

Diseño de una turbina eólica de eje vertical con rotores híbridos tipo

Troposkien y Helicoidal

Diego Alejandro Casas Jiménez, Juan Sebastián Correa Paipa y Sergio Neftalí Gutiérrez Duarte

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Mecánico

Director

Ricardo Alfonso Jaimes Rolón

M.Sc. en Ciencias

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2023

**Dedicatoria**

Espero que el lector, el profesional y la gente de a pie, del común se inspire en sus sueños, lleven sus logros de la mano con la disciplina y esfuerzo, recordando que los frutos del trabajo están siempre ahí, aunque no se vean a simple vista.

Dedicando este trabajo a mi linda madre Adriana, a mi tía Luz Marcela, a toda mi familia y a aquellos a quienes cruce un saludo, una mirada o una palabra durante lo largo de mi carrera, dedico este proyecto a todas aquellas personas que depositaron una gota de confianza en mí y vieron como poco a poco se construía un ser humano, un profesional y un amigo, gracias a todas aquellas personas que me regalaron sonrisas, sueños y alegrías, que me acompañaron durante las grandes tristezas y pesares, durante minutos, horas o días en donde estuvieron a mi lado para ser cada día mejor.

Dedico este trabajo al cariño, al respeto y al amor que se imprimió en mí a lo largo de los años dentro y fuera de las aulas, a la lucha por la igualdad y la justicia social, recordando siempre el mejorar no solo como persona profesional sino como un ser integro y amoroso.

Diego Alejandro Casas Jiménez

## **Dedicatoria**

“El futuro pertenece a los que creen en la belleza de sus sueños”

Eleonor Roosevelt

A mi familia por su apoyo y amor incondicional, especialmente a mi madre, padre y hermana quienes con sus palabras de aliento y fortaleza me brindaron la fuerza para seguir adelante en cada una de las dificultades que se me presentaron durante este largo camino, es gracias a su sacrificio y esfuerzo que hoy en día pude terminar esta etapa de mi vida, esto es para ustedes.

A mi pareja y a mis amigos quienes creyeron en mí aun cuando yo no lo hacía, su mejor actitud y su cariño a lo largo de estos años, han sido importantes para moldearme en la persona que soy hoy en día.

Juan Sebastián Correa Paipa

## **Dedicatoria**

“No se mide la grandeza de un hombre por su tamaño físico, sino por sus actos, por el impacto que produce en la historia humana”

Soichiro Honda

Quiero dedicar este proyecto a mi madre Lirian quien me guía en cada paso de mi vida, brindándome siempre su consejo, su apoyo y amor incondicional, muchos de mis logros se deben a ella, este principalmente es fruto de su sacrificio y esfuerzo por darme siempre las mejores oportunidades, esto es para ti mamá.

A mí abuela Flor Elva por ser un pilar fundamental para mí, todas sus palabras de amor y aliento me ayudaron en cada uno de los momentos difíciles que se enfrenté a lo largo de mi formación académica, es gracias a ella que soy quien soy.

Sergio Neftalí Gutierrez Duarte

## **Agradecimientos**

A nuestro director el ingeniero Ricardo Alfonso Jaimes Rolón por su orientación y colaboración durante todo el desarrollo del proyecto

A los profesores de la escuela de ingeniería mecánica, por su paciencia y dedicación con nuestra formación como profesionales

A todos nuestros amigos, compañeros estudiantes y egresados que de alguna u otra forma nos brindaron lo mejor de sí y fueron de gran ayuda para sacar adelante este proyecto.

A la lucha por la educación pública por defender nuestros valores y derechos como estudiantes, y velar por los mismos en las siguientes generaciones

A Juan Guillermo Jaramillo, increíble ingeniero químico que nos aconsejó en todo momento

A nuestros padres por su amor incondicional y apoyo a lo largo de toda nuestra etapa de formación

Por último y no menos importante a nosotros mismos, por seguir adelante pese a todos los tropiezos que encontramos en el camino, por creer en nosotros mismos y ponerle empeño a este sueño.

**Tabla de Contenido**

Introducción .....	16
1 Objetivos .....	19
1.1 Objetivo General .....	19
1.2 Objetivos Específicos .....	19
2 Fases Metodológicas .....	20
2. Fase investigativa .....	20
2.1.1 Energía Eólica .....	21
2.1.2 Potencia del viento .....	23
2.1.3 Velocidad del viento en Colombia.....	24
2.1.4 Dirección del viento. ....	25
2.1.5 Turbinas eólicas.....	26
2.1.6 Tipos de turbinas eólicas. ....	26
2.1.7 Leyes de aerodinámica. ....	28
2.1.8 Fuerza sobre un alerón. ....	29
2.1.9 Fuerzas en turbinas de eje vertical. ....	30
2.1.10 Generadores.....	31
2.2 Fase Propositiva .....	33
2.2.1. Resultados .....	34
2.3 Fase de Prototipado .....	35

DISEÑO DE UNA TURBINA ÉOLICA DE EJE VERTICAL	7
2.3.1 Elementos .....	38
2.3.2 Calibración de los equipos .....	47
2.3.3 Elaboración de componentes.....	50
2.3.4. Diseño e impresión de prototipos.....	51
2.3.5. Bases de los prototipos.....	52
2.3.6. Realización de pruebas.....	52
2.4. Fase de desarrollo.....	59
2.4.4. Diseño del eje.....	61
3. Manual de funcionamiento y mantenimiento.....	63
4. Análisis de costos.....	64
6. Recomendaciones.....	69
Referencias Bibliográficas .....	70
Apéndices .....	72

**Lista de Tablas**

<i>Tabla 1.</i> Características de las turbinas eólicas más comunes. ....	27
Tabla 2. Resultados matriz calidad.....	34
Tabla 3. Caracterización del motor-generador. ....	49
Tabla 4. Voltaje vs RPM motor-generador .....	50
Tabla 5. Tablas de pruebas de turbina grande.....	54
Tabla 6. Dimensiones obtenidas para la selección de tamaño de la turbina eólica. ....	59
Tabla 7. Inversión estimada de materiales e insumos de manufactura.....	64
Tabla 8. Inversión estimada en el subsistema de hélices.....	65
Tabla 9. Inversión estimada en el subsistema de frenado.....	65
Tabla 10. Inversión estimada del subsistema de soporte.....	66
Tabla 11. Inversión estimada del subsistema generador.....	66
Tabla 12. Inversión estimada global del proyecto.....	66

**Lista de Figuras**

Figura 1. Metodología del proyecto .....	17
Figura 2. Fases del proyecto.....	20
Figura 3. Viento Anabático.....	22
Figura 4. Potencia eólica específica en función de la velocidad para condiciones normales de presión y temperatura. ....	23
Figura 5. Dirección del viento.....	25
Figura 6. Tipos de turbina .....	27
Figura 7. Líneas de corriente en torno a un alerón, fuerza de sustentación FL y fuerza.....	29
Figura 8. Fuerzas sobre un elemento de pala de una turbina de eje vertical en los distintos cuadrantes.....	31
Figura 9. Imagen Estator o rotor de un generador eléctrico.....	32
Figura 10. Rotor de un generador eléctrico.....	32
Figura 11. Ley de Faraday y Lenz.....	33
Figura 12. Túnel de Viento.....	36
Figura 13. Base metálica. ....	37
Figura 14. Prototipo dentro del túnel de viento.....	37
Figura 15. Motor-generador DC de 9V. ....	38
Figura 16. Sensor de Corriente.....	39
Figura 17. Sensor de Voltaje.....	40
Figura 18. Sensor de RPM. ....	40
Figura 21. Regulador de voltaje .....	42
Figura 22. Batería de 9V.....	42

Figura 24. Pesas de Laboratorio.....	43
Figura 25. Poleas.....	44
Figura 26. Tacómetro.....	44
Figura 27. Multímetro digital Techman.....	45
Figura 28. Anemómetro UNI-T.....	45
Figura 30. Soplador de Viento LG.....	46
Figura 31. Resistencias de prueba.....	47
Figura 32. Turbinas impresas en 3D.....	52
Figura 33. Diseño final del prototipo a fabricar.....	61

## Lista de Apéndices

Apéndice A. Matriz de Calidad. Planteamiento y Selección de Alternativas. ....	72
Apéndice B. Resultados de Pruebas en Túnel de Viento. ....	88
Apéndice C. Cálculos de tamaño de turbina. ....	114
Apéndice D. Diseño del eje.....	126
Apéndice E. Planos del prototipo.....	134
Apéndice F. Manual de operación y mantenimiento.....	136

## Glosario

**Ángulo de ataque:** el ángulo formado entre el perfil de la cuchilla y la dirección del viento.

**Darrieus:** diseño de turbina eólica de eje vertical que utiliza alas curvadas para generar energía a partir de viento.

**Generador eléctrico:** dispositivo que convierte la energía mecánica generada por la turbina en energía eléctrica.

**Hélice helicoidal:** una hélice que tiene una forma similar a un espiral con un ángulo de torsión constante a lo largo de su longitud.

**Perfil aerodinámico:** la forma de la cuchilla o ala de la turbina que afecta su eficiencia y rendimiento.

**Perfil de Troposkien:** un tipo de turbina eólica que utiliza hélices con un diseño específico, similar al perfil de una hoja de Troposkien.

**Savonius:** tipo de diseño de turbina eólica de eje vertical que utiliza copas en forma de semicilindros para captar el viento.

**Turbina eólica de eje vertical:** un tipo de turbina eólica en el eje de rotación está dispuesto verticalmente.

## Resumen

**Título:** Diseño de una turbina eólica de eje vertical con rotores híbridos tipo Troposkien y Helicoidal\*

**Autores:** Diego Alejandro Casas Jiménez, Juan Sebastián Correa Paipa y Sergio Neftalí Gutiérrez Duarte\*\*

**Palabras claves:** Turbina, Aerogenerador, Hélice, Viento, Energía Renovable, potencia.

**Descripción:** La energía renovable ha ido escalando en las últimas décadas, su uso ha aumentado en las industrias y hogares en todo el planeta. Entre todas las energías limpias que se han empezado a utilizar destaca la energía eólica por su uso ilimitado con un impacto muy bajo en huella de carbono y contaminación subyacente. La ingeniería busca la implementación eficiente y una reducción de costos para ampliar su uso a nivel mundial. Teniendo en cuenta lo que se ha mencionado, en este proyecto se llegó a diseñar una turbina eólica de eje vertical con hélices combinadas, basándose en diseños previamente creados y analizando parámetros como la velocidad del viento y el ángulo de incidencia del aire en el generador. Se aplicaron métodos de iteración para hallar las medidas necesarias y que puedan cumplir con los parámetros de la industria. El diseño a detalle se llevó a cabo mediante herramientas computacionales de diseño, así como una comparación con distintos modelos los cuales fueron antepuestos uno con otro midiendo respecto a su eficiencia y costo con el fin de hallar la turbina óptima. El modelo fue sometido a pruebas con carga y a rotaciones a altas velocidades para determinar la calidad de los materiales y su resistencia. El resultado obtenido fue un generador de doble hélice que en la parte

---

\* Trabajo de Grado

\*\*Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica  
Director: Ricardo Alfonso Jaimes Rolón, Magister en ciencias

interna tiene un rotor helicoidal y en la parte externa uno tipo Troposkien los cuales resultan tener una gran eficiencia y bajo costo para ser implementado en diferentes terrenos y relieves.

**Abstract**

**Title:** Design of a vertical axis wind turbine with hybrid Troposkien and helical rotors.

**Authors:** Diego Alejandro Casas Jiménez, Juan Sebastián Correa Paipa y Sergio Neftalí Gutiérrez Duarte \*\*

**Keywords:** Wind Turbine, Propeller, Wind, Renewable Energy, power.

**Description:** Renewable energy has been escalating in the last decades, its use has increased in industries and homes all around the world. Among all the clean energies that have started to be used, wind energy stands out for its unlimited use with a very low impact on carbon footprint and underlying pollution. Engineering seeks efficient implementation and cost reduction to expand its global use. Considering what has been mentioned, in this project we came to design a vertical axis wind turbine with combined propellers, based on previously created designs and analyzing parameters such as wind speed and the angle of incidence of air on the generator. Some iteration methods were applied to find the necessary measurements that could comply with industry parameters. The detailed design was carried out using computational design tools as well as a comparison with different models which were compared with respect to their efficiency and cost to find the most optimal one. So, the model was subjected to load tests and high-speed rotations to determine the quality of the materials and their resistance. The result obtained was a double helix generator with a helicoidal rotor in the internal part and a Troposkien type in the external part, both of which are highly efficient and low cost to be implemented in different terrains and reliefs.

---

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica  
Director: Ricardo Alfonso Jaimes Rolón, Magister en ciencias

## Introducción

Las energías renovables son fuentes de energía limpia, inagotable y actualmente son más competitivas y van en aumento como queda reflejado en las estadísticas aportadas en 2015 por la Agencia Internacional de la Energía (AIE): representan cerca de la mitad de la nueva capacidad de generación eléctrica instalada en 2014, toda vez que se han constituido en la segunda fuente global de electricidad, sólo superada por el carbón. De acuerdo con la AIE, la demanda mundial de electricidad aumentará un 70% hasta 2040, elevando su participación en el uso de energía final del 18% al 24% en el mismo periodo- espoleada principalmente por regiones emergentes (India, China, África, Oriente Medio y el sureste asiático). Se diferencian de los combustibles fósiles principalmente en su diversidad, abundancia y potencial de aprovechamiento en cualquier parte del planeta, pero sobre todo en que no producen gases de efecto invernadero (causantes del cambio climático) ni emisiones contaminantes. Además, sus costes evolucionan a la baja de forma sostenida, mientras que la tendencia general de costes de los combustibles fósiles es la opuesta, al margen de su volatilidad coyuntural.

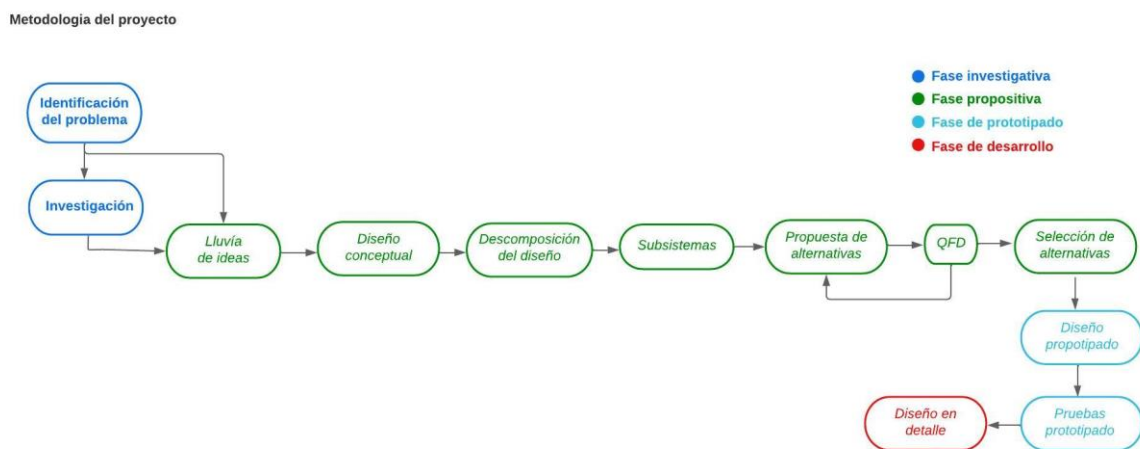
Según los autores Palas y Cárdenas (2019), la energía eléctrica que se produce en Colombia el 70% corresponde a generación hidráulica, casi el 30% a generación térmica (13% con gas natural, 7% con combustibles líquidos y 9% con carbón) y aproximadamente el 1% con fuentes no convencionales de energía renovable (eólica, solar, y biomasa). Los autores del comunicado del Sistema Interconectado y el administrador del Mercado de Energía Mayorista de Colombia ``El consumo anual de energía eléctrica en Colombia para 2021 fue 74,116.61 [Gw/h] y para el 2022 fue de 76,653.73 [Gw/h] `` (XM, 19 de enero del 2023).

Por su parte el Ministerio de Minas y Energía plantea que en la actualidad el crecimiento de la demanda de energía eléctrica en Colombia aumentó un 5,24% después de la caída que tuvo por la pandemia de SARS-COV2 y se espera que su aumento sea de un 2.22% y el 3,35% anual.

De lo anterior mencionado se puede concluir que Colombia es un territorio con un alto consumo energético y que tiene tendencias al crecimiento acelerado, además de ser un país que depende en un alto porcentaje a la energía hidroeléctrica y que debido al cambio climático y otros factores no es imprescindible el uso de este tipo de energías. Por ende, la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, se propone diseñar un prototipo de turbina eólica de bajo costo, producción promedio de 150-200 Watts, funcional y con características óptimas para la mantenibilidad.

Para la realización de este proyecto se sigue la metodología ilustrada en la figura 1.

**Figura 1.** Metodología del proyecto



En la fase investigativa se realizará una búsqueda de información relacionada con el problema en cuestión, para así en la fase propositiva realizar un diseño conceptual que considere las características implícitas de una turbina eólica vertical junto con varios diseños que buscan obtener la geometría del producto. Continuando con la fase de prototipado se realizarán construcciones a escalas para así obtener un comportamiento del diseño y finalizar con la fase de diseño a detalle, la cual busca obtener un diseño funcional y a tamaño real con sus componentes ya especificados.

## **1 Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Diseñar una turbina eólica de eje vertical con rotores híbridos tipo Troposkien y Helicoidal a escala plena, con el fin de suplir la demanda energética promedio de un hogar colombiano.

### **1.2 Objetivos Específicos**

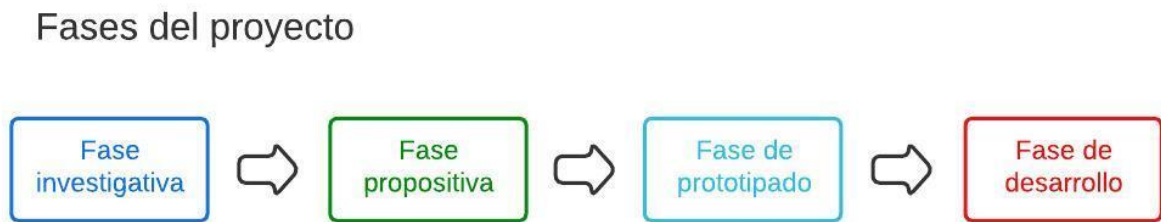
- Diseñar una turbina eólica con los siguientes requerimientos:
  - De eje vertical.
  - Rotores híbridos tipo Troposkien y helicoidal
  - Producción energética de 150 – 200 kW/h.
- Construir modelos funcionales a diferentes escalas para establecer el comportamiento y la tendencia de la turbina eólica.
- Diseñar a detalle de la turbina eólica, (teniendo en cuenta que el generador se va a seleccionar para así tener mejores resultados).
- Estimar costos para la construcción y montaje de la turbina eólica

## 2 Fases Metodológicas

El diseño es un proceso innovador y altamente iterativo. También es un proceso de toma de decisiones, que en ocasiones deben tomarse con muy poca información, en otras con apenas la cantidad adecuada y en ocasiones con un exceso de información parcialmente contradictoria.

Shigley, J. E. (2005). *Diseño en ingeniería mecánica - 6b: Edición*. McGraw-Hill Companies. A continuación, se enumeran las diferentes etapas que se llevaron a cabo para la realización de este proyecto

**Figura 2.** Fases del proyecto.



### 2.1 Fase investigativa

Tener conocimiento claro de los factores y parámetros que influyen en el medio en el cual se está trabajando es imprescindible para garantizar un correcto desarrollo del proceso de diseño, por esto, a continuación, se presentan los principios claves en el funcionamiento de una turbina eólica, así como los principios de la obtención de energía limpia y renovable.

### **2.1.1 *Energía en Colombia***

Los hogares colombianos consumen en promedio unos 157Kwh lo que representa más de dos mil millones de Kw/h mensuales debido al uso de esta en más de 13 millones de hogares en todo el país según las Unidades de planeación minero-energética (UPME).

### **2.1.2 *Energía Eólica***

Se refiere principalmente a aquellas tecnologías y aplicaciones donde se aprovecha la energía cinética del viento, convirtiéndola en energía eléctrica o mecánica según esta sea necesaria. Hay dos aplicaciones: las instalaciones para la producción de bombeo de agua y para la producción de electricidad. (secretaria de Energía, 2018)

Viento es el movimiento del aire, causado principalmente por las diferencias de presión desarrolladas por el calentamiento radiactivo diferencial de la superficie terrestre. Así, el aire cálido se expande lo cual genera una baja presión, mientras que el frío se comprime y se desarrolla una zona de alta presión. Con el fin de alcanzar un balance atmosférico entre las diferencias de presión, el aire fluye generalmente, desde los centros de alta a los de baja presión, presentando variaciones significativas en el tiempo y en el espacio. (Ruiz, Cuenca, & Zapata, 2017) La diferencia de radiación solar generada por la ubicación geográfica y las particularidades del relieve, originando diferencias en el calentamiento de la superficie terrestre y permite que se desarrolle viento catabático (brisa que desciende de la montaña al valle) y anabático (brisa que asciende del valle a la montaña).

**Figura 3.** *Viento Anabólico*

**Fuente:** Atlas De Los Vientos Colombia, 2017.

La intensidad del flujo depende de las variaciones térmicas entre el calentamiento diurno y el enfriamiento nocturno de la superficie del suelo, de la orientación del complejo montañoso con respecto a la incidencia de la radiación solar y de las condiciones sinópticas predominantes en un intervalo de tiempo determinado (Ruiz, Cuenca, & Zapata, 2017).

La ecuación que rige el movimiento para este sistema de coordenadas inclinado es (Stull, 21000):

$$\frac{\Delta U}{\Delta t} + U \frac{\Delta U}{\Delta t} + V \frac{\Delta U}{\Delta t} = |g| \frac{\Delta \theta_v}{T_{va}} \text{sen}(\alpha) + f_c V - C_d \frac{U^2}{h} \quad (1)$$

Donde el eje x representa la dirección de la línea de caída de pendiente; U y V las velocidades de los ejes (x, y); g la aceleración de la gravedad;  $\Delta \theta_v$  la diferencia entre la temperatura media y la temperatura media de la capa de aire más fría que fluye cuesta abajo;  $T_{va}$  la temperatura virtual ambiental;  $\alpha$  el ángulo de la pendiente;  $f_c$  el parámetro de Coriolis; V1 la velocidad de la masa de aire;  $C_d$  el coeficiente de resistencia total contra el suelo y el aire; U1 el viento de ladera descendente, y h la profundidad del aire frío. (Atlas De Los Vientos Colombia, 2017)

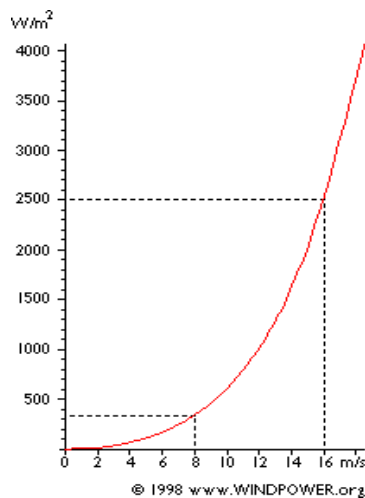
### 2.1.3 Potencia del viento

La velocidad del viento es una variable muy importante para determinar la cantidad de energía que un aerogenerador puede transformar en electricidad: la cantidad de energía que posee el viento varía con el cubo (la tercera potencia) de la velocidad media del viento la cual se puede evidenciar en la figura 4. (Manual de aplicación de la Energía Eólica, 1997)

$$Pot = \frac{1}{2} \rho A U_{\infty}^3 \quad (2)$$

Donde  $Pot$  es potencia del viento en Watt [W];  $\rho$  Densidad del aire [ $\text{Kg}/\text{m}^3$ ];  $A$  área enfrentada o de Barrio [ $\text{m}^2$ ];  $U_{\infty}$  es la velocidad del viento [ $\text{m}/\text{s}$ ].

**Figura 4.** Potencia eólica específica en función de la velocidad para condiciones normales de presión y temperatura.



**Fuente:** Manual de aplicación de la Energía Eólica.

Hay una gran cantidad de técnicas que permite determinar la velocidad y dirección del viento ya que la velocidad de este es muy importante para la conversión en energía eléctrica. Uno de estos métodos es el anemómetro que se utiliza generalmente para la medición de la velocidad del viento en superficie. Convencionalmente, está formado por un molinete de tres brazos (cada 120°) que gira sobre un eje vertical (con el viento) y activa un contador que, con base en el número de revoluciones, determina la velocidad. Existen diferentes tipos de anemómetros que utilizan métodos convencionales o tecnología de vanguardia para realizar las mediciones; entre ellos se destacan los rotatorios, a presión y ultrasónicos. (Atlas De Los Vientos Colombia, 2017)

#### ***2.1.4 Velocidad del viento en Colombia***

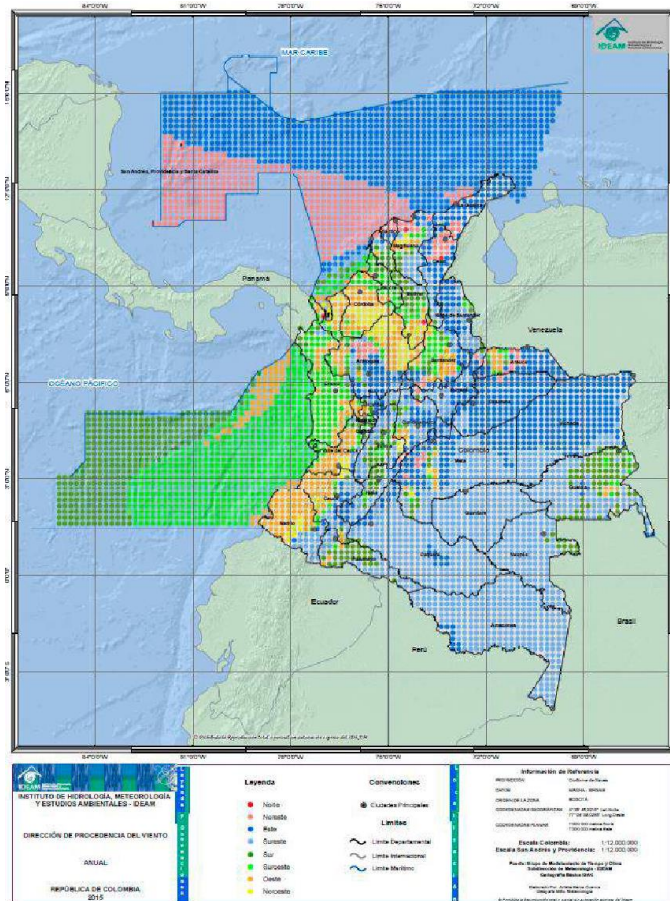
La velocidad del viento es un parámetro muy variable tanto en el tiempo como en el espacio. En el transcurso del día, la velocidad presenta variaciones por efecto de las diferencias de calentamiento sobre las superficies de tierra y mar, con un máximo entre las 10:00 UTC y las 03:00 UTC. Los cambios percibidos diariamente también presentan modulaciones en la escala estacional, razón por la que el comportamiento de esta variable presenta alta variabilidad a través del año. No obstante, los promedios anuales atenúan la influencia de los valores máximos y destacan el comportamiento representativo en cada región.

En Colombia, sobre las regiones planas, como la llanura del Caribe, la Orinoquía y la Amazonía, se observan circulaciones del viento bastante definidas en el transcurso del año, influenciadas por el comportamiento típico de los vientos alisios, mientras que en los valles interandinos y en las zonas montañosas, a pesar de percibirse una ligera influencia de estos vientos, las condiciones fisiográficas determinan en gran medida la dirección y velocidad del flujo de aire.

### 2.1.5 Dirección del viento.

Define la procedencia del viento; en otras palabras, la dirección expresa el punto del horizonte desde el cual sopla el viento. Su unidad de medida son grados sexagesimales, contados en el sentido de las manecillas del reloj, a partir del norte geográfico, utilizando los rumbos de la rosa de vientos. Las ocho direcciones principales son Norte (N), Noreste (NE), Este (E), Sureste (SE), Sur (S), Suroeste (SO), Oeste (O) y Noroeste (NE). (Atlas de los Vientos Colombia, 2017).

Figura 5. Dirección del viento.



Fuente: Atlas De Los Vientos Colombia.

### **2.1.6 Turbinas eólicas.**

Las turbinas eólicas son dispositivos que, mediante su rotación, convierten la energía cinética del viento en energía mecánica. Suelen clasificarse según el tipo de fuerza aerodinámica que provoca el giro del rotor. Hay turbinas que son impulsadas por la fuerza de arrastre aerodinámico y otras por la fuerza de sustentación aerodinámica. Las primeras se caracterizan por su operación con elevado par aerodinámico y baja velocidad. Esto es, la velocidad tangencial de las palas es menor a la velocidad del viento. Por otro lado, las turbinas de alta velocidad están impulsadas por la fuerza de sustentación aerodinámica, y tienen el mismo principio de funcionamiento que los perfiles alares de los aviones. Las turbinas generadoras de electricidad modernas son de este último tipo, principalmente debido a su mayor eficiencia (Walker y Jenkins, 1997).

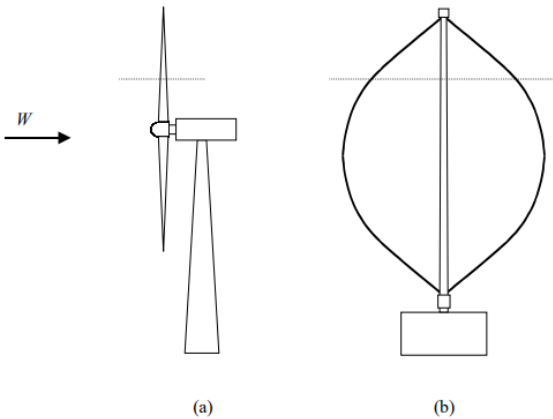
### **2.1.7 Tipos de turbinas eólicas.**

Las turbinas suelen ser clasificadas de acuerdo con la disposición de su eje de rotación. Las más comunes son las turbinas de eje horizontal, que constan de una, dos o tres palas. Tienen la ventaja de que las palas están situadas a elevada altura, con lo cual la velocidad media del viento es mayor, y la intensidad de turbulencia es menor, que a nivel del terreno. Las turbinas de eje horizontal pueden clasificarse a su vez según la disposición del rotor, que puede estar ubicado por delante o por detrás de la torre (Gipe, 1995; Clarke, 1991).

También existen turbinas de eje vertical. Éstas tienen la ventaja de que no requieren mecanismos de orientación. Además, el generador y la caja de engranajes se encuentran a nivel del terreno, facilitando el montaje y mantenimiento. Sin embargo, tienen una seria desventaja: el par aerodinámico varía fuertemente con la posición de las palas, aún con viento constante. Ésta es

una importante causa de fatiga de las palas y del sistema de generación, y de serios problemas de calidad de la potencia suministrada (Sharpe, 1990; Gipe, 1995; Dessaint et al., 1986).

**Figura 6.** Tipos de turbina.



**Fuente:** Control de la calidad de potencia en sistemas de conversión de energía eólica a) Eje horizontal, b) Eje vertical.

**Tabla 1.**

**Características de las turbinas eólicas más comunes.**

Tipo	Eje	Fuerza	Uso	Velocidad	Eficiencia	Par
bi- y tripala	Horizontal	Sustentación	Electricidad	Alta	0,42	Bajo
Darrieus, H	Vertical	Sustentación	Electricidad	Alta	0,40	Bajo
Multipala	Horizontal	Arrastre	Electricidad y bombeo	Baja	0,30	Alto
Savonius	Vertical	Arrastre	Bombeo	Baja	0,15	Alto

### 2.1.8 Leyes de aerodinámica.

La aerodinámica describe las fuerzas desarrolladas por los flujos de aire. Si se consideran flujos estacionarios, toda partícula que llegue a un punto cualquiera P en el espacio lo hará con la misma velocidad y dirección. Por lo tanto, la trayectoria seguida por una partícula que pase por el punto P será seguida por cualquier otra partícula que alcance dicho punto. Dicha trayectoria se llama línea de corriente, y tiene la propiedad de que el flujo de aire es tangente a ella en todo punto.

Toda región en el espacio limitada por líneas de corriente es llamada tubo de flujo. De las definiciones anteriores, el flujo de aire a través de las paredes del tubo de flujo es nulo. El flujo de aire “  $m$  ” que atraviesa la sección transversal A de un tubo de flujo está dado por:

$$m = \rho_w * A * W \quad (3)$$

La ecuación de Bernoulli es otra relación fundamental de la dinámica de los fluidos, que se deriva del teorema de la conservación de la energía. Establece que a lo largo de un tubo de flujo se satisface:

$$\frac{d}{dx} \left( p + \frac{1}{2} * \rho_w * A + \rho_w * g * z \right) = 0 \quad (4)$$

Donde: P = la presión,

g = la aceleración de la gravedad

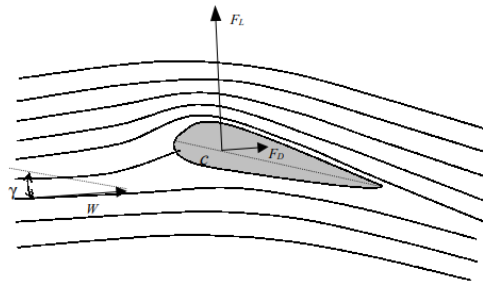
Z = la Altura.

(Houghton, E., Carpenter, P., Collicott, S. and Valentine, D., n.d. Aerodynamics for Engineering Students.)

### 2.1.9 Fuerza sobre un alerón.

- ❖ *Fuerza de arrastre:* Todo cuerpo sumergido en un fluido viscoso es sometido a una fuerza en la dirección del flujo llamada fuerza de arrastre  $F_D$ . El alerón es diseñado de manera de evitar turbulencias en el flujo de aire, y así minimizar la fuerza  $F_D$ . Sin embargo, cuando el ángulo de ataque supera cierto valor, el flujo deja de ser laminar, es decir, las líneas de corriente se separan de la cara superior del alerón. Cuando el alerón trabaja en estas condiciones, la fuerza de arrastre aumenta considerablemente, y se dice que el alerón entra en pérdida.

**Figura 7.** Líneas de corriente en torno a un alerón, fuerza de sustentación  $F_L$  y fuerza



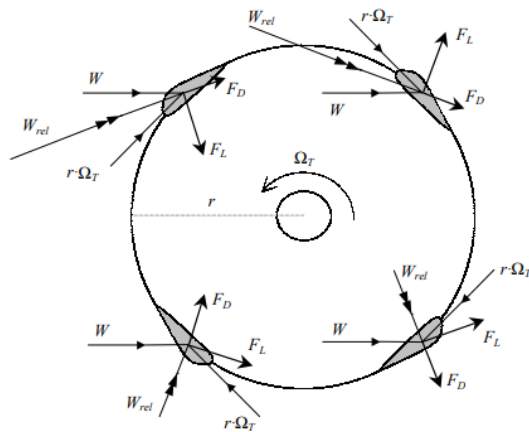
**Fuente:** Control de la calidad de potencia en sistemas de conversión de energía eólica.

❖ *Fuerza de sustentación:* La figura 7 muestra las líneas de corriente de flujo en torno al perfil de un alerón. El ángulo de ataque del alerón “ $\gamma$ ” produce una desviación del flujo de aire hacia abajo. Por encima del alerón, las líneas de corriente se concentran, mientras que por debajo se separan. Por la ley de continuidad, la velocidad aumenta por encima del alerón y disminuye por debajo. Luego, por el principio de Bernoulli, se produce una diferencia de presión entre ambas caras del alerón, dando lugar a una fuerza ascendente llamada fuerza de sustentación FL. Este análisis es, por supuesto, consistente con la tercera ley de Newton. En efecto, el alerón ejerce una fuerza sobre el aire para cambiar la dirección del flujo, y la reacción a esta fuerza es la fuerza ascendente o de sustentación ejercida por el aire sobre el alerón. (Houghton, E., Carpenter, P., Collicott, S. and Valentine, D., n.d. Aerodynamics for Engineering Students.)

#### ***2.1.10 Fuerzas en turbinas de eje vertical.***

La figura 8 muestra las fuerzas sobre un elemento de pala de una turbina de eje vertical en cada cuadrante de la revolución. Puede verse que en todos ellos se produce una fuerza de sustentación FL con una componente en la dirección de rotación. Sin embargo, el par producido varía con la posición de la pala. Esto significa que, como el número de palas NB es bajo, el par sobre el eje varía considerablemente durante cada revolución, aún con viento constante y uniformemente distribuido (Sharpe, 1990; Dessaint et al., 1986).

**Figura 8.** Fuerzas sobre un elemento de pala de una turbina de eje vertical en los distintos cuadrantes.



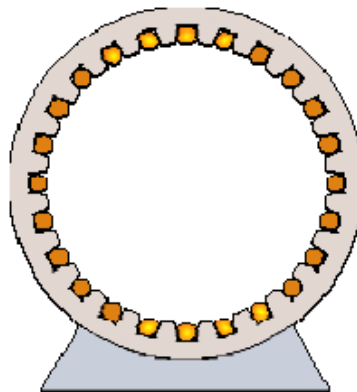
**Fuente:** Control de la calidad de potencia en sistemas de conversión de energía eólica

### 2.1.11 Generadores

Los generadores son todos aquellos dispositivos que pueden transformar algún tipo de energía en eléctrica, la más común de estas es la energía mecánica.

- Generadores eléctricos: Este tipo de generadores transforma cualquier tipo de energía en energía eléctrica utilizando el principio de Faraday que describe como un campo eléctrico forma un campo magnético y de la misma forma de genera uno al otro, pero en el otro sentido, para realizar este cambio y crear energía es necesario tener un estator y un rotor.
- Estator: *Este* componente también conocido como bobina se define comúnmente como la parte fija de una máquina (Figura 9) y es quien le transmite o absorbe la potencia eléctrica del generador.

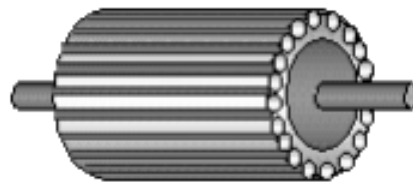
**Figura 9.** *Imagen Estator o rotor de un generador eléctrico*



**Fuente:** Maquinas rotantes, Universidad de Veracruz.

- Rotor.: Es la parte móvil de un sistema de generación de energía y esto debido a que las fuerzas externas interactúan sobre un extremo de este cuerpo generando su movimiento y así creando un campo electromagnético que energiza el estator.

**Figura 10.** *Rotor de un generador eléctrico.*

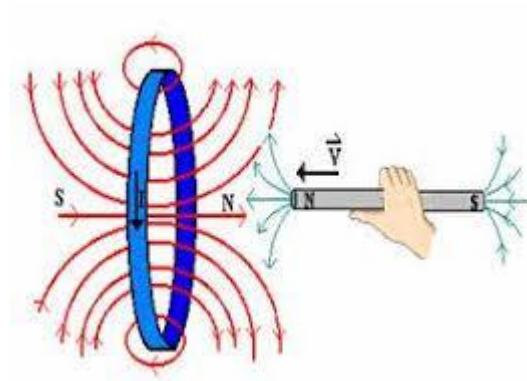


**Fuente:** Máquinas rotantes.

Generadores electromecánicos: Son aquellos generadores que producen energía eléctrica, transformando la energía mecánica (como lo es la eólica, mareomotriz, hidráulica, etc.) en energía eléctrica, esto mediante el cambio de energías y obteniendo electricidad que se puede clasificar en Corriente alterna (CA) y corriente continua (CC).

Generadores electromecánicos de corriente alterna: Este tipo de generadores crean energía eléctrica debido a que la ley de Faraday y la ley de Lenz se cumplen como se muestra en la siguiente Figura (Figura 11.), un rotor o dispositivo de cobre en movimiento genera un campo magnético que carga eléctricamente el estator.

**Figura 11.** Ley de Faraday y Lenz.



**Fuente:** Física II, Ley de Faraday, Universidad de Antioquia.

- Generadores electromecánicos de corriente continua: Estos generadores han sido casi en su totalidad sustituidos por los de corriente alterna debido a que es más complejo y costoso mantener la corriente continua, estos generadores tienen que estar en continuo funcionamiento y la intensidad energética es directamente proporcional a la velocidad de rotor.

## 2.2 Fase Propositiva

Inicialmente se da lugar a una lluvia de ideas como primera etapa del diseño creativo. Posteriormente y buscando desarrollar de forma óptima el diseño conceptual se hace necesario la implementación de un sistema que permita crear un producto que ofrezca un balance adecuado entre los requerimientos energéticos, económicos, funcionales y de calidad, tanto del diseñador como del usuario.

Con base en lo anterior se plantea el despliegue de una función calidad que, mediante la selección de diferentes alternativas de construcción, brinde un análisis más completo y aislado de las variables para tener en cuenta, convirtiendo dichas variables en criterios de diseño, para posteriormente agrupar las variables en tres subsistemas: Eléctrico, Potencia, bastidor y con base en esto seleccionar la alternativa óptima.

Partiendo de dicho análisis, se definen los siguientes requerimientos: Resistente a la corrosión, Producción de potencia dentro de un rango de 150 a 200 WATTS, Silencioso y de baja vibración, de fácil instalación, Fácil de transportar, Económico, alta mantenibilidad, Seguridad y alta funcionalidad.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de las diferentes alternativas planteadas. El detalle de esta fase y el desarrollo de la función calidad se presentan en la matriz de calidad, planteamiento y Selección de Alternativas (apéndice A).

### 2.2.1. Resultados

**Tabla 2. Resultados matriz calidad**

<b>SISTEMAS</b>	<b>TOTAL</b>	<b>ALTERNATIVA</b>
Eléctrico	492	2
Potencia	481	3
Bastidor	423	3

Partiendo de los resultados mostrados anteriormente se decide hacer un montaje de turbinahíbrida con los subsistemas ganadores, lo que concluye en la creación de una nueva alternativa y como se observa en la tabla 2 este nuevo híbrido de hélices tendrá las características

propias en la parte eléctrica del sistema 2 y la potencia y los bastidores de la alternativa número 3.

### **2.3 Fase de Prototipado**

La creación de prototipos es una parte fundamental del proceso de diseño, crear un modelo preliminar del producto que permita probarlo en un entorno controlado simulando las condiciones reales de operación, permite a los fabricantes identificar más fácilmente posibles errores y solucionarlos interactuando directamente con el diseño.

Para realizar la caracterización del comportamiento de la turbina, se implementó un sistema de pruebas con dos prototipos a menor escala elaborados en impresión 3D, con las siguientes características generales:

- Turbina Grande: 232mm de altura y 93.6mm de diámetro mayor.
- Turbina pequeña: 192.5mm de altura y 70.4mm de diámetro mayor.

Paralelo a la elaboración de dichos modelos a escala, se llevó a cabo la construcción de un túnel de viento rudimentario de tipo abierto como se muestra en la figura 12, donde se desarrollaron las pruebas, es oportuno aclarar que el túnel de viento cuenta con los respectivos correctores de flujo, así como paneles transparentes para visualizar las diferentes pruebas, para la fuente de potencia se utilizó un soplador de viento de tipo industrial al cual se le realizaron las respectivas pruebas de velocidad de viento con un anemómetro comercial.

**Figura 12.** *Túnel de Viento*

Para la sujeción de los prototipos se utilizó una base de metal de elaboración propia mostrada en la figura 13, con un soporte que permitía estabilizar el prototipo una vez puesto a prueba frente al soplador industrial y además se ajustaba a los dos tamaños de los prototipos, y permitía variar el Angulo de ataque que tenían las hélices respecto a la fuente de viento para asegurar un alcance total en las pruebas y un mayor rango de resultados mostrada en la figura 14.

**Figura 13.** *Base metálica.***Figura 14.** *Prototipo dentro del túnel de viento.*

La toma de datos es realizada por medio de tres diferentes sensores, que a través de un sistema de cables y tarjetas de Arduino se conectan tanto al modelo a escala como a una computadora portátil que registró en tiempo real las variables de RPM, voltaje y corriente del sistema.

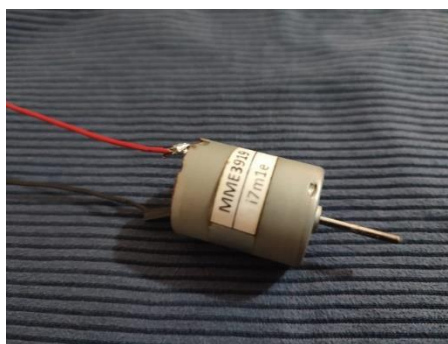
No obstante, es importante resaltar que antes de realizar las pruebas en el túnel de viento, se llevó a cabo la respectiva calibración de los sensores mediante un tacómetro digital proporcionado por el laboratorio de ingeniería química de la universidad industrial de Santander. Sumado a esto, fue necesaria la caracterización del motor generador con el fin de obtener los valores precisos de RPM y voltaje que dicho dispositivo provee una vez se le induce una corriente eléctrica.

A continuación, se presenta de manera detallada todos los elementos usados en las pruebas, así como la calibración de dichos elementos, junto con una explicación minuciosa del paso a paso de cada procedimiento.

### 2.3.1 Elementos

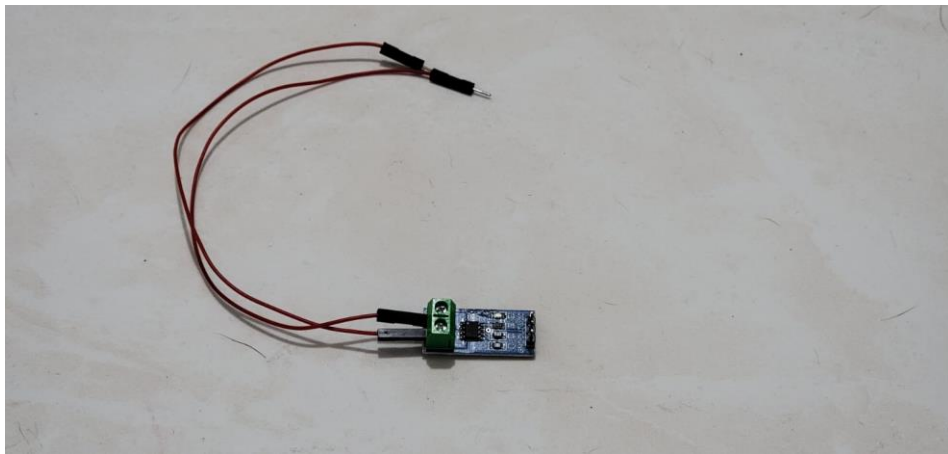
- Motor generador: El motor seleccionado es un motor DC de 9V, referencia DUMOCA MME-3919. Las características dadas por el fabricante indican que a 9V DC gira a una velocidad de 5600 rpm.

**Figura 15.** Motor-generador DC de 9V.



- Sensor de corriente: El sensor de corriente seleccionado es el Allegro® ACS712, con ruta de señal analógica de bajo ruido, tiempo de subida de 5  $\mu$ s en respuesta a la corriente de entrada de paso, ancho de banda de 80 kHz, error de salida total 1.5% a  $T_A=25^\circ$ , resistencia interna del conductor de 1,2 m $\Omega$ , operación de suministro único de 5V, sensibilidad de salida de 66 a 185 mV/A, tensión de salida proporcional a las corrientes AC O DC.

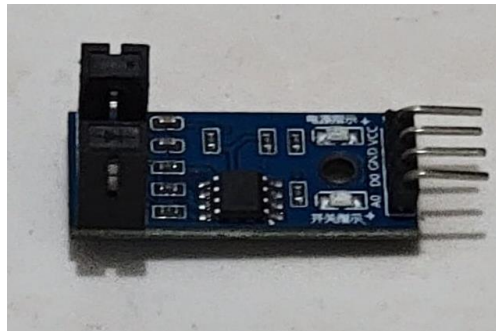
**Figura 16.** *Sensor de Corriente.*



- Sensor de voltaje: El sensor de voltaje seleccionado es el FZ0430 es un módulo bastante simple, el cual consiste en un divisor de tensión conformado por dos resistores uno de 7,5K y uno de 30K, este solo puede medir tensión en DC.

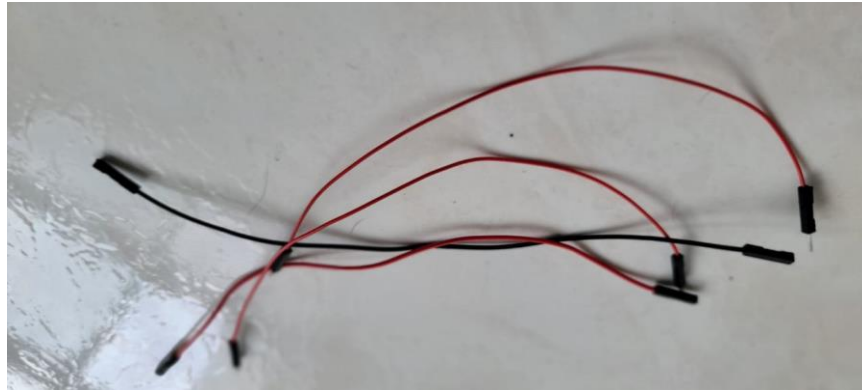
**Figura 17.** *Sensor de Voltaje.*

- **Sensor RPM:** Para medir los rpm del sistema se usó un módulo de sensor de velocidad f249 tipo herradura KLH-512, el cual contiene un sensor infrarrojo, que consta de un emisor y un receptor en cada costado, al interrumpir el haz de luz el voltaje de salida lógico cambia a cero lógico (Low), y cuando el haz pasa con normalidad el módulo arroja una salida de un uno lógico (High).

**Figura 18.** *Sensor de RPM.*

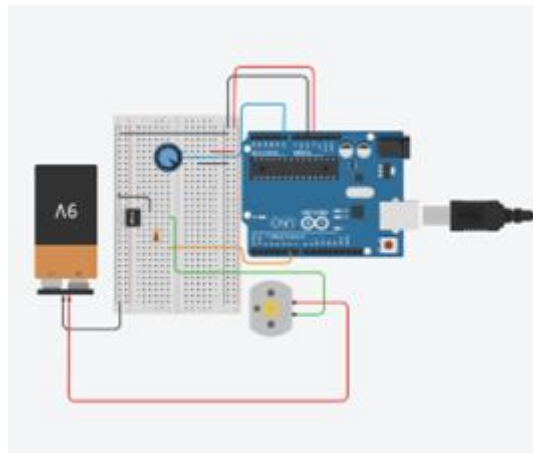
Cableado: Cable para protoboard jumper de 15 cm, flexibles, con distinción hembra-hembra, macho-macho, macho-hembra.

**Figura 19.** Cables para protoboard.



- Variador de voltaje: La regulación del voltaje se hizo mediante un esquema de fácil construcción, potenciómetro de 20Kohm, resistencia de 1 Kohm y un regulador de voltaje LM317T.

**Figura 20.** Esquema representativo del regulador de voltaje.



**Fuente:** <https://www.tinkercad.com/>

**Figura 21.** *Regulador de voltaje*

- **Batería:** Para las pruebas se usó la batería 9 voltios modelo 6F22 de carbón, zinc, magnesio marca Tronex.

**Figura 22.** *Batería de 9V.*

- **Arduino:** Para ayudar a la medición seleccionamos el Arduino UNO R3, una placa de microcontrolador basada en ATmega328P. tiene 14 pines de entrada/salida digital (de los cuales 6 pueden usarse como salida PWM), 6 entradas analógicas, un resonador de cerámica de 16 MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, un cabezal ICSP y un botón de reinicio.

**Figura 23.** *Arduino UNO R3 versión DIP*



*Fuente: proyectoarduino.com*

- **Pesas:** Para tener una precisión adecuada se usó un juego de pesas de calibración de 17 piezas en acero inoxidable.

**Figura 24.** *Pesas de Laboratorio.*



*Fuente. Abdlaboatorios.com*

- **Poleas:** Se usó un juego de poleas comercial de plástico de diferentes tamaños para así tener una mayor variedad a la hora de realizar los experimentos

**Figura 25. Poleas.**

- Tacómetro: Para la calibración se usó un tacómetro digital proporcionado por el laboratorio de ingeniería química de la universidad industrial de Santander, de referencia DT2236B este dispositivo opera mediante la técnica laser de unión y combina Tach de la foto (RPM) y el Tach de contacto (RPM, m/min).

**Figura 26. Tacómetro.**

**Fuente:** [ingecomsas.com](http://ingecomsas.com)

- Multímetro Digital: Este dispositivo fue utilizado para tomar algunas mediciones como la corriente y el voltaje en todas las pruebas y este es marca: Techman referencia: TM-102C y cuenta con 8 funciones y un voltaje DC: 200m/2000mV/20/200/1000V un voltaje AC:

200/750V, corriente DC: 2000u/20m/200m/10V, resistencias: 200/2000/20K/200K/2000K $\Omega$ , prueba de continuidad, prueba de Diodo.

**Figura 27.** *Multímetro digital Techman.*



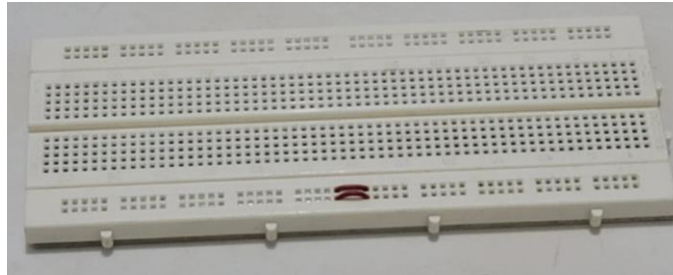
- Anemómetro: Con este dispositivo se midieron las velocidades promedio del viento que generaba el soplador utilizado para las pruebas, estas velocidades fueron tomadas a diferentes distancias con respecto al punto de generación. Marca: UNI-T, referencia: UT363, rango: 0-30m/s, tasa de muestra de datos: 0.5s e indica dato máximo y dato promedio.

**Figura 28.** *Anemómetro UNI-T.*



- **Protoboard:** Esta es utilizada para realizar las conexiones respectivas de los dispositivos electrónicos que se usaron en las pruebas con el túnel de viento, las pruebas de potencia y torque del motor generador. Marca: TresD Print Tech, modelo: MB-102, matriz: 14x64, peso: 121.3 gr, dimensiones: 172 x 64 x 8,5 mm, material: ABS.

**Figura 29.** Protoboard.



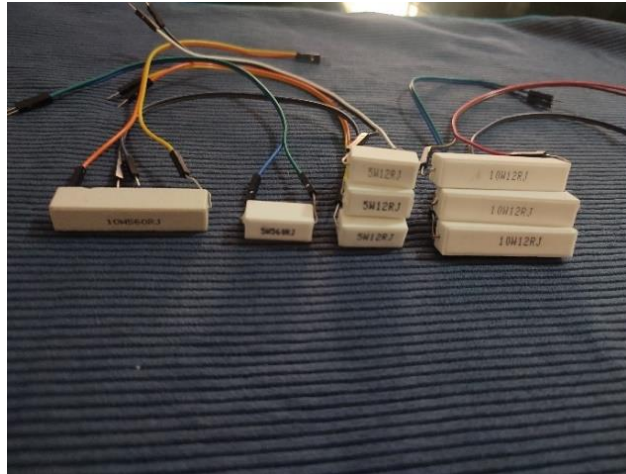
- **Soplador:** El dispositivo fue utilizado en las pruebas para generar una corriente de aire constante la cual nos permitía mantener los modelos a una velocidad constante. Marca: LG, modelo: B156V, velocidad sin carga: 0-160000 rpm, peso: 2700 gr, volumen de aire: 0-2.8 m<sup>3</sup>/min, presión: 0-560 mm de agua.

**Figura 30.** Soplador de Viento LG.



- Resistencias: Se usaron 4 Resistencias para las pruebas, las cuales fueron diferentes una de la otra gracias a la ohmiaje que puede llegar a soportar. Material: cerámica, propiedades: 5W 5RJ, 5W 12RJ, 10W 5RJ, 10 W 12RJ.

**Figura 31.** Resistencias de prueba.



### 2.3.2 Calibración de los equipos

- Sensor de RPM: Como ya se mencionó anteriormente para la toma de datos de RPM se utilizó un código Arduino, que registraba en tiempo real el valor de RPM que el sensor indicaba, con el fin de corroborar la veracidad de dichos datos se llevó a cabo el siguiente procedimiento:
  - Mediante una fuente de voltaje, se hace girar el motor generador
  - Se registra en tiempo real el valor de RPM que marca el sensor, en el computador
  - Se realiza la medición de las RPM con el tacómetro digital
  - Se comparan los valores obtenidos

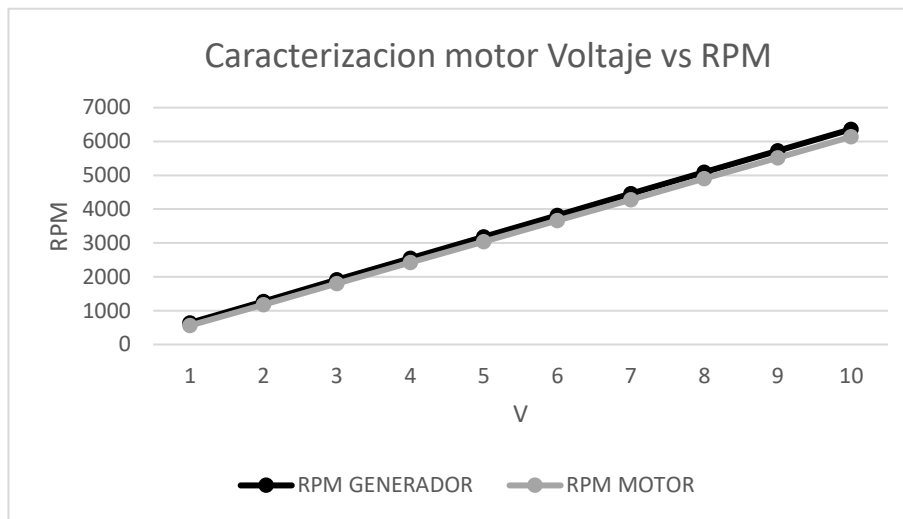
- Se procede a realizar cambios en el código Arduino hasta que nuestros valores coincidan con los valores reales obtenidos con el tacómetro digital
- Motor – Generador: Son necesarios los valores de torque que el motor puede producir, y ya que no se cuenta con dichos valores por parte del fabricante, se llevó a cabo la caracterización del motor, siguiendo el paso a paso mostrado a continuación:
- Mediante una fuente de voltaje variable, se hace girar el motor generador
  - Se conecta el eje del motor a una polea que en su extremo tiene una balanza (Previamente tabulada y pesada)
  - Se colocan diferentes pesos (previamente definidos y tabulados) en la balanza hasta que se logre que el sistema esté en equilibrio y el motor no pueda girar
  - Se registran los diferentes valores del peso que logra dicho equilibrio para cada uno de los diferentes valores de voltaje
  - Se tabulan los resultados obtenidos

Se asume el aire sin fricción y con los valores de pesos, se obtienen los valores de torque que produce el motor para diferentes voltajes.

La siguiente tabla muestra los datos de la calibración del motor generador comparando de su versión como generador y como motor.

**Tabla 3. Caracterización del motor-generador.**

	RPM	RPM
VOLTAJE	GENERADOR	MOTOR
1	640,2104	561,875
2	1275,9404	1181,635
3	1911,6704	1801,395
4	2547,4004	2421,155
5	3183,1304	3040,915
6	3818,8604	3660,675
7	4454,5904	4280,435
8	5090,3204	4900,195
9	5726,0504	5519,955
10	6361,7804	6139,715

**Tabla 4. Voltaje vs RPM motor-generador**

### 2.3.3 Elaboración de componentes

- Túnel de viento: Este componente es esencial para la realización de las pruebas, nos provee de un ambiente controlado y adecuado para la toma de datos, a continuación, el paso a paso de su realización:

Materiales usados:

- Cartón compacto
- Cinta Transparente
- Cinta industrial gris
- Pegamento
- Tijeras
- Bisturí
- Pintura blanca y verde
- Acetato transparente

Construcción:

- 1 Se toman las diferentes medidas y se realizan los respectivos cortes y uniones, dejando los respectivos espacios para los paneles que permiten visualizar el interior del túnel
- 2 Con retazos de cartón se realizan pequeños tubos que llevaran a cabo el papel de correctores de flujo en la entrada del túnel.
- 3 Se realiza un compartimiento en forma de tolva para la entrada del soplador y así no generar interferencia del viento externo.
- 4 Se realizan todas las uniones de los componentes previamente mencionados para u darle la forma final al túnel de viento como se muestra en la siguiente figura cuyas dimensiones son:  
  
40 cm de alto x 35 cm de ancho x 100 cm de profundidad.

#### ***2.3.4. Diseño e impresión de prototipos.***

Una vez realizado el túnel de viento, se procede a crear modelos a escala de una supuesta turbina, ya que con los datos de las medidas podemos tener un punto de referencia para el tamaño de los modelos.

Para la elaboración de los prototipos a escala se realizó un diseño en SolidWorks teniendo en cuenta los requerimientos mencionados en el apéndice matriz calidad (Apéndice A), una vez diseñado se procede a la impresión con material plástico en tres dimensiones como se muestra en la figura 29.

Bajo unas condiciones similares al prototipo final esperado ya que por medio de estos se realizaron pruebas con el fin de analizar su comportamiento y efectuar un futuro rediseño, partiendo de lo anterior, se realizaron dos turbinas con impresión 3D las cuales se catalogarán como la turbina grande y la turbina pequeña, la primera de ellas tiene un alto de 21 centímetros y

un diámetro máximo de 9.37 centímetros, mientras la turbina pequeña tiene una altura de 16.66 centímetros y un diámetro máximo de 7.06 centímetros.

**Figura 32.** *Turbinas impresas en 3D.*



### **2.3.5. Bases de los prototipos**

Con el fin de estabilizar los prototipos dentro del túnel para las pruebas se elaboraron diferentes bases, una de ellas fue en hierro laminado de 20cmx20cm la cual ayuda a estabilizar las impresiones y contrarresta la vibración de los modelos. Las otras bases fueron realizadas en madera y las cuales ayudaron a generar inclinaciones dentro del túnel de viento para crear ángulos de ataque en las pruebas mencionadas posteriormente como se muestran en el apéndice B, Tablas de resultados de las pruebas en el túnel de viento.

### **2.3.6. Realización de pruebas**

El diseño de experimentos que se planteó para la realización de pruebas consiste en ubicar el modelo a escala dentro del túnel de viento y poner en marcha el soplador industrial con el fin de hacer girar la turbina y registrar en tiempo real los valores de RPM, Voltaje y corriente dentro

de un rango de tiempo de 30 segundos, las variables que se definieron serian modificadas para cada experimento son: velocidad del viento, ángulo de ataque de la turbina y carga.

La carga para este fin se reconoce como la oposición al movimiento generada al conectar diferentes resistencias en el circuito. Con el fin de reducir el número de variables implicadas y obtener valores más precisos, se realizaron pruebas conectando la carga en serie y en paralelo, donde se pudo determinar que la mayor incidencia de estas resistencias sobre la turbina ocurre cuando se hace una conexión en paralelo, por tanto, para futuras referencias las pruebas con carga se realizaron en paralelo.

El flujo de viento que el soplador industrial puede suministrar depende de que tanto se oprime el gatillo de este, esto dificulta garantizar un mismo nivel de presión entre una prueba y otra debido al factor humano implicado en proporcionar dicha presión, por tanto, se opta por realizar un bloqueo del gatillo con un sistema propio del soplador, y variar la velocidad del viento modificando la distancia entre el modelo a escala y el soplador.

Usando un anemómetro comercial, se mide la velocidad del viento a diferentes distancias del soplador, y se establecen estos valores de velocidades, como datos de trabajo en las pruebas dentro del túnel.

El procedimiento que se usó para la toma de datos durante los experimentos es el siguiente:

- Ubicar en un lugar seguro y estable el túnel de viento y establecer la correcta conexión del cableado y los diferentes componentes que forman parte del circuito como lo son: cables, sensores, Arduino, protoboard, computador entre otros. Posteriormente asegurar el modelo a escala a su base metálica y ubicarlo en el lugar seleccionado para realizar la prueba.

- Poner en marcha la toma de datos del Arduino capturando un dato cada segundo y encender el soplador industrial.
- Detener la toma de datos y apagar el soplador industrial después de transcurridos los 30 segundos.

Se realizaron pruebas sin carga solo con el fin de estudiar el comportamiento del prototipo, dichas pruebas no proporcionan datos que puedan ser usados en la obtención de variables de trabajo y de diseño y por tanto no son tenidos en cuenta en la realización de cálculos, las diferentes configuraciones que se usaron en los experimentos, tanto para la turbina grande como la pequeña se muestran en la tabla 5.

**Tabla 5. Tablas de pruebas de turbina grande.**

Experimentos realizados			
Número de prueba	Velocidad del viento [m/s]	Angulo de Ataque [°]	Carga
1	20,5	0	5W12RJ
2	17	0	5W12RJ
3	20,5	0	10W12RJ
4	17	0	10W12RJ
5	20,5	0	10W560RJ
6	17	0	10W560RJ
7	20,5	0	5W560RJ
8	17	0	5W560RJ
9	20,5	30	5W12RJ

10	17	30	5W12RJ
11	20,5	30	10W12RJ
12	17	30	10W12RJ
13	20,5	30	10W560RJ
14	17	30	10W560RJ
15	20,5	30	5W560RJ
16	17	30	5W560RJ
17	20,5	45	5W12RJ
18	17	45	5W12RJ
19	20,5	45	10W12RJ
20	17	45	10W12RJ
21	20,5	45	10W560RJ
22	17	45	10W560RJ
23	20,5	45	5W560RJ
24	17	45	5W560RJ

Una vez finalizadas todas las pruebas, se tabulan y se promedian dichos datos como se muestra en el anexo B. Se procede a calcular torque y potencia mediante las siguientes ecuaciones.

#### ECUACION DE TORQUE

$$\tau = F * d \quad (5)$$

$$F = m * g \quad (6)$$

$$d = r \quad (7)$$

$$\tau = m * g * r \quad (8)$$

Donde  $\tau$  = Torque.

F = Fuerza.

d = distancia del centro del eje a la parte más externa de la turbina.

m = Masa del sistema.

g= Gravedad.

r = radio de la hélice externa.

#### ECUACION DE TORQUE CON POTENCIAL ELECTRICO

$$W = \frac{2\pi}{60} * \tau * n \quad (9)$$

$$\tau = \frac{W * 30}{\pi * n} [Nm] \quad (10)$$

Donde W = Potencial eléctrico en watts.

$\tau$  = Torque.

n = Revoluciones por minuto.

Para poder complementar las pruebas y tener resultados acertados hicimos el uso de cargas eléctricas, para esto por medio de las siguientes ecuaciones hallamos la potencia eléctrica consumida por estas cargas (resistencias de potencia).

$$P_c = V_r * I_r \quad (11)$$

$$I_r = \frac{V_r}{R} \quad (12)$$

Donde P<sub>c</sub> = Potencial eléctrico consumido en watts.

$V_r$  = Voltaje de la resistencia

$I_r$  = Corriente consumida por la resistencia

$R$  = Resistencia

Para el diseño y principalmente la caracterización de una turbina eólica se emplea dos conceptos importantes.

El primero de ellos es el rendimiento aerodinámico de la turbina ( $C_p$ ) término que relaciona la potencia entregada al eje de la turbina transmitida desde los alabes y la energía contenida en la masa de aire que cruza por el área frontal de la turbina como se muestra en la ecuación 13.

$$C_p = \frac{P_o}{\frac{1}{2} * \rho * v^3 * A} \quad (13)$$

Donde  $C_p$  = Rendimiento aerodinámico de la turbina.

$P_o$  = potencia en el eje de la turbina.

$\rho$  ( $\rho$ ) = densidad del airea condiciones de Bucaramanga.

$v$  = velocidad del aire.

$A$  = área que atraviesa el fluido a través del rotor.

Otro factor para tener en cuenta para el diseño de una turbina eólica es el Coeficiente de momento ( $C_m$ ). El cual es una relación entre un momento aerodinámico y un momento de referencia que es generado por la presión dinámica sobre la longitud media del alabe.

$$C_m = \frac{T}{\frac{1}{2} * \rho * v^2 * A * R} \quad (14)$$

Donde  $C_m$  = coeficiente de momento

$T$  = par en el eje de la turbina

$A$  = área que atraviesa el fluido a través del rotor

$R$  = radio de rotación de la turbina

$\rho$  = densidad del airea condiciones de Bucaramanga

$v$  = velocidad del aire

El segundo concepto que se debe definir es la relación de velocidades (TSR) por sus siglas en inglés “Tip Speed Ratio” que representa la relación entre la velocidad tangencial en el extremo de la turbina debida al giro de esta y la velocidad del viento incidente en la turbina, como se detalla en la siguiente ecuación:

$$TSR = \frac{\omega * R}{v} \quad (15)$$

Donde TSR = El Tip Speed ratio o coeficiente de velocidad

$\omega$  = velocidad de rotación de la turbina

$v$  = velocidad del aire

$R$  = radio de rotación de la turbina

Relacionando el TSR y  $C_p$  se puede caracterizar el comportamiento de la turbina, sin importar el tamaño de esta, para posteriormente optimizarla y acercarse al límite de Betz. El

límite de Betz indica que cualquier turbina eólica no puede aprovechar más de un 59,3 % de la energía cinética del viento.

Partiendo de lo anteriormente mencionado y teniendo en cuenta las características del generador a utilizar en escala real se utiliza una iteración para encontrar un valor geométrico de la turbina que nos pueda proporcionar un valor de potencia eléctrica requerido. A continuación, se muestran las posibles dimensiones para la construcción de un prototipo a escala real.

**Tabla 6. Dimensiones obtenidas para la selección de tamaño de la turbina eólica.**

<b>RPM</b>	<b>AREA [m<sup>2</sup>]</b>	<b>RADIO [m]</b>
20	23,93	0,8699
30	23,93	0,5666
50	23,93	0,3399
80	23,93	0,2125
100	23,93	0,17
200	23,93	0,08499
250	23,93	0,06799
450	23,93	0,03777
750	23,93	0,02266
950	23,93	0,01789

#### **2.4. Fase de desarrollo**

Partiendo de las fases anteriores y el cálculo de las dimensiones generales de la turbina, se llevará a cabo un diseño a detalle que incluirá todo lo necesario y pertinente para la construcción

en tamaño real agregando un manual de mantenimiento que permita a futuros proyectos una base sólida de partida para la construcción de este.

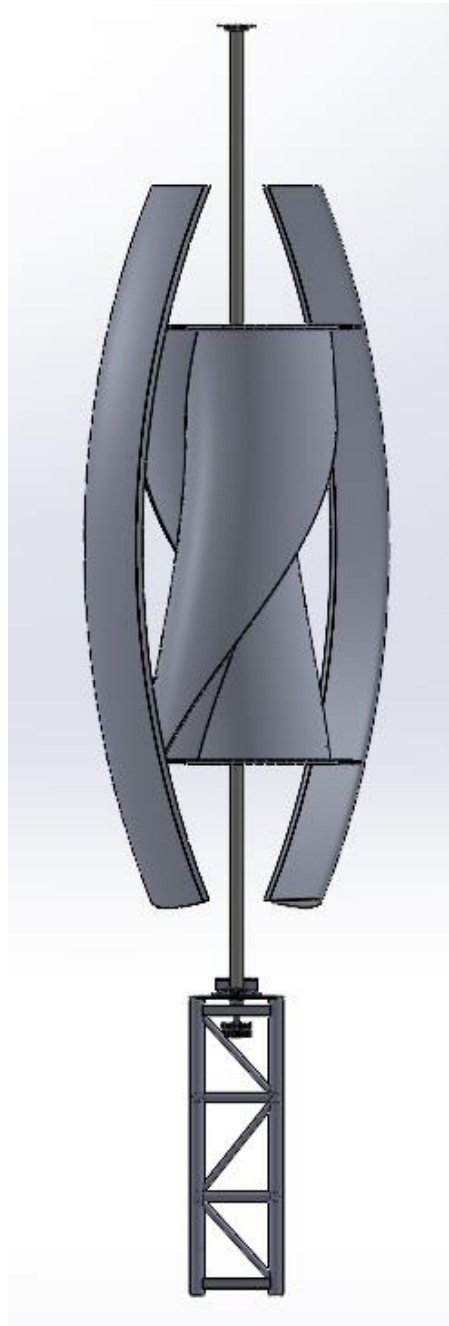
Con base en lo anteriormente mencionado se procede a seleccionar el material de construcción del modelo a escala real, tomando en cuenta los requerimientos propuestos, las dimensiones que se eligieron para el modelamiento de la turbina serán corroboradas o refutadas una vez se haya hecho el diseño del eje.

Los materiales elegidos como posibles candidatos en la construcción de la turbina son:

- Acero inoxidable ideal para situaciones donde se requiera soportar grandes esfuerzos y el material.
- Aluminio.
- Fibra de carbono.

Se llevo a cabo la construcción del posible diseño final con ayuda de computadores y el software de modelamiento en 3D SolidWorks, con el objetivo de obtener valores geométricos y de fuerzas las cuales serán usadas en el diseño del eje. Como se muestra en la figura 30.

**Figura 33.** *Diseño final del prototipo a fabricar.*



#### **2.4.4. Diseño del eje**

Según los autores, Bernhard j. Hamrock, Bo Jacobson; Steven R. Schmid el proceso de diseño para cualquier eje es el siguiente:

- Elaborar un diagrama de cuerpo libre, en el cual sean reemplazados los diferentes elementos de máquinas que interactúan con el eje por su equivalente en carga estática o de torsión.
- Se elabora el diagrama de momentos flectores para los diferentes planos
- Desarrollar un diagrama de par de torsión
- Se establece los puntos de falla, es decir aquel lugar a lo largo del eje en donde los momentos flectores y el par de torsión son mayores.
- Llevar a cabo la verificación de los criterios de construcción mediante el uso de diferentes teoremas. De la siguiente forma:
  - Para materiales dúctiles usar la teoría del esfuerzo cortante máximo (MSST por sus siglas en inglés) o la teoría de la energía de distorsión (DET por sus siglas en inglés).
  - Para materiales frágiles usar la teoría del esfuerzo normal máximo (MNST por sus siglas en inglés), la teoría de la fricción interna (IFT por sus siglas en inglés) o la teoría modificada de Mohr.

El respectivo diagrama de cuerpo libre, esfuerzo flector y par de torsión, para el modelo en cuestión se encuentra en el apéndice D, por otro lado, para el caso de estudio, la verificación se realizará usando la teoría de Von Mises.

Según los resultados obtenidos (ver apéndice C) las posibles dimensiones elegidas, así como los materiales seleccionados, cumplen a cabalidad con los requerimientos estimados, por tanto, se procede a realizar la selección de los rodamientos a usar.

La selección de los rodamientos se llevó a cabo, apoyados en el catálogo digital de la página SKF. Como se muestra en el apéndice C.

### **3. Manual de funcionamiento y mantenimiento**

Es importante como diseñador, ofrecer al usuario un manual de mantenimiento y funcionamiento a manera de guía gráfica que garantice el correcto uso del modelo y la seguridad del usuario.

Dicho manual se muestra en el apéndice F.

#### 4. Análisis de costos

Se realizó una cotización para este proyecto, en donde se investigaron los costos de distintos materiales y mano de obra, más específicamente dentro del área metropolitana de Bucaramanga con el fin de hallar un valor aproximado en la construcción de este. En las tablas 7-12 se observa más a detalle los valores aproximados del proyecto, todos estos valores son estimados y pueden llegar a variedad dependiendo de la demanda y oferta que tenga el proveedor así mismo, los materiales a utilizar y si se considera realizar la fabricación en una región o país diferente.

**Tabla 7.** *Inversión estimada de materiales e insumos de manufactura.*

<b>Concepto</b>	<b>Fuente</b>	<b>Valor estimado</b>
Subsistema de hélices	Mercado metalmecánico-área metropolitana de Bucaramanga	\$25.550.089 COP
Subsistema de frenado	Mercado nacional	\$620.000 COP
Subsistema de soporte	Mercado metalmecánico-área metropolitana de Bucaramanga	\$ 4.280.000 COP
Subsistema generador	Mercado internacional	\$ 1.200.000 COP
Ensamblaje	Mercado nacional	\$ 4.000.000 COP
Transporte	Mercado nacional	\$ 800.000 COP
	<b>TOTAL</b>	<b>\$ 34.050.000 COP</b>

**Tabla 8.** *Inversión estimada en el subsistema de hélices.*

<b>Concepto</b>	<b>Valor estimado</b>
Eje principal	\$ 2.000.000 COP
Hélices externas	\$ 5.000.000 COP
Hélices internas	\$ 5.000.000 COP
Tapas	\$ 10.600.000 COP
Rodamiento 6013	\$ 185.759 COP
Rodamiento 30313	\$ 329.330 COP
Mano de obra	\$ 2.400.000 COP
Envío de los rodamientos	\$ 35.000 COP
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 25.550.089 COP</b>

**Tabla 9.** *Inversión estimada en el subsistema de frenado.*

<b>Concepto</b>	<b>Valor estimado</b>
Disco Flotante universal	\$ 230.000 COP
Bomba de freno con deposito liquido	\$ 150.000 COP
Caliper de doble pistón	\$ 150.000 COP
Accesorios	\$ 70.000 COP
Envío del kit de frenado	\$ 20.000 COP
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 620.000 COP</b>

**Tabla 10.** *Inversión estimada del subsistema de soporte.*

<b>Concepto</b>	<b>Valor estimado</b>
Guayas	\$ 1.280.000 COP
Base	\$ 2.300.000 COP
Mano de obra	\$ 700.000 COP
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 4.280.000 COP</b>

**Tabla 11.** *Inversión estimada del subsistema generador.*

<b>Concepto</b>	<b>Valor estimado</b>
Batería 12v 200A	\$ 600.000 COP
Generador	\$ 1.200.000 COP
Transformador	\$ 254.900 COP
Instalación	\$ 600.000 COP
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 2.654.900 COP</b>

**Tabla 12.** *Inversión estimada global del proyecto.*

<b>Concepto</b>	<b>Fuente</b>	<b>Valor estimado</b>
Subsistema de hélices	Mercado metalmecánico-área metropolitana de Bucaramanga	\$25.550.089 COP
Subsistema de frenado	Mercado nacional	\$620.000 COP
Subsistema de soporte	Mercado metalmecánico-área metropolitana de Bucaramanga	\$ 4.280.000 COP

Subsistema generador	Mercado internacional	\$ 2.654.900 COP
Ensamblaje	Mercado nacional	\$ 4.000.000 COP
Transporte	Mercado nacional	\$ 800.000 COP
<hr/>		
	TOTAL	\$ 37.904.989 COP
Imprevistos	10%	\$ 3.790.499 COP
	<b>TOTAL, GLOBAL</b>	<b>\$ 41.695.488 COP</b>
<hr/>		

## 5. Conclusiones

Se diseñó una turbina de eje vertical que cuenta con rotores híbridos tipo Troposkien y helicoidal los cuales cumplen la necesidad energética de un hogar colombiano, donde su consumo eléctrico está entre los 150-200 Kw/h como se puede ver en el apartado 2.1.1.

Se construyeron diferentes prototipos para la experimentación de estos con el fin de establecer un comportamiento y tendencia para poder usar cálculos que permitieron llegar a una escala real. Se realizaron cambios en el diseño y geometría resultante del prototipado puesto que se vio afectada la experimentación ya que gran parte de la geométrica era muy simétrica, lo que causaba que el aire generara fuerzas opuestas y dieran una cancelación de estas.

En las pruebas realizadas junto con carga eléctrica y mecánica, se determinó que a mayor carga el subsistema del motor-generador demoraba mayor tiempo en iniciar el movimiento, pero una vez en iniciaba desplazamiento este llegaba rápidamente a un punto de equilibrio dinámico, manteniendo una similitud en las revoluciones generadas.

El límite de Betz nos habla de una eficiencia mecánica generada gracias a la interacción con el viento, el prototipo de turbina desarrollado en este proyecto muestra un porcentaje de 28.9 % con respecto al 59.3% máximo teórico como se observa en el apéndice D.

## 6. Recomendaciones

Al encontrarse debajo del área de trabajo de la turbina se recomienda utilizar implementos de seguridad como lo son cascos, protección para el rostro y oídos, guantes, calzado de seguridad, chaleco reflectivo, llevar siempre consigo botiquín de primeros auxilios.

Tener en cuenta que, para el trabajo a fondo sobre las turbinas eólicas de eje vertical, la teoría es escasa y se requiere una gran experimentación por lo que se debe contar con recursos económicos y de tiempo para poder ejecutar un plan optimo.

Los costos en la construcción del prototipo a escala real pueden variar dependiendo de la asequibilidad a los materiales necesarios para la fabricación, a su vez, tener en cuenta los costes por mano de obra, y lugar específico en donde se localizará la turbina.

En el caso de una implementación se sugiere baterías de almacenamiento de ion Litio con el fin de suplir la demanda energética cuando la producción no sea la suficiente debido a una baja intensidad del viento por condiciones meteorológicas.

### Referencias Bibliográficas

Planas y Cárdenas (2019). *La matriz energética de Colombia se renueva*. Extraído el 15 de mayo del 2023, de:

<https://blogs.iadb.org/energia/es/la-matriz-energetica-de-colombia-se-renueva/#:~:text=De%20esta%20capacidad%20instalada%2C%20el,%2C%20solar%2C%20y%20biomasa>

Ministerio de Minas y Energía (2023). *Energía eléctrica*. Extraído el 16 de mayo del 2023, de:

<https://www.minenergia.gov.co/es/misional/energia-electrica-2/>

Ministerio de Minas y Energía (2022) *Proyecciones de demanda UPME*. Extraído el 16 de mayo del 2023, de: <https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia>

Tang, Y. and Yu, T. (2013). “*Recent developments in wind turbine technologies with focus on offshore vertical axis wind turbine.*” Renewable Energy.

Wright, J. R., And Wood, D. H. (2016). “*Wind energy Explained; Theory, Desing and Application.*” Jhon Wiley and Sons.

Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., And Bossanyi, E. (2011). “*Wind Energy Hanndbook.*” Jhin Wiley and Sons.

Paraschivoiu, I. (2002). “*Wind Turbine Desing: With Emphasis on Darrieus comcept.*” Polytechnic International Press.

Bernhard j. Hamrock, Bo Jacobson; Steven R. Schmid. (2004). “*Elementos de máquinas*”, Pagina 425 y 426, capitulo 11.

Bogotá y Karlsruhe (2019). *Primer balance de Energía Útil para Colombia y cuantificación de las Perdidas energéticas relacionadas y la brecha de eficiencia energética*. Extraído el 05 de agosto del 2023, de:

[https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/Balance\\_energia\\_util/BEU-Residencial.pdf](https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/Balance_energia_util/BEU-Residencial.pdf)

IDEAM (2018). *Datos de vientos en Santander*. Extraído el 06 de agosto del 2023, de:

<http://www.ideam.gov.co/>

Anderson J. (2017). *“Fundamental of aerodynamics”*. McGraw-Hill Education.

## Apéndices

### Apéndice A. Matriz de Calidad. Planteamiento y Selección de Alternativas.

Para la selección del diseño óptimo, se desarrolló una matriz calidad por cada subsistema, con el fin de encontrar los factores más importantes con su respectiva ponderación para así tomar una decisión de la alternativa óptima y trabajar con la ganadora. Los valores dados se evalúan mediante la siguiente puntuación:

- 1 al 10 siendo 1 el menos importante y 10 la más importante.
- Se tomará cada alternativa y se dará un nivel de importancia que irá de 1 a 10 (siguiendo la escala mencionada anteriormente), una vez se le asigne un valor de importancia a la alternativa (1, 2 y 3) con respecto al requerimiento, este valor se multiplicará junto con el primero y este resultado se le realizará una sumatoria con respecto a los demás resultados.
- El valor mayor de la sumatoria será el de la alternativa ganadora.

#### Matriz de Calidad para el Subsistema de Potencia

Las necesidades del consumidor y especificaciones del diseñador se muestran en la tabla 1.

- Seguridad (S): garantizar el bienestar del operador, fauna u otro personal autorizado que ingrese al área de la turbina.
- Económica (E): el valor de la turbina debe ajustarse a un presupuesto inferior o cercano al mercado actual.
- Funcionalidad (F): cumplir con las necesidades del consumidor.
- Producción (P): garantizar una producción de 150-200 Watts.

- **Mantenibilidad (M):** capacidad de mantener la maquina en condiciones óptimas de funcionamiento.
- **Resistencia a la corrosión (R.C.):** que conserve sus características ya que va a estar a la intemperie.
- **Confiabilidad (C):** asegura en funcionamiento de la máquina.
- **Simplicidad del diseño (S.D.):** facilidad de integrar los sistemas.
- **Fácil de transportar (F.T.):** capacidad para llevarla a lugares inhóspitos ya que estos son los de máxima eficiencia.
- **Fácil de instalar (F.I.):** permite una fácil puesta en marcha de la máquina.

**Tabla 1.** Matriz calidad del subsistema de potencia

	Valor	Alternativa 1		Alternativa 2		Alternativa 3	
		Imp.	Pon.	Imp.	Pon.	Imp.	Pon.
S	10	8	80	8	80	9	90
E	9	8	72	6	54	6	54
F	9	7	63	9	81	9	81
P	8	7	56	8	64	9	72
M	7	8	56	7	49	6	42
R.C.	7	7	49	8	56	8	56
C	9	8	72	8	72	8	72
S.D.	7	3	21	4	28	6	42
F.T.	6	4	24	6	36	4	24
F.I.	5	4	20	8	40	6	30
<b>RESULTADOS</b>			<b>513</b>		<b>560</b>		<b>563</b>

Como se observa el resultado de la matriz calidad del subsistema de potencia el ganador es el propuesto por la alternativa número 3.

### Matriz de Calidad para el Subsistema Eléctrico

A continuación, se realiza un proceso similar anterior para obtener un subsistema eléctrico adecuado a los requerimientos de consumidor como se muestra en la tabla 2.

- Seguridad (S): el sistema debe cumplir los parámetros necesarios para un funcionamiento estable y seguridad de los operarios.
- Producción (P): garantizar una producción de 150-200 Watts.
- Confiabilidad (C): garantizar que esta tenga un funcionamiento adecuado.
- Mantenibilidad (M): requerimiento bajo la intervención para mantener las condiciones funcionales del trabajo.
- Económica (E): el valor del sistema debe ajustarse a un presupuesto adecuado.
- Fácil de transportar (F.T.): garantizar que sea compacto para evitar daños en su transporté.

**Tabla 2.** *Matriz calidad del subsistema eléctrico*

	Valor	Alternativa 1		Alternativa 2		Alternativa 3	
		Imp.	Pon.	Imp.	Pon.	Imp.	Pon.
S	10	10	100	8	80	8	80
P	10	6	60	9	90	5	50
C	9	8	72	8	72	6	54
M	8	5	40	6	48	6	48
E	8	8	64	9	72	7	56

F.T.	9	7	63	8	72	7	63
RESULTADOS			399			434	351

Como se observa el resultado de la matriz calidad del subsistema de potencia el ganador es el propuesto por la alternativa número 2.

### Matriz de Calidad para el Subsistema de Soporte

En la tabla 3, se muestra la matriz realizada para las especificaciones del Soporte.

- Seguridad (S): garantizar que sea lo suficientemente resistente para el soporte de la máquina y también soportar al operario en la realización de mantenimiento.
- Fácil de transportar (F.T.): facilidad a la hora de transportar al área de ensamblaje.
- Resistencia a la corrosión (R.C.): asegurar la calidad de los materiales para estar a la inclemencia de los diferentes climas.
- Confiabilidad (C): seguridad de que cumplirá su función.
- Económica (E): el valor debe ajustarse a un presupuesto.
- Alta durabilidad (A.D.): garantizar el uso de los mejores materiales para un trabajo duradero.

**Tabla 3.** Matriz calidad del subsistema de Soporte

	Valor	Alternativa 1		Alternativa 2	
		Imp.	Pon.	Imp.	Pon.
S	10	9	90	9	90
F.T.	8	7	56	7	56
R.C.	9	8	72	8	72

C	9	9	81	9	81
E	7	7	49	7	49
A.D.	9	8	72	9	81
<b>RESULTADOS</b>			<b>420</b>		<b>429</b>

Como se observa el resultado de la matriz calidad del subsistema de soporte el ganador es el propuesto por la alternativa número 2.

### **Planteamiento de Alternativas**

A continuación, se presentan las alternativas que se tuvieron en cuenta para realizar un despliegue de la función calidad (QFD) con el fin de seleccionar la alternativa más adecuada que diera una respuesta a los requerimientos del consumidor y del diseñador.

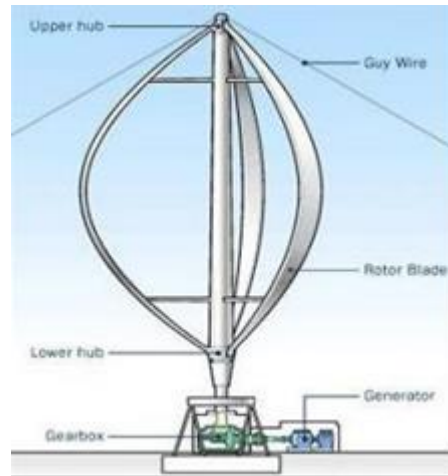
### **Alternativa Subsistema de Potencia**

Para el subsistema de potencia se requiere un mecanismo con la capacidad de recibir viento en cualquier dirección para así poder transfórmalo en energía. A continuación, se muestran las siguientes alternativas:

- Alternativa 1: para un mayor aprovechamiento de los vientos en cualquier dirección se plantea realizar una turbina eólica híbrida con las siguientes características: hélices externas tipo Darrieus hélice plana, hélices internas tipo Savonius sin separación en el eje. En esta configuración las hélices externas son tipo Darrieus con hélices planas. Este sistema no necesita de un sistema de orientación, lo que le permite una captación

de aire omnidireccional y ser instalado en cualquier terreno sin la necesidad de levantar altas torres. A continuación, se presenta una representación de dichas hélices.

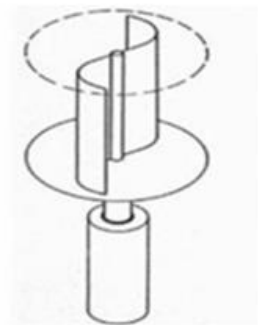
**Figura 1.** Rotor Darrieus hélice plana.



*Nota.* Tomado de *Turbinas eólicas de eje vertical.*

Para las hélices internas, se opta por una turbina tipo Savonius con alabes rectos sin separación al medio.

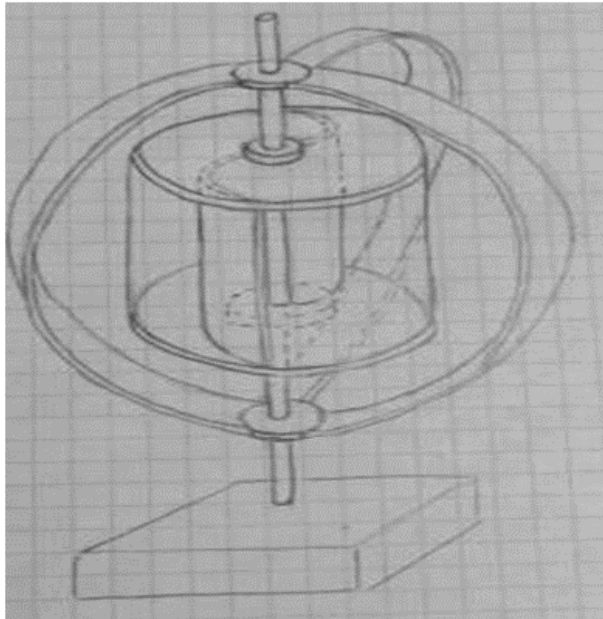
**Figura 2.** Rotor Savonius recto.



*Nota.* Tomado de [www.scielo.com.org](http://www.scielo.com.org).

Finalmente, a continuación, se presenta un boceto del resultado final de esta alternativa que presenta la unión de los componentes anteriormente presentados:

**Figura 3.** *Bosquejo alternativa 1.*



- Alternativa 2: Para este tipo de configuraciones las hélices externas son tomadas de un tipo Darrieus Helicoidal, en las que se puede apreciar una estructura similar al del ADN, pero con tres hélices, lo que permite una mayor captación en el flujo de aire y en especial cuando las corrientes no se encuentran perpendiculares al eje (vertical) de soporte. Estas hélices se encuentran unidas al eje mediante unos soportes en la parte superior e inferior de los mismos, lo que produce un mayor equilibrio como se ve en la siguiente figura.

**Figura 3.** Alabes helicoidales.



*Nota.* Tomado de [www.ecorfan.org](http://www.ecorfan.org).

En el caso de las hélices internas se ha tomado para esta alternativa la opción de álabes tipo Savonius rectos las cuales permiten mejor la captación de aire de baja potencia que se mueve horizontalmente por el terreno como se muestra en la siguiente figura:

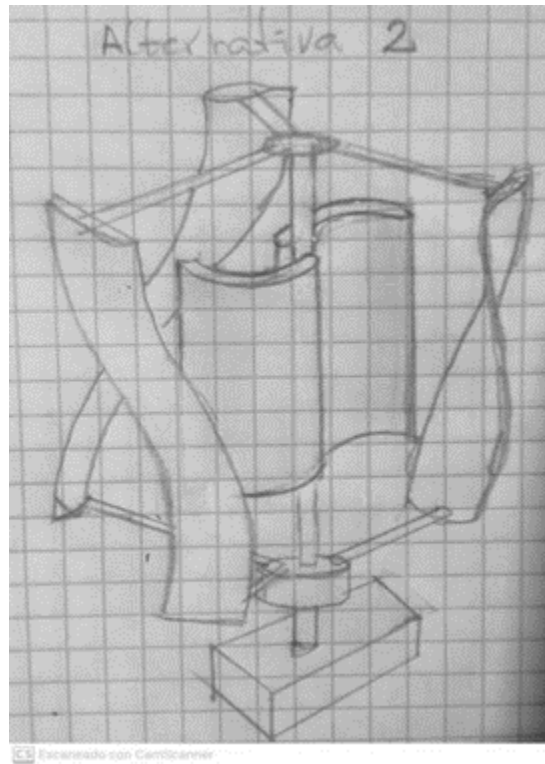
**Figura 4.** Rotor Savonius recto con separación en el eje



*Nota.* Tomado de Turbinas hidro cinéticas de eje vertical.

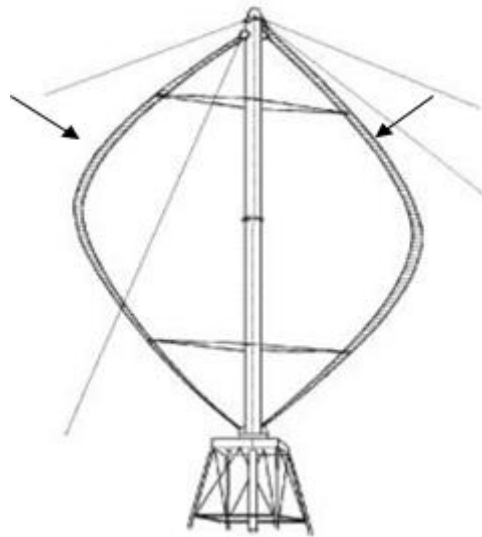
En la siguiente imagen se aprecia un bosquejo del posible modelo final de esta alternativa que presenta la mezcla entre alabes helicoidales en su parte externa y álabes tipo Savonius en su parte interna.

**Figura 5.** *Bosquejo alternativa 2*



- Alternativa 3: Para esta configuración las hélices externas escogidas son las utilizadas por la turbina eólica Darrieus tipo Troposkien, las cuales tienen forma de ala de avión, que están unidas al eje solo por dos extremos, con una curva especial diseñada para un máximo rendimiento entre las uniones del eje, como se muestra a continuación:

**Figura 6.** *Rotor Darrieus tipo Troposkien.*



*Nota.* Tomado de *Energía eólica, Pedro Fernández Díez pag.42.*

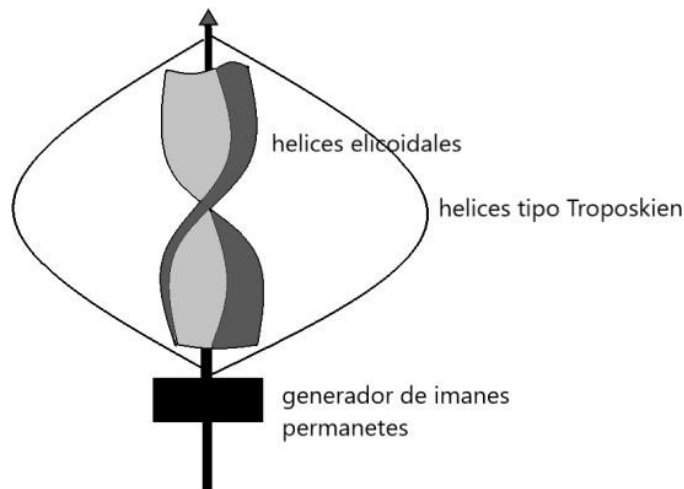
Para las hélices internas se plantea el uso de la turbina eólica Savonius helicoidal con el fin de permitir dar arranque a la turbina ya que aprovecha el concepto aerodinámico y le hace acercarse a las eficiencias de los aerogeneradores horizontales, como se muestra a continuación:

**Figura 7.** *Aerogenerador helicoidal Windside*



*Nota.* Tomado de [www.scielo.org](http://www.scielo.org).

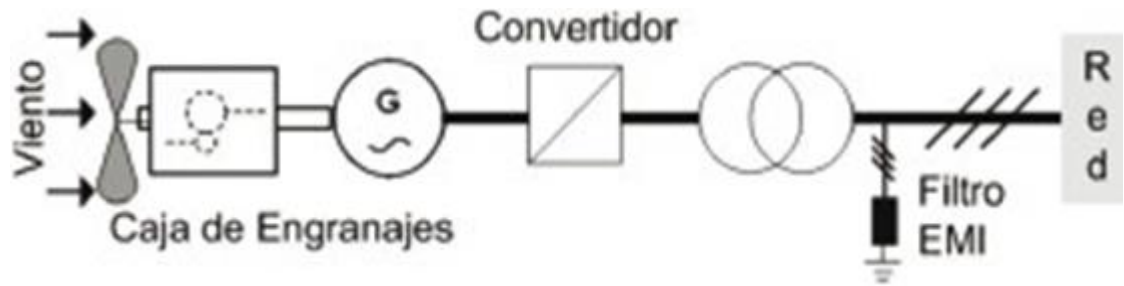
A continuación, se aprecia el diseño final planteado para este sistema:

**Figura 8.** Bosquejo alternativa 3

### **Alternativa Subsistema Eléctrico**

El subsistema eléctrico permitirá transformar la energía mecánica en energía eólica, a continuación, se muestran las alternativas propuestas para satisfacer dichas especificaciones.

- Alternativa 1: en cuanto a la parte eléctrica, se implementará un generador de inducción para generar 400w de potencia, produciendo corriente alterna con frecuencia variable, que posteriormente se convierte en corriente alterna de frecuencia fija, a través de un convertidor de potencia. La ventaja de este montaje es que permite la variación de la velocidad del generador en función de la velocidad del aire.

**Figura 9.** Esquema de montaje parte eléctrica

*Nota.* Tomado de revista UNAL.

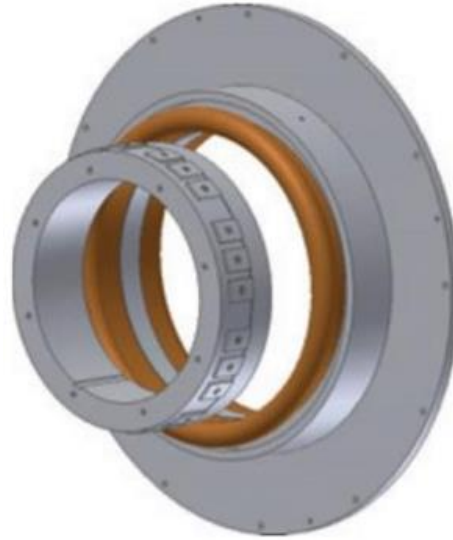
- Alternativa 2: se propone seleccionar el generador de viento de imanes permanentes DIY 500W 12V, el cual cumple a cabalidad la producción energética solicitada por el consumidor final, al igual que las demandas del diseñador.

**Figura 10.** Generador de imanes permanentes DIY 500W 12V.

*Nota.* Tomado de ([https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-921924752-generador-de-viento-iman-generadores-permanentes-diy-400w-12-\\_JM#reco\\_item\\_pos=0&reco\\_backend=machinalis-homes&reco\\_backend\\_type=function&reco\\_client=home\\_navigation-recommendations&reco\\_id=6bc5d797-fda1-4e66-8680-8668c73804bb&gid=1&pid=8](https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-921924752-generador-de-viento-iman-generadores-permanentes-diy-400w-12-_JM#reco_item_pos=0&reco_backend=machinalis-homes&reco_backend_type=function&reco_client=home_navigation-recommendations&reco_id=6bc5d797-fda1-4e66-8680-8668c73804bb&gid=1&pid=8)).

- Alternativa 3: se plantea la opción de construir un generador de imanes permanentes ya que es simple su construcción y su costo es considerablemente bajo, también no necesita mantenimiento exhaustivo.

**Figura 11.** *Generador de imanes permanentes.*



*Nota.* Tomado de [www.obeki.com](http://www.obeki.com).

### **Alternativa Subsistema de Soporte**

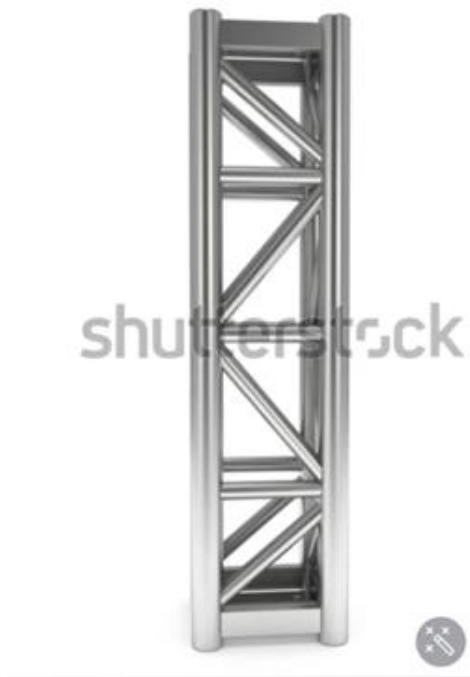
El subsistema de soporte es la respuesta para dar un apoyo y estabilidad a nuestra máquina, por lo tanto, se proponen las siguientes alternativas:

- Alternativa 1: para este sistema mostrado en la figura 12, se plantea construir una columna metálica circular con suficiente capacidad para resistir el peso, junto con la vibración que se pueda generar por la altura de nuestro diseño.
- Alternativa 2: En la figura 13 se muestra una estructura metálica tipo viga de armadura de acero, con esto se podrá dar un soporte adecuado junto con una facilidad para que el operario pueda llegar a la turbina y así realizar un mantenimiento más adecuado.

**Figura 12.** Soporte de turbina eólica de eje vertical.



*Nota.* Tomado de <https://www.alamy.es/imagenes/aerogeneradores-de-eje-vertical.html?sortBy=relevant>.

**Figura 13.** Viga de armadura

Nota. Tomado de <https://www.shutterstock.com/es/image-illustration/steel-truss-girder-element-3d-render-495450535>

### **Selección de Alternativas**

Partiendo de los resultados mostrados anteriormente se decide hacer un montaje de turbina híbrida con los subsistemas ganadores lo que concluye en la creación de una nueva alternativa y como se observa en la tabla 4 este nuevo híbrido de hélices tendrá las características propias del subsistema de potencia de la alternativa 3, el subsistema eléctrico de la alternativa 2, junto el subsistema de soporte de la alternativa 2.

**Tabla 4.** *Resultados de Matriz calidad*

Subsistemas	total	Alternativa
Potencia	563	3
Eléctrico	434	2
Soporte	429	2

**Apéndice B. Resultados de Pruebas en Túnel de Viento.**

A continuación, se muestra las tablas de resultados de las diferentes pruebas realizadas en el túnel de viento para el prototipo de turbina grande y turbina pequeña.

**Tabla 5.** Resultados de la prueba con velocidad de viento de 17 m/s, a un ángulo de 0° de la turbina grande y una carga de 10W12RJ

	<b>Angulo</b>	<b>Distancia</b>	<b>Resistencia Usada</b>	<b>Velocidad de aire</b>
TG	0°	40 Cm	10W12RJ	17 m/s
	<b>RPM</b>	<b>Voltaje (V)</b>	<b>Corriente (A)</b>	<b>Potencia (Watts)</b>
1	0	0	0	0
2	373,7	0	0	0
3	366,3	0	0	0
4	510,6	0,44	0,074	0,03256
5	610,5	0,68	0,077	0,05236
6	606,8	0,73	0,076	0,05548
7	651,2	0,95	0,081	0,07695
8	636,4	1,1	0,077	0,0847
9	703	1,27	0,081	0,10287
10	706,7	1,27	0,079	0,10033
11	666	1,25	0,081	0,10125
12	754,8	1,2	0,074	0,0888
13	636,4	0,66	0,077	0,05082
14	728,9	1,22	0,078	0,09516

15	666	1,22	0,08	0,0976
16	658,6	1,2	0,081	0,0972
17	717,8	1,25	0,076	0,095
18	714,1	1,22	0,072	0,08784
19	732,6	1,2	0,082	0,0984
20	688,2	0,95	0,072	0,0684
21	669,7	1,27	0,077	0,09779
22	714,1	1,27	0,074	0,09398
23	780,7	1,03	0,075	0,07725
24	717,8	1,1	0,083	0,0913
25	669,7	1,03	0,078	0,08034
26	717,8	1,32	0,077	0,10164
27	673,4	1,29	0,077	0,09933
28	669,7	1,25	0,075	0,09375
29	765,9	1,22	0,073	0,08906
30	703	1,27	0,08	0,1016
Promedio	640,3466667	0,995333333	0,069566667	0,077058667

**Tabla 6.** Resultados de la prueba con velocidad de viento de 20.5 m/s, a un ángulo de 0° de la turbina grande y una carga de 10W12RJ

	<b>Angulo</b>	<b>Distancia</b>	<b>Resistencia Usada</b>	<b>Velocidad de aire</b>
TG	0°	20 Cm	10W12RJ	<b>20,5 m/s</b>
	<b>RPM</b>	<b>Voltaje (V)</b>	<b>Corriente (A)</b>	<b>Potencia (Watts)</b>

	0	0	0	0
2	33,3	0	0	0
3	392,2	0	0	0
4	932,4	0,54	0,08	0,0432
5	1246,9	1,15	0,072	0,0828
6	1291,3	1,49	0,08	0,1192
7	1295	1,71	0,081	0,13851
8	1320,9	1,66	0,083	0,13778
9	1346,8	1,64	0,076	0,12464
10	1328,3	1,66	0,076	0,12616
11	1309,8	1,78	0,076	0,13528
12	1339,4	1,71	0,073	0,12483
13	1339,4	1,29	0,077	0,09933
14	1291,3	1,64	0,077	0,12628
15	1302,4	1,81	0,077	0,13937
16	1309,8	1,03	0,075	0,07725
17	1306,1	1,71	0,074	0,12654
18	1295	1,69	0,077	0,13013
19	1291,3	1,32	0,077	0,10164
20	1291,3	1,74	0,079	0,13746
21	1283,9	1,59	0,083	0,13197
22	1283,9	1,42	0,077	0,10934
23	1298,7	1,66	0,082	0,13612

24	1269,1	1,66	0,081	0,13446
25	1280,2	1,69	0,077	0,13013
26	1287,6	1,71	0,077	0,13167
27	1280,2	1,66	0,081	0,13446
28	1302,4	1,2	0,077	0,0924
29	1280,2	1,44	0,082	0,11808
30	1272,8	1,44	0,082	0,11808
Promedio	1170,063333	1,368	0,0703	0,106903667

**Tabla 7.** Resultados de la prueba con velocidad de viento de 20.5 m/s, a un ángulo de 0° de la turbina grande y una carga de 5W12RJ

	<b>Angulo</b>	<b>Distancia</b>	<b>Resistencia Usada</b>	<b>Velocidad de aire</b>
TG	0°	20 Cm	5W12RJ	20,5 m/s
	<b>RPM</b>	<b>Voltaje (V)</b>	<b>Corriente (A)</b>	<b>Potencia (Watts)</b>
1	0	0	0	0
2	281,2	0	0	0
3	558,7	0,02	0,078	0,00156
4	1095,2	0,83	0,075	0,06225
5	1291,3	1,1	0,075	0,0825
6	1317,2	1,64	0,076	0,12464
7	1346,8	1,71	0,077	0,13167
8	1369	1,15	0,082	0,0943
9	1369	1,51	0,076	0,11476

10	1369	1,71	0,078	0,13338
11	1376,4	1,37	0,086	0,11782
12	1376,4	1,83	0,076	0,13908
13	1383,8	1,1	0,078	0,0858
14	1387,5	1,83	0,081	0,14823
15	1361,6	1,83	0,081	0,14823
16	1357,9	1,81	0,079	0,14299
17	1387,5	1,17	0,078	0,09126
18	1350,5	1,83	0,073	0,13359
19	1346,8	1,42	0,08	0,1136
20	1357,9	1,81	0,078	0,14118
21	1346,8	1,71	0,076	0,12996
22	1339,4	1,74	0,077	0,13398
23	1328,3	1,69	0,078	0,13182
24	1357,9	1,76	0,077	0,13552
25	1365,3	1,49	0,075	0,11175
26	1343,1	1,61	0,075	0,12075
27	1346,8	1,69	0,077	0,13013
28	1317,2	1,78	0,078	0,13884
29	1332	1,34	0,081	0,10854
30	1328,3	1,76	0,076	0,13376
Promedio	1236,293333	1,408	0,072566667	0,109396333

**Tabla 8.** Resultados de la prueba con velocidad de viento de 17 m/s, a un ángulo de 0° de la turbina grande y una carga de 5W12RJ

	<b>Angulo</b>	<b>Distancia</b>	<b>Resistencia Usada</b>	<b>Velocidad de aire</b>
TG	0°	40 Cm	5W12RJ	17 m/s
	<b>RPM</b>	<b>Voltaje (V)</b>	<b>Corriente (A)</b>	<b>Potencia (Watts)</b>
	118,4	0	0	0
2	455,1	0	0	0
3	525,4	0,37	0,076	0,02812
4	547,6	0,63	0,077	0,04851
5	614,2	0,66	0,077	0,05082
6	684,5	0,76	0,071	0,05396
7	721,5	0,63	0,079	0,04977
8	736,3	0,98	0,074	0,07252
9	740	1,1	0,076	0,0836
10	714,1	0,86	0,077	0,06622
11	673,4	1,1	0,076	0,0836
12	710,4	1,15	0,082	0,0943
13	706,7	1,12	0,072	0,08064
14	717,8	0,9	0,073	0,0657
15	688,2	1,08	0,073	0,07884
16	706,7	0,86	0,08	0,0688
17	762,2	1,08	0,081	0,08748
18	710,4	1,17	0,079	0,09243

19	740	1,1	0,077	0,0847
20	754,8	0,88	0,074	0,06512
21	758,5	0,93	0,08	0,0744
22	740	0,95	0,084	0,0798
23	732,6	0,9	0,08	0,072
24	732,6	1,05	0,082	0,0861
25	714,1	1,05	0,078	0,0819
26	643,8	1,1	0,075	0,0825
27	710,4	0,71	0,072	0,05112
28	680,8	1,05	0,076	0,0798
29	740	1,15	0,076	0,0874
30	717,8	1,17	0,077	0,09009
Promedio	673,2766667	0,883	0,0718	0,068008

**Tabla 9.** Resultados de la prueba con velocidad de viento de 20,5 m/s, a un ángulo de 0° de la turbina pequeña y una carga de 5W12RJ

	<b>Angulo</b>	<b>Distancia</b>	<b>Resistencia Usada</b>	<b>Velocidad de aire</b>
TP	0°	20 Cm	5W12RJ	20,5 m/s
	<b>RPM</b>	<b>Voltaje (V)</b>	<b>Corriente (A)</b>	<b>Potencia (Watts)</b>
1	0	0	0	0

2	37	0	0	0
3	199,8	0	0	0
4	662,3	0,27	0,073	0,01971
5	1036	0,78	0,076	0,05928
6	1217,3	1,32	0,071	0,09372
7	1295	1,39	0,066	0,09174
8	1346,8	1,37	0,067	0,09179
9	1350,5	1,64	0,076	0,12464
10	1324,6	1,56	0,074	0,11544
11	1324,6	1,61	0,075	0,12075
12	1309,8	1,61	0,071	0,11431
13	1339,4	1,56	0,07	0,1092
14	1354,2	1,54	0,071	0,10934
15	1328,3	1,32	0,07	0,0924
16	1328,3	1,64	0,071	0,11644
17	1320,9	1,54	0,07	0,1078
18	1320,9	1,61	0,075	0,12075
19	1317,2	1,47	0,072	0,10584
20	1328,3	1,34	0,08	0,1072
21	1335,7	1,61	0,072	0,11592
22	1324,6	1,56	0,076	0,11856
23	1295	1,59	0,075	0,11925
24	1291,3	1,54	0,076	0,11704

25	1320,9	1,59	0,072	0,11448
26	1309,8	1,54	0,074	0,11396
27	1283,9	1,56	0,075	0,117
28	1280,2	1,47	0,072	0,10584
29	1291,3	1,59	0,072	0,11448
30	1298,7	1,51	0,071	0,10721
Promedio	1159,08667	1,449259259	0,072703704	0,094803

**Tabla 10.** Resultados de la prueba con velocidad de viento de 17 m/s, a un ángulo de 0° de la turbina pequeña y una carga de 5W12RJ

	<b>Angulo</b>	<b>Distancia</b>	<b>Resistencia Usada</b>	<b>Velocidad de aire</b>
TP	0°	40 Cm	5W12RJ	17 m/s
	<b>RPM</b>	<b>Voltaje (V)</b>	<b>Corriente (A)</b>	<b>Potencia (Watts)</b>
1	0	0	0	0
2	159,1	0	0	0
3	403,3	0,15	0,075	0,01125
4	617,9	0,41	0,077	0,03157
5	802,9	0,76	0,074	0,05624
6	895,4	1,15	0,073	0,08395
7	880,6	1,42	0,071	0,10082
8	865,8	1,47	0,07	0,1029
9	895,4	1,42	0,08	0,1136
10	899,1	1,34	0,068	0,09112

11	865,8	1,64	0,08	0,1312
12	913,9	1,51	0,074	0,11174
13	876,9	1,32	0,07	0,0924
14	854,7	1,2	0,073	0,0876
15	839,9	1,39	0,071	0,09869
16	839,9	1,17	0,08	0,0936
17	832,5	1,39	0,073	0,10147
18	839,9	1,25	0,074	0,0925
19	814	1,39	0,063	0,08757
20	847,3	1,44	0,075	0,108
21	821,4	1,2	0,075	0,09
22	821,4	1,29	0,078	0,10062
23	814	1,15	0,071	0,08165
24	828,8	1,25	0,071	0,08875
25	802,9	1,05	0,075	0,07875
26	795,5	0,95	0,067	0,06365
27	802,9	1,34	0,075	0,1005
28	795,5	1	0,07	0,07
29	836,2	1,22	0,071	0,08662
30	817,7	1,17	0,076	0,08892
Promedio	769,353333	1,194285714	0,073214286	0,081522667

**Tabla 11.** Resultados de la prueba con velocidad de viento de 20,5 m/s, a un ángulo de 0° de la turbina pequeña y una carga de 10W12RJ

	<b>Angulo</b>	<b>Distancia</b>	<b>Resistencia Usada</b>	<b>Velocidad de aire</b>
TP	0°	20 Cm	10W12RJ	<b>20,5 m/s</b>
	<b>RPM</b>	<b>Voltaje (V)</b>	<b>Corriente (A)</b>	<b>Potencia (Watts)</b>
1	0	0	0	0
2	44,4	0	0	0
3	85,1	0,19	0,069	0,01311
4	455,1	0,66	0,069	0,04554
5	843,6	1,05	0,07	0,0735
6	1084,1	1,08	0,079	0,08532
7	1187,7	1,25	0,073	0,09125
8	1235,8	1,42	0,071	0,10082
9	1261,7	1,39	0,073	0,10147
10	1265,4	1,37	0,071	0,09727
11	1265,4	1,29	0,074	0,09546
12	1272,8	1,44	0,076	0,10944
13	1261,7	1,47	0,07	0,1029
14	1246,9	1,42	0,073	0,10366
15	1198,8	1,39	0,072	0,10008
16	1202,5	1,1	0,069	0,0759
17	1206,2	1,25	0,066	0,0825
18	1202,5	1,39	0,068	0,09452

19	1202,5	1,32	0,074	0,09768
20	1206,2	1,42	0,072	0,10224
21	1206,2	1,32	0,072	0,09504
22	1195,1	1,03	0,065	0,06695
23	1165,5	1,37	0,067	0,09179
24	1184	1,34	0,07	0,0938
25	1154,4	1,29	0,069	0,08901
26	1161,8	1,34	0,066	0,08844
27	1147	1,39	0,074	0,10286
28	1154,4	1,22	0,072	0,08784
29	1150,7	1,39	0,076	0,10564
30	1169,2	1,27	0,073	0,09271
Promedio	1047,223333	1,245	0,071178571	0,082891333

**Tabla 12.** Resultados de la prueba con velocidad de viento de 17 m/s, a un ángulo de 0° de la turbina pequeña y una carga de 10W12RJ

	<b>Angulo</b>	<b>Distancia</b>	<b>Resistencia Usada</b>	<b>Velocidad de aire</b>
TP	0°	40 Cm	10W12RJ	17 m/s
	<b>RPM</b>	<b>Voltaje (V)</b>	<b>Corriente (A)</b>	<b>Potencia (Watts)</b>
1	0	0	0	0
2	584,6	0,66	0,07	0,0462
3	725,2	1,22	0,069	0,08418
4	825,1	1,12	0,069	0,07728

5	862,1	1,27	0,07	0,0889
6	847,3	1,34	0,079	0,10586
7	880,6	1,22	0,073	0,08906
8	880,6	1,34	0,071	0,09514
9	869,5	1,42	0,073	0,10366
10	836,2	1,34	0,071	0,09514
11	891,7	1,15	0,074	0,0851
12	836,2	1,25	0,065	0,08125
13	851	0,63	0,062	0,03906
14	847,3	1,22	0,073	0,08906
15	851	1,27	0,072	0,09144
16	851	1,17	0,069	0,08073
17	843,6	1,12	0,076	0,08512
18	825,1	1,2	0,068	0,0816
19	828,8	1,25	0,074	0,0925
20	806,6	1,25	0,072	0,09
21	817,7	1,1	0,072	0,0792
22	817,7	1,08	0,065	0,0702
23	784,4	1,1	0,067	0,0737
24	817,7	1,05	0,07	0,0735
25	821,4	1,03	0,069	0,07107
26	832,5	1,15	0,066	0,0759
27	777	1,27	0,074	0,09398

28	784,4	1,25	0,072	0,09
29	839,9	1,17	0,076	0,08892
30	765,9	1,15	0,073	0,08395
<b>Promedio</b>	<b>793,4033333</b>	<b>1,165172414</b>	<b>0,070827586</b>	<b>0,080056667</b>

**Tabla 13.** Resultados de la prueba con velocidad de viento de 20,5 m/s, a un ángulo de 0° de la turbina grande y una carga de 10W560RJ

	<b>Angulo</b>	<b>Distancia</b>	<b>Resistencia Usada</b>	<b>Velocidad de aire</b>
TG	0°	20 Cm	10W560RJ	<b>20,5 m/s</b>
	<b>RPM</b>	<b>Voltaje (V)</b>	<b>Corriente (A)</b>	<b>Potencia (Watts)</b>
1	0	0	0	0
2	44,4	0	0	0
3	403,3	0,17	0,089	0,01513
4	1043,4	1,61	0,095	0,15295
5	1328,3	3,25	0,098	0,3185
6	1398,6	3,81	0,089	0,33909
7	1317,2	3,69	0,098	0,36162
8	1306,1	3,81	0,092	0,35052
9	1320,9	4,08	0,088	0,35904
10	1365,3	3,57	0,096	0,34272
11	1324,6	3,91	0,093	0,36363
12	1446,7	4,08	0,09	0,3672
13	1439,3	3,59	0,093	0,33387

14	1443	3,69	0,091	0,33579
15	1431,9	3,54	0,088	0,31152
16	1398,6	3,18	0,092	0,29256
17	1406	3,67	0,095	0,34865
18	1387,5	3,96	0,096	0,38016
19	1413,4	3,71	0,094	0,34874
20	1398,6	3,91	0,099	0,38709
21	1387,5	3,25	0,09	0,2925
22	1417,1	3,59	0,091	0,32669
23	1402,3	3,81	0,086	0,32766
24	1424,5	3,81	0,094	0,35814
25	1383,8	3,81	0,092	0,35052
26	1376,4	3,79	0,094	0,35626
27	1417,1	3,47	0,095	0,32965
28	1420,8	3,76	0,092	0,34592
29	1380,1	3,81	0,088	0,33528
30	1365,3	3,52	0,091	0,32032
Promedio	1253,06667	3,494642857	0,092464286	0,323275714

**Tabla 14.** Resultados de la prueba con velocidad de viento de 17m/s, a un ángulo de 0° de la turbina grande y una carga de 10W560RJ

	<b>Angulo</b>	<b>Distancia</b>	<b>Resistencia Usada</b>	<b>Velocidad de aire</b>
TG	0°	40 Cm	10W560RJ	<b>17 m/s</b>
	<b>RPM</b>	<b>Voltaje (V)</b>	<b>Corriente (A)</b>	<b>Potencia (Watts)</b>
1	0	0	0	0
2	3,7	0	0	0
3	273,8	0	0	0
4	458,8	0,76	0,091	0,06916
5	569,8	1,61	0,091	0,14651
6	699,3	1,93	0,09	0,1737
7	714,1	2,54	0,095	0,2413
8	788,1	2,13	0,096	0,20448
9	865,8	2,98	0,093	0,27714
10	858,4	3,3	0,093	0,3069
11	847,3	2,61	0,092	0,24012
12	876,9	2,37	0,091	0,21567
13	891,7	3,05	0,096	0,2928
14	888	3,2	0,096	0,3072
15	876,9	3,2	0,095	0,304
16	869,5	3,3	0,094	0,3102
17	888	3,27	0,098	0,32046
18	821,4	3,18	0,094	0,29892

19	917,6	3,54	0,092	0,32568
20	891,7	3,2	0,09	0,288
21	906,5	3,49	0,084	0,29316
22	880,6	3,52	0,09	0,3168
23	884,3	3,25	0,092	0,299
24	895,4	3,52	0,096	0,33792
25	891,7	3,3	0,091	0,3003
26	880,6	3,08	0,095	0,2926
27	839,9	3,03	0,093	0,28179
28	884,3	2,74	0,09	0,2466
29	854,7	3,27	0,092	0,30084
30	858,4	3,3	0,095	0,3135
Promedio	759,24	2,913703704	0,092777778	0,270546296

**Tabla 15.** Resultados de la prueba con velocidad de viento de 20,5 m/s, a un ángulo de 0° de la turbina grande y una carga de 5W560RJ

	<b>Angulo</b>	<b>Distancia</b>	<b>Resistencia Usada</b>	<b>Velocidad de aire</b>
TG	0°	20 Cm	5W560RJ	<b>20,5 m/s</b>
	<b>RPM</b>	<b>Voltaje (V)</b>	<b>Corriente (A)</b>	<b>Potencia (Watts)</b>
1	303,4	0	0,093	0
2	666	0,61	0,092	0,05612
3	1198,8	2,3	0,089	0,2047
4	1383,8	3,69	0,095	0,35055

5	1435,6	3,96	0,095	0,3762
6	1398,6	4,32	0,093	0,40176
7	1376,4	4,42	0,091	0,40222
8	1380,1	4,47	0,091	0,40677
9	1354,2	4,06	0,088	0,35728
10	1391,2	4,28	0,089	0,38092
11	1406	4,3	0,098	0,4214
12	1402,3	3,62	0,095	0,3439
13	1406	3,81	0,091	0,34671
14	1365,3	4,52	0,093	0,42036
15	1398,6	4,32	0,094	0,40608
16	1394,9	2,98	0,091	0,27118
17	1431,9	4,4	0,093	0,4092
18	1446,7	4,01	0,093	0,37293
19	1383,8	4,45	0,097	0,43165
20	1380,1	4,52	0,093	0,42036
21	1409,7	4,11	0,093	0,38223
22	1406	4,42	0,09	0,3978
23	1424,5	4,2	0,098	0,4116
24	1454,1	4,4	0,091	0,4004
25	1417,1	4,42	0,094	0,41548
26	1413,4	4,06	0,096	0,38976
27	1383,8	4,35	0,092	0,4002

28	1394,9	3,42	0,091	0,31122
29	1491,1	4,2	0,089	0,3738
30	1491,1	4,47	0,092	0,41124
Promedio	1339,64667	4,088571429	0,092678571	0,379210714

**Tabla 16.** Resultados de la prueba con velocidad de viento de 17 m/s, a un ángulo de 0° de la turbina grande y una carga de 5W560RJ

	<b>Angulo</b>	<b>Distancia</b>	<b>Resistencia Usada</b>	<b>Velocidad de aire</b>
TG	0°	40 Cm	5W560RJ	17 m/s
	<b>RPM</b>	<b>Voltaje (V)</b>	<b>Corriente (A)</b>	<b>Potencia (Watts)</b>
1	0	0	0,096	0
2	92,5	0	0,098	0
3	325,6	0,34	0,097	0,03298
4	477,3	0,81	0,091	0,07371
5	588,3	0,93	0,095	0,08835
6	699,3	1,54	0,084	0,12936
7	765,9	2,3	0,089	0,2047
8	791,8	2,39	0,086	0,20554
9	765,9	2,59	0,09	0,2331
10	758,5	2,49	0,091	0,22659
11	810,3	2,49	0,097	0,24153
12	791,8	3,32	0,093	0,30876
13	814	2,93	0,096	0,28128

14	880,6	2,79	0,097	0,27063
15	869,5	2,64	0,094	0,24816
16	828,8	2,86	0,093	0,26598
17	832,5	3,2	0,09	0,288
18	821,4	3,15	0,089	0,28035
19	791,8	2,86	0,093	0,26598
20	736,3	3,2	0,091	0,2912
21	806,6	3,23	0,09	0,2907
22	736,3	2,76	0,088	0,24288
23	780,7	3,23	0,095	0,30685
24	814	3,03	0,096	0,29088
25	851	2,88	0,094	0,27072
26	865,8	3,08	0,088	0,27104
27	788,1	2,96	0,098	0,29008
28	832,5	3,35	0,091	0,30485
29	791,8	3,25	0,093	0,30225
30	847,3	3,3	0,095	0,3135
Promedio	718,54	2,724444444	0,092111111	0,251369259

**Tabla 17.** Resultados de la prueba con velocidad de viento de 20,5 m/s, a un ángulo de 0° de la turbina pequeña y una carga de 10W560RJ

	<b>Angulo</b>	<b>Distancia</b>	<b>Resistencia Usada</b>	<b>Velocidad de aire</b>
TP	0°	20 Cm	10W560RJ	<b>20,5 m/s</b>
	<b>RPM</b>	<b>Voltaje (V)</b>	<b>Corriente (A)</b>	<b>Potencia (Watts)</b>
1	81,4	0	0	0
2	429,2	0,51	0,094	0,04794
3	925	1,59	0,094	0,14946
4	1280,2	2,39	0,09	0,2151
5	1502,2	3,18	0,09	0,2862
6	1591	4,01	0,092	0,36892
7	1613,2	3,91	0,091	0,35581
8	1642,8	3,47	0,092	0,31924
9	1646,5	4,11	0,094	0,38634
10	1668,7	4,03	0,087	0,35061
11	1639,1	3,59	0,088	0,31592
12	1628	3,96	0,094	0,37224
13	1613,2	3,81	0,092	0,35052
14	1605,8	3,86	0,09	0,3474
15	1616,9	4,01	0,093	0,37293
16	1598,4	4,01	0,091	0,36491
17	1539,2	3,3	0,091	0,3003
18	1546,6	3,67	0,095	0,34865

19	1565,1	3,84	0,093	0,35712
20	1546,6	3,71	0,093	0,34503
21	1531,8	3,67	0,096	0,35232
22	1513,3	3,2	0,085	0,272
23	1517	3,18	0,089	0,28302
24	1513,3	3,05	0,087	0,26535
25	1505,9	3,32	0,094	0,31208
26	1528,1	3,49	0,09	0,3141
27	1524,4	3,52	0,087	0,30624
28	1494,8	3,03	0,092	0,27876
29	1509,6	3,18	0,093	0,29574
30	1513,3	3,42	0,091	0,31122
Promedio	1447,68667	3,4825	0,091310345	0,308464483

**Tabla 18.** Resultados de la prueba con velocidad de viento de 17 m/s, a un ángulo de 0° de la turbina pequeña y una carga de 10W560RJ

	<b>Angulo</b>	<b>Distancia</b>	<b>Resistencia Usada</b>	<b>Velocidad de aire</b>
TP	0°	40 Cm	10W560RJ	17 m/s
	<b>RPM</b>	<b>Voltaje (V)</b>	<b>Corriente (A)</b>	<b>Potencia (Watts)</b>
1	3,7	0	0,088	0
2	244,2	0	0,097	0

3	436,6	2,3	0,089	0,2047
4	658,6	2,68	0,092	0,24656
5	862,1	1,95	0,086	0,1677
6	921,3	1,73	0,093	0,16089
7	913,9	2,48	0,093	0,23064
8	936,1	1,8	0,093	0,1674
9	910,2	2,58	0,099	0,25542
10	910,2	2,2	0,089	0,1958
11	928,7	2,48	0,09	0,2232
12	910,2	2,28	0,091	0,20748
13	947,2	2,33	0,094	0,21902
14	925	1,77	0,096	0,16992
15	965,7	1,75	0,097	0,16975
16	913,9	2	0,098	0,196
17	943,5	1,92	0,089	0,17088
18	902,8	2,25	0,092	0,207
19	962	1,9	0,092	0,1748
20	947,2	2,1	0,096	0,2016
21	962	1,9	0,087	0,1653
22	969,4	2,38	0,088	0,20944
23	947,2	2,65	0,085	0,22525
24	932,4	1,9	0,094	0,1786
25	984,2	1,92	0,092	0,17664

26	958,3	1,9	0,095	0,1805
27	962	2,1	0,086	0,1806
28	969,4	1,98	0,09	0,1782
29	1028,6	1,98	0,09	0,1782
30	1024,9	2,05	0,087	0,17835
<b>Promedio</b>	<b>862,716667</b>	<b>2,116428571</b>	<b>0,0916</b>	<b>0,193565714</b>

**Tabla 19.** Resultados de la prueba con velocidad de viento de 20,5 m/s, a un ángulo de 0° de la turbina pequeña y una carga de 5W560RJ

	<b>Angulo</b>	<b>Distancia</b>	<b>Resistencia Usada</b>	<b>Velocidad de aire</b>
TP	0°	20 Cm	5W560RJ	<b>20,5 m/s</b>
	<b>RPM</b>	<b>Voltaje (V)</b>	<b>Corriente (A)</b>	<b>Potencia (Watts)</b>
1	29,6	0	0,091	0
2	247,9	0	0,092	0
3	740	4,65	0,092	0,4278
4	1250,6	4,38	0,091	0,39858
5	1602,1	4,8	0,096	0,4608
6	1835,2	4,75	0,088	0,418
7	1972,1	4,53	0,087	0,39411
8	2116,4	4,88	0,093	0,45384
9	2186,7	4,8	0,094	0,4512
10	2149,7	3,9	0,09	0,351
11	2257	4,93	0,091	0,44863

12	2116,4	4,5	0,093	0,4185
13	2105,3	4,13	0,092	0,37996
14	2064,6	4,57	0,093	0,42501
15	2064,6	4,25	0,091	0,38675
16	2083,1	4,38	0,093	0,40734
17	2083,1	4,5	0,093	0,4185
18	2060,9	4,68	0,091	0,42588
19	2072	4,25	0,095	0,40375
20	2057,2	4,38	0,089	0,38982
21	2053,5	4,23	0,098	0,41454
22	2064,6	3,9	0,092	0,3588
23	2064,6	3,73	0,093	0,34689
24	2068,3	3,98	0,092	0,36616
25	2064,6	3,4	0,093	0,3162
26	2023,9	3,43	0,091	0,31213
27	2016,5	3,93	0,086	0,33798
28	2016,5	3,5	0,084	0,294
29	2035	3,53	0,092	0,32476
30	2042,4	3,38	0,089	0,30082
Promedio	1851,48	4,223928571	0,0915	0,386848214

**Tabla 20.** Resultados de la prueba con velocidad de viento de 17 m/s, a un ángulo de 0° de la turbina pequeña y una carga de 5W560RJ

	<b>Angulo</b>	<b>Distancia</b>	<b>Resistencia Usada</b>	<b>Velocidad de aire</b>
TP	0°	40 Cm	5W560RJ	<b>17 m/s</b>
	<b>RPM</b>	<b>Voltaje (V)</b>	<b>Corriente (A)</b>	<b>Potencia (Watts)</b>
1	88,8	0	0	0
2	410,7	0	0,092	0
3	732,6	1,08	0,092	0,09936
4	943,5	1,74	0,091	0,15834
5	1065,6	2,2	0,096	0,2112
6	1017,5	2,71	0,088	0,23848
7	1228,4	3,01	0,087	0,26187
8	1224,7	3,1	0,093	0,2883
9	1191,4	3,03	0,094	0,28482
10	1206,2	2,93	0,09	0,2637
11	1198,8	2,96	0,091	0,26936
12	1184	2,69	0,093	0,25017
13	1169,2	3,03	0,092	0,27876
14	1261,7	2,79	0,093	0,25947
15	1150,7	3,01	0,091	0,27391
16	1209,9	3,27	0,093	0,30411
17	1191,4	2,44	0,093	0,22692
18	1217,3	2,47	0,091	0,22477

19	1217,3	3,15	0,095	0,29925
20	1206,2	2,88	0,089	0,25632
21	1187,7	2,47	0,098	0,24206
22	1154,4	3,2	0,092	0,2944
23	1147	2,76	0,093	0,25668
24	1176,6	3,18	0,092	0,29256
25	1191,4	2,44	0,093	0,22692
26	1161,8	3,01	0,091	0,27391
27	1213,6	3,03	0,086	0,26058
28	1184	3,01	0,084	0,25284
29	1221	2,64	0,092	0,24288
30	1135,9	2,79	0,089	0,24831
Promedio	1096,31	2,655862069	0,091517241	0,25707

### Apéndice C. Cálculos de tamaño de turbina.

Partiendo de los resultados obtenidos por las pruebas de los prototipos a escala, pasamos a hallar la geometría necesaria para nuestro prototipo final, para esto usamos el límite de Betz ya que el cual nos permite hacer la relación de tamaño con potencia y a su vez nos da un punto específico en la escala del límite de Betz. Para hallar el límite de Betz se debe obtener los valores de  $C_p$  y el  $Tsr$  ya que con estos podemos situarnos fácilmente en la escala hecha por Albert Betz. 1

$$C_p = \frac{P_o}{\frac{1}{2} * \rho * v^3 * A} \quad (1)$$

Donde tenemos que la potencia en el eje de la turbina ( $P_o$ ), es el resultado de la suma de la potencia consumida y la potencia aparente, la potencia aparente es la obtenida en las pruebas y la

potencia consumida ( $P_c$ ) varía dependiendo del tipo de carga usada en las diferentes pruebas, y esta fue hallada por medio de las ecuaciones 11 y 12 mencionadas en el apartado 2.3.6, de potencia eléctrica como se muestra a continuación:

Para la carga de 10W12RJ el voltaje obtenido en las pruebas fue de un promedio 3.84 voltios para la turbina grande y 3.7 para turbina pequeña y la resistencia en ohm que ofrece esta resistencia es de 12.

Turbina grande:

$$I_r = \frac{3.84}{12}$$

$$I_r = 0.32 \text{ [A]}$$

$$P_c = 3.8 * 0.32$$

$$P_c = 1.2288 \text{ [watts]}$$

Turbina pequeña:

$$I_r = \frac{3.7}{12}$$

$$I_r = 0.31 \text{ [A]}$$

$$P_c = 3.7 * 0.31$$

$$P_c = 1.147 \text{ [watts]}$$

Para la carga 5W12RJ el voltaje obtenido en las pruebas fue de un promedio 2.19 voltios para la turbina grande y 2.4 para turbina pequeña y la resistencia en ohm que ofrece esta resistencia es de 12.

Turbina grande:

$$I_r = \frac{2.19}{12}$$

$$I_r = 0.1825 \text{ [A]}$$

$$P_c = 2.19 * 0.1825$$

$$P_c = 0.39 \text{ [watts]}$$

Turbina pequeña:

$$I_r = \frac{2.34}{12}$$

$$I_r = 0.195 \text{ [A]}$$

$$P_c = 2.34 * 0.195$$

$$P_c = 0.4563 \text{ [watts]}$$

Para la carga 10W560RJ el voltaje obtenido en las pruebas fue de un promedio 2.84 voltios para la turbina grande y 2.79 para turbina pequeña y la resistencia en ohm que ofrece esta resistencia es de 560.

Turbina grande:

$$I_r = \frac{2.84}{560}$$

$$I_r = 5.07142 * 10^{-3} \text{ [A]}$$

$$P_c = 2.84 * 5.07142 * 10^{-3}$$

$$P_c = 0.0144 \text{ [watts]}$$

Turbina pequeña:

$$I_r = \frac{2.79}{560}$$

$$I_r = 4.98214 * 10^{-3} \text{ [A]}$$

$$P_c = 2.79 * 4.98214 * 10^{-3}$$

$$P_c = 0.0139 \text{ [watts]}$$

Para la carga 5W560RJ el voltaje obtenido en las pruebas fue de un promedio 2.84 voltios para la turbina grande y 3.43 para turbina pequeña y la resistencia en ohm que ofrece esta resistencia es de 560.

Turbina grande:

$$I_r = \frac{3.404}{560}$$

$$I_r = 6.0785 * 10^{-3} \text{ [A]}$$

$$P_c = 3.404 * 6.0785 * 10^{-3}$$

$$P_c = 0.0206 \text{ [watts]}$$

Turbina pequeña:

$$I_r = \frac{3.43}{560}$$

$$I_r = 6.125 * 10^{-3} \text{ [A]}$$

$$P_c = 3.43 * 6.125 * 10^{-3}$$

$$P_c = 0.0210 \text{ [watts]}$$

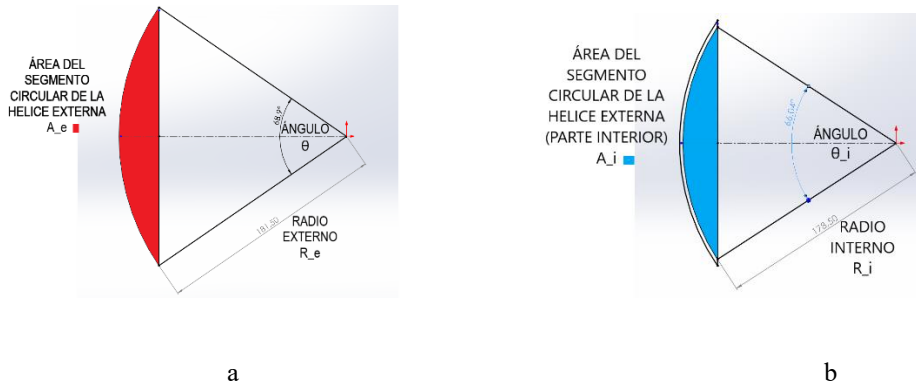
En la tabla 21 se muestran los valores de corriente, las cargas y la potencia consumida por estas mismas.

**Tabla 21.** *Cargas usadas en los experimentos con su respectivo consumo.*

	<b>Turbina grande</b>	<b>Turbina pequeña</b>
<b>Carga</b>	<b>Potencia consumida [Watts]</b>	<b>Potencia consumida [Watts]</b>
10W12RJ	1,2288	1,147
5W12RJ	0,3996	0,4563
10W560RJ	0.0144	0.0139
5W560RJ	0.0206	0.0210

Rho esta dado por las condiciones del aire en Bucaramanga con valor de 1,20 [Kg/m<sup>3</sup>], la velocidad [v] del aire usada para las pruebas es de 20.5 [m/s] y 17 [m/s], el área [A] está definido por la geometría mostrada en la figura 14.

**Figura 14.** Geometría para hallar el área de contacto de las hélices externas del prototipo de mayor tamaño. a) área de segmento mayor; b) área de segmento menor.



Gracias a esta geometría y con ayuda de la ecuación 2 podemos hallar el área de contacto que tiene el viento con cada hélice externas en cada revolución en los diferentes prototipos.

$$A = \frac{R^2}{2} * \left( \frac{\theta * \pi}{180} * \text{Sin}(\theta) \right) \quad (2)$$

$$A_i (\text{turbina grande}) = \frac{178.5^2}{2} * \left[ \frac{66.04 * \pi}{180} - \sin 66.04 \right]$$

$$A_i (\text{turbina grande}) = 3804.133 [\text{mm}^2]$$

$$A_e (\text{turbina grande}) = \frac{181.5^2}{2} * \left[ \frac{68.9 * \pi}{180} - \sin 68.9 \right]$$

$$A_e (\text{turbina grande}) = 4440.258 [\text{mm}^2]$$

Para determinar el área superficial de las hélices helicoidales que hace contacto con el viento se usó el programa de SolidWorks ya que este permite realizar una entidad de silueta que nos da el

contorno exacto de las hélices y así determinar exactamente el área de contacto como se muestra en la figura 15:

**Figura 15.** Geometría de silueta dada por SolidWorks.



Las propiedades de sección de la cara seleccionada  $A_{hi}$  :

$$A_{hi} = 5673.54 \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$A_t(\text{turbina grande}) = 2 * (A_e - A_i) + A_{hi}$$

$$A_t(\text{turbina grande}) = 2 * (4440.258 - 3804.133) + 5673.5$$

$$A_t(\text{turbina grande}) = 6945.75 \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$A_t(\text{turbina grande}) = 0.00694575 \text{ [m}^2\text{]}$$

De la misma manera se realizó el proceso para hallar la geometría de la turbina pequeña, a continuación, se muestra la tabla de resultados:

**Tabla 22.** Resultados de las áreas de la turbina pequeña.

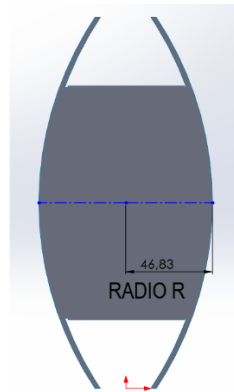
TURBINA PEQUEÑA	
$A_e$	2276.13 [mm <sup>2</sup> ]
$A_i$	1779.23 [mm <sup>2</sup> ]
$A_{hi}$	3191.94 [mm <sup>2</sup> ]
$A_t$	4185.74 [mm <sup>2</sup> ]
$A_t$ [m <sup>2</sup> ]	0.00418574 [m <sup>2</sup> ]

Para el cálculo de Tsr se utilizó la ecuación 15 de TSR, en donde la velocidad de rotación de la turbina ( $\omega$ ) está dada por los valores obtenidos en las tablas 5-20, la velocidad de aire esta dad por los valores de la tabla 23, estos valores fueron seleccionados en el túnel de viento para aprovechar las mejores características de este.

**Tabla 23.** Velocidad de viento usadas en el túnel de viento para las pruebas de los prototipos.

Velocidad del viento [m/s]	Distancia perfil de corrección de viento – prototipo en [cm]
20.5	20
17	40

Para la obtención del radio de la turbina (R) fue tomado la parte más externa que abarca nuestra turbina como se muestra en la figura 16.

**Figura 16.** Silueta de prototipo donde se muestra el radio.**Tabla 24.** Radio de los prototipos de turbinas eólicas.

Radio Turbina Grande [m]	0.04683
Radio Turbina Pequeña [m]	0.035235

Para complementar el sistema de variables, se usó la ecuación 14 de  $C_m$  mostrada en el apartado 2.3.6. Con esta se determina el coeficiente de momento ( $C_m$ ), usando los datos de la tabla 23 para la variable ( $T$ ) que obtuvimos en las pruebas, las demás variables ya están determinadas, pues el  $C_m$  es muy similar al  $C_p$ .

Para el toque se obtuvo mediante la ecuación 8 mostrada en el apartado 2.3.6., en donde los valores de gravedad se asumieron como  $9,81 \text{ m/s}^2$ , y el valor de  $n$  fue el mismo de las tablas 5-20.

**Tabla 25.** Torque generado por el motor generador en las pruebas de los prototipos.

TURBINA	VELOCIDAD DEL VIENTO [M/S]	CARGA	TORQUE
GRANDE	17	10W12RJ	0,01947388
	17	5W12RJ	0,00649607
	17	10W560RJ	0,00373298
	17	10W560RJ	0,0034543
	20,5	10W12RJ	0,010901148
	20,5	5W12RJ	0,003857405
	20,5	10W560RJ	0,002663984
	20,5	10W560RJ	0,002764039
PEQUEÑA	17	10W12RJ	0,01524855
	17	5W12RJ	0,00637969
	17	10W560RJ	0,00241279
	17	10W560RJ	0,00226401
	20,5	10W12RJ	0,010230767
	20,5	5W12RJ	0,004859267
	20,5	10W560RJ	0,002195363
	20,5	10W560RJ	0,002045403

Como se puede observar el torque generado en las pruebas es similar, también se observa que el tamaño hace una mínima de diferencia en el torque generado, ya que siempre y cuando se llegue a una velocidad optima esta generara el mismo torque.

A continuación, ya se puede desarrollar las ecuaciones de Tsr y Cp, esto se hace mediante la ayuda de Matlab ya que vamos a variar los rpm con base a las tablas 5-20 para tener un valor promedio de 30 iteraciones y los resultados se muestran en la tabla 26 y 27.

**Tabla 26.** Resultados de Cp y Tsr para turbina grande (prototipo de mayor tamaño).

<b>Carga</b>	<b>Velocidad [m/s]</b>	<b>Cp</b>	<b>Tsr</b>
10w12rj	17	0,75278846	1,99269231
	20	0,47425769	3,18226923
5w12rj	17	0,26561852	2,04066667
	20	0,17961852	3,29192593
5w560rj	17	0,1564228	2,31608
	20	0,13617607	3,43453571
10w560rj	17	0,177196	2,47752
	20	0,129548	3,41052

**Tabla 27.** Resultados de Cp y Tsr para turbina pequeña (prototipo de menor tamaño).

<b>Carga</b>	<b>Velocidad [m/s]</b>	<b>Cp</b>	<b>Tsr</b>
10w12rj	17	1,16832	1,80628
	20	0,723276	2,21296
5w12rj	17	0,5147	1,82826923

	20	0,32552308	2,40361538
5w560rj	17	0,25973913	2,58595652
	20	0,22695217	3,83956522
10w560rj	17	0,205384	2,05576
	20	0,20646	2,89372

Como se puede observar en las tablas 26 y 27 los valores de Tsr son similares teniendo pequeñas variaciones, estas son causadas por el torque ya que la turbina de mayor tamaño genera un torque levemente mayor.

Ya que obtuvimos los valores de Tsr y Cp de nuestro prototipo lo que vamos a hacer es una regresión donde vamos a tomar un valor constante de velocidad de viento más alto acorde a departamento de Santander, tomando un valor promedio de Tsr de los valores que más se repiten, junto a esto se saca un valor promedio del Cp de los valores compañeros del Tsr, y hallaremos el valor del radio necesario del prototipo para ser optimo, junto con valor de rpm que van a estar dadas de acuerdo al generador final a utilizar que fue seleccionado en el apéndice A, ya que el generador tienen una velocidad máxima de trabajo que es de 950 rpm, para cumplir nuestro valor mínimo de energía de 150 Kw/h, se usara este valor como mínimo de torque necesario para cumplir nuestro objetivo. Los valores de lo anterior mencionado se muestra en la tabla 28.

**Tabla 27.** Valores tomados para hacer la regresión y obtener el tamaño ideal para la turbina eólica de eje vertical.

Tsr	2,373284821	Cp	0,289952441
Velocidad aire	7.5 [m/s]	Potencia mínima para obtener	150 [Kw/h]

De la regresión se obtienen los valores mostrados en la tabla 28.

**Tabla 28.** Resultados de la regresión.

Rpm	Área	Radio [m]
20	23,93	0,8699
30	23,93	0,5666
50	23,93	0,3399
80	23,93	0,2125
100	23,93	0,17
200	23,93	0,08499
250	23,93	0,06799
450	23,93	0,03777
750	23,93	0,02266
950	23,93	0,01789

De la tabla 28 se observa que la mejor opción es la de 20 Rpm, ya que el tamaño de área es acorde al radio de 86.9 cm con lo cual tendremos una turbina balanceada que generara energía con velocidades de viento bajas.

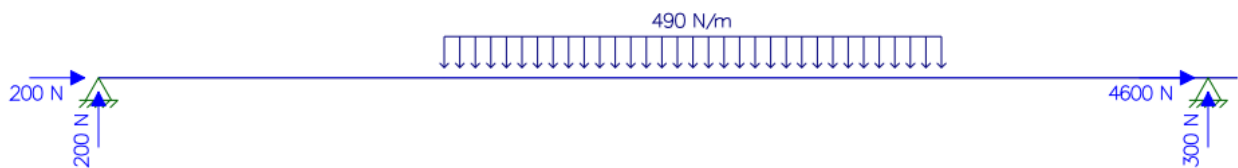
El valor de radio tomado para el desarrollo final es de 86.9cm y un área final de 23.93 m <sup>2</sup>.

#### **Apéndice D. Diseño del eje**

Para la realización de los esquemas en el diseño del eje se utilizó el siguiente programa *FTool* para la obtención del marco dimensional y el análisis del eje.

Se realizó el diagrama de cuerpo libre del eje y se reemplazaron todas las demás partes que interactuaban con el mismo como se muestra en la figura 17 en donde esas cargas tanto puntuales como distribuidas aparecen como fuerzas.

**Figura 17.** Diagrama de cuerpo libre con cargas sobre el eje.



Las fuerzas mostradas se hallaron de la siguiente forma:

$$F_v = A * P * c_x$$

Donde:  $F_v$  = Fuerza del viento.

A= Área proyectada.

P=Presión del viento.

$C_x$  = coeficiente de arrastre del viento.

Donde  $C_x$  es de 0.82 que es el coeficiente de arrastre para cuerpos cilíndricos. Este valor sale de la tabla 3.44 del libro Fundamentos de la aerodinámica 6ta. Ed. Jon D. Anderson.

El área proyectada es la misma área que se encuentra en contacto directo con el viento por parte de las hélices tanto internas como externas, su valor es de 2.328 [m<sup>2</sup>].

La presión del viento está dada bajo la siguiente ecuación:

$$P = (C_d * R_o * V^2)/2$$

Donde: P=Presión del viento.

Cd=Coefficiente aerodinámico.

Ro=Densidad del aire.

V= velocidad del viento.

El coeficiente aerodinámico se cataloga en tres diferentes tipos, por superficie plana, esférica o aerodinámica, para el caso en estudio de utilizo el coeficiente de superficie plana ya que se toma el dato en el instante que existe mayor superficie de contacto con el viento circundante.

$$C_d = 1.17$$

La densidad del aire se toma con los datos del IDEAM del área metropolitana de Bucaramanga que nos da un valor de 1Kg/m<sup>3</sup>

La velocidad del viento que se usó para la realización de este proyecto fue extraída de las bases de datos históricos del IDEAM la cual para el área metropolitana de Bucaramanga es de 21m/s.

$$P = \frac{1.17 * 1 * 21^2}{2}$$

$$P = 257.985[\text{N} * \text{m}]$$

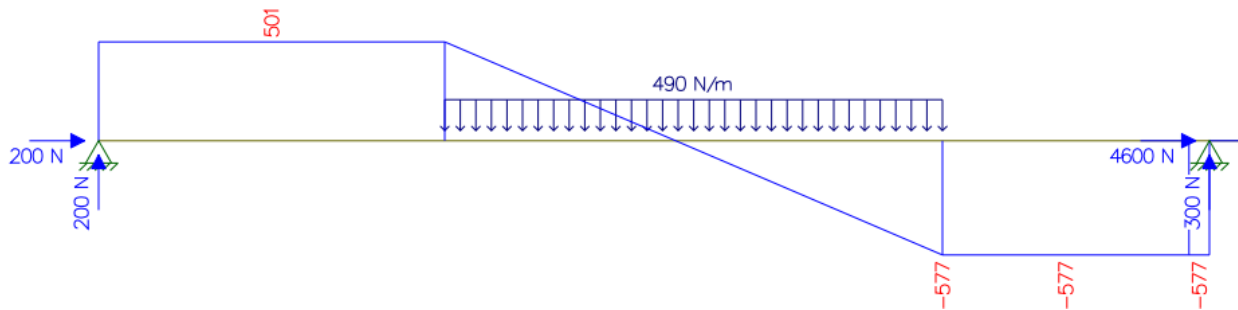
$$F_v = 2.328 * 257.985 * 0.82$$

$$F_v = 492.5[\text{N}]$$

Se observan fuerzas de derecha a izquierda como se muestra en la imagen anterior las cuales vienen como resultante del contacto con los rodamientos que es de 300N, las fuerzas normales con la base de la turbina de forma axial con carga de 4600N, las hélices que reciben toda la carga del viento de manera distribuida con una fuerza de 490N/m y las cuerdas de soporte tensoras en la parte superior de la máquina que generan una fuerza de 200N.

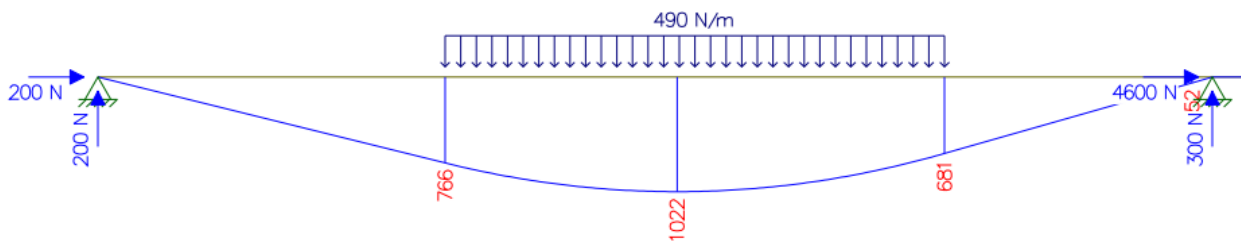
Con base en las fuerzas mostradas se realizó un diagrama de fuerzas cortantes sobre el eje como se muestra en la figura 18.

**Figura 18.** Diagrama de fuerzas cortantes del eje.



Como se muestra en la siguiente figura 19 los mayores momentos sobre el eje se producen en donde se encuentran las hélices.

**Figura 19.** Diagrama de momentos del eje.



Con las figuras anteriores se hallaron los máximos esfuerzos y momentos sobre el eje los cuales permiten realizar los cálculos para la determinación del diámetro menor requerido que pueda soportar las fuerzas antes mencionadas.

Se halla el diámetro requerido en el punto máximo de la carga usando la siguiente ecuación.

$$D = \sqrt{\frac{(2.94 * K_t * V * N)}{S_n''}}$$

Donde:

D= Diámetro mínimo requerido del eje.

Kt=Es el valor de un chaflan agudo de 2.5.

V= Esfuerzo máximo cortante.

N= Factor de Diseño. El cual se asumió como 2

S<sub>n</sub><sup>''</sup> =Resistencia la fatiga modificada.

La resistencia la fatiga modificada es igual a:

$$S_{n''} = S_n * C_s * C_r$$

Donde:

S<sub>n</sub><sup>''</sup> = Resistencia la fatiga modificada.

S<sub>n</sub> = Resistencia a la Fatiga tomado de la figura 5.8 del Diseño de elementos de Maquinas 4ta. Ed.

Robert L. Mott. Con un valor de 757 [N\*m<sup>2</sup>]

C<sub>s</sub>=Factor por tamaño. Es un valor que se desconoce por lo que se asumió un valor de 0.75 que es un valor intermedio de la figura 5.9 del Diseño de elementos de Maquinas 4ta. Ed. Robert L. Mott.

C<sub>r</sub>= Factor de confiabilidad tomado de la Tabla 5.1 del Diseño de elementos de Maquinas 4ta. Ed. Robert L. Mott. Con valor de 0.81.

$$S_{n''} = 757 * 0.75 * 0.81$$

$$S_{n''} = 459.87 \text{ [N/m}^2\text{]}$$

$$D = \sqrt{\frac{2.94 * 2.5 * 323.4 * 2}{459.85}}$$

$$D = 3.21 \text{ [mm]}$$

Este valor de Diámetro se toma en pulgadas para una mejor observación del mercado.

En el mercado se pueden encontrar distintos tipos de tubos, estos dados por su tipo de material y grosor, para este proyecto se seleccionó uno de estos y se le realizó un análisis estático por medio de la herramienta de simulación del programa CAD SolidWorks con el fin de comprobar si el tubo seleccionado cumpliría su función como eje para la turbina de doble hélice.

Las características del tubo son las siguientes:

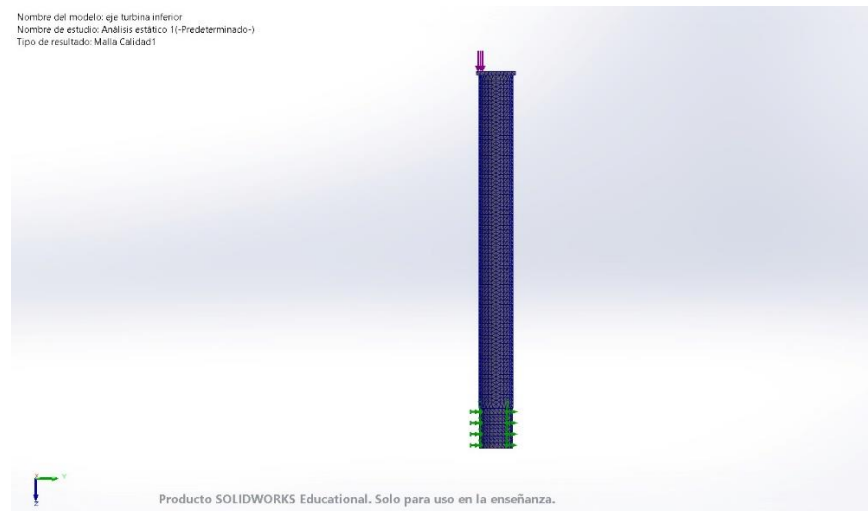
-Material: Acero AISI 304.

-Fuerza externa aplicada=3924 N.

-Tipo de sujeción: Fija.

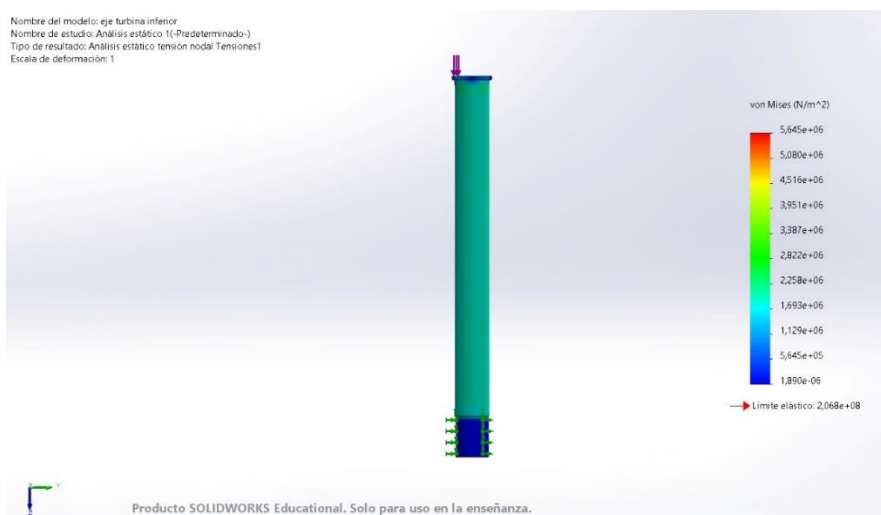
Para estos cálculos se realizó un trazado de malla como se muestra en la imagen

**Figura 20.** Malla utilizada en el análisis estático.



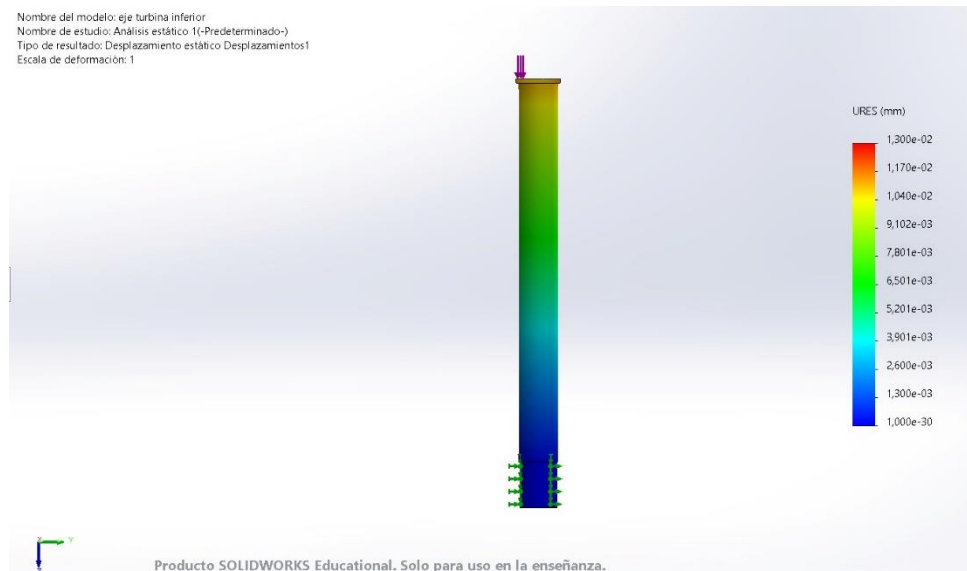
Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

**Figura 21.** Resultados de la prueba de límite elástico realizada con SolidWorks.



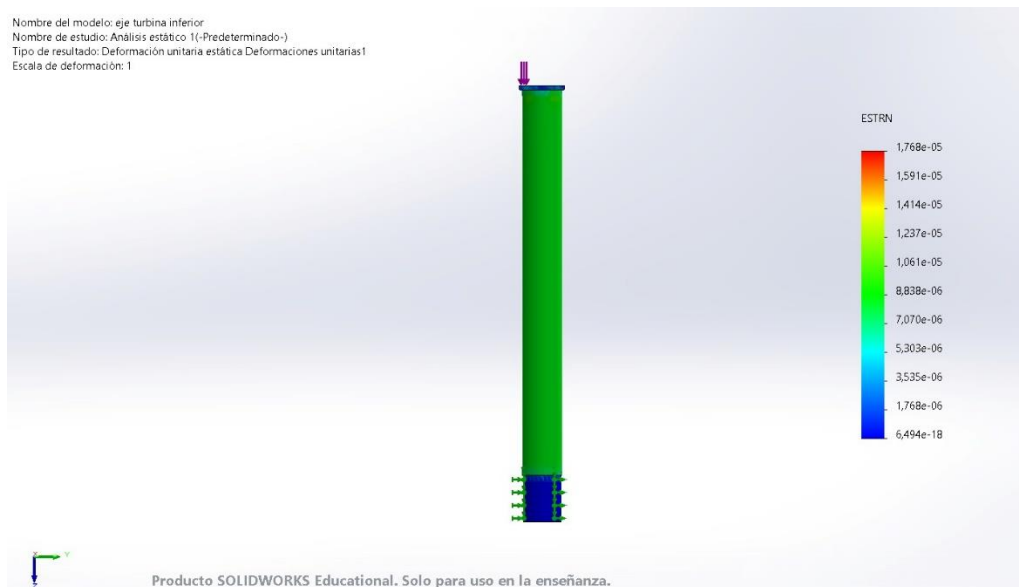
El programa SolidWorks utiliza la teoría de Von Mises para llegar al resultado mostrado en la imagen anterior. Se muestra que el límite máximo es de  $2.068e+08$ .

**Figura 22.** Resultados de la prueba de desplazamiento realizada con SolidWorks.



Por medio de SolidWorks el desplazamiento respectivo dado por el programa da un máximo de  $1.3e-02$ . Por lo cual se puede determinar que bajo altas cargas el desplazamiento es mínimo.

**Figura 23.** Resultados de la prueba de deformación unitaria realizada con SolidWorks.



El programa SolidWorks da un esquema de deformaciones unitarias como se muestra en la figura anterior, y como se observa que existe un equilibrio general en la estructura.

De lo anterior se puede observar que el diseño presentado cumple las características mínimas necesarias para un funcionamiento óptimo por lo que las dimensiones dadas en el sistema se verán en el apéndice E, donde van a estar todos los planos de la turbina eólica.

**Apéndice E. Planos del prototipo**

“Los planos están adjuntos al presente documento”

Plano 1. Turbina eólica de eje vertical de doble hélice.

Plano 2. Medidas generales de la turbina de eje vertical.

Plano 3. Subsistemas de la turbina eólica de eje vertical de doble hélice.

Plano 4. Componentes del subsistema de hélices.

Plano 5. Vista a detalle de las tapas de soporte de las hélices.

Plano 6. Vista a detalle de las hélices tipo Troposkien.

Plano 7. Vista a detalle del eje de soporte de la turbina de eje vertical.

Plano 8. Vista a detalle de las hélices helicoidales.

Plano 9. Componentes del subsistema de frenado.

Plano 10. Componentes del subsistema de soporte.

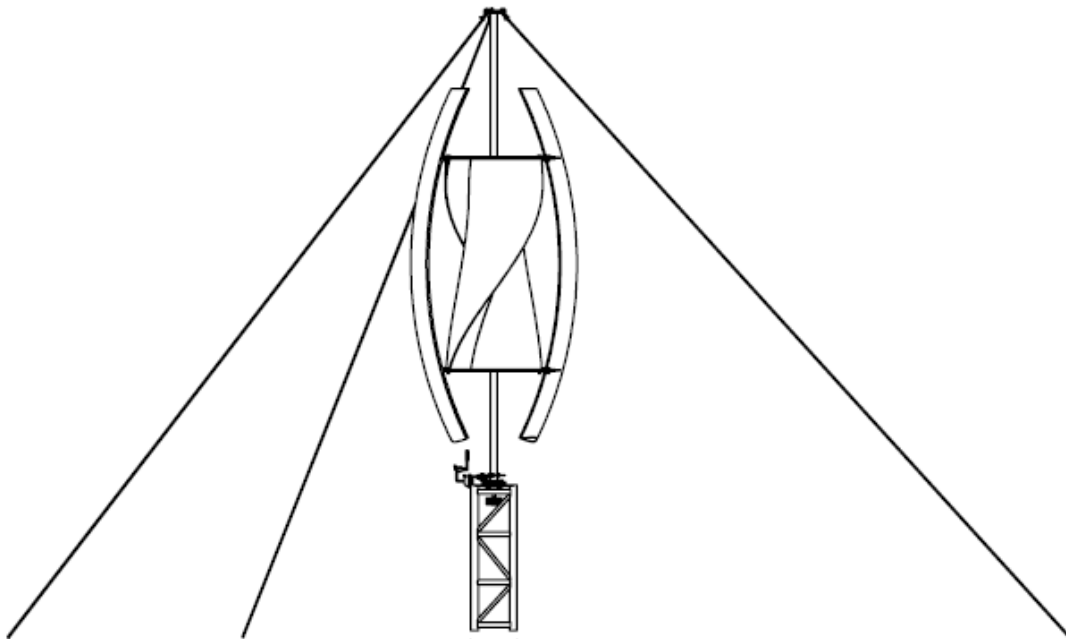
Plano 11. Vista a detalle de la base de la turbina.

Plano 12. Vista a detalle de la palanca de frenado.

**Apéndice F. Manual de operación y mantenimiento**

**MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO**

**TURBINA ÉOLICA CON HÉLICES TIPO TROPOSKIEN Y HELICOIDAL**



Juan Sebastián Correa Paipa – Diego Alejandro Casas Jiménez – Sergio Neftalí Gutierrez Duarte

M.Sc. Ricardo Alfonso Jaimes Rolón

Universidad Industrial de Santander – Facultad de ingenierías Físico Mecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Tabla de contenido

1. Información general .....	138
1.1. Aplicación.....	138
1.2. Datos técnicos.....	138
1.3. Dimensiones .....	139
1.4. Diseño.....	139
2. Recomendaciones de seguridad .....	144
4. Mantenimiento .....	147
4.1. Rutina de mantenimiento .....	147

## 1. Información general

### 1.1. Aplicación

La turbina eólica de eje vertical con rotores híbridos tipo Troposkien y helicoidal, es un mecanismo diseñado para suplir la falta de energía eléctrica en zonas montañosas donde es difícil instalar una turbina eólica convencional. La turbina puede trabajar en laderas y o lugares planos, ya que su forma vertical la hace óptima para aprovechar el viento en cualquier dirección.

### 1.2. Datos técnicos

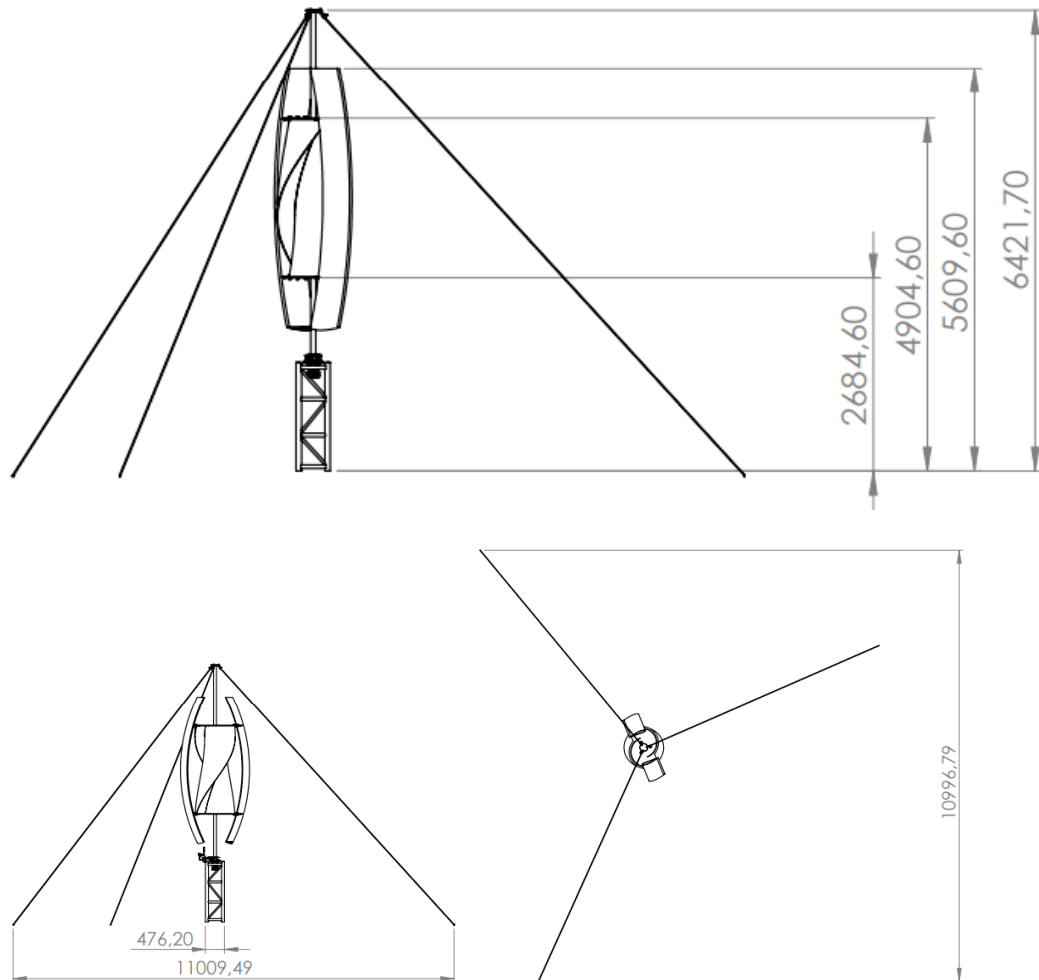
**Tabla 1**

*Datos técnicos del sistema*

Voltaje	24 V
Potencia nominal	500 W
Frecuencia nominal	50 Hz
Velocidad de oscilación máxima	950 rpm
Velocidad máxima viento	21 m/s
Temperatura ambiente máxima permitida	-40°C ~ 80°C
Lubricación	Grasa
Freno	Hidráulico flotante de 230 mm
Peso	400 Kg

### 1.3. Dimensiones

**Figura 1.** Medidas generales del sistema



### 1.4. Diseño

La turbina eólica ha sido diseñada con el fin de tener energía eléctrica sustentable en hogares colombianos de difícil acceso. El diseño está centrado en maximizar el aprovechamiento de la energía cinética del viento en ladera junto con la durabilidad a lo largo de su vida útil.

La turbina eólica es de tipo vertical, con rotores tipo Troposkien y helicoidal que maximizan el aprovechamiento de vientos a bajas y altas velocidades. El conjunto esta soportado sobre un armazón de acero robusto y de altura adecuada para una captura de vientos óptimos.

Las hélices presentan un perfil aerodinámico especial que permite un mejor aprovechamiento del viento, garantizando una transmisión eficiente de energía mecánica a eléctrica.

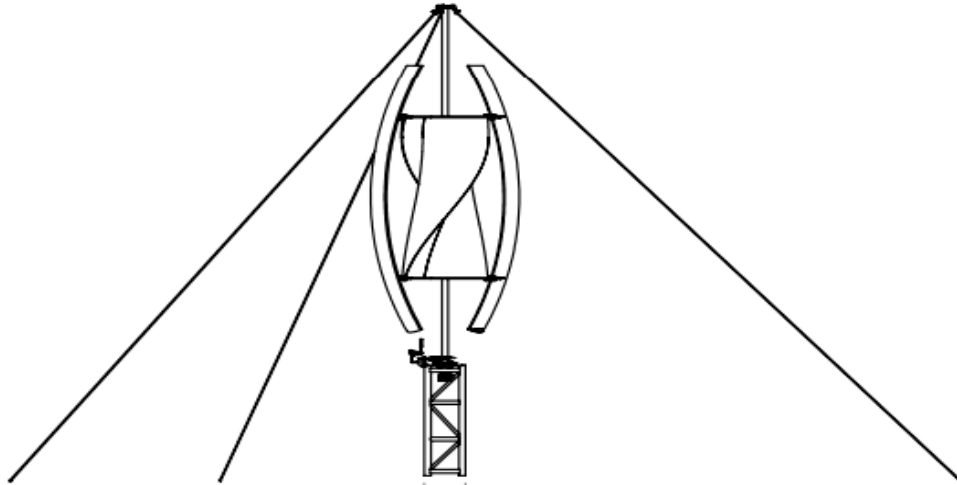
El generador de imanes permanentes se encuentra conectado a las hélices a través de un eje, esto con el fin de que por cada rotación de las hélices haya una revolución en el generador y poder evitar esfuerzos en el sistema cuando sean días de tormenta y vientos con altas velocidades.

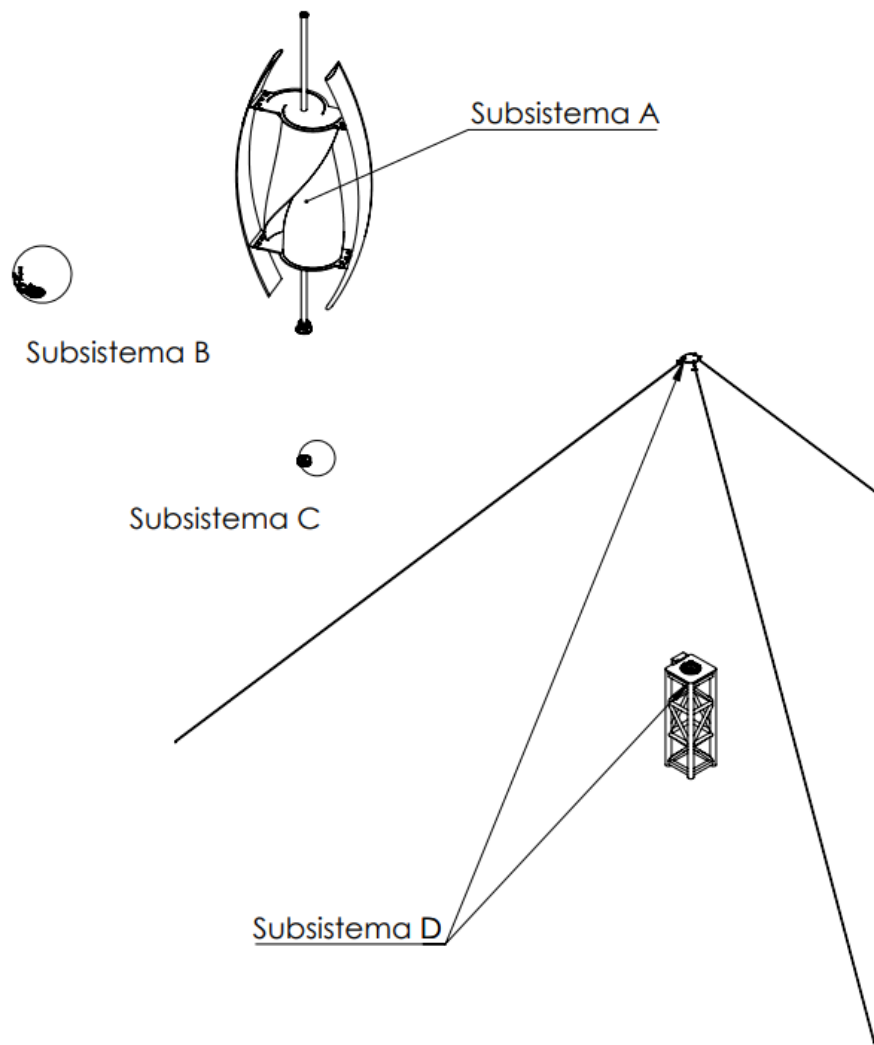
La orientación no es necesaria en la turbina eólica de eje vertical ya que su forma permite el aprovechamiento del viento en cualquier dirección.

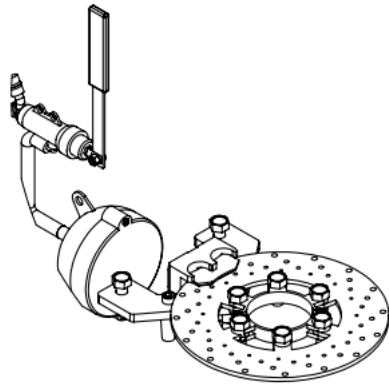
En caso de emergencia, se emplea un freno de disco manual con la capacidad de reducir la velocidad hasta pararlo totalmente, también para hacer las revisiones y mantenimientos de la turbina.

Para garantizar la durabilidad y eficiencia, se han seleccionado materiales compuestos de alta resistencia y aleaciones de aluminio y acero de alta calidad.

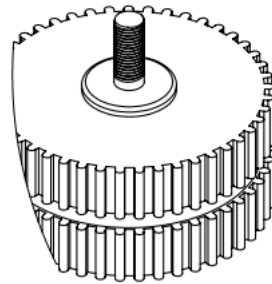
**Figura 2.** *Subsistemas de la turbina eólica.*







DETALLE Subsistema B  
ESCALA 1 : 6



DETALLE Subsistema C  
ESCALA 1 : 3

<b>SUBSISTEMAS</b>	<b>CONJUNTO</b>
Subsistema A	Hélices
Subsistema B	Frenado
Subsistema C	Generador
Subsistema D	Soporte

## 2. Recomendaciones de seguridad

Las siguientes recomendaciones se deben tener en cuenta en la instalación, puesta en marcha y funcionamiento del equipo. La desatención podría poner en riesgo la integridad física de quienes estén en el área de trabajo e instalación.

- ❖ Asegurarse de que todo personal involucrado en la instalación este debidamente capacitado en los procedimientos específicos para la instalación.
- ❖ Todos los trabajadores deben usar el equipo de protección personal adecuado, incluyendo cascos, guantes, gafas de seguridad, calzado de protección, arneses de seguridad y cualquier equipo necesario para la tarea.
- ❖ Realizar una evaluación exhaustiva del sitio para identificar posibles peligros y determinar la ubicación más segura y adecuada para la instalación.
- ❖ Asegura de cumplir con las normativas y regulaciones municipales, departamentales y nacionales relacionadas con la instalación de turbinas eólicas.
- ❖ Antes de iniciar la instalación verificar que todos los componentes y materiales estén en buen estado y cumplan con las especificaciones de diseño.
- ❖ Utilizar equipos de elevación adecuados y seguir las practicas seguras de manejo y elevación para garantizar la seguridad durante la instalación.

- ❖ Hay que asegurar que todas las partes de la turbina se monten y fijen de manera segura de acuerdo con las instrucciones del fabricante.
- ❖ Realizar una verificación completa de la instalación después de completarla para asegurar de que todo esté en condiciones óptimas.
- ❖ Establecer y seguir procedimientos operativos para la detención y mantenimiento de la turbina eólica.
- ❖ Hay que asegurarse de que se implementen procedimientos adecuados de bloqueo y señalización para evitar puestas en marcha accidentales de la turbina.
- ❖ Realizar inspección visual completa de la turbina antes de iniciar un mantenimiento para identificar cualquier problema obvio o riesgo de seguridad.
- ❖ Establecer un sistema de comunicación claro para garantizar que todos los miembros del equipo estén informados sobre las actividades a realizar y las que están en curso para mantener las condiciones de seguridad.
- ❖ Considerar las condiciones climáticas y demás variables ambientales antes de comenzar el mantenimiento. Asegurarse que el clima sea seguro y adecuado para realizar las actividades planeadas.
- ❖ Si el mantenimiento es eléctrico, asegurar que se sigan las prácticas de seguridad eléctrica adecuadas.
- ❖ Realizar una revisión minuciosa de cada actividad de mantenimiento realizada para identificar cualquier mejora necesaria para futuras actividades.
- ❖ Realizar una instalación de cercas o barreras alrededor de la turbina.

### 3. Puesto en marcha y funcionamiento

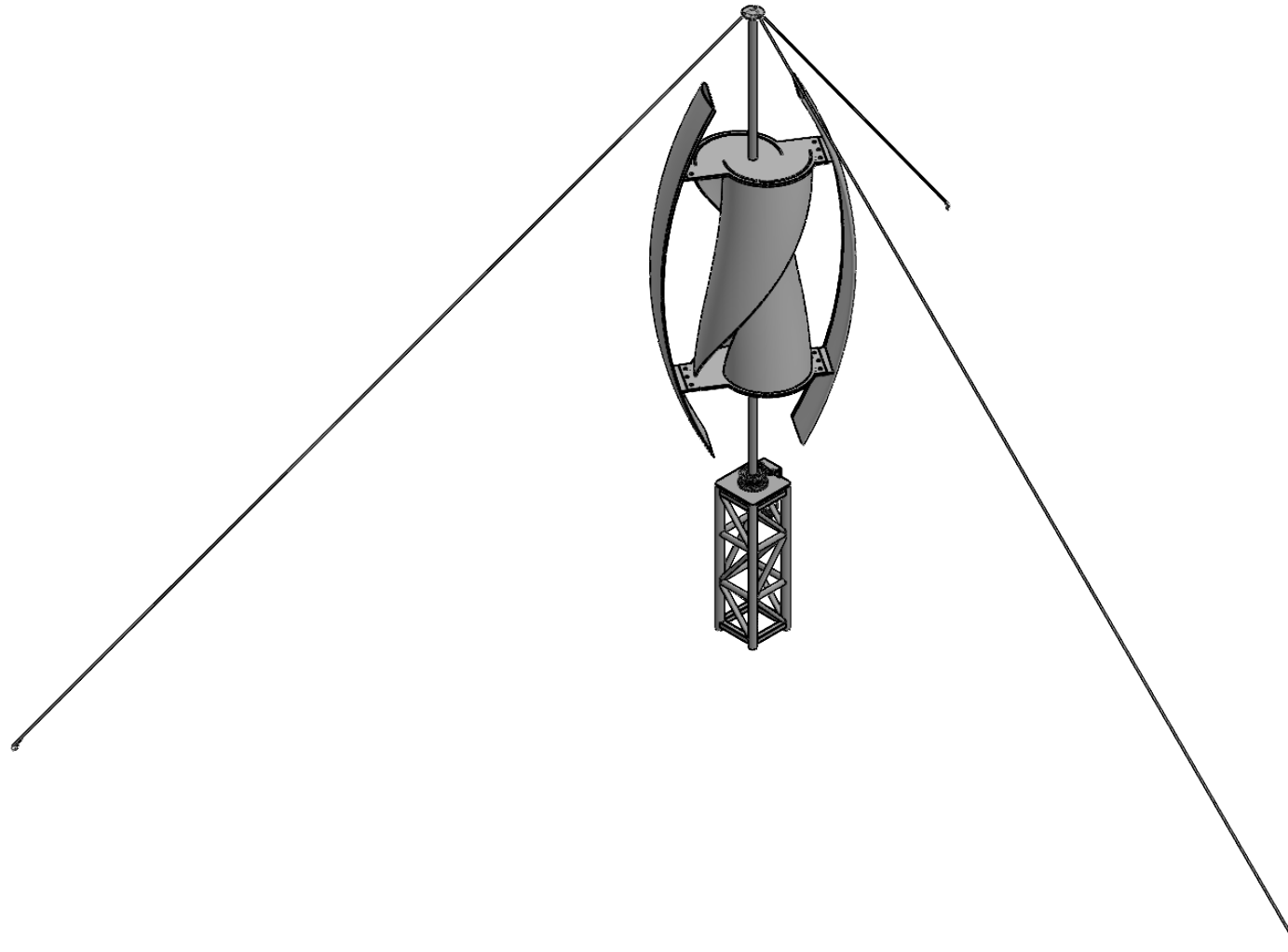
Para la puesta en marcha de la turbina eólica de eje vertical se deben seguir los siguientes pasos para garantizar un funcionamiento óptimo y seguro.

- ❖ Hay que asegurar que todos los anclajes estén bien asegurados y soportados.
- ❖ Verificar que todas las conexiones eléctricas estén seguras y que no haya daños visibles en la turbina eólica que hayan podido ocurrir en la instalación.
- ❖ Conectar los cables eléctricos desde la turbina hacia el sistema de almacenamiento.
- ❖ Girar las hélices de la turbina para asegurar de que no haya fricción excesiva o problemas de giro en el mecanismo.
- ❖ Iniciar gradualmente la turbina para evitar sobrecargas y observar su funcionamiento, esto mientras se va desactivando el freno manualmente.

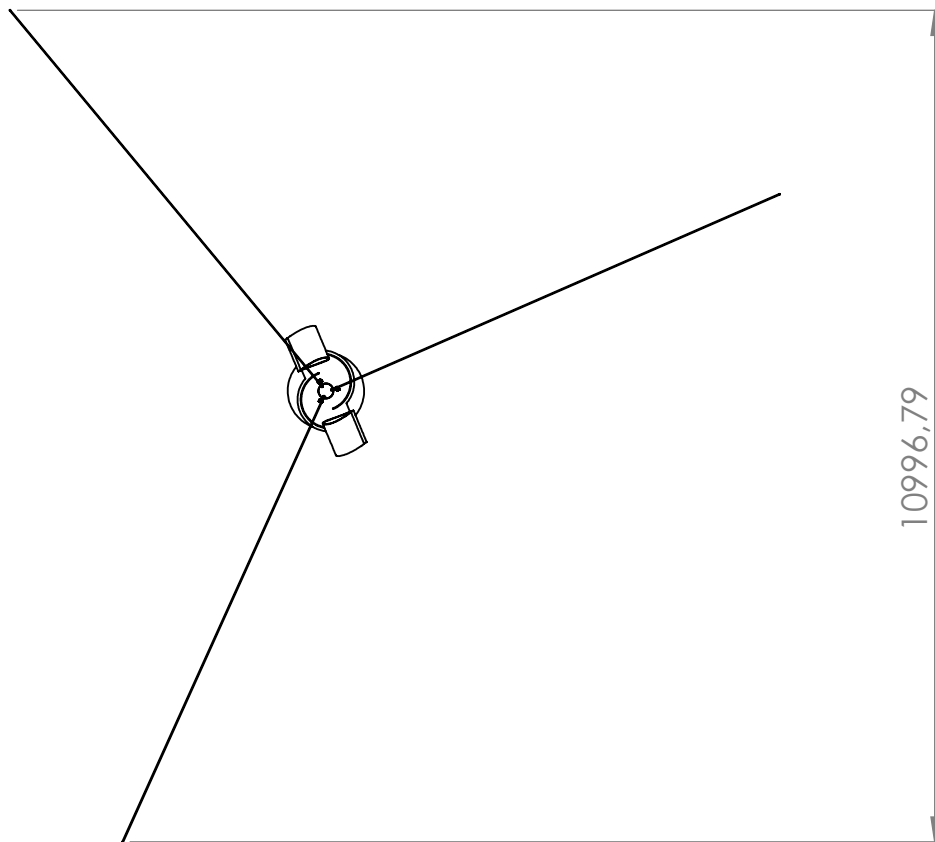
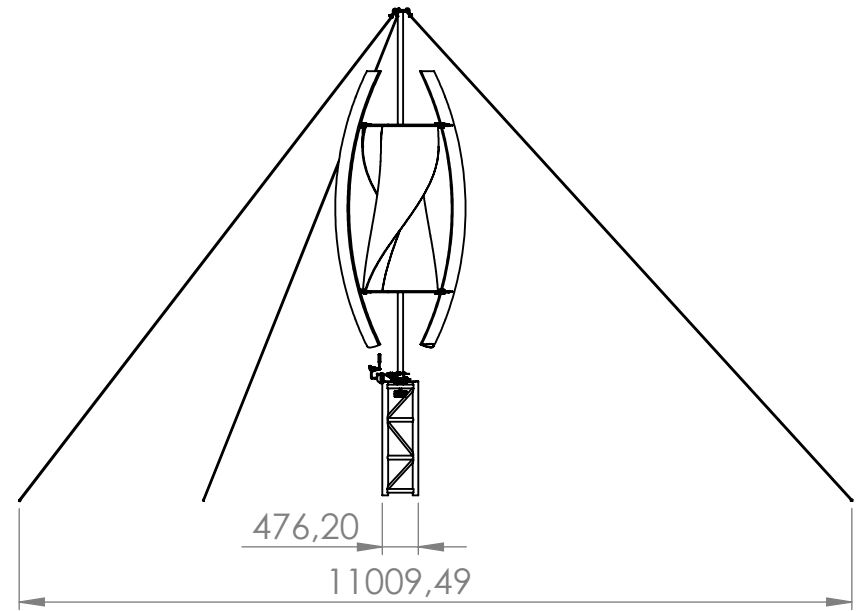
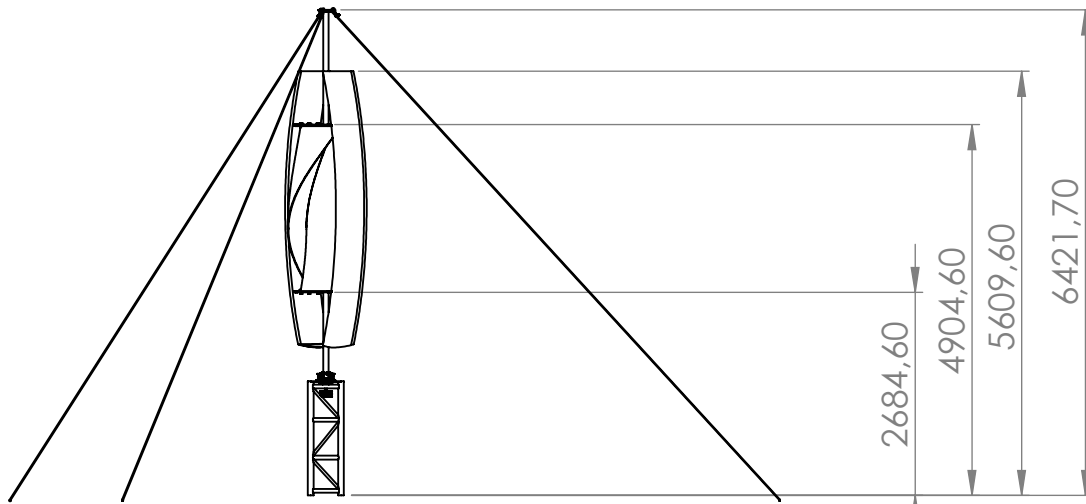
## 4. Mantenimiento

### 4.1. Rutina de mantenimiento

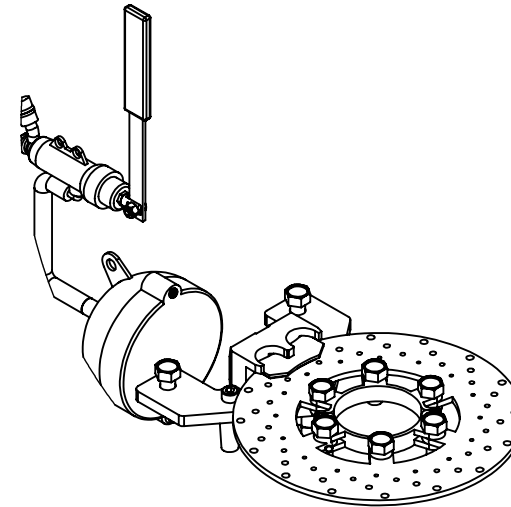
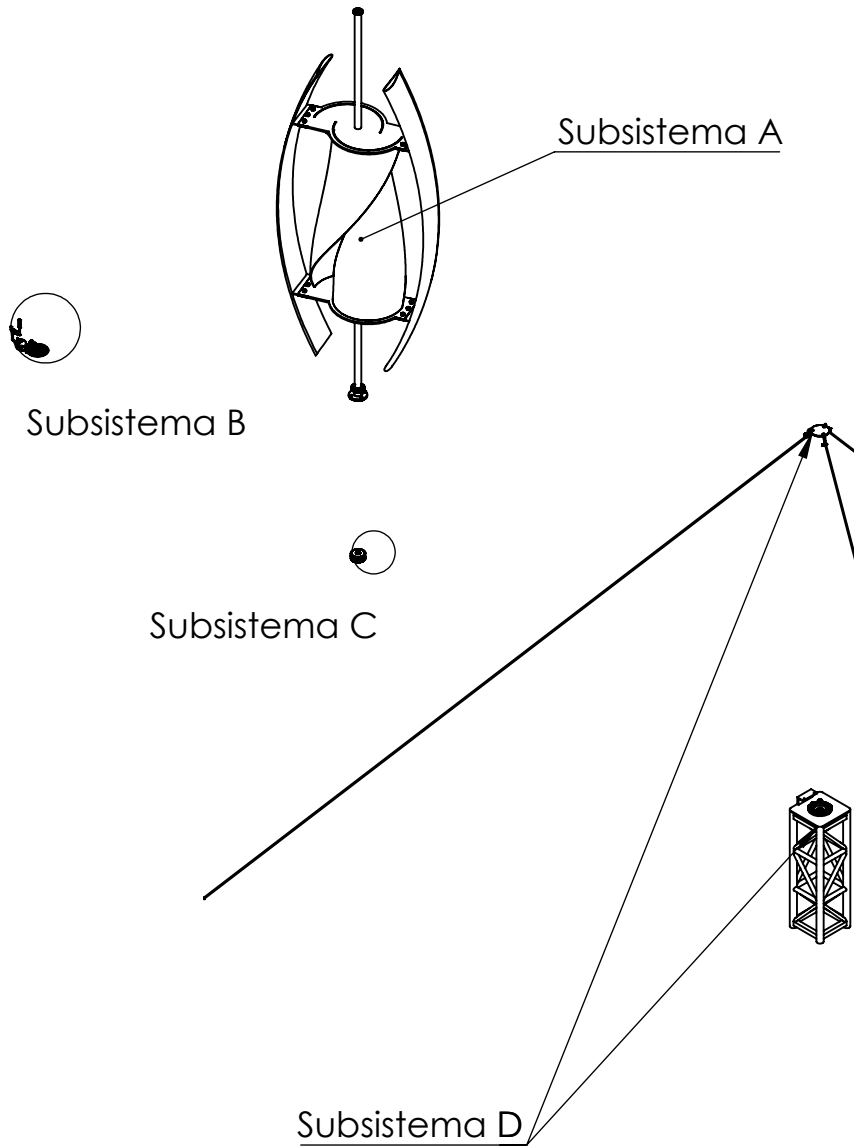
<b>Actividad</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Duración [horas]</b>
Inspección visual	Mensual	1
Lubricación rodamientos, engranajes y demás mecanismos móviles.	Trimestral	1
Limpieza de hélices y superficies expuestas	Trimestral	2
Inspección de sistema eléctrico	Semestral	1
Sistema de frenado	Trimestral	1
Balanceo de hélices	Anual	4
Inspección y verificación de anclajes y estructuras	Anual	3
Registro y documentación de inspecciones y mantenimientos realizados	Después de cada actividad realizada	1



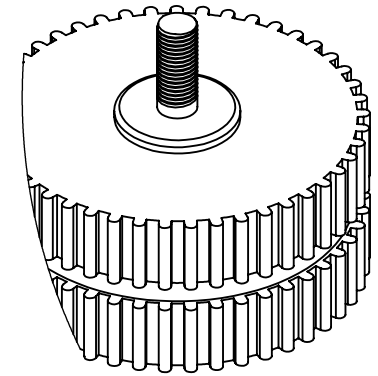
 	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 31/08/2023	TITULO:	
ESCALA: 1:60	<b>TURBINA EOLICA DE DOBLE HELICE</b>	
UNIDADES: mm	AUTOR: DIEGO ALEJANDRO CASAS JIMENEZ	
A4		REVIS: ING. RICARDO A. JAIMES ROLON
		HOJA: 1/12



 		<b>UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER</b>	
FECHA: 06/08/2023		TITULO:	
ESCALA: 1:100		<b>TURBINA EOLICA DE DOBLE HELICE</b>	
UNIDADES: mm		AUTOR: DIEGO ALEJANDRO CASAS JIMENEZ	
A4		REVIS: ING. RICARDO A. JAIMES ROLON	HOJA: 2/12



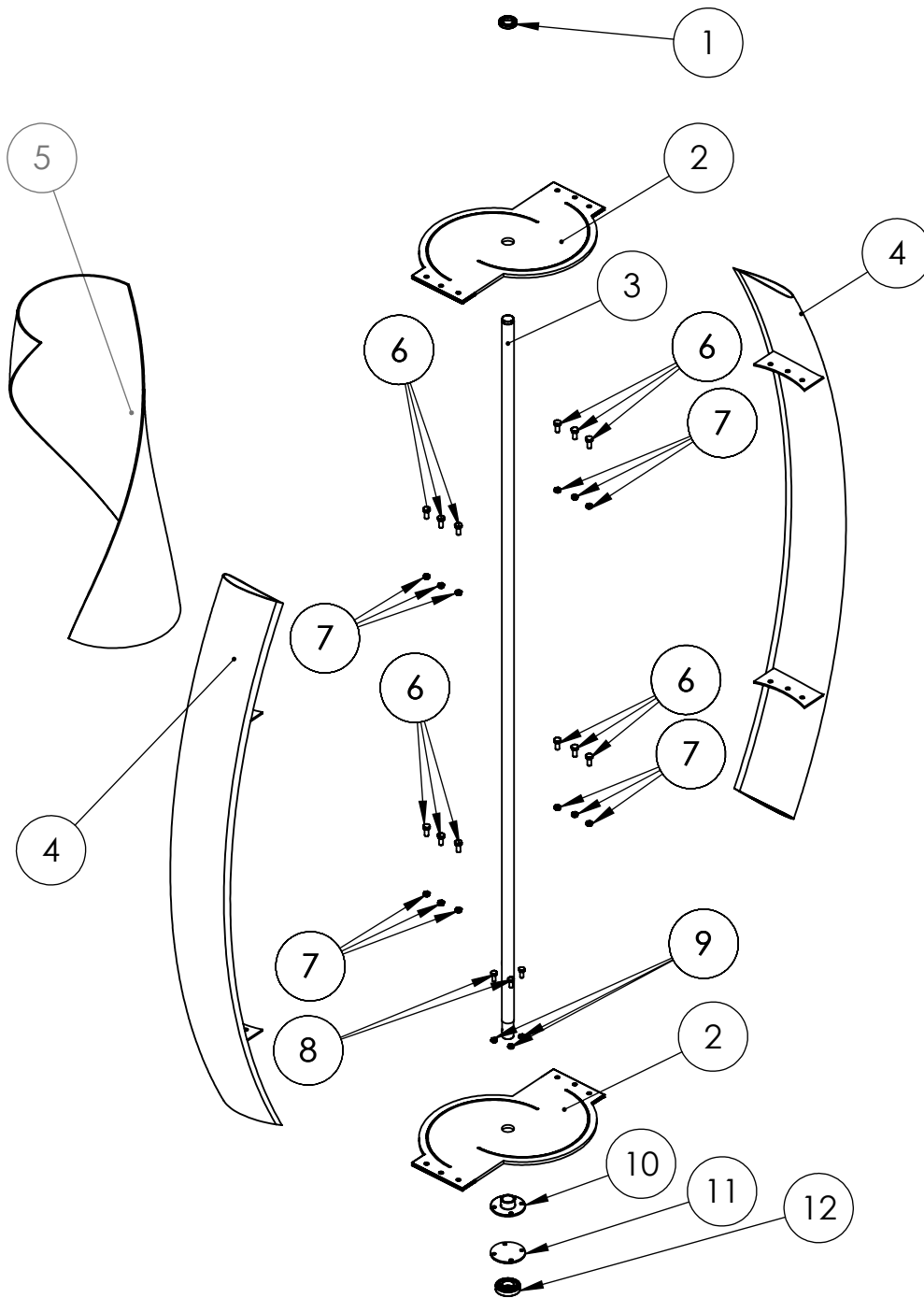
DETALLE Subsistema B  
ESCALA 1 : 6



DETALLE Subsistema C  
ESCALA 1 : 3

SUBSISTEMAS	CONJUNTO	CODIGO CONJUNTO
Subsistema A	Helices	TEDH-A-.XXX
Subsistema B	Frenado	TEDH-B-.XXX
Subsistema C	Generador	TEDH-C-.XXX
Subsistema D	Soperte	TEDH-D-.XXX

 	<b>UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER</b>	
FECHA: 06/08/2023	TITULO:	
ESCALA: 1:80	<b>TURBINA EOLICA DE DOBLE HELICE</b>	
UNIDADES: mm	AUTOR: DIEGO ALEJANDRO CASAS JIMENEZ	
A4		REVIS: ING. RICARDO A. JAIMES ROLON      HOJA: 3/12



### SUBSISTEMA DE HELICES

COMPONENTE N°	NOMBRE	CODIGO	CANTIDAD
1	Rodamiento SKF_6013	TEDH-A-.001	1
2	Tapa de soporte de helices	TEDH-A-.002	2
3	Eje principal	TEDH-A-.003	1
4	Helice tipo Troposkien	TEDH-A-.004	2
5	Helice tipo Helicoidal	TEDH-A-.005	2
6	Tornillo HHFBOLD 0.875-14x2x2	TEDH-A-.006	12
7	Tuerca HJNUT 0.875-14-B	TEDH-A-.007	12
8	Tornillo HHFBOLD 0.75-16x1.75x1.375	TEDH-A-.008	4
9	Tuerca HHJNUT 0.75-16-B	TEDH-A-.009	4
10	Acople superior de eje	TEDH-A-.010	1
11	Acople inferior de eje	TEDH-A-.011	1
12	Rodamiento SKF_30313	TEDH-A-.012	1



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FECHA: 15/08/2023

TITULO:

ESCALA: 1:40

**TURBINA EOLICA DE DOBLE HELICE**

UNIDADES: mm

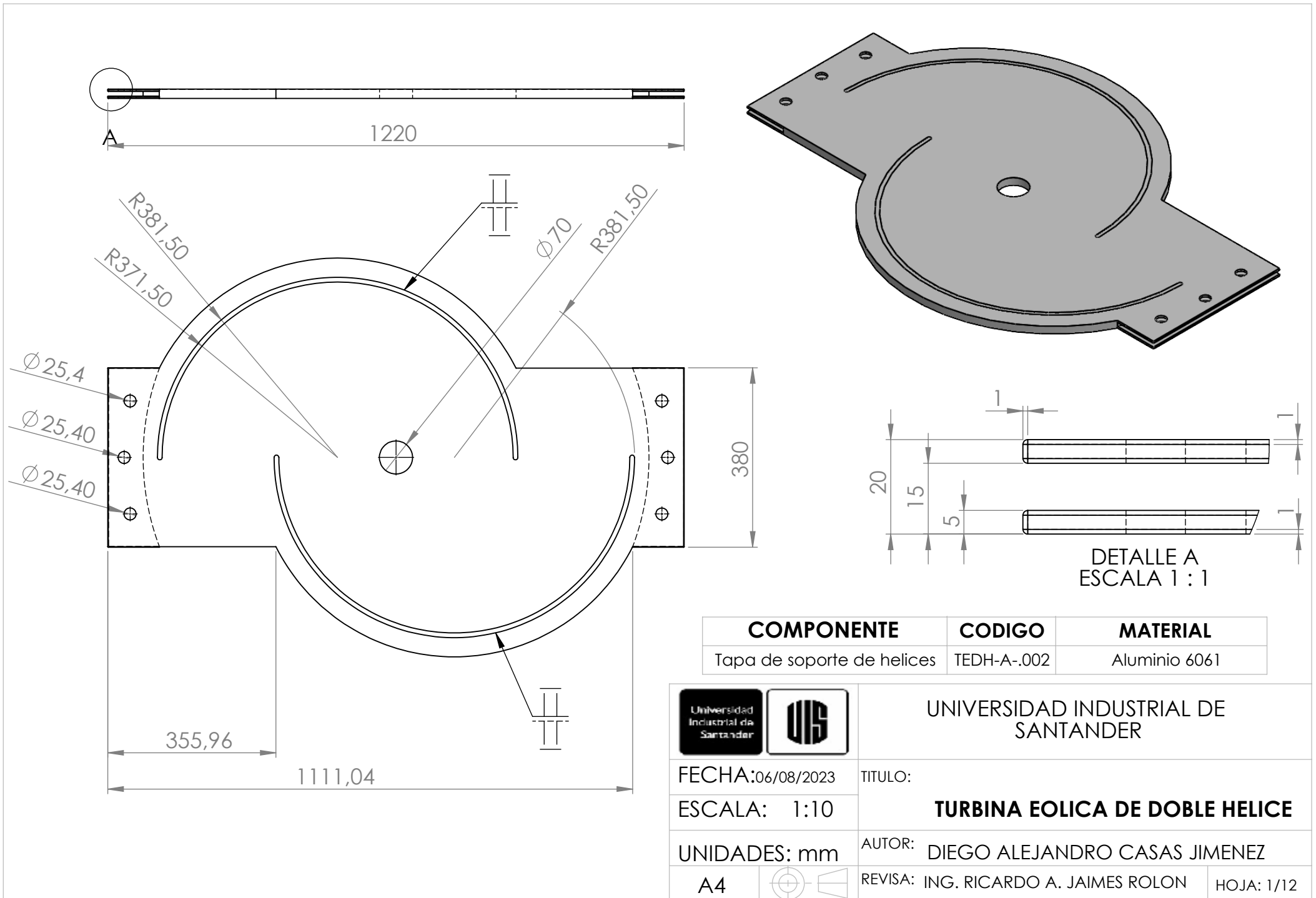
AUTOR: DIEGO ALEJANDRO CASAS JIMENEZ

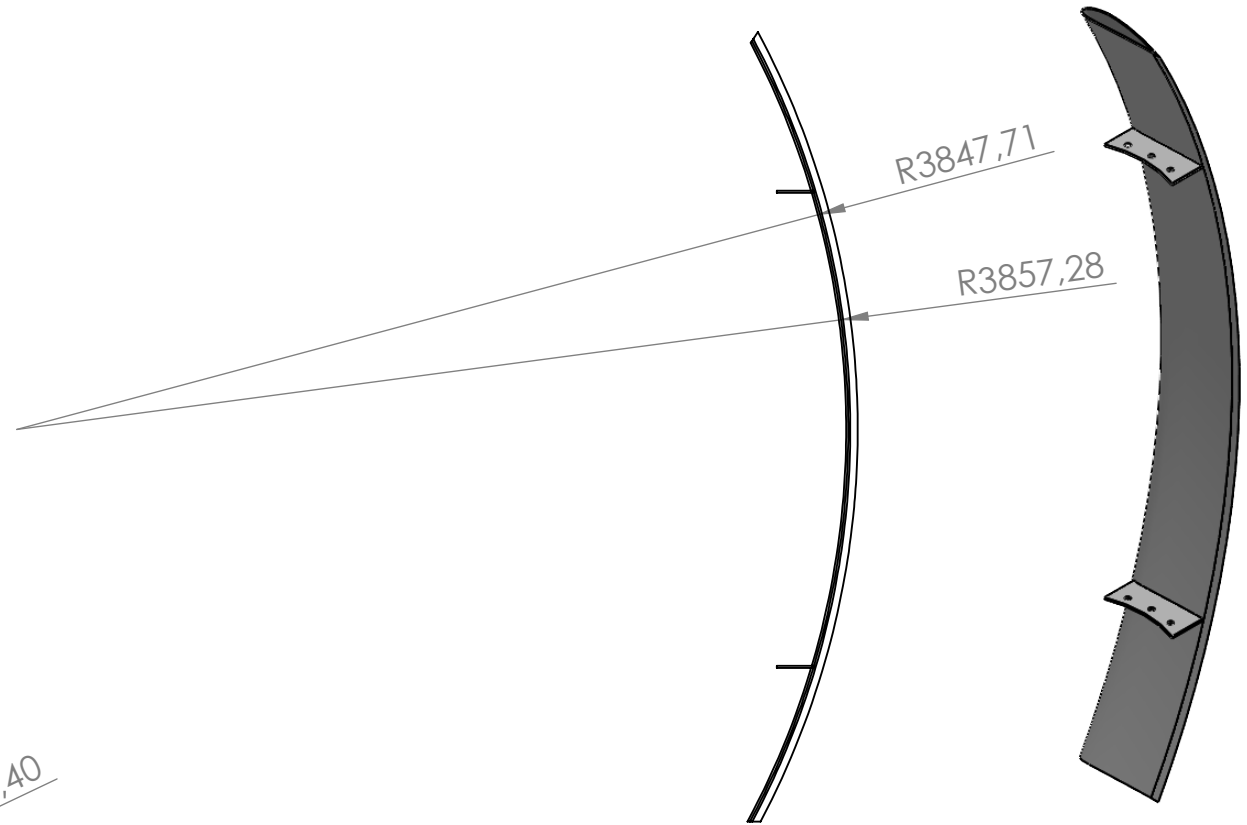
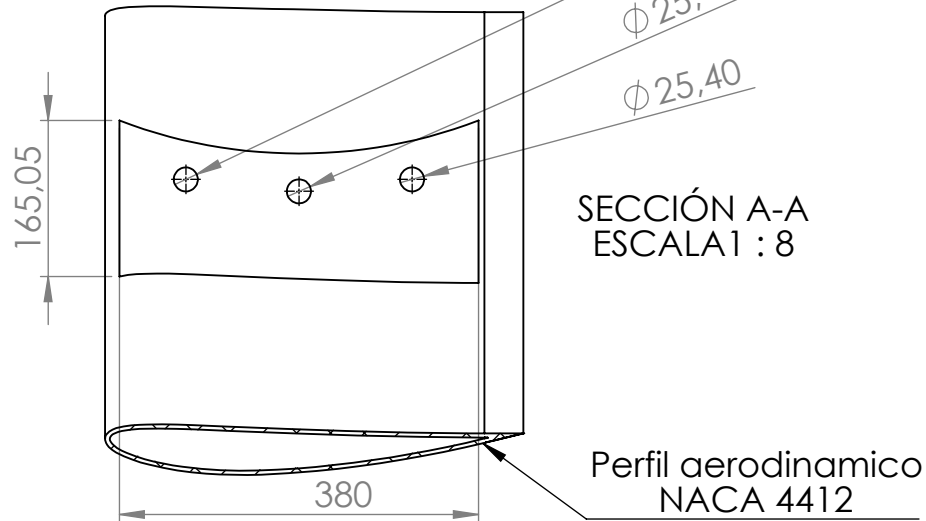
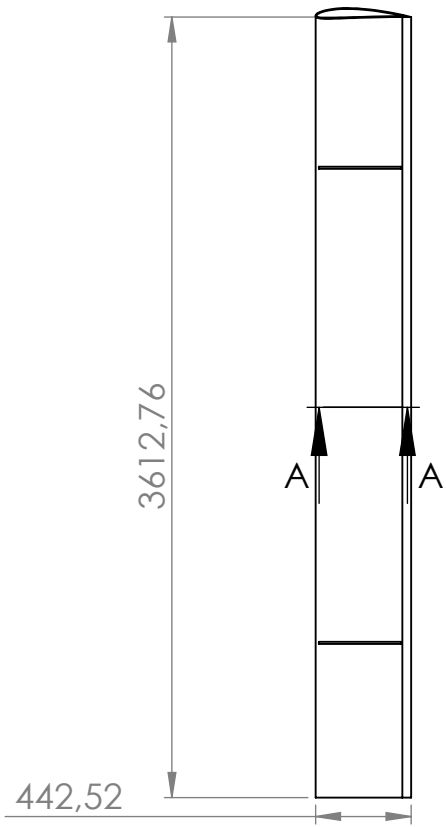
A4



REVIS: ING. RICARDO A. JAIMES ROLON

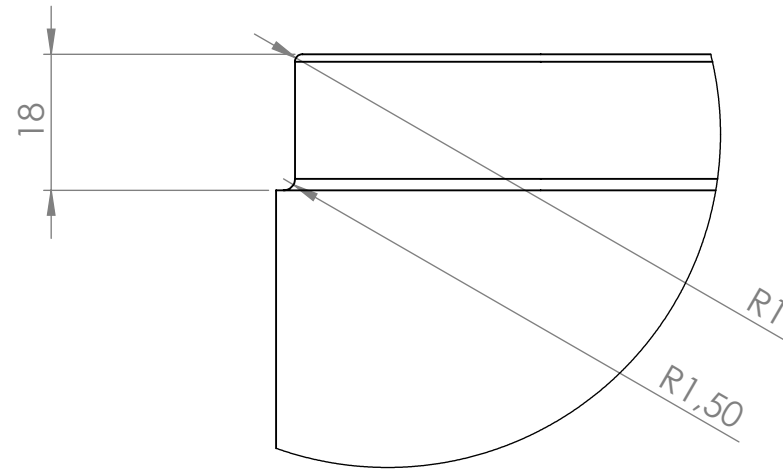
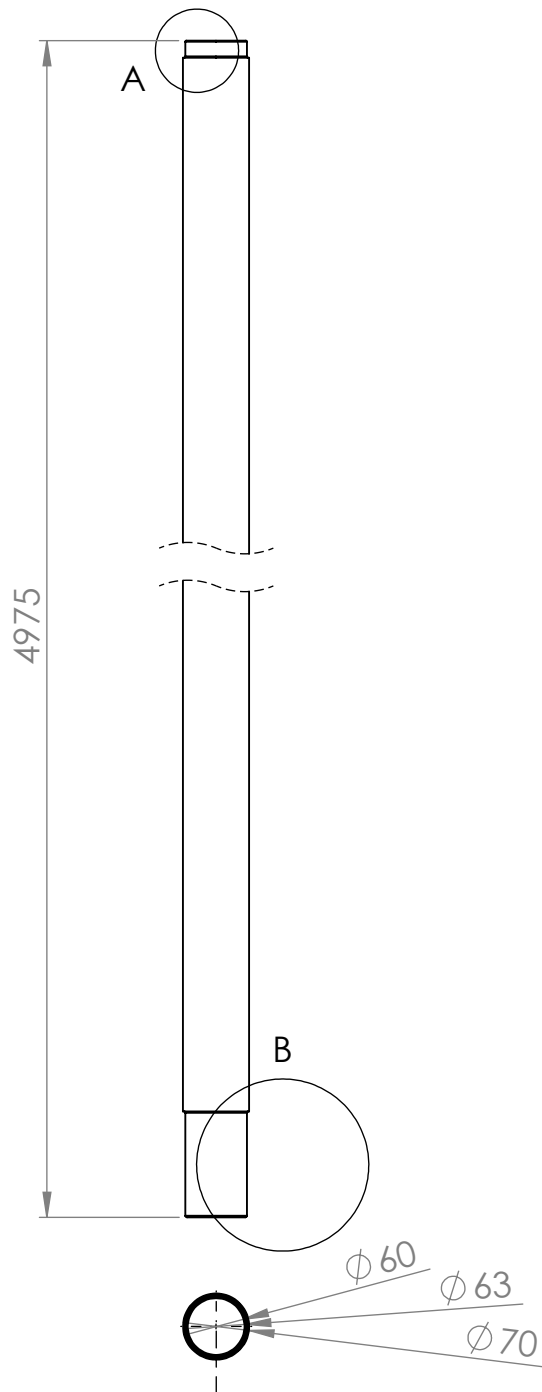
HOJA: 4/12



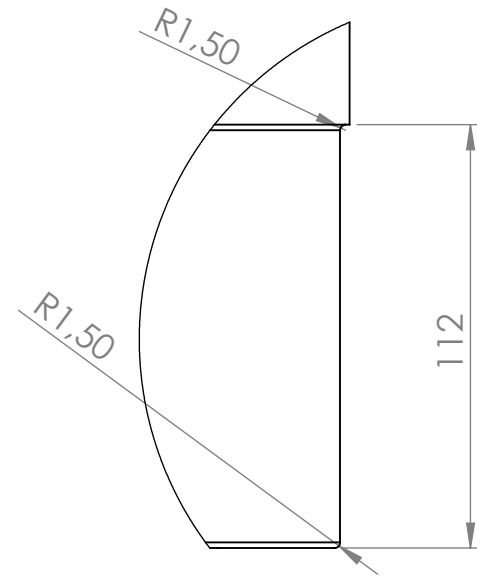


COMPONENTE	CODIGO	MATERIAL
Helices tipo Troposkien	TEDH-A-.004	Aluminio 6061

 	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 06/08/2023	TITULO:	
ESCALA: 1:35	<b>TURBINA EOLICA DE DOBLE HELICE</b>	
UNIDADES: mm	AUTOR: DIEGO ALEJANDRO CASAS JIMENEZ	
A4		REvisa: ING. RICARDO A. JAIMES ROLON HOJA: 1/12



DETALLE A  
ESCALA 1 : 1

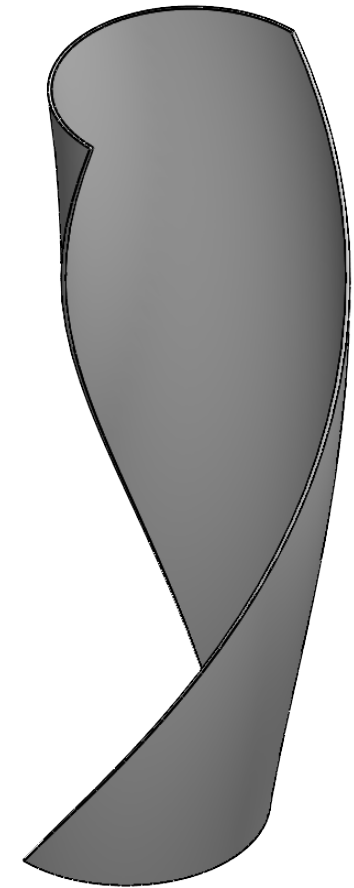
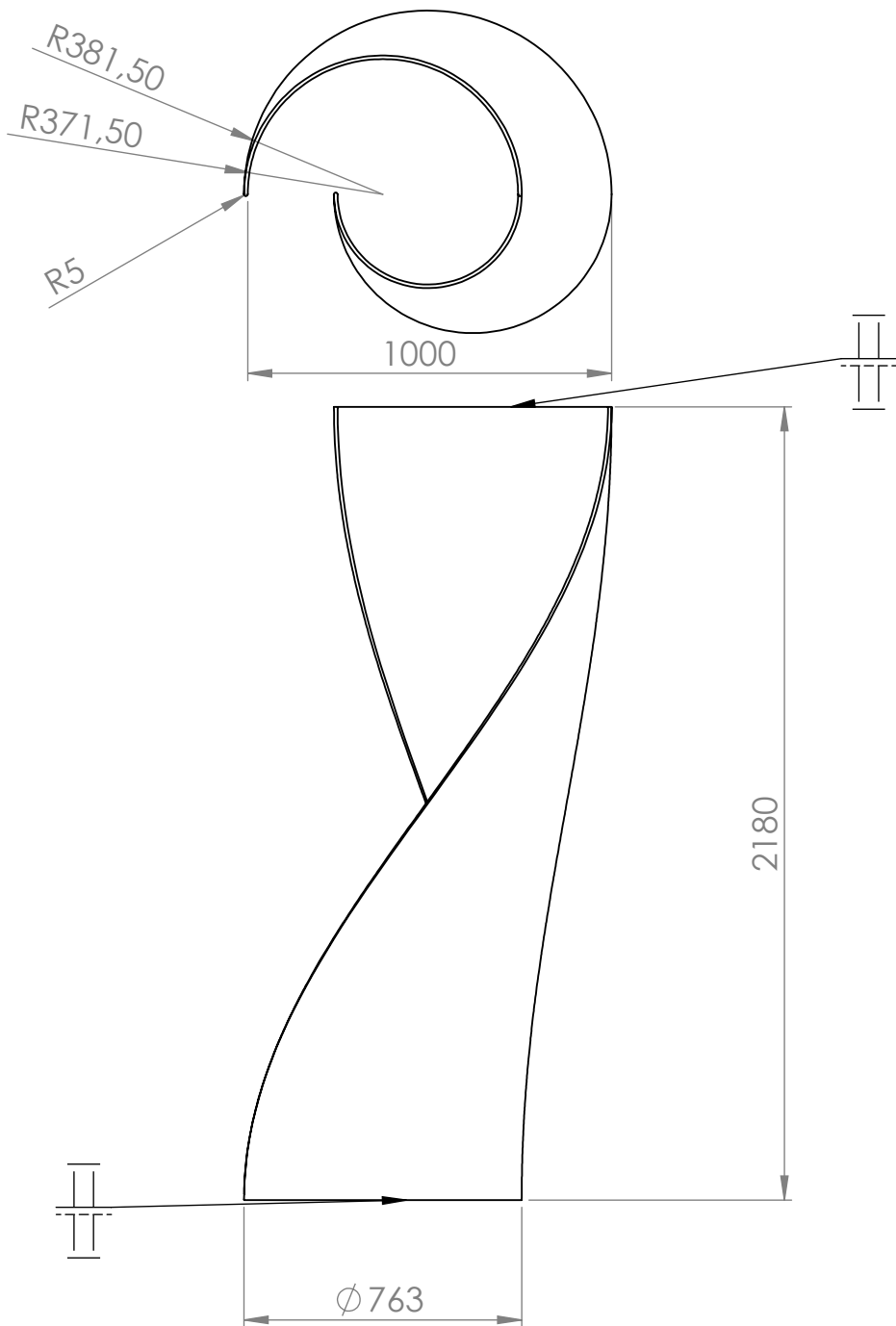


DETALLE B  
ESCALA 1 : 2



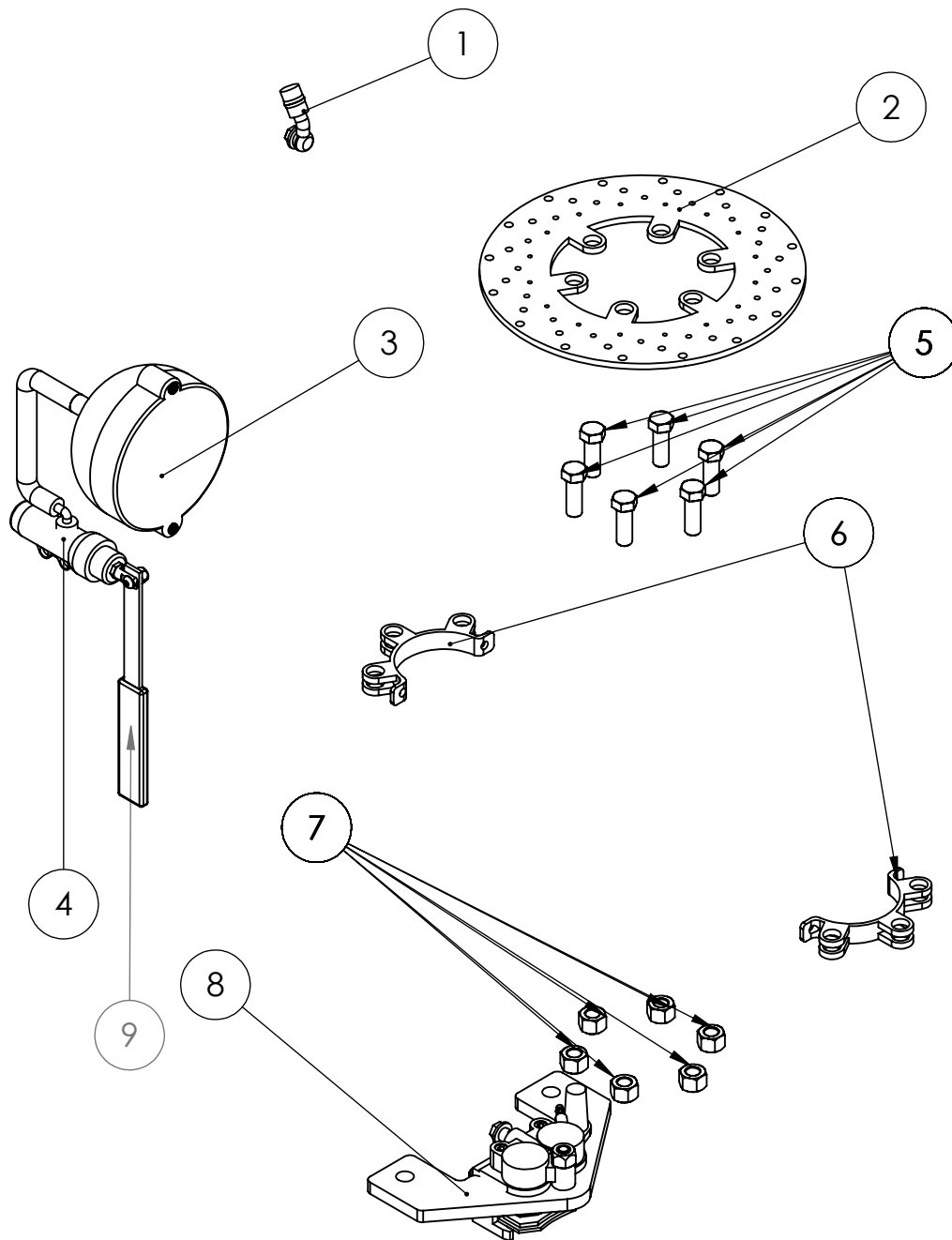
COMPONENTE	CODIGO	MATERIAL
Eje principal	TEDH-A-.003	Acero inoxidable 1.4313

 	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 16/08/2023	TITULO:	
ESCALA: 1:8	<b>TURBINA EOLICA DE DOBLE HELICE</b>	
UNIDADES: mm	AUTOR: DIEGO ALEJANDRO CASAS JIMENEZ	
A4		REvisa: ING. RICARDO A. JAIMES ROLON HOJA: 7/12



COMPONENTE	CODIGO	MATERIAL
Helices tipo helicoidal	TEDH-A-.005	Aluminio 6061

 	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 16/08/2023	TITULO:	
ESCALA: 1:20	<b>TURBINA EOLICA DE DOBLE HELICE</b>	
UNIDADES: mm	AUTOR: DIEGO ALEJANDRO CASAS JIMENEZ	
A4		REVIS: ING. RICARDO A. JAIMES ROLON
		HOJA: 8/12



### SUBSISTEMA DE FRENADO

COMPONENTE N°	NOMBRE	CODIGO	CANTIDAD
1	Cabezal hidraulico	TEDH-B-.001	1
2	Disco de freno	TEDH-B-.002	1
3	Tanque de freno	TEDH-B-.003	1
4	Bomba de freno	TEDH-B-.004	1
5	Tornillo HFBLOT 0.4375-20x1.75x1.75	TEDH-B-.005	6
6	Sujetador de Disco	TEDH-B-.006	2
7	Tuerca HTNUT 0.4375-20	TEDH-B-.007	6
8	Caliper de freno	TEDH-B-.008	1
9	Palanca de freno	TEDH-B-.009	1



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FECHA: 16/08/2023

TITULO:

ESCALA: 1:5

**TURBINA EOLICA DE DOBLE HELICE**

UNIDADES: mm

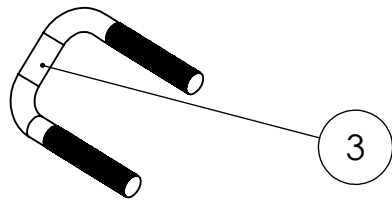
AUTOR: DIEGO ALEJANDRO CASAS JIMENEZ

A4

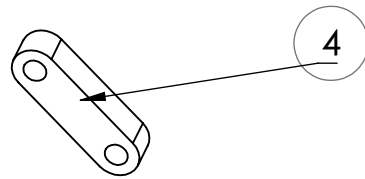


REVIS: ING. RICARDO A. JAIMES ROLON

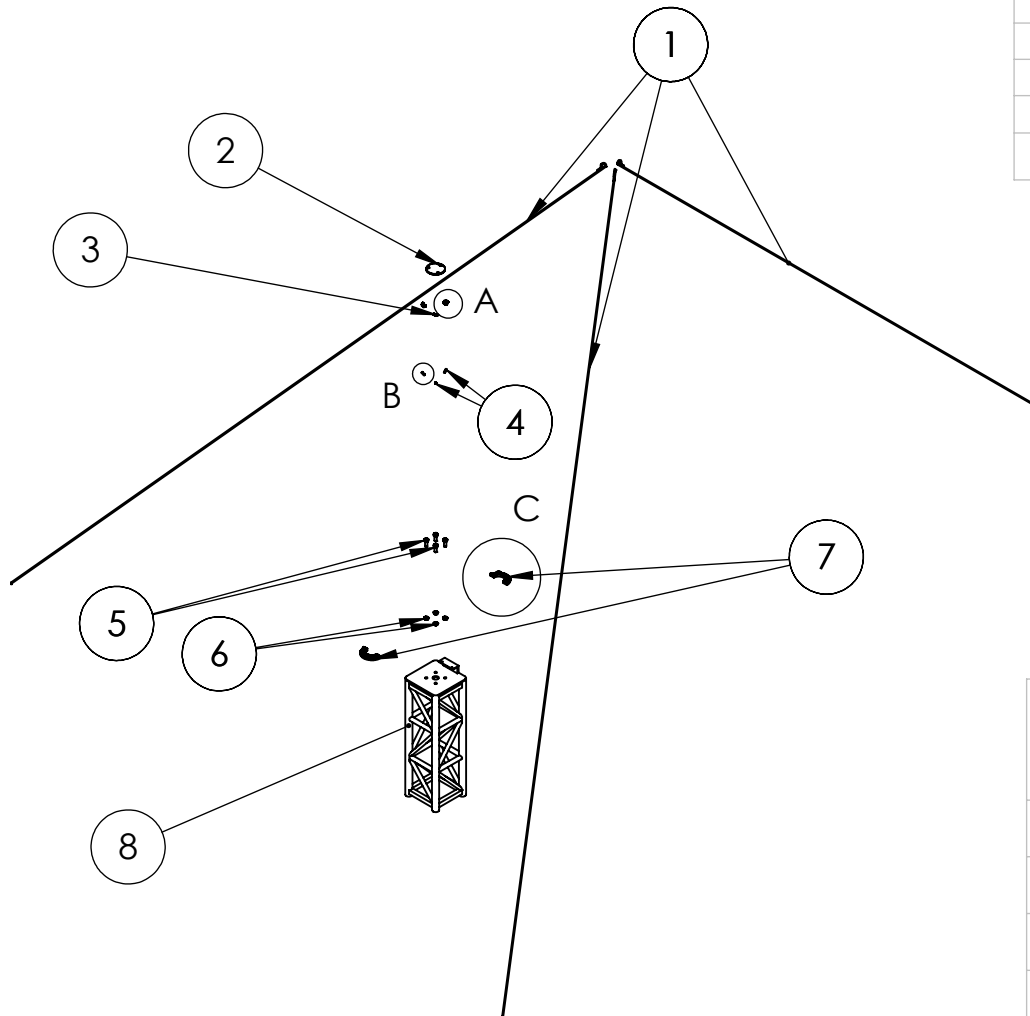
HOJA: 9/12



DETALLE A  
ESCALA 1 : 2

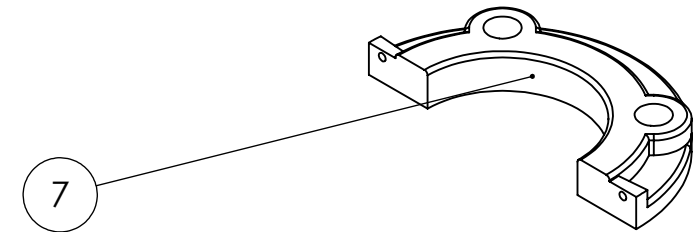


DETALLE B  
ESCALA 1 : 2



### SUBSISTEMA DE SOPORTE

COMPONENTE N°	NOMBRE	CODIGO	CANTIDAD
1	Cuerdas de soporte	TEDH-D-.001	3
2	Tapa superior	TEDH-D-.002	1
3	Abrazadera de cuerda	TEDH-D-.003	3
4	Sujetador de abrazadera	TEDH-D-.004	3
5	Tornillo HHBLOT 1.0-8x2.75x1.75	TEDH-D-.005	4
6	Tuerca HHJNUT 1.0-8	TEDH-D-.006	4
7	Chumacera de Rodamiento	TEDH-D-.007	2
8	Base	TEDH-D-.008	1



DETALLE C  
ESCALA 1 : 5



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE  
SANTANDER

FECHA: 16/08/2023

TITULO:

ESCALA: 1:80

**TURBINA EOLICA DE DOBLE HELICE**

UNIDADES: mm

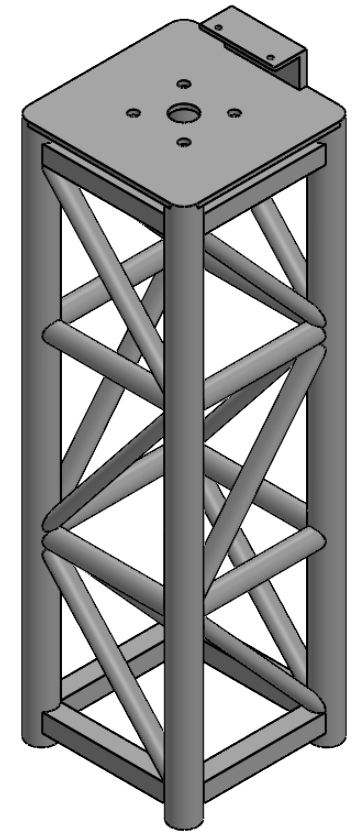
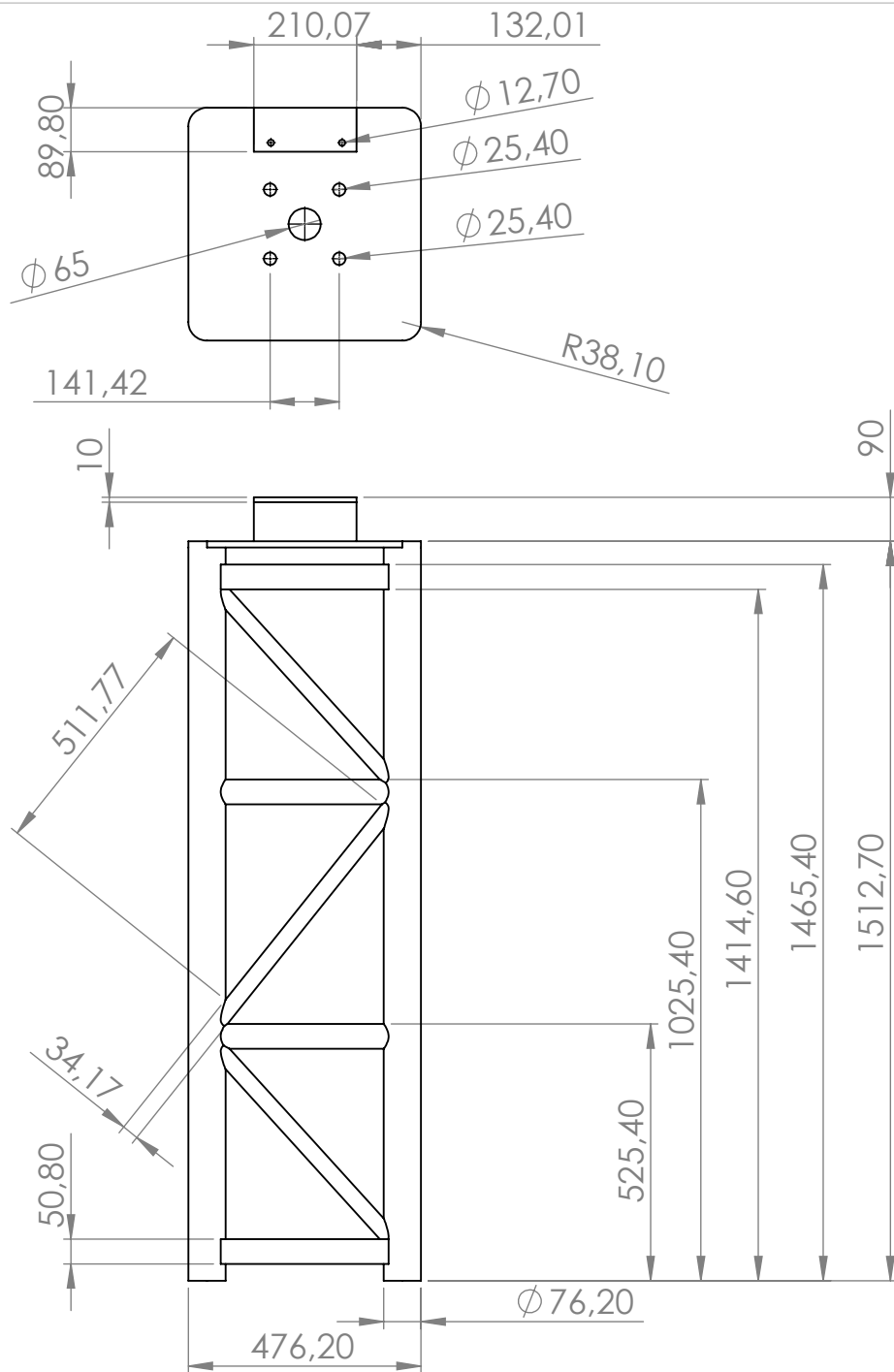
AUTOR: DIEGO ALEJANDRO CASAS JIMENEZ

A4



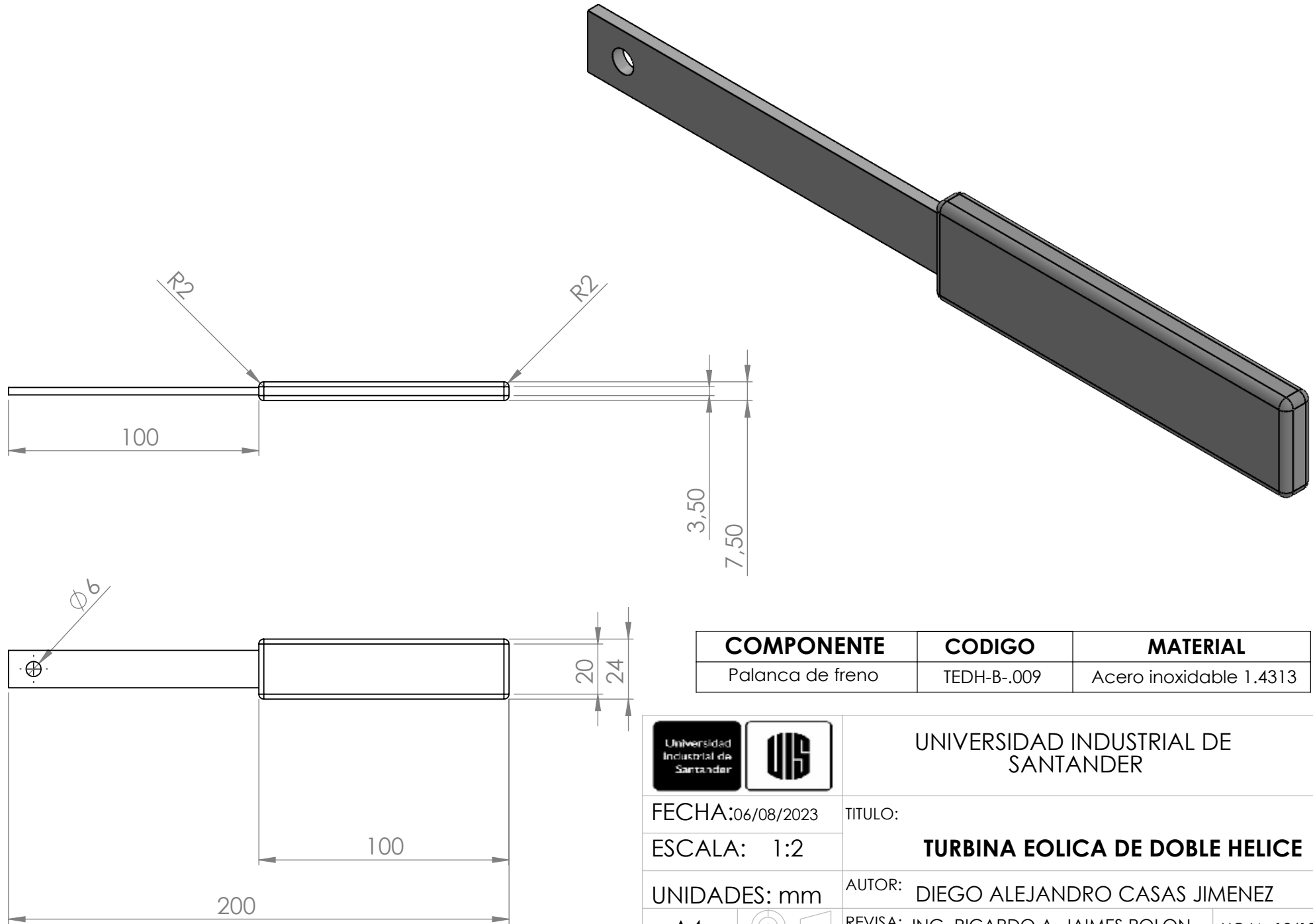
REVIS: ING. RICARDO A. JAIMES ROLON

HOJA: 10/12



COMPONENTE	CODIGO	MATERIAL
Base	TEDH-D-.008	Acero inoxidable 1.4313

 	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 06/08/2023	TITULO:	
ESCALA: 1:15	<b>TURBINA EOLICA DE DOBLE HELICE</b>	
UNIDADES: mm	AUTOR: DIEGO ALEJANDRO CASAS JIMENEZ	
A4		REVIS: ING. RICARDO A. JAIMES ROLON
		HOJA: 11/12



COMPONENTE	CODIGO	MATERIAL
Palanca de freno	TEDH-B-.009	Acero inoxidable 1.4313

 	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 06/08/2023	TITULO:	
ESCALA: 1:2	<b>TURBINA EOLICA DE DOBLE HELICE</b>	
UNIDADES: mm	AUTOR: DIEGO ALEJANDRO CASAS JIMENEZ	
A4		REVIS: ING. RICARDO A. JAIMES ROLON
		HOJA: 12/12