

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MONTAJE EXPERIMENTAL
PARA LA EVALUACIÓN DE UN PROTOTIPO DE
AEROGENERADOR MIXTO DARREIUS – SAVONIUS**

**JUAN SEBASTIÁN MIRANDA ÁVILA
ANDRES FELIPE GIL FRANCO**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
BOGOTÁ**

2023

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MONTAJE EXPERIMENTAL
PARA LA EVALUACIÓN DE UN PROTOTIPO DE
AEROGENERADOR MIXTO DARREIUS – SAVONIUS**

**JUAN SEBASTIÁN MIRANDA ÁVILA
FELIPE ANDRES GIL FRANCO**

**Trabajo de grado en la modalidad de auxiliar de
investigación para optar el título de ingenieros mecánicos**

Director

Ing. Andrés José Zapata Saad.

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
BOGOTÁ**

2023

AGRADECIMIENTOS

*Le agradezco a Dios y a mis padres la oportunidad de convertirme en ingeniero mecánico, por brindarme la sabiduría y apoyo incondicional en tantos años de esfuerzo, por el cariño brindado, por las lecciones que me hacen ser lo que soy hoy, por el acompañamiento en los momentos de incertidumbre y sobre todo les agradezco jamás haberme permitido renunciar a mis sueños. Agradezco a **VECTOR ITC** y a todos sus colaboradores por recibirme en el momento más difícil de mi vida, por ayudarme, por permitirme trabajar y estudiar, por brindarme las mejores experiencias de mi vida y sobre todo por ayudarme a forjarme como persona. A **Maria Paula Velandia Sedano**, por estar a mi lado en estos momentos y brindarme todo su cariño y apoyo para construir mis nuevos proyectos profesionales y personales. Finalmente, le agradezco a **“Florentina Daza”** que me otorgó su amor durante tantos años y me proporcionó los pilares teóricos para realizar este trabajo de grado, a ese tormentoso amor que solo Dios sabe cuánto quise.*

Juan Sebastián Miranda Ávila.

En primer lugar, les agradezco a mis padres que siempre me han brindado su apoyo incondicional para poder cumplir todos mis metas tanto personales y académicos. Ellos son los que con su cariño me han impulsado y guiado en todo este camino que he recorrido hasta ahora en mi vida. También agradecer a toda mi familia que sin ellos no habría podido seguir en la carrera, a mis abuelos por su apoyo y cariño, a mi tío por su forma de enseñarme y no dejarme las cosas tan fáciles. Agradecer a todos mis compañeros que me han marcado ellos saben perfectamente porque y como me han ayudado en este camino tan especial. Por último, agradezco a las personas que ya no están conmigo pero que viven en mi corazón siempre y han marcado mi ser. Y el logro más importante y que se lo quiero dedicar especial mente a mi abuelo Gabriel que fue el fundador del proyecto de vida familiar y que estaría orgulloso en este momento de mi vida.

Andres Felipe Gil Franco

CONTENIDO

CONTENIDO	4
RESUMEN	6
INTRODUCCIÓN.....	7
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	8
2. JUSTIFICACIÓN.....	10
3. OBJETIVOS	11
3.1. Objetivo general.....	11
3.2.Objetivos específicos	11
4. MARCO REFERENCIAL	12
4.1.Marco conceptual.....	13
4.2.Estado del arte.....	13
4.3.Marco teórico	14
4.3.1 Energías renovables	14
4.3.2 Aerogeneradores de eje vertical.....	14
4.3.3 Rotor Savonius.....	14
4.3.4 Determinación del torque en el modelo Savonius	17
4.3.5 Rotor Darreius.....	18
4.3.6 Modelo de un solo tubo de corriente.....	19
4.3.7 Modelo de múltiples tubos de corriente.....	19
4.3.8 Modelo del doble disco actuador de múltiples tubos.....	21
4.3.9 Conversión de la energía eólica en energía eléctrica	25
4.4.1 Sensores	26
4.4.2 Transductores.....	27
4.4.3 Amplificadores	27
4.4.4 Módulo SD.....	27
4.4.5 Distribución de Weibull.....	27
5. PARAMETRIZACIÓN Y LOCALIZACIÓN.....	31
5.1. Perfil de elevación.....	35
5.2.Aplicación del método estadístico de Weibull a los datos obtenidos por la NASA.....	36
5.3.Aplicación del método estadístico de Weibull a los datos obtenidos por el IDEAM	46
6. PARÁMETROS DE DISEÑO PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DEL AEROGENERADOR	48
6.1. Perfil aerodinámico	48

6.2. Actividades para la fabricación del prototipo del aerogenerador	51
7. DISEÑO DEL EJE DEL PROTOTIPO	55
7.1. Análisis estático	64
7.2. Análisis por fatiga	69
8. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS	70
9. UBICACIÓN DEL PROTOTIPO DEL AEROGENERADOR Y DEL DISPOSITIVO DE ADQUISICIÓN DE DATOS.....	78
10. CONFIABILIDAD DEL MONTAJE EXPERIMENTAL.....	81
11. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA.....	84
11.1. Diseño de los engranajes en Inventor.....	86
11.2. Factor de seguridad para engranajes plásticos	89
11.3. Actividades para la construcción del sistema de transmisión	92
12. CONCLUSIONES.....	94
13. RECOMENDACIONES.....	95
14. BIBLIOGRAFÍA.....	96

RESUMEN

El proyecto de grado está enfocado en el diseño y construcción de un dispositivo que permita la medición de algunas propiedades físicas como potencia, velocidad angular, torque, voltaje entre otras de un prototipo de aerogenerador mixto el cual estará ubicado en la **Universidad Santo Tomás sede central**. Para lograr lo anteriormente mencionado se utilizarán métodos estadísticos que permitan obtener la velocidad teórica del viento en la sede principal de la Universidad Santo Tomás.

Teniendo en cuenta lo anterior, es necesario establecer parámetros y requerimientos para el diseño y la fabricación del dispositivo, inicialmente se obtendrá la velocidad teórica aproximada a la que se espera girará el prototipo. Posteriormente se determinará si los elementos que componen el prototipo del aerogenerador soportarán las cargas máximas a las que se verá sometida cuando esté en funcionamiento.

Para lograr lo anteriormente mencionado se utilizarán criterios de probabilidad de Weibull e información del portal de la **NASA** y el **IDEAM** para obtener un valor teórico cercano de la velocidad en la Universidad Santo Tomás sede central , a partir del valor promedio de la velocidad del viento se obtendrá la velocidad angular a la que girará el prototipo y a partir de este valor se determinará el torque, la potencia y el voltaje en tiempo real del prototipo de la turbomáquina , para lograr todo lo mencionado se diseñará un código la obtención de las propiedades mencionadas.

Una vez el dispositivo permita al usuario la visualización de las propiedades se podrá definir (junto con toda la información del proyecto) si bajo las condiciones del lugar es sostenible el prototipo y si es viable establecer un modelo real para apoyar la mitigación de material particulado en la ciudad de Bogotá a través del uso de energías limpias.

INTRODUCCIÓN

Actualmente en la facultad de ingeniería mecánica de la **Universidad Santo Tomás sede central** no se cuenta con un dispositivo de medición de propiedades en tiempo real de un aerogenerador, cabe decir que tampoco dentro de las instalaciones de la Universidad se cuenta con una alternativa energética real que permita apoyar la disminución de contaminación producida por los diferentes tipos de automóviles en la ciudad de Bogotá.

Cabe recalcar que la contaminación producida por los vehículos en la capital de Colombia es considerablemente alta ya que representan el **60,3%** de la contaminación del aire [1]. Bajo lo anterior este efecto trae grandes problemas a la salud como enfermedades cardiovasculares, asma entre otros.

En el espacio académico **Proyecto integrador** se planteó el diseño de un prototipo de aerogenerador de eje vertical que permitiese la carga de una batería de un vehículo eléctrico y al mismo tiempo pudiese ayudar a mitigar el efecto de contaminación por los vehículos en la ciudad de Bogotá, pero debido a la falta de información y de presupuesto no se pudo definir si en efecto este prototipo pudiese servir como alternativa para la disminución de material particulado a través de modelos de energías renovables.

Cabe recalcar que, al prototipo del aerogenerador construido en el espacio académico Proyecto Integrador se le implementaron algunas partes como un sistema de transmisión de potencia, modificaciones a la estructura entre otros. Lo anterior se hizo para agregar al prototipo el dispositivo de medición ya que como se mencionó previamente no se pudo obtener datos de operación por parte del prototipo.

Para determinar si el prototipo pudiese servir y fomentar el uso de energías alternativas dentro de la **Universidad Santo Tomás sede central** es necesario determinar; la potencia que puede generar el prototipo, el torque y la velocidad angular que éste puede producir (entre otras propiedades), con el fin de determinar si bajo las condiciones del lugar se puede establecer un modelo más grande que permita en futuros **trabajos académicos** cargar baterías de vehículos eléctricos se construirá un dispositivo que permita determinar en tiempo real las magnitudes previamente mencionadas.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el espacio académico **Proyecto Integrador** se diseñó y construyó un prototipo de aerogenerador de eje vertical mixto entre los modelos *Savonius* y *Darrieus*. El objetivo del proyecto de clase era diseñar un sistema que pudiera permitir que los estudiantes de la Universidad Santo Tomás sede central pudieran cargar baterías de vehículos eléctricos personales usando energías limpias. Lo anterior se hizo con el fin de incentivar el uso de este tipo de vehículos que permiten mitigar los problemas de contaminación y mejorar la movilidad. Según un estudio realizado por el Ministerio de Ambiente y la organización Greenpeace afirmó que gran parte la contaminación dentro de la ciudad es provocada por los diferentes vehículos que se transportan puesto que representa el 60,3% de la contaminación del aire en Bogotá [1].

La contaminación en la ciudad de Bogotá es tal que puede provocar diferentes tipos de enfermedades como asma bronquial y enfermedades cardiovasculares, esto se debe a la quema de combustibles en vehículos con motor a combustión interna los cuales emiten material particulado y otros contaminantes [2]. Además de los problemas que ocasiona la contaminación dentro de la capital, Bogotá está catalogada como una de las ciudades con mayor tasa de congestión vehicular a nivel mundial lo cual afecta directamente la salud de la sociedad bogotana [3].

El prototipo de la turbina en efecto se probó con las corrientes de viento que circulan en la Universidad Santo Tomás sede central, pero no se pudo obtener información respecto a la potencia que pudiese generar el prototipo. Por consiguiente, es necesario diseñar un dispositivo que permita medir en tiempo real si el prototipo bajo las condiciones del lugar genera suficiente potencia para implementar un diseño a escala real. Cabe recalcar que para implementar el dispositivo de medición fue necesario realizar algunas modificaciones como diseñar y construir un sistema de transmisión de potencia, cambios a la estructura del prototipo entre otros. Todo esto se hizo con el fin de garantizar el funcionamiento del dispositivo de medición.

Si bien es posible mediante la mecánica de fluidos computacional predecir el funcionamiento de la turbina [4]. No sería el método más adecuado ya que este tipo de modelamientos estarían por fuera del alcance de un proyecto para estudiantes de pregrado ya que son temas de posgrado debido a su complejidad en los parámetros de análisis y diseño, por ejemplo, una simulación realizada en Egipto demostró que es necesario establecer parámetros de diseño muy rigurosos ya que de no ser así la eficiencia del rotor Savonius respecto a la del rotor Darrieus es inferior cuando se unifican los aerogeneradores en un modelo híbrido [5].

Por las razones previamente expuestas se decidió evaluar el funcionamiento de la turbina de manera experimental. Actualmente no se cuenta con un montaje experimental en la facultad de ingeniería mecánica que tenga la capacidad de evaluar la potencia en tiempo real este tipo de turbinas. Por tanto, es necesario **DISEÑAR Y CONSTRUIR UN MONTAJE EXPERIMENTAL QUE PERMITA OBTENER DATOS DE OPERACIÓN**

VELOCIDAD ANGULAR, TORQUE, VOLTAJE) con el fin de confirmar cual es la potencia que genera el prototipo del aerogenerador bajo las condiciones de la velocidad teóricas del viento en la Universidad Santo Tomás sede central.

La información proporcionada en este trabajo de grado permitirá confirmar en futuros trabajos académicos si la facultad de ingeniería mecánica puede aportar información respecto a un modelo a escala real el cual permita la disminución del material particulado producido por los carros en la ciudad de Bogotá a través de la carga de baterías de vehículos eléctricos usando la energía producida por el aerogenerador.

2. JUSTIFICACIÓN

El propósito de este trabajo de investigación es diseñar y construir un montaje experimental que pueda ser utilizado en la Universidad Santo Tomás sede central y que permita medir potencia real, velocidad angular, torque entre otras características físicas para garantizar tanto a la Universidad Santo Tomás como al usuario que el prototipo construido es funcional bajo las condiciones del lugar. Este proyecto suministrará información suficiente con la cual se podrá evaluar si dentro de las instalaciones de la Universidad Santo Tomás sede central se podrá diseñar y construir un aerogenerador que produzca más potencia para cargar más baterías.

Es importante destacar que el objetivo principal de este proyecto no es determinar la eficiencia del prototipo construido, sino diseñar un dispositivo que permita la obtención de la potencia generada por la turbomáquina bajo las condiciones teóricas de las corrientes de viento que circula en **la Universidad Santo Tomás sede central**.

Durante el desarrollo del proyecto se realizarán las respectivas investigaciones que permitan: definir los parámetros necesarios para el diseño y construcción del montaje experimental para medir algunas propiedades físicas del aerogenerador, cabe decir que todo esto se hace con el fin de impulsar el uso de energías renovables dentro de la Universidad Santo Tomás construyendo dispositivos funcionales y económicamente viables.

Este proyecto además de implementarle a la Facultad de Ingeniería Mecánica un prototipo de aerogenerador mixto y un sistema de adquisición de datos de diferentes características físicas entiendo real le permitirá a todos los estudiantes y docentes realizar mejoras tanto teóricas como experimentales del aerogenerador con el fin de apoyar el uso de energías alternativas. Debido a las razones previamente expuestas y a todos los beneficios que trae este proyecto de grado a la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Santo Tomás. Bajo lo anterior, este proyecto de grado permitirá la obtención del título de ingenieros mecánicos.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo General.

Diseñar y construir un montaje experimental que permita la evaluación de una turbina de eje vertical mixta para la obtención de la potencia generada por el aerogenerador bajo las condiciones teóricas de las corrientes del viento en la **Universidad Santo Tomás sede central**.

3.2. Objetivos Específicos.

- ✓ Obtener la velocidad del viento teórica que circula en la **Universidad Santo Tomás sede central** caracterizando las corrientes de aire utilizando la información de la **NASA** y del **IDEAM** a través del parámetro de análisis la probabilidad de Weibull.
- ✓ Diseñar y construir un dispositivo de medición que permita la obtención de la potencia, torque y velocidad angular producida por el prototipo del aerogenerador durante su operación.
- ✓ Verificar a través de pruebas experimentales la confiabilidad del montaje experimental.

4. MARCO REFERENCIAL

➤ AEROGENERADORES DE EJE VERTICAL (VAWT):

Los aerogeneradores verticales son turbinas eólicas las cuales el eje del rotor principal generalmente se coloca de manera transversal al viento, a su vez sus componentes se encuentran en la base de este tipo de turbinas con el fin de optimizar procesos de reparación y mantenimiento. Las turbinas de eje vertical se caracterizan por producir energía en lugares con baja velocidad de viento.

- **AEROGENERADOR SAVONIUS:** Este tipo de turbinas eólicas de eje vertical se caracterizan por ser dispositivos de arrastre o de resistencia, generalmente constan de dos o tres pisos dependiendo su aplicación (las turbinas Savonius forman una S si se observa desde una vista superior) [6] . Debido a la curvatura de las palas el rotor experimenta menor resistencia al viento cuando estas se mueven en contra del aire (las palas de este tipo de aerogeneradores no necesitan estar orientadas a la dirección del viento).
- **AEROGENERADOR DARREIUS:** Es una turbina caracterizada por el perfil aerodinámico que tienen sus palas, existen múltiples aerogeneradores Darreius, principalmente se diseñan y se fabrican dependiendo de su aplicación. Generalmente cuando este tipo de turbo máquinas están girando sus aerodeslizadores se mueven hacia adelante a través del aire formando una trayectoria circular [6]. A diferencia del rotor Savonius este tipo de turbinas es caracterizada por ser un dispositivo de sustentación, fue diseñada en 1926 por el ingeniero Jean Marie Darreius.

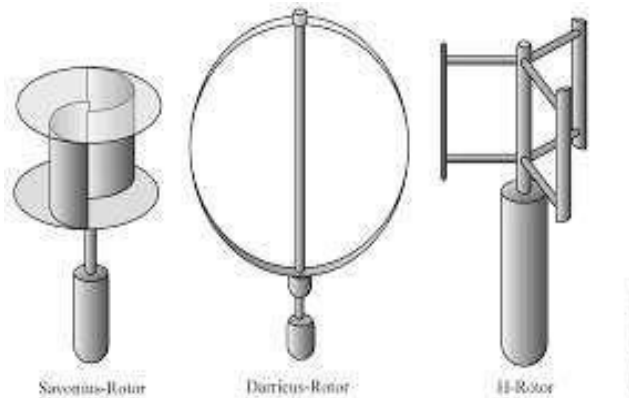


Imagen 1. Aerogeneradores de eje vertical [7].

➤ **PROBABILIDAD DE WEIBULL:**

La distribución de Weibull (también llamada como distribución de tres parámetros), es una técnica que permite la estimación de datos medidos. Fue diseñada en 1951 con el fin de simular un amplio rango de distribuciones estadísticas como lo son la normal, la exponencial entre otras [7]. En el caso de análisis la velocidad del viento cambia continuamente, por lo que es necesario describirlo de forma estadística para aumentar la fiabilidad de los resultados.

➤ **SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS:**

Los sistemas de adquisición de datos son procesos en los que a través de un computador portátil se pueden medir fenómenos eléctricos [8], físicos entre otros. Generalmente este tipo de sistemas consisten en dos sensores enlazados a un hardware el cual permite la implementación de un sistema de adquisición de datos y un computador.

Imagen 2. Funcionamiento de un sistema de adquisición de datos [8].



4.1. ESTADO DEL ARTE.

En la búsqueda de información de diseño y construcción de aerogeneradores de eje vertical y dispositivos de medición en los mismos se logró encontrar investigaciones en diferentes partes de Latinoamérica.

El autor **Arcila Arias Andrés Felipe** en el año 2017 realizó un trabajo de grado “**TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS Y CONTROL PARA BANCO DE SIMULACIÓN DE TURBINA EÓLICA**”, en el cual a través de diferentes dispositivos electrónicos logró obtener las RPM a las que trabajaba el motor de la turbina (además de obtener el torque y la potencia generada). Además, proporcionó una guía sobre cómo se debe realizar el programa y cómo se debe hacer el respectivo uso. El resultado del ingeniero mecatrónico se basó en brindar una guía sobre cómo a través de un software se puede obtener la velocidad angular del motor de un aerogenerador torque y otras características físicas.

Los autores **Daniel Márquez, Alexander Barreto y Betty Farías** en el año 2021 realizaron una investigación “**DEVELOPMENT OF A PORTABLE DATA ACQUISITION SYSTEM FOR KAPLAN TURBINE BANK**”. En este trabajo diseñaron una interfaz de adquisición de datos para la medición vacuo-métrica a la entrada de la bomba y la presión de salida de la bomba y la presión de entrada del fluido en la turbina a través de sensores utilizando diferentes velocidades angulares en la turbina.

Las autoras **Caita Espitia Carolina y Lilian Johanna Puerto Molina** en el año 2014 realizaron un trabajo de grado “**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MINI AEROGENERADOR DE EJE VERTICAL**” en el cual intentaron suplir una demanda energética en la ciudad de Bogotá, este proyecto permite la visualización sobre cómo se puede implementar un sistema de carga y bajo las condiciones de estudio la cantidad de energía máxima alcanzada por el aerogenerador.

El autor **Vidal Diago Carlos** realizó una investigación para su título de Máster en ingeniería mecatrónica “**DISEÑO DE UN AEROGENERADOR SAVONIUS PARA USO DOMÉSTICO**”. El autor en este trabajo diseñó un aerogenerador Savonius doble etapa con el fin de intentar suplir las necesidades energéticas de una casa en España en el documento se ven los parámetros necesarios para el diseño de un rotor Savonius e implementa la probabilidad de Weibull con el fin de obtener la potencia anual ponderada del rotor.

Cabe decir que la información adquirida de trabajos de grado e investigaciones relacionados al diseño de dispositivos de adquisición de datos en aerogeneradores no contemplan en sus diseños parámetros de análisis de dirección del viento ni su velocidad en tiempo real. Muchos de los artículos encontrados están enfocados a la toma de datos a partir del sistema de transmisión. Lo anterior da lugar a que incluyendo parámetros como la velocidad del viento en tiempo real e históricos de intensidad del aire se podrán dar valores de potencia del aerogenerador de mayor veracidad.

4.2. MARCO TEÓRICO

4.2.1. Energías renovables

Las energías renovables son fuentes de energía limpias e inagotables que se obtienen de fuentes de la naturaleza que no producen gases de efecto invernadero, ni emisiones contaminantes. Las diferentes fuentes de energía son las siguientes: la energía solar, la energía eólica, la energía mareomotriz, la energía geotérmica, la energía solar, térmica, la energía hidráulica y la energía producida mediante biomasa [9].

Existen varios tipos de energías de este tipo, pero **en este desarrollo del proyecto nos centraremos en una en particular; la energía eólica la cual es obtenida a partir de la energía cinética del viento** existe ciertos dispositivos llamados turbinas de viento o aerogeneradores que están diseñados para poder captar la mayor cantidad de esta energía cinética posible y generar electricidad. A nivel industrial la potencia que un aerogenerador debe generar oscila entre los 30 kW y los 100 kW, pero para uso doméstico se recomienda una potencia inferior a los 30 Kw [9].

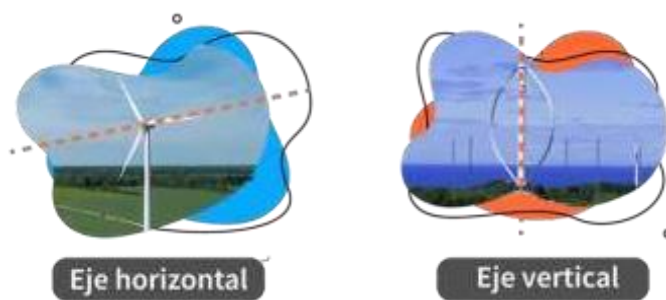


Imagen 3. Tipos de aerogeneradores [9].

4.2.2. Aerogeneradores de eje vertical

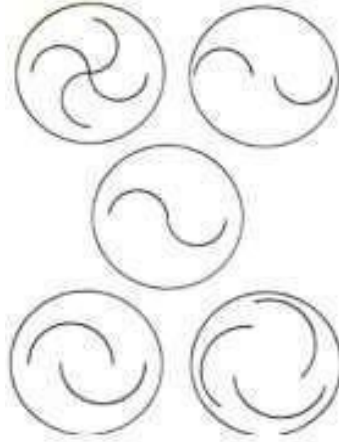
Los aerogeneradores de eje vertical tienen una ventaja muy preponderante respecto a los de eje horizontal y es que no necesitan dispositivos de orientación, pueden adaptarse en la dirección del viento [10]. Esta clase de aerogeneradores funcionan bajo la diferencia del coeficiente de arrastre entre las dos mitades de la sección expuesta al viento, con lo anterior el viento hace que el rotor sea propenso a girar sobre su eje en una dirección. Las consideraciones para el diseño de este tipo de aerogeneradores son las siguientes:

- Los aerogeneradores de eje vertical operan con baja velocidad y pueden generar potencias que van desde los **200 W** a los **4MW** [10]. Son de fácil reparación ya que sus elementos de transformación de energía se encuentran generalmente a nivel del suelo.

4.2.3. Rotor Savonius

Alrededor de 1920 y 1930 Sigurd Savonius diseñó un nuevo sistema eólico de eje vertical el cual consistía en dos semi cilíndricos traslapados los cuales están unidos a través de un eje vertical [11]. El cilindro hueco partido por la mitad las cuales han sido desplazadas para ser convertidas en una S, las partes cóncavas de este diseño capturan el viento mientras que la parte posterior ofrece una resistencia menor al viento por lo tanto este tipo de aerogenerador girará en el sentido que menos resistencia oponga el viento.

Imagen 4. Ensayos de S.J Savonius [11].



Los resultados obtenidos por S.J Savonius de manera experimental fueron del 31% de eficiencia lo cual era un valor muy por encima del límite de Betz anteriormente había afirmado que la máxima eficiencia de un molino de eje vertical era del 20% pero con los resultados experimentales de S.J Savonius demostró de manera experimental que este sistema tiene un 31% de eficiencia, valor superado por lo establecido por Betz [11].

Como se determinó anteriormente este tipo de aerogeneradores son de arrastre, es decir que la energía rotacional se genera por el empuje del viento y no por sustentación aerodinámica [12], como la mayoría de las turbinas modernas.

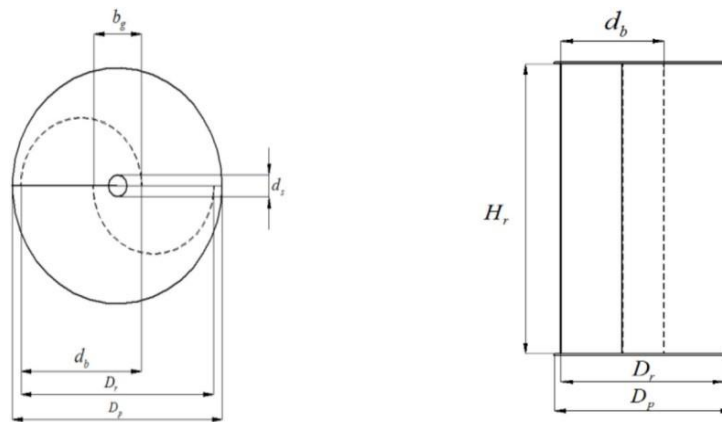


Imagen 5. Aerogenerador Savonius [12].

Existen muchos criterios y parámetros cuando se pretende diseñar y/o fabricar una turbina Savonius, para efectos de este trabajo de grado solo se tendrá en cuenta aquellos parámetros que permitan entender su funcionamiento matemático de manera individual con el fin de entender su comportamiento cuando este tipo de turbomáquinas trabajan de manera híbrida.

Existe un parámetro en los aerogeneradores de eje vertical llamado relación de velocidad lineal del extremo de las palas y la velocidad del viento (*TSR*), este factor se obtiene de la siguiente manera para turbomáquinas Savonius:

$$TSR = \frac{w D}{2U}$$

Ecuación 1. Relación de velocidad [13].

El parámetro del *TSR* está relacionado directamente con el coeficiente de potencia del aerogenerador el cual representa qué tan eficiente la turbomáquina convierte la energía recolectada del viento en electricidad [13]. Como se muestra en la imagen existen diferentes factores de relación dependiendo el tipo de aerogenerador.

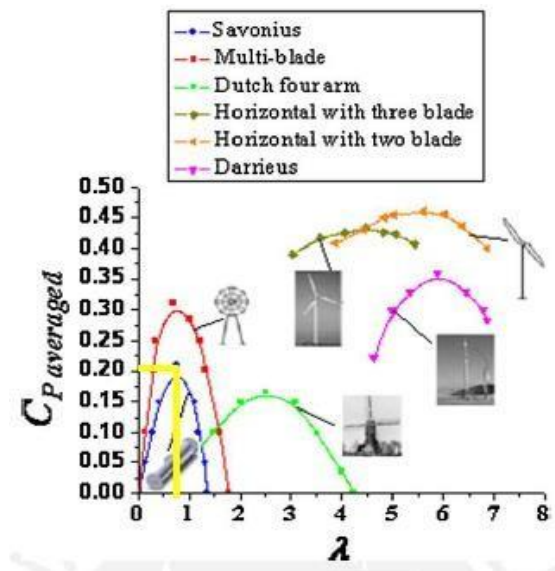


Imagen 6. Curva característica del coeficiente de potencia vs TSR [13].

4.2.4. DETERMINACIÓN DEL TORQUE EN EL MODELO SAVONIUS

Para obtener el torque en un modelo **Savonius** existen muchas maneras ya sea a través de ecuaciones o través de gráficas.

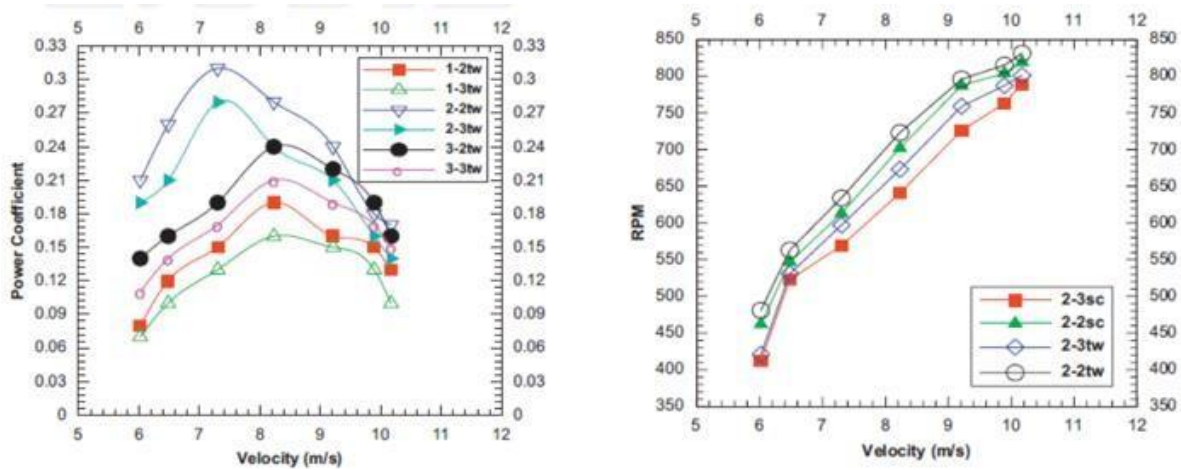


Imagen 7. Coeficiente de potencia vs velocidad del viento y velocidad en RPM vs velocidad [13].

Como se puede evidenciar en la imagen 6 dependiendo el tipo de rotor Savonius ya sea de una sola etapa dos o más se puede obtener el torque a través de la velocidad del viento y la velocidad angular de la turbomáquina o a través del coeficiente de potencia y la velocidad del viento utilizando la siguiente ecuación:

$$T_w = \frac{\rho \times A \times v^3 \times C_p}{2\omega}$$

Ecuación 2. Torque en un rotor Savonius [13].

- **Donde:**
- ρ : Densidad del aire del lugar. ($\frac{Kg}{m^3}$)
- A : Área del rotor (m^2).
- v : Velocidad del viento (m/s).
- C_p : Coeficiente de potencia.
- ω : Velocidad angular ($\frac{rad}{s}$).

4.2.5. Rotor Darrieus

Patentado en 1931 por el ingeniero George Darrieus, consiste en la construcción de dos o tres palas(no requiere necesariamente una torre) y vientos mínimos de 4 a 5 m/s [14]. Las palas de este tipode aerogenerador son verticales y ya que no tienen sistema de orientación son

muy funcionales cuando la dirección del viento cambia rápidamente, el aerogenerador Darrieus tiene mayor rendimiento lo cual ha generado en el mercado una buena aceptación.

Las palas del aerogenerador Darrieus experimentan una fuerte fuerza centrífuga ya que trabajan en pura tensión lo cual hace que sus palas sean simples y económicos, el rotor Darrieus tiene un problema y es que no puede arrancar por sí mismo [14] es necesario incluir un sistema capaz de ponerlo en marcha ya que después de esto gracias a la aerodinámica del sistema y al diseño de sus palas podrá mantenerse en funcionamiento.



Imagen 8. Aerogenerador Darrieus [14].

Como se estableció previamente, se diseñará un aerogenerador mixto, a continuación, se explicarán las principales pautas de un aerogenerador **Darrieus**. Este tipo de aerogeneradores tienen varias características geométricas que influyen en su aerodinámica, generalmente son:

- ✚ σ : Solidez del rotor.
- ✚ N : Número de palas.
- ✚ c : Longitud de cuerda.
- ✚ H : Altura del rotor.
- ✚ S : Área de barrido

4.2.6. MODELO DE UN SOLO TUBO DE CORRIENTE

Este método asume que la velocidad del viento es constante en toda el área de barrido del rotor, por lo tanto, es de esperarse que la velocidad inducida aguas arriba es la misma que aguas abajo, generalmente este método se usa para predecir coeficientes de potencia superiores a los que se pudiesen obtener de manera experimental [15].

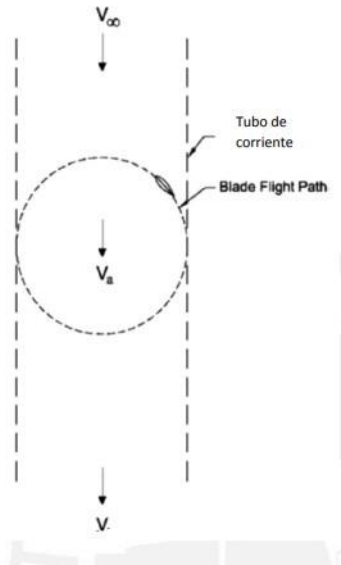


Imagen 9. Modelo de un solo tubo de corriente [15].

4.2.7. MODELO DE MÚLTIPLES TUBOS DE CORRIENTE

Este modelo establece que el área de barrido del rotor es dividida en varios tubos de corriente paralelos, se establece que el aire trabaja como un fluido no viscoso e incompresible. [15]

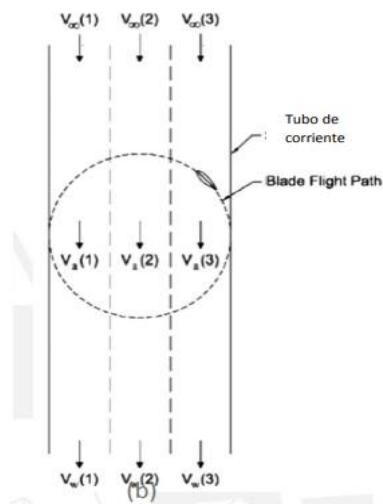


Imagen 10. Múltiples tubos de corriente [15].

4.2.8. MODELO DEL DOBLE DISCO ACTUADOR DE MÚLTIPLES TUBOS

Este método relaciona las fuerzas aerodinámicas sobre las palas y el desempeño del rotor para el aerogenerador **Darrieus**. El presente modelo considera que el viento pasa dos veces por el área de barrido del rotor y que las velocidades difieren dependiendo de la sección de análisis. Además, el análisis representa al aerogenerador como un disco actuador el cual se divide dos secciones: La primera es denominada aguas arriba y la segunda agua abajo [15]. Con lo anterior se considera las velocidades inducidas por la acción del aire en función de un ángulo denominado azimutal.

El análisis que se asume es que la velocidad del viento se reduce cerca del rotor. Además, se considera que la velocidad inducida en las palas no tiene variación a lo largo de las mismas debido a que están sometidas al mismo flujo de aire.

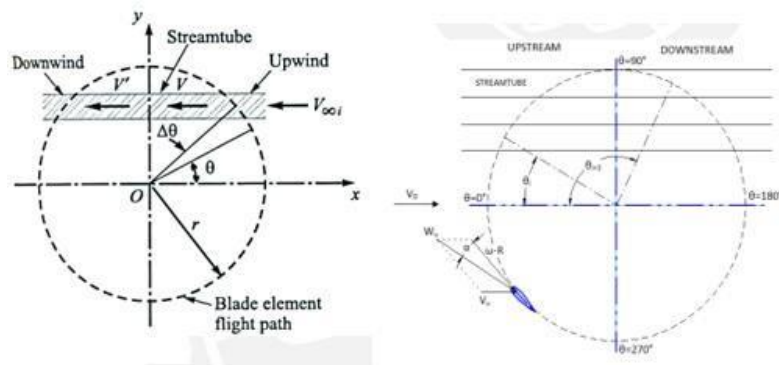


Imagen. 11. Modelo doble disco actuador de múltiples tubos de corriente y división del área de barrido del rotor [15].

CONSIDERACIONES:

- La velocidad inducida decrece en la dirección axial del flujo del aire.
- La velocidad está influenciada por un factor de inducción menor a uno.
- La velocidad en el sector de aguas arriba es mayor a la velocidad inducida.

La velocidad del aire inducido para la corriente en aguas arriba se obtiene de la siguiente manera:

$$V_u = V_o * a_u$$

Ecuación 3. Velocidad de aire inducido [15].

- **Donde:**

5. V_u : Velocidad inducida aguas arriba.

6. V_o : Velocidad aguas arriba del rotor.

7. a_u : Factor de inducción aguas arriba.

El equilibrio de la velocidad inducida entre la corriente de aguas arriba y aguas abajo es:

$$V_e = V_o * (a_u - 1)$$

$$V_d = V_e * a_d$$

Ecuación 4. Velocidad inducida de aguas arriba y abajo [15].

- **Donde:**

- ✓ V_d : Velocidad de equilibrio inducida.

- ✓ V_e : Velocidad aguas arriba del rotor.

- ✓ a_d : Factor de inducción aguas arriba.

Como se mencionó anteriormente los aerogeneradores de eje vertical manejan un coeficiente TSR, al igual que en el análisis del aerogenerador **SAVONIUS** el análisis del aerogenerador Darreius también tendrá uno el cual se obtendrá posteriormente, con este coeficiente se podrá obtener la velocidad rotacional resultante como:

$$W_u = \sqrt{V_u^2[(\lambda - \sin^2\theta)^2 + \cos^2\theta]}$$

Ecuación 5. Velocidad rotacional en un rotor Darreius [15].

Con el valor de la velocidad rotacional resultante se puede obtener el número de Reynolds como:

$$Re = \frac{W_u C}{\nu}$$

Ecuación 6. Número de Reynolds [15].

- **Donde:**

- ✓ Re : Número de Reynolds.

- ✓ C : Longitud de cuerda (m)

- ✓ ν : Viscosidad cinemática a condiciones ambientales (*Temperatura Bogotá*). m^2/s .

Obtenidos los coeficientes normales y tangenciales es posible obtener el torque que van a producir las palas del aerogenerador de la siguiente manera:

$$F_t = \frac{1}{2} \rho c L C_t V_r$$

Ecuación 7. Fuerza tangencial en un rotor Darreius [16].

Donde:

- ✓ F_t : Fuerza tangencial. (N)
- ✓ ρ : Densidad del fluido (Kg/m^3)
- ✓ C_t : Coeficiente de fuerza tangencial.
- ✓ V_r : Velocidad relativa (m/s) .
- ✓ C : Coeficiente de sustentación

Con el valor de la fuerza tangencial se puede obtener el torque que producen las palas del aerogenerador como:

$$T = N F_t R$$

Ecuación 8. Torque de un rotor Darreius. [16].

• **Donde:**

- ✓ T : Torque total. (N-m)
- ✓ R : Radio del rotor (m).
- ✓ F_t : Coeficiente de fuerza tangencial.

Para los perfiles aerodinámicos es necesario establecer una característica la cual es la longitud de cuerda que es la distancia entre el borde de ataque y el borde de salida del perfil del álabe la cual se define como:

$$c = \sqrt{\frac{A \sigma}{N * BAR}}$$

Ecuación 9. Longitud característica. [16].

Generalmente en un aerogenerador es necesario considerar su solidez, en este tipo de turbomáquinas se analiza su solidez teniendo en cuenta los parámetros de TSR (Relación de velocidad) y el coeficiente de potencia, la solidez del rotor permite determinar la eficiencia de la turbina, usualmente los coeficientes de solidez suelen ser altos y un coeficiente TSR bajo [16].

✚ **TSR:** Es la relación de velocidad en la punta de un álabe el cual cuenta con un rango de 0-10, este coeficiente indica con qué velocidad se mueven las aletas respecto a la velocidad real del viento. Se recomienda tener un TSR entre 3-7 para obtener un coeficiente de solidez dentro del rango donde la turbina pueda ser eficiente.

$$\lambda = \frac{wR}{V_w}$$

Ecuación 10. Relación de velocidad en la punta del álabe [17].

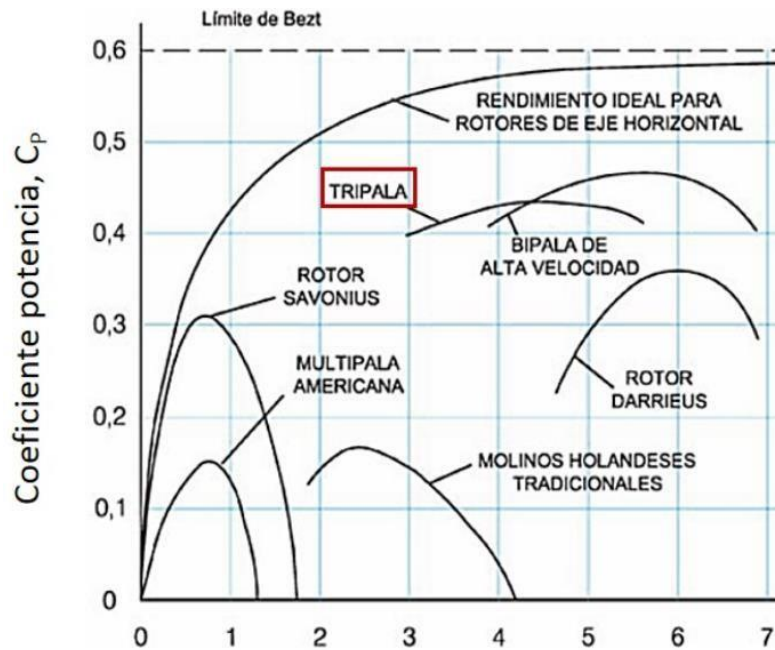


Imagen 12. TSR vs Cp para un rotor Darreius [17].

Para poder obtener la relación de velocidad primero se debe determinar el coeficiente de potencia dependiendo la necesidad.

Tipo aerogenerador	Velocidad de operación	Torque	Complejidad constructiva	Rendimiento	Robustez (%)
Eje horizontal					
Moderadas RPM	Moderada	Bajo	Moderada	0.2-0.35	5-10
Altas RPM	Alta	Muy bajo	De precisión	0.3-0.45	<5
Eje vertical					
Panemono	Baja	Medio	En bruto	>0.1	50
Savonius	Moderada	Medio	Moderada	0.15	100
Darrieus	Moderada	Muy bajo	De precisión	0.25-0.35	10-20
Geometría variable	Moderada	Muy bajo	De precisión	0.2-0.35	15-40

Tabla 1. Coeficientes de potencia para diferentes tipos de aerogenerador [17].

GENERALIDAD: Si se tiene una relación de velocidad considerablemente baja es recomendable aumentar la longitud de cuerda ya que existe un mayor contacto entre el fluido y el perfil aerodinámico.

$$\sigma = N c 2 R$$

Ecuación 11. Longitud de cuerda de un rotor Darreius [18].

Donde:

- ✓ N : Número de alabes.
- ✓ c : Longitud cuerda del perfil (m).
- ✓ R : Radio del rotor (m).
- ✓ σ : Solidez del rotor.

El coeficiente de solidez del rotor también puede obtenerse a través de la siguiente gráfica la cual involucra: coeficiente de potencia y la relación de velocidad. Para este trabajo se utilizará un coeficiente de solidez de 0,5 el cual más adelante se hará su respectiva aplicación.

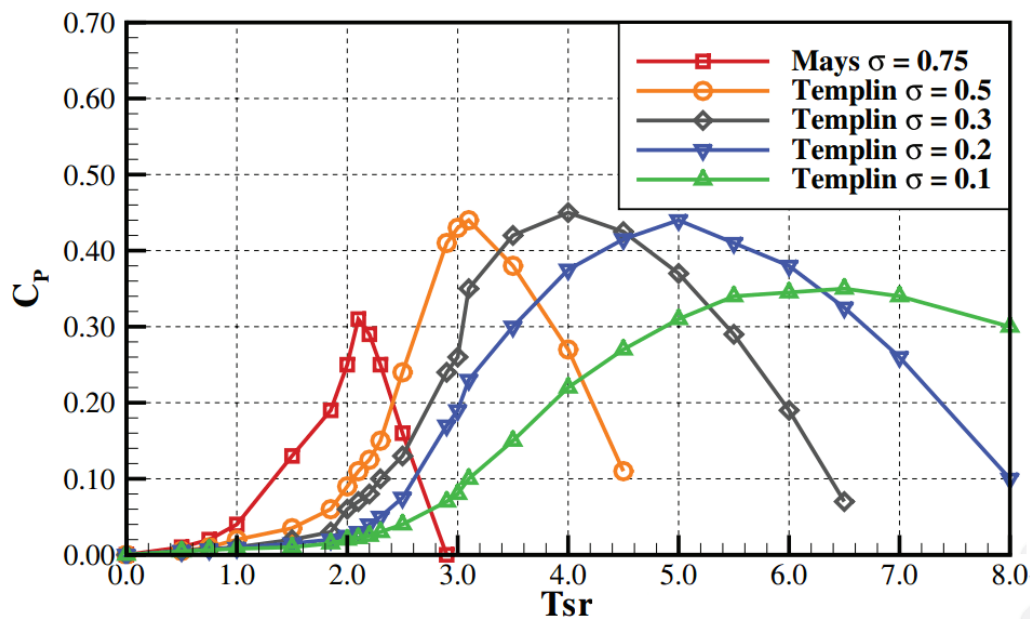


Imagen 13. TSR para aerogeneradores Darreius [19].

4.2.9. CONVERSIÓN DE LA ENERGÍA EÓLICA EN ENERGÍA ELÉCTRICA

La energía eólica es un tipo de energía cinética, esta energía choca con las palas del rotor lo cual produce movimiento, este movimiento se transforma en energía mecánica. Las aspas están conectadas directamente al rotor del eje, el eje gira con cierta velocidad (dependiendo del lugar de instalación) y es en ese punto en que se produce la corriente en los hilos del cobre del rotor, la corriente suministra al generador una fuerza electromotriz que permite producir energía eléctrica, ya sea para almacenarla en baterías o para conectarlas directamente a la red [20].

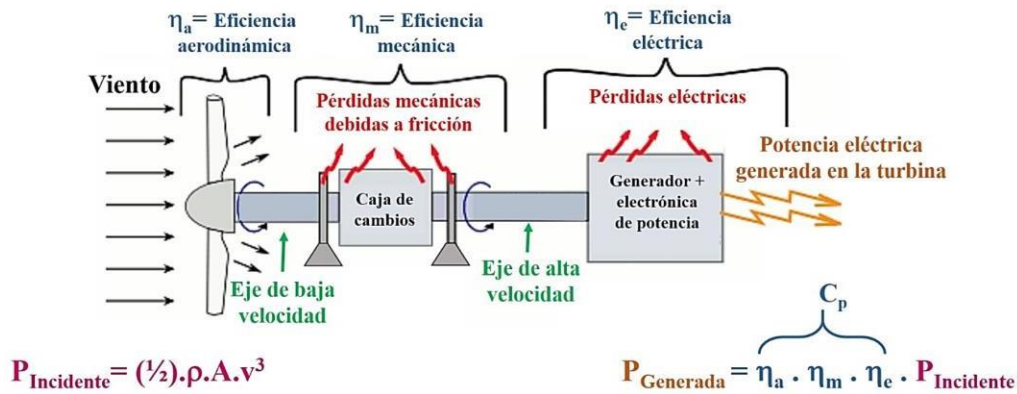


Imagen 14. Conversión de energía mecánica en eléctrica [20].

En la imagen 2.6 se ilustra el proceso de conversión de energía eólica en energía eléctrica, se puede observar que el tipo de conversión de energía mecánica en energía eléctrica con conexión directa a la red y al mismo tiempo se ilustra para la conversión, pero para poder almacenar la energía en baterías lo cual evitaría y ahorraría la instalación y uso de convertidores electrónicos [20].

4.3.1. SENSORES

Una señal solamente es la diferencia en el tiempo de un fenómeno físico en el cual se requiere transmitir información, en este proyecto de grado se utilizarán dos tipos de sensores los cuales son:

- ✓ **Señal análoga:** Este tipo de señales se caracteriza por transferir la información sobre un intervalo de tiempo, básicamente una señal de valor continuo permite hallar una continuidad de valores en extensión finita o infinita [21]
- ✓ **Señal digital:** Se caracterizan por ser señales que solo puede tener valores discretos, es decir, se refiere a la transmisión de datos de una secuencia de valores y se utiliza usualmente en valores binarios [21].
- ✓ **Sensor de voltaje:** Es un tipo de sensor que permite entregar una señal física que se mide, generalmente este tipo de sensores implica resistores que permiten ajustar el rango de voltaje [21].

- ✓ **Sensor de corriente:** Son dispositivos utilizados que permiten la detección de corriente, estos funcionan cuando existe un contacto a través de una línea de medición. [21].

4.3.2. TRANSDUCTORES

- ✓ Los transductores tienen como función principal convertir la magnitud física en una magnitud eléctrica como voltaje, algunas magnitudes físicas que se pueden medir en variables eléctricas son aceleración, nivel tiempo entre otras.

4.3.3. AMPLIFICADORES

- ✓ La amplificación de una señal consiste básicamente en aumentar los niveles de una señal con el fin de que ésta pueda ser detectada por un módulo/tarjeta o convertidor [21].

4.3.4. MÓDULO SD

- ✓ Es una tarjeta Micro SD con un módulo de lectura y una interfaz el cual a través de un controlador de archivos permite leer y escribir archivos, este dispositivo sirve como periférico para conectar en la pantalla del sensor de Arduino [21].

4.3.5. DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL

La distribución de Weibull es una función de probabilidad, representada mediante una curva, que muestra el porcentaje de la distribución de la velocidad de viento a lo largo de un periodo en un determinado lugar. La distribución de **Weibull** varía tanto en la forma como en el valor medio, además representa la función de densidad de probabilidad de la distribución de la velocidad del viento como se muestra en la siguiente ecuación.

$$f(v) = \frac{k}{c} \times \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \times e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}$$

Ecuación 12. Función matemática de Weibull [22]

- **Donde:**
 - ✓ v : Velocidad del viento media $\left(\frac{m}{s}\right)$.
 - ✓ c : Factor de escala semejante a la velocidad del viento media $\left(\frac{m}{s}\right)$.
 - ✓ k : Factor de forma que se caracteriza a la simetría de la función de probabilidad.

Se deben determinar los parámetros c y k que dependen de los valores de velocidad de viento de la zona en estudio. Para ello se realiza una tabla de frecuencia, donde se calcula la cantidad

de veces en el año que hubo determinada velocidad, y también se calcula la frecuencia relativa, la cual representa la probabilidad de ocurrencia de cada velocidad. A continuación, se realiza el procedimiento para poder calcular los parámetros correspondientes.

$$F(V) = \int_0^v f(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}$$

Ecuación 13. Integral de la distribución de Weibull [22].

- Donde:

$$i = [1, 2, 3, \dots, n]$$

- Se linealiza el parámetro de Weibull:

$$f(v < v_i) = 1 - e^{-\left(\frac{v_i}{c}\right)^k} \quad e^{-\left(\frac{v_i}{c}\right)^k} = 1 - f(v < v_i)$$

$$\frac{1}{e^{\left(\frac{v_i}{c}\right)^k}} = 1 - f(v < v_i)$$

Ecuación 14. Linealización del parámetro de Weibull [22].

Se sabe que la ecuación de la recta es de la siguiente forma, por tanto:

$$y = bx + a$$

$$y_i = \ln[-\ln[1 - f(v < v_i)]]$$

$$x_i = \ln[v_i].$$

$$b = k \rightarrow \text{Factor de forma. [23]}$$

$$a = -k \times \ln[c]$$

$$-\frac{a}{k} = \ln[c]$$

$$e^{-\frac{a}{k}} = e^{\ln[c]}$$

$$c = e^{-\frac{a}{k}} \rightarrow \text{Factor de escala [23].}$$

La probabilidad de Weibull se utiliza en múltiples aplicaciones no solo para la parte eólica sino también en la parte hidráulica, industrial entre otras, existen varios métodos de aplicación de esta distribución estadística. Solamente se explicará la relacionada con el método de los mínimos cuadrados. Esto se debe a que es el método más adecuado para este

trabajo de grado, las gráficas que arrojan sirven como información para el ajuste de la distribución y permite dar un indicio si es necesario o no el parámetro de localización.

$$f(t) = \frac{\beta (t-\delta)^{\beta-1}}{\theta^{\beta}} \exp\left(-\frac{(t-\delta)^{\beta}}{\theta}\right), t \geq \delta \text{ o}$$

$$R(t) = \int_s^{\infty} f(t)dt = e^{-\left(\frac{t-\delta}{\theta}\right)^{\beta}}$$

Ecuación 14 y 15. Confiabilidad de la probabilidad de Weibull [24].

- ✓ *t*: Variable para representar la confiabilidad (representa el tiempo entre fallas).
- ✓ β : Parámetro de forma ($0 < \beta < \text{Inf}$), este parámetro representa la forma o perfil de la distribución.
- ✓ θ : Parámetro de escala ($0 < \theta < \text{Inf}$), este parámetro representa que tan aguda o plana será la función
- ✓ δ : Parámetro de localización ($-\text{inf} < \delta < \text{inf}$), representa el tiempo a partir se empieza la ejecución de la distribución de Weibull.

Dentro de la probabilidad existe un parámetro muy importante que es la regresión para ello es necesario obtener un estimador de la función acumulativa, la cual es el complemento de la función de confiabilidad y se define como:

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\delta}{\theta}\right)^{\beta}}$$

Ecuación 16. Lineal de regresión [25].

Para obtener el rango de mediana en cada una de las observaciones se utilizará la aproximación mediante la ecuación de Bernard ya que dentro de las ecuaciones para obtener la mediana es la más sencilla y se define como:

$$RM(X_i) = \frac{i - 0,3}{n + 0,4}$$

Ecuación 17. Rango de mediana [26].

• **Donde:**

- ✓ *i*: Interacción.
- ✓ *n*: Velocidad de análisis.

Otro de los parámetros necesarios en la probabilidad de Weibull es el tiempo entre fallas para cada observación y se obtiene como:

$$x = \ln(t - \delta)$$

Ecuación 18. Tiempo de fallas [26].

- **Donde:**

- ✓ *t: Velocidad de análisis.*

- ✓ *δ : Parámetro de localización.*

Para este trabajo se utilizará el método de mínimos cuadrados ya que de todos los mencionados es el más simple para aplicar, permite la obtención de una gráfica de datos que sirven como prueba de la distribución que se pretende obtener y puede dar un indicio sobre el parámetro de localización.

5. PARAMETRIZACIÓN Y LOCALIZACIÓN

Para el planteamiento de este proyecto de grado es importante establecer que el análisis se realizará en la Universidad Santo Tomás sede central ya que ahí es donde se requiere saber la potencia que puede producir el prototipo del aerogenerador. Para lograr lo anterior, es necesario inicialmente determinar las coordenadas del lugar de análisis, ya que para obtener información de la velocidad teórica del viento las plataformas tanto de la **NASA** como del **IDEAM** solicitan esta información.

Inicialmente, se utilizará la herramienta Google Earth la cual permitirá obtener las coordenadas del lugar, posteriormente se introducirá la información en las plataformas tanto de la NASA como del IDEAM para obtener las velocidades de viento entre los años 2015 y 2021. Bajo el anterior argumento, la Universidad Santo Tomás sede central se encuentra ubicada en la localidad de Chapinero en la ciudad de Bogotá con coordenadas **4° 37' 48.000''** latitud norte y **74°3' 36.000''** longitud oeste a una altura de **2579 msnm** [27]. En la imagen 15 se observa de manera satelital la institución educativa.



Imagen 15. Localización geográfica de la Universidad Santo Tomas [27].

Como se mencionó anteriormente, se procede a obtener primero la información relacionada a la velocidad del viento en la plataforma de la NASA. Inicialmente, se busca en la plataforma la información relacionada de la dirección, precipitación y velocidad del viento en la zona de estudio como se verá en la *imagen 16*.

-BEGIN HEADER-							
NASA/POWER CERES/MERRA2 Native Resolution Hourly Data							
Dates (month/day/year): 01/01/2021 through 03/31/2021							
Location: Latitude 4.63 Longitude -74.06							
Elevation from MERRA-2: Average for 0.5 x 0.625 degree lat/lon region = 2099.7 meters							
The value for missing source data that cannot be computed or is outside of the sources availability range: -999							
Parameter(s):							
WS10M	MERRA-2 Wind Speed at 10 Meters (m/s)						
WD10M	MERRA-2 Wind Direction at 10 Meters (Degrees)						
PRECTOTCORR	MERRA-2 Precipitation Corrected (mm/hour)						
-END HEADER-							

Imagen 16. Parámetros para la adquisición de datos del portal de la NASA [28].

Como se puede evidenciar en la *imagen 16*, la plataforma de la NASA solicita indicar las coordenadas del lugar de análisis con el fin de proporcionar los parámetros de velocidad, dirección entre otros. Con la ayuda del programa **WRplot** se muestra la velocidad de las corrientes del viento entre el 2015 y el 2021 como se verá en la *imagen 17*.

✚ El software **WRplot** es una herramienta que permite visualizar a través de gráficas como rosas de viento, análisis de frecuencias entre otros el comportamiento del viento en una determinada zona.

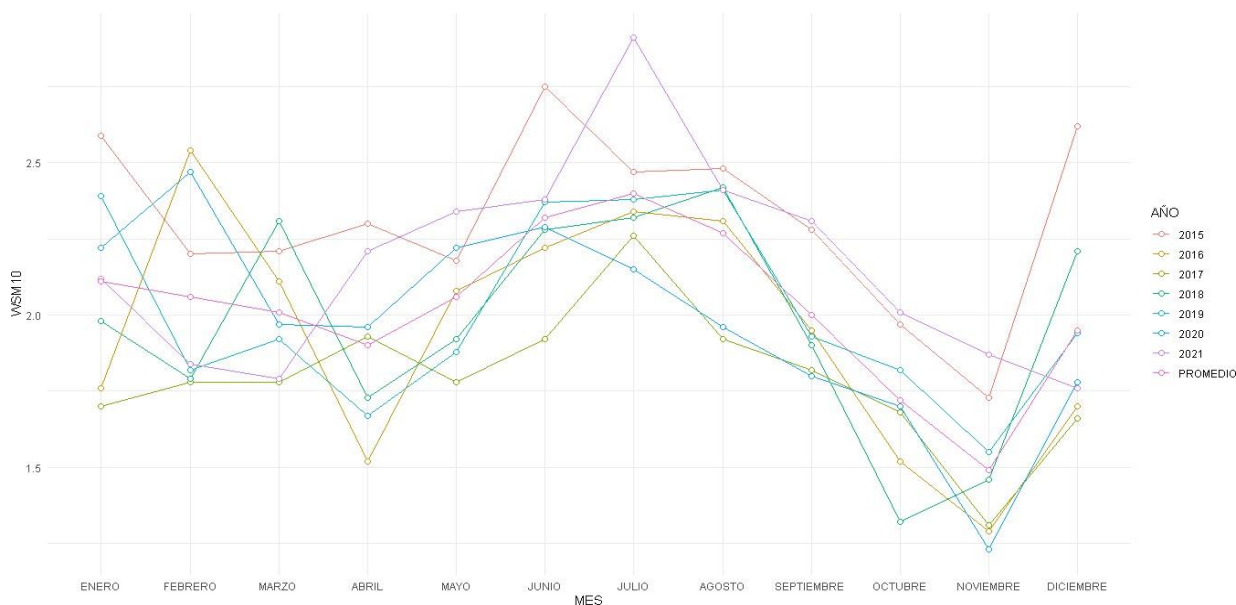


Imagen 17. Velocidad del viento en la Universidad Santo Tomás en diferentes años (WS10M) [28].

Con la información del portal de la NASA, se grafica la velocidad media mensual entre los años 2015 y 2021 a través de WRPlot. Se utilizará como periodo de análisis **el año en el cual las corrientes de viento hayan sido más críticos y/o variables con el fin de obtener un valor aproximado de la velocidad teórica del viento en el lugar de análisis**. En la imagen 17, se observa que la velocidad de viento en los años de análisis se encuentra en el rango de **1 m/s a 3 m/s**.

Al mismo tiempo se puede observar que el año 2021 presentó mayores picos de velocidad, además, se puede apreciar que la máxima velocidad se produjo entre los meses de julio y agosto del correspondiente año, la velocidad mínima del viento según la gráfica se da entre los meses de octubre y noviembre. Bajo lo anterior, **el año de análisis para este trabajo de grado corresponde al periodo entre enero y diciembre del año 2021.**

Con la información arrojada por el portal de la NASA se procede a utilizar nuevamente el software WRplot con el fin de hacer una rosa de los vientos del comportamiento de las corrientes de viento en las cercanías de la Universidad Santo Tomás sede central. Esto se hace para evidenciar los rangos de velocidad y dirección del viento a través de la información otorgada por el portal de la NASA.

✚ La rosa de los vientos de la *imagen 18* permite visualizar los patrones de frecuencia de la velocidad del viento en el año 2021.

- ✓ La a sección verde de la rosa de los vientos representan las velocidades son menores a 4 m/s.
- ✓ La franja amarilla es moderada, es decir que el rango de velocidades está entre 4 m/s a 7 m/s
- ✓ La franja roja se localizan las magnitudes mayores a 7 m/s.

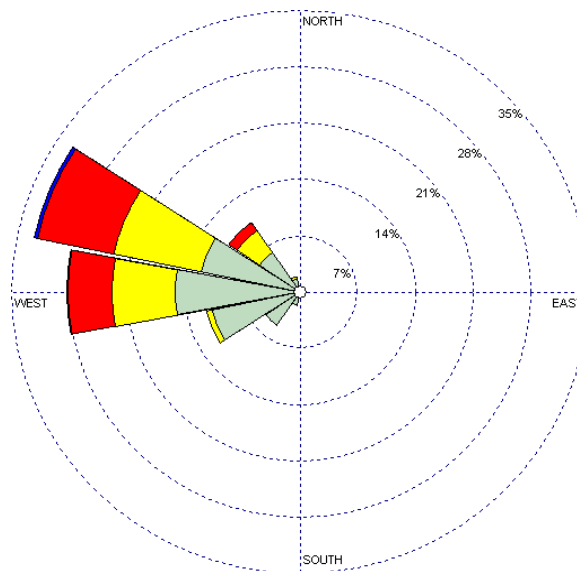


Imagen 18. Rosa de los vientos del comportamiento del viento en la Universidad Santo Tomás [28].

El programa WRplot tiene una herramienta la cual permite transferir los datos obtenidos y graficados en la rosa de los vientos a Google Earth, lo anterior permitirá de manera gráfica observar el perfil del viento que a traviesa la Universidad Santo Tomás sede central de la siguiente manera:

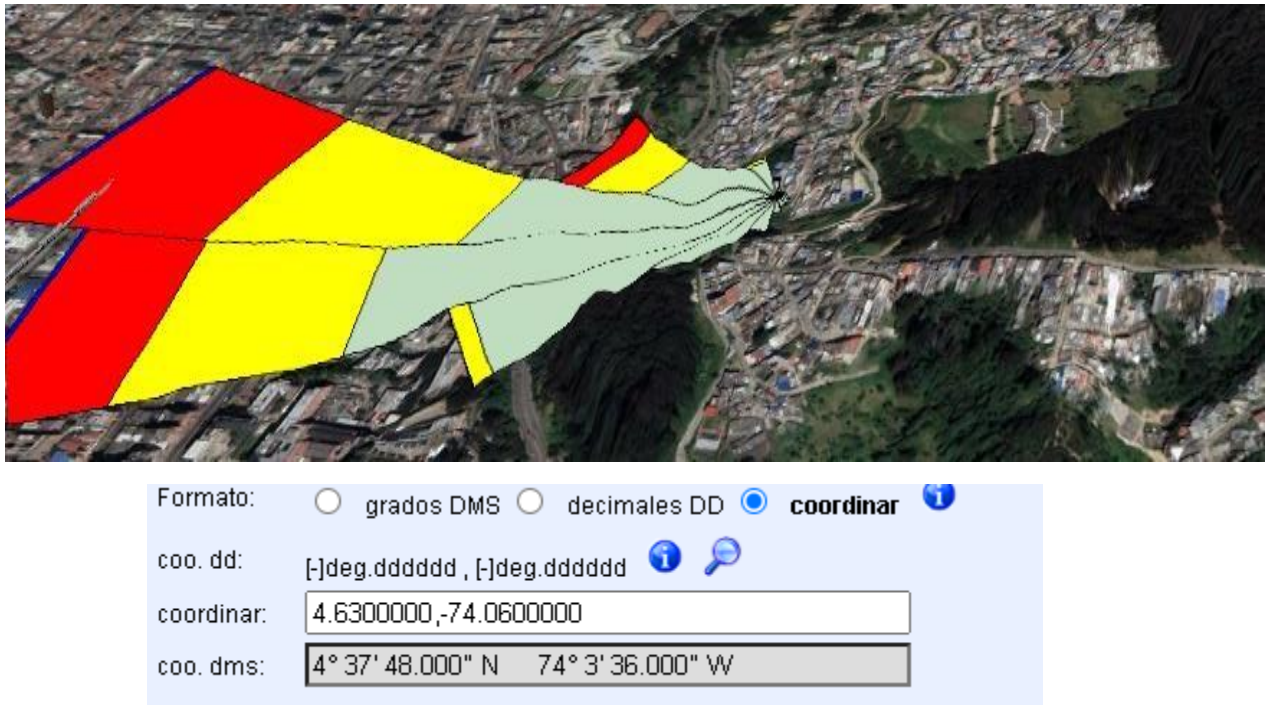


Imagen 19. Comportamiento del viento en la Universidad Santo Tomás sede central a través de Google Earth [29].

🚩 **CONSIDERACIÓN:**

Con la ayuda de la herramienta WRplot se puede determinar que los datos hasta la fecha de análisis muestran que la dirección de las corrientes de viento en las cercanías de la Universidad Santo Tomás tiende hacia el oeste.

Al mismo tiempo el software WRplot permite graficar la frecuencia por clase de vientos o en otras palabras el rango de la velocidad del viento que hubo en el periodo de análisis. Se observa en la *imagen 20* que la velocidad del viento registró una mayor frecuencia en un rango **1 m/s a 4 m/s**.

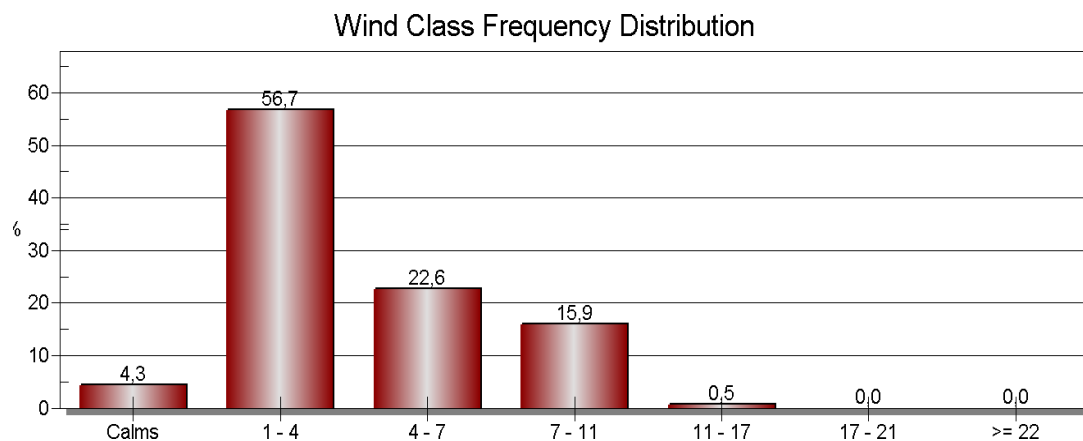


Imagen 20. Distribución de frecuencia de la velocidad del viento en la universidad Santo Tomás [30].

Con la información inicial del rango de la velocidad del viento en la Universidad Santo Tomás sede central es necesario establecer los parámetros que posteriormente ayudarán a implementar en este trabajo de grado el método de distribución de Weibull. Los parámetros para lograr lo previamente mencionado son:

5.1. PERFIL DE ELEVACIÓN.

El perfil de elevación indica la altura del nivel sobre el mar del punto de referencia y a partir de esta información se puede hallar la densidad del aire del lugar de análisis (cabe recalcar que el valor de la densidad del aire en la Universidad Santo Tomás sede central es un parámetro importante para implementar en este trabajo de grado ya que en la parametrización de Weibull la densidad del aire influye en los resultados). En la *imagen 21* se observa que el perfil de elevación de la zona oscila entre **2572 a 3161** metros sobre el nivel del mar.

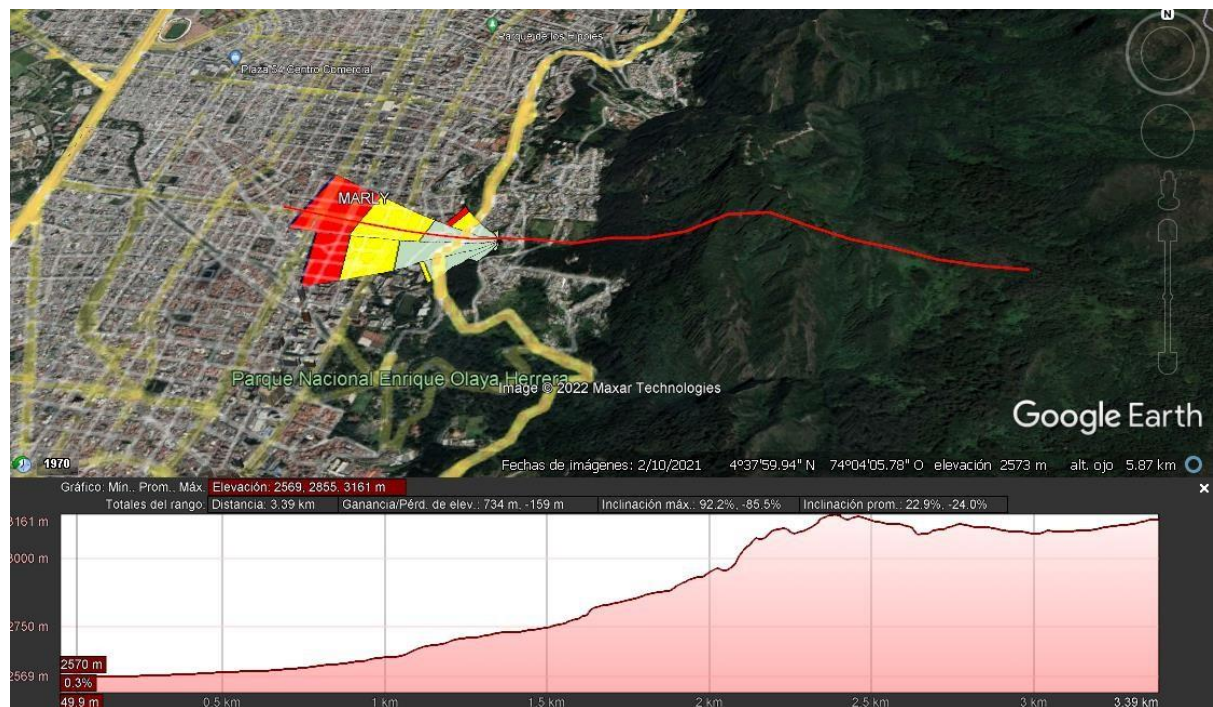


Imagen 21. Perfil de elevación de la Universidad Santo Tomás sede central [31].

Utilizando Google Earth se obtiene el valor aproximado del perfil de elevación de la ubicación de análisis con el fin de obtener la densidad del viento en la Universidad Santo Tomás sede central. A partir de lo anterior se tiene un valor de altura de **2579** metros sobre el nivel del mar y se establece una temperatura promedio de **18° C** para la capital de Colombia, con esta información se procede a obtener la densidad del aire promedio en la universidad de la siguiente manera:

$$\rho_{USTA} = 1,22 \times e^{\left(-\frac{Z}{8345} - \frac{(T-15)}{288}\right)}$$

Ecuación 19. Densidad del aire en la Universidad Santo Tomás sede central [32].

- **Donde:**

- ✓ ρ_{UST} : Densidad del aire en de la Universidad Santo Tomas sede central ($\frac{Kg}{m^3}$).
- ✓ Z: Altura sobre el nivel del mar (msnm).
- ✓ T: Temperatura promedio de la Universidad Santo Tomas (T).

$$\rho = 0,86 \frac{Kg}{m^3}$$

5.2. Aplicación del método estadístico de Weibull a los datos obtenidos por la NASA:

Como se estableció anteriormente la distribución de Weibull es un método el cual permite determinar la probabilidad de la velocidad del viento en una zona geográfica a través de unos parámetros iniciales.

✚ *Es importante aclarar que la velocidad del viento teórica se obtendrá utilizando el criterio estadístico de Weibull ya que este método es la más recomendado por la Norma internacional IEC 61400-12 como la función de ajuste más fiable utilizada para aproximar los datos medidos de la velocidad del viento [33].*

Con las coordenadas del lugar (Latitud 4.63 N y longitud -74.06 W) se procede a obtener los datos del viento de la plataforma de la NASA desde el 1 de enero hasta el 31 de diciembre de 2021 con el fin de tener un promedio anual sobre la velocidad del viento en los alrededores de la Universidad Santo Tomás sede central, para ello se utilizará la plataforma **Power Larc Nasa** y se descargará la información relacionada de la velocidad del viento a 10 m en Excel.

Como se evidencia en la tabla 2 la información obtenida se da por año de análisis, mes, día y hora, esto beneficiará más adelante la distribución de Weibull debido a la afinidad de los datos.

✚ Debido a la cantidad de datos proporcionados por la plataforma de la NASA solo se pondrán algunos valores obtenidos debido a que los datos suministrados por este portal son aproximadamente 8000.

AÑO	MES	DÍA	HORA	WS10M	WD10M	PRECTOT
2021	1	1	0	0,92	97,79	0,46
2021	1	1	1	1,16	83,79	0
2021	1	1	2	1,29	75,96	0
2021	1	1	3	1,45	74,1	0
2021	1	1	4	1,48	70,22	0
2021	1	1	5	1,27	65,32	0
2021	1	1	6	1,14	69,08	0

Tabla 2. Diferentes datos de la velocidad y dirección del viento según la base de datos de la NASA [34].

- ✚ WS10M: Wind Speed to 10 meters (Velocidad de viento a 10 metros).
- ✚ WD10M: Wind Direction 10 meters (Dirección del viento a 10 metros).
- ✚ PRECTOT: Precipitación del viento.

Con la ayuda de la plataforma de la **NASA** se pudieron obtener **8760** datos que permitieron la ejecución del primer objetivo de este trabajo de grado. Inicialmente es necesario saber el flujo de energía que es producido en cada hora, día y mes en el año de análisis. Para ello se utilizará la siguiente ecuación la cual permitirá saber el **FLUX**.

✚ Es necesario obtener el flujo de energía ya que al momento de lograr la distribución de Weibull permite obtener el dato real del factor de forma. Si no se obtiene el FLUX cuando se realice la gráfica de la distribución de Weibull los datos darán información errónea (por ejemplo, la frecuencia de los datos será errada, por tanto, el promedio de la velocidad del viento también).

✚ FLUX: Energía que pudiese dar el viento según la velocidad de análisis.

$$FLUX = \frac{1}{2} \times \rho_{USTA} \times v^3$$

Ecuación 20. Energía producida por la velocidad del viento [35].

- Donde:

✓ ρ_{UST} : Densidad del aire en la Universidad Santo Tomás ($\frac{Kg}{m^3}$).

✓ v : Velocidad de viento en la cercanía de la Universidad Santo Tomás. ($\frac{m}{s}$).

Se utilizará la herramienta **Excel** para obtener el flujo de energía producida por cada una de las velocidades en el año 2021 utilizando la ecuación previamente mencionada.

AÑO	MES	DÍA	HORA	WS10M	WD10M	PRECTOT	FLUX
2021	1	1	0	0,92	97,79	0,46	0,506
2021	1	1	1	1,16	83,79	0	1,014
2021	1	1	2	1,29	75,96	0	1,395
2021	1	1	3	1,45	74,1	0	1,981
2021	1	1	4	1,48	70,22	0	2,107
2021	1	1	5	1,27	65,32	0	1,331
2021	1	1	6	1,14	69,08	0	0,963

Tabla 3. Criterios de evaluación para la obtención de la distribución de Weibull [34].

✚ Con los valores del FLUX en el año de análisis se procede a determinar la frecuencia de la velocidad del viento en la zona de análisis. A partir de estos valores y del flujo de energía previamente obtenido se empezarán a implementar los criterios del método estadístico de Weibull.

VELOCIDAD DEL VIENTO (m / s)	FRECUENCIA	PORCENTAJE DE FRECUENCIA
1	2022	23%
2	2932	33%
3	1381	16%
4	1233	14%
5	868	10%
6	289	3%
7	32	1%

Tabla 4. Frecuencia de los datos obtenidos del portal de la NASA [34].

- **FRECUENCIA:** Cantidad de datos que se repiten los datos seleccionados.
- **% FRECUENCIA:** Valor en porcentaje de la frecuencia de los datos (Para obtener este valor, se divide el valor de la frecuencia entre la cantidad de datos obtenidos por el portal de la NASA).

Con la información de la tabla número cuatro se observa que en el año de análisis las velocidades superiores a **6 m/s** tuvieron una frecuencia baja, bajo lo anterior, se considerarán despreciables estas velocidades ya que no influirán dentro del análisis de la probabilidad de Weibull. Utilizando la herramienta **Excel** se podrá determinar la velocidad promedio del viento implementando los factores de forma y escala.

- ❖ Inicialmente se obtendrá el factor de forma (K): Este parámetro representa la forma o perfil de la distribución. Para calcular este factor inicialmente se parametrizará un valor arbitrario y posteriormente se corregirá implementando métodos numéricos. En primera instancia el valor será de **1,92**.
- ❖ Existe otro parámetro importante y es el factor de escala (C): Este parámetro representa qué tan aguda o plana será la función. Este factor se representa matemáticamente como:

$$C = \frac{K}{e^{\Gamma(1+\frac{1}{K})}}$$

Ecuación 21. Factor de escala en la distribución de Weibull [35].

- *Donde:*
 - ✓ Γ : Gamma logaritmo natural.
 - ✓ K: Factor de forma.
 - ✓ C: Factor de escala.

Es necesario aclarar que el factor de escala también será un valor arbitrario ya que como se evidencia en la ecuación 21 este parámetro depende directamente del factor de forma. Bajo lo anterior, la ecuación matemática de la distribución de Weibull en función de la frecuencia de los datos se define como:

$$F(x) = f \times K \times C$$

Ecuación 22. Distribución de Weibull en función de la frecuencia de los datos [35].

- *Donde:*
 - ✓ f: Frecuencia de la velocidad en la Universidad Santo Tomás sede central.
 - ✓ K: Factor de forma.

✓ *C: Factor de escala.*

✚ CONSIDERACIÓN

- ✓ *Al momento de obtener el valor de la distribución en el software **Excel** es necesario establecer (al momento de escribir la función) la variable **FALSO** ya que no se requiere que la frecuencia de los datos de la velocidad del viento sea un proceso acumulativo. Además, la ecuación 22 se aplica a cada uno de los parámetros de velocidad ilustrados de la tabla 4.*

Con el valor de la distribución de Weibull se procede a obtener los valores promedios de la distribución en función de la frecuencia de la velocidad del viento, para ello se utiliza la siguiente ecuación:

$$F(x)_{prom} = \frac{k}{c} \frac{U^{k-1}}{c} \exp \frac{U^k}{c}$$

Ecuación 23. Promedio de la distribución de Weibull [35].

Previamente, se estableció la ecuación matemática del **FLUX** de energía en el año de análisis (2021). Bajo la información obtenida por el portal de la NASA se obtuvo un flujo de energía promedio de **16,186 $\frac{W}{m^2}$**

- ✚ Como se mencionó anteriormente es necesario realizar una corrección al valor del factor de forma ya que este valor influye directamente en cada una de las ecuaciones previamente ilustradas, para lograr lo anterior se utilizará el comando **SOLVER** de **Excel** y se tendrán en cuenta los siguientes parámetros:

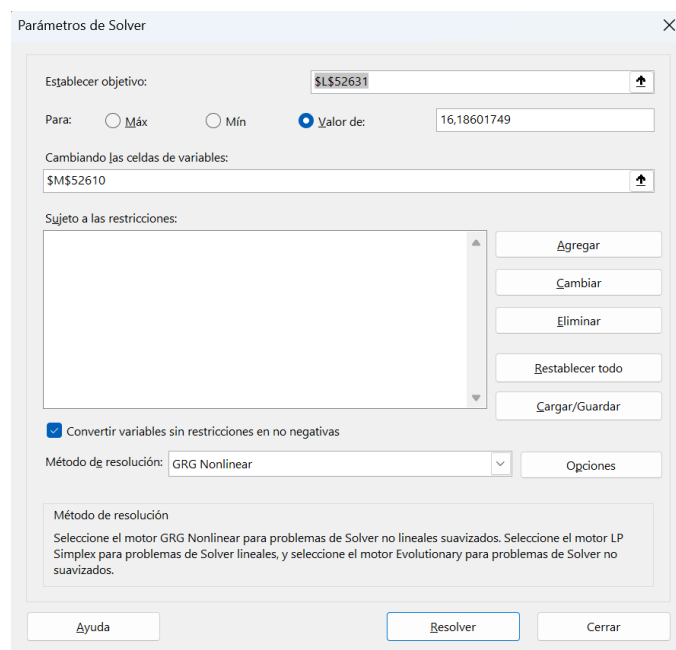


Imagen 22. Solver en el software Excel [35].

✚ El parámetro objetivo será: $FLUX_{promWeibull}$.

✚ El parámetro de valor será: $FLUX_{prom}$.

✚ El parámetro de cambio de variable será el **factor de forma**.

Utilizando la opción **SOLVER** de la imagen 22, el comando **Solver** encontrará el valor correcto para el parámetro de forma con ello se obtuvo:

DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL	FACTOR K	VELOCIDAD DE VIENTO (m/s)	FACTOR C	DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL EN FUNCION DEL FLUX
0	2,511	2,164	2,830	0
0,1711				0,0744
0,3456				1,2028
0,3045				3,5764
0,1379				3,8406
0,0322				1,7523
0,0037				0,3529

Tabla 5. Valores finales para la obtención de la distribución de Weibull según la información de la NASA [35].

✚ **Análisis:**

- ✓ **Parámetro Weibull:** Cabe aclarar que tanto el valor matemático de Weibull como el valor promedio estuvieron relacionados directamente con la frecuencia de la velocidad del viento. En la primera casilla la descripción **Distribución de Weibull** corresponde a la ecuación 22 o $F(x)$.
- ✓ **K:** Es el valor final del parámetro de forma, una vez aplicado el comando **Solver**, se puede determinar que al relacionar las variables de energía de las corrientes de viento la frecuencia total de la velocidad de viento (**factor K**) es de 2,5.
- ✓ **Weibull Flux:** Es el parámetro final que corresponde a $F(x)_{prom}$ con los parámetros definidos. Con esta información se procede a obtener la curva de la distribución de Weibull con su respectiva frecuencia.

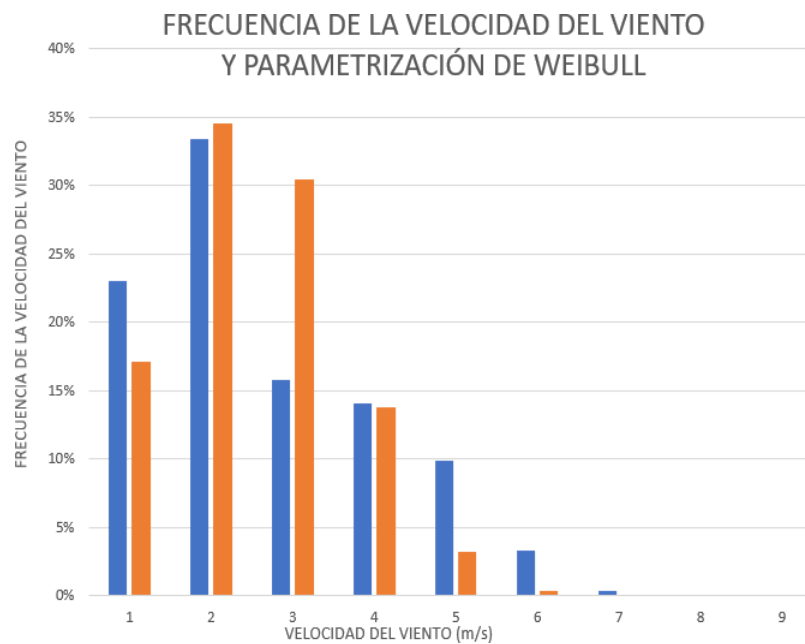
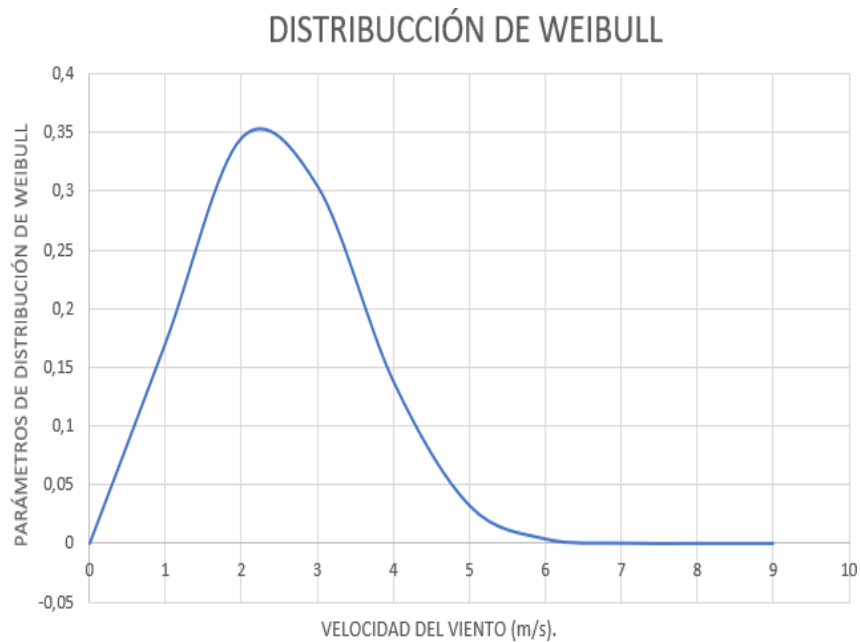


Imagen 23 e imagen 24. Densidad de probabilidad de Weibull y frecuencia de los datos del portal de la NASA [35].

- Como se estableció previamente el parámetro de forma describe la manera en que los datos obtenidos se distribuyen, según lo establecido en la teoría de **Weibull** un valor de forma alto refiere a una curva asimétrica hacia la izquierda como se puede observar en la imagen 23.

- En la imagen 24, el color azul corresponde a la frecuencia de los datos obtenidos por la plataforma de la NASA mientras que el tinte naranja corresponde a la probabilidad de frecuencia de la velocidad del viento la parametrización de Weibull.
- Como se observa en el análisis de la frecuencia de la velocidad incluyendo la distribución de Weibull, los valores de velocidad entre 8 y 9 m/s si ocurrieron, pero fueron mínimos.
- Con los valores de las frecuencias del viento en el lugar de análisis es importante destacar que la velocidad teórica promedio en la Universidad Santo Tomas sede central es aproximadamente de **2,1 m/s**.

5.3. Aplicación del método estadístico de Weibull a los datos obtenidos por el IDEAM:

El proceso indicado anteriormente se aplica a la información adquirida por parte del **IDEAM** y la secretaría de ambiente, todo esto con el fin de corroborar que la velocidad del viento en la zona de análisis efectivamente se encuentre dentro de los rangos establecidos.

🚦 Cabe mencionar: Es necesario verificar que la velocidad teórica del viento sea lo más aproximada posible ya que de no ser así, las variables de análisis del sistema de adquisición de datos (Potencia, velocidad angular, torque etc) no arrojarán la información correcta. Por tanto, se comparará la velocidad obtenida por medio de las dos plataformas con el fin de evitar errores en la visualización de resultados. También es necesario hacer la comparación de datos ya que la información de análisis del **IDEAM NO ES SUFICIENTE PARA REALIZAR UN ANÁLISIS COMPLETO DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO**. Como se estableció en este proyecto **NO SE OBTENDRÁ LA VELOCIDAD EN TIEMPO REAL DEL VIENTO**, por tanto, se debe garantizar que el dato de la velocidad teórica del viento sea lo más exacto posible.

AÑO	MES	HORA	WS10M	WD10M	PRECTOT
2021	ENERO	0	1,0545	77,519	0,16
2021	ENERO	1	1,0767	67,836	0,148
2021	ENERO	2	1,1096	69,645	0,130
2021	ENERO	3	1,1529	60,293	0,107
2021	ENERO	4	1,1554	60,976	0,095
2021	ENERO	5	1,1638	63,897	0,086
2021	ENERO	6	1,2641	68,839	0,092

Tabla 6. Datos de la velocidad y dirección del viento según el **IDEAM** [36].

A diferencia de los datos adquiridos por el portal de la **NASA** los datos suministrados por los entes meteorológicos del país, la información se ve reducida, la información proporcionada por esta plataforma es aproximada de 288 datos. A partir de esta información se procede a realizar el análisis de Weibull con el fin de determinar si existe una relación o variación de los datos de la **NASA** respecto a los del **IDEAM**.

AÑO	MES	DÍA	HORA	WS10M	WD10M	PRECTOT	FLUX
2021	1	1	0	1,0545	77,519	0,16	0,506
2021	1	1	1	1,0767	67,836	0,148	1,014
2021	1	1	2	1,1096	69,645	0,130	1,395
2021	1	1	3	1,1529	60,293	0,107	1,981
2021	1	1	4	1,1554	60,976	0,095	2,107
2021	1	1	5	1,1638	63,897	0,086	1,331
2021	1	1	6	1,2641	68,839	0,092	0,963

Tabla 7. Criterios de evaluación para la obtención de la distribución de Weibull según la información del IDEAM [36].

Una vez obtenido el **FLUX** de energía se procede a involucrar la frecuencia de la información de la velocidad del viento.

VELOCIDAD DEL VIENTO (m/s)	FRECUENCIA	% FRECUENCIA
0	0	0%
1	44	15%
2	120	42%
3	38	13%
4	60	21%
5	25	9%
6	1	0%
7	0	0%
8	0	0%
9	0	0%
10	0	0%
11	0	0%
12	0	0%
13	0	0%
14	0	0%

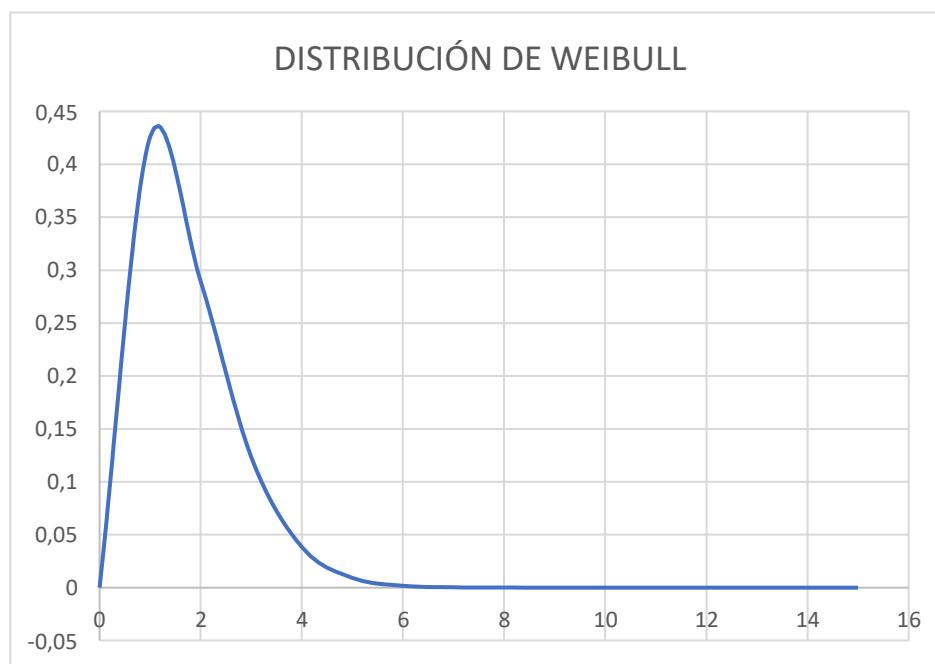
Tabla 8. Frecuencia de los datos obtenidos del portal del IDEAM [36].

Con la información de la frecuencia de los datos de la plataforma del IDEAM se procede inicialmente a obtener el flujo de energía promedio de todos los datos. Utilizando las ecuaciones previamente mencionadas se obtiene que el FLUX promedio según la información del IDEAM es de $8,750 \frac{W}{m^2}$. A partir de esta información, se procede a obtener los factores de escala y forma corregido.

DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL	FACTOR K	VELOCIDAD DE VIENTO (m/s)	FACTOR C	DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL EN FUNCION DEL FLUX
0	1,601	2,162	1,785	0
0,4261				0,3664
0,2894				1,9911
0,1234				2,8668
0,0383				2,1104
0,0091				0,9888
0,0017				0,3272

Tabla 9. Valores finales para la obtención de la distribución de Weibull según la información del IDEAM [36].

Con los valores de forma y escala corregidos se procede a graficar la distribución de Weibull según la información del **IDEAM**.



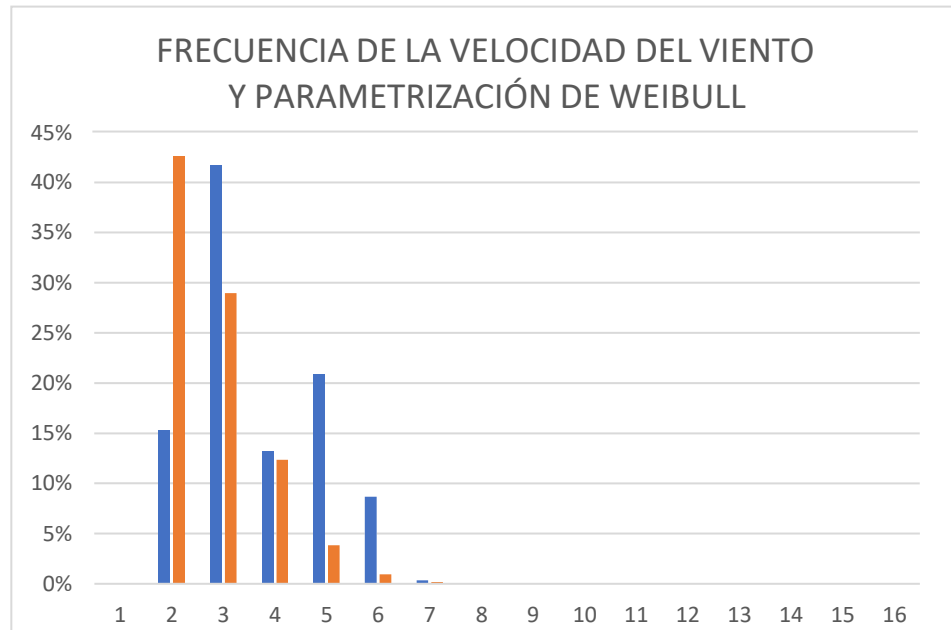


Imagen 25 e imagen 26. Densidad de probabilidad de Weibull y frecuencia de los datos según el IDEAM [36].

- ❖ Con los datos obtenidos con la información de la **NASA** y del **IDEAM** se pudo establecer que la información obtenida tiene una buena relación ya que el valor de la velocidad bajo los criterios ilustrados coincide sustancialmente. El valor **promedio** de la velocidad del viento es **2,1 m/s** y el rango en el que oscilan los datos tanto en la plataforma de la **NASA** y del IDEAM se encuentran entre **1,5 m/s y 3 m/s**.
- ❖ Se compararon los datos de la NASA y como el IDEAM ya que inicialmente la cantidad de datos proporcionados por el IDEAM no eran suficientes, además el factor más influyente es: el dispositivo de medición **NO va a medir en tiempo real la velocidad del viento**, por tanto era necesario determinar que los datos indicasen una buena correlación de la velocidad teórica del viento ya que este valor influenciará directamente en las ecuaciones que se utilizarán para programar el código del dispositivo de adquisición de datos.
- ❖ Se determinó la velocidad teórica del viento a través de la distribución de Weibull ya que al tener una cantidad considerablemente alta de datos es un método que permite la obtención de la velocidad del viento y al mismo tiempo permitió saber el flujo energético promedio que se puede extraer con diferentes valores de la velocidad. Esta información será útil en futuras investigaciones ya que se puede comparar o constatar esta información.

6. PARÁMETROS PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DEL AEROGENERADOR HÍBRIDO.

Como se estableció inicialmente en el espacio académico Proyecto Integrador se diseñó y se construyó el prototipo del aerogenerador híbrido. Como se evidenciará en capítulos posteriores al prototipo se le realizaron diferentes adecuaciones con el fin de implementar el dispositivo de adquisición de datos. En esta sección se aclararán algunos criterios que se tuvieron en cuenta para la construcción del prototipo y el estado en el que se encuentra. Cabe aclarar que en este apartado **no se explicará en detalle todo el proceso de diseño del prototipo**, sino que se describirán los parámetros relevantes que afecten el diseño del sistema de medición.

• 6.1. PERFIL AERODINÁMICO

Como se mencionó con anterioridad al prototipo se le implementaron las aspas correspondientes al modelo Darreius. Este tipo de aerogeneradores tienen un perfil aerodinámico de forma que tanto las fuerzas de sustentación como de arrastre sean lo más eficiente posible con el fin de extraer la mayor energía del viento.

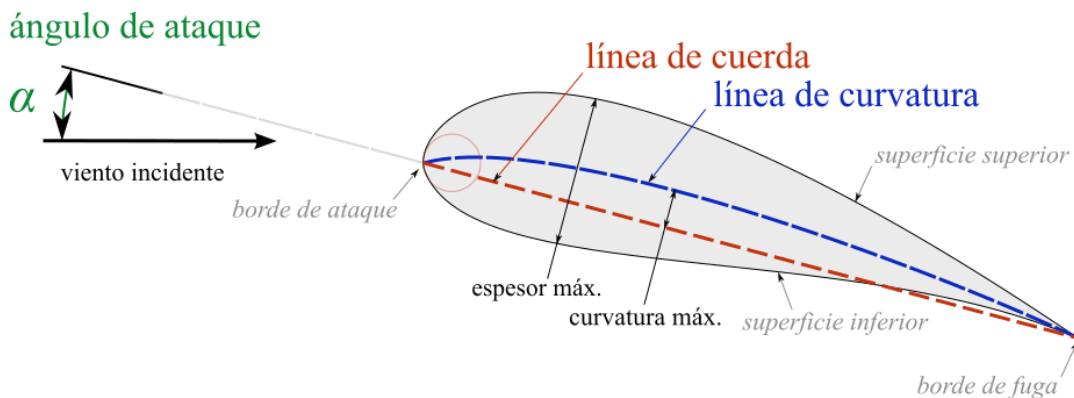


Imagen 27. Perfil aerodinámico y sus componentes [37].

Los perfiles alares se especifican bajo la denominación NACA (National Advisory Committee of Aeronautics) [37]. La denominación, además diferencia los perfiles bajo cuatro dígitos los cuales especifican la siguiente información:

1. El primer dígito del perfil indica la flecha de la línea o en otras palabras, la curvatura máxima [37].
2. El segundo dígito especifica la distancia máxima desde el borde de ataque hasta la posición de máxima flecha [37].
3. Los dos últimos dígitos indican el espesor de la cuerda [37].

En el espacio académico Proyecto Integrador se compararon diferentes perfiles aerodinámicos que pudiesen servir para el prototipo del aerogenerador. Bajo diferentes

investigaciones y métodos de comparación se seleccionó un **perfil 0018** ya que sus características bajo las condiciones donde se ubicará el prototipo son adecuadas. Por ejemplo, este perfil se caracteriza por tener una buena relación de elevación a menores ángulos de ataque, además presenta simetría con la rotación existente del ángulo de ataque del aspa.

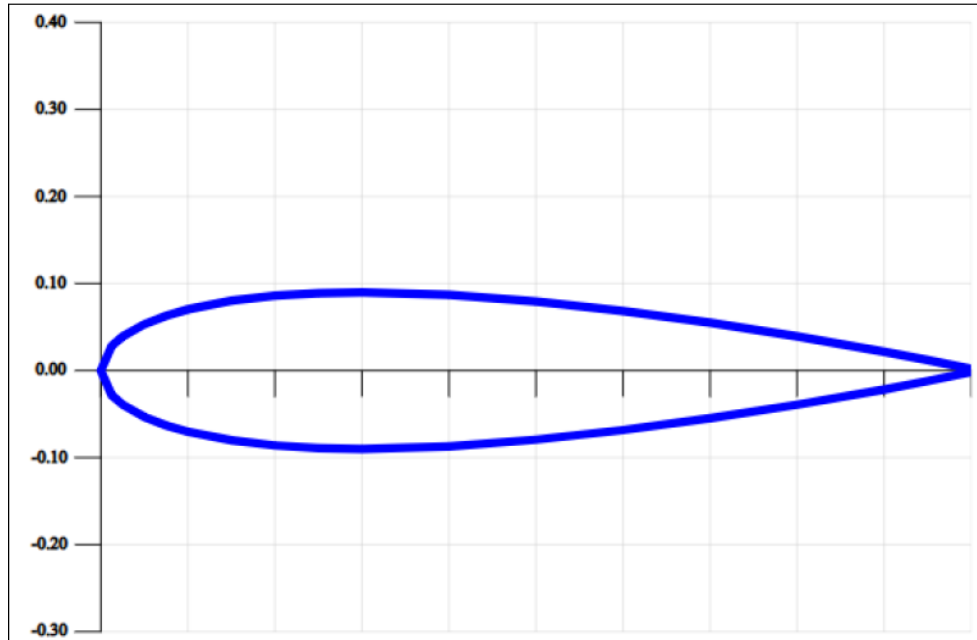


Imagen 28. Perfil NACA 0018 [38].

- ✚ Aclarando el tipo de perfil que se utilizó para la fabricación del prototipo del aerogenerador híbrido es importante destacar que para el diseño del modelo de aerogenerador Darreius se seleccionaron cuatro aspas ya que bajo esta configuración el coeficiente de potencia es mayor (en lugares donde la velocidad del viento es baja).
- ✚ Para la construcción de las aspas se utilizó impresión 3D ya que previamente se tenía la máquina para realizar las impresiones. Lo anterior facilitó los costos de fabricación ya que solo fue necesario comprar el material y realizar la impresión. Para la construcción de las aspas se utilizó un polímero termoplástico (acrilonitrilo butadieno estireno).

Para la construcción del modelo Savonius existen diferentes tipos de configuraciones ya que este tipo de aerogeneradores de eje vertical tiene muchas aplicaciones tanto a nivel académico como a nivel industrial. Cabe recalcar que actualmente no existe un **único** método analítico para determinar cual es la mejor configuración del modelo de aerogenerador.

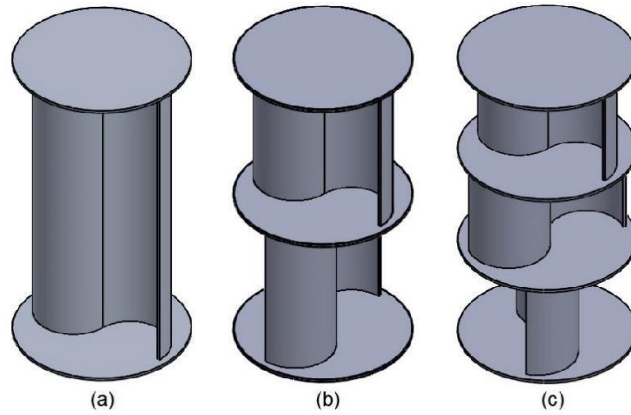


Imagen 29. Rotores Savonius de diferentes etapas [39].

- Una característica fundamental en los rotores Savonius es la cantidad de etapas que van a conformar el modelo. Cabe aclarar que, aunque un modelo de tres etapas puede tener un coeficiente de potencia mayor su eficiencia sería menor debido a su inercia [39]. Bajo lo anterior para el diseño y construcción del prototipo del aerogenerador se seleccionó un rotor doble etapa.
- Para la construcción del modelo Savonius doble etapa se utilizó como material acero galvanizado debido a que el prototipo estará a la intemperie, es sabido que este material (debido a sus características) tiene buena resistencia a la corrosión y al mismo tiempo es un material económico.

Con los conceptos explicados previamente el modelo que se construyó fue el siguiente:



Imagen 30. Prototipo del aerogenerador.

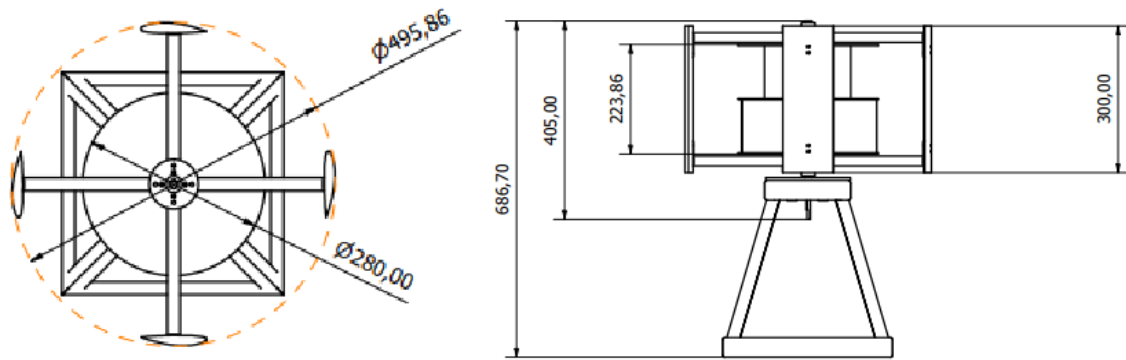


Imagen 31. Medidas del aerogenerador híbrido en milímetros.

✚ Para soportar las aspas se construyeron con la ayuda de la impresión 3D dos bujes los cuales soportan el modelo Darreius, los tornillos de fijación utilizados fueron Bristol M5.



Imagen 32. Buje para soportar los modelos Savonius y Darreius.

6.2. ACTIVIDADES PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL AEROGENERADOR.

Previamente se ilustró el prototipo construido, ahora se mostrarán las actividades requeridas para su respectiva construcción.

EJE TURBINA			
PROCESO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	HORAS
Compra de material AISI 4140	diámetro de material 12 mm largo y 1 metro largo	1	1
Corte	Corte con segueta	n/a	1
Torneado	Refrentar y dar forma	n/a	2
CNC	Muecas y planeado	n/a	1
Ajuste manual	Quitar rebaba y pulir	n/a	1

Tabla 10. Proceso de construcción del eje del prototipo de la turbina.

BASE AEROGENEADOR			
PROCESO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	HORAS
Compra de material.	Perfil estructural de 20x30 se vende por 6 metros	1	1
Corte.	Se realiza el corte con cortadora de perfil	n/a	1
Soldadura.	Se soldan las piezas previamente cortadas	n/a	3
Pulir.	Se utilizo una pulidora para quitar el exceso de soldadura	n/a	1
Pintura.	Se pintan los modelos con pintura negra para protegerlo de la oxidación	n/a	2

Tabla 11. Proceso de construcción de la base del prototipo de la turbina.

PLACA SOPORTE			
PROCESO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	HORAS
Compra de material.	Se utilizo material reciclado adquirido previamente.	1	1
Corte.	Se aproxima la medida del plano con sierra sin fin.	n/a	1
CNC.	Para dar medida a la placa y hacer los agujeros según plano.	n/a	1
Ajuste manual.	Quitar rebaba y pulir.	n/a	1

Tabla 12. Proceso de la placa de la base del prototipo de la turbina.

SOPORTE DEL PERFIL ALAR			
PROCESO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	HORAS
Compra material.	Perfil estructural de 20x30 se vende por 6 metros	1	1
Corte.	Uso de una cortadora de perfil.	4	1
Corte.	Corte de una platina galvanizada bajo las medidas estándar de soldadura con un espesor 4 mm de espesor	4	2
Soldadura.	Uso de soldadura de las piezas previamente cortadas	n/a	2
Pulir.	Uso de pulidora para quitar el exceso de soldadura	n/a	1
Pintura.	se utilizó pintura negra para protegerlo de la oxidación	n/a	1

Tabla 13. Proceso de fabricación del soporte del perfil alar.

SOPORTE DE MADERA			
PROCESO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	HORAS
Compra de material.	MDF de 8 mm de espesor tabla completa	1	1
Corte.	Corte a laser para obtener la precisión adecuada	3	1

Tabla 14. Proceso de fabricación del soporte del soporte del modelo Savonius.

BUJE PARA RODAMIENTO			
PROCESO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	HORAS
Compra material	Implementación de material reciclado que se tenía MATERIAL ACERO INOX 304	1	1
Corte	se aproxima medidas con sierra sin fin	n/a	1
Torneado	refrentar, dar forma y dar ajuste para rodamiento	1	2
CNC	Se procede a hacer los agujeros según plano	1	1

Tabla 15. Proceso de fabricación del buje del rodamiento.

SEPARADOR RODAMIENTO			
PROCESO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	HORAS
Compra de material	Se utilizo material reciclado que se tenía, el material es ACERO INOX 304	1	1
Corte	Se aproxima medidas con sierra sin fin	n/a	1
Torneado	refrentar y dar forma	1	1

Tabla 16. Proceso de fabricación del separador para rodamiento.

BUJE IMPRESION 3D			
PROCESO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	HORAS
Compra de material	Compra de PET – G que es apto para esfuerzos grandes y no se deteriora con el ambiente	1	1
Impresión	Se hicieron varias pruebas de resistencia con rellenos y temperaturas hasta que se pudo sacra uno que cumplía y se replico	4	12

Tabla 17. Proceso de fabricación del buje en 3D.

7. DISEÑO DEL EJE DEL PROTOTIPO.

Con la visualización del modelo del prototipo del aerogenerador híbrido *Darrei*us – *Savonius* y las actividades para su construcción es importante determinar si en efecto el prototipo podrá soportar las condiciones críticas de viento. Como se evidenció anteriormente, aunque es muy poco probable que las corrientes de viento superen los **7 m/s** es importante garantizar a la Universidad Santo Tomás sede central que si en algún caso la velocidad del viento fuese mayor en efecto el prototipo podrá soportar esta carga y seguirá funcionando.

En capítulos previos se estableció el valor promedio de la velocidad del viento circulante en los alrededores de la Universidad Santo Tomás sede central. Al mismo tiempo se determinó la necesidad de garantizarle a la entidad educativa que el eje del prototipo del aerogenerador efectivamente podrá soportar cargas de viento superiores al promedio obtenido. Para lograr lo anterior, se utilizará el programa **INVENTOR** ya que a través de este mismo software se modeló el CAD del prototipo, al mismo tiempo las herramientas del programa permiten hacer un análisis de esfuerzos en algunos puntos donde el eje pueda verse sometido a fallas ya sea por torsión, flexión ente otros.

Cabe decir que se decidió realizar el análisis de falla en el programa INVENTOR porque el software permite visualizar las zonas donde estarán los esfuerzos mínimos y máximos sobre el eje. Además, el software permite realizar diferentes tipos de simulaciones las cuales ayudan a ver el comportamiento de los esfuerzos.

Para visualizar a través del software los esfuerzos a los que estará sometido el eje se utilizará el criterio de falla de **Von Mises**. Se utilizará este criterio ya que establece que el fallo en un material **dúctil** inicia cuando el material empieza a ceder en un punto cuando la tensión de **Von Mises es igual al límite de tensión**, en muchos casos el límite elástico se utiliza como límite de tensión [40]. También el teorema de energía de distorsión es más utilizado (comprobado experimentalmente) debido a que es el que mejor se ajusta con la realidad.

CONSIDERACIÓN:

*Solo se implementarán las herramientas que brinda el software **INVENTOR** para realizar el análisis estático del eje, para el análisis por fatiga se hará de manera manual debido a la cantidad de parámetros que el análisis por fatiga requiere.*

Para obtener los valores de los esfuerzos a los que estará sometido el eje del prototipo es necesario determinar: Inicialmente la carga del viento sobre el eje. Es sabido que el eje del aerogenerador se encuentra sometido a una fuerza de arrastre ya que se opone al paso del viento en toda su longitud [41].

 *Con el fin de garantizar que el eje del aerogenerador híbrido en efecto podrá soportar las cargas a las que estará sometido se ha propuesto modelar y obtener los esfuerzos (a través del software Inventor) el eje bajo condiciones críticas. Un buen punto de partida es que una estación meteorológica registró vientos que alcanzaron*

una velocidad aproximada de 15 m/s en la sabana de Bogotá [42], a partir de este dato se realizará el análisis al eje.

Para lograr la simulación de las condiciones críticas en el eje se obtendrán inicialmente diferentes parámetros los cuales permitirán calcular, la potencia máxima teórica producida por el eje, el torque máximo y la velocidad angular máxima, con esta información posteriormente se harán los análisis estático y dinámico. Primeramente, se debe obtener:

La fuerza del viento que actuará sobre el eje del prototipo se define matemáticamente como:

$$F_{Wind} = \frac{1}{2} \rho V^2$$

Ecuación 24. Fuerza de arrastre/Viento [43].

✓ ρ : Densidad del aire en la Universidad Santo Tomás sede central $\frac{Kg}{m^3}$

✓ V : Velocidad teórica del viento ($\frac{m}{s}$).

$$F_{Wind} = 96,75 \text{ N.}$$

➤ Debido a que la fuerza del viento afecta al eje de manera longitudinal se debe convertir la carga de viento en una carga distribuida con el fin de visualizar los esfuerzos sobre el eje.

$$q = \frac{F_{Wind}}{L}$$

Ecuación 25. Fuerza distribuida del viento ($\frac{N}{m}$)

➤ Longitud del eje: 320 mm

Con el valor de la carga distribuida sobre el eje se procede a obtener cual sería el valor teórico de la potencia extraída por parte del prototipo del aerogenerador híbrido.

Para lograr esto, es necesario relacionar los principios físicos de conservación de masa y de energía. La ecuación 26 permite unificar los principios físicos que involucran la energía cinética y al mismo tiempo relaciona la ley de **Betz** la cual establece que es imposible extraer la energía cinética de una corriente de aire. Lo anterior, se define matemáticamente como:

$$P_{int} = \frac{1}{2} C_p V^3 A \rho$$

Ecuación 26. Potencia extraída inicial en un aerogenerador Darreius y Savonius [44].

✓ A : Área de barrido del prototipo del aerogenerador. (m^2)

- ✓ V : Velocidad teórica del viento en la Universidad Santo Tomás sede central ($\frac{m}{s}$).
- ✓ ρ : Densidad del aire en la Universidad Santo Tomás sede central ($\frac{kg}{m^3}$).
- ✓ C_p : Coeficiente de potencia (0,59): Se utiliza 0,59 debido a que es el máximo valor de eficiencia obtenido en un aerogenerador según la ley de Betz [44].

✚ Para obtener el área del aerogenerador mixto se consulta en la literatura el modo de obtenerla y se obtiene lo siguiente:

$$A = D * H + 0,65 (D_1 * H_1)$$

Ecuación 27. Área de barrido de un aerogenerador híbrido [44].

- Donde:
 - ✓ D : Diámetro Savonius (m).
 - ✓ H : Altura Savonius (m).
 - ✓ D_1 : Diámetro Darreius (m).
 - ✓ H_1 : Altura Darreius (m).
- ❖ Se debe obtener primero el área de barrido del aerogenerador ya que de las variables mencionadas en la ecuación 25 es la única que falta. Se decidió aplicar esta ecuación ya que una investigación realizada por los investigadores Andrés Hincapié Niño y Oscar Jaimes Hernández modelaron y construyeron (igual que en este trabajo de grado) una turbina mixta [44].

Con la ayuda del **software Inventor** se mostrarán los parámetros previamente mencionados.

$$A = 0.280 * 0.2338 + 0.65 * (0.495 * 0.3)$$

$$A = 0.161 \text{ m}^2$$

Remplazando el valor del área en la ecuación 26 se obtiene la potencia extraída teóricamente tanto el valor mínimo como el valor máximo de potencia.

$$P_{intm\acute{a}x} = 137,45 \text{ W}.$$

Con el valor de la potencia sería posible determinar el valor del torque máximo producido por el aerogenerador. Matemáticamente el torque se define como:

$$T_{intm\acute{a}x} = \frac{P_{intm\acute{a}x}}{\omega}$$

Ecuación 28. Torque del sistema [45].

- *Donde:*

- ✓ $P_{intm\acute{a}x}$: Pontencia máxima producida por el prototipo del aerogenerador (W).

- ✓ ω : Velocidad angular (Rad/s).

Para obtener el torque, solo se necesitaría el valor de la velocidad angular. Para ello es necesario establecer que en los aerogeneradores se maneja el concepto de velocidad específica y/o velocidad tangencial (**TSR**). Este concepto se define como:

$$TSR (\lambda) = \frac{\omega R}{v}$$

Ecuación 29. Velocidad específica de un aerogenerador [45].

- *Donde*

- ✓ ω : Velocidad angular $\frac{rad}{s}$

- ✓ R : Radio del rotor (m)

- ✓ v : Velocidad del viento $\frac{m}{s}$

Los autores J. Vicente, H. Antonio, A. Prisco recomiendan usar una relación velocidad tangencial/ velocidad específica/ (TSR) como **0,8 y a partir de ese factor obtener la velocidad angular del sistema**. Esto se debe a que los autores observaron que los rotores a pesar de que tienen radios diferentes se comportan como si fuese una sola turbina y no dos. Es por lo que, aunque los aerogeneradores Darreius y Savonius manejan diferentes TSR al comportarse igual se maneja el mismo parámetro de análisis [45].

Despejando de la ecuación 29 la velocidad angular se obtiene:

$$\omega = \frac{TSR * v}{R}$$

Ecuación 30. Velocidad angular en un aerogenerador híbrido [45].

$$\omega_{m\acute{a}x} = 48,4 \text{ Rad/s}$$

- ❖ Previamente se obtuvo el valor máximo de la potencia y de la velocidad angular, a partir de la información se obtendrá el valor del torque máximo del sistema de la siguiente manera:

$$T_{intm\acute{a}x} = \frac{P_{intm\acute{a}x}}{\omega}$$

Ecuación 31. Torque del sistema [45].

$$T_{intm\acute{a}x} = 2.93 \text{ N} - \text{m}.$$

7.1. ANÁLISIS ESTÁTICO.

Con los valores máximos calculados se procede a realizar el análisis estático a través del software **INVENTOR** ya que a través de las herramientas que trae (por defecto) el software permite predecir la tensión, esfuerzos y deformación.

✚ CONSIDERACIONES:

- La carga distribuida se coloca sobre el eje desde el voladizo hasta donde se encuentra con el rodamiento (**el cual está empotrado**), la distancia que existe entre el voladizo y el rodamiento es de **320 mm**. Se seleccionó así debido a que es el lugar hasta donde se considera puede golpear la corriente de viento sobre el eje de manera directa.
- El segundo apoyo es el que corresponde al generador del prototipo (El torque se genera por el viento el cual se transmite hasta el generador).

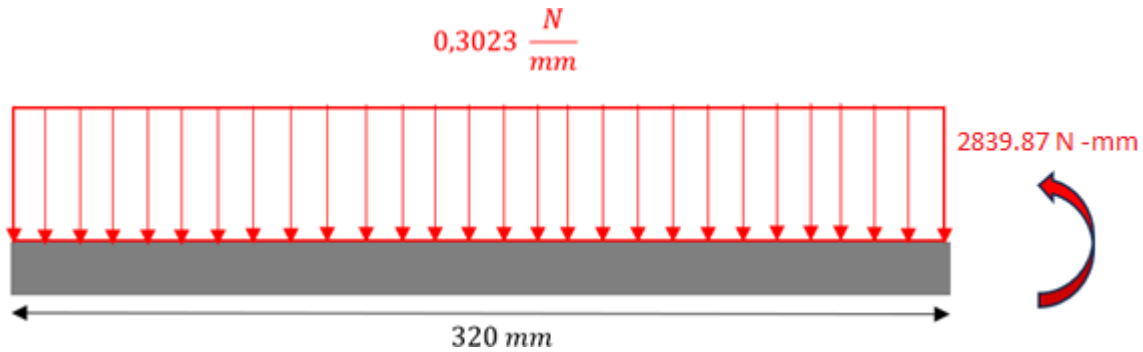
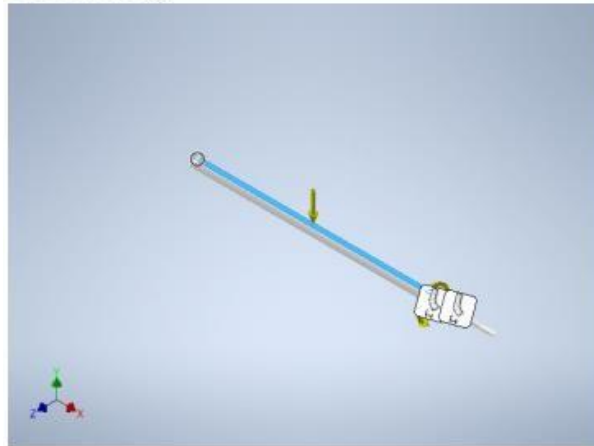


Imagen 33. Planos del eje y zona de carga de análisis.

Selected Face(s)

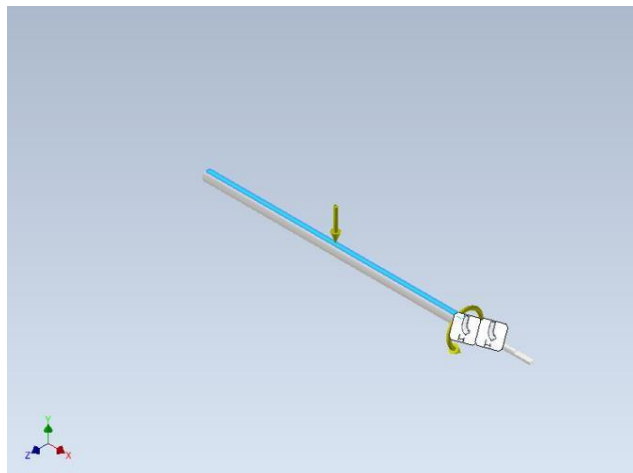


Operating conditions

Force:1

Load Type	Force
Magnitude	96,750 N
Vector X	-0,000 N
Vector Y	-96,750 N
Vector Z	-0,000 N

Imagen 34. Carga del viento sobre el eje del prototipo y su correspondiente magnitud.



Moment:2

Tipo de carga	Momento
Magnitud	2840,000 N mm
Vector X	2840,000 N mm
Vector Y	-0,000 N mm
Vector Z	0,000 N mm

Imagen 35. Torque sobre el eje del prototipo y su correspondiente magnitud.

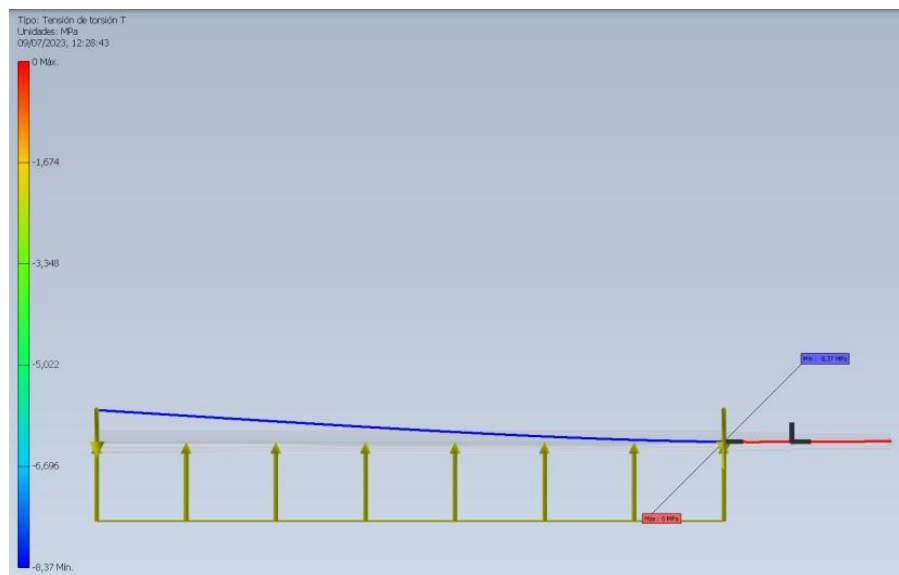


Imagen 36. Esfuerzos cortantes en el eje a través del software Inventor.

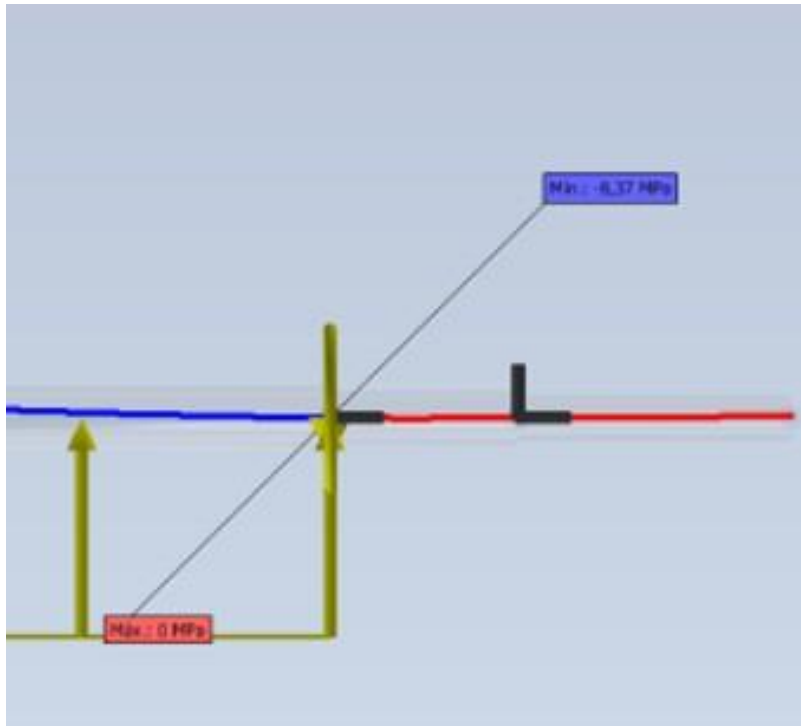


Imagen 36 e imagen 37. Esfuerzos cortantes en el eje a través del software Inventor.

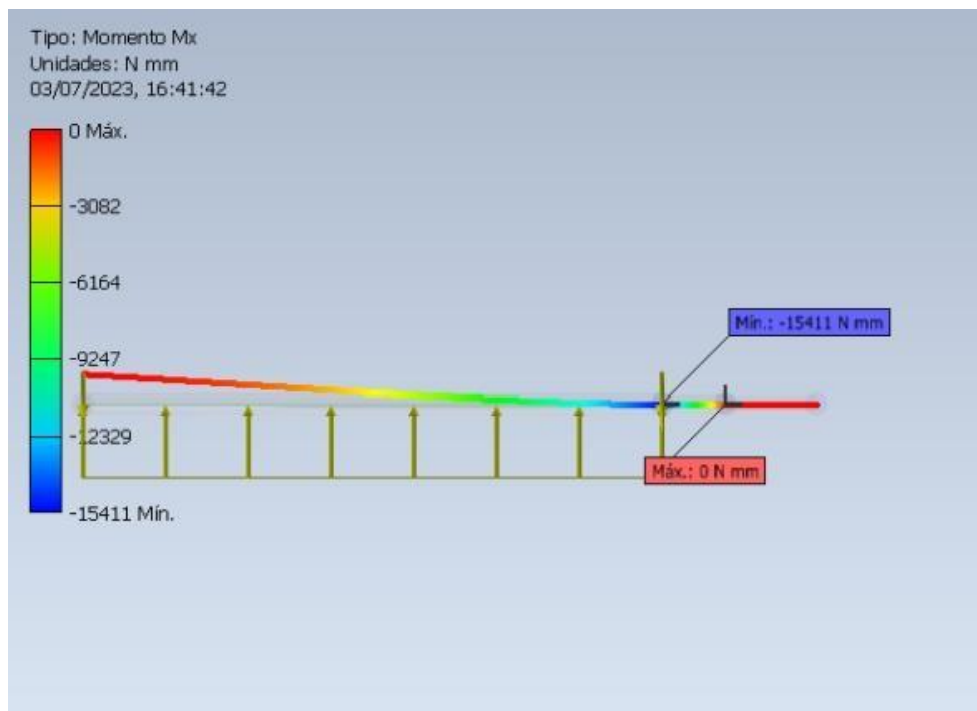


Imagen 38. Momento flector en el eje a través del software Inventor.

Se puede ver que la sección crítica es en la sección del rodamiento ya que en esta sección hay un cambio de sección lo cual provoca que exista un concentrador de esfuerzos. Bajo lo

anterior, se tiene un **momento máximo de 15.411 N - m**, un esfuerzo cortante de **8,37 Mpa** y un par de torsión máximo de **2,93 N – m**.

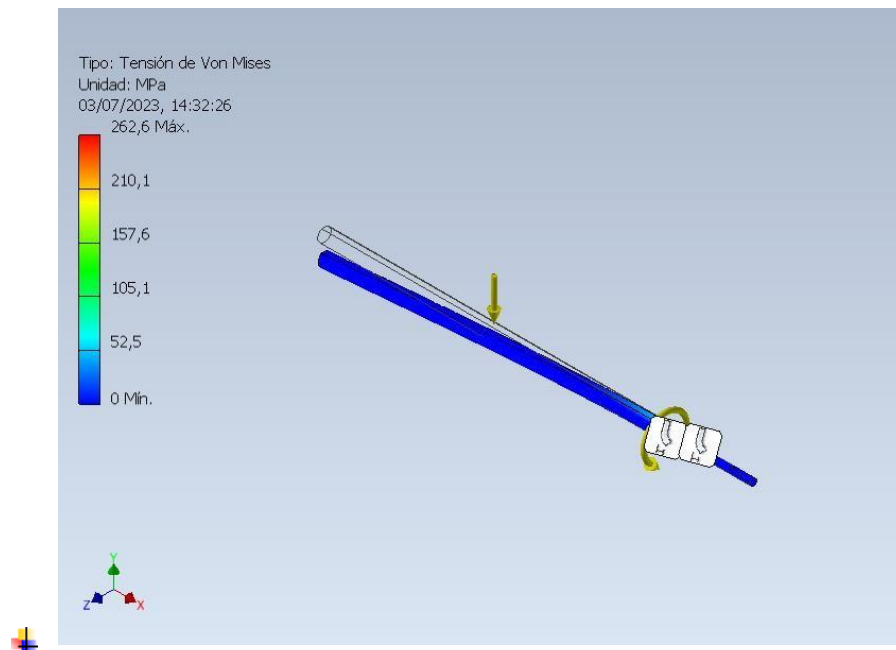
Nuevamente con la ayuda del software **Inventor** se procede a definir si bajo las condiciones máximas el eje fallaría, para lograr lo anterior, se utilizará el criterio de falla máxima energía de distorsión. Este criterio establece que un material **dúctil** no cederá en el punto de análisis siempre que la energía de distorsión en el punto no supere la energía de distorsión que se da en el momento de la fluencia. El criterio de energía de distorsión o **Von Mises** es muy utilizado cuando se requiere dar un indicador del desempeño de materiales dúctiles.

✚ Para la construcción del eje es un **AISI 4140** el cual se caracteriza por ser un acero templado en aceite el cual es versátil, generalmente es utilizado en la industria automotriz. Además, este tipo de aceros también tienen una resistencia a la corrosión atmosférica considerable.

Material

Material		Steel
Módulo de elasticidad	E	206000 MPa
Módulo de rigidez	G	80000 MPa
Densidad	ρ	7860 kg/m ³

Imagen. 39. Características del acero AISI 4140.



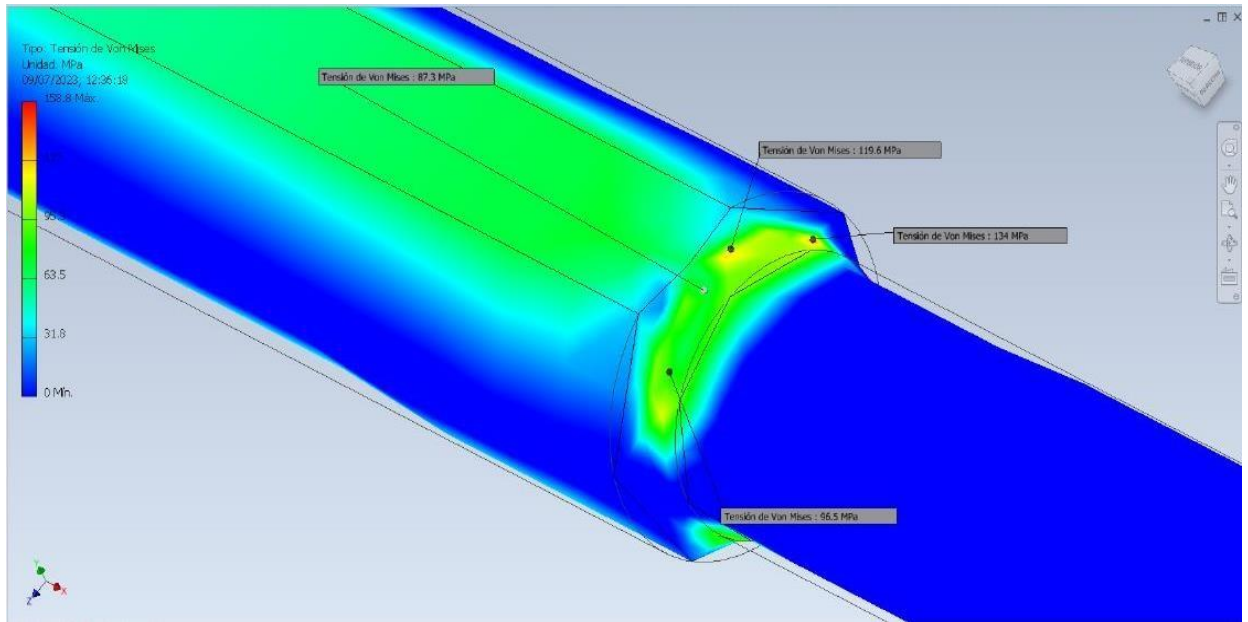
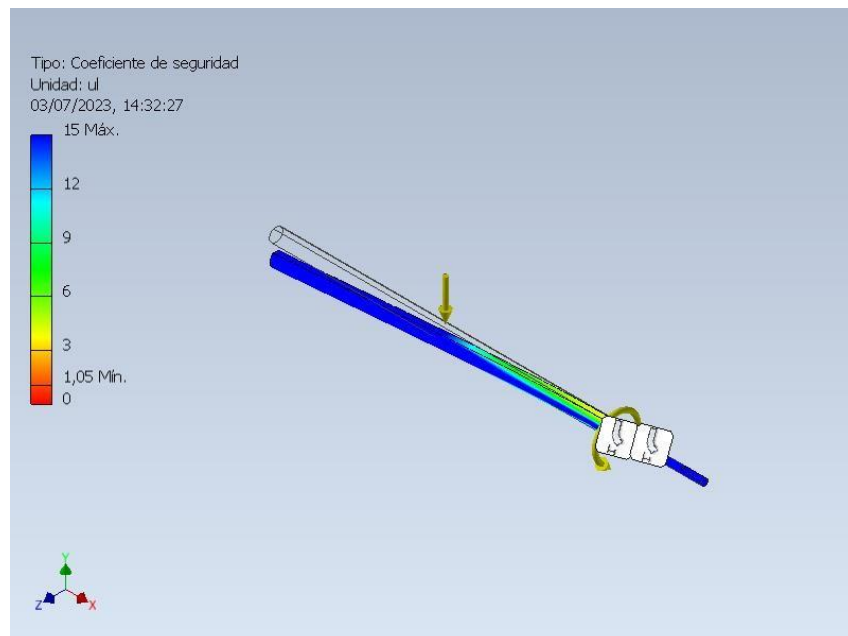


Imagen 40. Esfuerzos aplicados sobre el eje bajo las cargas de torque máximo y carga distribuida producida por el viento utilizando el criterio de falla **Von Mises** en el software INVENTOR.

Como se puede evidenciar el esfuerzo máximo en la zona crítica del eje (**el rodamiento**) tendrá un valor de **134,8 Mpa**, cabe aclarar que se analizó el eje de acuerdo con la condición máxima con el fin de garantizar que en condiciones normales de operación no habrá falla en esta zona.



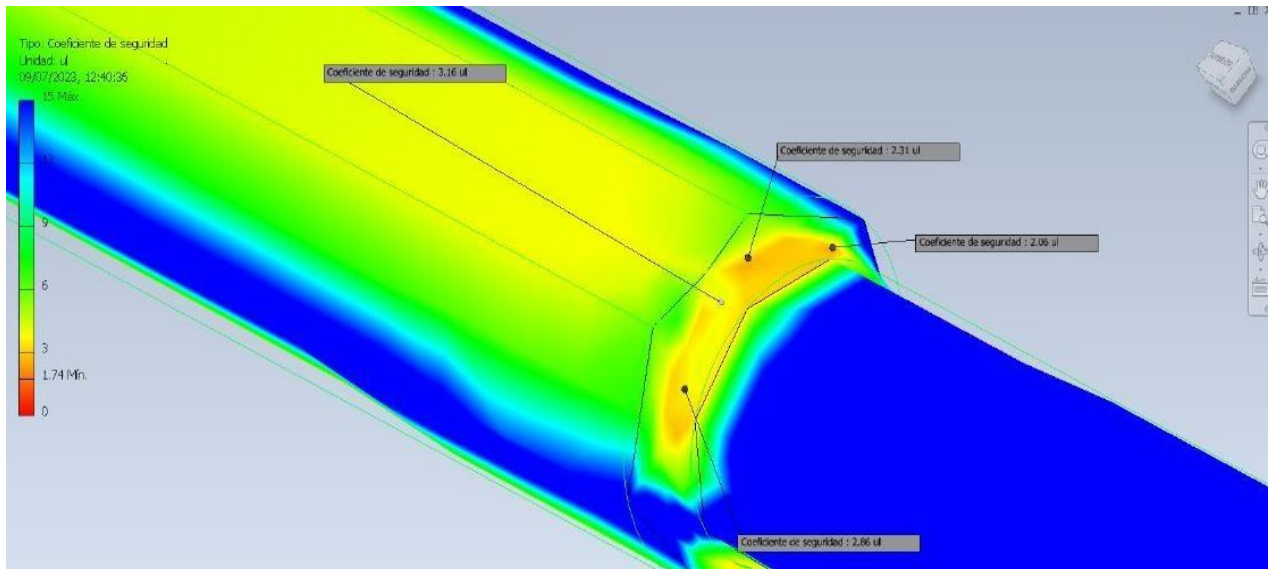


Imagen 41. Factor de seguridad en el eje bajo condiciones críticas.

- ✚ Es importante destacar que, en la zona crítica, el factor de seguridad tiene un valor superior a 1. Al mismo tiempo se puede observar que el color amarillo representa un factor de seguridad de 3 (el cual se desplaza desde el rodamiento hasta llegar a la mitad del eje). A su vez en la imagen 6.3 se observa que el factor de **seguridad mínimo en la zona crítica será de 2,06**, por ende, el eje bajo condiciones críticas no fallará.
- ✚ En la literatura consultada, el trabajo hecho por los autores **Franco Tabares y Moncada Melgarejo** también concluyen que los esfuerzos máximos soportados en el eje se ven en el rodamiento (como se puede observar en las imágenes del análisis estático). Bajo lo anterior este será el punto de análisis por fatiga y por deflexión con el fin de corroborar si a través de la sección crítica el eje podrá fallar [45].

7.2. ANÁLISIS POR FATIGA

Como se pudo evidenciar, anteriormente se obtuvieron los esfuerzos a los que estará sometido el eje bajo carga estática, ahora para realizar el análisis por fatiga es necesario determinar los esfuerzos medios y alternantes con el fin de validar si el eje los soportará. Para ello es necesario:

$$S_e' = 0,5 S_{ut} \text{ para } S_{ut} < 200 \text{ Kpsi (1400 Mpa)}.$$

Ecuación 32. Resistencia a la fatiga para aceros [46].

Como se mencionó anteriormente el acero utilizado es un **AISI 4140**, consultando la literatura se obtiene la siguiente información:

- S_{ut} : Resistencia a la tensión = 1020 Mpa.
- S_y : Resistencia a la fluencia = 655 Mpa.

A partir de la ecuación 32. se sabe que la resistencia a la fatiga corregida del acero será de:

$$S_e' = 510 \text{ Mpa}$$

Ahora es necesario determinar los factores de carga que afectan al eje con el fin de obtener el **factor de seguridad debido a la fatiga**, para ello se tendrán en cuenta los siguientes factores:

- Para obtener el factor de carga se consideró solamente la carga producida por efecto de flexión ya que no hay una carga axial en el eje, con lo anterior según la teoría el factor de carga por flexión es 1.
- El factor de tamaño según la información obtenida por el autor Shigley para secciones circulares es:

$$C_{\text{tamaño}} = 1.189d^{-0.097}$$

Ecuación 33. Factor de tamaño [46].

- Donde d : Diámetro del eje. Remplazando en la ecuación 30 se obtiene que el factor de tamaño es de: $9,343 \times 10^{-4} m$.
- El factor de superficie pudiese ser obtenido a través de gráficas, pero con el fin de dar un valor exacto se utilizará la siguiente ecuación:

$$C_{\text{Sup}} = A (S_{ut})^b$$

Ecuación 34. Factor de superficie [46].

CONSIDERACIÓN:

Los ejes generalmente se generan a través de maquinados y/o torneados, bajo el anterior argumento se utilizarán los coeficientes de maquinado o rolado en frío en la ecuación. Remplazando:

$$A = 4.51 \quad b = -0.265$$

$$C_{\text{Sup}} = 0.71.$$

- Como el eje estará trabajando a temperatura ambiente el factor por temperatura será de:

$$C_{\text{temp}} = 1.$$

- Es necesario establecer un factor adicional el cual es el factor de confiabilidad, este coeficiente permite disminuir la dispersión de los datos previamente mencionados. Para este caso se utilizará un porcentaje de confiabilidad del 99,9999 lo cual es un factor de 0,620 [46].

Con todos los factores obtenidos se procede a calcular ahora si la resistencia a la fatiga como:

$$S_e = S_e' * C_{Carga} C_{tamaño} C_{Superficie} C_{Temperatura} C_{confiabilidad}$$

Ecuación 35. Resistencia a la fatiga [46].

$$S_e = 208 \text{ Mpa}$$

Existe un parámetro que aún no se ha calculado y es la sensibilidad a la muesca, básicamente este concepto representa que tan sensible es el material en el cambio de sección o qué tanto un esfuerzo se puede concentrar un esfuerzo en el cambio de sección. Como se evidenció anteriormente el punto crítico del eje es en el rodamiento. Bajo lo anterior es importante realizar su respectivo análisis.

- Donde:
- ✓ r : Radio de la muesca (mm).
- ✓ d : Diámetro menor del eje (mm).
- ✓ D : Diámetro mayor del eje (mm).

$$\frac{r}{d} = 0,2$$

$$\frac{D}{d} = 1,2$$

Los valores del diámetro mayor y menor del eje están en el anexo.

Con la información de los factores relacionados con el radio de la muesca y los diámetros se obtuvo un **concentrador de esfuerzos bajo carga estática** aproximadamente de **1,4**. Ahora bien, es necesario implementar el concentrador de esfuerzos en la zona crítica con el fin de validar realmente el esfuerzo que se está aplicando en el lugar de análisis.

$$\sigma = K_t * \sigma_{máx}$$

$$\sigma = K_t * \frac{M * C}{I}$$

Ecuación 36. Esfuerzo máximo en la zona de análisis [46].

- Donde:

- ✓ K_t : *Concentrador de esfuerzos estático.*
- ✓ M : *Esfuerzo máximo en la zona crítica (N –mm).*
- ✓ I : *Momento de inercia del eje ($\frac{1}{4} \pi r^4$) / (mm⁴).*
- ✓ C : *Distancia del eje neutro al punto de análisis (m) / Radio del eje (mm).*

Remplazando:

$$\sigma = 127.178 \text{ Mpa}$$

Con el valor del **esfuerzo máximo en la zona del concentrador de esfuerzos** ahora se procederá a obtener la sensibilidad a la muesca como:

$$q = \frac{1}{1 + \frac{\sqrt{a}}{\sqrt{r}}}$$

Ecuación 37. Sensibilidad a la muesca [46].

Donde:

- q : *Sensibilidad a la muesca.*
- $\sqrt{a}$: *Valores de la constante de Neuber para aceros.*
- $\sqrt{r}$: *Raíz del radio de la muesca.*

Para obtener los valores de la constante de **Neuber** se utilizará la siguiente tabla:

σ_u (kpsi)	σ_u (Mpa)	$\sqrt{a}$
120	835	0,049
130	905	0,044
140	975	0,039
150	1115	0,031
160	1255	0,024
180	1395	0,018
200	1535	0,013

Tabla 18. Valores de la constante de Neuber para aceros en diferentes unidades [46].

- Con el fin obtener el valor de la constante de *Neuber* lo más aproximado posible se interpolarán los valores. Cabe decir que en la tabla los valores de la constante están en función de la resistencia a la tensión la cual es de **1020 Mpa**. Con el valor del S_{ut} se procede a obtener la constante.

Interpolando los valores más cercanos a la resistencia a tensión se obtiene que la constante tiene un valor de:

$$\sqrt{a} = 0,036$$

Remplazando los valores en la *ecuación 37* se obtiene que la sensibilidad a la muesca es ***q***: **0,96**. Con el valor de la sensibilidad se puede ahora si obtener el concentrador de esfuerzos debido a la fatiga de la siguiente manera:

$$K_f = 1 + q (K_t - 1).$$

Ecuación 38. Concentrador de esfuerzos a fatiga [46].

Como ya se tienen todos los valores se puede remplazar las variables y determinar el concentrador de esfuerzos a fatiga.

✚ Cabe decir que todos los valores calculados deben realizarse con el fin de obtener el factor de seguridad debido a la fatiga. Esto ayudará a comprobar que el eje del prototipo del aerogenerador no fallará bajo cargas dinámicas.

$$K_f = 1,3.$$

Con el concentrador de esfuerzos debido a la fatiga se procede a aplicar alguno de los parámetros de diseño como el criterio de Soderberg

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_y} = \frac{1}{n}$$

Ecuación 39. Criterio de diseño de Soderberg según el libro de Shigley [46].

❖ CONSIDERACIÓN:

Es importante considerar que el eje como se encuentra a rotación la flexión estará fluctuando entre tensión y compresión. Lo anterior quiere decir que:

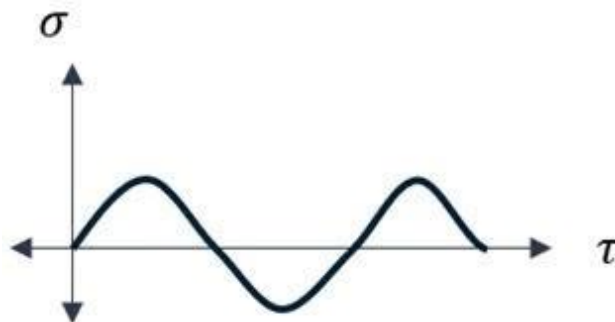


Imagen 42. Gráfica de la fluctuación del esfuerzo por flexión debido a la rotación del eje [46].

- ✚ El valor del esfuerzo debido a la flexión estará alternando de manera tanto positiva como negativa. Para este caso de análisis el **esfuerzo medio será 0**. Esto se refleja en el criterio de Soderberg de la siguiente manera:

$$\frac{\sigma_a}{S_e} = \frac{1}{n}$$

Ecuación 40. Criterio de falla de Soderberg [46].

- ✚ Sin importar qué criterio se utilizará es importante resaltar que en este caso al no haber esfuerzos medios **no habrá variación en el resultado del factor de seguridad** por lo que se puede utilizar cualquier criterio de falla de fatiga. En este caso se utilizará el criterio de **Soderberg**.

Explicando por qué los esfuerzos medios son cero se procede a obtener el factor de seguridad a fatiga de la siguiente manera:

$$n = \frac{S_e}{\sigma_a}$$

- σ_a : Esfuerzo alternante = $\sigma_{m\acute{a}x} * K_f$

$$\sigma_a: 118.32 \text{ N} - \text{mm}.$$

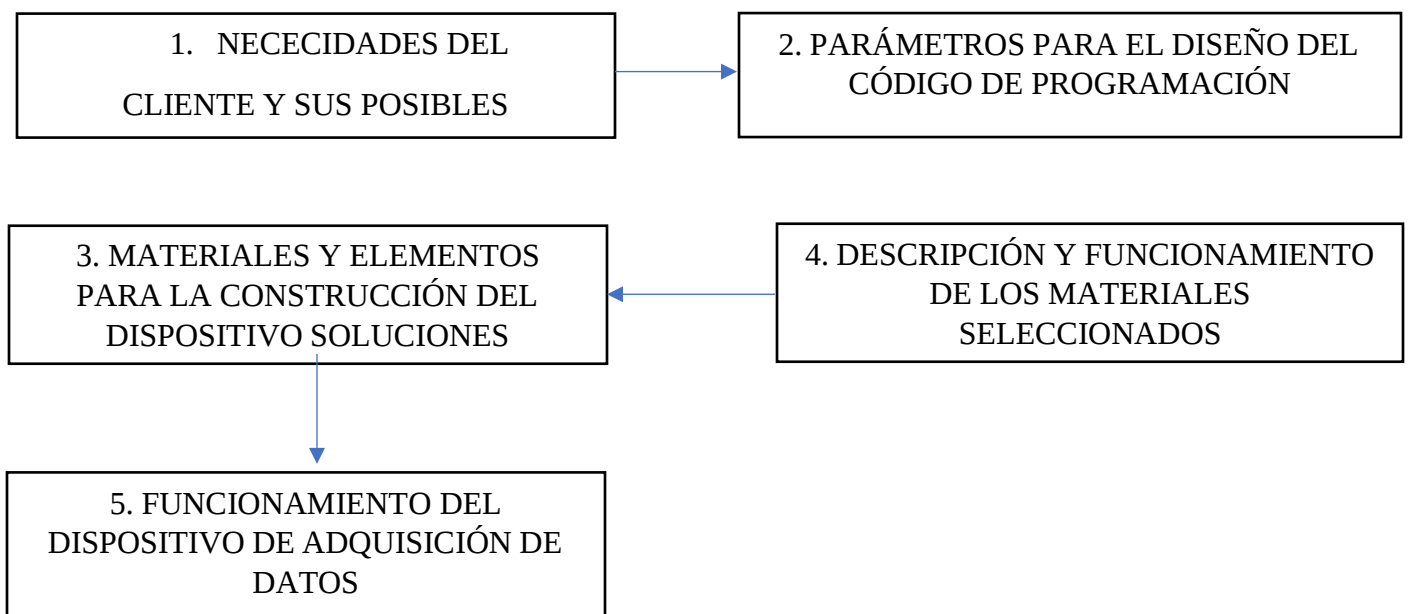
$$n = 1,75$$

- ✚ Como se puede evidenciar en el análisis estático y a fatiga, el eje (al ser la base de sujeción de los modelos Darreius y Savonius) podrá soportar corrientes de vientos superiores a las calculadas en capítulos previos.

8. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.

El sistema de adquisición de datos le permitirá al usuario a través de una pantalla **LED** ver las magnitudes tanto físicas (potencia y torque) como eléctricas (voltaje y amperaje), además de la velocidad angular.

Para lograr lo anteriormente mencionado, es necesario establecer una guía de parámetros necesarios que permita la construcción del dispositivo de medición. En el siguiente esquema, se establece una guía de los pasos necesarios para lograr el objetivo de diseñar y construir el sistema de adquisición de datos:



Esquema 1. Flujo de trabajo para el diseño y construcción del dispositivo de adquisición de datos

✚ Cabe decir que el sistema de adquisición de datos medirá en tiempo real las variables de voltaje, amperaje y velocidad angular. Esto se debe a que estos tres parámetros tienen una relación con la potencia y el torque. Además, existen dispositivos de medición industriales como el tacómetro y el multímetro que permitirán en próximos capítulos validar si la información que arroja el sistema de adquisición de datos es correcta.

Inicialmente se establecen los requerimientos del cliente y sus respectivas soluciones:

REQUERIMIENTOS	SOLUCIÓN
Sistema capaz de suministrar datos de operación del prototipo del aerogenerador en tiempo real potencia, velocidad angular, torque, voltaje, amperaje	Diseñar y construir un dispositivo el cual a través de un código de programación permita la lectura de datos en tiempo real.
Deberá ser un sistema que soporte la intemperie.	Diseñar y construir un cajón que proteja el dispositivo de medición de la intemperie y al mismo tiempo solo sea manipulado por personal autorizado con el fin de evitar hurtos.
Los datos de operación deben almacenarse en una base para futuros trabajos académicos.	Implementarle al dispositivo de medición una memoria SD que guarde todos los datos de operación
La información arrojada por el dispositivo de medición sea confiable-	Realizar pruebas experimentales al dispositivo de medición utilizando herramientas industriales para comparar los resultados que arroja el dispositivo.
Amplia vida útil del dispositivo de adquisición de datos.	Uso de materiales de buena calidad que alarguen la vida del dispositivo.
Es importante que el prototipo no sea tan costoso para su fabricación.	Escoger los elementos adecuados y económicos que permitan el funcionamiento del dispositivo de adquisición de datos.

Tabla 19. Requerimientos del cliente y sus soluciones.

Con los parámetros del cliente establecidos, es necesario diseñar un programa que permita leer en tiempo real los parámetros requeridos por parte del cliente. Para ello es necesario inicialmente determinar las variables que permitirán el diseño del programa. Bajo lo anterior se tendrá en cuenta lo siguiente:

La potencia eléctrica del sistema se utilizará la siguiente ecuación:

$$P_{ent} = V * A$$

Ecuación 41. Potencia eléctrica.

➤ *Donde:*

- $V = \text{Voltaje (V)}.$
- $A = \text{Amperaje (A)}$

- ✚ Para poder hallar la potencia mecánica del sistema se debe convertir la energía eléctrica en energía mecánica, La parte del generador que se encarga de la conversión de la energía se le denomina estator (siendo el rotor su contraparte móvil). Ahora bien, es importante destacar que en el proceso de conversión de energía existen diferentes tipos de pérdidas como:

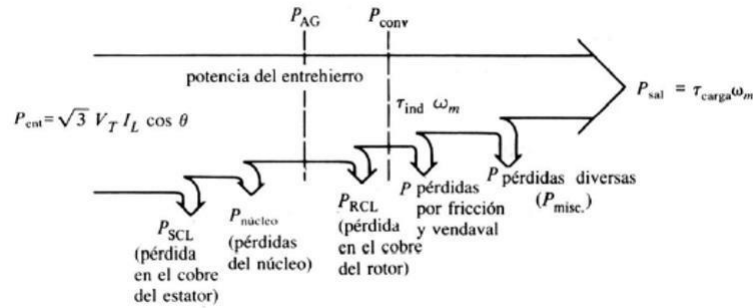


Imagen 49. Pérdidas en la conversión de energía en el generador [47].

Ahora bien, es necesario resaltar que no solo existen pérdidas por parte de la conversión de energía sino también existen pérdidas por el sistema de transmisión (valor que también debe ser calculado), para ello se utilizará el siguiente criterio:

- ✚ Según la literatura del libro **Diseño en ingeniería mecánica de Shigley** generalmente la eficiencia aproximada de una transmisión por engranajes es de **98%** Aun así, es importante aclarar que la anterior información cobra mayor veracidad debido a un estudio de análisis de eficiencia en transmisiones por engranajes realizado en la **Universidad de Cantabria** en el cual establecen que la eficiencia teórica y experimental son valores muy similares [48].

Con la eficiencia del sistema de transmisión por engranajes se utilizará información establecida en capítulos anteriores, por ejemplo, el valor máximo de potencia que puede generar el prototipo bajo las corrientes de viento en la Universidad Santo Tomás sede central y la velocidad angular máxima producida por el prototipo.

- ✚ Bajo los parámetros mencionados anteriormente se podrá obtener el valor de la potencia bajo las condiciones de pérdidas producidas por el generador y el sistema de transmisión. Lo anterior se define matemáticamente como:

$$P_{mec} = P_{elec} * \eta_{gen} * \eta_{ts}$$

Ecuación 42. Potencia mecánica del sistema [48].

✓ Donde:

- P_{elec} : Potencia eléctrica (W).

- η_{gen} : Pérdidas del generador.
- η_{ts} : Pérdidas por el sistema de transmisión

Con el fin de obtener el valor teórico de la potencia mecánica del sistema se procede inicialmente a obtener la potencia eléctrica utilizando un valor de voltaje de **55V** y **8.6A**. Bajo lo anterior se reemplaza en la **ecuación 42** y se obtiene lo siguiente:

$$P_{elec} = 473 \text{ W}$$

✚ Los valores de voltaje y amperaje se obtuvieron de la siguiente manera: Teóricamente ya se había estimado el valor de la potencia máxima que se podría obtener por parte del prototipo del aerogenerador (bajo las condiciones de viento en la Universidad Santo Tomás sede central). A partir de esa información se realizaron estimaciones experimentales para obtener los valores previamente mostrados. (En capítulos posteriores se explicará más a fondo el modo en que se obtuvieron los resultados de voltaje y amperaje).

Con el valor de la potencia eléctrica se procede a calcular las pérdidas producidas en el generador utilizando la ecuación 42 y se obtiene la siguiente información:

$$\eta_{gen} = 29\%$$

✚ Con los valores de la potencia eléctrica y las pérdidas tanto por el sistema de transmisión como por la conversión de energía en el estator se procede a obtener el valor teórico de la potencia mecánica máxima producida por el prototipo del aerogenerador. Para lograr lo anterior se reemplazarán los valores en la ecuación 42 y se obtiene:

$$P_{mec} = 134.42 \text{ W}.$$

Incluyendo los parámetros de pérdidas existió una reducción del valor de la potencia máxima alcanzado por el prototipo del aerogenerador.

Con los parámetros para satisfacer los requerimientos del cliente se deben implementar diferentes dispositivos o materiales que permitan satisfacer los parámetros del cliente. Bajo lo anterior, se necesita:

1. Un sensor que sea capaz de medir la velocidad angular producida por el movimiento del eje.
2. Un dispositivo que convierta las señales producidas por los sensores.
3. Un sensor que permita la medición del voltaje.
4. Un sensor que permita la medición de amperaje.
5. Un microcontrolador que pueda leer los parámetros matemáticos explicados previamente a través de un código de programación.

6. Un dispositivo que almacene la información del prototipo del aerogenerador.
7. Una pantalla para que el usuario pueda leer las variables en tiempo real.

Con el fin de darle al cliente un dispositivo funcional y económico se han seleccionado los materiales que pueden cumplir con las necesidades previamente planteadas. Inicialmente se describirán los materiales y su funcionamiento, posteriormente se mostrará un diagrama de cómo cada una de las piezas pondrá en marcha el sistema de adquisición de datos.

- ✚ Con el fin de obtener la medición de la velocidad angular se utilizará un dispositivo llamado **Encoder óptico**, es un sensor que genera señales cuando detecta movimiento. Básicamente este dispositivo convierte la posición angular de un eje en una señal. Debido a las especificaciones este dispositivo es el idóneo para que el usuario a través de una pantalla pueda ver la velocidad angular en tiempo real que produce la turbina.



Imagen 43. Encoder óptico.

- ✚ Para que el usuario pueda leer a través de la pantalla las variables de voltaje y amperaje se ha decidido utilizar un **punte rectificador** ya que este dispositivo mediante sus componentes hace que las curvas del voltaje se rectifiquen lo cual permite que se tenga una lectura más precisa tanto para el módulo de voltaje como el de amperaje del que se encuentra en el Arduino.



Imagen 44. Punte rectificador.

- ✚ Es necesario obtener un microcontrolador que permitiese la lectura del código de programación, para ello se decidió implementar un **Arduino** ya que este dispositivo funciona de manera independiente el cual a través del código de programación puede

interactuar con otros dispositivos debido a sus sensores y actuadores, además un Arduino contiene los suficientes puertos lógicos y analógicos para llevar el proyecto a acabo.

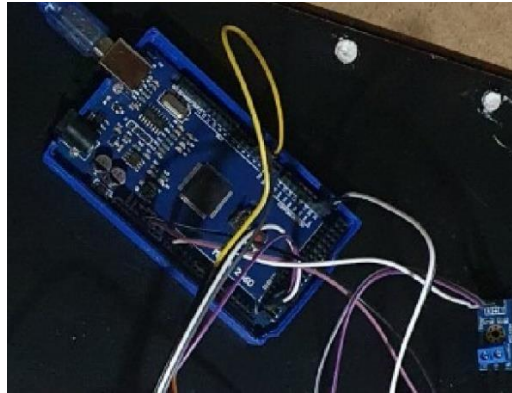


Imagen 45. Arduino.

- Es necesario que la información de los datos de operación del prototipo de la turbo máquina queden almacenados y puedan ser utilizados más adelante de manera académica. Bajo lo anterior, se seleccionó un módulo que permitiese a través de un controlador leer y escribir archivos, este dispositivo guardará toda la información de los datos de operación obtenidos (en tiempo real) por parte del prototipo del aerogenerador, (El módulo retiene la información a través de una **tarjeta microSD de 32 GB**).

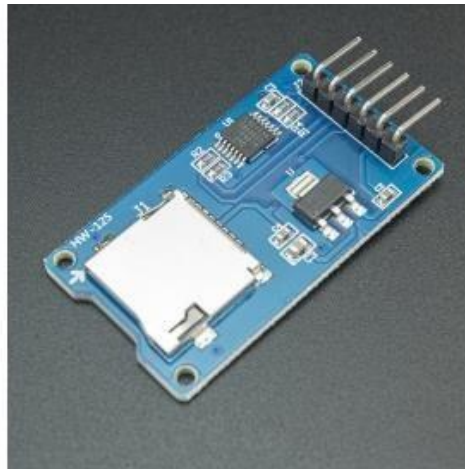


Imagen 46. Módulo de voltaje.

- Para que el usuario pueda visualizar la fluctuación de la velocidad angular del aerogenerador, potencia, amperaje y voltaje. Se implementará utiliza una **pantalla LCD de 20×4** la cual se escogió para poder visualizar de los datos de operación.



Imagen 47. Pantalla LCD.

- Como el dispositivo estará conectado a la salida del motor es necesario implementar al sistema de adquisición de datos un dispositivo que mida las señales eléctricas y de voltaje producidas por el motor. Para ello se ha decidido usar un módulo de voltaje.

Con la descripción específica de cada uno de los materiales implementados para el sistema de adquisición de datos se procede a mostrar gráficamente cómo se conectan cada uno de los dispositivos mencionados para lograr el funcionamiento del sistema de la siguiente manera:

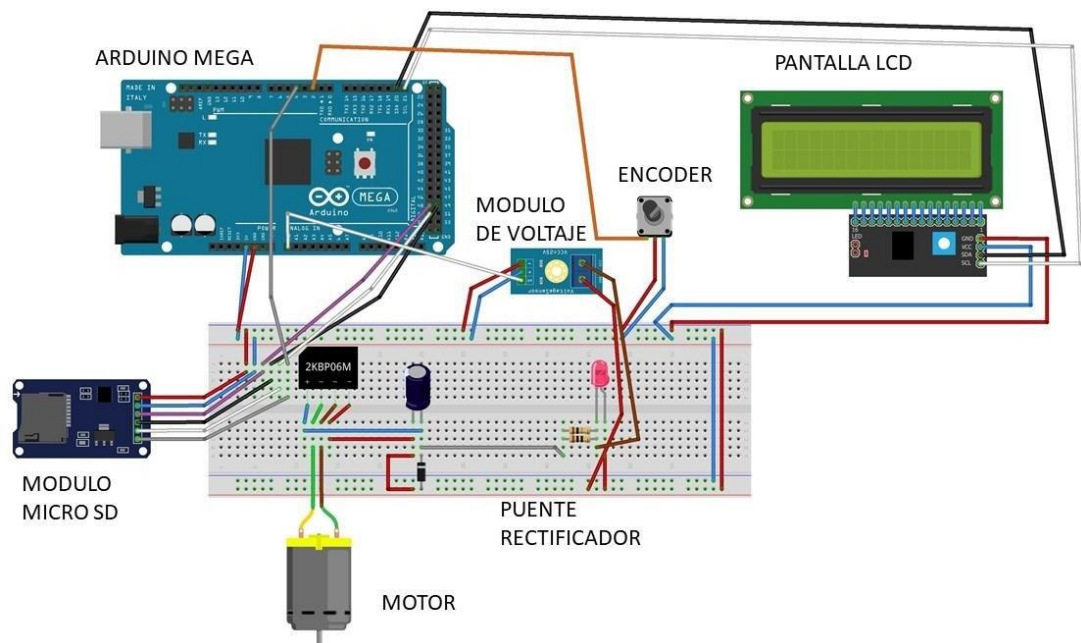


Imagen 48. Diagrama de conexión de los componentes del sistema de adquisición de datos

Con la descripción del funcionamiento de cada uno de los componentes que compondrán el dispositivo de adquisición de datos se procede a explicar el funcionamiento de los

componentes del sistema de adquisición de datos y la programación del código que hará que los dispositivos mencionados funcionen se explicará el funcionamiento de los componentes de la siguiente manera:

🚧 Se comienza con la generación del movimiento que será dado por las ráfagas de viento, estas ráfagas permitirán por medio del sistema mixto de hélices mover el eje motriz del aerogenerador. A la salida del eje del aerogenerador se conectará:

1. Un componente del **Encoder** el cual es la rueda perforada evidenciada en la imagen 43. Con el movimiento del eje del prototipo se generará una pulsación la cual será leída por el Arduino como la *velocidad angular* a través de un puerto lógico.

A la salida de la transmisión se conectará el eje del motor, este dispositivo (el motor) recibe el movimiento y lo convierte en energía por medio de los componentes internos, esa energía generada pasará por un puente rectificador el cual estabilizará las ondas o frecuencias de la energía generada. Posteriormente la energía producida pasa por un módulo **LM256**, con el fin de transformar esta señal en un aviso de voltaje.

Para obtener los valores del amperaje se conectaron unas resistencias en paralelo (en el puente rectificador) para poder implementar por medio de la ley de Ohm la relación que existe mediante la *tensión, corriente y resistencia*. Esta información es transferida al Arduino, el cual será el encargado de leer todos los datos y procesarlos mediante un código previamente programado y a través de una pantalla LED el usuario podrá visualizar los resultados.

9. UBICACIÓN DEL PROTOTIPO DEL AEROGENERADOR Y DEL DISPOSITIVO DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Como se ha establecido a lo largo del proyecto tanto el prototipo del aerogenerador híbrido como el dispositivo de adquisición de datos estarán ubicados en la Universidad Santo Tomás sede central. Se recomienda establecer inicialmente el prototipo del aerogenerador exactamente en el tejado de los laboratorios de la siguiente imagen.



Imagen 50. Recomendación de ubicación para el prototipo del aerogenerador híbrido.

Se recomienda dejar el prototipo en ese lugar ya que es una zona donde no hay tantos edificios que dificulten las corrientes del viento, adicionalmente es una zona donde el acceso es solo para personal autorizado, lo anterior garantizará que no habrá pérdidas de las partes de prototipo del aerogenerador.

Para el dispositivo de medición se recomienda implementar un tablero de control para intemperie el cual garantice inicialmente que sin importar las condiciones climáticas el dispositivo seguirá funcionando, adicional el tablero estará cerrado con llave para que solo sea manipulado por personal autorizado. Se recomienda instalar el tablero en:



Imagen 51. Recomendación de ubicación para la instalación del tablero de control.

- ✚ Se recomienda este lugar dentro de las instalaciones de la Universidad Santo Tomás sede central ya que: El tablero estará protegido por el tejado lo cual garantizará que por condiciones climáticas el dispositivo seguirá funcionando, el flujo de personas en este lugar es mínimo lo cual disminuye la posibilidad de pérdidas o de manipulación por personal externo y al mismo tiempo el prototipo del aerogenerador se encuentra cerca.
- ✚ Para adquirir la información de los datos de operación del prototipo del aerogenerador se recomienda que la llave del tablero de control se deje a disposición del representante de último semestre la facultad de ingeniería mecánica de la Universidad Santo Tomás sede central.
- ✚ Para la instalación del tablero de control se recomienda comprar un modelo que tenga como mínimo las siguientes dimensiones (las unidades que serán ilustradas serán en milímetros):

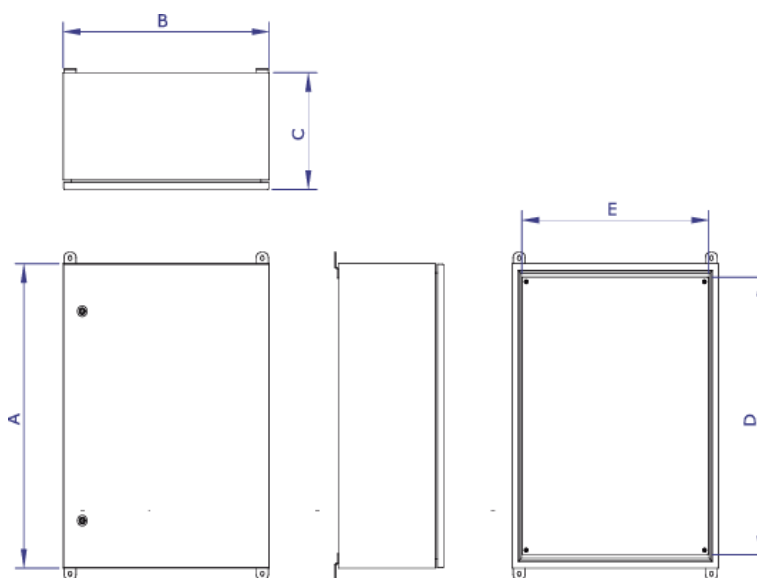


Imagen 52. Plano del tablero de control.

A	B	C	D	E
250	200	200	175	140

✚ Se recomienda realizar la compra a la empresa **ATIELEC INDUSTRIAL LTDA** debido a que los tiempos de entrega son entre una y dos semanas si no se tiene el producto en stock.

10. CONFIABILIDAD DEL MONTAJE EXPERIMENTAL.

Es importante tener en cuenta que, aunque se haya diseñado y fabricado el dispositivo de adquisición de datos, se debe garantizar a la Universidad Santo Tomás sede central y a la facultad de ingeniería mecánica que los valores que verá el usuario en la pantalla del dispositivo son parecidos a los que arrojaría un dispositivo industrial. Para ello, inicialmente, a través de un tacómetro y un multímetro se verificarán **en tiempo real** las variables que tienen relación directa con los parámetros de análisis (**POTENCIA Y TORQUE**). En este caso las variables que tienen relación son la **velocidad angular**, **voltaje** y **amperaje**, a través de estas variables se podrá verificar si los resultados que el usuario verá a través de la pantalla son correctos.

Inicialmente, se especificarán los dispositivos de medición utilizados (junto con su referencia) y se explicará a fondo la relación matemática que existe entre la velocidad angular, voltaje y amperaje con la potencia mecánica y el torque.

- ✓ *Un tacómetro es un instrumento de medición en tiempo real el cual mide la rotación de un eje a través de revoluciones por minuto. Para este caso se utilizó un tacómetro PCE – T238 fabricado en el año 2012.*
- ✓ *El multímetro es un dispositivo eléctrico que puede medir directamente magnitudes eléctricas tales como corrientes, tensiones y resistencias. El multímetro que se utilizará es un Uni-t Ut89X RMS NCV.*

✚ *La relación que existe entre la potencia, el voltaje y el amperaje está definida matemáticamente como:*

$$P_{elec} = V * A$$

Ecuación 43. Potencia eléctrica.

Con la ayuda del multímetro, **cuando se ponga en marcha el montaje experimental** se podrá medir en tiempo real las variables de voltaje y amperaje. A su vez, se compararán los valores arrojados por el multímetro y el dispositivo de medición construido. Una vez se logre comparar que la información de estas dos variables visualizadas a través de la pantalla LCD del dispositivo de medición se relaciona a la información del multímetro se asumirá que el valor de la potencia (al ser un valor directamente dependiente del voltaje y el amperaje) podrá ser un valor confiable.

Como se determinó en el capítulo anterior, la relación que existe entre la potencia mecánica y la potencia eléctrica es directamente proporcional, por tanto, el usuario al querer observar el torque producido por el prototipo del aerogenerador lo hará bajo el siguiente criterio:

✚ *La relación que existe entre el torque, la potencia y la velocidad angular está definida matemáticamente como:*

$$T = \frac{(V * A) * \eta_T}{\omega}$$

✓ Donde:

- $P_{electrica} : (V * A) (W)$.
- η_T : Pérdidas del generador y el sistema de transmisión.
- ω : Velocidad angular (rad/s).

✚ Como se puede observar en la ecuación xx, el valor del torque depende de los tres parámetros que se pueden medir a través del montaje experimental (**velocidad angular, voltaje y amperaje**).

Con la información teórica aclarada se procede a explicar el montaje experimental que permitirá al usuario garantizar que la información es verídica, para ello: Sobre la parte superior del eje se colocará un taladro industrial el cual simulará la velocidad del viento y permitirá el movimiento del eje. En la parte inferior (a la salida del motor), se pondrá el tacómetro, y el multímetro el cual permitirá la visualización del voltaje y el amperaje y la velocidad angular.

Con la ayuda de las herramientas industriales y el dispositivo construido colocados sobre el prototipo del aerogenerador se comprobará si la información que muestra el dispositivo de medición a través de la pantalla tiene relación con la información arrojada por los dispositivos industriales.



Imagen 45. Montaje experimental sobre el prototipo del aerogenerador.

Para validar la información del dispositivo de medición, inicialmente se genera el movimiento del taladro de manera manual. Es decir, se oprime el botón del taladro (el cual permite la generación del movimiento del eje) y se va variando la velocidad que éste genera. (se visualiza el cambio de velocidad producido por el taladro a través del tacómetro).

✚ Inicialmente se hizo la toma de los datos arrojados por el tacómetro y el multímetro de manera manual. Es decir, mientras que una persona variaba la fuerza aplicada

sobre el taladro se observaba la medición de la velocidad angular, el voltaje y el amperaje, posteriormente se anotaban los datos en las tablas que se mostrarán a continuación.

Información del tacómetro		Prueba experimental 1		Prueba experimental 2		Prueba experimental 3		Prueba experimental 4		Prueba experimental 5	
465	rpm	462,2	rpm	462,1	rpm	462,1	rpm	462	rpm	462,1	rpm
85	rpm	19,9	rpm	85,1	rpm	84,9	rpm	80	rpm	84,9	rpm
90	rpm	90,1	rpm	90	rpm	90,2	rpm	90	rpm	90,1	rpm
120	rpm	120,2	rpm	120	rpm	120,5	rpm	120	rpm	120,	rpm
150	rpm	150,1	rpm	150	rpm	150,2	rpm	150	rpm	150,1	rpm
20	rpm	19,9	rpm	19,9	rpm	20,3	rpm	20	rpm	20,2	rpm
200	rpm	200,1	rpm	200	rpm	200	rpm	200	rpm	200	rpm
250	rpm	250,2	rpm	250,5	rpm	250,3	rpm	250	rpm	250,2	rpm
170	rpm	170,1	rpm	170,2	rpm	170,2	rpm	170	rpm	170	rpm

Tabla 20. Datos del tacómetro vs datos del dispositivo de medición construido.

Información del multímetro		Prueba experimental 1		Prueba experimental 2		Prueba experimental 3		Prueba experimental 4		Prueba experimental 5	
55	V	55	V	55.1	V	55.1	V	55	V	55	V
10	V	10.1	V	10	V	10.2	V	9.9	V	10	V
11	V	11.2	V	11	V	11	V	11	V	11.1	V
14	V	14.1	V	14.1	V	14.1	V	14	V	13.9	V
18	V	18.1	V	18.1	V	18.1	V	18.2	V	18	V
2	V	2.2	V	2.2	V	2.1	V	2	V	2	V
24	V	24.1	V	24.2	V	24	V	24	V	24	V
30	V	30.2	V	30	V	30	V	30	V	30.1	V
20	V	20	V	20.1	V	20.1	V	20	V	20.1	V

Tabla 21. Datos del multímetro vs datos del dispositivo de medición construido.

🔧 El dispositivo de medición construido recolecta la información cada dos segundos, y los almacena a través de una USB, posteriormente los datos arrojados por el dispositivo se pasan a un computador y se procede a comparar con los datos del tacómetro y el multímetro.

🔧 Como se puede ver en las tablas, la información que arroja el dispositivo de medición respecto a la del tacómetro y al multímetro es muy similar en todas las pruebas realizadas tanto para la información de la velocidad angular como para los valores de voltaje y amperaje.

11.DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA RELACIÓN DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA

En capítulos anteriores se obtuvieron los valores mínimos y máximos de la velocidad angular producida por el prototipo del aerogenerador. Ahora bien, los valores previamente mencionados se calcularon con el fin de validar que en efecto algunos elementos del prototipo bajo condiciones críticas no tendiesen a fallas. Para el diseño del sistema de transmisión se logró reutilizar un motor el cual para el caso de este proyecto de grado se utilizará como un generador.

CONSIDERACIÓN:

- *Para el diseño de la relación de transmisión se tuvo en cuenta lo siguiente: El módulo de voltaje (previamente ilustrado) no podía sobrepasar un límite de 50V (debido a sus propiedades). Bajo lo anterior es necesario diseñar el sistema de transmisión incluyendo dicha restricción con el fin de que el sensor de voltaje no tienda a fallas debido a la variación de velocidad que puede haber en el lugar donde estará ubicado el prototipo del aerogenerador. Utilizando este criterio se decidió diseñar y construir una relación de transmisión de 1 a 1.5 para evitar una sobrecarga de voltaje producida por un aumento en la velocidad del viento.*

En el proceso de diseño y fabricación, se utilizaron algunas especificaciones establecidas en el libro ***Diseño de máquinas de Norton***. Para el propósito de este trabajo el ángulo de presión seleccionado será 20 grados debido a que según la literatura es el más común. Los valores estándar para ángulos de presión de engranajes son 14.5°, 20° y 25°, de los cuales el de 20° es el más común y el de 14.5° se considera obsoleto [49]. para la ejecución de este trabajo de grado se decidió utilizar un tren de engranajes ya que según la definición del libro Norton es un dispositivo que permite intercambiar torque por velocidad o viceversa [49].

Para el diseño y construcción del tren de engranajes se utilizarán algunos valores previamente establecidos en diferentes textos y libros. El requerimiento principal es el diseño de un tren de engranajes que sea de reducción ya que la velocidad angular de entrada es mayor a la de salida, más adelante se demostrará el criterio previamente mencionado.

Para el diseño del tren de engranaje se utilizaron engranajes ***“Espina de pescado”*** o helicoidales dobles, este tipo de engranajes se pueden catalogar como una combinación de hélice derecha e izquierda, aunque industrial mente son complejos de fabricar por su complejo diseño se logró la adquisición de una impresora 3D la cual permitió la fabricación de estos.

Cabe decir que, aunque fabricar este tipo de engranajes puede ser dispendioso son muy útiles ya que a diferencia de los helicoidales y los rectos solo sufre la mitad de error de deslizamiento respecto a los otros, también permite la reducción de ruido entre otras características.



Imagen 46. Tren de engranajes fabricado para el prototipo del aerogenerador.

Para el diseño del tren de engranajes es importante tener en cuenta algunos criterios de diferentes parámetros como: módulo métrico, pasos diametrales, número de dientes entre otros. Nuevamente con la ayuda del libro ***Diseño de máquinas de Norton*** se seleccionaron de la siguiente manera:

Módulos métricos estándares		Número mínimo de dientes del piñón para evitar la interferencia entre un piñón con dientes a profundidad total y una cremallera de profundidad total		Pasos diametrales estándares	
Módulo métrico (mm)	Equivalente p_d (in ⁻¹)			Grueso ($p_d < 20$)	Fino ($p_d \geq 20$)
0.3	84.67	Ángulo de presión (grados)	Número mínimo de dientes	1	20
0.4	63.50			1.25	24
0.5	50.80			1.5	32
0.8	31.75			1.75	48
1	25.40			2	64
1.25	20.32			2.5	72
1.5	16.93			3	80
2	12.70	14.5	32	4	96
3	8.47	20	18	5	120
4	6.35	25	12	6	
5	5.08			8	
				10	

Imagen 47. Selección de parámetros para el diseño y fabricación de los engranajes para el prototipo [49].

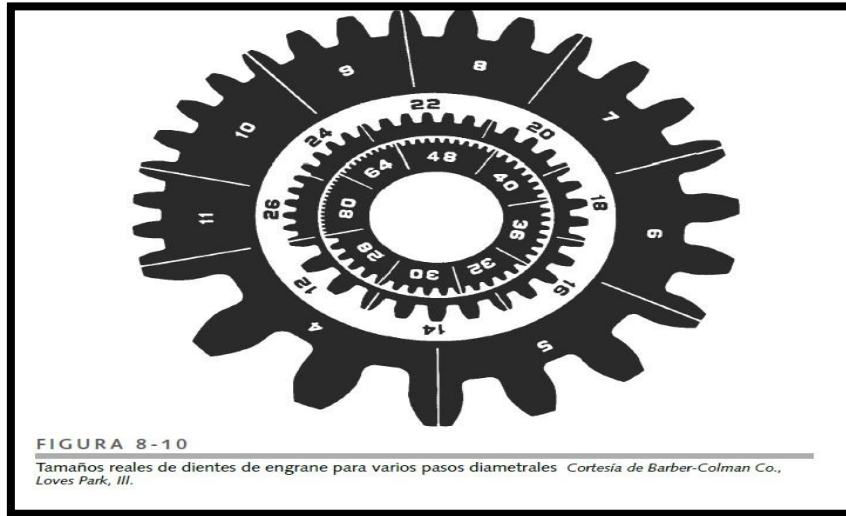


Imagen 48. Selección de parámetros para el diseño y fabricación de los engranajes para el prototipo [49].

11.1. Diseño de los engranajes.

Con la ayuda de la herramienta **Excel** se procede a obtener el número de dientes tanto del engranaje como del piñón utilizando la relación de transmisión, para ello es necesario determinar la velocidad angular de salida, utilizando el generador que en este caso es un motor reciclado.

Tabla 22. Especificaciones del motor.

Lugar de origen: Alemania	Marca: Synchronous motors	Número del modelo: RSM 828/3F	Aplicaciones: Blisteadoras
Tipo de motor: DC de escobillas	Torque: 7.8 N-cm	Construcción: Imanes permanentes	Velocidad: 1200 rpm
Corriente: 75 mA	Potencia: 20 W	Tamaño: 100x64	Voltaje: 230 V
Peso: 0,55 kg	Tiene caja de reducción: si	Diámetro del eje: 10 mm	

Como se evidenció en el capítulo anterior con la ayuda de los dispositivos se logró determinar que a **85 RPM** el voltaje producido es de **10V**. Bajo lo anterior se procedió a hacer una tabla en la que se relacionará la velocidad angular con el voltaje, esto se hizo con el fin de seleccionar un voltaje manejable por parte del prototipo.

En primera instancia como ya se había determinado el valor medio de la velocidad angular. Para el diseño de la transmisión se procede a realizar la siguiente tabla:

<i>DIVISOR</i>	<i>Rpm</i>
1	127.29
1,1	115.71
1,2	106.07
1,3	97.91
1,4	90.92
1,5	85
1,6	79.55
1,7	74.87
1,8	70.71
1,9	66.99
2	68

Tabla 23. Parámetros para la relación de transmisión.

Al saber que la relación de transmisión va a ser de **1:1.5** el siguiente paso sería, mirar la relación de engrane que se determinada como:

$$m_v = \sqrt{\text{relacion de transmision}}$$

$$m_v = \sqrt{1.5}$$

$$= 1.225$$

Ecuación 45. Relación de engrane [44].

Con la ecuación previamente ilustrada se calcula la relación de transmisión la cual da como resultado **1,225** o una relación de transmisión **1:1.5**. Con el valor de la relación se procede a obtener el número de dientes de la siguiente manera:

$$\text{Diente engranaje} = \text{Diente piñon} * \text{relacion de engrane}$$

Ecuación 46. Dientes del engranaje [44].

RELACIÓN DE ENGRANAJE	DIENTES DEL PIÑÓN	DIENTES DEL ENGRANAJE
1,225	12	14,697
1,225	13	15,922
1,225	14	17,146
1,225	15	18,371
1,225	16	19,596
1,225	17	20,821
1,225	18	22,0454
1,225	19	23,270
1,225	20	24,49489743
1,225	21	25,720
1,225	22	26,944
1,225	23	28,169

1,225	24	29,394
1,225	25	30,619
1,225	26	31,84336666
1,225	27	33,068
1,225	28	34,293

Tabla 24. Especificaciones de dientes de engranaje.

Con lo visto anterior se tiene que los datos generales para la creación de nuestro tren de engranajes de dos etapas serian:

Datos proporcionados		Unidades
w-sal	90	Rpm
w-entrada	127.29	Rpm
Angulo de presión	20	Grados
Modulo	3	
Numero de dientes piñón	18	Und
Numero de dientes engranaje	22	Und
Pd	6	
Angulo de hélice	20	Grados

Tabla 25. Información para el sistema de transmisión.

Con la ayuda del software **Inventor** se procede a diseñar y modelar el tren de engranajes como ilustra la siguiente imagen. Una vez puestos los parámetros previamente expuestos en el software se obtiene el modelo del tren de engranajes como se muestra en los planos. Posteriormente se procede a la fabricación de esta y la instalación en el prototipo del aerogenerador:

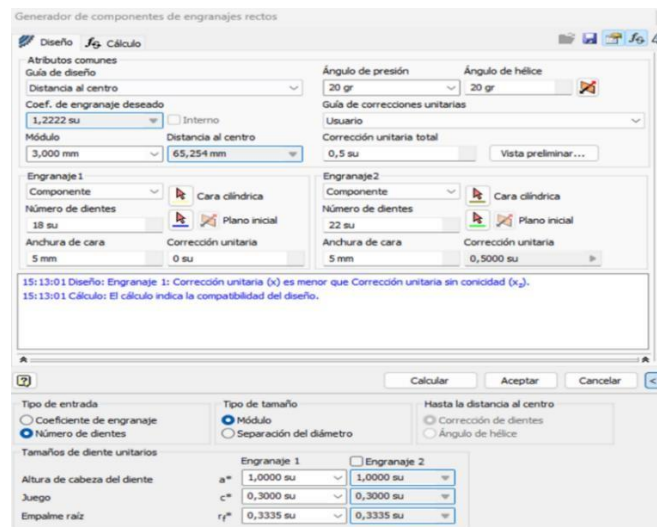


Imagen 49. Selección de parámetros en el software Inventor.

11.2. Factor de seguridad para engranajes plásticos.

El factor de seguridad se utiliza para poder verificar que los engranajes no fallen por las cargas sometidas o por la vida útil dada, debido a las características de los engranajes no se puede calcular el factor de seguridad de manera convencional como está en los libros de diseño. Bajo lo anterior se tendrá que implementar distintos métodos que permitiesen a conseguir el factor de seguridad. Para el propósito de este trabajo se utilizará una variable del método de Lewis que es utilizado en el método según *Dvorak* [51].

Para obtener el factor de seguridad de los engranajes. Se utiliza la información del artículo ABS en la cual, “Dvorak presenta una ecuación que no es más que una modificación de la ecuación de Lewis e incorpora la velocidad en la circunferencia de paso y el factor de servicio” [51]. Se tendrá que expresar de la siguiente manera:

$$S = \frac{55(6 + V) * W * P * G}{F * Y * V} \leq [Ss]$$

Ecuación 47. Método según Dvorak [51].

❖ *Donde:*

- *S - Tensión actuante en la base del diente en lb/pulg².*
- *W - Potencia en HP.*
- *V – Velocidad angular en pie/min.*
- *P – Diámetro del engranaje.*
- *CS - Factor de servicio.*
- *F - Ancho del diente en pulgadas.*
- *Y - Factor de forma o factor de Lewis.*
- *[SS] - Tensión admisible en lb/pulg².*

Tipo de Carga	8 – 10 h / día	24 h / día	Intermitente (3 h / día)	Ocasional (0,5 h / día)
Constante	1	1,25	0,80	0,50
Choques ligeros	1,25	1,50	1	0,80
Choques medios	1,50	1,75	1,25	1
Choques fuertes	1,75	2	1,50	1,25

Tabla 26. Factores de Servicio según Lewis [51].

Número de dientes	Dientes de involuta de 20°	Dientes de involuta de 20° cortos.
12	0,245	0,311
14	0,276	0,339
16	0,295	0,361
18	0,308	0,377
20	0,320	0,393
22	0,330	0,405
26	0,346	0,424
30	0,358	0,437
34	0,371	0,446
38	0,383	0,456
43	0,396	0,462
50	0,408	0,474

Tabla 27. Valor de la tensión admisibles para engranajes plásticos a 70°F en lb/pulg2 [51].

Plástico	Normal	Reforzado con fibra de vidrio
ABS	3000	6000
Acetato	5000	7000
Nylon	6000	12000
Policarbonato	6000	9000
Poliéster	3500	8000
Poliuretano	2500	-

Tabla 28. Valores de tensiones admisibles para engranajes plásticos a 70 F en Lb/In^2 [51].

$$S = \frac{55(6 + V) * W * P * C_s}{F * Y * V} \leq [Ss]$$

La variable C_s se selecciona a través por la tabla de factor de servicio a una carga con choques medios debido a que el prototipo del aerogenerador gira por instantes de tiempo rápido y en otros muy lento durante el periodo de funcionamiento que es de 24 horas de uso, por lo tanto:

$$C_s = 1.75$$

La variable Y se selecciona por la tabla de factor de forma ya que la transmisión del prototipo es de dos engranajes por lo tanto se obtendrán dos valores dependiendo del número de dientes, el primer engranaje tiene 18 dientes y el segundo 22 dientes, bajo la condición mencionada el factor de **Lewis** para los engranajes es:

$$Y_1 = 0.308 \quad Y_2 = 0.330$$

La velocidad de giro o polo está dada por la siguiente expresión, se procederá a hacer el cálculo para los dos engranajes.

- La ecuación de velocidad de giro se encuentra en sistema inglés por lo cual será necesario realizar la conversión a sistema internacional posteriormente.

$$V = \omega * \frac{D_e}{2}$$

Ecuación 48. Velocidad de giro [45].

❖ Donde:

- ω : Velocidad angular.
- D_e = Diámetro exterior de los engranajes (**Para hacer la conversión de unidades se tendrá que dividir el valor en mm entre 304.8**).

$$V_1 = 127.29 \text{ RPM} * \frac{78,24/304,8}{2} \text{ ft}$$

$$V_1 = 17.45 \text{ pie/min}$$

$$V_2 = 127.29 \text{ RPM} * \frac{62,31/304,8}{2} \text{ pie}$$

$$V_2 = 13.90 \text{ pie/min}$$

✚ Con el valor de la velocidad de giro de los engranajes se procede a sustituir todos los valores en la ecuación 42 para cada uno de los engranajes.

$$S_1 = \frac{55(6 + 13.90 \text{ pie/min}) * 0.317 \text{ hp} * 3.08 \text{ in} * 1.75}{0.39 \text{ in} * 0.308 * 13.90 \text{ pie/min}} \leq [3000]$$

$$S_1 = 1024.03 \text{ lb/pulg}^2 \leq [3000 \text{ lb/pulg}^2]$$

$$S_1 = 7.06 \text{ MPa}$$

✚ En este caso se cumple con la ecuación propuesta ya que está dentro del límite que planteó Dvorak para que se cumpla la tensión admisible.

$$S_2 = \frac{55(6 + 13.90 \text{ pie/min}) * 0.317 \text{ hp} * 2.45 \text{ in} * 1.75}{0.39 \text{ in} * 0.308 * 13.90 \text{ pie/min}} \leq [3000]$$

$$S_2 = 890.94 \text{ lb/pulg}^2 \leq [3000 \text{ lb/pulg}^2]$$

$$S_2 = 6.14 \text{ MPa}$$

Para el segundo caso de análisis también se cumple con la ecuación propuesta ya que está dentro del límite que planteo Dvorak para que se cumpla la tensión admisible.

Al haber obtenido anterior mente los valores de la tensión admisible se proceden a determinar el factor de seguridad, de la siguiente forma.

$$n = \frac{S_y}{S}$$

Ecuación 49. Factor de seguridad [51].

- Donde:
 - S = Tensión admisible.
 - S_y = Esfuerzo último a tensión.
- Valor de ABS: $3000 \text{ Lb}/\text{In}^2$ ya que este valor corresponde a un polímero, este tipo de materiales se utilizan para realizar impresiones en 3D de engranajes.
- ABS: Es un acrilonitrilo butadieno estireno o un polímero termoplástico el cual es muy usado para realizar impresiones en 3D.
- $ABS = 3000 \text{ Lb}/\text{In}^2$ o 20.68 MPa

$$n_1 = \frac{20.68 \text{ MPa}}{7.06 \text{ MPa}}$$

$$n_1 = 2.92$$

$$n_2 = \frac{20.68 \text{ MPa}}{6.14 \text{ MPa}}$$

$$n_2 = 3.36$$

Con los valores de los factores de seguridad se logra asegurar que el sistema de transmisión no va a fallar, teniendo en cuenta la literatura utilizada anterior mente el factor ideal para un engranaje plástico sería de un valor de dos o más En el caso del diseño de este proyecto el valor del factor de seguridad fue mayor [51]. Lo anterior permite determinar que bajo las condiciones a las que estará sometida el sistema de transmisión no tendrá fallas.

11.3. ACTIVIDADES PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA.

Las actividades para lograr la construcción del sistema de transmisión de potencia para este trabajo de grado fueron:

ENGRANAJES IMPRESION 3D			
PROCESO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	HORAS
Compra de material	Se compro PET-G que es utilizado en el mundo de la impresión 3d para hacer los engranajes	1	1
Impresión	Se hicieron barias pruebas de resistencia con rellenos y temperaturas hasta que se pudo sacra uno que cumplía y se replico	2	12

Tabla 29. Procedimiento de fabricación de los engranajes en impresión 3D.

ENGRANAJES IMPRESION 3D			
PROCESO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	HORAS
Compra de material	Se compro PET-G que es utilizado en el mundo de la impresión 3d para hacer los engranajes	1	1
Impresión	Se hicieron barias pruebas de resistencia con rellenos y temperaturas hasta que se pudo sacra uno que cumplía y se replico	2	12

Tabla 30. Procedimiento de fabricación de los engranajes en impresión 3D.

CAJA ENGRANAJES IMPRESION 3D			
PROCESO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	HORAS
Compra de material	Se compro pet-g que es apto para esfuerzos grandes y no se deteriora con el ambiente	1	1
Impresión	Se imprimió y ajusto para que no tenga interferencia con el sistema de trasmisión	2	12

Tabla 31. Procedimiento de fabricación de la caja de impresión 3D.

BUJE PARA ENGRANJE EN 3D			
PROCESO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	HORAS
Compra material	Se compro y utilizo bronce fosforado que tiene propiedades auto lubricantes, se puso este buje para que directamente no se afectará el plástico del engranaje con le rozamiento	2	1
Corte	Se aproxima medidas con sierra sin fin	n/a	0,25
Torneado	Refrentar, dar forma y dar ajuste para el engranaje	2	2

Tabla 32

. Procedimiento de fabricación de la caja de impresión 3D.

12. CONCLUSIONES

1. Utilizar el método estadístico de Weibull permitió determinar la probabilidad de la velocidad de las corrientes del viento en la Universidad Santo Tomás sede central. Esto gracias a la comparación de la información entre los portales de la NASA y el IDEAM, se espera que en promedio la velocidad del viento en el lugar de análisis se encuentre en rango promedio de 2,14 m/s y 2,31 m/s. A partir de esta información se podrá en futuros trabajos académicos establecer si dentro de las instalaciones de la institución educativa se puede establecer un modelo a escala real.
2. La implementación en el proyecto de grado de materiales en impresión **3D** resultó ser funcional ya que, cómo se demostró en la construcción del sistema de transmisión de potencia bajo condiciones críticas el sistema no fallara, lo anterior demuestra que: Implementar polímeros en este tipo de proyectos permite dar alternativas de fabricación respecto al modelo tradicional de la construcción de sistemas de transmisión en acero ya que disminuye los tiempos de fabricación, costos y pueden soportar (al igual que el acero) diferentes tipos de cargas.
3. Implementar un modelo experimental permitió comprobar que los datos arrojados por el dispositivo de adquisición de datos fuesen cercanos respecto a la información de los equipos industriales utilizados para este trabajo de grado. Cabe decir que, esta información será un punto de partida para verificar en el futuro si los datos de operación del dispositivo de medición construido seguirán teniendo relación respecto a otros instrumentos de medición con diferentes especificaciones técnicas o si por el contrario existirán variaciones significativas en la toma de datos.
4. Gracias a la información de los datos de operación producidos por el prototipo del aerogenerador se podrá definir si efectivamente la potencia producida por la turbomáquina bajo las condiciones de la Universidad Santo Tomás sede central es suficiente para cargar baterías de vehículos eléctricos o si por el contrario no es viable continuar con este tipo de proyectos debido.

13. RECOMENDACIONES

1. Con el fin de que la facultad de ingeniería mecánica de la universidad Santo Tomás sede central continúe realizando investigaciones relacionadas al uso de energías renovables se recomienda implementar un anemómetro al prototipo del aerogenerador para saber en tiempo real (sin necesidad de parámetros matemáticos) la velocidad real del viento.
2. Con la información de los datos de operación se recomienda establecer la eficiencia del prototipo construido para determinar si bajo las condiciones del lugar se puede establecer un aerogenerador a escala real que pueda brindar la energía necesaria para cargar baterías de vehículos eléctricos.
3. Ya que las partes del prototipo del aerogenerador son desmontables se recomienda realizar un diseño en detalle y construcción de los modelos Darreius y Savonius con el fin de comparar si incluyendo un proceso de ingeniería en detalle la potencia de la turbomáquina aumenta.
4. Se recomienda tener una lubricación constante en el sistema de transmisión de potencia con el fin de evitar el deterioro de las piezas plásticas debido a las velocidades a las que el sistema estará sometido, diferentes estudios recomiendan usar lubricantes como SuperLube o MagnaLube cada 250 horas de uso.

14. BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. D. BOGOTÁ, «DOCUMENTO DE COMISIÓN ACCIDENTAL, ACUERDO 790,» BOGOTÁ, 2021.
- [2] S. BALLESTEROS GONZALEZ y R. MORALES BETANCOURT, «ESTIMACIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE Y LOS IMPACTOS EN LA SALUD DE LA QUEMA DE BIOMASA EN EL NORTE DE SUDAMERICA UTILIZANDO UN MODELO DE TRANSPORTE QUÍMICO,» TOTAL ENVIRON, 2020.
- [3] A. FARROW, A. ANHAUSER, JEN CHEN y T. CESPEDES, «LA CARGA DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE EN BOGOTÁ,» GREEN PEACE ANDINO, BOGOTÁ, 2021.
- [4] A. LOZANO DURAN, «APUNTES SOBRE DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL,» UPM, ESPAÑA, 2019.
- [5] A. FATTAH MAHROUS, «A COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS STUDY OF AN INTEGRATING SAVONIUS-DARREIUS VERTICAL AXIS WIND TURBINE,» AKADEMIA BARU, EGIPTO, 2020.
- [6] J. C. ANTEZANA, «DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE GENERADOR EÓLICO DE EJE VERTICAL,» UNIVERSIDAD DE CHILE, SANTIAGO DE CHILE, 2004.
- [7] J. TAMBORERO DEL PINO, «FIABILIDAD: LA DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL,» MINISTERIO DE TRABAJO Y ASUNTOS SOCIALES, ESPAÑA, 1994.
- [8] R. BOYLESTAND, «ELECTRÓNICA: TEORÍA DE CIRCUITOS Y DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS,» PEARSON EDUCATION, MÉXICO, 2009.
- [9] J. A. ESCOBAR, VIENTOS DE CAMBIO, CIUDAD DE MÉXICO, 2009.
- [10] E. A, REPORTE ANUAL DE ENERGÍA EÓLICA, ALEMANIA: WWEA HEAD OFFICE , 2011.
- [11] J. R. TOLOSA, AEROGENERACIÓN DE ENERGÍA, ECUADOR: OLADE, 1983.
- [12] A. PALENCIA DIAZ, «MODELADO COMPUTACIONAL DE TURBINA SAVONIUS,» CHILENA DE INGENIERÍA 7, CHILE, 2014.

- [13] M. S. WONG GARCIA, «DISEÑO DE UN AEROGENERADOR VERTICAL SAVONIUS - CURVADO PARA ENSAYOS EXPERIMENTALES CON VELOCIDADES DE 4 m/s a 8 m/s,» PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ , PERÚ, 2015.
- [14] B. K. KIRBE, «EVALUATION OF SELF-STARTING VERTICAL AXIS WIND TURBINES FOR STAND-ALONE APPLICATIONS,» GOALD COAST, 1998.
- [15] I. PARASCHIVOIU, «WIND TURBINE DESIGN SECOND EDITION,» PRESSES INTERNATIONALS POLYTECHNIQUE, QUEBEC, 2009.
- [16] J. CASTILLO, de *SMALL SCALE VERTICAL AXIS WIND TURBINE DESIGN*, UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES, 2011, p. 26.
- [17] «DISEÑO DE UN AEROGENERADOR PARA USO PARTICULAR [EN LÍNEA]. TRABAJO DE GRADO DE INGENIERO MECÁNICO,» MADRID, UNIVERSIDAD CARLOS III, 2012, p. 80.
- [18] i. PARASCHIVOIU, «WIND TURBINE DESIGN WITH EMPHASIS ON DARREIUS CONCEPT».
- [19] B. Kirke, «EVALUATION OF SELF-STARTING VERTICAL AXIS WIND TURBINES FOR STAND-ALONE APPLICATIONS,» SCHOOL OF ENGINEERING, AUSTRALIA , 1998.
- [20] D. W. HART, *ELECTRÓNICA DE POTENCIA*, PRENTICE HALL, 2001.
- [21] R. M. J, «SEÑALES Y SISTEMAS,» McGraw Hill, MÉXICO, 2005.
- [22] A.S.S.S, «WIND CLIMATE MODELING USING WEIBULL AND EXTREM VALUE DISTRIBUTION VOL.VOL,3 no 5,» 2011.
- [23] C. JUSTUS y A. MIKHAIL, «HEIGHT VARIATION OF WIND SPEED AND WIND DISTRIBUTION STATISTICS,» 1976, pp. 261-264.10.1029.
- [24] R. B.Abernethy, «FUNDAMENTOS DEL ANÁLISIS DE WEIBULL,» FL, USA.
- [25] R. E. y R. M. Walpole, «Probabilidad y estadística para ingenieros,» Interamericana, México, 1990.
- [26] L. D. A. Reference, «Estimación of the Weibull parametres,» ReliaSoft Corporation , Arizona, 2015.
- [27] Google, «Google Maps,» [En línea]. Available: <https://www.google.com/maps/place/Universidad+Santo+Tom%C3%A1s./@4.6380966,-74.0662537,514m/data=!3m1!1e3!4m6!3m5!1s0x8e3f9a3a95d6bf55:0x8fc21e52a6>

221d39!8m2!3d4.6381156!4d-74.0642732!16zL20vMGcwNl81!5m1!1e9?hl=es.
[Último acceso: 20 02 2023].

- [28] NASA, «POWER ACCESS VIEWER,» [En línea]. Available: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>. [Último acceso: 08 02 2023].
- [29] Google, «Google Maps,» [En línea]. Available: <https://www.google.com/maps/place/Universidad+Santo+Tom%C3%A1s./@4.6380966,-74.0662537,17z/data=!4m6!3m5!1s0x8e3f9a3a95d6bf55:0x8fc21e52a6221d39!8m2!3d4.6381156!4d-74.0642732!16zL20vMGcwNl81!5m1!1e9?hl=es>. [Último acceso: 23 03 2023].
- [30] NASA, «POWER ACCES VIEWER,» [En línea]. Available: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>. [Último acceso: 08 02 2023].
- [31] Google, «Google Maps,» 08 02 2005. [En línea]. Available: <https://www.google.com/maps/place/Universidad+Santo+Tom%C3%A1s./@4.6380966,-74.0662537,17z/data=!4m6!3m5!1s0x8e3f9a3a95d6bf55:0x8fc21e52a6221d39!8m2!3d4.6381156!4d-74.0642732!16zL20vMGcwNl81!5m1!1e9?hl=es>. [Último acceso: 23 03 2023].
- [32] M. P. Burgos Gutierrez, S. Aldana Avila y D. J. Rodriguez Patarroyo, «Análisis del recurso energético eólico para la ciudad de Bogotá DC,» Universidad Distrital Fransisco Jose de Caldas, Bogotá, 2015.
- [33] A. ÁVILA S., D. PEREZ y J. JIMENEZ CARDOZO, ANÁLISIS DEL POTENCIAL EÓLICO A TRAVÉS DE LA FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL Y ROSA DE LOS VIENTOS, 2022.
- [34] NASA, «POWER ACCES VIEWER,» 08 02 2005. [En línea]. Available: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>. [Último acceso: 08 02 2023].
- [35] C. Justus y A. Mikhail, «Height variation of wind speed and wind distributions statistics. \grl, 3(5),» 1976, pp. 261-264..
- [36] IDEAM, «INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE DATOS ABIERTOS DEL IDEAM,» [En línea]. Available: <http://www.ideam.gov.co/capas-geo>. [Último acceso: 25 03 2023].
- [37] M. F. ALMANZA VARGAS y N. RODRIGUEZ RIBERO, «DISEÑO DE UN AEROGENERADOR DE EJE VERTICAL CON GUIA "PASO A PASO", PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN UNA FINCA DE 2000 M2,» FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA, BOGOTÁ, 2020.

- [38] AIRFOIL, «AIRFOIL TOOLS,» [En línea]. Available: <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca0018-il>. [Último acceso: 05 09 2023].
- [39] Saha, Thotla y Maity, «Optimum design configuration of Savonius rotor. JOurnal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,» Concordia University, Montreal, Quebec, 2008.
- [40] M. ABASOLO BILBAO, J. CORRAL SAIZ y E. IRIODO PLAZA, «TEORÍAS DE FALLO ESTÁTICO,» de *DISEÑO DE MÁQUINAS*, VALENCIA, UPV, 2017.
- [41] L. R. HERNANDEZ BRAVO, «DISEÑO DE UN AEROGENERADOR VERTICAL MODELO DARREIUS PARA ENSAYOS EN EL TUNEL DE VIENTO DE LABORATORIO DE ENERGÍA DE LA PUCP,» UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ, MAYO, 2016.
- [42] UNIDAD NACIONAL PARA LA GESTIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES, «PORTAL DE GESTIÓN DEL RIESGO,» 06 04 2014. [En línea]. Available: http://portal.gestiondelriesgo.gov.co/paginas/old_noticias/225.aspx. [Último acceso: 24 04 2023].
- [43] I. D. FRANCO TABARES y B. MONCADA MELGAREJO, «DESARROLLO DE UNA TURBINA EÓLICA HÍBRIDA VERTICAL DE BAJA POTENCIA,» FLORIDABLANCA, 2020.
- [44] A. M. HINCAPIÉ NIÑO y O. J. JAIMES HERNÁNDEZ, «IMPLEMENTACIÓN DEL AEROGENERADOR HÍBRIDO DARREIUS-SAVONIUS EN UN VEHÍCULO PARA LA GENERACIÓN ENERGÉTICA,» UNIVERSIDAD DE LA SALLE, BOGOTÁ, 2016.
- [45] I. D. FRANCO TABARES y B. MONCADA MELGAREJO, «DESARROLLO DE UNA TURBINA EÓLICA HÍBRIDA VERTICAL DE BAJA POTENCIA,» UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA, FLORIDABLANCA, 2020.
- [46] R. G. Budynas y J. Keith Nisbett, *DISEÑO EN INGENIERÍA MECÁNICA DE SHIGLEY NOVENA EDICIÓN*, Mc Graw Hill, 2012.
- [47] J. A. PEREZ, «ESTIMADOR DE TORQUE ELECTRÓNICO PARA MOTORES DE INDUCCIÓN JAULA DE ARDILLA,» UNIVERSIDAD DISTRIAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS, BOGOTÁ, 2017.
- [48] A. Diez Ibarbia, A. Fernandez del Rincon, M. Iglesias Santamaria, P. Garcia Fernández, A. De Juan de Luna y F. Viadero Rueda, «ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA EN TRANSMISIONES DE ENGRANAJES RECTOS

CORREGIDOS,» ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE INGENIERÍA MECÁNICA, ESPAÑA.

- [49] R. L. NORTON, DISEÑO DE MÁQUINAS UN ENFOQUE INTEGRADO, PEARSON, 2011.
- [50] R. L. NORTON, DISEÑO DE MÁQUINAS UN ENFOQUE INTEGRADO, PEARSON, 2011.
- [51] J. Moyo, T. Vilchez, J. Velasquez y R. Mestizo , «ResearchGate,» 03 09 2019. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/publication/335589412_a-fallas-y-metodos-calculo-engranajes-plasticosa. [Último acceso: 05 09 2023].
- [52] F. Eraso-Checa, E. Escobar Rosero, D. Fernando Paz y C. Morales, «METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE CARACTERÍSTICAS DEL VIENTO Y EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE ENERGÍA EÓLICA EN TÚQUERRES-NARIÑO,» REVISTA CIENTÍFICA, BOGOTÁ, 2017.
- [53] IDEAM, «INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE DATOS ABIERTOS DEL IDEAM,» [En línea]. Available: <http://www.ideam.gov.co/capas-geo>. [Último acceso: 25 03 2023].
- [54] IDEAM, «INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE DATOS ABIERTOS DEL IDEAM,» [En línea]. Available: <http://www.ideam.gov.co/capas-geo>. [Último acceso: 25 03 2023].
- [55] N. N. P. O. N. GROUP, «NKE AUTODESK PLATINUM PARTNER,» 13 06 2021. [En línea]. Available: <https://www.nke360.es/autodesk-inventor-que-es-y-ventajas/#:~:text=Inventor%20ofrece%20herramientas%20profesionales%20y,y%20dibujos%20de%20modelos%203D..> [Último acceso: 13 05 2023].
- [56] V. Moyo.Jorge, «ResearchGate,» 03 09 2019. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/publication/335589412_a-fallas-y-metodos-calculo-engranajes-plasticosa. [Último acceso: 05 09 2023].