Referencias.....	98

## Lista de figuras

Figura 1. Tipos de Rotor de Aerogeneradores de eje Vertical.....	25
Figura 2. Eje Principal de Aerogenerador Vertical.....	26
Figura 3. Sistema de Transmisión del Aerogenerador.....	26
Figura 4. Modelo de Generador eléctrico.....	27
Figura 5. Aerogenerador Vertical Darrieus.....	28
Figura 6. Aerogenerador Darrieus – Rotor H.....	29
Figura 7. Modelo de Turbina Savonius.....	31
Figura 8. Multímetro DO 9847.....	31
Figura 9. Anemómetro.....	33
Figura 10. Prova RM – 1501 Fototacómetro Digital.....	34
Figura 11. Medidas de las Estructura Soporte (Vista lateral y Superior).....	43
Figura 12. Vista 3D de la Estructura.....	44
Figura 13. Estructura de la Turbina.....	44
Figura 14. Estructura de las Turbinas Verticales en Sólido.....	45
Figura 15. Sistema de Transmisión.....	46
Figura 16. Sistema de Transmisión Completo.....	47
Figura 17. Estado General de la Estructura.....	48
Figura 18. Piezas de la Base con Alta Corrosión.....	48
Figura 19. Cadena y Tornillos Oxidados.....	49
Figura 20. Hélices de Turbina Savonius en Acrílico Quebradas.....	49
Figura 21. Generador con cables dañados y rotos.....	50
Figura 22. Cambio de Cables de Conexión del Generador Eléctrico.....	52
Figura 23. Lijado de la Estructura Base de las Turbinas.....	53
Figura 24. Pizas de Aluminio para las Hélices.....	53
Figura 25. Recorte de Piezas de Reemplazo de las Hélices de Acrílico.....	54
Figura 26. Limpieza y engrase de piezas mecánicas y móviles.....	54
Figura 27. Instalación de L para Soporte de las Láminas de las Hélices.....	55
Figura 28. Cambio de Engranajes de los Ejes de Giro.....	56
Figura 29. Mecanismo de Giro del Eje del Generador Eólico Vertical.....	57
Figura 30. Pintura Sobre Estructura de Base de las Turbinas Eólicas de Eje Vertical.....	58
Figura 31. Colocación y Reemplazo de las Hélices.....	58
Figura 32. Pintado de la Estructura de Soporte de las Hélices.....	59
Figura 33. Cadenas y Soldadura de la Estructura.....	59
Figura 34. Medición Velocidad del Viento.....	61

Figura 35. Medición de Temperatura Ambiente.....	62
Figura 36. Medición de Caudal.....	63
Figura 37. Comparativa de Velocidad en Rpm.....	64
Figura 38. Primera Prueba de Fuerzas .....	67
Figura 39. Segunda Prueba de Fuerza.....	67
Figura 40. Resultado de Fuerzas Remotas .....	69
Figura 41. Vista previa de proceso de las pruebas de velocidad .....	73
Figura 42. Fuerza de Cizallamiento .....	74
Figura 43. Momento de Flexión.....	74
Figura 44. Ángulo de Deflexión .....	75
Figura 45 Deflexión .....	75
Figura 46. Tensión de Deflexión .....	76
Figura 47. Esfuerzo Cortante .....	76
Figura 48. Esfuerzos de Tensión (75 mm).....	77
Figura 49. Esfuerzos de Tensión (0 mm).....	78
Figura 50. Diámetro Digital.....	78
Figura 51. Material Eje Planetario .....	79
Figura 52. Cara Seleccionada para Simulación (Momento 1) .....	80
Figura 53 Cara Seleccionada para Simulación (Momento 2) .....	81
Figura 54. Cara Seleccionadas Fuerza Remota 1.....	82
Figura 55. Caras Seleccionadas para Fuerza Remota 2 .....	84
Figura 56. Medición de Velocidad Turbina de Acrílico (rpm).....	86
Figura 57. Velocidad de la turbina (m/s) .....	88
Figura 58. Medición de Velocidad – 5 de mayo.....	90
Figura 59. Medición de Velocidad – 10 de junio.....	90
Figura 60. Medición de Velocidad – 3 de julio .....	91
Figura 61. Medición de Velocidad – 4 de agosto .....	91
Figura 62. Medición de Voltaje 1 .....	92
Figura 63. Medición de Velocidad 2.....	93
Figura 64. Medición de Voltajes 3.....	93



## Lista de tablas

Tabla 1. Ficha de Especificaciones de Velocidad Óptica .....	35
Tabla 2. Especificaciones de Velocidad del Contacto .....	35
Tabla 3. Características del Contador de Eventos .....	36
Tabla 4 Especificaciones Generales.....	36
Tabla 5. Análisis Físico.....	65
Tabla 6. Configuración del estudio.....	65
Tabla 7. Ajustes de Malla .....	65
Tabla 8 Resumen de Materiales .....	66
Tabla 9. Condiciones de operación de Fuerzas.....	66
Tabla 10. Segunda Prueba de Fuerzas .....	67
Tabla 11. Fuerzas Remotas 1 .....	68
Tabla 12. Resultado de Fuerza de Reacción y Restricciones de Movimiento .....	69
Tabla 13. Resumen de Resultados de las Pruebas de Stress .....	69
Tabla 14. Información de Configuración.....	71
Tabla 15. Propiedades del Cálculo.....	71
Tabla 16. Configuración de Cargas .....	72
Tabla 17. Fuerzas de Soporte.....	72
Tabla 18. Resultados Finales .....	73
Tabla 19. Material del Eje Planetario .....	79
Tabla 20 Momento 1 .....	80
Tabla 21. Momento 2.....	81
Tabla 23. Fuerza Remota 1 .....	82
Tabla 24. Fuerza Remota 2 .....	83
Tabla 25. Fuerza de Restricción y Momento sobre Restricciones.....	84
Tabla 26. Resumen de Resultados .....	84

**Lista de símbolos y abreviaturas**

Símbolo	Significado
A	Área superficial
Ah	Amperios hora
C	Centígrados
$\rho$	Densidad
E	Energía
°	Grado
Hz	Hertz
h	Hora
K	Kilo (1x10 <sup>3</sup> )
m	Metro
m	Masa
n	Nano (1x10 <sup>-9</sup> )
$\nabla$	Nabla
T	Periodo
P	Potencia
RPM	Revoluciones por minuto
s	Segundo
t	Tiempo
v	Velocidad
v	Voltios
VAC	Voltiamperio corriente

W

Watt

*(Dedicatoria)*

*Dedico este trabajo de grado a mis padres,  
Samuel Castellanos Sierra y María Amelia  
Betancourt por su apoyo incondicional y por  
los valores inculcados*

**Oscar Iván Castellanos Betancourt**

*Dedico este trabajo a Dios por darme la  
entereza para culminar este trabajo de grado.  
A mis padres por sus enseñanzas y consejos a  
lo largo de mi vida*

**Jorge Alberto Pulido Garzón**

## **Agradecimientos**

Agradecemos a la Universidad Antonio Nariño por su colaboración para el desarrollo de este trabajo de grado, por el prestamo de los equipos, laboratorio e instalaciones para alcanzar esta meta.

De igual forma agradecemos a nuestro director de tesis Ph.D. Carlos Ramón Batista Rodríguez por su apoyo y su guía continua para el desarrollo de este trabajo; por la disposición y por su inmensa colaboración.

## Resumen

Al tener en cuenta que se requieren sistemas eficientes de producción de energía, que no dependan de combustibles convencionales, de manera que se desarrolle un aprovechamiento de recursos renovables, en la Universidad Antonio Nariño de Tunja se ha diseñado un sistema de dos turbinas verticales que ha sido afectado por procesos erosivos relacionados al viento y la lluvia, de manera que antes de este proyecto se encontraba fuera de servicio. Con base en lo anterior, y como se presenta en el objetivo de este trabajo se llevó a cabo un proceso que permitió **Restaurar dos turbinas eólicas verticales con puesta en funcionamiento en la universidad Antonio Nariño Sede Tunja**. En estos procesos se identificaron las fallas y las piezas que se encuentran en mal funcionamiento o averiadas por efectos asociados a los factores climáticos o desgaste de las piezas por vibración, desgaste y corrosión. Como paso a seguir, se realizó un proceso de restauración de las piezas, se procedió a el armado de las turbinas verticales de manera que sus partes quedasen acopladas en un único mecanismo. Una vez se terminó el proceso de armado del sistema, se procedió a realizar las pruebas de funcionamiento y verificación en diferentes escenarios, de manera que se pudiese verificar y validar el estado final mediante pruebas de medición de velocidad, temperatura ambiente y caudal.

A partir de instrumentos de medición como el multímetro multifunction DO 9847 y un anemómetro, se realizaron pruebas por alrededor de 11 horas y 51 minutos, esto se llevó a cabo en tomas muestrales cada dos minutos. Se realizó medición de la velocidad del viento, la cual tuvo una velocidad máxima de 10.98 m/s, una mínima de 0.06 m/s y promedio de 3.1499 m/s; la medición de la temperatura registró un valor máximo de 10.9 °C, una mínima

de 20.0 5 °C y promedio de 15.438 °C; al medir el caudal se obtuvo en valor máximo de 109.9 m<sup>3</sup>/s, una mínima de 0.6 m<sup>3</sup>/s y un valor de medición promedio 31.672 m<sup>3</sup>/s.

**Palabras clave:**

- Generador
- Engrane Epicicloidal
- Energía Eólica
- Anemómetro

### **Abstract**

Taking into account that efficient energy production systems are required, which do not depend on conventional fuels, in order to make use of renewable resources, the Antonio Nariño de Tunja University has designed a system of two vertical turbines that has been affected by erosive processes related to wind and rain, so that before this project it was out of service. Based on the above, and as presented in the objective of this work, a process was carried out that allowed the restoration of two vertical wind turbines with commissioning at the Antonio Nariño Sede Tunja university. In these processes, failures and parts that are malfunctioning or damaged due to effects associated with climatic factors or wear of parts due to vibration, wear and corrosion were identified. As a step to follow, a restoration process of the pieces was carried out, the vertical turbines were assembled so that their parts were coupled in a single mechanism. Once the assembly process of the system was finished, the operation and verification tests were carried out in different scenarios, so that the final state could be verified and validated through speed, ambient temperature and flow measurement tests.

Using measuring instruments such as the DO 9847 multifunction multimeter and an anemometer, tests were carried out for around 11 hours and 51 minutes, taking samples every two minutes. The wind speed was measured, which had a maximum speed of 10.98 m/s, a minimum of 0.06 m/s and an average of 3.1499 m/s; The temperature measurement registered a maximum value of 10.9 °C, a minimum of 20.05 °C and an average of 15.438 °C; when measuring the flow, a maximum value of 109.9 m<sup>3</sup>/s was obtained, a minimum of 0.6 m<sup>3</sup>/s and an average measurement value of 31,672 m<sup>3</sup>/s.



**keywords**

- Generator
- Epicycloid Gear
- Wind power
- Anemometer

## Introducción

En los últimos años la energía eólica se ha convertido a nivel mundial en una apuesta sostenible y de gran valor ambiental a futuro; es una de las energías más limpias e inagotables, con un gran potencial y mayor crecimiento; tanto así que diferentes países en todo el mundo compiten por cuál de estos realiza un mayor aporte ya sea de tipo económico, ambiental o intelectual. Dentro de las energías alternativas, la eólica constituye una buena opción para suplir las fuentes energéticas actuales, ya sea por su menor efecto contaminante, o fundamentalmente por su posibilidad de renovación. (González, 2011). Sin embargo, se debe tener en cuenta que no existe ningún tipo de generador de energía en el cual sus componentes no tengan una fecha de caducidad o deterioro.

Por lo anterior se puede decir que la energía eólica, aun teniendo tanto potencial y crecimiento en el mundo, al año quedan miles de turbinas eólicas fuera de servicio por diferentes motivos, esto se convierte en un problema para las empresas o entidades estatales ya que la gestión de estos residuos es un tema complejo debido a que, si se habla de energías amigables con el medio ambiente, se debe ser congruente con la gestión de estos residuos. Las estadísticas demuestran que aproximadamente el 85% de los componentes de una turbina eólica pueden reciclarse o reutilizarse, incluidos el acero, el alambre de cobre, las partes electrónicas y los engranajes. El punto de conflicto sigue siendo las cuchillas de fibra de vidrio y la imposibilidad de hacer algo útil con ellas. (worldenergytrade, 2020).

Por otro lado, se debe tener en cuenta que la fuerza del viento, su velocidad y las condiciones ambientales ejercen una presión considerable sobre las partes mecánicas críticas de una turbina eólica, lo que deteriora gradualmente el rendimiento y aumenta los costos de

operación y mantenimiento con el tiempo. Como tal, las turbinas eólicas requieren inspecciones y reparaciones periódicas para alcanzar su vida útil estándar, por lo general alrededor de 20 años. (Smartketing360, 2021). También suelen presentarse incidentes de turbinas que van desde fallas eléctricas o mecánicas hasta incendios en góndolas, fallas en los álabes, colapsos estructurales, efectos de la vibración o resonancia, e incluso accidentes al momento de ser transportadas. (Forensics, 1989 - 2022)

Para el entorno urbano, los patrones de viento son complejos, ya que las corrientes de aire pasan alrededor y por encima de los edificios lo cual genera turbulencias. Estas condiciones hacen que las turbinas eólicas de eje vertical sean más adecuadas que las turbinas de eje horizontal. (Tecpa, 2018) Aunque las turbinas eólicas son equipos muy manuales. Las tuercas y conexiones eléctricas deben ser revisadas y si es necesario apretarlas. Debe verificarse que no exista corrosión y que los cables de las retenidas se encuentren a la tensión correcta. Además, debe revisarse y en su caso reemplazar cualquier borde desgastado en los álabes de la turbina. (Laboratorio Nacional de Energía Renovable, 2007) En términos generales, la mayoría de los componentes de un aerogenerador son reciclables. Actualmente, Siemens Gamesa ya ha mostrado las primeras palas completamente reciclables. Se fabrican principalmente a partir de solo seis materias primas básicas: acero, hierro fundido, fibra de vidrio (y materiales compuestos similares), cobre, aluminio y el hormigón utilizado en las cimentaciones. (Munguia, 2021).

Es por esto que el mantenimiento de las turbinas eólicas es indispensable, ya que permite tener algunas ventajas como actualización rápida de pequeños detalles, hacer que la producción de energía se incremente, incluso con velocidades bajas o medias de viento y la detección mucho más rápida de fallos en la estructura. Como consecuencia, las reparaciones

se pueden programar con anterioridad y eficacia y además se logra alargar la vida útil del aerogenerador y, por tanto, permite una reducción de costes que supondría sustituirlo por una turbina nueva. (Hergoros Industrias eléctricas, 2018)

Para el caso particular, y revisar estudios anteriores que están relacionadas con esta temática, se identificó que los constructores de las turbinas objeto del presente estudio, propusieron algunas recomendaciones sobre actividades que se deben llevar a cabo periódicamente para evitar fallas y prolongar la vida útil de las turbinas. Realizar mantenimiento a los aerogeneradores, al limpiar periódicamente los álabes y aplicando grasa a los rodamientos al menos una vez al mes; realizar una limpieza periódica del panel, mínimo una vez por semana, pero de ser necesario aumentar la frecuencia, esto al tener en cuenta el clima, ya que en épocas de lluvias puede empeorar la suciedad recogida por este (Triana, 2018). Así mismo, Gómez (2019) afirma que el acople entre las turbinas y el motor es susceptible a cambios bruscos debido a la elevada velocidad, por lo que se requiere un especial cuidado en los ajustes de tornillería y el acople en sí, lo que evita descarrilamiento en las cadenas y la necesidad de gran inercia para el arranque del motor.

Con el fin de poner en contexto la problemática de la presente investigación, se tiene que, en la Universidad Antonio Nariño, Sede Tunja Boyacá (sexto piso) se encuentran dos turbinas eólicas verticales diseñadas y construidas en proyectos de grado por estudiantes del programa de ingeniería mecánica. Estas turbinas en este momento presentan desgaste, corrosión, ruptura de pernos, daños en los rodamientos y algunos materiales de fabricación inadecuados. Todos estos factores permitieron que estas dejaran de funcionar, lo que ocasionó una pérdida de espacio físico, materiales, prácticas e investigaciones, lo que genera afectación en los espacios académicos, debido a que, por encontrarse en mal estado, no es

posible analizar e interpretar el comportamiento de dichas turbinas por parte de los estudiantes. Al tener en cuenta que las turbinas eólicas de la universidad Antonio Nariño Sede Tunja están deterioradas y dejaron de funcionar, es de gran relevancia llevar a cabo su restauración y puesta en funcionamiento. Adicionalmente, es relevante retomar estos espacios y mecanismos para uso didáctico en la práctica y adquisición de conocimiento técnico y profesional de los estudiantes. En razón a lo expuesto, se puede llegar a la formulación de la siguiente pregunta de investigación:

¿Qué mantenimientos y reparaciones deben realizar para restaurar y lograr la puesta en marcha de 2 turbinas eólicas verticales de la universidad Antonio Nariño - Sede Tunja?

Lo que se busca con este proyecto es poner en marcha dos turbinas eólicas de tipo verticales ubicadas en la Universidad Antonio Nariño sede Tunja-Boyacá, las cuales no se encuentran funcionando actualmente; por tanto, el objetivo general de la investigación es “Restaurar dos turbinas eólicas verticales con puesta en funcionamiento en la universidad Antonio Nariño Sede Tunja”. Para alcanzar dicho propósito se establecieron los siguientes objetivos específicos:

- Realizar un diagnóstico para cada una de las turbinas eólicas.
- Realizar el montaje de las dos turbinas eólicas en un único mecanismo y
- Efectuar pruebas del sistema desde la parte mecánica y la parte eléctrica.

Respecto al alcance de la investigación, con la restauración, montaje y pruebas funcionales de estas turbinas eólicas, buscan proporcionar un resultado de medición de eficiencia a la Universidad Antonio Nariño sede Tunja-Boyacá que permita aprovechar al máximo los recursos ya existentes tales como materiales, estructuras y por supuesto la energía cinética del viento que pasa por esta zona. Por otra parte, también se busca que los

estudiantes de la facultad de ingeniería puedan observar cómo es el funcionamiento y les permita mediante prácticas, comprender los fenómenos asociados y continuar los procesos de investigación a futuro. Algunas de las limitaciones para llevar a cabo este proyecto son las condiciones atmosféricas, que por diversas variables meteorológicas no permitan que haya suficiente viento que posibilite a las turbinas moverse.

Con los resultados obtenidos, se espera optimizar el rendimiento de las turbinas potenciando la energía generada con los acoples implementados. Por otra parte, se brindará conocimiento y experiencia a los interesados en el área de energías renovables, ya que se podrá apreciar, estudiar e investigar directamente algunas de las formas de transformación de energía a través de las turbinas eólicas restauradas y puestas en funcionamiento en la terraza de la universidad.

Este proyecto se encuentra ubicado dentro de la línea de desarrollo de tecnologías para el aprovechamiento de fuentes de Energía Renovable.

Los usuarios directos y la forma de utilización de los resultados del proyecto serán los directivos, docentes y estudiantes de la Universidad Antonio Nariño sede Tunja-Boyacá que utilicen energía de esta fuente en asignaturas relacionadas con transferencia de calor, transferencia de energía, mecánica de fluidos, energías renovables, sistemas de transformación de energía diseño mecánico etc.

## 1. Capítulo I. Marco referencial

### 1.1 Marco teórico

#### 1.1.1 La energía eólica

Es aquella que se obtiene a partir de la fuerza del viento a través de un aerogenerador que transforma la energía cinética de las corrientes de aire. El proceso de extracción se realiza principalmente gracias al rotor, que transforma la energía cinética en energía mecánica (Iberdrola, 2022). En las regiones de latitudes medias del hemisferio norte, la velocidad del viento se incrementó tres veces respecto al descenso observado de 1978 a 2010, de acuerdo a un nuevo estudio publicado en la revista *Nature Climate Change* (BBC, 2022)

#### 1.1.2 Aerogeneradores para la producción de energía eólica

Un aerogenerador es un dispositivo que es usado para la producción de energía eólica y con ella la corriente eléctrica, pues es aerogenerador convierte la energía cinética obtenida del viento a energía mecánica, y finalmente a eléctrica.

Gracias a las palas que giran a una velocidad constante, una velocidad del rotor que varía en función del viento, pues a mayor viento en el lugar será mayor la eficiencia en la consecución de la energía. (IngeoExpert, 2019)

Los aerogeneradores fueron apareciendo cuando hubo un interés verdadero por la energía eólica, cuando en Europa surgió una crisis petrolera que obligó a los seres humanos a buscar nuevas formas de abastecerse, por tanto a finales de 1980 aparecieron los primeros aerogeneradores que generaban 55kW, pues fue en esa época ochentera que la energía eólica empieza a crecer pues era necesaria para la combustión interna, la propulsión de barcos, molinos de molienda de grano, bombeo de agua para riego, y también un crecimiento dado por movimientos que iban en contra de la energía nuclear, pues como se dijo antes, a mayor

demanda de energía eólica era necesario el uso de aerogeneradores, que a medida del paso del tiempo son más de 200.000 distribuidos y usados en el mundo que generan aproximadamente 238,351 MW de energía (Galar, 2011).

### 1.1.3 Tipos de aerogeneradores

Turcan (2015) en su trabajo final propone y menciona los tipos de generadores de viento, los cuales son clasificados según su dirección de eje, la forma del rotor y la forma de las alas.

El primer tipo de aerogenerador de viento es “El aerogenerador con rotor Savonius”; un aerogenerador con un modelo de rotor sencillo formado por cilindros huecos que se desplazan respecto a su eje, por lo que tiene menor resistencia de giro siendo no muy útiles para la generación de electricidad.

Otro tipo de aerogenerador es el “Aerogenerador con rotor Darreieus”, uno de los aerogeneradores con más éxito comercial debido a que su diseño es de eje vertical, de palas simétricas que permite mayor velocidad del rotor, aunque necesita de un sistema externo para su arranque.

El último tipo de aerogenerador, pero no menos importante es el “Aerogenerador con rotor Giromill” un modelo que tiene palas verticales unidas al eje por brazos horizontales, que tienen la capacidad de cambiar su orientación a medida que se produce el giro en el rotor para aprovechar mejor la fuerza del viento.

### 1.1.4 Aerogenerador Vertical

El aerogenerador vertical o aerogenerador VAWT (Vertical Axis Wind Turbine) es un tipo de aerogenerador que no requiere de mecanismo de movimiento de yaw para la orientación de sus palas, y además es de los aerogeneradores más sencillos de fabricar e



instalar, aunque no es el más comercial o eficiente pues sus velocidades de viento a nivel del suelo son bajas por tanto su potencia para generar viento o electricidad será baja, y que además al estar con objetos muy grandes cercanos al aerogenerador provocan turbulencias que causen vibraciones y estrés en los componentes del aerogenerador. (Molina, Ponce, & Soriano, 2010)

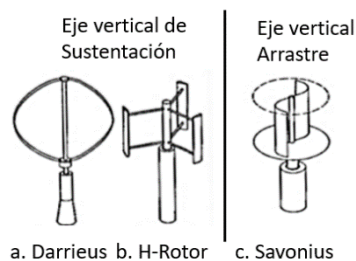
### 1.1.5 Diseño y características del aerogenerador vertical

En los aerogeneradores de tipo vertical se debe de tener en cuenta para su diseño interno o estructural principalmente al rotor, eje principal, generador eléctrico y su sistema de transmisión. Así lo menciona (Sola, 2012) en su proyecto en donde nombra las características principales de los aerogeneradores verticales como la posición vertical del eje principal, el generador síncrono de imágenes y su sistema de transmisión de poleas y correas.

Por tanto, se nombran las características de cada diseño estructural:

Diseño del rotor: En los aerogeneradores, el rotor se compone de dos palas y dos tapas circulares en material de aluminio, en donde las palas irán unidas a las tapas. En este diseño se debe determinar la forma más adecuada para las palas ya que de esto depende el coeficiente de potencia del aerogenerador.

*Figura 1. Tipos de Rotor de Aerogeneradores de eje Vertical*

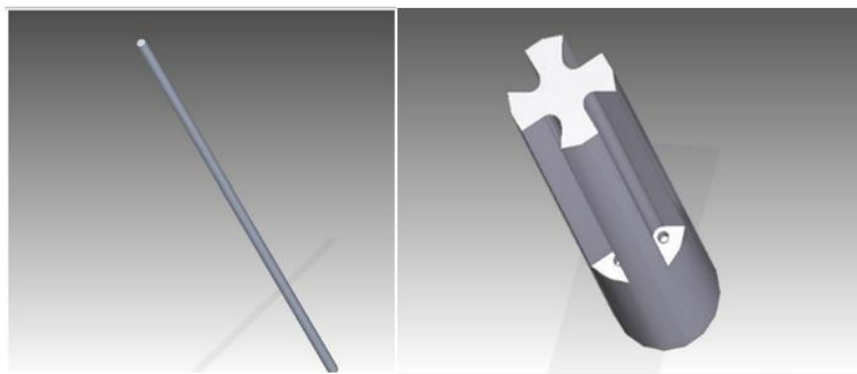


Fuente: (Alcántara, 2017)

En la Figura 1 se presentan los modelos rotores de eje vertical, esto al tener en cuenta la literatura que muestra los rotores de eje vertical de sustentación, de igual forma en su clasificación se han establecido el rotor a. Darrieus y b. Rotor tipo H; el otro tipo de clasificación es el rotor de eje vertical de arrastre, en cual se encuentra el rotor c. Savonius (Alcántara, 2017).

Diseño eje principal: El eje principal funciona para enlazar el rotor con el sistema de transmisión, pues el eje se debe encontrar atornillado con una chapa de acero, y estar apoyado a la estructura de sujeción, mientras su parte inferior unida a la polea grande del sistema de transmisión. En la Figura 2 se presentan los tipos de eje vertical que se emplean en forma característica para los aerogeneradores de eje vertical.

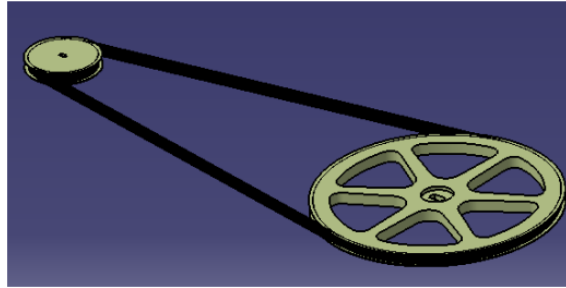
*Figura 2. Eje Principal de Aerogenerador Vertical*



Fuente: (Román, 2013)

Diseño del sistema de transmisión: El sistema de transmisión se compone por las poleas y correas necesarias para aumentar la velocidad de giro del eje principal (ver Figura 3), y así lograr que el generador eléctrico funcione a su vez con una velocidad adecuada (Sola, 2012).

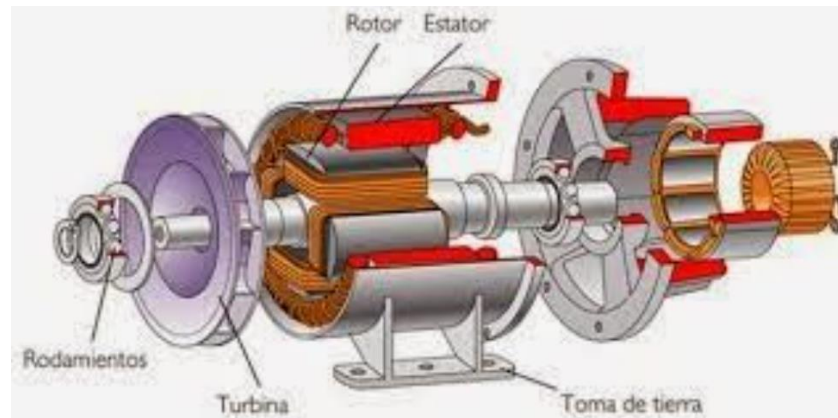
*Figura 3. Sistema de Transmisión del Aerogenerador*



Fuente: (Sola, 2012)

Diseño del generador eléctrico: Es una de las piezas claves para el funcionamiento del aerogenerador, pues es aquí donde la energía mecánica se convierte en energía eléctrica. El generador necesita de un rotor como parte móvil para que todo gire conjuntamente, encontrándose unido a la polea del sistema de transmisión, y por el estator como parte fija de generador en donde se alojan las bobinas encontrándose fijo entre los dos discos del rotor.

*Figura 4. Modelo de Generador eléctrico*



Fuente: (Tobías & Rubio, 2017)

#### 1.1.6 Tipos de turbinas de aerogenerador vertical

Los aerogeneradores de tipo vertical se clasifican según el uso y funcionamiento de la turbina, puesto que es diferente la velocidad o captación de aire como de generación de energía de cada turbina, por tanto, cada una es empleada en un proyecto o finalidad

específica. Se clasifican en aerogeneradores verticales con turbina tipo Savonius; su nombre debido a su creador S.J. Savonius, y los aerogeneradores de eje vertical con turbina tipo Darrieus; nombre acuñado por su creador el ingeniero G.J.M. Darrieus.

#### 1.1.7 Características y diferencias entre turbinas de eje vertical.

##### 1.1.7.1 Aerogenerador de eje vertical con turbina Darrieus

Según Arango et al., (2016) en su proyecto sobre los aerogeneradores Darrieus presenta que son de los aerogeneradores de eje vertical más comerciales, puesto que permite velocidades mayores a comparación de la turbina Savonius. Este tipo de turbina fue patentada en 1931, una turbina con palas simétricas muy finas que se encuentran unidas a eje principal, con el propósito de alcanzar un mejor rendimiento, además de que no es necesario en su instalación y modelo tener torres altas debido a su captación omnidireccional. Es usada generalmente para la calefacción de viviendas, recargas de automóviles de tipo eléctrico, encendido de luces, entre otros. Mas, sin embargo, el diseño clásico que cuenta con dos a cuatro palas, se encuentra inconvenientes debido a que los perfiles aerodinámicos de las palas no permiten un arranque propio, por lo que es necesario el uso de tensores para la estabilidad estructural de la misma.

*Figura 5. Aerogenerador Vertical Darrieus*

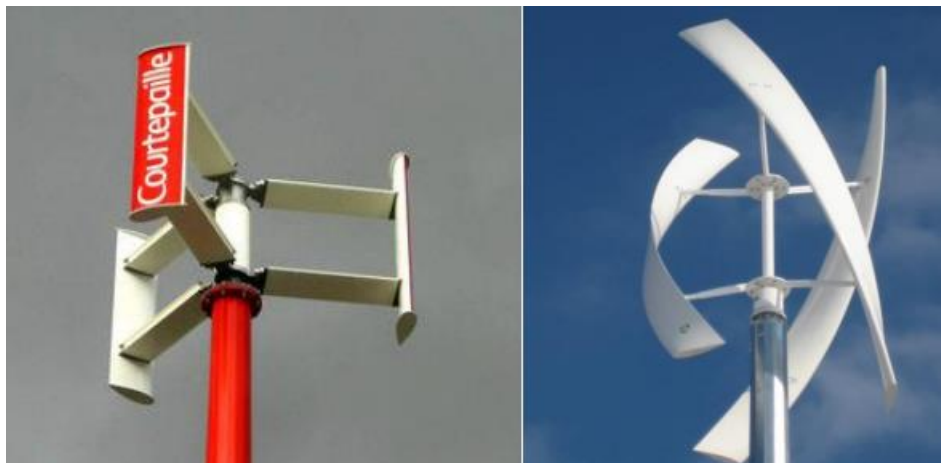


Fuente: (Tobías Salas & Rubio Jiménez, 2017)

#### 1.1.7.2 Aerogenerador Darrieus - Rotor H

Este tipo de rotor está formado por palas verticales, unidas al eje mediante brazos horizontales, los cuales pueden salir de los extremos del perfil o bien de la parte central del mismo. Durante el funcionamiento en servicio de este tipo de generador, la orientación de los perfiles va variando con el giro del rotor, lo cual permite un mayor aprovechamiento de la fuerza del viento (Pico et al., 2018).

*Figura 6. Aerogenerador Darrieus – Rotor H*



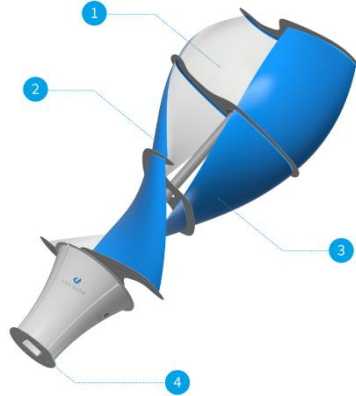
Fuente: (Pico et al., 2018)

### 1.1.7.3 Aerogenerador de eje vertical con turbina Savonius

En la investigación y proyecto de Murcia (2019) menciona a las turbinas Savonius, son un tipo de aerogenerador vertical con turbinas que tienen palas de forma semicilíndrica; dos palas que trabajan según su coeficiente de arrastre por lo que es poco eficaz para la extracción de energía obtenido del viento, con una relación directa con la potencia, por ende, su producción potencial es menor. Pues sus principales desventajas son su bajo rendimiento y la escasa velocidad de giro.

Como parte de sus ventajas se encuentran, la capacidad de trabajar con vientos de velocidad pequeñas, buena resistencia a turbulencias y que no es necesario un “autoarranque”. Al tomar en cuenta Figura 7 se presentan las partes principales de una turbina vertical tipo Savonius, 1. Sistema de recogida de viento en un rango de 360°, lo que hace que no sea necesario un sistema que incorpore guiñada; 2. Diseño a prueba de tormentas, lo que permite una velocidad máxima de 180 Km/h; 3. Sistema de bajo impacto ambiental, con funcionamiento silencioso; 4. Seguridad de funcionamiento, cuenta con seguridad de embrague de sobrecarga.

*Figura 7. Modelo de Turbina Savonius*



Fuente: (Moreno & Tello Yépez, 2017)

## **1.2 Instrumentos de Medición para Pruebas de Funcionamiento**

### **1.2.1. Multímetro (Multifunction Meter DO9847)**

El medidor multifunción DO 9847 es un aparato multifuncional, portátil o de mesa con función de registro de datos. El medidor multifunción dispone de una gran pantalla gráfica y de tres entradas independientes. El diseño y aspecto físico del Multímetro DO 9847 se muestra en la Figura 8.

*Figura 8. Multímetro DO 9847*



Fuente: Autores

Las entradas permiten conectar sondas de un canal o sondas combinadas de dos canales (p.e. dos sondas de temperatura, temperatura y humedad relativa, etc.). El medidor multifunción reconoce automáticamente las sondas SICRAM conectadas en la entrada (sensores configurables inteligentes con memoria).

### **Principales Características del Multímetro DO9847**

Instrumento de placa de mano multifuncional y registrador de datos.

Provisto de una pantalla gráfica de 128x64 píxeles (56x38 mm) y tres entradas independientes.

Cada entrada se puede conectar a un canal o dos sondas duales de canal (por ejemplo, dos termopares, humedad relativa / temperatura, etc.).

El instrumento reconoce automáticamente las sondas SICRAM conectadas a la entrada (sonda inteligente equipada con memoria y configurable).

Funciones: registro de registro de registro de registro de reloj, retención, máx., mín., promedio, registro de registro de inicio inmediato o diferido, diferencia entre las dos entradas, medidas relativas, medición de tres canales de entrada y visualización de temperatura de referencia interior.

Tiempo de muestreo: uno por segundo/entrada.

Calibración de sonda a través del módulo SICRAM; almacenamiento permanente de datos de calibración dentro de la sonda.

Capacidad de almacenamiento: 32.000 lecturas por entrada.



El intervalo de almacenamiento y la impresión se pueden configurar entre un segundo y 1 hora.

Salida serie RS232C: desde 300 hasta 115.200 baudios.

Impresión inmediata o diferida.

Los datos almacenados se pueden mostrar y los bloques de datos almacenados se pueden eliminar.

El apagado automático después de 8 minutos se puede desactivar.

Las unidades de medida se pueden seleccionar de acuerdo con la cantidad física de la sonda conectada.

### **1.2.2. Anemómetro**

Debido a la necesidad de establecer las medidas que se podrían obtener una medición del desempeño de los aerogeneradores, se empleó un anemómetro es un instrumento que permite la medición de la rapidez del flujo de aire en un espacio o conducto y flujos de viento atmosférico.

*Figura 9. Anemómetro*



Fuente: Autor

### 1.2.3. Instrumento de Medición Prova RM-1501 Fototacómetro Digital

El tacómetro digital TES Prova RM-1501 es un fototacómetro permite la medición de las revoluciones por minuto (rpm) de manera rápida y confiable. Realiza medidas superficiales hasta 99.990 rpm. Ideal para motores, compresores, bombas, ventiladores, sopladores, tornos hidráulicos y medición de velocidad de convoyes.

*Figura 10. Prova RM – 1501 Fototacómetro Digital*



Fuente: (Alcántara, 2017)

En la Figura 10 se presenta el modelo RM-1501 del fototacómetro digital empleado para medir la velocidad de las turbinas eólicas, como parte de sus características cuenta con una pantalla LCD de 5 dígitos, interfaz de RS-232 para el modelo de tacómetro empleado, rango de medición automático para RPM, permite medie en rango Max/Min/retención para medida real; contador de eventos con tiempo transcurrido; distancia de medición desde 50 a 300 mm; en rango de medida va desde 10.00 a 99.999 rpm; medición de reflejo de luz; pantalla LCD de 5 dígitos. En la Tabla 1 se presentan las especificaciones del dispositivo Fototacómetro Prova RM – 1501.

*Tabla 1. Ficha de Especificaciones de Velocidad Óptica*

Especificaciones de Velocidad Óptica			
	Rango de	Resolución	Precisión
RPM	10.00 – 99999	0.01/0.1/1	0.04% 2dgtst
Rps (Hz)	0.2 – 2000	0.001/0.01/0.1	0.04% 2dgtst

Fuente: Autor

Al tener en cuenta la velocidad de contacto del dispositivo, en la Tabla 2 se muestra un resumen de las especificaciones del dispositivo.

*Tabla 2. Especificaciones de Velocidad del Contacto*

Especificaciones de Velocidad de Contacto			
	Rango de	Resolución	Precisión
RPM	10.00 – 29999	0.01/0.1/1	0.04% 2dgtst
M/min	1.000-2999.9	0.001/0.01/0.1	0.04% 2dgtst
Pies/min	4,00-10000	0,01/0,1/1	0.04% 2dgtst
Rps (Hz)	0.2 -500	0.001/0.01/0.1	0.04% 2dgtst

Fuente: Autores

En la Tabla 3 se muestran las características con la que cuenta el contador de evento del dispositivo.

Tabla 3. Características del Contador de Eventos

Características del Contador de Eventos	
Rango de	Frecuencia de entrada máxima
0 -99999	10KHz. Con ciclo de trabajo del 5%

Fuente: Autores

Tabla 4 Especificaciones Generales

Especificaciones Generales	
Entrada TTL externa	Alto > 4,5 V (RM-1501)
Pantalla	5 dígitos 99999 cuenta
Tasa de muestreo	0,7 segundo (> 60 rpm) > 1 segundo (10 a 60 rpm)
Distancia de medición	50 a 300mm
Base de tiempo	Cristal de cuarzo de 4,0 MHz
Selección de rango	Máquina automática
Consumo de energía	1,5 MA (inactivo) 5mA (1000,0-99999 rpm) 25mA (10,00-999,99 rpm) 25mA (máx., Min o Ave habilitada) 25mA (contador de eventos)
Auto-de-	30 minutos.
Temperatura de funcionamiento	0 C ~ 50 C (32 F ~ 122 F)
Peso	190g (6,7 oz.) (incluyendo la batería)
Temperatura de funcionamiento	0 C ~ 50 C (32 F ~ 122 F)
Talla grande	72mm x 63mm x 36mm (6,8 "x 2,5" x 1,5 ")

Fuente: Autores

La Tabla 4 presenta un compendio resumen de las especificaciones generales del dispositivo de medición de velocidad.

### 1.3 Estado del arte

En esta sección se tuvo la finalidad de presentar trabajo o proyectos que estuvieran enfocados en procesos de mantenimiento, restauración y puesta en marcha de turbinas de tipo vertical, de manera que se realizó una revisión documental en el rango de 2012 a 2022, que estuviese enfocado es temáticas similares a las del trabajo de grado. A continuación, se

presentan una serie de proyectos, investigación y trabajos de distintos autores que sirven para identificar los que se ha realizado en los últimos años.

El trabajo realizado por Orduz & Suárez (2011) estuvo basado en el diseño y proceso de construcción de un prototipo de generador de energía eléctrica sostenible de baja potencia. Dentro del proceso de diseño se presentan los aspectos básicos y principios de funcionamiento del dispositivo, de igual forma se presenta en diseño de un alternador de imanes para rectificación de la corriente en el prototipo. Como parte del diseño metodológico del proyecto, en la parte inicial se desarrolló un marco conceptual y una aproximación teórica de los sistemas de aerogeneradores de tipo vertical; posteriormente se presenta el proceso del diseño, en cual se presentan la caracterización del sistema y las variables que se encuentran involucradas. El prototipo diseñado se concibe como un equipo que permite desarrollar pruebas de los parámetros de diseño y operación. Como parte final del proceso se presentan los resultados de las pruebas relacionadas al funcionamiento del prototipo.

Como parte de los proyectos dirigidos a establecer una medición de la eficiencia de los sistemas de turbinas eólicas de tipo vertical, se han realizado análisis que comparan la generación de potencia mecánica y entrópica en diferentes configuraciones para este tipo de sistemas. El proyecto llevado a cabo por Cortés (2018), en el cual se lleva a cabo un modelamiento que permite desarrollar pruebas en 28 configuraciones diferentes para establecer el comportamiento de potencia mecánica y generación entrópica sobre la turbina de eje vertical; el estudio de simulación logró establecer las fluctuaciones y comportamientos incidentales, de forma que se pueda identificar el mejor lugar para empalmar el prototipo a implementar.

Como otra de las propuestas relacionadas a los sistemas de turbinas eólicas de eje vertical, los investigadores Pachón et al. (2019) realizaron el diseño de un banco de pruebas que permita medir y evaluar el desempeño de una turbina vertical por su capacidad de generar energía en áreas de bajo nivel de viento. Cabe resaltar que las condiciones específicas son complejas de medir, precisar y establecer y más si se busca implementar en zonas rurales. El banco busca establecer un proceso de optimización de los parámetros conforme se realicen pruebas prototipo que permitan mediante el banco, obtener nuevos modelos y comportamientos, esto a partir de las bajas velocidades que se requieren, pero que cada vez sean más eficiente.

Con el fin de desarrollar una evaluación del deterioro de una turbina de eje vertical, los estudiantes Pacheco et al. (2020) presentan un estudio de los materiales afectados por las condiciones ambientales y el clima, en sistemas de aerogeneradores eólicos de tipo vertical. Como parte del desarrollo metodológico se llevó a cabo una caracterización matemática del sistema para ser llevado a procesos de simulación en condiciones de clima seco y lluvioso, de forma que se logre simular los efectos aproximados de la erosión mientras el sistema se encuentra en funcionamiento, se estudiaron las variables de velocidad, tamaño de material particulado y ángulo en el que golpea la partícula.

Se han desarrollado trabajos en los que se busca implementar un diseño de las dos turbinas de tipo vertical más empleadas, con el objetivo de optimizar los diseños desarrollados y proponer un prototipo que combine las ventajas de las turbinas de eje vertical Sabonius y Darrieus. El trabajo realizado por Franco & Moncada, (2020) se busca que la implementación del diseño híbrido permita la obtención de energía limpia, a partir de los diferentes rangos de velocidades con los que cuenta Colombia. Como parte del diseño se

logra establecer su bajo costo y mantenimiento mínimo, lo que permite entregar una recolección de energía de forma económica. Se llevó a cabo un proceso de identificación de parámetros para el diseño como la altura de la instalación, la densidad del aire, el área de barrido y el área disponible para el proceso de instalación. Una vez diseñada, se llevó a cabo un proceso de pruebas en campo, para lograr la evaluación del sistema implementado, mediante las distintas curvas de rendimiento.

Como parte de las estrategias empleadas para los procesos de mantenimiento de los sistemas de turbinas, se llevan a cabo procesos de medición y análisis de vibración para identificar fallas potenciales, derivadas del uso prolongado de los sistemas. En esta metodología se aplican distintos escenarios y parámetros de prueba que generan vibraciones a diferentes frecuencias. Lo que se busca por parte de , es realizar un algoritmo que sea capaz de identificar los fallos que producen vibración en turbinas de eje vertical. Como parte de los parámetros medidos está el desbalance hidráulico, desbalanceamiento magnético, desbalanceamiento hidráulico y runout. El algoritmo fue diseñado a partir del software matemático MATLAB en entorno de simulación mediante la herramienta SIMULINK. Como parte de los resultados se estableció que los errores máximos relativos se encuentran en un 3.12% y las realizadas con MATLAB, se encuentran en 212%.

#### 1.4 Marco conceptual

##### 1.4.1 Energías Renovables

Según lo define Ramírez (2014) la energía renovable hace referencia a todos aquellos recursos naturales ya sea que provengan del aire, agua y suelo, que, al encontrarse en forma de sustancia líquida, sólida o gaseosa, permiten obtener energía a través de diversos procesos, generando así aún más flujos de energía a partir de recursos que se pueden regenerar.

#### 1.4.2 Viento

Se conoce como viento al movimiento de aire, es decir, el estado variable del movimiento de las masas de aire, cuyo movimiento puede ir en direcciones verticales u horizontales. El viento es originado por las diferencias de temperaturas que existen en la atmosfera. (Weather, 2009)

#### 1.4.3 Aerogenerador

Es el dispositivo empleado en la generación de energías renovables, con el propósito de ser máquinas que transformen la fuerza y velocidad del viento en energía eléctrica. Éstos son colocados en sitios donde haya viento, y generalmente son de gran altura para que la velocidad del viento aumente (Aeólica, 2011)

#### 1.4.4 Eólica

Es un tipo de energía que se origina a partir del recurso viento, el cual es considerado como un recurso renovable. La energía es tomada a partir de los movimientos de las masas del viento, masas generadas a partir de las presiones existentes en distintos lugares, con movimientos a baja y alta presión (Spiegeler & Cifuentes, 2012).

#### 1.4.5 Energía mecánica

Para Lee & Mora, (2020) la energía mecánica se define como la energía convertida en trabajo mecánico, un trabajo que se expresa por el producto o multiplicación de la fuerza por la diferencia de desplazamiento del objeto, o también definida con la suma de las energías de potencial y la energía cinética.

#### 1.4.6 Poleas



En el proyecto de Alcover (2020), se menciona a las poleas como sistemas formados por ruedas y cuerdas o tensores que le permitan realizar algún trabajo específico al ser humano, y para el caso de poleas en aerogeneradores, no son más que ruedas con hendiduras que acoplan el eje del torno de giro.

#### 1.4.7 Palas

Las palas o palas aerogeneradoras son una parte esencial de los aerogeneradores, pues ellas determinan el potencial y captación de energía del aerogenerador, permitiéndole al aerogenerador giros entre 13 y 20 revoluciones por minuto. (Energy, 2020)

#### 1.4.8 Autoarranque

El término acuña varias definiciones de acuerdo al campo en que se emplee, generalmente hace referencia a la acción de arrancar o poner en marcha el sistema de cualquier máquina y propios de la misma, aunque para la informática es el disco duro de un computador.

#### 1.4.9 Potencial eléctrico

Para investigadores como Recamán (2022) el potencial eléctrico con la idea de campo eléctrico, en donde el potencial eléctrico es el trabajo por unidad de una carga que necesita para mover a otra carga en el campo eléctrico, considerando cargas positivas y negativas con la ley de coulomb.

#### 1.4.10 Combustión

García (2001) se refiere a la combustión como el conjunto de reacciones de oxidación, en las que se desprende o absorbe calor en la ecuación química, ecuación y proceso el cual

se compone del combustible que puede ser Gasóleo, Carbón, Madera, Gas propano, y el comburente que es el oxígeno

#### 1.4.11 Energía nuclear

La energía nuclear es la energía que hace referencia al núcleo del átomo, pues con esta energía, el átomo puede dividir a un material dependiendo del tipo de átomo ya sea de petróleo o gas. La energía nuclear generalmente es utilizada para generar electricidad (Spiegeler & Cifuentes, 2016)

## 2. Capítulo II. Diagnóstico de las Turbinas Verticales

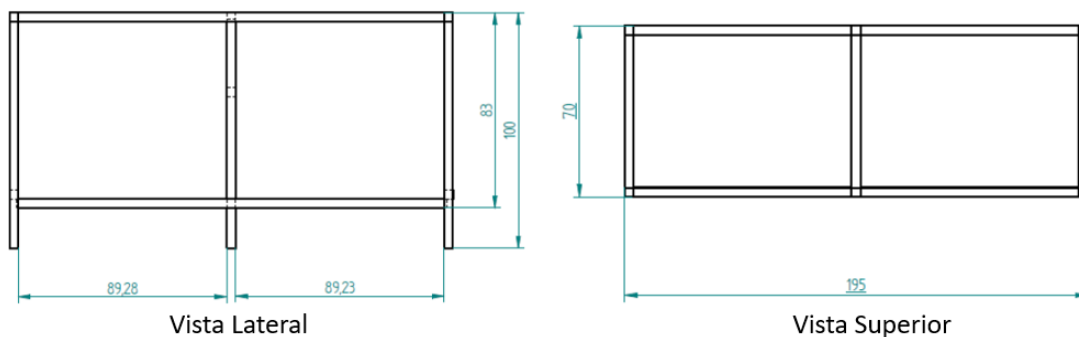
### 2.1 Identificación del Sistema de Turbinas Verticales

#### 2.1.1 Diseño Mecánico y Características

Los aerogeneradores que se han diseñado bajo sistemas de eje vertical, de forma que reacciona a estímulos de viento que se genere en cualquier dirección porque lo que se les ha denominado Panémonos. Estos dispositivos se pueden implementar en lugares en los que se generan vientos de baja velocidad, por lo general lugares en los que no se superan los 250 rpm, de forma que su potencial de generación de energía eólica va en el rango de los 200 W.

Al tomar como base el trabajo realizado por Gómez & Cárdenas (2019) se identificaron las especificaciones de construcción. El sistema cuenta con un soporte para la instalación de dos turbinas, una turbina tipo Savoneus y otro tipo Panémoma, la estructura está construida en metal con ángulos de  $1\frac{1}{2}'' \times 1\frac{1}{2}''$ , este diseño tuvo en cuenta el peso de cada elemento y las condiciones de seguridad, de forma que las fuerzas aplicadas sobre la estructura son soportadas sin problemas.

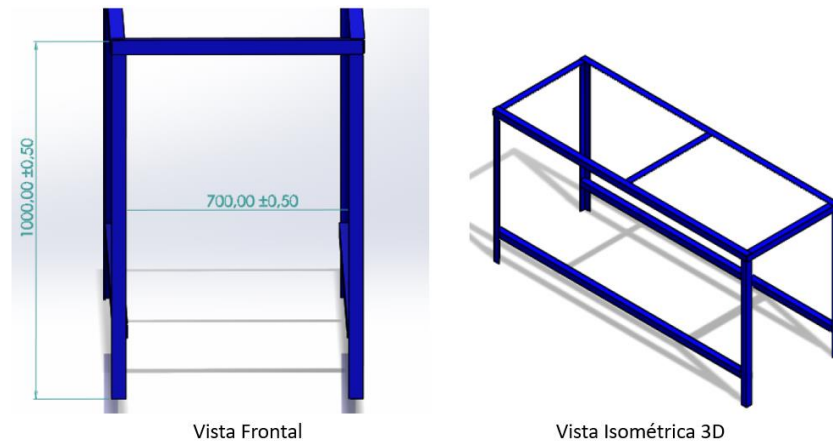
*Figura 11. Medidas de las Estructura Soporte (Vista lateral y Superior)*



Fuente: Gómez & Cárdenas (2019)

En la Figura 11 se puede observar la estructura metálica diseñada para el soporte de las turbinas de eje vertical, con sus medidas, desde la vista lateral y superior.

*Figura 12. Vista 3D de la Estructura*

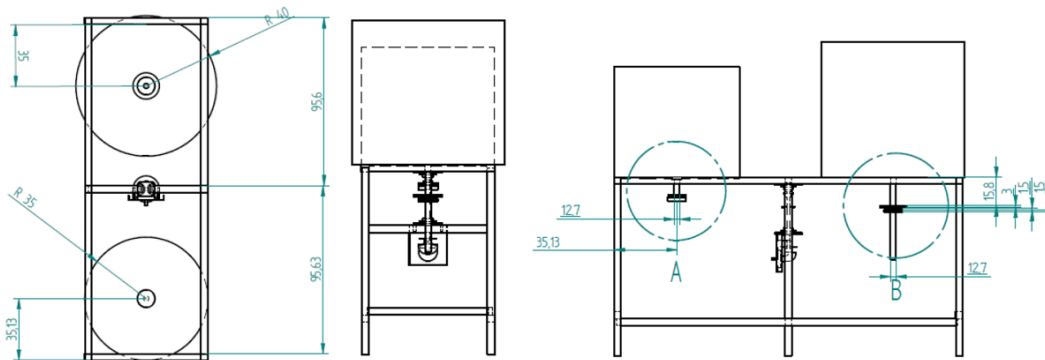


Fuente: Gómez & Cárdenas (2019)

En la Figura 12 se observa la estructura desde la vista frontal con sus medidas y en la parte izquierda la estructura para las turbinas desde una perspectiva isométrica en 3D.

De igual forma, al tomar en cuenta la estructura ya con las turbinas instaladas, en la Figura 13 se muestra la vista lateral.

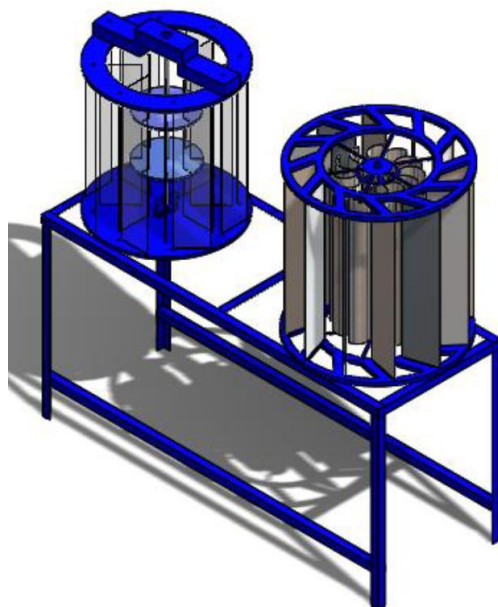
*Figura 13. Estructura de la Turbina*



Fuente: Fuente: Gómez & Cárdenas (2019)

En la Figura 13 se presenta el sistema del aerogenerador de eje desde distintas posiciones, de izquierda a derecha la primera representa la vista superior y sus medidas principales, la segunda es la vista frontal y finalmente, la tercera representa la vista lateral de todo el sistema con las turbinas y el soporte.

*Figura 14. Estructura de las Turbinas Verticales en Sólido*



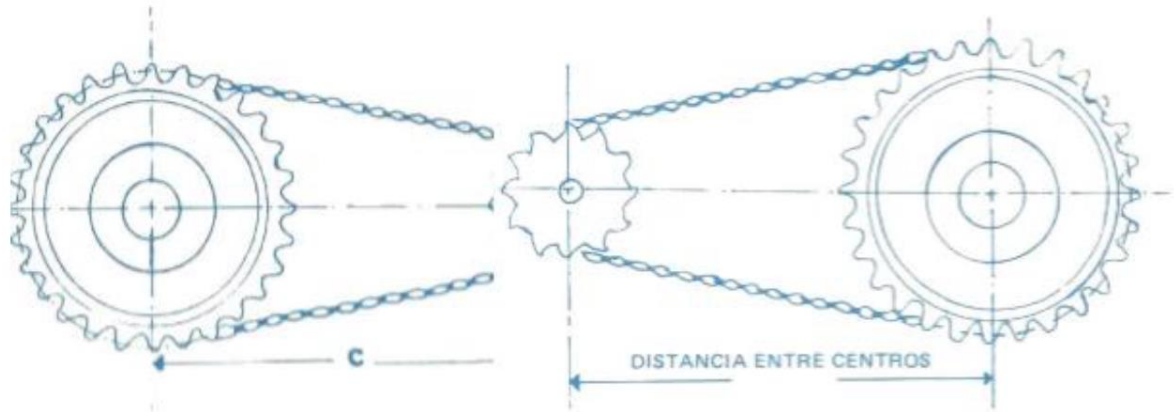
Fuente: Gómez & Cárdenas (2019)

En la Figura 14 se muestra la estructura general del sistema de las turbinas eólicas de eje vertical con el que se desarrolló el proceso de diagnóstico y restauración del mismo.

El tren de potencia es el componente que tiene la función de transmitir la energía producida por el giro de los rotores, en este caso las dos turbinas, al motor de una forma aprovechable por este para la generación de energía eléctrica. Para la generación eléctrica un motor estándar requiere una velocidad de giro de alrededor 1500 rpm, por lo que en muchos casos se requiere un multiplicador con el fin de aumentar la velocidad de giro transmitida. en

la Figura 15 se presenta el sistema de transmisión de fuerza diseñado (Gómez Caviedes & Cárdenas Bernal, 2019).

*Figura 15. Sistema de Transmisión*

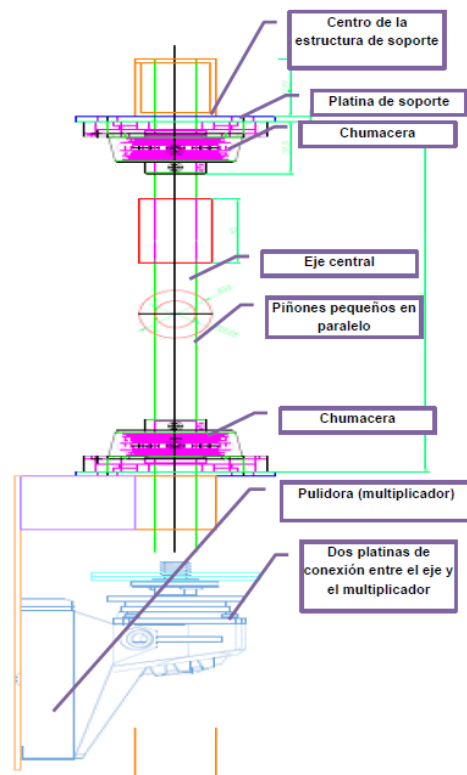


Fuente: (Gómez Caviedes & Cárdenas Bernal, 2019)

La estructura está compuesta por 2 piñones o catarinas de 28 dientes con un diámetro de 113,28 mm, y 2 piñones o catarinas de 16 dientes con un diámetro de 65,02 mm, Los piñones grandes transfieren la fuerza de cada una de las turbinas por medio de 2 cadenas de 1510 mm que se conectan a los piñones pequeños localizados a lo largo de un eje principal. La distancia del piñón al dicho eje es de 609,6 mm, y la relación entre las revoluciones de los piñones conectados es de 1,75. Además de disponer de un tacómetro análogo con kit de guaya y rodamientos para medir revoluciones por minuto. Cerca de los piñones grandes, bajo cada una de las turbinas se disponen dos tensores de 7 dientes, que accionan el sistema para suspender la transmisión de fuerza desde cada una de las turbinas. Esto se hace suspendiendo el engrane y pasando la cadena del piñón a un buje circular sin dientes, cuando no hay engrane la posición de la cadena es alrededor de buje de 102 mm de diámetro y 30 mm de espesor. En la Figura 16 se observa el detalle del eje central, donde se localizan los piñones pequeños

y se produce la transmisión de fuerza hasta la caja multiplicadora que en este caso es un cabezote de pulidora.

*Figura 16. Sistema de Transmisión Completo*



Fuente: (Gómez Caviedes & Cárdenas Bernal, 2019)

## 2.2. Diagnóstico de las Turbinas de Eje Vertical

Al tener en cuenta que era necesario rehabilitar el sistema y colocar en funcionamiento los aerogeneradores, pues estos han sido afectados por falta de mantenimiento, los procesos relacionados al clima como las lluvias y la exposición al sol, se identificaron las distintas partes que debían ser reparadas. A continuación, se presentan y se describen los fallos encontrados.

*Figura 17. Estado General de la Estructura*



Fuente: Autores

Como se puede observar en la Figura 17, la estructura general presenta corrosión debido a un deterioro progresivo de las piezas y de las turbinas, estos por factores asociados a la humedad (lluvias) y procesos de oxidaciones de los metales que componen el sistema, por causa de las corrientes de aires de la zona en la se encuentran ubicadas las turbinas.

De igual forma, se encontraron partes de la estructura de soporte con un deterioro que justificaba su mantenimiento, de forma que el metal se encontraba totalmente corroído y con piezas gastadas, perforadas y con baja rigidez, como se muestra en la Figura 18.

*Figura 18. Piezas de la Base con Alta Corrosión*



Fuente: Autores



Al tener en cuenta todas las piezas que se encontraban deterioradas, en la Figura 19 se puede observar que los tornillos, arandelas y cadena de transmisión, se encuentran oxidadas. Cabe resaltar que las cadenas del sistema de transmisión se encontraron deterioradas, por oxidación y corrosión, lo que hizo necesario un mantenimiento que restaurase las piezas. Como parte del procedimiento realizado, las cadenas se desmontaron y se dejaron un día en ACPM para su respectiva limpieza, y de esta forma poder eliminar parte de la oxidación, luego se dejaron secar para acortarlas (quitarle dientes) ya que se eliminó el sistema de guayas que tensionaba estas. Al eliminar este sistema el mecanismo de tensión quedo por medio de corredera para las dos turbinas cada una cuenta con tres correderas sujetadas con tornillo al momento de correrlas hacia afuera tensiona la cadena con el fin de no dejarla caer y no perder el movimiento.

Figura 19. Cadena y Tornillos Oxidados



Fuente: Autores

Al hacer una revisión de partes como las hélices, se identificó que algunas se encontraban quebradas como observa en la Figura 20.

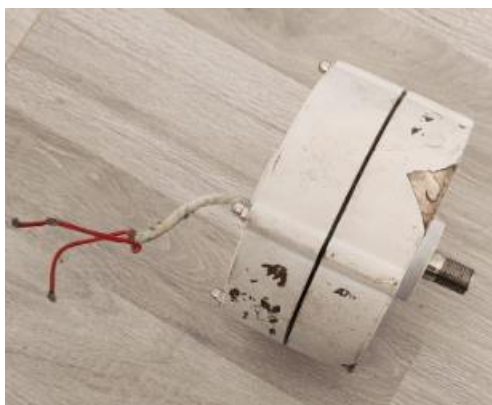
*Figura 20. Hélices de Turbina Savonius en Acrílico Quebradas*



Fuente: Autores

Adicionalmente el generador eléctrico se encontrada con las conexiones dañadas y desconectadas por lo que hubo que repararlo, el generador desarmado se muestra en la en la Figura 21.

*Figura 21. Generador con cables dañás y rotos*



Fuente: Autores

Como falla detectada, al realizar una medida de continuidad con el multímetro, se detectó un corto circuito en el cableado. La prueba se realizó en las salidas (fases), pero no se detectó continuidad esto debido a que el cableado interno se encontraba quebrado. Como procedimiento se procedió a observar y encontrar los puntos desconectados, esto con el propósito de realizar las uniones necesarias para obtener la continuidad en las salidas.

### Listado de Daños

- Rotura de cableado de generador eléctrico
- Desgaste de la estructura base, corrosión
- Tornillos corroídos
- Piezas de hélices de acrílico rotas y desgastadas
- Piezas desgastadas y mal construidos como los mecanismos de eje central
- Cadenas de transmisión oxidadas
- Partes de colocación de las aspas oxidadas y sin puntura por corrosión

### 3. Capítulo III. Montaje del Sistema Eólico

#### 3.1. Mantenimientos Realizados

En esta sección se presentan los mantenimientos realizados a el sistema de aerogeneradores eólicos de eje vertical, esto con el fin de rehabilitar y reactivar el sistema que se encontraba fuera de servicio, a consecuencia de las partes que se encontraban descompuestas y desgastadas por factores como el clima, ya sea por las lluvias, exposición al sol o viento, que han traído como efecto la oxidación y corrección.

*Figura 22. Cambio de Cables de Conexión del Generador Eléctrico*



Fuente: Autores

Como parte esencial del sistema de turbinas aerogeneradores se realizó una reparación del cableado de conexión, debido a que se encontraban sueltos y con secciones que no contaban con goma protectora del alambre del cableado, lo que potencialmente podría causar corto o arcos eléctricos que afectarían el generador y las espiras de las bobinas hasta ocasionar que se quemara el dispositivo; se llevó a cabo una limpieza de las partes mecánicas

del generador, se reemplazaron los cables, se mejoró la soldadura de los terminales y se cubrió de cinta como se muestra en la Figura 22.

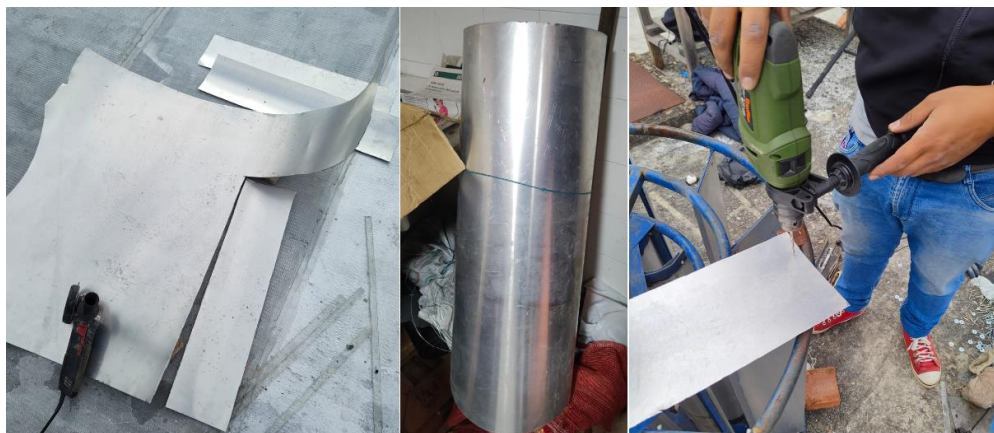
*Figura 23. Lijado de la Estructura Base de las Turbinas*



Fuente: Autor

Al tener en cuenta la necesidad de mejorar el estado actual de la estructura general, sobre la estructura de acero de la base se llevó a cabo un proceso de lijado y cepillado de las partes, para retirar las rugosidades de la superficie, la pintura y en parte la oxidación corrosión por los efectos ambientales, como se muestra en la Figura 23.

*Figura 24. Pizas de Aluminio para las Hélices*



Fuente: Autores

A partir de a la adquisición de una lámina de metal, se realizaron los cortes de las láminas con las medidas idénticas, con los cortes y perforaciones para la instalación de las hélices como se muestra en la Figura 24.

*Figura 25. Recorte de Piezas de Reemplazo de las Hélices de Acrílico*



Fuente: Autores

Al tener en cuenta que las piezas de la hélices de la turbina de eje vertical se encontraban en mal estado, y que algunas estaban quebradas, se decidió lleva a cabo un proceso de reemplazo es estas piezas, por hélices con idénticas medidas pero bajo un material con una mayor resistencia a condiciones climáticas severas, como días de lluvia intensa o tormentas, de manera que emplearon láminas de aluminio, esto con el fin de mejorar la resistencia y evitar los efectos del clima ligados a oxidación de otros materiales de metal. Las piezas de aluminio se muestran en la Figura 25.

*Figura 26. Limpieza y engrase de piezas mecánicas y móviles*



Fuente: Autores

Como se observa en la Figura 26, las chumaceras que sostienen el eje principal, el cual recibe la energía de las dos turbinas se encontraban frenadas estas no giraban debido a su oxidación, suciedad y agua que tenían debido al paso del tiempo; se desmontaron y desarmaron, luego se procedió a realizar limpieza de estas con gasolina y lubricante en aerosol luego se engrasaron y armaron para su instalación en la estructura. Al igual los piñones se les realizó limpieza ya que tenían mugre y grasa pegada y al quedar limpios se procedió a dejar engrasados, esto con el objetivo de recuperar y mejorar la movilidad de las piezas mecánicas y móviles.

*Figura 27. Instalación de L para Soporte de las Láminas de las Hélices*



Fuente: Autores

Como parte de las mejoras con respecto a la estructura anterior, dentro de los procesos de mantenimiento se instalaron piezas de refuerzo de unión metálicas en forma de L (ver Figura 31), esto con el fin de mejorar la estabilidad las piezas de las hélices de aluminio que reemplazaron las hélices de acrílico. Para la colocación de las piezas de refuerzo fueron sujetados al aluminio por medio de remaches y a la estructura de madera con tornillo goloso

Se realizó una reducción en el tamaño de los engranes de los ejes de giro de los aerogeneradores, debido a que los que se ven a mano izquierda son muy pesados, lo que dificultaba el giro y hacía que se requiriese más potencia y eso implica mayor gasto energético. Como se puede observar en la Figura 27, en la parte derecha se identifica la reducción de tamaño, con esto se mejoró el mecanismo de giro por partes más livianas. Debido a la eliminación de las pesas que sostienen el piñón de cada eje de las turbinas, se adaptó una platina atornillada con rosca en el centro para la instalación en el eje, esta se ajusta por medio de tuerca y contratuerca en la estructura.

*Figura 28. Cambio de Engranes de los Ejes de Giro*



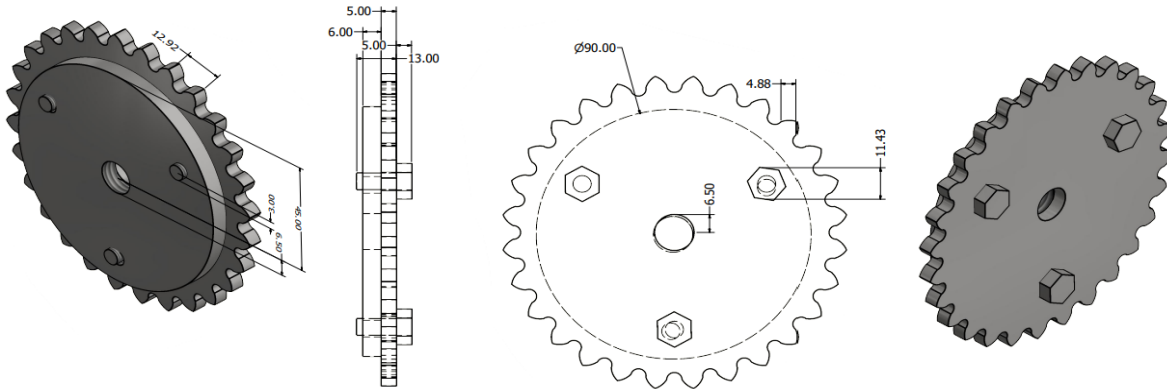
Fuente: Autores

Debido al cambio del peso en los engranes se reemplazó el mecanismo de giro del generador eólico vertical (Ver Figura 30). Se mejoró el sistema de acople al generador esto ya que se eliminó un mecanismo que transmitía el giro vertical en uno horizontal. Se instaló el generador de forma vertical acoplándolo a la pieza mostrada con el fin de eliminar piezas y no perder tanta energía. Se mejoró el sistema de acople al generador, esto al eliminar un



mecanismo que transmitía el giro vertical, y reemplazarlo por uno horizontal. Se instaló el generador de forma vertical, con el fin de eliminar piezas y no perder tanta energía.

*Figura 29. Pieza de Engranajes Modificada*



Fuente: Autores

En la Figura 29 se presenta el esquema de la pieza modificada, la cual fue diseñada, con sus medidas y vistas principales (isométrica, fronta y lateral).

*Figura 30. Mecanismo de Giro del Eje del Generador Eólico Vertical*



Fuente: Autores

En la figura 30 se observa la conexión entre el eje central y el generador, este piñón (planetario) tiene la función de multiplicar las rpm entregadas al generador; con la finalidad de obtener más voltaje a la salida. En el numeral 4.3.2 se muestra matemáticamente la relación de engranajes.

*Figura 31. Pintura Sobre Estructura de Base de las Turbinas Eólicas de Eje Vertical*



Fuente: Autores

Para evitar la continuación de los procesos de corrosión desgaste una vez lijado se procedió a pintar la estructura como se evidencia en la Figura 31. Cabe resaltar que la pintura empleada, fue una pintura anticorrosiva.

*Figura 32. Colocación y Reemplazo de las Hélices*



Fuente: Autores

Una vez se terminó con las piezas de las hélices y se colocaron los sujetadores de refuerzo en forma de L, se instalaron las hélices de aluminio como se observa en la Figura

32. Cabe recordar que las hélices anteriores estaban quebradas, debido a que el acrílico fue acetado por factores como vientos a altas velocidades.

*Figura 33. Pintado de la Estructura de Soporte de las Hélices*



Fuente: Autores

Como se observa en la Figura 33 se llevó a cabo un proceso de pintura de las estructuras de soporte de las hélices. Adicionalmente, se realizó un proceso de soldadura para reforzar la estructura que soporta la estructura general, las cuales tienen la función de corredera para tensionar las cadenas de la transmisión de potencia para generar movimiento por tensión de la cadena (Ver Figura 34), se colocaron las cadenas y se dejó armado el sistema terminado.

*Figura 34. Cadenas y Soldadura de la Estructura*



Fuente: Autores

## 4. Capítulo IV. Pruebas de Funcionamiento

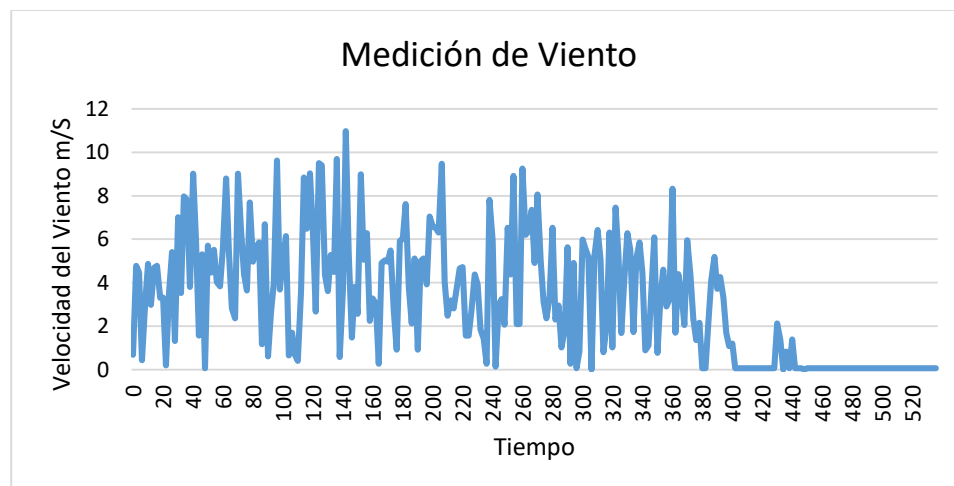
Para llevar a cabo en proceso de validación de funcionamiento del sistema de Eólico de turbinas verticales tipo Savoneus y Panémona, la cuales quedaron acopladas a una estructura metálica de soporte, se realizaron pruebas de funcionamiento, de manera que se pudiese comprobar la movilidad y la eficiencia del sistema, una vez realizó el proceso de reparaciones y restauración. Para esto, se emplearon instrumentos de medición como el multímetro (Multifuction Meter DO9847), un anenómtro

Las pruebas de funcionamiento realizadas se llevaron a cabo en su primera parre por medio del dispositivo. De igual forma después de proceso de mantenimiento y puesta en marcha del sistema de turbinas eólicas se llevó a cabo un proceso de análisis de estructural

### 4.1. Pruebas de Medición del Sistema

#### 4.1.1. Pruebas de Velocidad de Viento, temperatura y caudal

*Figura 35. Medición Velocidad del Viento*

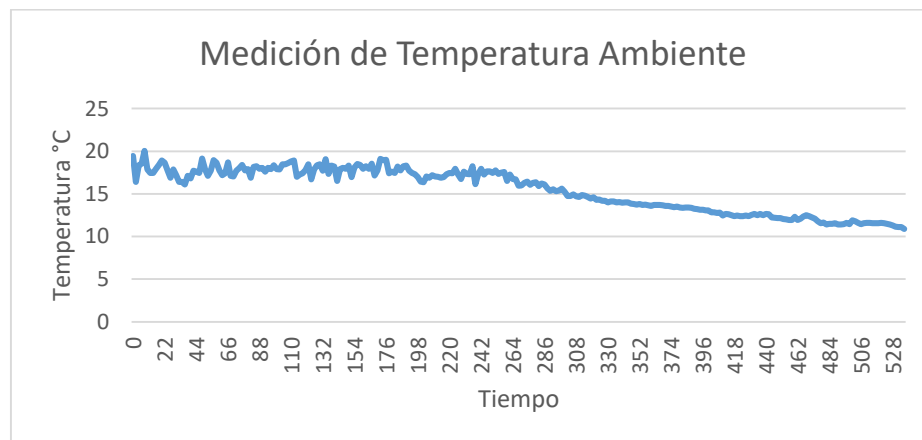


Fuente: Autores

Para la realización las pruebas de rendimiento del sistema una vez se llevaron a cabo las reparaciones se empleó un Multímetro DO 9847 multifunción y un anemómetro perteneciente a la Institución Antonio Nariño.

Para la realización de las pruebas se emplearon tomas de datos cada 2 minutos en un total de 536 muestras, lo que da como resultado 712 minutos en tiempo de prueba, lo que da aproximadamente 11 horas con 51 minutos. En la Figura 35 se logra observa en comportamiento de la medición del viento, el cual tuvo una velocidad máxima de 10.98 m/s y valores mínimos cercanos a cero de 0.06 m/s; al tener en cuenta el total de los datos la velocidad promedio fue de 3.1499 m/s.

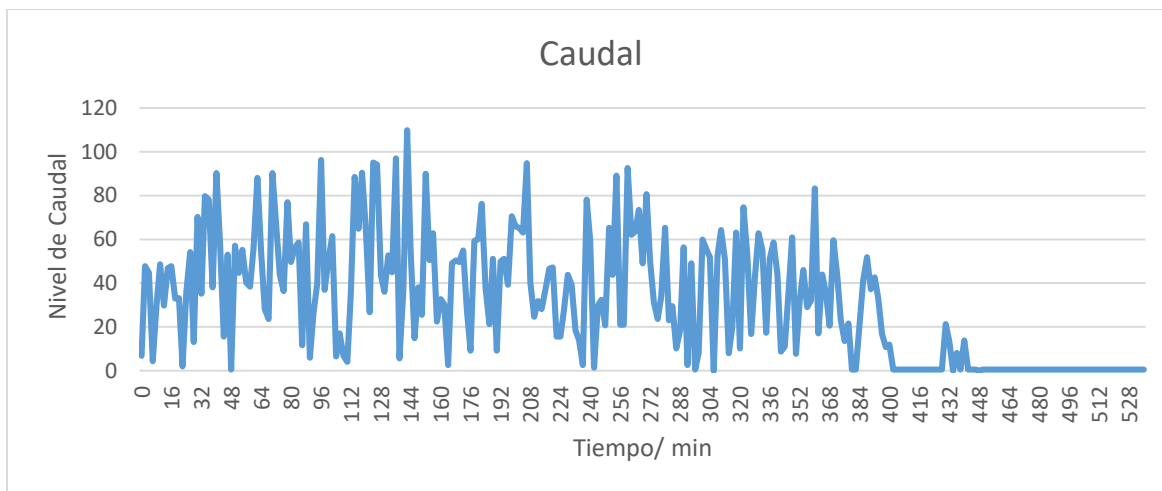
*Figura 36. Medición de Temperatura Ambiente*



Fuente: Autor

Al aprovechar las posibilidades con las que cuenta el dispositivo de medición, se pudo tomar de igual forma el dato de la temperatura ambiental durante el desarrollo de la prueba. La Figura 36 se muestra la medición de temperatura, en este proceso se pudo establecer que la temperatura máxima fue de 20.05 °C, la temperatura mínima fue de 10.9 °C y la temperatura promedio se estableció en un valor de 15.438 °C.

Figura 37. Medición de Caudal



Fuente: Autores

Al medir el caudal se pudo establecer un valor máximo de  $109.9 m^3/s$ , un valor mínimo de  $0.6 m^3/s$ , y un valor promedio de  $31.672 m^3/s$ , como se muestra en la Figura 37.

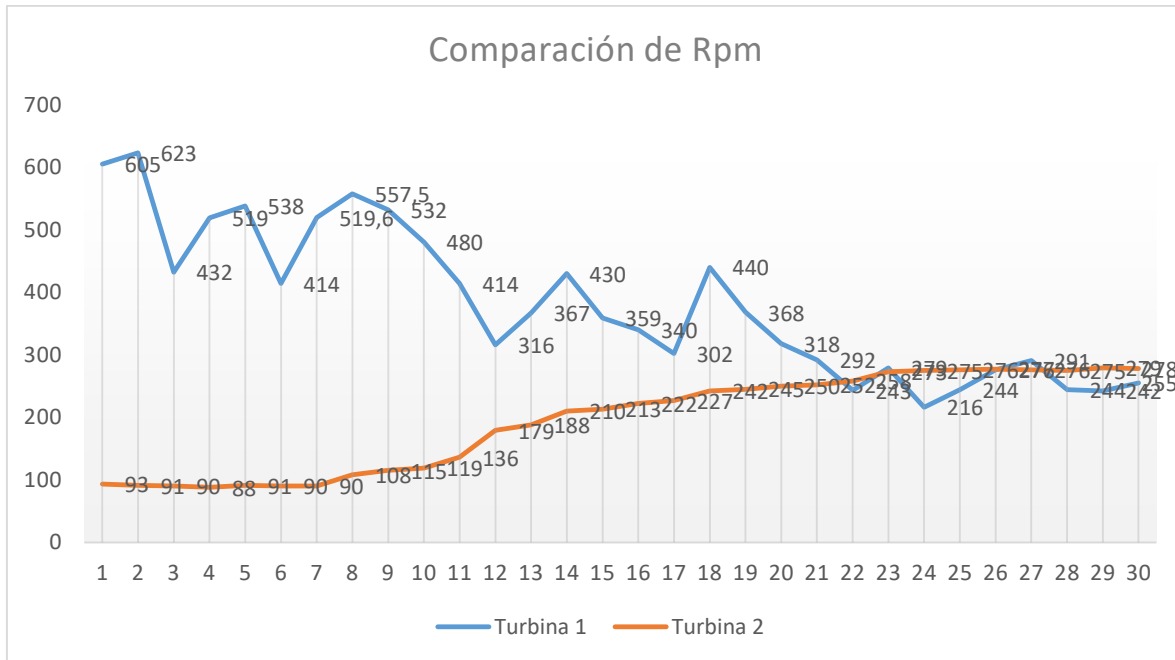
#### 4.1.2. Comparativa de Rendimiento del Sistema

Para lograr identificar el rendimiento del sistema de turbinas una vez restaurado su funcionamiento se tomó el resultado de la prueba de velocidad de la Figura 35 y se comparó con el rendimiento mostrado por el trabajo realizado por Gómez & Cárdenas (2019), esto a partir de la Figura 38.

Al tener en cuenta los valores de rendimiento del sistema restaurado (turbina 2 – Naranja), al compararlo con el sistema de diseño inicial del proyecto realizado por Gómez & Cárdenas (2019) (turbina 1 - azul), se puede establecer que, a partir de la Figura 38 que la turbina 1, presentó mayor velocidad en rpm con un valor máximo de 623 rpm, mientras que para la turbina 2 tuvo un valor máximo de 279 rpm. Lo que permite inferir que la turbina 1, presentó un nivel más alto de rpm. Esto de igual puede deberse no solo a las modificaciones del diseño,

sino que a su vez, depende de las condiciones ambientales o en este caso, la velocidad del viento en el momento de la pruebas, como se muestra en la Figura 38.

Figura 38. Comparativa de Velocidad en Rpm



Fuente: Fuente

## 4.2. Pruebas de Análisis Estructural de los Aerogeneradores Verticales

### 4.2.1. Análisis de Estructura Soporte de las Turbinas

Con el fin de evidenciar las capacidades de la estructura base, una vez reparada, se sometió el soporte estructural pruebas de stress o análisis de esfuerzo, a partir de programa Autodesk Inventor. Al tomar como base los planos realizados esto se logró a partir de análisis físico inicial, de manera que el material de la base está compuesto de acero y carbono, la densidad estructural de  $7.85 \text{ g/cm}^3$ , cuenta con una masa de  $50.852 \text{ kg}$ , un área total de  $3367930 \text{ mm}^2$  y un volumen de  $6477960 \text{ mm}^3$ . Al tener en cuenta los puntos de centro de



gravedad se cuenta con los siguientes valores por eje:  $x = 433.502 \text{ mm}$ ;  $y = 0.416945 \text{ mm}$  y  $z = 8.8134 \text{ mm}$ . Esta información se presenta en la Tabla 5.

Tabla 5. Análisis Físico

Identificación de Parámetros Físicos	
Material	Acero y carbono
Densidad	$7.85 \text{ g/cm}^3$
Masa	$50.852 \text{ kg}$
Área	$3367930 \text{ mm}^2$
Volumen	$6477960 \text{ mm}^3$
Centro de Gravedad	$x = 433.502 \text{ mm}$ $y = 0.416945 \text{ mm}$ $z = 8.8134 \text{ mm}$

Fuente: Autores

Tabla 6. Configuración del estudio

Configuración del Tipo de Estudio	
Objetivo de Diseño	Punto único
Tipo de estudio	Análisis estático
Detecte y elimine los modos de cuerpo rígido	No

Fuente: Autores

Al tener en cuenta la Tabla 6 como parte de proceso de configuración de simulación para el estudio de stress fue de punto único, bajo un análisis estático y el no eliminar la detección y eliminación de los modos de cuerpo rígido.

Tabla 7. Ajustes de Malla

Ajustes de Malla	
Tamaño medio del elemento (fracción del diámetro del modelo)	0.1
Tamaño mínimo del elemento (fracción del tamaño medio)	0.2
Factor de gradiente	1.5
Máximo ángulo de giro	60

Fuente: Autores

Por la parte de configuración de los ajustes de malla o cuadrícula para el proceso de simulación, el tamaño medio de elemento con una fracción de 0.1; un tamaño mínimo por 0.2, con un factor de gradiente de 1.5 y un máximo ángulo de giro de 60, como se observa en la Tabla 7.

*Tabla 8 Resumen de Materiales*

Resumen de Materiales		
Nombre	Acero y Carbono	
General	Densidad de Masa	7.85 g/cm <sup>3</sup>
	Límite Elástico	350 MPa
	Máxima resistencia a la tracción	420 MPa
Stress	Módulo de Young	200 GPa
	Relación de Poisson	0.29 ul
	Módulo de cizallamiento	77.5194 GPa
Nombre de las partes	Chasis ipt	

Fuente: Autores

En la Tabla 8 se presenta un resumen de los materiales empleados para el proceso de simulación, con un límite elástico 350 MPa; máxima resistencia a la tracción 420 MPa; módulo de Young de 200 GPa; módulo de cizallamiento 77.5194 GPa.

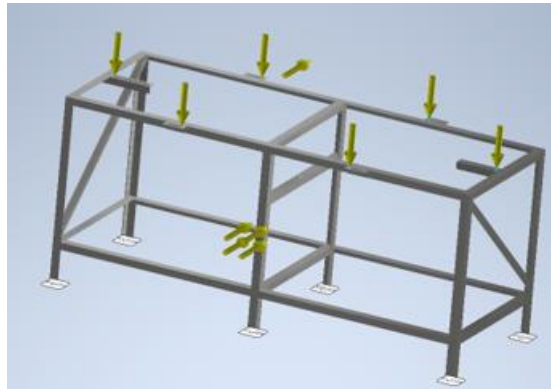
*Tabla 9. Condiciones de operación de Fuerzas*

Tipo de Carga	Fuerza
Magnitud	242,300 N
Vector X	242,300 N
Vector Y	0,000 N
Vector Z	0,000 N

Fuente: Autor

En la Tabla 9 se presentan las condiciones de la operación de fuerzas por tipo de carga con magnitud de aplicada sobre el eje x = 242,300 N.

*Figura 39. Primera Prueba de Fuerzas*



Fuente: Autores

En la Figura 39 se presentan las fuerzas a aplicadas en cada punto para el proceso de simulación y análisis de fuerzas.

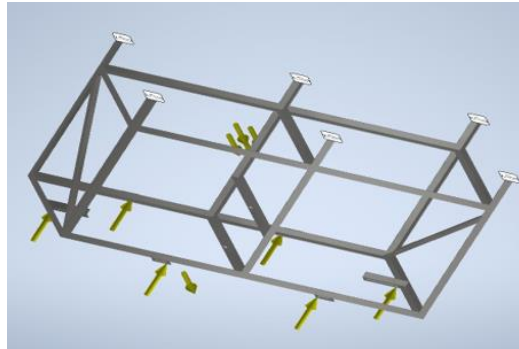
*Tabla 10. Segunda Prueba de Fuerzas*

Tipo de Carga	Fuerza
Magnitud	159,900 N
Vector X	159,900 N
Vector Y	0,000 N
Vector Z	0,000 N

Fuente: Autores

Al tener en cuenta la aplicación de fuerzas, se realizó una segunda prueba en la que se varió el vector x con un valor de 159,900 N. Como se puede observar en la Tabla 10.

*Figura 40. Segunda Prueba de Fuerza*



Fuente: Autores

Como se puede observar en la

Figura 40 se presenta la estructura que soporta los aerogeneradores de eje vertical y las fuerzas aplicadas en cada punto.

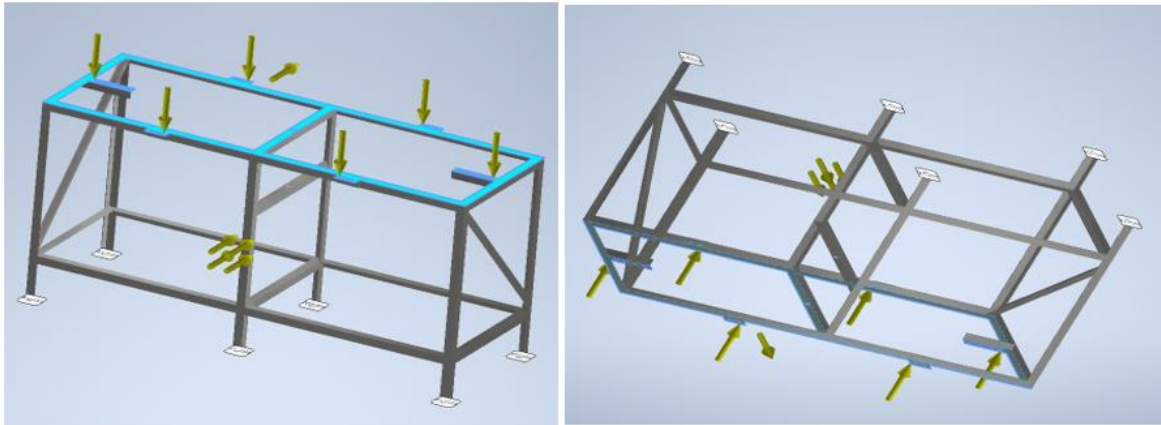
*Tabla 11. Fuerzas Remotas 1*

Tipo de Carga	Fuerza Remota
Magnitud	70,000 N
Vector X	0,000 N
Vector Y	70,000 N
Vector Z	0,000 N
Punto Remoto X	-350,000 mm
Punto Remoto Y	0,000 mm
Punto Remoto Z	0,000 mm

Fuente: Autor

Al tomar como base la información de la Tabla 11 se presentan las cargas que se estipularon para el análisis de fuerzas remotas. La magnitud asignada fue de 70.000 N, Vector  $x=0$  N; Vector  $y=70.000$ ; vector  $z=0$ ; punto remoto  $x$  con un valor de -350.000 N; y los puntos remotos  $Y$  y  $Z$  con valor de 0 N.

Figura 41. Resultado de Fuerzas Remotas



Fuente: Autores

En la Figura 41 se presenta el diagrama de simulación de sistema de fuerzas remotas aplicadas a la base que soporta la estructura de las turbinas de los aerogeneradores de eje vertical.

Tabla 12. Resultado de Fuerza de Reacción y Restricciones de Movimiento

Nombre de las Restricciones	Fuerza de Reacción	Componente (x,y,z)	Reacción de Momento	Componente (x,y,z)
	Magnitud		Magnitud	
Restricciones fijas	13448 N	-402,2 N	7662,84 Nm	0 Nm
		-13442 N		0 Nm
		0 N		7662,84 Nm

Fuente: Autores

Como parte de los resultados generados por el software de simulación, en la Tabla 12 se presentan las magnitudes empleadas para las fuerzas de restricción con una fuerza de reacción con una magnitud de 13448 N, de manera que por componentes se expresa como  $x = -402.2$  N, para  $y = -13442$  N y  $Z = 0$  N. Por otro lado, la magnitud de Reacción de Momento fue de 7662.84 N sobre el eje Z.

Tabla 13. Resumen de Resultados de las Pruebas de Stress

Nombre	Mínimo	Máximo
--------	--------	--------

Volumen	6477960 mm <sup>3</sup>	
Masa	50,852 kg	
Stress de von Mises	0,00722625 Mpa	275,793 Mpa
1er stress principal	80,0609 Mpa	292,538 Mpa
3er stress principal	287,419 Mpa	408,253 Mpa
Displacement	0 mm	5,60497 mm
Factor de Seguridad	1,43571 ul	15 ul
Stress XX	- 280,486 Mpa	289,242 Mpa
Stress XY	-83,7273 Mpa	62,2402 Mpa
Stress XZ	-45,3242 Mpa	44,9519 Mpa
Stress YY	-268,202 Mpa	249,841 Mpa
Stress YZ	-78,8886 Mpa	110,806 Mpa
Stress ZZ	-250,23 Mpa	176,641 Mpa
Desplazamiento X	-1,00387 mm	1,35158 mm
Desplazamiento Y	-0,000202499 mm	5,59662 mm
Desplazamiento Z	- 0,657919 mm	0,5296 mm
Cepa Equivalente	0,0000000352521 ul	0,00122912 ul
1er cepa principal	-0,00000259928 ul	0,0014137 ul
3er cepa principal	-0,0013642 ul	0,000000534417 ul
Stress XX	-0,00135507 ul	0,00139245 ul
Stress XY	-0,000540041 ul	0,000401449 ul
Stress XZ	-0,000292341 ul	0,00028994 ul
Stress YY	-0,00125059 ul	0,001211218 ul
Stress YZ	-0,000508832 ul	0,0007147 ul
Stress ZZ	-0,00107771 ul	0,000798783 ul

Fuente: Autores

En la Tabla 13 se presentan los resultados de las pruebas de Stress o Esfuerzo sobre la estructura base de las turbinas eólicas de giro vertical, de forma que se detalla el volumen de 6477960 mm<sup>3</sup>, con masa de 50,852 kg. Al tener en el stress de von Mises el valor mínimo obtenido fue de 0,00722625 Mpa y valor máximo 275,793 Mpa; el valor obtenido de primer stress fue en un mínimo de 80.0609 Mpa y un máximo de 292.538 Mpa; como prueba de 3er stress el valor mínimo fue de 287.419 Mpa y valor máximo de 408.253 Mpa; como parte de

los procesos de simulación se estableció un prueba de desplazamiento, de forma que se logró establecer que el desplazamiento mínimo obtenido fue de 0 mm y como desplazamiento máximo 5.60497 mm. Como otro valor a destacar se presenta el valor de seguridad, el cual se estableció en su resultado mínimo fue de 1,43571 ul y su valor máximo de 15 ul.

*Tabla 14. Información de Configuración*

Información de Configuración		
Material		Acero
Módulo de elasticidad	E	206000 MPa
Módulo de rigidez	G	80000 MPa
Densidad	$\rho$	7860 Kg/m <sup>3</sup>

Fuente: Autores

En la Tabla 14 se presentan las propiedades de configuración del sistema como el tipo de material (Acero), la densidad (7860 Kg/m<sup>3</sup>), el nivel de elasticidad (206000 MPa) y rigidez (80000 MPa).

*Tabla 15. Propiedades del Cálculo*

Propiedades del Cálculo			
Incluir			
Sí	Densidad	$\rho$	7860 kg/m <sup>3</sup>
Si	Relación de desplazamiento	$\beta$	1.188 ul
	Número de divisiones		1000 ul
	Modo de reducción del estrés		HMH

Fuente: Autores

A partir de la Tabla 15 se presentan en forma resumida las propiedades incluidas para el desarrollo de los procesos de simulación, como parte de los cálculos se observan los las variables densidad  $\rho$  igual a 7860 Kg/m<sup>3</sup>, relación de desplazamiento  $\beta$  con un valor de 1.188 ul, con una cantidad de divisiones de 1000 ul. Finalmente se relaciona en modo de reducción de estrés en configuración HMH.

Tabla 16. Configuración de Cargas

Configuración de Cargas												
Índice	Ubicación	Fuerza radial				Fuerza Atrial	Par Motor	Deflexión				Ángulo de deflexión
		Y	X	Tamaño	Dirección			Y	X	Tamaño	Dirección	
1	0 mm	100,000 N		100,000 N		100,000 N		9,574 micras		9,574 micras		0,03 grados
2	90 mm							-29,212 micras		29,212 micras	180,00 grados	0,02 grados
3	90 mm						-4,600 Nm	-29,212 micras		29,212 micras	180,00 grados	0,02 grados
4	120 mm						-3,000 Nm	-34,827 micras		34,827 micras	180,00 grados	0,01 grados
5	120 mm	100,000 N		100,000 N				-34,827 micras		34,827 micras	180,00 grados	0,01 grados
6	370 mm						-7,600 Nm	38,839 micras		38,839 micras		0,02 grados

Fuente: Autores

En la Tabla 16 presenta la configuración de cargas empleada, en todas se ubicaron 6 cargas, la fuerza radial, el par motor, la deflexión en los ejes X y Y, su tamaño en micras, la dirección y el ángulo de deflexión en cada posición.

Tabla 17. Fuerzas de Soporte

Índice	Fijo	Ubicación	Fuerza de Reacción				Deflexión				Ángulo de deflexión
			Y	X	Tamaño	Fuerza Axial	Y	X	Tamaño	Dirección	
1	Fijo	20 mm	135,336 N		135,336 N	100,000 N	0 micras		0 micras	180,00 grados	0,03 grados
2	Gratis	270 mm	72,658 N		72,658 N		0 micras		0 micras	180,00 grados	0,02 grados

Fuente: Autores



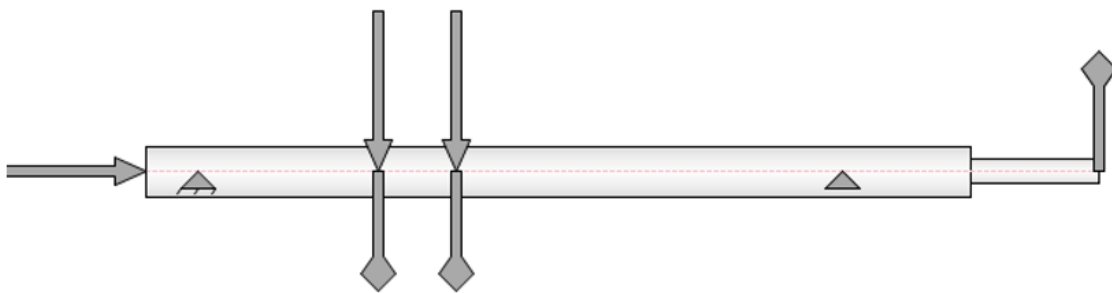
De igual forma, se establecieron las fuerzas de soporte como se muestra en la Figura 22. Como parte del conjunto de fuerzas de soporte están las de tipo fijo en una ubicación de 20 mm, con fuerza de reacción 135.336 N en el eje Y, fuerza axial de 100 N, dirección de 180° y en un ángulo de deflexión de 0.3°. Además, se estableció una fuerza en ubicación de 270 mm, con una fuerza de reacción en el eje X de 72.658 N, en dirección de 180 grados y un ángulo de deflexión de 0.02 grados.

Tabla 18. Resultados Finales

Resultados Finales		
Largura	L	370.000 mm
Masa	Masa	0.815 kg
Tensión de flexión máxima	$ \sigma_B $	13.190 MPa
Esfuerzo cortante máximo	$T_s$	0.429 MPa
Tensión torsional máxima	$\tau$	53.095 MPa
Tensión máxima	$ \sigma_T $	0.318 MPa
Estrés máximo reducido	$ \sigma_{Rojo} $	91.964 MPa
Deflexión máxima	$f_{max}$	38.839 micras
Ángulo de torsión	$\Phi$	-0.50 grados

Fuente: Autores

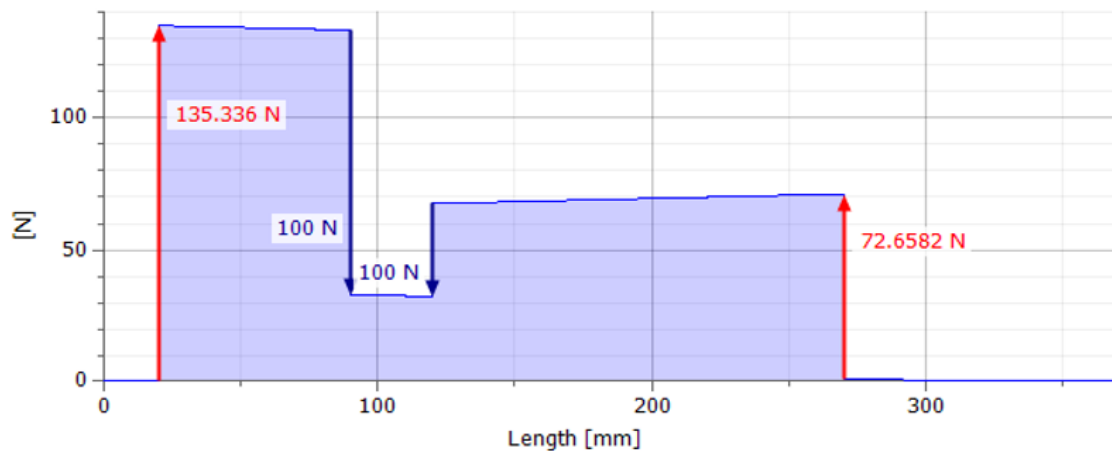
Figura 42. Vista previa de proceso de las pruebas de velocidad



Fuente: Autores

La Figura 42 presenta un diagrama de fuerzas que como vista previa para las pruebas de velocidad con el instrumento El tacómetro digital TES Prova RM-1501.

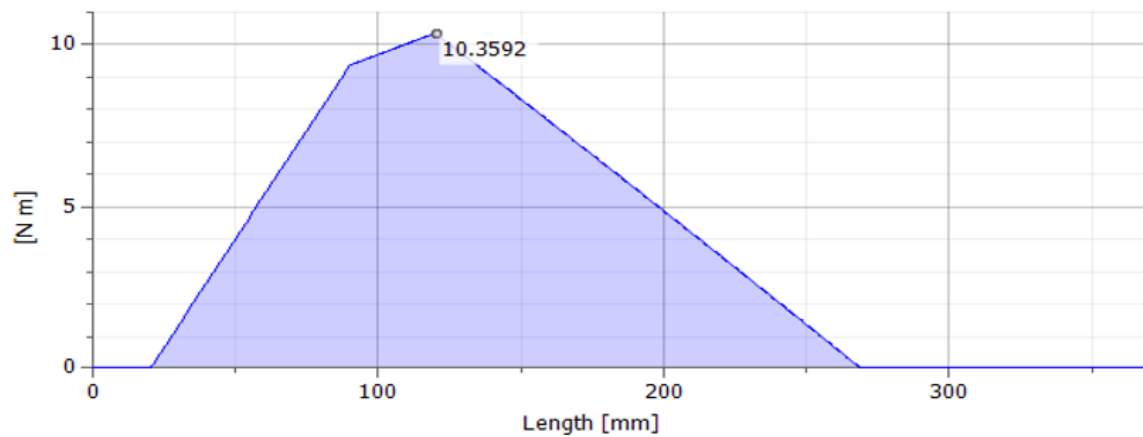
Figura 43. Fuerza de Cizallamiento



Fuente: Autores

En la Figura 43 se observan las fuerzas de cizallamiento aplicadas o medidas en el eje Y con una magnitud de 135.336 N, aproximadamente a una distancia de 20 mm en el eje X. Además, se midió una fuerza de 72.6582 N a una distancia de 270 mm; con una fuerza axial de 100 N.

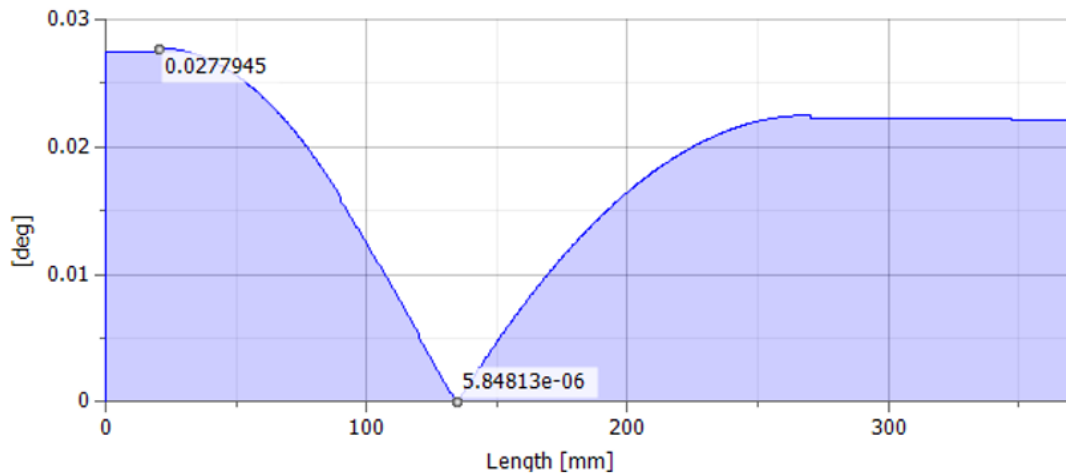
Figura 44. Momento de Flexión



Fuente: Autores

Al tener en cuenta el momento de flexión, la Figura 44 en un punto máximo en 10.3592 Nm en 124 mm aproximadamente.

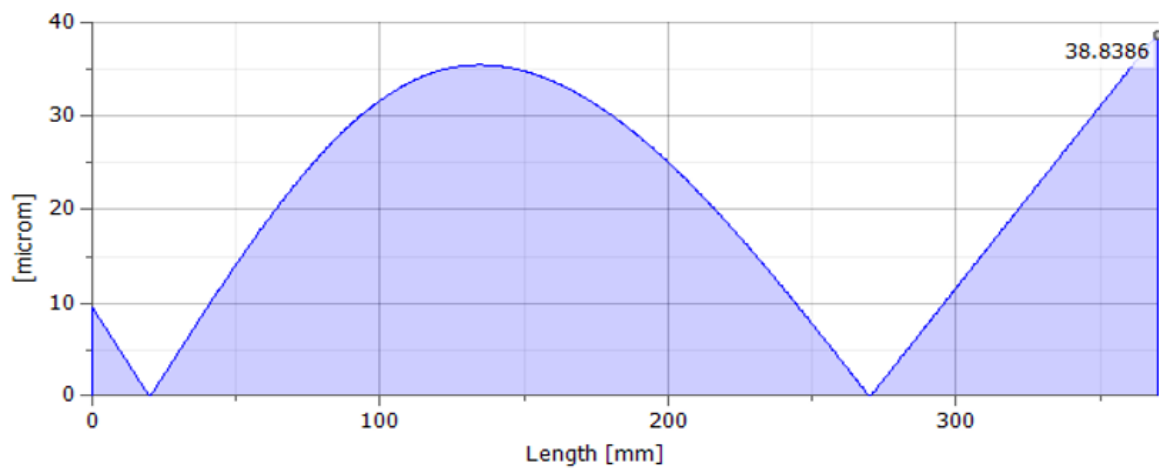
Figura 45. Ángulo de Deflexión



Fuente: Autores

Como parte de los resultados obtenidos, se puede establecer un valor de ángulo de deflexión de 0.0277945 en 20 mm, y otro punto medido tuvo un valor de  $5.84813 e^{-06}$  aproximadamente a los 124 mm como se muestra en la Figura 45.

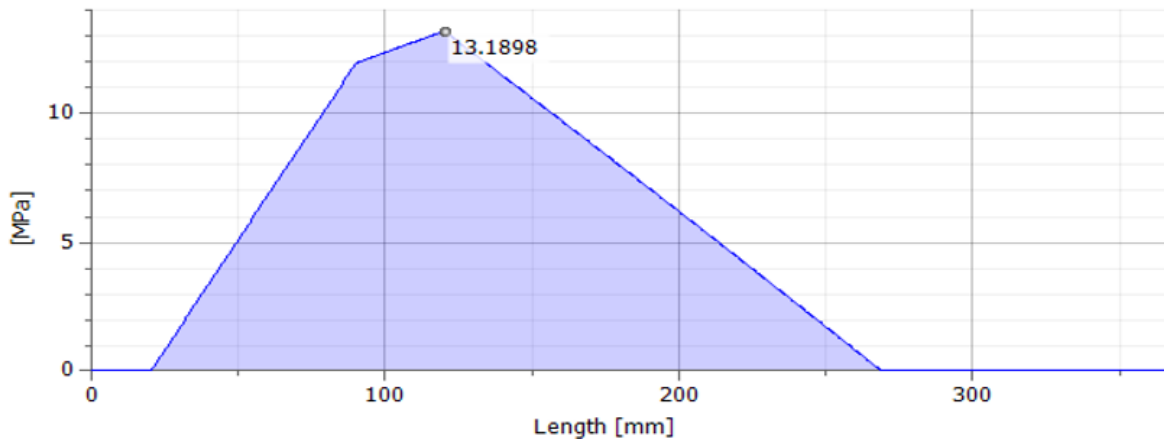
Figura 46 Deflexión



Fuente: Autores

En la Figura 46 se muestra el punto de deflexión obtenido con un valor de 38.8386 micras.

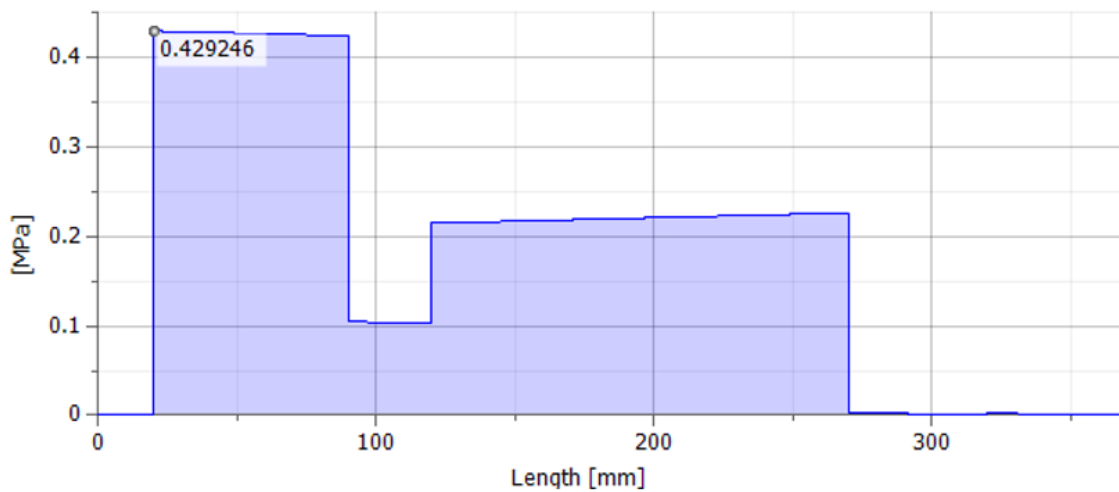
*Figura 47. Tensión de Deflexión*



Fuente: Autores

El tomar como base la tensión de deflexión se puede observar en la Figura 47 que el inicio de la tensión de deflexión se da a partir de los 20 mm y asciende hasta un valor máximo de 13.1898 MPa a una distancia de 124 mm.

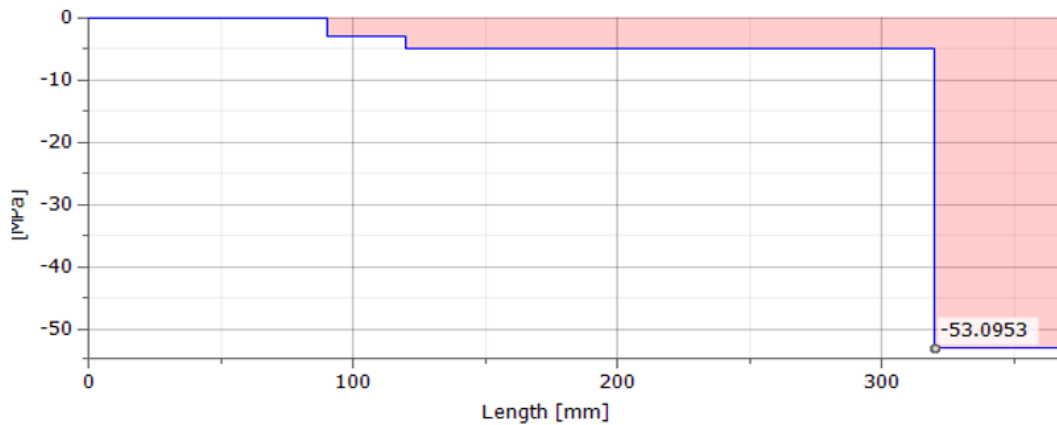
*Figura 48. Esfuerzo Cortante*



Fuente: Autores

Al tener en cuenta la medición de esfuerzo cortante, en la Figura 48 se puede establecer que a los 20 mm se logró un valor de 0.429246 MPa, con un descenso en este valor de forma ligera hasta llegar a 0.75 mm a un valor de 0.425 MPa, a partir de este punto desciende a un valor de 0.11 MPa y se desplaza sobre este valor hasta una distancia de 124 mm; a partir de este punto la gráfica aumenta hacia un valor aproximado de 0.223 MPa y continúa su ascenso hasta un valor aproximado de 0.245 MPa a los 270 mm.

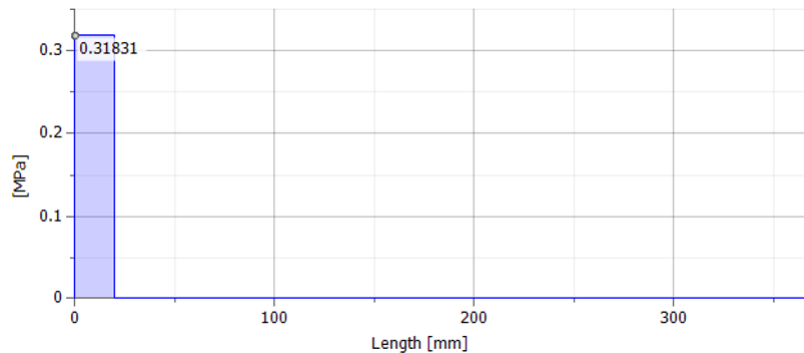
Figura 49. Esfuerzos de Tensión (75 mm)



Fuente: Autores

A partir de la Figura 49 se representa el resultado de los esfuerzos de tensión, a partir de los 75 mm se presenta un valor de -0.25 MPa, se mantiene en este valor hasta una distancia de 124 mm y sube a -0.5 MPa, a partir de este punto se mantiene de forma constante hasta los 270 mm y el valor cambia hacia los -53.0953 MPa.

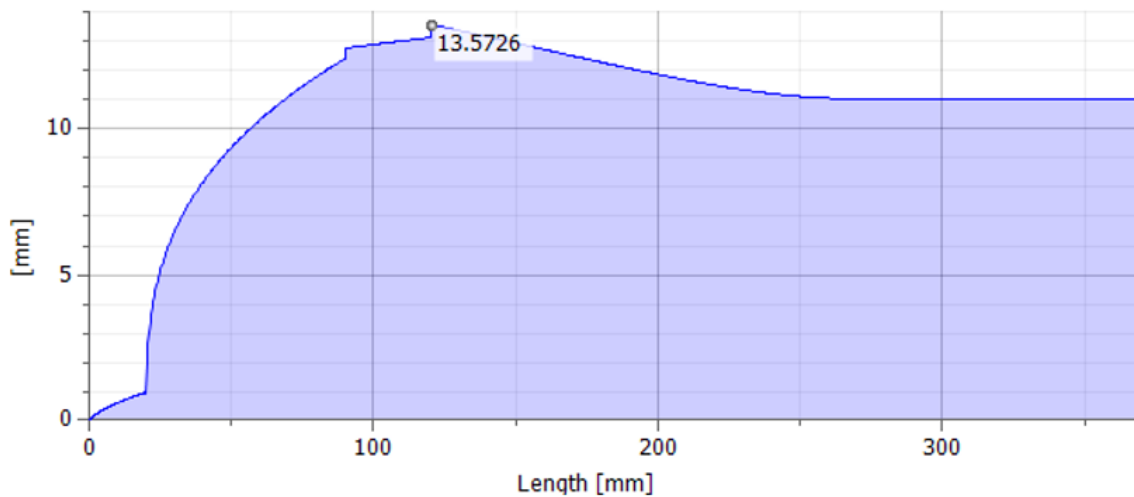
Figura 50. Esfuerzos de Tensión (0 mm)



Fuente: Autores

El medir los esfuerzos de tensión (ver Figura 50), el valor obtenido fue de 0.31831 MPa a partir del punto 0 mm hasta el punto 27 mm.

Figura 51. Diámetro Digital



Fuente: Autores

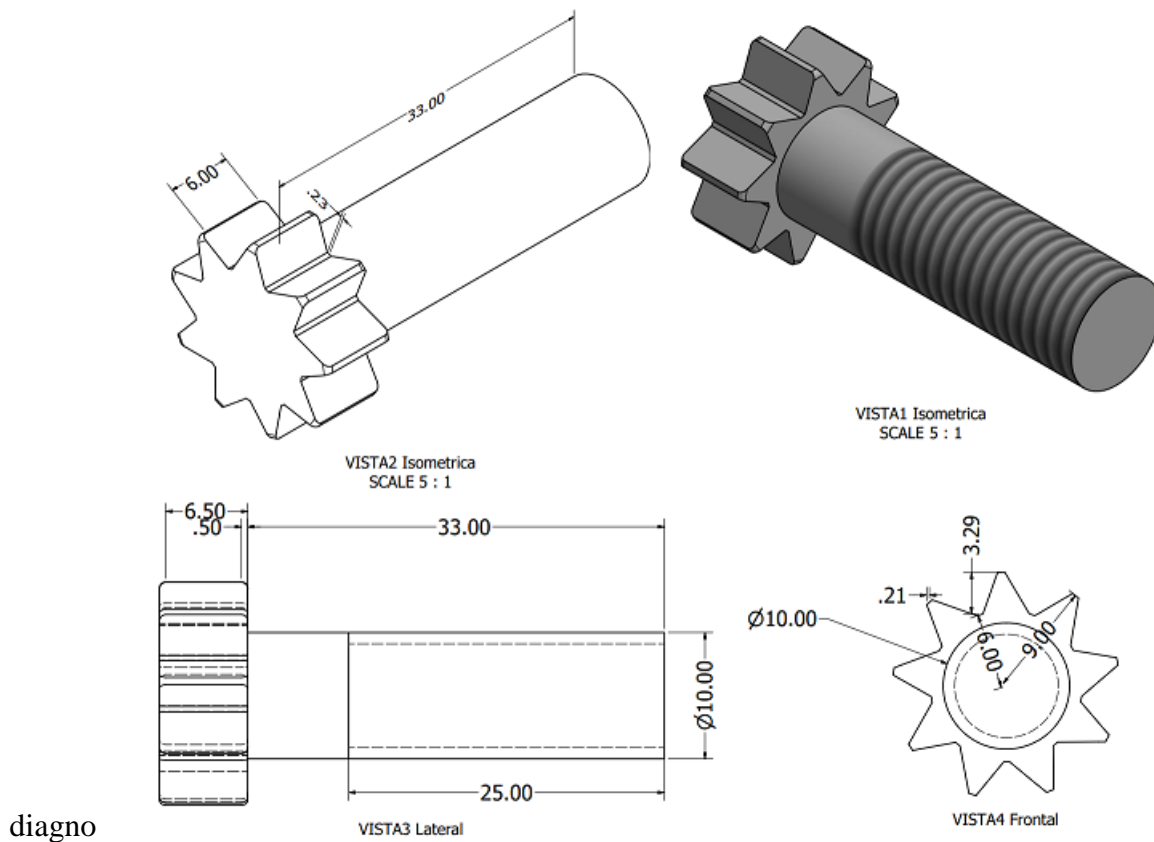
En la Figura 51 el resultado del diámetro digital que inicia a los 27 mm y se eleva en forma exponencial creciente hasta el punto 0.75 mm a unos 12.867 mm. Su punto máximo se presenta en el punto 13.5726 mm, he inicia un descenso hasta los 11 mm en el punto 270 mm en el eje X.

#### 4.2.2. Análisis de Eje Planetario

En esta sección se presentan los resultados de la pieza denominada Eje Planetario con distintas pruebas desarrolladas con el programa de simulación Autodesk

### Información Básica

*Figura 52. Material Eje Planetario*



Fuente: Autores

En la Figura 52 se presenta la vista de diseño de la pieza Eje Planetario, con la vista isométrica con medidas (superior izquierda), vistas lateral (izquierda inferior) y frontal (inferior derecha)

### Análisis Estático

*Tabla 19. Material del Eje Planetario*

Material del Eje Planetario		
Nombre	Acero, Carbono	
General	Densidad	7,85 g/cm <sup>3</sup>

	Límite elástico	350 MPa
	Máxima resistencia a la tracción	420 MPa
Estrés	Módulo de Young	200 GPa
	Proporción de Poisson	0,29 UL
	Módulo de corte	77.5194 GPa
Nombre(s) de pieza	Eje conector. Eje-Planetario	

Fuente: Autores

En la Tabla 19 se presentan las características del eje planetario, el cual está fabricado en acero y carbón, con una densidad de  $7,85 \text{ g/cm}^3$ , límite elástico de 350 MPa, máxima resistencia a la tracción de 420 MPa. Como parte de las fuerzas de estrés se muestra que el módulo de Young tuvo un valor de 200 GPa, proporción de Poisson de 0,29 uL y módulo de corte de 77.5194 GPa.

Condiciones de Funcionamiento

*Tabla 20 Momento 1*

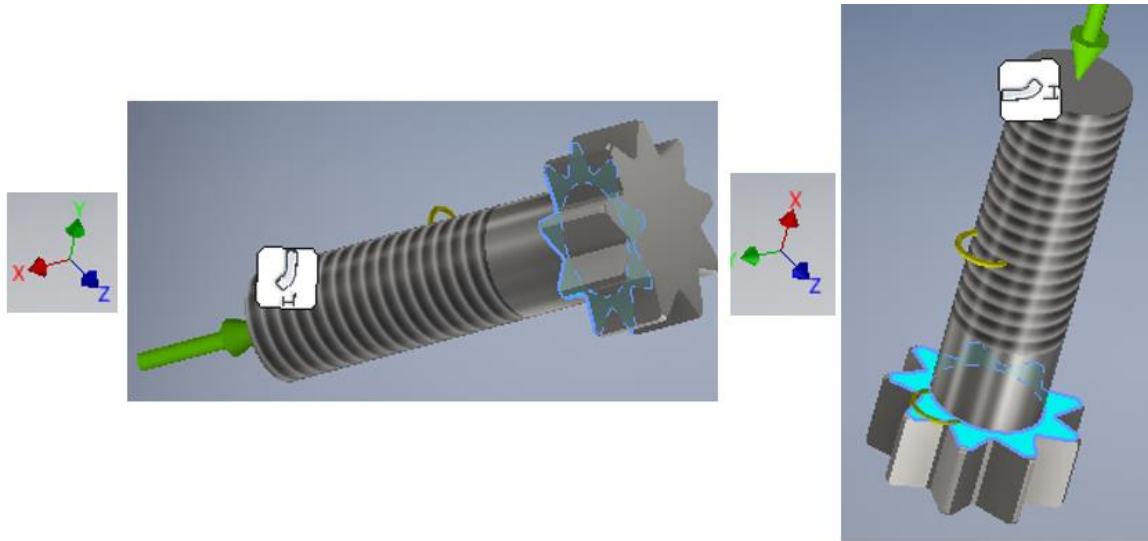
Momento 1	
Tipo de carga	Momento
Magnitud	7.600 N mm
Vector X	-7.600 N mm
Vector Y	0,000 N mm
Vector Z	0,000 N mm

Fuente: Autores

Como parte de las características de funcionamiento, en proceso de simulación se establecieron las propiedades de carga de momento 1, con una magnitud de 7.600 N mm, Vector X de -7.600 N mm, y los vectores Y y Z con valor de 0 N mm.

*Figura 53. Cara Seleccionada para Simulación (Momento 1)*





Fuente: Autores

Para la aplicación de las fuerzas de magnitud se seleccionó una cara para el momento1, como se muestra en la Figura 53.

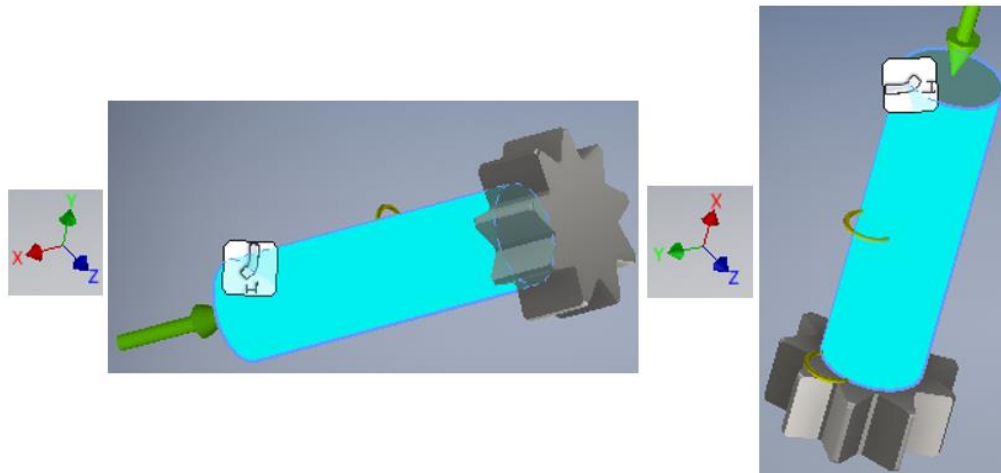
Tabla 21. Momento 2

Parámetros Momento 2	
Tipo de carga	Momento
Magnitud	7.600 N mm
Vector X	-7.600 N mm
Vector Y	0.000 N mm
Vector Z	0.000 N mm

Fuente: Autores

En la Tabla 21 se observan los parámetros para la simulación de momento 2, con una magnitud de 7.600 N mm, fuerza que se aplicó sobre el eje X. Adicionalmente, en la Figura 54 se muestran los puntos en los que se realizó el punto de presión sobre el eje planetario en eje X, como lo muestra la flecha de color verde, y de igual forma, la posición de los ejes (x,y,z).

Figura 54 Cara Seleccionada para Simulación (Momento 2)



Fuente: Autores

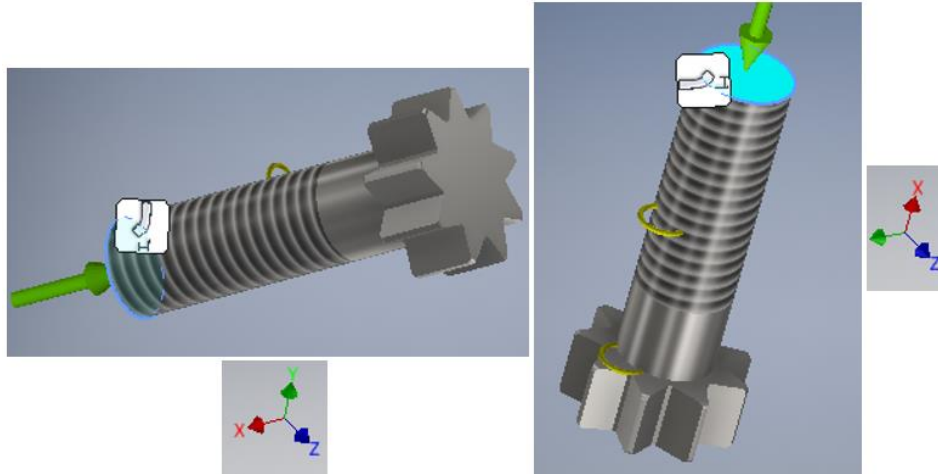
Tabla 22. Fuerza Remota 1

Propiedades de Fuerza Remota 1	
Tipo de carga	Fuerza remota
Magnitud	2,000 N
Vector X	-2.000 N
Vector Y	0,000 N
Vector Z	0,000 N
Punto remoto X	0,000 mm
Punto remoto Y	0,000 mm
Punto remoto Z	0,000 mm

Fuente: Autores

Al tener en cuenta la fuerza remota 1 que se ve en la Tabla 22.esta permite evidenciar el tipo de carga y fuerza remota aplicada, la magnitud fue de 2.000 N, sobre el vector X se ve una fuerza de  $-2.000$ , como fuerzas principales, debido a que sobre los vectores Y y Z con magnitudes de 0 N. DE igual forma los puntos remotos de los ejes X,Y y Z de 0 mm.

Figura 55. Cara Seleccionadas Fuerza Remota 1



Fuentes: Autores

En la Figura 55 se muestra la cara seleccionada para la aplicación de la fuerza remota 1 y el eje X como fuerza aplicada con una flecha en color verde.

Tabla 23. Fuerza Remota 2

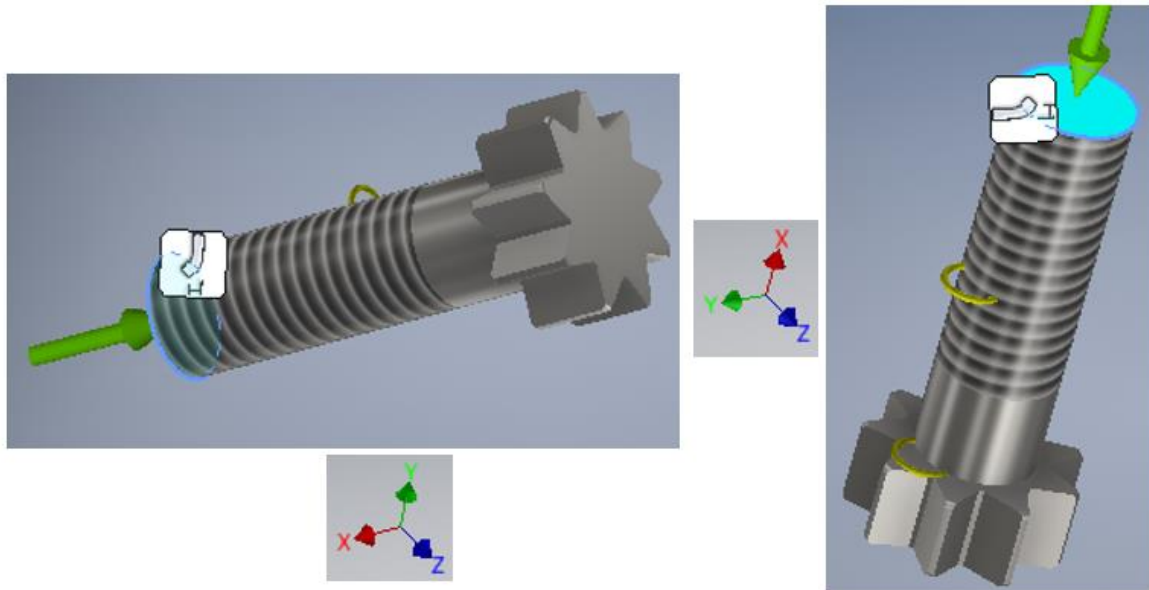
Propiedades de Fuerza Remota 2	
Tipo de carga	Fuerza remota
Magnitud	1,500 N
Vector X	-1.500 N
Vector Y	0,000 N
Vector Z	0,000 N
Punto remoto X	40,000 mm
Punto remoto Y	0,000 mm
Punto remoto Z	0,000 mm

Fuente: Autores

Para la simulación de la fuerza remota 2 con una fuerza con una magnitud de 1.500 N y magnitud sobre el vector X con fuerza de -1.500. Adicionalmente, sobre el eje X, con una magnitud de punto remoto x de 40.000 mm y punto remoto X y Y con magnitud de 0 mm. Por otro lado, en la

Figura 56 se representan los resultados de procesos de simulación con la fuerza aplicada sobre el eje X, y representado con la flecha verde y el área de aplicación representado en color azul celeste.

Figura 56. Caras Seleccionadas para Fuerza Remota 2



Fuente: Autores

Resultados de Pruebas sobre el Eje Planetario

Tabla 24. Fuerza de Restricción y Momento sobre Restricciones

Nombre de restricción	Fuerza de reacción		Momento de reacción	
	Magnitud	Componente (X, Y, Z)	Magnitud	Componente (X, Y, Z)
Restricción fija:1	3,49946 N	3,49946 N	0,0152402 N m	0,0152402 N m
		0 N		0 N m
		0 N		0 N m

Fuente: Autores

En la Tabla 24 se muestran los resultados de la aplicación de las fuerzas de restricción y el momento sobre restricciones, de manera que el valor de la restricción fija con una magnitud de 3.49946 N sobre el componente del eje X con la misma magnitud. Al tener en cuenta el momento de reacción con una magnitud de 0.0152402 N m sobre la componente del eje X.

Tabla 25. Resumen de Resultados

Nombre	Mínimo	Máximo
Volumen	3779,48 mm <sup>3</sup>	
Masa	0,0296689 kg	

Estrés de Von Mises	0,0000489135 MPa	0,373489 MPa
1er Estrés Principal	-0,0366448 MPa	0,371756 MPa
3° Estrés Principal	-0,0953921 MPa	0,00202593 MPa
Desplazamiento	0 mm	0,0000491282 mm
Factor de seguridad	15 ul	15 ul
Estrés XX	-0,0860896 MPa	0,192796 MPa
Estrés XY	-0,180929 MPa	0,171835 MPa
Estrés XZ	-0,151951 MPa	0,133925 MPa
Estrés YY	-0,0902964 MPa	0,187811 MPa
Estrés YZ	-0,100185 MPa	0,0862761 MPa
Estrés ZZ	-0,0751403 MPa	0,154025 MPa
X Desplazamiento	-0,00000238036 mm	0 mm
Desplazamiento Y	-0,0000469274 mm	0,000048849 mm
Desplazamiento Z	-0,0000486621 mm	0,0000464034 mm
Cepa equivalente	0,00000000214375 UL	0,00000164807 UL
1ª Cepa Principal	-0,0000000196092 ul	0,00000185586 UL
3ª Cepa Principal	-0,000000820772 ul	-0,0000000000719998 UL
Cepa XX	-0,000000356773 ul	0,0000007357 UL
Cepa XY	-0,00000116699 UL	0,00000110834 UL
Cepa XZ	-0,000000980086 UL	0,000000863817 UL
Cepa YY	-0,000000528254 ul	0,00000066942 UL
Cepa YZ	-0,000000646192 ul	0,000000556481 UL
Cepa ZZ	-0,00000066368 ul	0,000000610427 UL

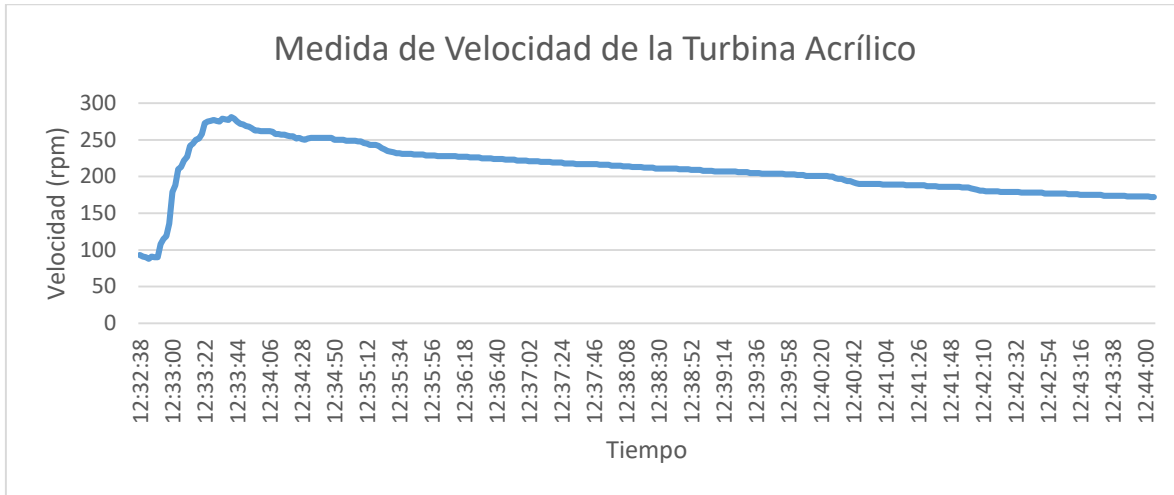
Fuente: Autores

En la Tabla 25 presenta un resumen de las fuerzas máximas y mínimas aplicadas sobre el eje conector o eje planetario

### 4.3. Pruebas de Velocidad de las Turbinas

#### 4.3.1. Medición de Turbina de Acrílico

Figura 57. Medición de Velocidad Turbina de Acrílico (rpm)



Fuente: Autores

Al tener en cuenta la Figura 57 se puede establecer que el punto de mayor velocidad fue de 281 rpm, con un punto mínimo de 88 rpm y una velocidad promedio de 209 rpm. De igual forma para lograr identificar los cálculos se emplearon los valores de revoluciones máximas con la ecuación 1.

$n$  = número de revoluciones por minuto

$T$  = Torque (Nm)

$P_w$  = Potencia (Watt)

$D_s$  = Diámetro (m)

$F_t$  = Fuerza Total (Nm)

Datos:

$$P_w = 400 \text{ w}$$

$$n = 281 \text{ rpm}$$

$$D_s = 0.06 \text{ m}$$

$$P_w = T \times \frac{\pi * n}{30} \quad (1)$$

Al despejar el torque (T) se obtuvo la ecuación 2

$$T = P_w \times \frac{30}{\pi * n} \quad (2)$$

Al reemplazar los valores se obtuvo la ecuación 3

$$T = 400 \text{ w} \times \frac{30}{\pi * 281 \text{ rpm}} \quad (3)$$

$$T = 400 \times \frac{30}{882.787536}$$

$$T = 400 \times 0.0334$$

$$T = 13.590 \text{ Nm}$$

Para determinar la fuerza total se empleó la ecuación 4

$$F_T = \frac{2T}{D_s} \quad (4)$$

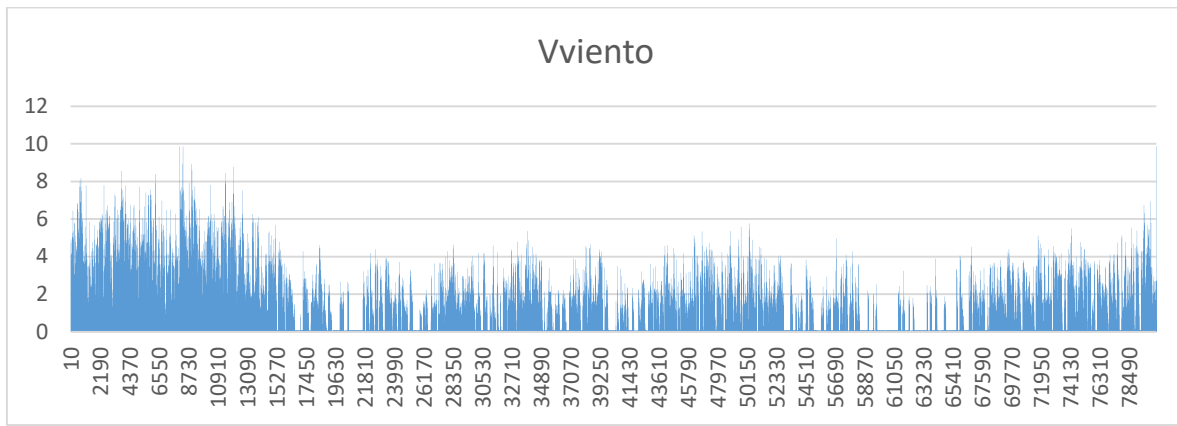
Al reemplazar el valor T y D<sub>s</sub>

$$F_T = \frac{2 * 13.590 Nm}{0.06 m}$$

$$F_T = \frac{27.180}{0.06}$$

$$F_T = 453.001 \text{ Newton}$$

Figura 58. Velocidad de la turbina (m/s)



Fuente: Autor

En la Figura 58 se logró establecer que la velocidad máxima generada por la turbina fue de 9.86 m/s, la velocidad mínima obtenida fue de 0.06 m/s, y con una velocidad promedio de 1.6122 m/s.

#### 4.3.2. Cálculos de velocidad en Rpm del Generador

A continuación, se presentan los cálculos desarrollados para establecer la velocidad del generador

$z_1 = \text{Número de dientes del piñón} - \text{turbina}$

$z_2 = \text{Número de dientes del piñón} - \text{eje central}$

$z_3 = \text{Número de dientes Corona}$



$z_4 =$  Número de dientes del piñón central

$i_1 =$  Relación tensión por cadena

$i_2 =$  Relación eje acoplador piñol epiciclodal

$n_1 =$  Velocidad de la turbina

$n_2 =$  Velocidad integrada al eje

$n_3 =$  Velocidad entregada al generador

$$i_1 = \frac{z_1}{z_2}$$

$$i_1 = \frac{28}{16} = 1.75$$

$$i_2 = \frac{z_3}{z_4}$$

$$i_2 = \frac{78}{26} = 3$$

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{z_1}{z_2}$$

$$n_2 = n_1(z_1/z_2) = n_1 (i_1)$$

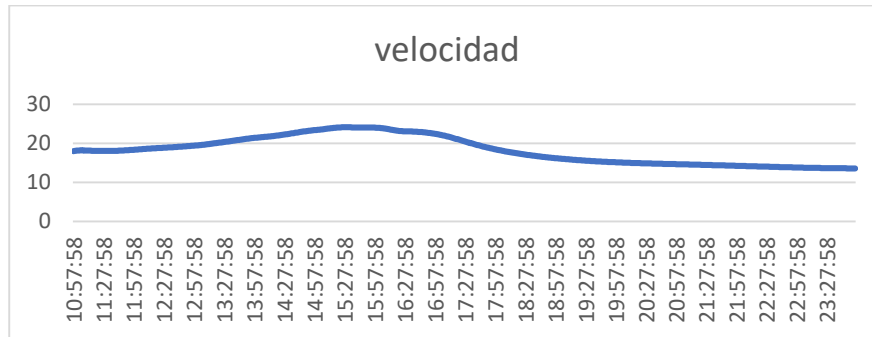
$$n_2 = 209(1.75) = 365.75 \text{ rpm}$$

$$n_3 = n_2(z_3/z_4) = n_2 (i_2)$$

$$n_2 = 365,75 (3) = 1097,25 \text{ rpm}$$

### 4.3.3. Medición de Velocidad

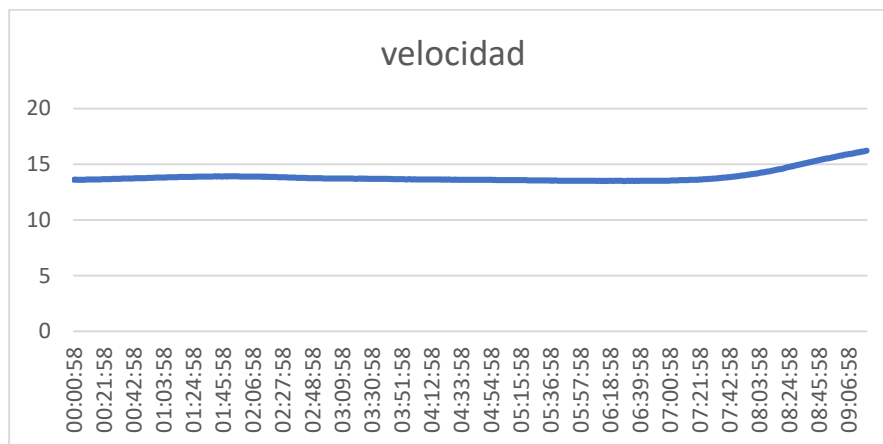
Figura 59. Medición de Velocidad – 5 de mayo



Fuente: Autores

Al tener en cuenta los datos registrados en la Figura 59 se puede identificar que el punto de velocidad más bajo registrado fue de 13.62 m/s y el valor de mayor velocidad fue de 24.14 m/s.

Figura 60. Medición de Velocidad – 10 de junio

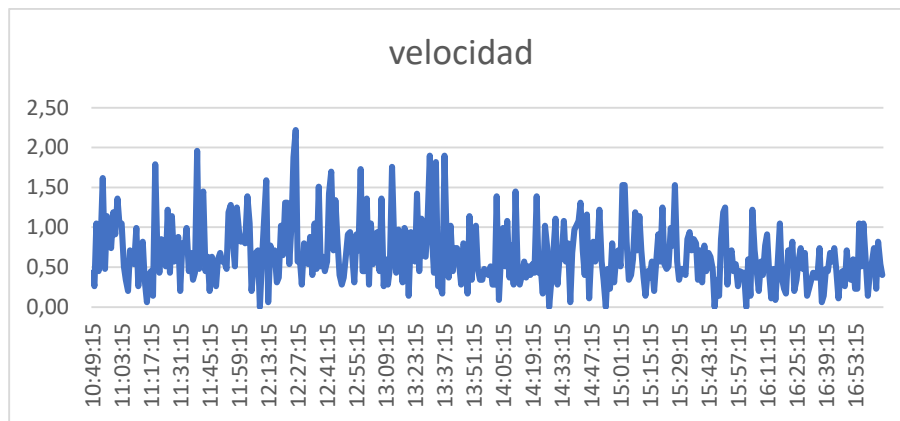


Fuente: Autores

En la Figura 60 se puede observar el comportamiento que tuvo la velocidad del viento registrada en pruebas de caracterización, de forma que se puede identificar que el valor mínimo registrado fue de 13.62 m/s y punto máximo de 16.42 m/s.

Fuente: Autores

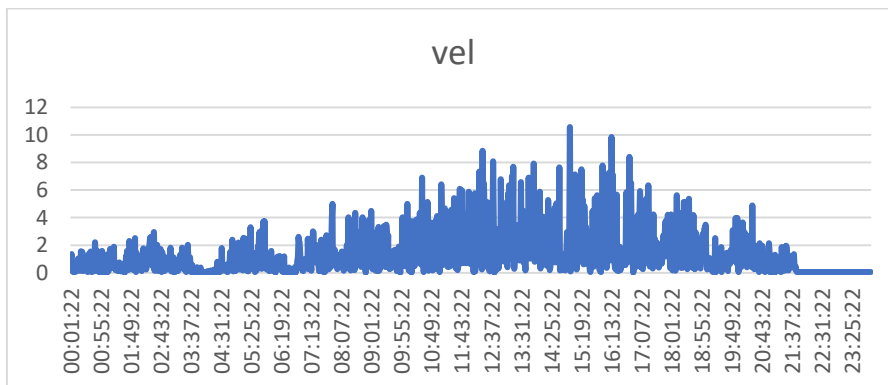
*Figura 61. Medición de Velocidad – 3 de julio*



Fuente: Autores

En la Figura 61 se pudo establecer que la velocidad máxima registrada fue de 2.37 m/s y la velocidad estuvo en los 0.6 m/s.

*Figura 62. Medición de Velocidad – 4 de agosto*



Fuente: Autores

Para las pruebas realizadas que se observan en la Figura 62 se destaca como punto máximo de velocidad un valor de 15.44 m/s y un valor mínimo de 0.152 m/s

#### 4.3.4. Medición de Voltajes

*Figura 63. Medición de Voltaje 1*



Fuente: Autores

En la Figura 63 se logra observar el nivel de voltaje alcanzado por las turbinas a partir de la velocidad del viento alcanzada, con valor de 128.2 v

*Figura 64. Medición de Velocidad 2*



Fuente: Autores

Otro de los valores medidos por el sistema de las turbinas aerogeneradores fue de 128.6 v, como se muestra en la Figura 64.

*Figura 65. Medición de Voltajes 3*



Fuente: Autores

Finalmente, otro de los datos registrados evidencia una medición de voltaje de 129.3 v, datos que se observa en la Figura 65.

## Conclusiones

La realización del diagnóstico permitió la identificación de cada una de las fallas detectadas en las turbinas de los aerogeneradores de eje vertical, de forma que se pudo iniciar el proceso de análisis de necesidades de reparación. Rotura de cableado de generador eléctrico, desgaste de la estructura base, corrosión, tornillos corroídos, piezas de hélices de acrílico rotas y desgastadas, piezas desgastadas y mal construidos como los mecanismos de eje central, cadenas de transmisión oxidadas. partes de colocación de las aspas oxidadas y sin pintura por corrosión.

Al tener en cuenta las falencias del sistema de turbinas eólicas encontrado en el diagnóstico, se realizaron procedimientos para rehabilitar el sistema de turbinas eólicas de eje vertical, de forma que se realizaron procedimientos como el cambio de cables de conexión de generador eléctrico, lijado de estructura de base de las turbinas, reemplazo de las hélices acrílicas, limpieza y engrase de piezas mecánicas y móviles, instalación de L de soporte para la láminas acrílicas, cambio de Engranajes de eje de giro, pintura de estructura base de las turbinas eólicas, pintura de estructura base de las turbinas, instalación de cadenas y soldadura de la estructura.

A partir de instrumentos de medición como el multímetro multifunction DO 9847 y anemómetro se realizaron pruebas por alrededor de 11 horas y 51 min en tomas muestrales cada dos minutos. Se realizó medición de la velocidad del viento, la cual tuvo una velocidad máxima de 10.98 m/s, una mínima de 0.06 m/s y promedio de 3.1499 m/s; la medición de la

temperatura registró una temperatura máxima de 10.9 °C, una mínima de 20.0 5 °C y promedio de 15.438 °C; al medir el caudal se obtuvo en valor máximo de 109.9 m<sup>3</sup>/s, una mínima de 0.6 m<sup>3</sup>/s y un valor de medición promedio 31.672 m<sup>3</sup>/s. Adicionalmente, se realizaron procesos de simulación con el apoyo del programa Autodesk Inventor se llevaron a cabo pruebas de esfuerzo de la estructura que soporta el peso de las turbinas eólicas de eje vertical, de manera que por parte de sus resultados se pueda establecer que la prueba de stress de von Mises con un valor mínimo de 0,00722625 Mpa y máximo de 275,793 Mpa; de primer stress con resultado mínimo de 80.0609 Mpa y un máximo de 292.538 Mpa; como prueba de 3er stress, el valor mínimo fue de 287.419 Mpa y el máximo de 408.253 Mpa; como parte de la prueba de desplazamiento, el valor mínimo fue de 0 mm y máximo 5.60497 mm.

Adicionalmente, las pruebas de simulación de las turbinas mostraron, a partir de pruebas de estrés se identificó una flexión máxima 13.190 MPa; un esfuerzo cortante máximo de 0.429 MPa; con tensión torsional máxima de 53.095 MPa; tensión máxima de 0.318 MPa; estrés máximo reducido 91.964 MPa; deflexión máxima de 38.839 micras y un ángulo de torsión de -0.50 grados.



## **Recomendaciones**

Como parte de las recomendaciones del proyecto, se sugiere que para proyectos futuros se desarrollen procesos en los que se establezcan manuales y procesos de mantenimiento preventivo y correctivo, con destinación a desarrollo procesos de mantenimiento programado que mantengan en correcto funcionamiento el sistema de los aerogeneradores eólicos de eje vertical.

## Referencias

- [1] Aeólica. (2011). *Energía eólica*. IDAE. Obtenido de [https://www.aeolica.org/uploads/BAJACuadrptico\\_ACERCATE\\_AEE\\_2.pdf](https://www.aeolica.org/uploads/BAJACuadrptico_ACERCATE_AEE_2.pdf)
- Alcántara, M. P. (2017). Diseño, construcción y control de un aerogenerador de equipo de prácticas de bajo coste. *Universidad de Sevilla*, 1-53. Obtenido de [https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/65373/TFG\\_Mar%C3%ADa%20Paz%20Luque%20Alc%C3%A1ntara.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/65373/TFG_Mar%C3%ADa%20Paz%20Luque%20Alc%C3%A1ntara.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Alcover, M. C. (09 de 2020). *Academia*. Obtenido de Accelerating the world's research.: [https://www.academia.edu/78367936/Definici%C3%B3n\\_de\\_los\\_componentes\\_y\\_del\\_funcionamiento\\_de\\_un\\_captador\\_de\\_luz\\_solar?bulkDownload=thisPaper-topRelated-sameAuthor-citingThis-citedByThis-secondOrderCitations&from=cover\\_page](https://www.academia.edu/78367936/Definici%C3%B3n_de_los_componentes_y_del_funcionamiento_de_un_captador_de_luz_solar?bulkDownload=thisPaper-topRelated-sameAuthor-citingThis-citedByThis-secondOrderCitations&from=cover_page)
- Anónimo. (2022). *Arrancadores.com*. Obtenido de <https://arrancadores.com/tipo/generador-electrico/>
- Arango, L. T., Fajardo, M. M., & Orozco, M. G. (2016). *INTERACCIÓN AERODINÁMICA ENTRE AEROGENERADORES TIPO DARRIEUS*. Medellín. Obtenido de [https://www.researchgate.net/profile/Mauricio-Giraldo-2/publication/267800378\\_INTERACCION\\_AERODINAMICA\\_ENTRE\\_AEROGENERADORES\\_TIPO\\_DARRIEUS/links/54b5e2380cf2318f0f9a05af/INTERACCION-AERODINAMICA-ENTRE-AEROGENERADORES-TIPO-DARRIEUS.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Mauricio-Giraldo-2/publication/267800378_INTERACCION_AERODINAMICA_ENTRE_AEROGENERADORES_TIPO_DARRIEUS/links/54b5e2380cf2318f0f9a05af/INTERACCION-AERODINAMICA-ENTRE-AEROGENERADORES-TIPO-DARRIEUS.pdf)
- BBC. (2022). *BBC NEWS*. Recuperado el 21 de 04 de 2022, de <https://www.bbc.com/mundo/noticias-50489716>
- Cortés Guajardo, G. E. (2018). Análisis comparativo de generación de entropía y potencia mecánica en configuraciones de emplazamiento de turbinas eólicas de eje vertical. *Repositorio Académico de la Universidad de Chile*, 1-98. Obtenido de <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/151778>
- Energy. (01 de 12 de 2020). *Masmóvil*. Obtenido de <https://blog.energygo.es/que-son-las-palas-aerogeneradoras/#:~:text=Un%20aerogenerador%20es%20un%20dispositivo,ya%20permite%20prolongar%20esa%20durabilidad.>
- Forensics, E. (1989 - 2022). *ENVISTA*. Recuperado el 21 de 04 de 2022, de ENVISTA: <https://www.envistaforensics.com/es-mx/servicios/expertos-en-analisis-forense/analisis-de-fallas-de-energia/fallas-en-turbinas-eolicas-y-analisis-de-perdidas/>
- Franco Tabares, I. D., & Moncada Megarejo, B. (2020). Desarrollo de una trurbina eólica híbrida vertical de baja potencia. *Repositorio de la Universidad Santo Tomas*, 1-178. Obtenido de

[https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/9065/1533\\_e\\_4%20%281%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/9065/1533_e_4%20%281%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Galar, E. M. (2011). Aerogenerador. *upNA*, 1-48. Obtenido de <https://academic-e.unavarra.es/handle/2454/4187>

García Santander. (2001). COMBUSTION Y COMBUSTIBLES. *Accelerating the world's research*, 1-25. Obtenido de [https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/51315812/Combustion\\_y\\_combustibles-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1664593002&Signature=E03Zqe3z3nFxfjVITYSA3UIZby5ONQqiwupbRR4QGqKszed~viQCbeI7JlxSxbg6tYl2OAHIs9iS66OmJZF7E~VkqeXWVCpJgGdknPCWfi3qNB2WM OukmVSkmc9LzGt-bA](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/51315812/Combustion_y_combustibles-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1664593002&Signature=E03Zqe3z3nFxfjVITYSA3UIZby5ONQqiwupbRR4QGqKszed~viQCbeI7JlxSxbg6tYl2OAHIs9iS66OmJZF7E~VkqeXWVCpJgGdknPCWfi3qNB2WM OukmVSkmc9LzGt-bA)

Gómez Caviedes, J. G., & Cárdenas Bernal, W. A. (2019). Diseño construcción y ensayos de un sistema electromecánico para la obtención de energía eléctrica a partir de dos sistemas híbridos eólicos. *Repositorio Institucional - Univerisdad Antonio Nariño*, 1-79.

Hergoros Industrias electricas. (26 de 07 de 2018). *Hergoros Industrias electricas*. Recuperado el 18 de 04 de 2022, de Hergoros Industrias electricas: <https://hergoros.com/la-importancia-del-mantenimiento-preventivo/#:~:text=Ventajas%20del%20mantenimiento&text=Detecci%C3%B3n%20mucha%20m%C3%A1s%20r%C3%A1pida%20de,sustituirlo%20por%20una%20turbina%20nueva>

Hernando González Sierra, J. P. (2011). DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN GENERADOR EÓLICO. *ARTÍCULO DE REFLEXIÓN*, 8. Recuperado el 22 de 04 de 2022, de <file:///D:/Downloads/Dialnet-DisenoYConstruccionDeUnGeneradorEolicoDeEnergiaEle-3798833.pdf>

Iberola s.a. (2022). *IBERDROLA*. Obtenido de IBERDROLA: <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/energia-eolica>

IngeoExpert. (15 de 03 de 2019). *IngeoExpertblog*. Obtenido de <https://ingeoexpert.com/2019/03/15/que-es-un-aerogenerador-y-como-funciona/>

Juan Gabriel Gómez Cavieles, W. A. (2019). *Diseño construcción y ensayos de un sistema electromecánico para la obtención de energía eléctrica a partir de dos sistemas híbridos eólicos*. Tunja. Recuperado el 21 de 04 de 2022

Laboratorio Nacional de Energía Renovable. (2007). *Sistemas Eólicos Pequeños para*. Nuevo México. Recuperado el 21 de 04 de 2022, de <https://www.nrel.gov/docs/fy07osti/42070.pdf>

Lee, A. M., & Mora, C. (2020). Aprendizaje de la energía mecánica y sus propiedades desde la perspectiva estratégica. *Dialnet*, 1-20. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7660377>

- Luiz Eduardo Triana, R. R. (2018). *Diseño, construcción y evaluación de un prototipo de generador híbrido eólico-fotovoltaico*. Tunja .
- Molina, Ponce, & Soriano. (2010). *Diferentes tipos de aerogeneradores*. INSTITUTO TECNOLÓGICO. Obtenido de [https://repositorio.tec.mx/bitstream/handle/11285/632714/13\\_t2s3\\_c14\\_html\\_contex\\_2.pdf?sequence=1](https://repositorio.tec.mx/bitstream/handle/11285/632714/13_t2s3_c14_html_contex_2.pdf?sequence=1)
- Moreno, G., & Tello Yépez, M. F. (2017). Construcción de un aerogenerador de eje vertical tipo Savonius con sistema de medición de giro. *Respositorio Digital de a Universidad Intenacional SEK*, 1-78. Obtenido de <https://repositorio.uisek.edu.ec/handle/123456789/2649>
- Munguía, S. F. (09 de Septiembre de 2021). *Xataka*. Obtenido de Xataka: <https://www.xataka.com/energia/miles-aerogeneradores-se-acercan-al-final-su-vida-util-gran-pregunta-que-haremos-sus-palas-despues-1>
- MURCIA, A. F. (2019). MODELAMIENTO DE UNA TURBINA EÓLICA DARRIEUS H DE EJE VERTICAL IMPLEMENTANDO EL MÉTODO DE SLIDING MESH POR SIMULACIÓN CFD. *Unamerica*, 1-142. Obtenido de <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7560/1/4151976-2019-2-IM.pdf>
- Orduz Berdugo, O. I., & Suárez Perez, J. E. (2011). Diseño y construcción de un prototipo de turbina eólica de eje vertical para generación de baja potencia. *Repositorio de la Universidad Industrial de Santander*, 1-173. Obtenido de <https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/53884134/137798-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1664772112&Signature=BPD-TNUSnuBFRIXp311pSMtwUG8rmVqEGQYDGoMj0pYr2Y5kd4c1tQdgX4oB2KDTqcm2dfkQ-IIIcl01eflOIP9rtHjMK~TOup3gwrnE~mEniVwhRwhoAWec7iQXciWVwwyu77WUBtmzpcBrZEt>
- Pacheco Barragán, H. C., Triana Chavez, J. J., & Cárdenas Quinónes, A. (2020). Evaluación del deterioro por corrosión-erosión en perfiles de una turbina eólica de eje vertical. *Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería*, 1-102. Obtenido de <https://acofipapers.org/index.php/eiei/article/view/816>
- Pachón Bachiller, C. D., Cortés Ramírez, J. S., & Cuevas Carvajal, N. (2019). Diseño de un banco de pruebas en techo para caracterizar el desempeño de turbinas eólicas de eje vertical. *Encuentro Internacional de Educación en Ingenierías*, 1-15. Obtenido de <https://acofipapers.org/index.php/eiei/article/view/163>
- Pico Saltos, G., Saltos, P., Mendoza, & Mendoza, D. (2018). Turbinas hidrocínicas de eje vertical helicoidal. *Rocca - Revista Científica*, 285-297. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6759691>
- PIZANO, R. (28 de 06 de 2018). Obtenido de PROYECTO FSE: <http://www.proyectofse.mx/2018/06/28/turbina-eolica-de-eje->

vertical/#:~:text=En%20una%20turbina%20e%C3%B3lica%2C%20las,se%20mueva%20a%20gran%20velocidad.

- Ramírez, J. C. (2014). *Fuentes de energía: Renovables y no renovables aplicaciones*. Mexico: Alfaomega. Obtenido de <https://books.google.es/books?id=PNh0EAAAQBAJ&lpg=PR5&ots=4a7Zlkl6iX&dq=que%20es%20energia%20renovable&lr&hl=es&pg=PA21#v=onepage&q&f=false>
- Recamán, D. A. (2022). *NA MIRADA DEL CAMPO ELÉCTRICO Y EL POTENCIAL ELÉCTRICO DESDE UNA PERSPECTIVA GEOMÉTRICA*. Bogotá: UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL. Obtenido de <http://upnblib.pedagogica.edu.co/bitstream/handle/20.500.12209/17716/Una%20mirada%20del%20campo%20electrico%20y%20el%20potencial%20electrico%20desde%20una%20perspectiva%20geometrica.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Román, Á. L. (2013). Diseño de un aerogenerador para uso particular. *Universidad Carlos III*, 1-80. Obtenido de [https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/20245/TFG\\_Alvaro\\_Lucas\\_San\\_Roman.pdf](https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/20245/TFG_Alvaro_Lucas_San_Roman.pdf)
- Smartketing360. (17 de Septiembre de 2021). *Testek group*. Obtenido de Testek group: <https://www.testekndt.net/soluciones-de-inspeccion-visual-remota-en-mantenimiento-de-turbinas-eolicas/#:~:text=Como%20tal%2C%20las%20turbinas%20e%C3%B3licas,general%20alrededor%20de%2020%20a%C3%B1os.&text=Se%20deben%20realizar%20inspecciones%20peri%C3%B3d>
- Sola, L. A. (2012). Diseño de un aerogenerador de eje vertical tipo Savonius para electrificación rural. *UPNA*, 1.169. Obtenido de <https://hdl.handle.net/2454/6667>
- Spiegeler, C., & Cifuentes, J. I. (2012). *DEFINICION E INFORMACION DE ENERGIAS RENOVABLES*. Guatemala: USAC. Obtenido de <https://core.ac.uk/download/pdf/35294536.pdf>
- Spiegeler, C., & Cifuentes, J. I. (2016). *DEFINICION E INFORMACION DE ENERGIAS RENOVABLES*. Guatemala: USAC. Obtenido de <https://core.ac.uk/download/pdf/35294536.pdf>
- Structuralia. (16 de 07 de 2018). *Structuralia.com*. Obtenido de <https://blog.structuralia.com/aerogeneradores-de-eje-vertical-y-horizontal-tipos-ventajas-e-inconvenientes>
- Tecpa. (09 de 02 de 2018). *OTECPA*. Recuperado el 21 de 04 de 2022, de OTECPA: <https://www.tecpa.es/turbinas-eolicas-pequenas/>
- Tobías Salas, A., & Rubio Jiménez, C. A. (2017). Estado del arte de aerogeneradores de eje vertical y horizontal. *Repositorio Institucional de la Universidad de Guanajuato*, 1-5. Obtenido de <http://repositorio.ugto.mx/bitstream/20.500.12059/4745/1/Estado%20del%20arte%20de%20aerogeneradores%20de%20eje%20horizontal%20y%20vertical.pdf>
- Turcan, N. (2015). Aerogenerador de viento. *UPC*, 1-61. Obtenido de <http://hdl.handle.net/2117/80895>

Weather. (2009). *1 CAPITULO 7 EL VIENTO 1. DEFINICIÓN*. nimbus. Obtenido de <http://200.58.146.28/nimbus/weather/pdf/cap7.pdf>

worldenergytrade. (2020). *worldenergytrade*. Recuperado el 18 de 04 de 2022, de worldenergytrade: <https://www.worldenergytrade.com/energias-alternativas/energia-eolica/las-aspas-de-las-turbinas-eolicas-no-son-reciclables-y-se-han-convertido-en-toneladas-de-desechos>