

Evaluación de Aerogeneradores Tipo Vortex para Bajas Velocidades de Viento

Ricardo José Perea Moreno

Valeria Paola Tapia Martínez

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Mecánico

Escuela De Ingeniería Mecánica

Facultad Físico-Mecánica

Universidad Industrial De Santander

Bucaramanga - Santander

2025

Evaluación de Aerogeneradores Tipo Vortex para Bajas Velocidades de Viento

Ricardo José Perea Moreno

Valeria Paola Tapia Martínez

Estudiantes

Julián Jaramillo

Director de Tesis

Escuela De Ingeniería Mecánica

Facultad Físico-Mecánica

Universidad Industrial De Santander

Bucaramanga - Santander

2025

Tabla de contenido

Lista de Ilustraciones	5
Lista de apéndices.....	8
Introducción.....	9
1. Resumen	10
2. Abstract.....	10
3. Planteamiento del problema	11
3.1. Pregunta de investigación.....	12
4. Objetivos.....	13
4.1. Objetivo General.....	13
4.2. Objetivos Específicos	13
5. Marco de Referencias	14
5.1. Marco Conceptual.....	14
5.2. Marco Teórico	18
5.2.1. Energía eólica.....	18
5.2.2. Tipos de Aerogeneradores	18
5.2.3. Aerogenerador Tipo Vortex.....	19
5.2.4. Configuraciones Geométricas Analizadas.....	22
5.2.5. Modelo de Turbulencia k- ω Estándar	25
5.3. Marco Legal.....	27
5.3.1. Normativas ambientales	27
5.3.2. Normas técnicas	28
5.3.3. Propiedad intelectual	29
5.3.3.1. La Ley 23 de 1982.....	29
5.3.4. Uso de software.....	29
6. Metodología.....	30

6.1.	Suposiciones iniciales.....	30
6.2.	Elaboración del CAD en SolidWorks.....	31
6.3.	Dominio Computacional.....	32
6.4.	Simulación CFD del Modelo CAD (Turbina Vortex) en ANSYS®	33
6.5.	Recomendaciones De La Calidad De Malla ANSYS®.....	36
6.5.1.	Condiciones de frontera.....	42
6.6.	Análisis Estructural (FEA) del Aerogenerador	48
6.6.1.	Geometría del Aerogenerador.....	48
6.6.2.	Selección de las Superficies.....	50
7.	Interpretación de Resultados	52
7.1.	Distribución de Presión De Los Aerogeneradores Generado en el CFD .	53
7.2.	Distribución De Esfuerzos de los Aerogeneradores.....	55
7.3.	Número de Reynolds	58
7.4.	Resultados del Aerogenerador Cilindro Flexible Empotrado.....	59
7.4.1.	Energía Teórica Vs Real.....	63
7.5.	Porcentaje De Error	65
7.6.	Frecuencia de Generación	65
7.7.	Resultados del Aerogenerador Tipo A: Cilindro Rígido Sobre Varilla Flexible.	66
7.8.	Resultados del Aerogenerador tipo B: Cono Truncado sobre Varilla Flexible	68
7.9.	Comparativa de aerogeneradores.....	69
8.	Conclusiones y Recomendaciones.....	72
	Referencias.....	74
	Apéndices.....	76

Lista de Ilustraciones

Ilustración 1: Sólido en Flotación y Sumergido. Fuente: (Mott, 2006).....	15
Ilustración 2: Tipos de Aerogeneradores. Fuente: (García, 2019).....	19
Ilustración 3: Formación de vórtices de Von Kármán. Fuente: (Paéz, 2021).....	21
Ilustración 4: Cilindro empotrado recto. Fuente: Elaboración Propia, 2024.	22
Ilustración 5: Cilindro Rígido Sobre Varilla Flexible. Fuente: Elaboración Propia, 2024.	23
Ilustración 6: Cono Truncado Sobre Varilla Flexible. Fuente: Elaboración Propia, 2024.	24
Ilustración 7: Aerogenerador a analizar. Fuente: Elaboración propia tomado de SolidWorks, 2024.	31
Ilustración 8: Base con Piezoeléctrico. Fuente: Elaboración propia, tomado de <i>SolidWorks</i> , 2024.....	32
Ilustración 9: Dominio Computacional. Fuente: Elaboración propia tomado de ANSYS®, 2025.	33
Ilustración 10: Vista en sección de Dominio Computacional. Fuente: Elaboración propia tomado de ANSYS®, 2025.	33
Ilustración 11: Ícono de Fluent. Fuente: ANSYS®, 2024.....	34
Ilustración 12: Geometría en del CFD ANSYS®. Fuente: ANSYS®, 2024.....	34
Ilustración 13: Zona de Contacto entre el Aerogenerador y el Volumen de Control del análisis CFD. Fuente: Elaboración propia tomado de ANSYS®, 2025	35
Ilustración 14: Mallado para el análisis CFD. Fuente: Elaboración propia tomado de ANSYS®, 2025.	35
Ilustración 15: Recomendaciones de calidad de malla ANSYS®. Fuente: ANSYS®, 2011	36
Ilustración 16: <i>Fluent Launcher en ANSYS</i> . Fuente: <i>Elaboración propia</i>	38
Ilustración 17: Ventana del setup de ANSYS®. Fuente: Elaboración propia, 2024	39
Ilustración 18: Ventana del <i>Setup</i> de ANSYS. Fuente: elaboración propia, ANSYS 2024	40
Ilustración 19: Selección/ Edición del material. fuente: Elaboración propia, 2024.	41

Ilustración 20: Configuraciones del <i>Setup</i> de ANSYS. Fuente: Elaboración propia, 2024.	42
Ilustración 21: Condiciones de frontera: fuente: Elaboración propia tomado de ANSYS, 2025	43
Ilustración 22: Condiciones de velocidad de entrada en el dominio Fuentes: Elaboracion propia, 2025.....	44
Ilustración 23: Condiciones de salida del dominio computacional	45
Ilustración 24: Condiciones de Frontera para las paredes. Fuente: elaboración Propia, 2025	46
Ilustración 25: Configuración de los valores de referencia. Fuente: Elaboración propia, ANSYS 2024	47
Ilustración 26: CFD – <i>Post</i> . Fuente: Elaboración propia, ANSYS 2024.....	48
Ilustración 27: Mallado del aerogenerador para el análisis estructural. Fuente: Elaboración propia, ANSYS 2024.....	49
Ilustración 28: Superficies determinadas que cuentan con una carga. Fuente: Elaboración propia, ANSYS, 2024.....	51
Ilustración 29: Simulación del modelo en ANSYS®. fuente: Elaboración propia tomado de ANSYS, 2025.....	52
Ilustración 30: Distribución de presión para la geometría Cilindro Flexible Empotrado. Fuente: Elaboración propia tomado de ANSYS, 2025.	53
Ilustración 31: Distribución de Presión para la geometría Cilindro Rígido sobre Varilla Flexible. Fuente: Elaboración propia tomado de ANSYS, 2025.....	54
Ilustración 32: Distribución de presión para la geometría Cono Truncado sobre Varilla Flexible. Fuente: Elaboración Propia tomado de ANSYS, 2025.....	55
Ilustración 33: Distribución de esfuerzo para la geometría Cilindro Flexible Empotrado. Fuente: Elaboración propia tomado de ANSYS, 2025.	56
Ilustración 34: Distribución de esfuerzo para la geometría Cilindro Rígido sobre Varilla Flexible. Fuente: Elaboración propia tomado de ANSYS, 2025.....	57
Ilustración 35: Distribución de esfuerzo para la geometría Cono Truncado sobre Varilla Flexible. Fuente: Elaboración Propia tomado de ANSYS, 2025.....	58

Ilustración 36: Cilindro Flexible Empotrado. Fuente: Elaboración propia tomado de ANSYS, 2024.	60
Ilustración 37: La función de la Calculadora. Fuente: tomado de ANSYS, 2024.	60
Ilustración 38: Fuerza Resultante para la Geometría: Cilindro Flexible Empotrado. Fuente: Elaboración Propia, ANSYS, 2025.....	61
Ilustración 39: Forma y área del Piezoeléctrico elegido. Fuente: Elaboración propia, SolidWorks, 2024.	62
Ilustración 40: La función de la Calculadora de ANSYS <i>Fluent</i> . Fuente: Elaboración propia, ANSYS, 2025.	66
Ilustración 41: Fuerza Resultante para la Geometría: Cilindro Rígido sobre Varilla Flexible. Fuente: Elaboración Propia, ANSYS, 2025.	67
Ilustración 42: La función de la Calculadora. Fuente: Elaboración propia, ANSYS, 2025.	68
Ilustración 43: Fuerza Resultante para la Geometría: Cono Truncado sobre Varilla Flexible. Fuente: Elaboración Propia, ANSYS, 2025.	69
Ilustración 44: Gráfica De Potencial Eléctrico Contra Tipos De Aerogenerador. Fuente: Elaboración propia, 2025.....	71

Lista de apéndices

Anexo 1: Variación de velocidad en el eje Z, para el Túnel de Viento sin Aerogeneradores. Elaboración propia tomado de ANSYS®, 2025.....	76
Anexo 2: Vista de conjunto de aerogenerador tipo base. Elaboración propia tomado de SolidWorks 2022.....	77
Anexo 3: Vista de subconjunto A de aerogenerador tipo base. Elaboración propia tomado de SolidWorks 2022.....	77
Anexo 4: Vista de subconjunto B de aerogenerador tipo base. Elaboración propia tomado de SolidWorks 2022.....	78
Anexo 5: Vista del elemento Cubierta del subconjunto B de aerogenerador tipo base. Elaboración propia tomado de SolidWorks 2022.....	78
Anexo 6: Vista del elemento Piezoeléctrico del subconjunto B de aerogenerador tipo base. Elaboración propia tomado de SolidWorks 2022.....	79
Anexo 7: Vista del elemento Cubierta del subconjunto B de aerogenerador tipo base. Elaboración propia tomado de SolidWorks 2022.....	79
Anexo 8: Vista del elemento Soporte interno del subconjunto B de aerogenerador tipo base. Elaboración propia tomado de SolidWorks 2022.....	80
Anexo 9: Vista de conjunto de aerogenerador tipo A. Elaboración propia tomado de SolidWorks 2022.....	80
Anexo 10: Vista general de subconjunto A y B de aerogenerador tipo A. Elaboración propia tomado de SolidWorks 2022.....	81
Anexo 11: Vista detalle de subconjunto A de aerogenerador tipo A. Elaboración propia tomado de SolidWorks 2022.....	81
Anexo 12: Vista detalle de subconjunto A de aerogenerador tipo A. Elaboración propia tomado de SolidWorks 2022.....	82
Anexo 13: Vista de conjunto de aerogenerador tipo B. Elaboración propia tomado de SolidWorks 2022.....	82
Anexo 14: Vista detalle de subconjunto A de aerogenerador tipo B. Elaboración propia tomado de SolidWorks 2022.....	83

Introducción

El sector energético ha experimentado una evolución significativa en las últimas décadas, migrando de un modelo dependiente de combustibles fósiles —asociado a impactos ambientales negativos— hacia fuentes de energía más sostenibles. En este contexto, las energías renovables han cobrado especial relevancia, al permitir el aprovechamiento de recursos naturales como el sol y el viento. En particular, la energía eólica ha despertado un creciente interés a nivel nacional, debido al potencial del recurso eólico en diversas regiones del país.

A partir de ello, existe una gran variedad de dispositivos de captación de energía eólica en la actualidad, estos se diferencian por su accionamiento, entre captación por medio de rotación de eje y accionamiento por vibración. En este último, se logra obtener energía con velocidades de viento más bajas que los equipos accionados por rotación.

Considerando este contexto, y con el propósito de fomentar el uso de fuentes no convencionales de energía, así como de aportar a la integración energética en zonas sin sistema eléctrico convencional -en concordancia con los con los lineamientos de eficiencia energética establecidos en la Ley 1715 de 2024-, el presente proyecto tiene como objetivo analizar la viabilidad de la tecnología Vortex Bladeless, evaluando su capacidad de generación energética bajo condiciones de viento constante a una velocidad de 4 m/s

1. Resumen

Título: Evaluación de Aerogeneradores Tipo Vortex para Bajas Velocidades

Autor: Valeria Paola Tapia Martínez, Ricardo José Perea Moreno

Palabras Clave: Aerogenerador, Esfuerzos, ANSYS, Potencial Eléctrico

El objetivo de este trabajo es evaluar la viabilidad de los aerogeneradores tipo Vortex Bladeless en condiciones de viento constante de 4 m/s. Se analizaron tres configuraciones geométricas: cilindro flexible empotrado, cilindro rígido sobre varilla flexible y cono truncado sobre varilla flexible, utilizando modelado CAD en SolidWorks y simulaciones CFD y FEA en ANSYS. Los resultados mostraron que el modelo de cono truncado sobre varilla flexible presentó el mejor rendimiento energético debido a una mayor amplitud de oscilación y generación de fuerza par, lo que mejora el potencial eléctrico del sistema piezoeléctrico en la base. Se concluye que esta tecnología representa una alternativa eficiente y sostenible para generación distribuida en zonas rurales o no interconectadas, especialmente en regiones colombianas con baja velocidad de viento.

2. Abstract

Title: Evaluation of Vortex-Type Wind Turbines for Low Wind Speeds

Author: Valeria Paola Tapia Martínez, Ricardo José Perea Moreno

Key Words: Wind Turbine, Forces, ANSYS, Electrical Potential

The objective of this work is to evaluate the viability of Vortex Bladeless wind turbines under constant wind conditions of 4 m/s. Three geometric configurations were analyzed: embedded flexible cylinder, rigid cylinder on flexible rod, and truncated cone on flexible rod, using CAD modeling in SolidWorks and CFD and FEA simulations in ANSYS. The results showed that the truncated cone on flexible rod model presented the best energy efficiency due to a greater oscillation amplitude and torque generation, which improves the electrical potential of the piezoelectric system at the base. It is concluded that this technology represents an efficient and sustainable alternative for distributed generation in rural or non-interconnected areas, especially in Colombian regions with low wind speeds.

3. Planteamiento del problema

La energía eólica ha emergido como una fuente fundamental de energía renovable a nivel mundial, con una capacidad instalada que supera los 700 gigavatios en 2021 (Global Wind Energy Council, 2022). Aunque esta tecnología ha avanzado significativamente, los aerogeneradores convencionales presentan desafíos asociados, como el impacto ambiental en aves migratorias, la necesidad de grandes áreas de instalación, contaminación visual y acústica, y los altos costos de mantenimiento.

Actualmente en Colombia, el 21 de enero de 2022 se inauguró el parque eólico Guajira I, construido por ISAGEN en el corregimiento del Cabo de la Vela, en el municipio de Uribia, La Guajira. Este parque cuenta con 10 aerogeneradores en un área de 5,5 hectáreas, con una capacidad de 200 megavatios (MW), suficiente para abastecer a 33.295 familias colombianas. (Forbes Staff, 2022). Este tipo de tecnología es viable en zonas costeras con vientos constantes y de alta velocidad, como en el caso de La Guajira. Sin embargo, en regiones montañosas y accidentadas de Colombia, la variabilidad y las bajas velocidades del viento limitan la implementación de turbinas convencionales.

Para superar estas limitaciones, tecnologías innovadoras como **Vortex Bladeless** ofrecen una alternativa prometedora. Este tipo de aerogenerador aprovecha la resonancia Aero elástica inducida por vórtices, generada cuando el viento pasa alrededor de una estructura. Según Vortex Bladeless (2018):

Quando el viento pasa alrededor de una estructura, se crean vórtices de presión. (...) La frecuencia de aparición de los vórtices depende de la velocidad del viento, y si la estructura tiene una frecuencia natural similar, esta empieza a oscilar y absorber energía por efecto de resonancia. Este fenómeno se conoce como calle de vórtices y ocurre habitualmente en la naturaleza.

Esta tecnología presenta una ventaja significativa frente a las turbinas eólicas convencionales: su capacidad para operar de manera eficiente a velocidades de viento considerablemente más bajas. Mientras que las turbinas tradicionales requieren velocidades promedio superiores a 6 m/s para generar energía de forma efectiva, los aerogeneradores tipo Vortex pueden comenzar a funcionar en rangos de 2 a 4 m/s, gracias a su aprovechamiento

del fenómeno de resonancia inducida por vórtices. Esta característica los hace especialmente adecuados para regiones como Bucaramanga y otras zonas del interior de Colombia, donde las velocidades de viento promedio se encuentran por debajo del umbral operativo de los sistemas rotacionales. Por esta razón, el presente proyecto evalúa el comportamiento de esta tecnología bajo una velocidad de viento constante de 4 m/s, con el fin de determinar su viabilidad como alternativa para generación distribuida en contextos rurales o no interconectados.

Asimismo, se han desarrollado investigaciones complementarias como el proyecto “*Design and Construction of Art Shaped and Disc Pendulum for Vortex Bladeless Wind Generator*” (Salvador, y otros, 2017), que evalúa distintas formas geométricas de péndulos en aerogeneradores Vortex. Este estudio concluye que configuraciones como la figura cónica mejoran el rendimiento debido al aumento del área de contacto electromagnético.

En este contexto, el presente proyecto propone analizar tres configuraciones geométricas de aerogeneradores Vortex: **un cilindro flexible, cilindro rígido sobre varilla flexible o cono truncado sobre varilla flexible**. Estas configuraciones se evaluarán bajo condiciones de velocidad de viento constantes de $4 \frac{m}{s}$, con el objetivo de determinar cuál maximiza la capacidad de generación de energía mediante el cálculo de la fuerza par resultante generada por el viento. El diseño incluirá un mecanismo de pivote en la base para mantener la base en oscilación y que no se active el piezoeléctrico por solo el peso del aerogenerador.

3.1. Pregunta de investigación

¿Cuál configuración geométrica de aerogenerador tipo Vortex (cilindro empotrado recto, cilindro con viga recto y cilindro con viga cónico) maximiza la generación de energía con velocidad constante de viento de $4 \frac{m}{s}$?

4. Objetivos

4.1. Objetivo General

Evaluar la capacidad de generación y la eficacia de los aerogeneradores tipo Vortex operando en condiciones de velocidades bajas de viento $\left(4 \frac{m}{s}\right)$.

4.2. Objetivos Específicos

- Dimensionar tres configuraciones de aerogeneradores tipo Vortex (Cilindro Flexible, Cilindro Rígido Sobre Varilla Flexible O Cono Truncado Sobre Varilla Flexible) de fibra de carbono para funcionar en velocidades del viento de 4 m/s.
- Determinar la distribución de esfuerzos que genera el viento sobre los aerogeneradores por medio de una simulación computacional empleando el modelo de turbulencia $k-\omega$ estándar.
- Seleccionar cuál de los tres aerogeneradores tipo Vortex analizados genera un mayor potencial eléctrico.

5. Marco de Referencias

5.1. Marco Conceptual

En este marco se presentan los conceptos fundamentales que sustentan el desarrollo de este proyecto; se abordan palabras claves como: dinámica de fluidos, fuerzas generadas por el viento, generación de energía, análisis computacional, entre otros para la mejor comprensión del estudio.

Aerogenerador: Sistema que capta una parte de la energía eólica (Del viento) para transformarla en energía cinética. Generalmente tiene asociado un sistema para convertirla en diferencial potencial (Voltaje).

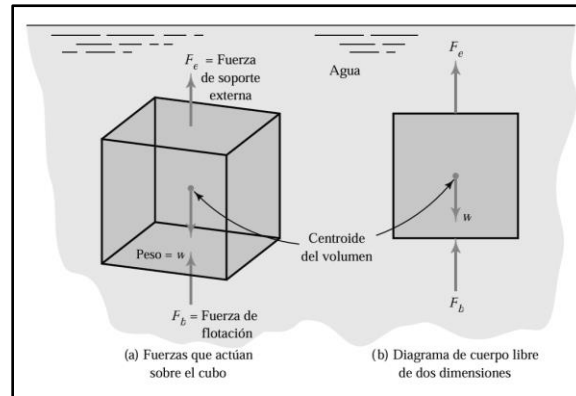
Superficies sumergidas: Cuando un objeto se encuentra rodeado por un fluido, ya sea en su totalidad o de manera parcial, En el caso de los fluidos incompresibles como el agua la presión depende de la altura a la que encuentre el objeto, para gases como el aire se distribuye uniformemente por la superficie.

Centro de presiones: Sobre este punto se pueden ubicar todas las presiones que experimenta un sólido en forma de vector, como las generadas por una corriente de viento sobre una superficie. En ocasiones coincide con el centroide o centro geométrico de un objeto

Área proyectada: Figura o contorno proyectado en forma de plano, en una superficie sumergida se encuentra perpendicular en la dirección del fluido y sometida a las fuerzas del flujo.

Fuerzas sobre superficies sumergidas: Las fuerzas que experimenta un sólido en el momento de entrar totalmente en un fluido, en la figura se presentan las principales.

Ilustración 1: Sólido en Flotación y Sumergido. Fuente: (Mott, 2006)



La **Ilustración 1** muestra el **Diagrama de Cuerpo Libre** de un cuerpo sumergido, donde se representan las principales fuerzas que actúan sobre él, como la **fuerza de flotación**, el **peso**, ubicado en el centroide del volumen, y la **fuerza de soporte externa**.

En el contexto del proyecto, se hace énfasis en la **fuerza de sustentación** obtenida a partir del análisis CFD. Posteriormente, dicha fuerza se modela como una carga puntual para llevar a cabo el análisis FEA, con el objetivo de calcular la **fuerza de reacción** que actúa sobre el material piezoeléctrico.

Energía: Capacidad de la materia para producir trabajo, luz y calor.

Eólica: La energía proveniente del movimiento del viento.

Piezoeléctrica: La energía eléctrica generada por el cambio de presión sobre una de las superficies de un material piezoeléctrico; traduciendo la tensión mecánica en voltaje.

Según Martínez (2021), en materiales con composición isotrópica, como por ejemplo cristales naturales, se manifiesta el efecto piezoeléctrico sobre estructuras policristalinas, en las cuales existen múltiples regiones con ejes polares independientes. Debido a esta característica, las variaciones en la tensión mecánica interna —provenientes de distintas direcciones— inducen la generación de carga eléctrica.

Mecánica: La energía empleada por un objeto para realizar un trabajo a través de una distancia determinada.

Cinética: Relacionada con el movimiento del objeto.

Potencial: Relativa a la altura a la cual se ubica el objeto.

Elástica: Acumulada dentro del objeto.

Eléctrica: Transformación de una energía en electricidad.

Modelos de turbulencia: Representaciones matemática del comportamiento de un fluido en régimen turbulento. Pueden ser empleados por un software de simulación computacional para realizar simulaciones.

Capa límite: Zona donde se presenta la perturbación del fluido por acción del sólido que obstruye su paso, en este punto la velocidad del fluido varía desde cero hasta llegar casi a la velocidad de corriente no perturbada.

Método de Elementos Finitos: Es un método numérico empleado para la resolución de ecuaciones diferenciales aproximadas por ordenador, donde se define un número de elementos determinado para simplificar el sistema, teniendo un porcentaje de error aceptable al compararlo con el sistema real.

ANSYS: Software utilizado para realizar estudios CFD (*Computational Fluid Dynamics*) y FEA (*Finit Element Analysis*), empleado en diferentes ramas de la ingeniería, que utiliza el método de elementos finitos como una forma de solución de problemas.

Mallado del modelo de estudio: La malla es el conjunto de elementos computacionales y nodos que representan el sólido de estudio.

Viga de Euler-Bernoulli: Es el método de análisis estático de un elemento longitudinal al cual se le aplica una carga puntual en uno de sus extremos, generando sobre él una flexión sin llegar a deformarse.

Par equivalente: Es un conjunto de dos elementos con una relación específica. Dos pares son equivalentes cuando sus efectos sobre un cuerpo rígido son los mismos. Este principio se emplea en el análisis estático de cuerpos rígidos.

Esfuerzos de Von Mises: Magnitud escalar de la energía de distorsión, que mide la capacidad interna que posee el material para realizar una transformación reversible o irreversible.

Aerogenerador tipo Vortex: Tipo de aerogenerador de eje vertical que generan energía mediante la oscilación que ocurre cuando la estructura del dispositivo tiene la misma frecuencia natural que la del viento.

Potencial eléctrico: Es la cantidad de energía eléctrica que tiene una carga en un punto del espacio debido a un campo eléctrico. Se mide en Voltios (V) y representa el trabajo necesario para mover una carga unitaria desde un punto de referencia, sin acelerarla.

Viscosidad turbulenta (μ): Es un concepto utilizado en la modelación de flujos turbulentos para representar el efecto de los remolinos y estructuras de turbulencia sobre el transporte de cantidad de movimiento.

5.2. Marco Teórico

5.2.1. *Energía eólica*

La **energía eólica** es una fuente de energía renovable que aprovecha la fuerza del viento para generar electricidad. Su funcionamiento consiste en el uso de aerogeneradores, dispositivos que captan la energía cinética del viento a través de aspas que giran al ser impulsadas por la fuerza del viento. Este movimiento rotatorio es transformado en energía mecánica por medio de un rotor y finalmente, es transformado en electricidad a través de un generador. Existen dos tipos principales de energía eólica: la **eólica terrestre**, que se produce en parques eólicos instalados en tierra firme, y la **eólica marina**, donde las turbinas se colocan en áreas costeras o en alta mar, aprovechando vientos más fuertes y constantes.

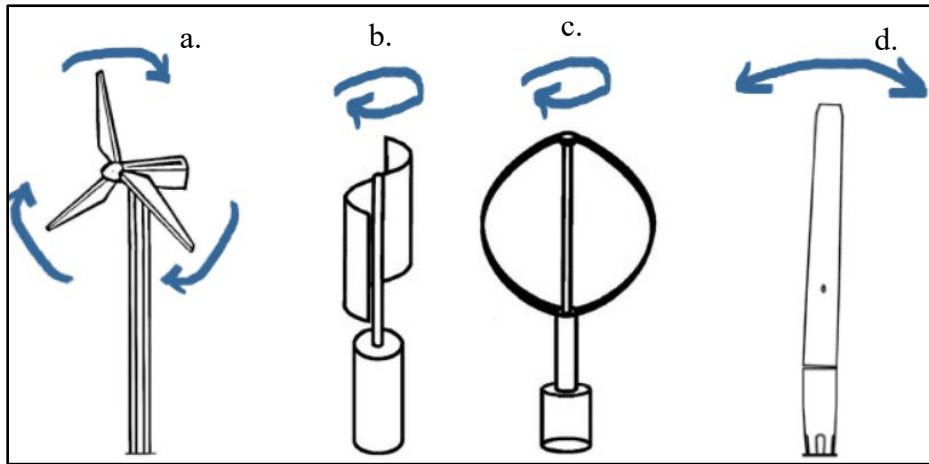
5.2.2. *Tipos de Aerogeneradores*

Un aerogenerador se define como una máquina capaz de aprovechar y transformar la energía del viento en potencial eléctrico, su principal clasificación se debe a la orientación del eje rotor, en ese sentido se pueden encontrar turbinas eólicas de eje vertical y de eje horizontal, siendo las más utilizadas por su alta eficiencia en la generación de energía. Actualmente, podemos encontrar aerogeneradores giratorios y no giratorios, estos últimos no utilizan un elemento giratorio como un rotor o hélice, sino que utilizan el principio del fenómeno vibratorio inducido por el flujo de viento para obtener un movimiento oscilante y a través de láminas de material piezoeléctrico producir electricidad.

Las turbinas eólicas de baja potencia son una buena opción para la implementación de nuevas alternativas de energía renovable para las casas, parques e instalaciones que no necesiten tanta potencia, puede que el índice no sea alto, pero ayuda bajar la dependencia de la energía en base a los hidrocarburos.

Actualmente existen dos familias principales en lo que respecta a dispositivos energéticos de producción eólica: HAWT (turbinas de eje horizontal) y VAWT (turbinas de eje vertical). Este proyecto se basa en la utilización de un tercer tipo recientemente añadido y patentado por la empresa “Vortex Bladeless S.L.” denominado turbinas Vortex (turbinas eólicas de oscilación). (García, 2019).

Ilustración 2: Tipos de Aerogeneradores. Fuente: (García, 2019).



La **Ilustración 2** presenta cuatro tipos de aerogeneradores con distintos principios de captación de energía eólica: **(a)** de eje horizontal, el diseño convencional con hélices; **(b)** de eje vertical tipo Darrieus, que aprovecha la sustentación aerodinámica; **(c)** de eje vertical tipo Savonius, basado en la fuerza de arrastre y eficiente a bajas velocidades; y **(d)** tipo Vortex Bladeless, que oscila por resonancia aeroelástica y genera electricidad mediante sistemas piezoeléctricos o electromagnéticos.

Las turbinas de eje horizontal están compuestas por aspas, un eje de rotación y un generador, con todos los componentes situados en la parte superior del poste, orientando las aspas hacia el viento. El eje tiene un engranaje en su extremo que acciona el generador, y algunas turbinas, también incluyen frenos para detenerlas en caso de vientos fuertes.

Sin embargo, las turbinas de eje vertical tienen el eje y las aspas alineados verticalmente con la estructura. Una de las ventajas es que el centro de gravedad es más estable debido a que los componentes se encuentran más cerca del suelo.

5.2.3. Aerogenerador Tipo Vortex

Los aerogeneradores no giratorios se componen básicamente de un cuerpo de farol, el cual puede ser de perfil circular, cuadrado o prismático; lo innovador del funcionamiento de este tipo de máquinas radica en la forma de producir energía por medio de varillas o placas de material piezoeléctrico, el cual tiene la propiedad de generar potencial eléctrico gracias a

la deformación mecánica producida por el movimiento inducido por el flujo del entorno. (Paéz, 2021).

Los generadores Vortex no pertenecen a ninguna de estas dos categorías, debido a no poseen un eje sobre el cual se produzca rotación. Estos aerogeneradores se basan en un fenómeno conocido como desprendimiento de vórtices o "Vortex Shedding". Estos generadores sin aspas (Bladeless) convierten la energía eólica en electricidad mediante la oscilación que ocurre cuando la estructura del dispositivo alcanza la misma frecuencia de resonancia que los vórtices de viento creados por la perturbación que la propia turbina genera en el viento. Este fenómeno, conocido en dinámica de fluidos como "Vortex Induced Vibrations" (VIV), es la base de su funcionamiento. Cabe destacar que la información utilizada en este estudio sobre el dispositivo Vortex se basa en estimaciones del prototipo y en las expectativas de la empresa, por lo que esta tecnología aún no está completamente desarrollada.

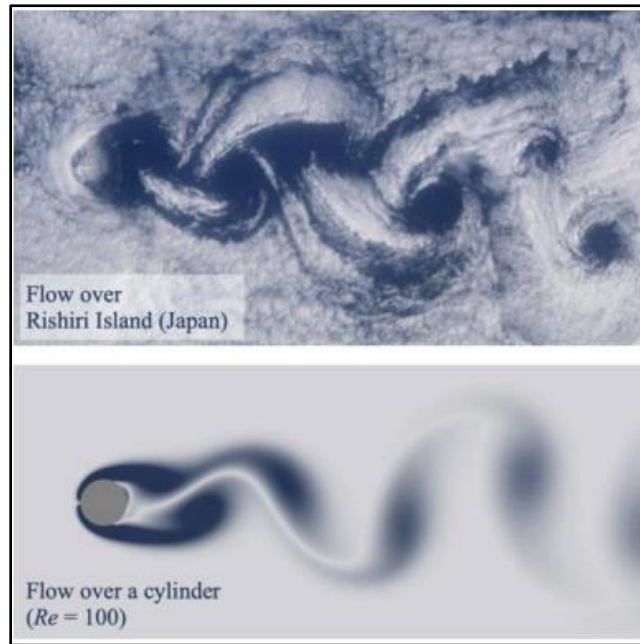
Cada tipo de generador responde de manera diferente según las características del viento. La velocidad de inicio (punto de cut-in) promedio para las turbinas HAWT es de aproximadamente 4 m/s, mientras que para las turbinas VAWT este valor sube a 4,5 m/s. En el caso de las turbinas Vortex, el punto de cut-in se encuentra entre 3 y 3,5 m/s, debido a que esta velocidad del viento cuando las turbinas logran sincronizarse con el desprendimiento de vórtices. (García, 2019).

5.2.3.1. Fenómeno de Vibración Inducida por Vórtices VIV

El fenómeno de vibración inducida por vórtices se presenta en un obstáculo cuando un flujo que choca con él, generando un efecto en el fluido, el cual se conoce como vórtices de Von Kármán [**Ilustración 3**]. Estos hacen que el objeto comience a oscilar debido a las diferentes corrientes de cada torbellino, los cuales generan una diferencia de presión y, esta se compensa por el cuerpo con un movimiento opuesto al desprendimiento de cada vórtice.

Cuando los ingenieros diseñan edificios, intentan que este fenómeno no esté presente, debido a que afecta negativamente a la estructura, en especial, porque la vibración puede ocasionar el colapso de esta. Sin embargo, para el diseño de aerogeneradores no giratorios, se quiere que la vibración inducida sea lo más alta posible para obtener la mayor cantidad de energía producida por el movimiento. (Paéz, 2021).

Ilustración 3: Formación de vórtices de Von Kármán. Fuente: (Paéz, 2021).



La **Ilustración 3** muestra dos ejemplos del fenómeno de calle de vórtices de Von Kármán, una estructura de vórtices generados cuando un flujo incide sobre un obstáculo. Este hecho es relevante para el diseño de estructuras sumergidas flujos, como puentes, edificios y, para nuestro proyecto de los aerogeneradores tipo Vortex Bladeless.

El fenómeno de **VIV** es un tipo de **interacción fluido-estructura (FSI)** en el cual un flujo de fluido, como el aire, interactúa con un sólido, generando una serie de vórtices a medida que el fluido rodea el objeto. Estos vórtices aplican fuerzas periódicas sobre la estructura, que a su vez genera vibraciones. La intensidad y frecuencia de estas vibraciones dependen de parámetros como el número de Reynolds y el número de Strouhal, que caracterizan la naturaleza del flujo y las dimensiones del objeto.

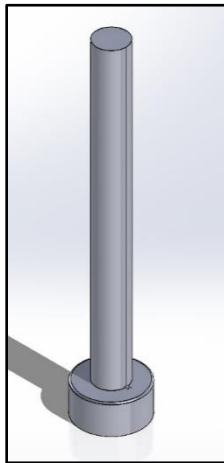
En condiciones de **baja velocidad de viento**, el reto consiste en diseñar una estructura que maximice las vibraciones y, por tanto, la energía generada. La optimización geométrica juega un papel crucial, ya que diferentes configuraciones pueden variar la eficiencia con la que se capturan las fuerzas aerodinámicas y se transforman en energía eléctrica.

5.2.4. *Configuraciones Geométricas Analizadas*

En este proyecto se evaluarán tres configuraciones geométricas para los aerogeneradores tipo Vortex, cada una diseñada para maximizar la captación de energía mediante resonancia Aero elástica bajo condiciones de baja velocidad de viento (4 m/s). La primera configuración es un **cilindro flexible empotrado**, posterior a este se evaluaron el **cilindro rígido sobre varilla flexible** y el **cono truncado sobre varilla flexible**. Estas geometrías serán comparadas para determinar cuál maximiza la generación de energía bajo las condiciones planteadas.

5.2.4.1. **Cilindro Flexible Empotrado.**

Ilustración 4: Cilindro empotrado recto. Fuente: Elaboración Propia, 2024.

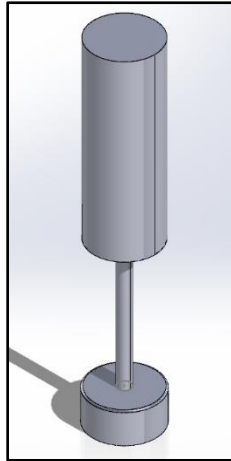


La **Ilustración 4** presenta la configuración básica de un cilindro vertical fijado en su base. Este diseño, el más simple desde el punto de vista estructural, permite analizar el comportamiento fundamental de las Vibraciones Inducidas por Vórtices (VIV).

La simplicidad de esta geometría facilita su estudio. Por otro lado, la rigidez del cilindro empotrado puede limitar su capacidad de oscilación, reduciendo así la amplitud de las vibraciones y, en consecuencia, el momento generado en el piezoeléctrico, lo que podría afectar la eficiencia en la conversión de energía.

5.2.4.2. Cilindro Rígido Sobre Varilla Flexible

Ilustración 5: Cilindro Rígido Sobre Varilla Flexible. Fuente: Elaboración Propia, 2024.



En la **Ilustración 5** se muestra la configuración consta de un cilindro conectado a una varilla flexible, lo que añade un grado adicional de libertad y flexibilidad a la estructura.

Esta flexibilidad permite mayores amplitudes de oscilación, mejorando potencialmente la captación de energía. La rigidez y elasticidad de la viga influyen directamente en el momento generado en el piezoeléctrico, optimizando el desempeño del aerogenerador al aprovechar de manera más eficiente las fuerzas inducidas por el viento.

5.2.4.3. Cono Truncado Sobre Varilla Flexible.

Ilustración 6: Cono Truncado Sobre Varilla Flexible. Fuente: Elaboración Propia, 2024.

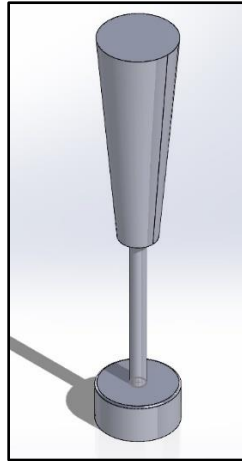


Ilustración 6 en esta configuración, el cilindro posee una geometría cónica, con un diámetro variable a lo largo de su longitud. Esta variación influye en la dinámica de las vibraciones inducidas por vórtices, porque el desprendimiento de estos cambia a lo largo de la superficie del cilindro

El diseño cónico ofrece una mayor adaptabilidad a diferentes condiciones de viento, favoreciendo una distribución más uniforme de las fuerzas aerodinámicas. Además, esta geometría puede optimizar el momento generado en el piezoeléctrico al modular las frecuencias naturales de la estructura, mejorando su desempeño en condiciones de baja velocidad del viento.

5.2.5. Modelo de Turbulencia $k-\omega$ Estándar

Las simulaciones computacionales, tienen la capacidad de recrear condiciones atmosféricas y diseños estructurales para evaluar la reacción entre estos. En el software de ANSYS Fluent, este proceso se puede realizar empleando uno de los modelos de turbulencia disponibles, dependiendo de la exactitud del estudio, método de cálculo de turbulencia entre otros factores. por los alcances del presente estudio y la disponibilidad computacional, se escogió el modelo $k - \omega$ Estándar.

“El Modelo $k-\omega$ estándar, propuesto por Wilcox, es un modelo empírico basado en una ecuación de transporte para energía cinética (k) y una tasa de disipación (ω) obtenido las ecuaciones gobernantes, las cuales se han ido modificando en la versión más nueva del modelo (Wilcox 2006).” (ANSYS 2021.).

El modelo matemático escogido para realizar esta simulación es el $k-\omega$ estándar, debido a que este modelo de transporte ofrece una mayor facilidad de uso en problemas enfocados en el análisis de deformaciones sin tener en cuenta el cambio de temperatura. Este modelo se basa principalmente en dos ecuaciones de transporte y luego se desglosan los términos relacionados como se expone a continuación:

5.2.5.1. Ecuaciones de transporte

Energía cinética de turbulencia k

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D_{effk} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k + G_b^1 \quad (1)$$

Tasa de disipación específica ω

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D_{eff\omega} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + S_\omega + G_{\omega b}^2 \quad (2)$$

Donde:

¹ Ecuación energía cinética de turbulencia k (ANSYS, Inc., 2021)

² Ecuación Tasa de disipación específica ω (ANSYS, Inc., 2021)

- G_k : Generación de energía cinética de turbulencia debido a la velocidad.
- G_ω : Generación de tasa de disipación específica de turbulencia debido a la velocidad.
- D_{effk} : Difusión efectiva de k .
- $D_{eff\omega}$: Difusión efectiva de ω .
- Y_k : Disipación por turbulencia debida a k .
- Y_ω : Disipación por turbulencia debida a ω .
- S_k y S_ω son valores definidos por el usuario.
- G_b : Generación de turbulencia debido a la flotabilidad.

5.3. Marco Legal

5.3.1. Normativas ambientales

Regulaciones relacionadas con la evaluación, mitigación del impacto ambiental y manejo responsable de recursos ambientales en el territorio nacional.

5.3.1.1. Ley 99 de 1993

Establece el marco general de protección ambiental en Colombia, resaltando el uso racional de los recursos naturales, procurando la protección de la biodiversidad en ecosistemas claves como paramos, nacimientos de agua y zonas de recarga acuíferos. Establece también el deber de la preservación ambiental por parte conjunta entre el estado, la comunidad y las organizaciones no gubernamentales, descentralizando la gestión ambiental a un solo organismo (Ambiente, 1993)

5.3.1.2. La Resolución 075 de 2011 de la CREG (Comisión de Regulación de Energía y Gas)

Reconoce una variación en la producción de energía eólica debido a su dependencia con la disponibilidad del recurso viento, razón por la cual se resalta la necesidad de un estudio detallado para garantizar la confiabilidad del suministro. Evalúa el porcentaje de tiempo de operación a capacidad máxima de las turbinas eólicas. Expone estudios de casos internacionales de implementación en sistemas eléctricos y casos locales de plantas eólicas como Jepírachi en La Guajira. En el apartado regulatorio, propone un esquema de cargo por confiabilidad para competir en igualdad de condiciones con otras fuentes de energía. (CREG, 2011)

5.3.1.3. Regulaciones energéticas

Leyes y políticas que promuevan el uso de energías renovables, requisitos técnicos, y objetivos de sostenibilidad.

5.3.1.4. La Ley 1715 de 2014

Promueve el desarrollo y uso de fuentes no convencionales de energía renovable como la energía solar, eólica, geotérmica y biomasa. Establece mecanismos para el uso eficiente de la energía renovable con el objetivo de reducir emisiones de los gases de efecto invernadero, facilitando la integración en áreas donde no hay acceso al

sistema eléctrico regular. Adicionalmente, Define incentivos fiscales y financieros para proyectos relacionados con energías renovables. (republica, 2014)

5.3.1.5. La Ley 697 de 2001

Esta ley fomenta el uso racional y eficiente de la energía, con el objetivo de garantizar el abastecimiento energético sostenible, protegiendo al consumidor y apoyando a una competitividad económica en el país. promueve el aprovechamiento óptimo de la energía en las etapas de producción, transformación, transporte, distribución y consumo. Plantea un enfoque en el desarrollo sostenible, para garantizar un equilibrio entre crecimiento económico, calidad de vida y protección de los recursos naturales para futuras generaciones. Establece el deber estatal de crear condiciones legales, económicas y técnicas necesarias para implementar proyectos de uso energético responsable. (ciencias, 2001)

5.3.1.6. Las normas de la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME)

Abarcan aspectos técnicos, económicos, sociales y ambientales para el sector minero-energético en Colombia, con el objetivo de garantizar un uso eficiente y sostenible de los recursos energéticos y mineros del país. Con esto en mente, genera estudios y datos técnicos que sirven como base para la formulación de políticas públicas y la toma de decisiones en el sector. También emite resoluciones y guías técnicas que regulan aspectos como la expansión de la infraestructura eléctrica, la viabilidad de proyectos energéticos y la integración de energías renovables. (UPME, 2021)

5.3.2. Normas técnicas

Referencias a estándares internacionales que garanticen la calidad y seguridad de las simulaciones.

Estándares internacionales como la norma IEC 61400, es un estándar internacional que establece los requisitos técnicos para el diseño, fabricación, instalación, operación y mantenimiento de aerogeneradores. Su objetivo principal es garantizar la seguridad, eficiencia y confiabilidad de los sistemas de generación de energía eólica. Establece las especificaciones para los componentes mecánicos, eléctricos y estructurales de los aerogeneradores, parámetros para operar en diferentes entornos considerando factores como la velocidad del viento, la turbulencia y las condiciones

externas y tipos de aerogeneradores según las características del lugar de instalación. Proporciona directrices para realizar pruebas de rendimiento y seguridad, asegurando que los aerogeneradores cumplan con los estándares internacionales, la vida útil y el correcto funcionamiento de los equipos. Estos lineamientos deben ser adaptados a las condiciones locales. (AEE, 2020)

5.3.3. *Propiedad intelectual*

Condiciones legales relacionadas con el uso de programas de simulación, licencias y derechos de autor.

5.3.3.1. **La Ley 23 de 1982**

Regula los derechos de autor y protege las obras científicas, así como los derechos de las interpretaciones y producciones relacionadas. Reconoce al autor el derecho de mención como creador de su obra y de proteger su integridad. Establece medidas legales contra la reproducción o uso no autorizado de obras protegidas. (República, 1982)

5.3.4. *Uso de software*

La licencia SolidWorks *Student* 2022 está diseñada para el uso académico para estudiantes y profesores, ofrece acceso a herramientas de diseño y simulación en 3D. La licencia del software tiene las siguientes limitaciones: No puede ser utilizada para fines comerciales o profesionales. No se permite compartir, copiar o distribuir el software sin autorización. Esta licencia es válida por un período limitado. (SolidWorks Corporation, 2025)

La licencia ANSYS *Student* 2024 R1 está diseñada para estudiantes y ofrece acceso gratuito a herramientas de simulación basadas en ANSYS Workbench. La licencia es solo para fines educativos, como autoaprendizaje, proyectos estudiantiles y demostraciones académicas. No se permite su uso comercial. La licencia es válida por un período específico y debe renovarse para continuar su uso. (ANSYS, 2025)

6. Metodología

La metodología utilizada en este estudio está diseñada para evaluar la capacidad de generación de las tres geometrías de aerogenerador tipo Vortex en condición de baja velocidad de viento. Para ello, se desarrolló un enfoque basado en simulaciones computacionales, combinando el análisis de dinámica de fluidos computacional (CFD) y análisis de elementos finitos (FEM). Inicialmente, se determinan las cargas aerodinámicas inducidas por el flujo de aire a $4 \frac{m}{s}$, las cuales se transfieren al modelo estructural para evaluar la respuesta mecánica del sistema y la generación de energía mediante el piezoeléctrico ubicado en la base. A lo largo de esta sección, se detallan las herramientas, suposiciones iniciales, condiciones de frontera y procedimientos utilizados para la implementación del estudio.

En este proyecto, se emplea una metodología basada en la determinación del **centro de presiones**, el cual depende directamente de la geometría del aerogenerador. A partir de esta ubicación, se calculan las fuerzas aerodinámicas inducidas por el flujo de viento, lo que permite determinar la magnitud y dirección de la fuerza de arrastre y la fuerza de sustentación. Finalmente, se evalúa el momento generado alrededor del punto de oscilación del sistema, considerando la interacción entre las características geométricas y las propiedades del flujo. Este enfoque teórico establece la base para desarrollar simulaciones precisas y diseñar aerogeneradores optimizados para condiciones de baja velocidad del viento.

6.1. Suposiciones iniciales

Inicialmente, se diseñó un modelo básico inspirado en los estudios realizados en (Aerogeneradores resonantes por VIV, 2018), en donde se tienen los parámetros dimensionales utilizados por la empresa Vortex Bladeless de forma experimental, en este documento, se proporcionan dimensiones de toda la turbina, valores de velocidad de viento, así como un sistema de captación de movimiento.

Para la ubicación del aerogenerador en el dominio computacional, primero se ubica una línea a lo largo de la profundidad del dominio computacional (38 m), a una altura de 2,2 m respecto a la base. Al obtener la gráfica, se observa que a una distancia de 15 m la

velocidad llega a un pico estable de 4,29 m/s en el túnel de viento antes de decrecer hasta los 4 m/s. Por motivos de tener resultados más acercados a la realidad, se considerará esta distancia de estabilización de la velocidad para ubicar el aerogenerador. Además, se tiene en cuenta que, durante un proceso de simulación de fluido computacional, los resultados al momento de tener un cuerpo que obstruye el flujo, los valores de velocidad obtenidos a lo largo del dominio serán diferentes. **Nota: Este estudio se hizo previo a la investigación, como una caracterización del túnel de viento; para más información ver anexo 1.**

Con base, en el **Anexo 1**, se ubicaron los aerogeneradores a analizar a 15 m de profundidad, debido a que se consigue una velocidad estable $4,29 \frac{m}{s}$ para hacer las comparaciones de las geometrías planteadas bajo las mismas condiciones de viento.

Ilustración 7: Aerogenerador a analizar. Fuente: Elaboración propia tomado de SolidWorks, 2024.

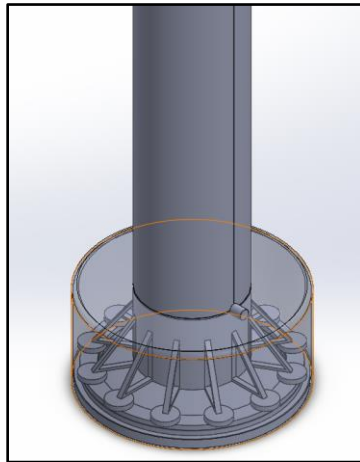


La **Ilustración 7**, presenta una vista general del aerogenerador básico con configuración de Cilindro Flexible Empotrado, el cual sirve como referencia principal para el estudio. A partir de esta geometría se aplican los principios de las turbinas Vortex Bladeless, permitiendo luego, la modificación de sus características geométricas para analizar y comparar el desempeño de las diferentes configuraciones planteadas en el marco teórico.

6.2. Elaboración del CAD en SolidWorks

En el proceso de simulación del modelo propuesto inicialmente, se utilizó el programa de SolidWorks 2022, un software CAD *Computer Asisted Design* que permitió la realización del modelado del aerogenerador y del dominio utilizado en el análisis.

Ilustración 8: Base con Piezoeléctrico. Fuente: Elaboración propia, tomado de *SolidWorks*, 2024



En la **Ilustración 8**, se muestra la distribución de los soportes diseñados para evitar que el peso de la estructura active los piezoeléctricos de manera no deseada. Estos soportes permiten aislar la respuesta del sistema a las fuerzas inducidas por el viento; además de simplificar el modelo y optimizar el análisis del comportamiento estructural.

Las dimensiones del modelo propuesto son de 0.2 m de diámetro del mástil, 2 m de largo en su sección móvil, 250 mm de largo ubicado en la base y un soporte de 0.2 m de largo con diámetro externo de 0.4 m para una mayor estabilidad y a su vez, contener el sistema piezoeléctrico.

Dentro de la base se encuentran 12 estructuras triangulares, ajustadas al cilindro de los aerogeneradores, con discos esféricos de 50 mm de diámetro y 10 mm de alto, que cumplen la función de presionar el aro piezoeléctrico del mismo espesor y un diámetro de 380 mm, ubicado por debajo de los discos; todo esto con la función de recibir el momento par de reacción generado por la acción del viento.

6.3. Dominio Computacional

Las dimensiones del dominio propuesto son de 38 m de profundidad, 2 m de ancho y 2.5 m de alto. El tamaño escogido fue el resultado de tomar en cuenta las restricciones computacionales del equipo y la distancia máxima de restablecimiento del flujo, de tal

manera que se pudiera evidenciar claramente en vista superior y lateral las zonas de vorticidad y la normalización del flujo de viento.

Así mismo, la zona de dominio computacional de mayor tamaño no modifica los resultados de la simulación. Por lo tanto, estas dimensiones se escogen de manera que se pueda realizar un análisis visual más evidente, no siendo necesario un mayor dominio que resultaría en gastos computacionales innecesarios. El ancho es igual al largo de la turbina, el alto tiene un aumento del 25% respecto de la altura máxima y la profundidad es 15 veces la longitud, estimando que, a lo largo de esta distancia el flujo de viento normalice su velocidad inicial.

Ilustración 9: Dominio Computacional. Fuente: Elaboración propia tomado de ANSYS®, 2025.

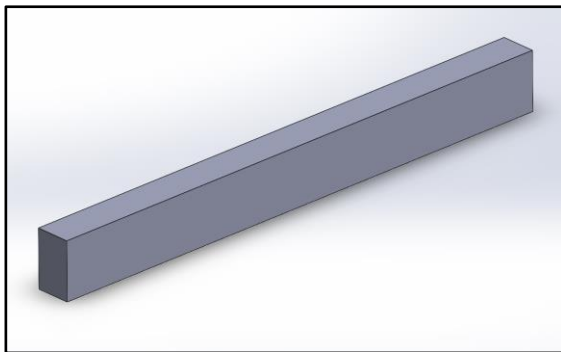
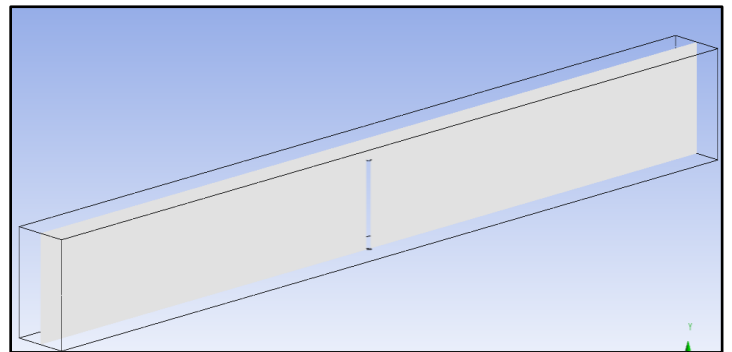


Ilustración 10: Vista en sección de Dominio Computacional. Fuente: Elaboración propia tomado de ANSYS®, 2025.



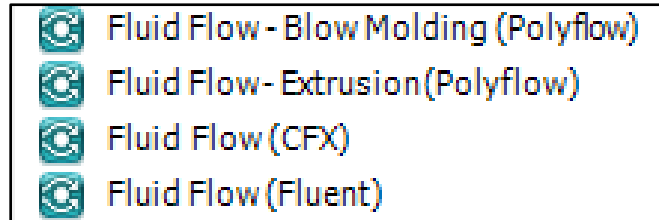
En la **Ilustración 9** y la **Ilustración 10**, se muestra la representación tridimensional del dominio computacional en que se llevarán a cabo en los análisis. En este dominio, se define el espacio en que se simulará el flujo de aire y su interacción con las geometrías planteadas.

Los modelos diseñados de aerogenerador y dominio se exportan al *software* de simulación de fluido, para evaluar las fuerzas que actúan sobre este y se emplea el método de elementos finitos para solucionar las ecuaciones del modelo turbulento.

6.4. Simulación CFD del Modelo CAD (Turbina Vortex) en ANSYS®

Una vez obtenida la geometría de la turbina y el dominio computacional en el programa de SolidWorks, se importan los modelos a ANSYS® WORKBENCH para realizar la simulación completa, con los datos en ANSYS® se trabaja con el complemento “fluent” como se muestra en las siguientes figuras:

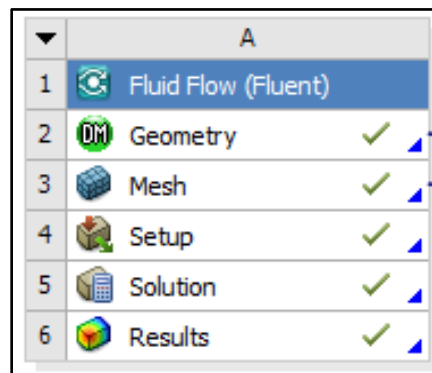
Ilustración 11: Ícono de Fluent. Fuente: ANSYS®, 2024.



Esta **Ilustración 11**, muestra las opciones de software de simulación de fluidos en ANSYS: **Polyflow** para procesos de moldeo por soplado y extrusión, y **CFX** para simulaciones CFD de alta complejidad y velocidad.

Una vez en el “*fluent*” se selecciona el componente “*Geometry*” donde se abre el subprograma “*Desing modeler*” o modelador de diseño como se muestra a continuación:

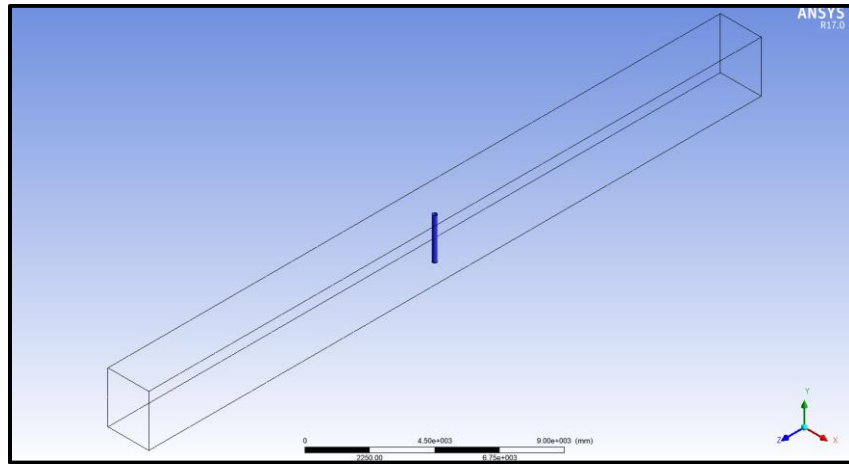
Ilustración 12: Geometría en del CFD ANSYS®. Fuente: ANSYS®, 2024.



La **Ilustración 12**, muestra el flujo de trabajo en ANSYS **Fluent**, que incluye las etapas clave de simulación CFD: **geometría, mallado, configuración, solución y análisis de resultados**. Las marcas de verificación indican la finalización exitosa de cada paso.

En el “*Design modeler*” insertamos el modelo geométrico del aerogenerador, en esta interfaz se seleccionan las superficies del modelo que tendrán algún tipo de trabajo (condiciones de frontera) y se les define un nombre (Named selección), seleccionamos qué tipo de superficie estamos trabajando, luego de terminar la nomenclatura de todas las superficies se cierra el “*Design modeler*”.

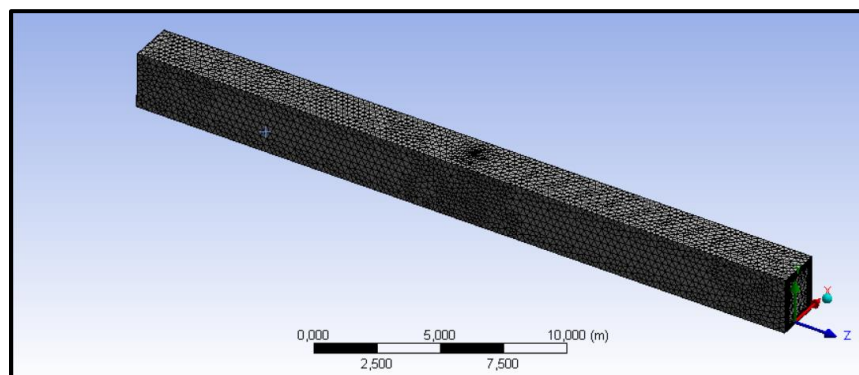
Ilustración 13: Zona de Contacto entre el Aerogenerador y el Volumen de Control del análisis CFD. Fuente: Elaboración propia tomado de ANSYS®, 2025



En la **Ilustración 13**, se representa la zona de contacto y el volumen de control de la geometría Cilindro Flexible Empotrado.

Seguidamente, se ejecuta el diseñador de malla, en el cual se configura la malla general del sólido y la malla específica, en las cuales se pueden configurar o modificar los valores del tamaño, ángulo y cantidad de elementos infinitesimales.

Ilustración 14: Mallado para el análisis CFD. Fuente: Elaboración propia tomado de ANSYS®, 2025.

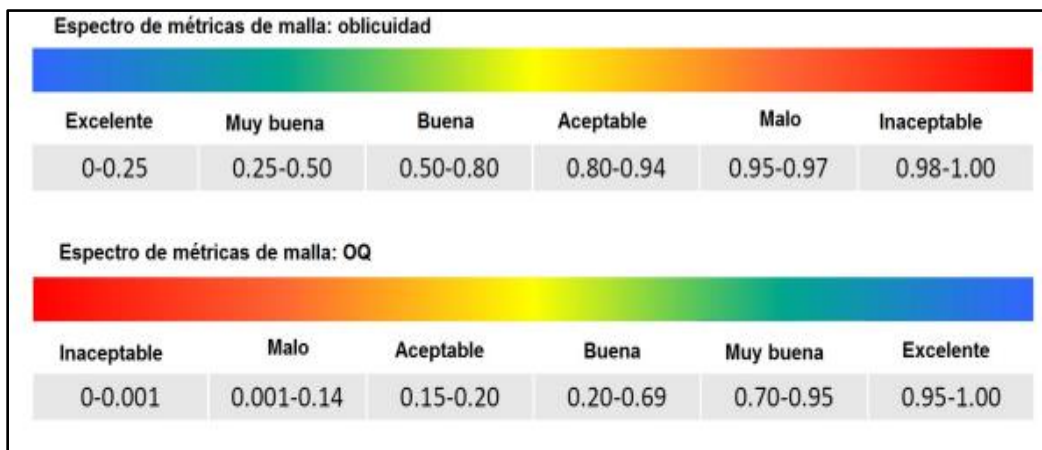


En la **Ilustración 14**, se muestra el mallado, es donde se crea los puntos sobre la superficie de la geometría que nos permiten, generar las ecuaciones de las zonas que se procederán a estudiar.

6.5. Recomendaciones De La Calidad De Malla ANSYS®

El procedimiento de la generación de la malla en el bloque Meshing, es totalmente automático y cuenta con un control considerable sobre los elementos de malla, para lograr asegurar la obtención de la mejor solución de fluidos, junto con los recursos informáticos disponibles, en primera instancia se analiza la malla básica generada por ANSYS® y se contrasta los valores de Calidad Ortogonal (*Orthogonal Quality*) y la Relación de Asimetría-Oblicuidad (*Skewness*) con la tabla de valores de ANSYS®.

Ilustración 15: Recomendaciones de calidad de malla ANSYS®. Fuente: ANSYS®, 2011



En la **Ilustración 15**, se muestra métricas de calidad de malla en simulaciones numéricas. La **oblicuidad** evalúa la deformación angular, donde valores bajos (0 – 0,25) son excelentes y altos (0,98 – 1,00) inaceptables. La **OQ (*Orthogonal Quality*)** mide la calidad ortogonal, siendo óptima cerca de 1,00 e inaceptable por debajo de 0,001. Estas métricas garantizan precisión en simulaciones evitando errores numéricos. Una buena calidad de malla mejora la estabilidad y confiabilidad del análisis.

La malla cuenta con valores óptimos tanto para la relación de simetría (*Skewness*) así como la calidad ortogonal (*Orthogonal Quality*). Finalmente se muestran las características de nodos y elementos con sus respectivos valores estadísticos:

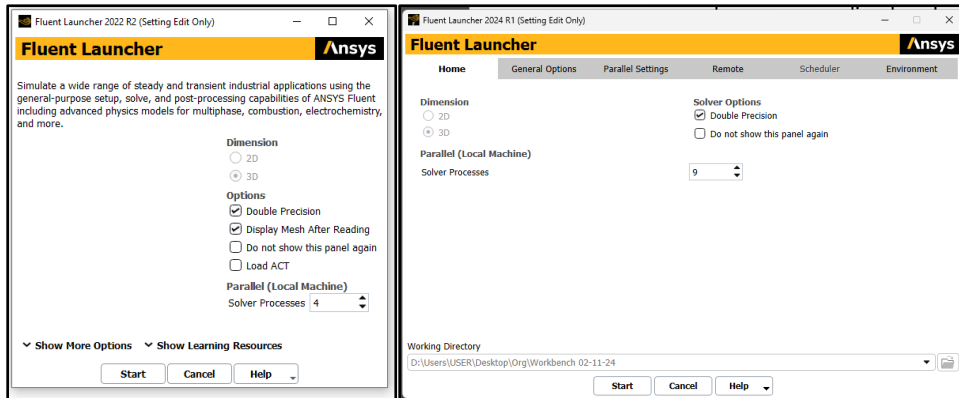
Tabla 1: Estadísticas y métricas del mallado para la simulación CFD.
Fuente: Elaboración propia tomado de ANSYS, 2025.

Nodos	105225		
Elementos	252574		
Métrica y estadístico del mallado	Relación de asimetría	Calidad ortogonal	Calidad del elemento
Mínimo	$4,37e^{-004}$	$5,78e^{-002}$	$1,151e^{-002}$
Máximo	0,83772	0,998	0,99971
Promedio	0,32422	0,82792	0,34304
Desviación estándar	0,13883	0,11427	0,32281

La **Tabla 1** muestra las estadísticas del mallado en CFD con **105225** nodos y **252574** elementos, evaluando **asimetría, calidad ortogonal y calidad del elemento**. Los valores promedio indican una malla muy buena, con una **calidad ortogonal de 0,82792** y **relación de asimetría de 0,32422**, adecuada para la simulación.

Al ejecutar el “*setup*”, arrojará una pantalla en la cual se puede configurar la solución, de esta manera nos permitirá elegir la forma en la que se analizará los datos de la ecuación.

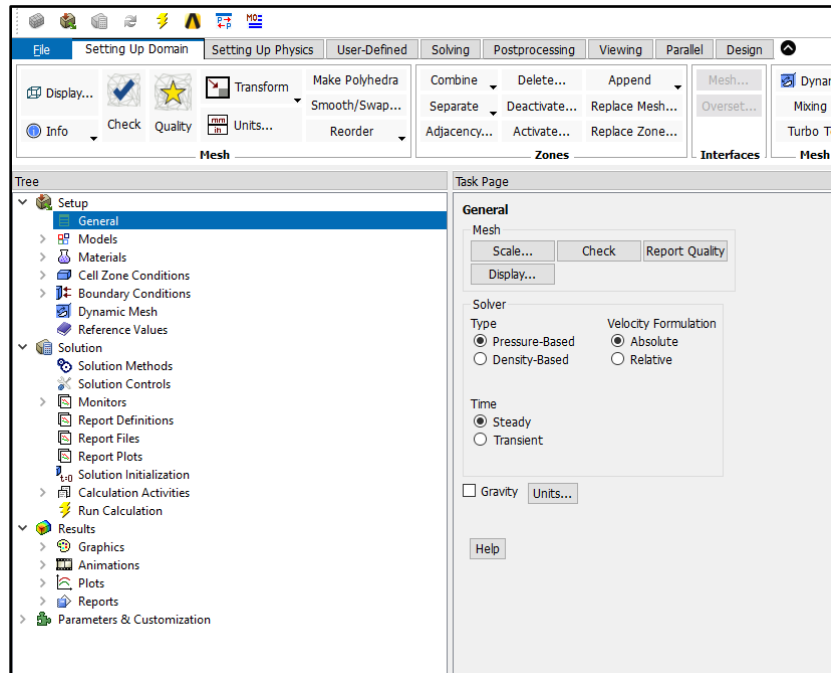
Ilustración 16: *Fluent Launcher en ANSYS. Fuente: Elaboración propia*



La **Ilustración 16**, muestra la ventana de inicio de ANSYS *Fluent Launcher*; utilizada para configurar la ejecución de las simulaciones en ANSYS *Fluent*, esta permite seleccionar opciones como dimensión (2D o 3D), precisión (doble), visualización de malla y carga de ACT, además se define el número de procesos de solución en paralelo.

Se establecen las configuraciones de todas las superficies nombradas en la malla geométrica y el tipo de superficie, sus propiedades y el modelo matemático a utilizar en los cálculos de la simulación; se debe tener en cuenta que se realizaron configuraciones para cada superficie nombrada. La opción “*Dynamic Mesh*” no se usó en este estudio, por lo tanto; están fuera de la nomenclatura.

Ilustración 17: Ventana del setup de ANSYS®. Fuente: Elaboración propia, 2024

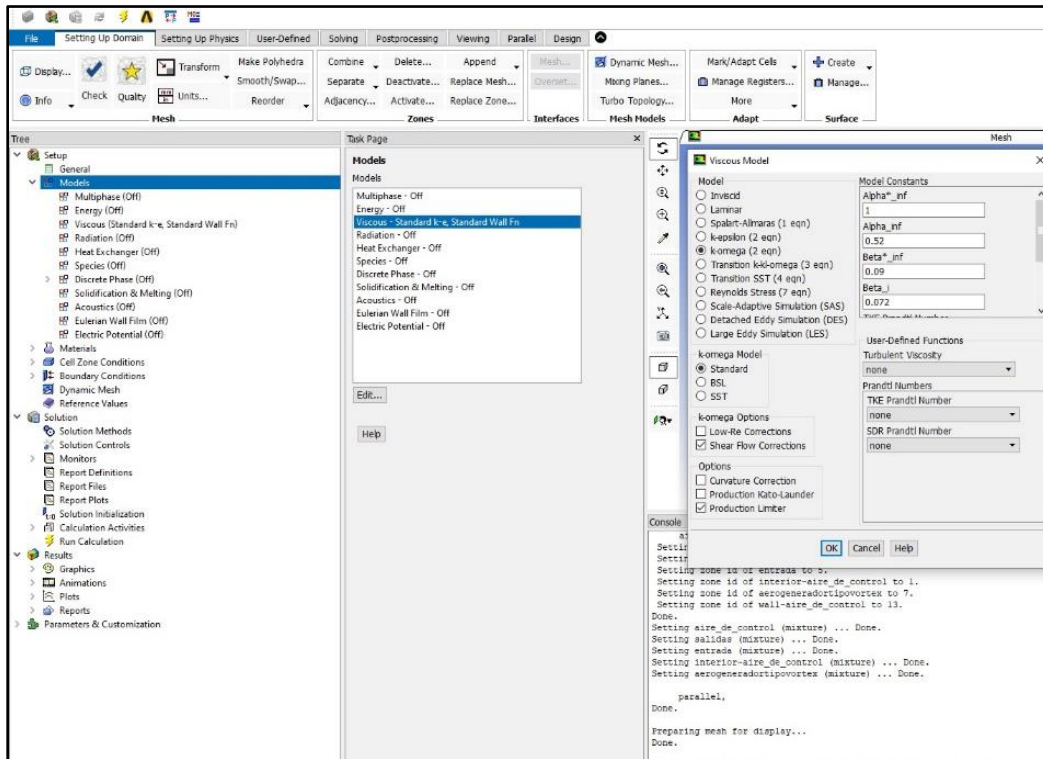


En la **Ilustración 17**, muestra la interfaz principal de ANSYS Fluent, donde se configuran los parámetros de una simulación CFD. El **panel izquierdo** organiza opciones como modelos físicos, materiales y condiciones de frontera, mientras que el **panel derecho** permite seleccionar el *solver*, la formulación de velocidad y el tipo de análisis. La barra superior ofrece herramientas para edición de malla y postprocesado.

En el árbol de configuración del *Setup*, se define el tipo de estudio que se va a realizar, basado en densidad o presión, con velocidad relativa o absoluta, viscosidad variable o sin variar y si se comporta de manera transitorio o estacionaria; además, se definen las unidades en las cuales trabajaremos y si el sistema tendrá en cuenta la gravedad.

Para este proyecto, se optó por un análisis basado en presión, con una velocidad absoluta y viscosidad variable, por lo que estas condiciones permiten capturar con mayor precisión la interacción entre el flujo de aire y la geometría del aerogenerador. Además, este estudio se realizó en régimen turbulento. La gravedad no se incluye para que el sistema gaseoso no se vea afectado.

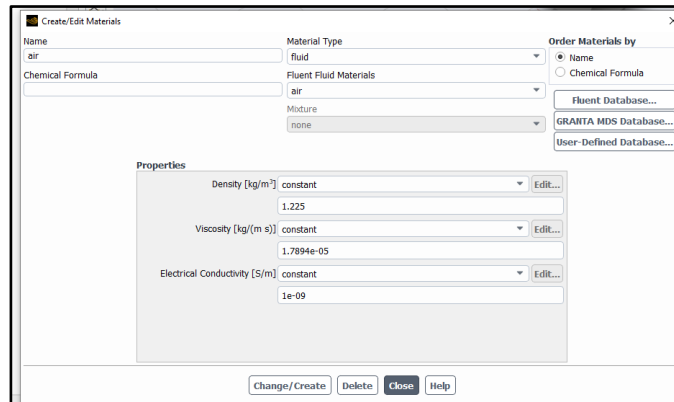
Ilustración 18: Ventana del *Setup* de ANSYS. Fuente: elaboración propia, ANSYS 2024



En la **Ilustración 18**, muestra la opción del árbol de configuraciones del *setup*, encontramos las opciones de modelos matemáticos disponibles.

Se definió el modelo de turbulencia $k - \omega$ estándar, el cual permite realizar un análisis cinético con velocidad constante y variación de la presión generada sobre la superficie. Se tiene en cuenta que para este caso se utiliza la opción de análisis con tratamiento estándar de pared.

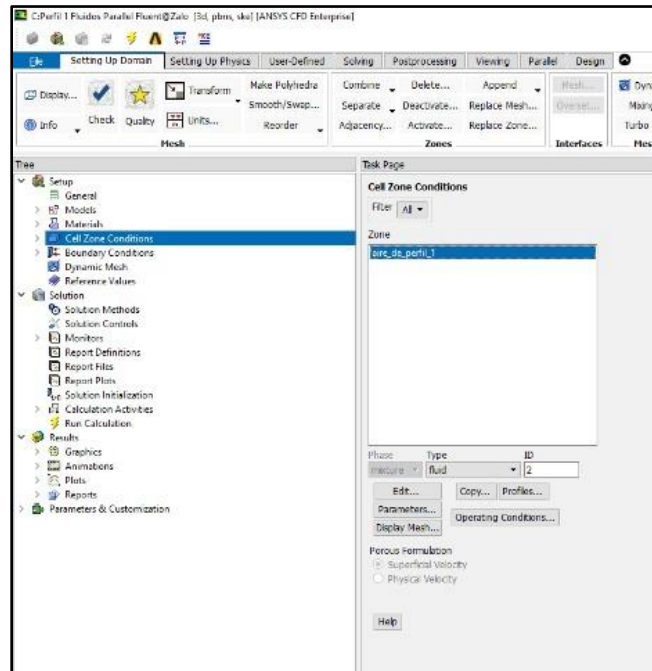
Ilustración 19: Selección/ Edición del material. fuente: Elaboración propia, 2024.



La **Ilustración 19**, es la tercera opción del árbol de configuración, en esta se escogen los materiales de trabajo.

A causa, de haber trabajado bajo el supuesto de **condiciones atmosféricas de intemperie**, es necesario definir el aire como el fluido de trabajo que representa la atmósfera; por defecto ANSYS® establece una temperatura de **15°C**, correspondiente a condiciones estándar de laboratorio. Además, se determinan los materiales específicos utilizados en la construcción del aerogenerador.

Ilustración 20: Configuraciones del *Setup* de ANSYS. Fuente: Elaboración propia, 2024.



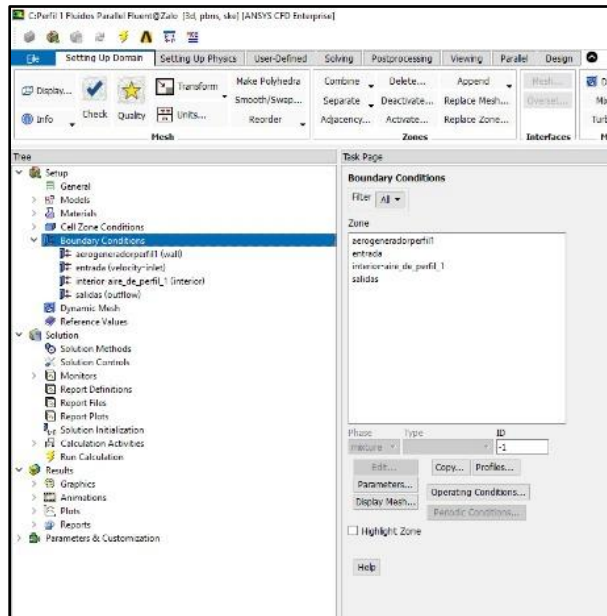
La **Ilustración 20**, es la cuarta opción del árbol de configuración, en ella se encuentran las condiciones zonales, que permite considerar de manera individual cada volumen mallado en uso.

Ya sea el caso en el que se requiera definir un material diferente para el sólido o si este tiene algún régimen de movimiento particular. Para el estudio utilizamos el material de fibra de carbono debido a su baja densidad.

6.5.1. Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera son aquellas reglas que se implementan para limitar el dominio computacional y así, restringir características y/o elementos que no son necesarios para el análisis del mismo.

Ilustración 21: Condiciones de frontera: fuente: Elaboración propia tomado de ANSYS, 2025



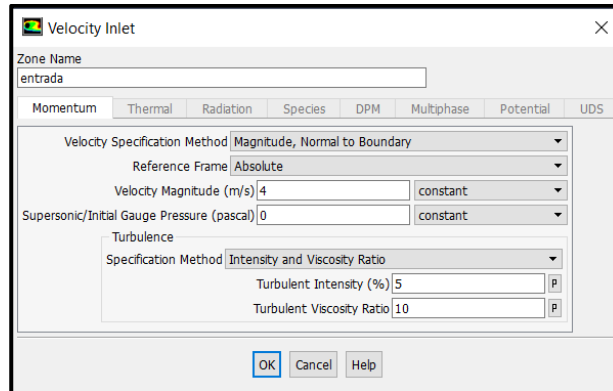
En la **Ilustración 21**, se muestra la quinta opción del árbol de configuración, correspondiente a las condiciones de frontera. En esta sección aparecen los *Named Selection* (grupos de superficies) que se crearon en el *Design Modeler*; con la finalidad de indicar las superficies del modelo 3D y las características de su comportamiento, según las condiciones de frontera adecuadas a su funcionamiento.

6.5.1.1. Entrada

Zona por donde hay entrada de materia y/o energía al dominio computacional o volumen de control. En el apartado de velocidad de entrada, se pueden modificar las condiciones de referencia de entrada de viento, para establecer que el flujo entrante está totalmente desarrollado *Absolute* o no *Relative to adjacent Cell Zone*.

Con relación a la cara frontal del dominio computacional, se estableció una condición de contorno tipo *Velocity Inlet*, que define la velocidad de entrada del flujo a través de dicha superficie. Esta condición representa la velocidad de la masa que atraviesa la sección transversal perpendicular al paso del fluido, permitiendo así controlar el perfil de velocidad en el ingreso del dominio.

Ilustración 22: Condiciones de velocidad de entrada en el dominio. Fuente: Elaboración propia tomado de ANSYS, 2025.



La **Ilustración 22**, muestra la interfaz de modificación para las condiciones de viento entrante del dominio computacional; en este apartado se especifica la magnitud, presión atmosférica y marco de referencia de la velocidad.

Para desarrollo de la presente investigación, se seleccionó una magnitud de velocidad constante de 4 m/s , una presión de 0 Pa , una intensidad de turbulencia de 5% y una ratio de viscosidad de 10.

6.5.1.2. Salida

Zona por donde sale la materia y/o energía del dominio computacional, también llamada volumen de control. En el apartado de salida de flujo (*Out Flow*), se demarcan zonas donde puede entrar o salir fluido, y dependen de las condiciones de frontera de la entrada.

Ilustración 23: Condiciones de salida del dominio computacional.
Fuente: Elaboracion propia tomado de ANSYS, 2025.

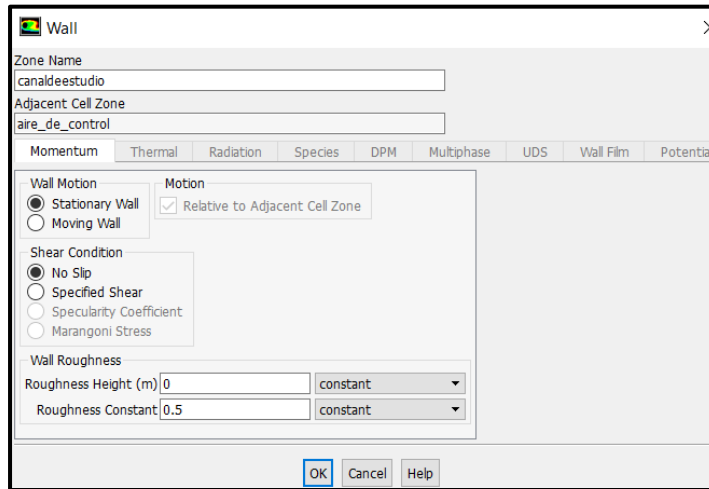
The image shows a screenshot of the ANSYS Fluent software interface for setting boundary conditions. The 'Zone Name' is 'salida'. The 'Momentum' tab is selected. The 'Backflow Reference Frame' is set to 'Absolute'. The 'Gauge Pressure (pascal)' is 101325, and the specification method is 'constant'. The 'Backflow Direction Specification Method' is 'Normal to Boundary'. The 'Radial Equilibrium Pressure Distribution' and 'Average Pressure Specification' options are unchecked. The 'Target Mass Flow Rate' option is checked, with a 'Target Mass Flow (kg/s)' of 24.5, specified as 'constant'. The 'Upper Limit of Absolute Pressure (pascal)' is 5000000 and the 'Lower Limit of Absolute Pressure (pascal)' is 1, both specified as 'constant'. The 'Pressure Jump (pascal)' is set to 'polynomial'. The 'Turbulence' section shows the 'Specification Method' as 'Intensity and Viscosity Ratio', with 'Backflow Turbulent Intensity (%)' set to 5 and 'Backflow Turbulent Viscosity Ratio' set to 10, both specified as 'P'.

La **Ilustración 23**, muestra las condiciones de salida que se establecen para la simulación: tener un flujo másico de $24,5 \frac{kg}{s}$, un rango de presión absoluta para garantizar la estabilidad numérica, especificando de esta manera los parámetros de turbulencia (intensidad del 5%) y la relación de viscosidad turbulenta (10); todo lo anterior para tener un mejor control de la condición de salida y por consiguiente un comportamiento realista del flujo turbulento.

6.5.1.3. Paredes

Se denominan paredes a todas las zonas por donde no hay entrada ni salida de materia y energía.

Ilustración 24: Condiciones de Frontera para las paredes. Fuente: Elaboración propia tomado de ANSYS, 2025.

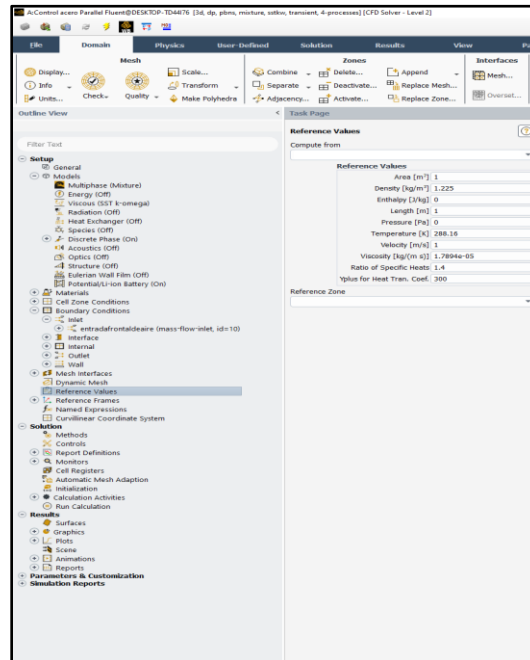


La **Ilustración 24**, muestra la interfaz que permite seleccionar las características de las paredes en el dominio computacional.

Se aplica la condición de no deslizamiento (*No-slip*) en paredes, piso y techo del dominio computacional, lo que conlleva que entre la velocidad del fluido y las superficies el contacto sea nulo; garantizando la representación más realista de la interpretación entre el flujo y las fronteras sólidas. Esta condición permite capturar correctamente los efectos de la viscosidad, en el desarrollo de la capa límite y la generación de esfuerzos cortantes en las superficies del dominio.

En la siguiente opción del árbol de configuración, se encuentra la interfaz de malla, que permite configurar la interacción entre las mallas de los elementos y los cuerpos sólidos.

Ilustración 25: Configuración de los valores de referencia. Fuente: Elaboración propia tomado de ANSYS, 2025.

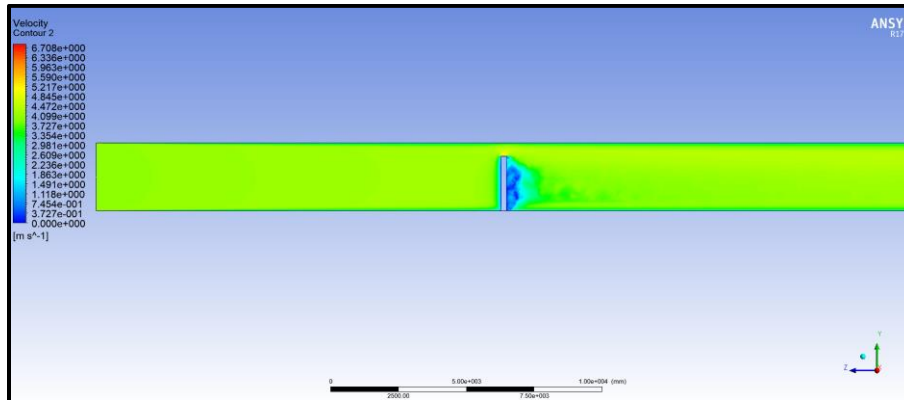


La **Ilustración 25** es la sección de interfaz de malla del árbol de configuración, donde se encuentran valores de referencia y se configuran los valores iniciales y las condiciones con las que se va a empezar a simular; en este caso solo se tienen en cuenta las condiciones densidad, temperatura y viscosidad.

Después de estar todas las superficies configuradas se establecen las cantidades de interacciones y se procede a simular el modelo. Luego, de calcular los resultados se cierra el *Setup (solver)* y se ejecuta el *CFD-Post* para visualizar los resultados numéricos de manera gráfica.

Desde el *CFD-Post*, se crean los planos y superficies para visualizar y analizar los datos arrojados por la simulación; en el caso que se pretenda analizar un punto específico del dominio se utiliza la **Herramienta Probeta**, ubicada en el árbol de herramientas obteniendo así el valor numérico de la sección seleccionada.

Ilustración 26: CFD – Post. Fuente: Elaboracion propia tomado de ANSYS, 2025.



En la **Ilustración 26**, se visualiza el cambio de velocidad del viento a través del dominio computacional en el plano ZY; las zonas en color verde representan lugares donde la velocidad tiende a estabilizarse a $4 \frac{m}{s}$ y las de color azul indican zonas de baja velocidad de viento.

6.6. Análisis Estructural (FEA) del Aerogenerador

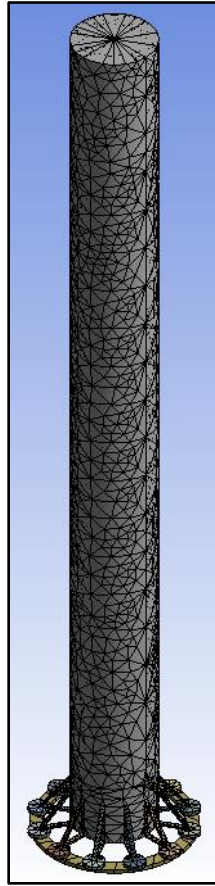
Este apartado contiene la interfaz del análisis FEA *Finite Element Method* de los aerogeneradores, donde se añaden las cargas aerodinámicas calculadas anteriormente en el análisis CFD a las geometrías a analizar.

6.6.1. Geometría del Aerogenerador

Se hace la extracción del modelo CAD de SolidWorks y se selecciona el material a utilizar en el aerogenerador; posteriormente, se hace el mallado de la geometría para agregar las cargas aerodinámicas obtenidas en la simulación de CFD.

Para este apartado, ocurre lo mismo mencionado anteriormente, donde se hace la extracción del modelo CAD del SolidWorks, además se hace la selección del material que va a estar compuesto el aerogenerador, en este apartado primero se hace la malla para luego agregar las cargas aerodinámicas obtenidas en la simulación anterior.

Ilustración 27: Mallado del aerogenerador para el análisis estructural.
Fuente: Elaboración propia, ANSYS 2024.



En la **Ilustración 27**, se visualiza el modelo de aerogenerador base (Cilindro Flexible Empotrado) realizado en SolidWorks y exportado a ANSYS. El tipo de malla a utilizar es tetraédrico y su configuración hace que sus elementos sean más pequeños; debido a esto, genera que se resuelvan las ecuaciones del modelo de turbulencia $k - \omega$ de manera individual.

Dicho lo anterior, se realiza el análisis de malla bajo los criterios de relación asimétrica y calidad ortogonal, para garantizar la adecuada resolución en la zonas de mayor interés, especialmente en aquellas sometidas a mayores esfuerzos o concentraciones de carga.

Tabla 2: Estadísticas y métricas del Mallado del Análisis Estático Estructural. Fuente: Elaboración propia tomado de ANSYS, 2025.

Nodos	31533		
Elementos	14454		
Métrica y estadístico del mallado	Relación de asimetría	Calidad ortogonal	Calidad del elemento
Mínimo	$5,8824e^{-002}$	0	$7,8485e^{-003}$
Máximo	1	0,98725	0,99927
Promedio	0,87572	0,26756	0,24538
Desviación estándar	0,17813	0,21284	0,19259

La **Tabla 2**, expone los resultados del mallado realizado para el modelo base, destacando número de nodos y elementos finales, así como los valores de la malla: asimetría *Skewness*, calidad ortogonal y calidad de elementos, indicando cuales fueron los valores mínimos y máximos registrados, el promedio entre ellos y la desviación estándar.

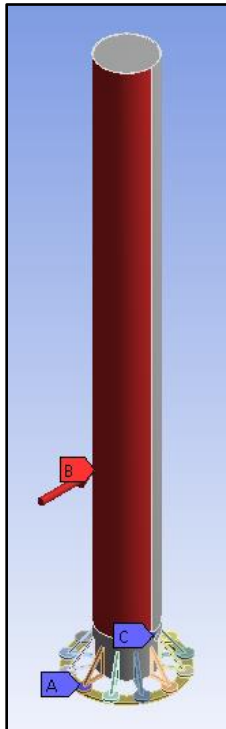
La malla generada expone una calidad muy favorable según los criterios de evaluación utilizados. En cuanto a la **relación asimétrica**, se obtuvo un valor de 0,875, lo cual indica una excelente conformación de los elementos debido a que se encuentra dentro del rango aceptable para simulaciones precisas. Por otro lado, la **calidad ortogonal** alcanzó un valor de 0,2675, considerado como muy bueno, según los estándares de malla.

Estos resultados permiten concluir que la malla es óptima para llevar a cabo la simulación estructural, contribuyendo a mejorar la precisión y la confiabilidad en la estimación de los resultados obtenidos mediante el análisis por elementos finitos.

6.6.2. Selección de las Superficies.

A continuación, se escogen las superficies de interés sobre las cuales se aplican las condiciones de cargas aerodinámicas, fundamentales para el desarrollo del análisis estructural mediante el método de elementos finitos (FEA).

Ilustración 28: Superficies determinadas que cuentan con una carga.
Fuente: Elaboración propia, ANSYS, 2024.



La **Ilustración 28**, muestra la selección de la cara superficial del modelo base (Cilindro Flexible Empotrado) señalada en color rojo; así mismo, indica las anotaciones de lugares donde se agregaron elementos fijos (*Fixed Support*) en color morado y una línea normal a la superficie en color rojo, que indica la dirección de la carga recibida por el viento.

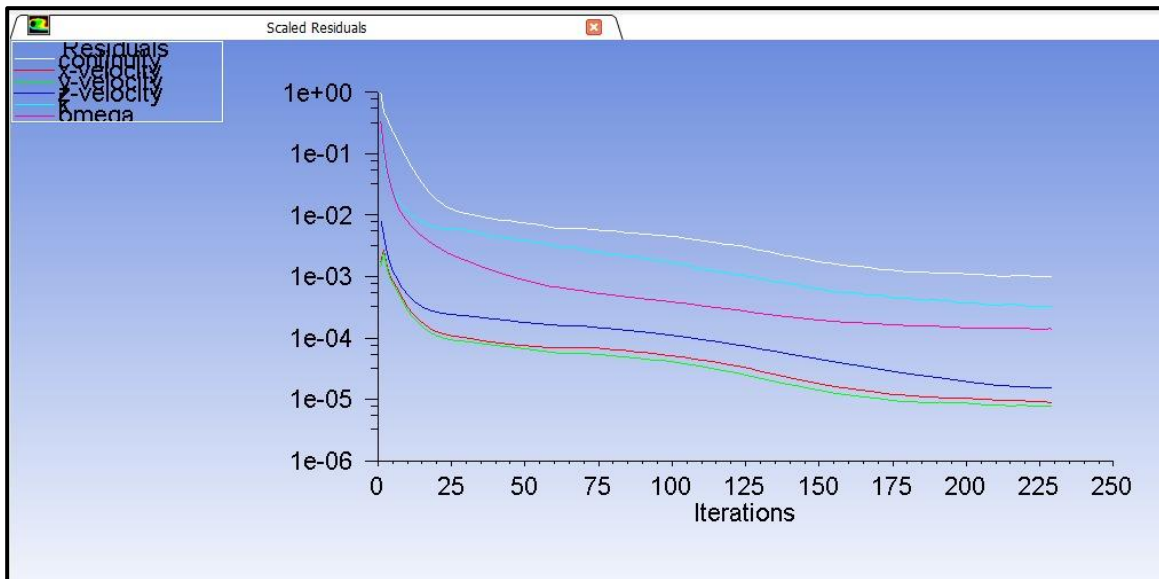
Por otra parte, la **superficie A** se define como fija, proporcionando el anclaje necesario para la estructura. La **superficie B** es la cara perpendicular al viento, donde incide directamente la fuerza del flujo, generando el empuje aerodinámico. La **superficie C** actúa como el pivote que sostiene la estructura, asegurando que el peso del sistema no afecte a los piezoeléctricos.

Para el análisis en **FEA (Método de Elementos Finitos)**, la carga se modela como una presión distribuida, la flecha solo indica el vector de la dirección del viento sobre esta superficie; con estas condiciones establecidas, se procede a la simulación y por último a la interpretación de los resultados.

7. Interpretación de Resultados

Posterior a desarrollar las simulaciones CFD y FEA, se procede a analizar los resultados con el objetivo de evaluar la producción energética obtenida en la simulación. En la teoría, este tipo de aerogeneradores tiene una eficiencia entre el 70% al 80%, siendo conservadores se escoge un factor de aprovechamiento del 75%.

Ilustración 29: Simulación del modelo en ANSYS®. fuente: Elaboración propia tomado de ANSYS, 2025.



La **Ilustración 29**, representa el resultado de las iteraciones de las ecuaciones modeladas en el sistema; la línea blanca indica la energía cinética, la azul claro es la componente k y ω es identificada de color rosa, la línea roja, verde y azul oscuro corresponden a las velocidades en los ejes x , y y z respectivamente.

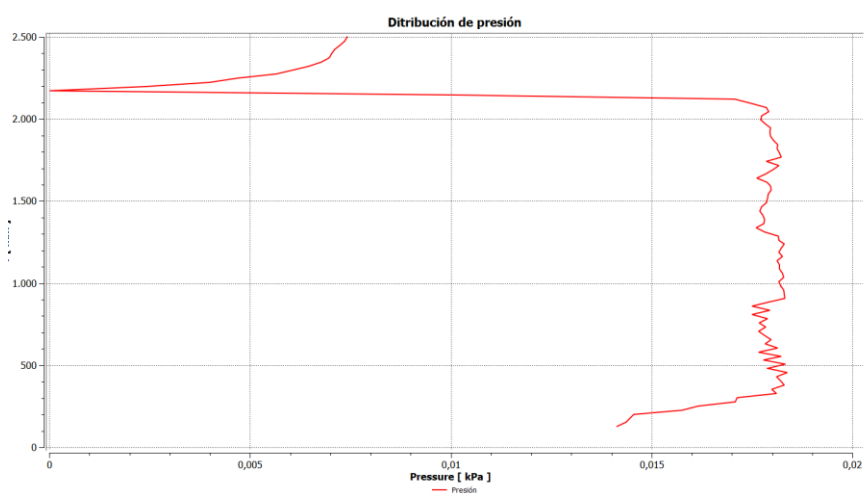
En la **Ilustración 29** se observa que, a partir de la iteración número 230, el sistema alcanza una **zona de estabilidad numérica**, lo cual indica que las soluciones comienzan a converger de manera consistente. Este comportamiento sugiere que los resultados obtenidos se encuentran dentro del margen de error aceptable definido por el software ANSYS para este tipo de análisis, validando así la confiabilidad de la simulación. La estabilización de las iteraciones es un indicio de que el modelo ha alcanzado una solución estacionaria adecuada, permitiendo interpretar los resultados con mayor precisión y seguridad.

7.1. Distribución de Presión De Los Aerogeneradores Generado en el CFD

En un aerogenerador tipo Vortex, la distribución de presiones es fundamental para generar las oscilaciones, que permiten a su vez convertir la energía cinética en eléctrica. Debido al fenómeno de desprendimiento de vórtices (*Vortex Shedding*), la interacción del flujo de aire con la superficie del dispositivo produce una distribución dinámica y alternante de presiones a lo largo de la estructura. En la parte frontal, el flujo impacta directamente, creando zonas de presión elevada, en comparación con la parte trasera zonas de baja presión.

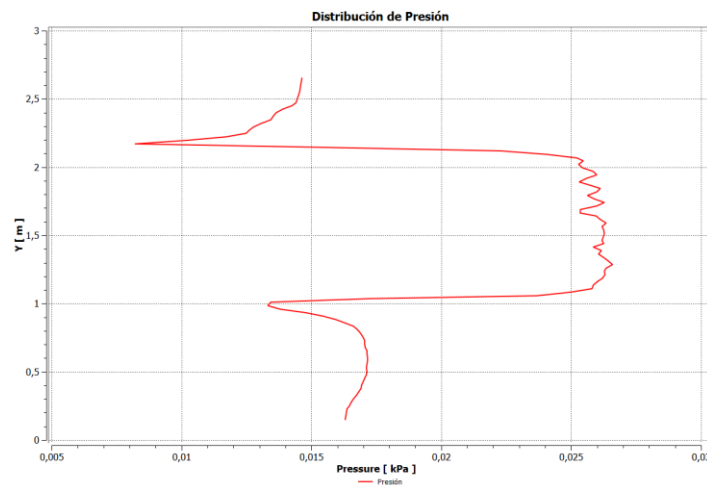
En las ilustraciones posteriores, se analiza la parte frontal del cilindro base (Cilindro Empotrado Flexible), ubicando una línea vertical en el eje y atravesando el dominio de forma transversal al flujo de viento, para medir las variaciones de presión presentadas en esta zona de impacto directo flujo-estructura.

Ilustración 30: Distribución de presión para la geometría Cilindro Flexible Empotrado. Fuente: Elaboración propia tomado de ANSYS, 2025.



La **Ilustración 30**, evidencia que en la sección frontal se genera una presión inicial, gracias a la capa límite superior. Luego, esta se reduce a cero para posteriormente volver a aumentar al encontrarse con la punta más alta del aerogenerador, desde ese punto fluctúa en un rango estable alrededor de 0,018 *KPa* hasta llegar al límite interior del dominio.

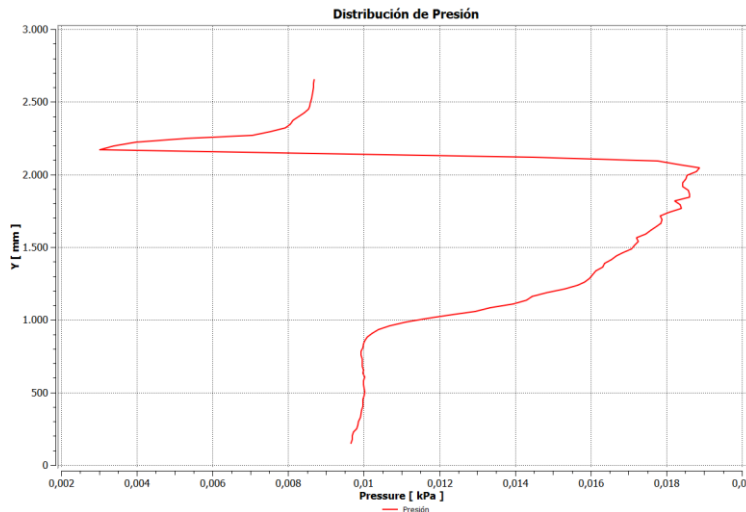
Ilustración 31: Distribución de Presión para la geometría Cilindro Rígido sobre Varilla Flexible. Fuente: Elaboración propia tomado de ANSYS, 2025.



En la **Ilustración 31**, se evidencia el comportamiento de la presión inicial gracias a la capa límite del dominio computacional, posteriormente se reduce y vuelve a aumentar hasta la altura del aerogenerador; desde este punto la presión fluctúa en un rango estable alrededor de $0,027 \text{ KPa}$ hasta llegar a la punta interior del aerogenerador, donde la presión es de $0,017 \text{ KPa}$ hasta la parte inferior del dominio computacional.

El comportamiento de presión del Cilindro Rígido sobre Varilla Flexible es similar al cilindro base, especialmente en cuanto a la distribución general del flujo. Sin embargo, se observa una diferencia en el rango de presiones, que oscila alrededor de los $0,026 \text{ KPa}$ en este caso, valor ligeramente inferior al Cilindro Rígido Empotrado. Este valor se atribuye a la distribución de área entre ambas geométricas. Además, al igual que en el caso anterior, se evidencia un descenso progresivo en la presión hacia la parte inferior de la varilla, manteniendo un comportamiento coherente con el patrón observado previamente.

Ilustración 32: Distribución de presión para la geometría Cono Truncado sobre Varilla Flexible. Fuente: Elaboración Propia tomado de ANSYS, 2025



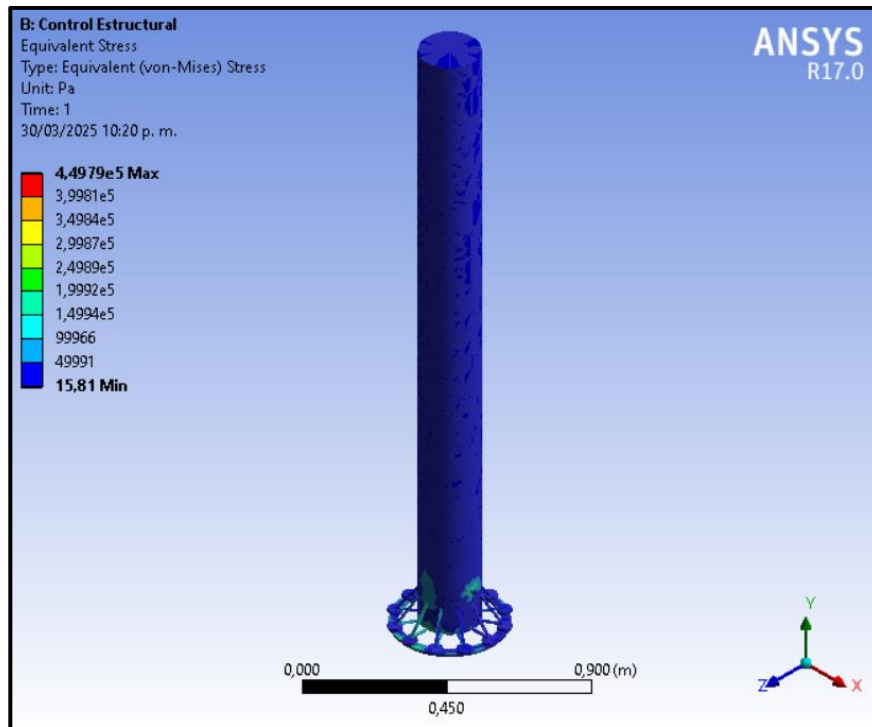
En la **Ilustración 32**, la presión sobre el cuerpo tiene una distribución más desigual, esto debido a su forma geométrica irregular. En la punta superior se presenta el pico de presión de **0,019 [KPa]**, descendiendo hasta **0,01 [KPa]** en la varilla inferior.

7.2. Distribución De Esfuerzos de los Aerogeneradores

El esfuerzo es generado con las fuerzas ejercidas por el flujo de aire en movimiento sobre la superficie, es la respuesta mecánica del material a la excitación externa. Cuando el viento impacta la estructura, se generan presiones y fuerzas de arrastre que inducen tensiones internas en el material.

Para los aerogeneradores tipo Vortex, las cargas aerodinámicas producen las oscilaciones en la estructura, esto a su vez, genera las deformaciones que son aprovechadas para convertir energía mecánica en electricidad por medio del sistema piezoeléctrico instalado.

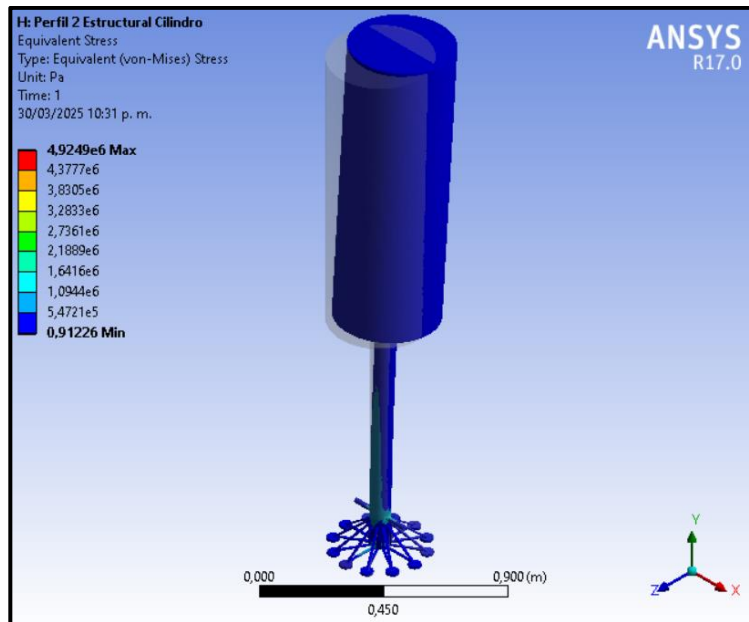
Ilustración 33: Distribución de esfuerzo para la geometría Cilindro Flexible Empotrado. Fuente: Elaboración propia tomado de ANSYS, 2025.



En la **Ilustración 33**, se muestra la distribución del esfuerzo equivalente por el método de Von Mises sobre toda la superficie del aerogenerador base al ponerse, en contacto con el fluido transversal.

El análisis revela que la estructura, al estar en oposición directa al flujo de viento, experimenta su mayor concentración de esfuerzos en la base, específicamente en el disco piezoeléctrico, alcanzando un valor máximo de $4,4979e^5 (Pa)$. En el resto del cuerpo, se mantienen niveles significativamente bajos en comparación. Esto ocurre a causa de la robustez del material y la rigidez estructural, generando que no se evidencie una deformación considerable, lo que limita la cantidad de energía mecánica disipada y resulta en una conversión energética menor en comparación con otras configuraciones.

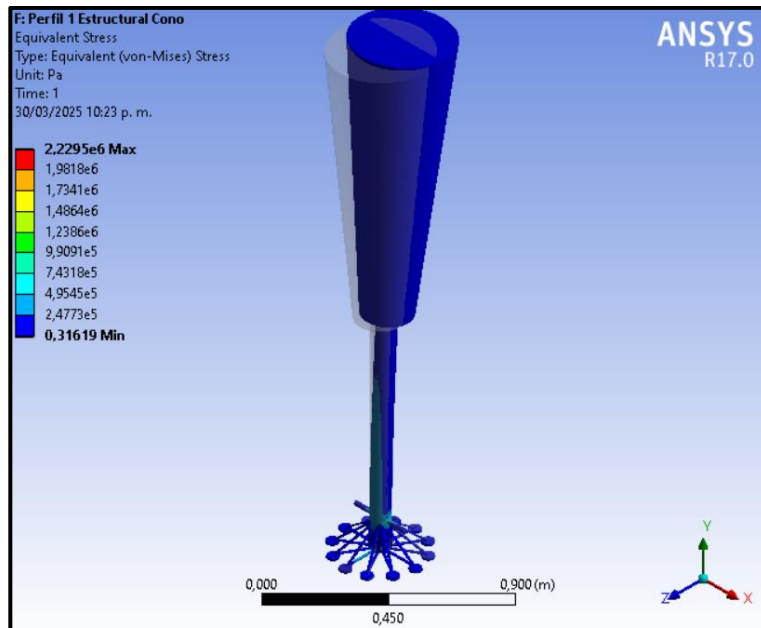
Ilustración 34: Distribución de esfuerzo para la geometría Cilindro Rígido sobre Varilla Flexible. Fuente: Elaboración propia tomado de ANSYS, 2025.



En la **Ilustración 34**, se muestra la distribución del esfuerzo equivalente por el método de Von Mises sobre toda la superficie del aerogenerador tipo A, al entrar en contacto con el fluido transversal.

En el cilindro tipo A, el esfuerzo máximo registrado es de $4,9249e6$ (Pa), el cual se presenta en la varilla que sostiene la estructura superior, debido a que en esta sección hay una menor área que tiene se presenta una pequeña deformación en el lado expuesto al flujo de viento, al tener una masa superior más grande presenta también un mayor esfuerzo.

Ilustración 35: Distribución de esfuerzo para la geometría Cono Truncado sobre Varilla Flexible. Fuente: Elaboración Propia tomado de ANSYS, 2025.



En la **Ilustración 35**, se muestra la distribución del esfuerzo equivalente por el método de Von Misses sobre toda la superficie del aerogenerador tipo B al ponerse en contacto con el fluido transversal.

En el cilindro tipo B (Cono Truncado sobre Varilla Flexible), el esfuerzo máximo registrado es de $2,2295e^6$ (Pa), concentrando principalmente en la varilla que sostiene la estructura superior, al igual que en el cilindro tipo A. No obstante, dado que esta geometría presenta una menor masa en comparación con el modelo cilíndrico, los esfuerzos globales resultan más bajos. Esta reducción en la masa implica una menor inercia y, por lo tanto, una carga estructural interior, lo que contribuye a disminuir las sollicitaciones mecánicas a lo largo del sistema.

7.3. Número de Reynolds

Se calcula el número de Reynolds para un flujo de aire a una velocidad de 4 m/s a una temperatura ambiente de 25°C en un medio controlado.

$$Re = \frac{\rho * U * L}{\mu} \quad (3)$$

- ρ : Densidad del aire. (1.225 Pa * s)
- U : Velocidad del viento. (4 m/s)
- L : Longitud característica. (2,5 m) -rectángulo de 2,5 m × 2m-
- μ : viscosidad dinámica del aire. (1,85x10⁻⁴)

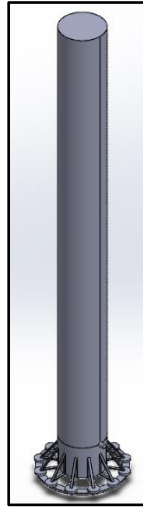
De acuerdo con la ecuación (3), utilizada para calcular el número de Reynolds del flujo que circula por el dominio computacional, se obtiene un valor de 66216,21. Este resultado permite clasificar el flujo como turbulento, dado que supera el umbral típico de transición ($Re = 4000$) entre flujo laminar y turbulento. La naturaleza turbulenta del flujo tiene implicaciones directas en su comportamiento dentro del dominio, especialmente en términos de mezcla, pérdidas de energía y generación de vórtices.

7.4. Resultados del Aerogenerador Cilindro Flexible Empotrado

Considerando los resultados obtenidos de las dos simulaciones realizadas, se determina la fuerza ejercida por el viento sobre la cara del aerogenerador es de 2,716 N. La magnitud obtenida indica el empuje aerodinámico generado por el flujo al impactar directamente sobre la superficie del dispositivo; lo cual es un parámetro clave para el análisis estructural y energético del sistema.

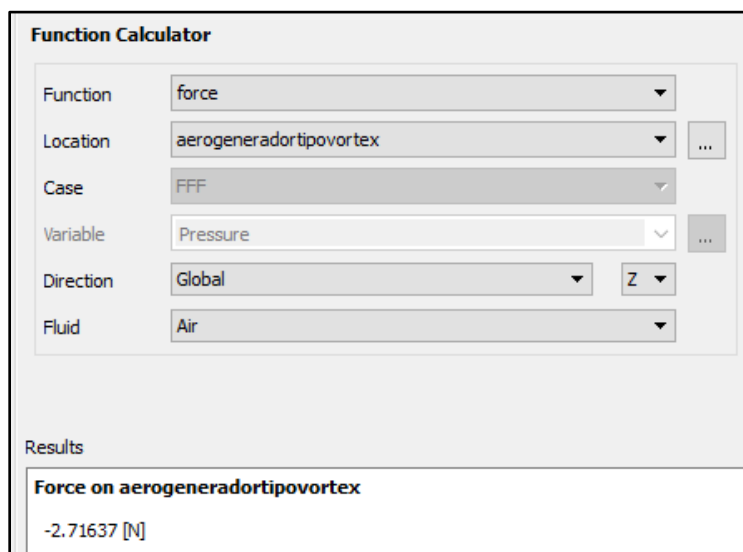
³ Ecuación número de Reynolds (Mott, 2006)

Ilustración 36: Cilindro Flexible Empotrado. Fuente: Elaboración propia tomado de ANSYS, 2025.



La **Ilustración 36** muestra el modelo CAD de la turbina base realizada en Solid Works, en esta ilustración no se tiene la cubierta en la base para observar el sistema de pulsadores y material piezoeléctrico ubicado en la parte interior.

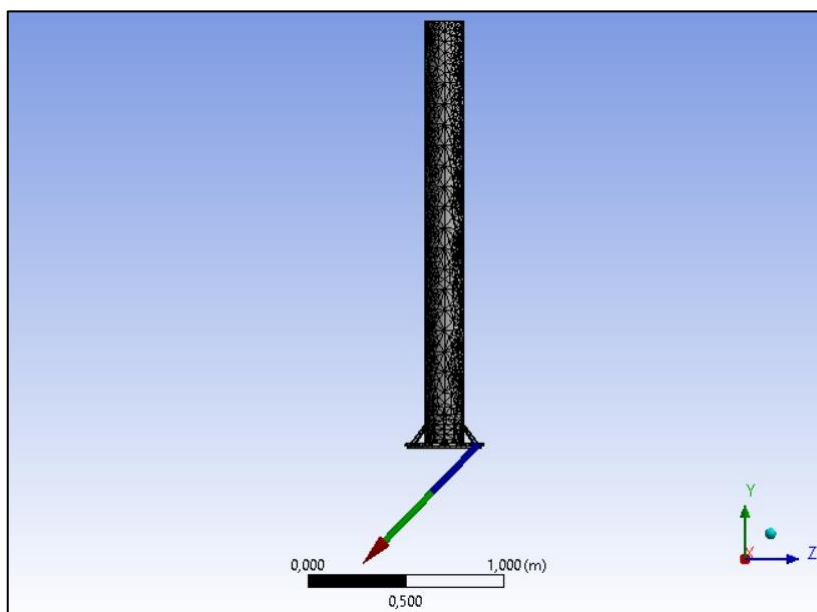
Ilustración 37: La función de la Calculadora. Fuente: tomado de ANSYS, 2025.



En la **Ilustración 37**, se muestra el apartado de calculadora de funciones de ANSYS *Fluent*, en donde se escoge la magnitud y zona de interés; por último, el software realiza el cálculo especificado.

En esta instancia, se calcula la fuerza ejercida sobre la superficie del modelo base del aerogenerador. A partir del valor resultado de la fuerza, se aplica el concepto de fuerza par, con el objetivo de transmitir el empuje generado por el viento hacia el punto de presión ubicado sobre el elemento piezoeléctrico. Este procedimiento permite estimar cómo se transfiere la carga desde la superficie expuesta hasta el componente encargado de la conversión energética.

Ilustración 38: Fuerza Resultante para la Geometría: Cilindro Flexible Empotrado. Fuente: Elaboración Propia, ANSYS, 2025.



Tabular Data				
Time [s]	<input checked="" type="checkbox"/> Force Reaction (X) [N]	<input checked="" type="checkbox"/> Force Reaction (Y) [N]	<input checked="" type="checkbox"/> Force Reaction (Z) [N]	<input checked="" type="checkbox"/> Force Reaction (Total) [N]
1 1,	1,4279e-002	-7,2923	-7,052	10,144

En la **Ilustración 38**, se visualiza el vector de fuerza resultante sobre uno de los pulsadores del modelo base, se evidencia la dirección del vector vista desde la lateral del sólido. Además, se exhibe las tres componentes y la magnitud resultante de la fuerza.

En el desarrollo del estudio se emplea la fuerza resultante aplicada sobre el piezoeléctrico, considerando que el material utilizado es cuarzo, el cual posee una estructura cristalina que permite la generación eléctrica de forma isotrópica. Conforme al principio del efecto piezoeléctrico descrito por Martínez (2021), se determina una fuerza aplicada de 10,144 N sobre el dispositivo. Dicho lo anterior, se calcula la tensión eléctrica disponible el aprovechamiento mediante la ecuación de voltaje piezoeléctrico:

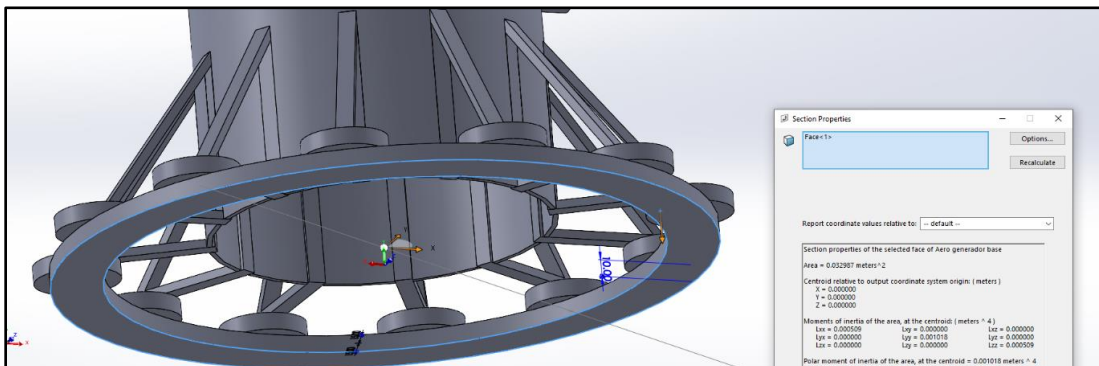
$$V = \frac{d_{ij} * F * t}{\epsilon_r * \epsilon_0 * A} \quad (4)$$

Donde:

- V: Voltaje generado en el aerogenerador.
- d_{ij} : Coeficiente piezoeléctrico del cuarzo ($\sim 2,3 \times 10^{-12} m/v$).
- F: Fuerza aplicada (10,144 N).
- t: Espesor de la placa (*suponiendo* $1 \text{ mm} = 10^{-3} m$).
- ϵ_r : Permisividad relativa del cuarzo ($\sim 4,5$).
- ϵ_0 : Permisividad al vacío ($8,85 \times 10^{-12} F/m$).
- A: Área de la placa ($0,032 \text{ m}^2$).

Considerando los parámetros expuestos anteriormente y mediante de la ecuación (4), se determina un voltaje generado de aproximadamente 18,31 mV por pulsación.

Ilustración 39: Forma y área del Piezoeléctrico elegido. Fuente: Elaboración propia, SolidWorks, 2024.



⁴ Ecuación voltaje generado en el aerogenerador (White, 2012)

La **Ilustración 39** muestra una vista en detalle del sistema de pulsadores y el material piezoeléctrico ubicado en la parte inferior del aerogenerador. En la ventana de propiedades de sección *Section Properties* se muestra el área superficial de la placa piezoeléctrica de $0,032 \text{ m}^2$.

Teniendo en cuenta la frecuencia de funcionamiento del aerogenerador debido al viento, se calcula la frecuencia de desprendimiento de vórtices de Von Kármán, dada por la ecuación de Strouhal:

$$f = \frac{St * V}{D}^5 \quad (5)$$

Donde:

- f : Frecuencia de vibración (Hz).
- St : Número de Strouhal (0,2 para cilindros, 0,3 para conos).
- V : Velocidad del viento (4 m/s).
- D : Diámetro del cilindro (200 mm = 0,2 m).

Se obtiene que el sistema se mueva a una frecuencia de 4 Hz lo que es equivalente a 4 pulsaciones por segundo, generándonos de 121,12 [mV/s] para condiciones de viento de 4 m/s.

7.4.1. **Energía Teórica Vs Real**

En el siguiente análisis, los valores de presión dinámica, así como carga aerodinámica (Energía Potencial Recolectada) se tomarán como energía en forma de presión.

⁵ Ecuación de frecuencia de vibración (Rao, 2011)

7.4.1.1. Fuerza Dinámica en superficie plana proyectada (Teórico)

En el cálculo de la fuerza ejercida por el viento sobre el sólido en oposición, se toma la presión dinámica presente en el fluido con la ecuación (6) y se multiplica por el área que proyecta la superficie del aerogenerador, obteniendo así el valor de fuerza.

$$p = \frac{1}{2} * \rho * v^2 \quad (6)$$

$$F = \frac{1}{2} * \rho * v^2 * A_{proyectada}$$

$$F = \frac{1,225 * 4^2 * 0,4}{2}$$

$$F = 3,92 \text{ N}$$

Donde

- F : Es la fuerza dinámica [N].
- ρ : Densidad del aire. (1,225 Pa * s)
- $A_{proyectada}$: Es el área proyectada de la geometría que está en contacto con el viento (m^2)
- v : Velocidad del viento $\left[4 \frac{m}{s}\right]$.

7.4.1.2. Energía Potencial Recolectada Debido A La Carga Aerodinámica (Teórico)

$$Carga \text{ Aerodinámica} = F * \text{Factor de aprovechamiento}^7 \quad (7)$$

$$Carga \text{ Aerodinámica} = 3,92 [N] * 0,7$$

$$Carga \text{ Aerodinámica} = 2,744[N]$$

⁶ Ecuación presión dinámica (White, 2012)

⁷ Ecuación de carga aerodinámica (Mott, 2006)

7.4.1.2.1. Voltaje generado en el piezoeléctrico (Mediante Simulación)

Utilizando la ecuación (4) calculamos la energía en el piezoeléctrico:

$$V_{piezoelctrico} = \frac{2,3 \times 10^{-12} * 10,144 * 10^{-3}}{4,5 * 8,85 \times 10^{-12} * 0,032}$$

$$V_{piezoelctrico} = 18,31 [mV]$$

7.5. Porcentaje De Error

En la **Ilustración 37** se puede evidenciar que la simulación arroja un valor de carga aerodinámica de 2,71637 [N], lo que nos da un error de 1.017% según la ecuación:

$$\% Error = \frac{Teorico - Simulado}{Teorico} * 100\% \quad (8)$$

$$\% Error = \frac{2,71637[N] - 2,744[N]}{2,744[N]} * 100\%$$

$$\% Error = 1.017\%$$

Para este estudio, se considera como aceptable un factor de error menor al 2%, esto se hace para poder calibrar las siguientes simulaciones con las demás geometrías.

7.6. Frecuencia de Generación

Utilizando la ecuación (5), se calcula la frecuencia de oscilación del aerogenerador:

$$f_{aerogenerador} = \frac{0,2 * 4}{0,2}$$

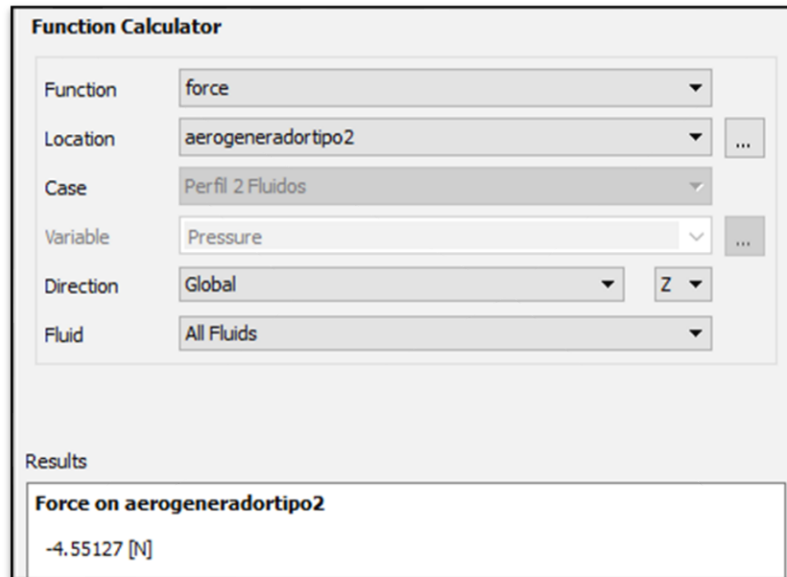
$$f_{aerogenerador} = 4 [Hz]$$

El voltaje piezoeléctrico se produce en cada pulsación del aerogenerador. Considerando que en cada ciclo se produce un voltaje de 18,31 mV y la frecuencia de funcionamiento del sistema es de 4 Hz (es decir, cuatro pulsaciones por segundo), se obtiene una tasa de generación de voltaje de aproximadamente de $73,23 \frac{mV}{s}$.

7.7. Resultados del Aerogenerador Tipo A: Cilindro Rígido Sobre Varilla Flexible.

Tras llevar a cabo las simulaciones bajo la misma metodología de la geometría anterior, se obtuvo una fuerza de impacto del viento sobre el aerogenerador equivalente a $4,55127\text{ N}$, como se evidencia en la **Ilustración 40**

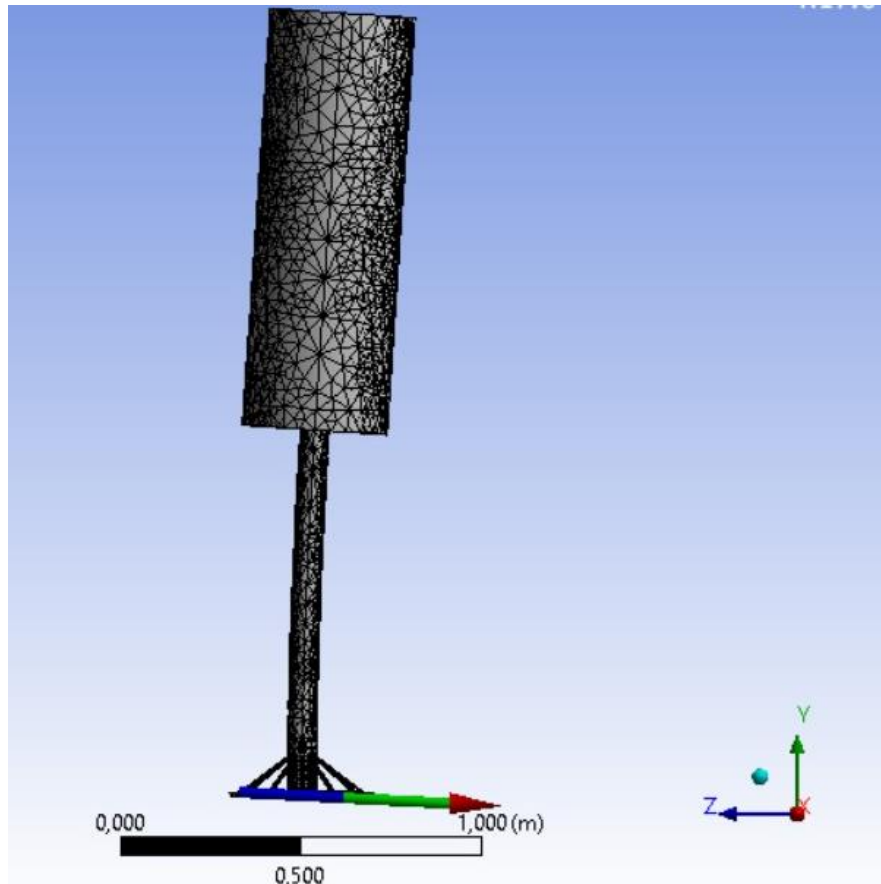
Ilustración 40: La función de la Calculadora de ANSYS *Fluent*. Fuente: Elaboración propia, ANSYS, 2025.



En la **Ilustración 40**, se muestra el apartado de calculadora de funciones de ANSYS *Fluent*, el cual se selecciona tanto la magnitud física a evaluar como la zona del modelo de interés. En este caso, se determinó la fuerza ejercida específicamente sobre la superficie del modelo correspondiente.

Considerando el valor de fuerza obtenido, se procede a implementar el concepto de fuerza par con el fin de trasladar la magnitud de fuerza captada hacia el sensor piezoeléctrico, permitiendo así simular la presión que este componente recibirá en condiciones reales de operación.

Ilustración 41: Fuerza Resultante para la Geometría: Cilindro Rígido sobre Varilla Flexible. Fuente: Elaboración Propia, ANSYS, 2025.



Time [s]	Force Reaction (X) [N]	Force Reaction (Y) [N]	Force Reaction (Z) [N]	Force Reaction (Total) [N]
1	8,1297e-003	-1,3462	-25,548	25,583

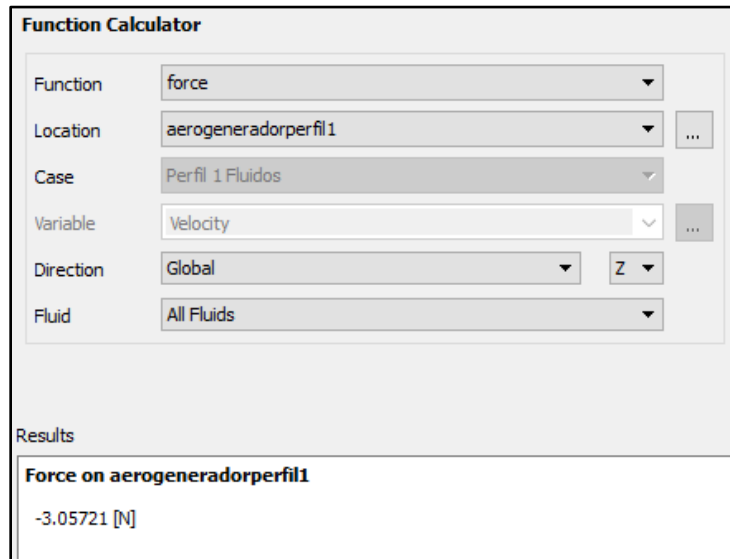
En la **Ilustración 41**, se muestra el vector de fuerza resultante sobre uno de los pulsadores de la base del modelo de aerogenerador tipo A. Se expresa la dirección vista desde el lateral del sólido y las tres magnitudes X,Y y Z, así como la magnitud de fuerza resultante.

Aplicando la ecuación, se obtiene un voltaje de 46.11 [mV] por pulsación. El sistema se mantiene con una frecuencia de 4 HZ lo que es equivalente a 4 pulsaciones por segundo, generando así 184,43 [mV/s] para las condiciones de viento de 4 m/s. El área proyecta de la geometría es de 0,4 m².

7.8. Resultados del Aerogenerador tipo B: Cono Truncado sobre Varilla Flexible

Tras ejecutar las simulaciones de dinámica de fluidos y mecánica, replicando la metodología empleada en las geometrías previas, se obtuvo un valor de fuerza ejercida por el viento sobre el aerogenerador de 3,05721 N.

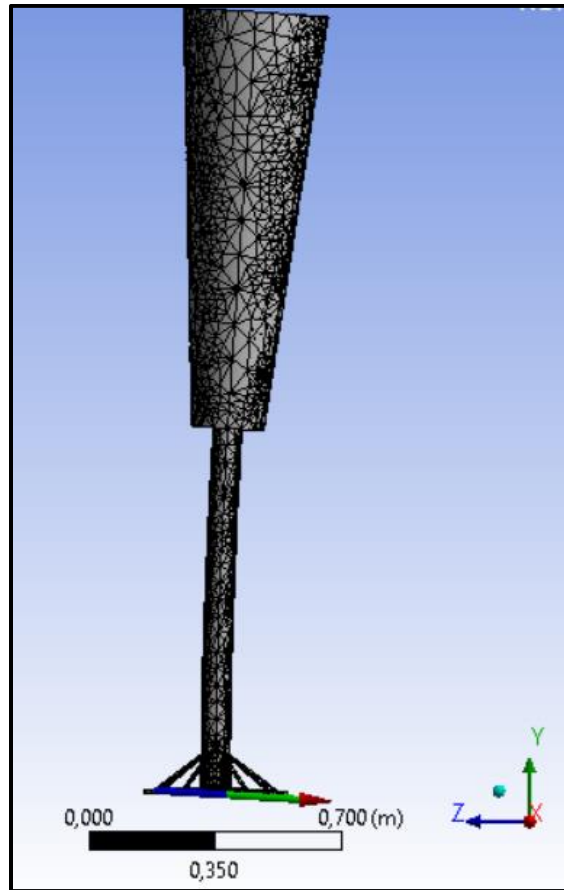
Ilustración 42: La función de la Calculadora. Fuente: Elaboración propia, ANSYS, 2025.



La **Ilustración 42** presenta el módulo de calculadora de funciones del software ANSYS *Fluent*, en el cual es posible escoger tanto la magnitud física como la zona específica de interés para realizar el cálculo correspondiente. En este caso particular, se seleccionó la fuerza ejercida sobre la superficie de la geometría Cono Truncado sobre Varilla Flexible.

Con el valor de fuerza determinado, se procede a repetir el concepto de fuerza par, con la finalidad de transferir dicha magnitud al punto de presión en el sistema piezoeléctrico.

Ilustración 43: Fuerza Resultante para la Geometría: Cono Truncado sobre Varilla Flexible. Fuente: Elaboración Propia, ANSYS, 2025.



Time [s]	<input checked="" type="checkbox"/> Force Reaction 2 (X) [N]	<input checked="" type="checkbox"/> Force Reaction 2 (Y) [N]	<input checked="" type="checkbox"/> Force Reaction 2 (Z) [N]	<input checked="" type="checkbox"/> Force Reaction 2 (Total)
1,	-1,4999e-002	-0,72422	-11,769	11,791

En la **Ilustración 43**, se expone el vector de fuerza resultante sobre uno de los pulsadores del modelo de aerogenerador tipo B. Se expresa la dirección vista desde el lateral del sólido y las tres magnitudes X,Y y Z, junto con la magnitud de fuerza resultante.

Por otra parte, el sistema mantiene una frecuencia constante de 4 Hz, al igual que en los modelos anteriormente analizados, lo que permite alcanzar una tasa de generación de voltaje de 85,12 mV/s bajo condiciones de viento de 4 m/s.

7.9. Comparativa de aerogeneradores

En esta sección se lleva a cabo el análisis comparativo de los resultados obtenidos mediante la simulación de las geometrías: Cilindro Flexible Trucado (modelo básico),

Cilindro Rígido sobre Varilla Flexible (tipo A) y Cono Truncado sobre Varilla Flexible (tipo B), tomando como criterio principal el **potencial eléctrico generado**. Para dicho análisis, se emplearon los valores de fuerza aerodinámica calculados en ANSYS, los cuales se integraron en la ecuación (4), estimando así el potencial eléctrico disponible en el piezoeléctrico utilizado en cada simulación.

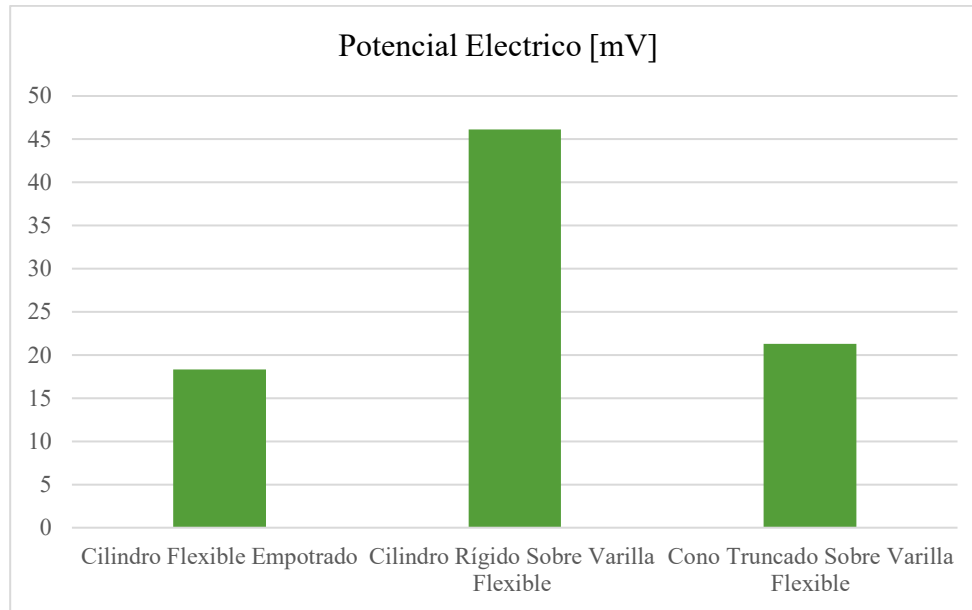
Tabla 3: Comparación de las Geometrías de los Aerogeneradores. Fuente: Elaboración propia, 2025.

Aerogenerador	fuerza ejercida sobre la superficie [N]	Potencial eléctrico [mV]
Básico	2,71637	18,3
Tipo A	4,55127	46,11
Tipo B	3,05721	21,28

La **Tabla 3** sintetiza los valores de fuerza resultante y potencial eléctrico obtenidos para cada una de las geometrías planteadas.

Los datos evidencian una variación considerable en la fuerza transmitida al piezoeléctrico producto de las modificaciones geométricas implementadas en los diseños. Esta variación repercute directamente en el aumento del potencial eléctrico generado. En particular, si bien el aerogenerador tipo A no presenta mayor altura en su centro de presión, su mayor área proyectada, en comparación con la geometría tipo B, compensa dicha diferencia. Como consecuencia, el modelo Cilindro Rígido sobre Varilla Flexible logra alcanzar un potencial eléctrico significativamente superior.

Ilustración 44: Gráfica De Potencial Eléctrico Contra Tipos De Aerogenerador. Fuente: Elaboración propia, 2025.



En la **ilustración 44** se muestran los resultados en términos de potencial eléctrico de los tres aerogeneradores evaluados en este proyecto: Cilindro Flexible Empotrado (Básico), Cilindro Rígido Sobre Varilla Flexible (Tipo A) y Cono Truncado Sobre Varilla Flexible (Tipo B).

Lo anterior evidencia que el potencial eléctrico generado es proporcional a la carga aerodinámica. En los tres modelos analizados se mantuvo constante el mecanismo de captación de energía, consistente en un piezoeléctrico de cuarzo dispuesto estratégicamente para que las cargas inducidas modifiquen el campo eléctrico, permitido así la generación de un diferencial de potencial. En este contexto, una mayor presión ejercida sobre el material piezoeléctrico se traduce en una mayor producción de energía eléctrica.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el aerogenerador tipo A evidenció el mejor desempeño en término de generación eléctrica, alcanzando un valor de 46,11 *mV* por pulso, superando significativamente al tipo B, que registró 21,28 *mV*. Estos hallazgos permiten establecer una base sólida para las conclusiones y recomendaciones que se presentan a continuación.

8. Conclusiones y Recomendaciones

Los resultados obtenidos en las simulaciones permiten concluir que la geometría de los aerogeneradores tipo Vortex influye de manera significativa en la cantidad de energía generada a partir del flujo de viento. Aunque la distancia horizontal se mantuvo constante entre las tres geometrías, la distribución del volumen y la ubicación del centro de presión respecto al eje Y variaron, lo repercutió directamente en el potencial eléctrico obtenido.

En el caso de la geometría Cilindro Rígido sobre Varilla Flexible, si bien se conservó el mismo valor de área que en modelo base, se realizó una redistribución de dicha área. Este cambio modificó la posición vertical del centro de presión, incrementando la fuerza ejercida sobre el piezoeléctrico y, en consecuencia, el potencial eléctrico generado, que alcanzó un potencial de $46,11\text{ mV}$ por pulsación. Cabe resaltar que, en todas las configuraciones evaluadas, la frecuencia de vibración permaneció constante, lo cual explica por qué las modificaciones introducidas no afectaron la dinámica del sistema en términos de su frecuencia inicial.

En conclusión, se cumplieron todos los objetivos planteados en este estudio. Se dimensionaron y caracterizaron tres configuraciones de aerogeneradores tipo Vortex, se analizaron los esfuerzos generados mediante simulaciones computacionales utilizando el modelo de turbulencia $k - \omega$, y se determinó que la configuración **Cilindro Rígido sobre Varilla Flexible (tipo A)** es la más eficiente en términos de generación energética, al alcanzar $46,11\text{ mV}$ por pulsación. Se acuerdo con la frecuencia de funcionamiento del aerogenerador, esto se traduce en un valor aproximado de $184,43\text{ mV}$ por segundo, consolidándose como la opción más prometedora para la generación de energía en condiciones de baja velocidad de viento.

Para futuros estudios se podrían probar diferentes tipos de convertidor energético para evaluar diferentes formas de generación de energía tales como un sistema magnético o hidráulico para maximizar los resultados.

En una altura superior a 10 m la velocidad en la parte superior es mucho mayor que en la parte inferior, esto genera turbulencias, sin embargo, en las formas cónicas con base mayor se reducen las vibraciones considerablemente, por lo cual sería una opción por

considerar para un aerogenerador de mayor escala, teniendo en cuenta la salvedad de realizar un análisis de turbulencia por temas de seguridad.

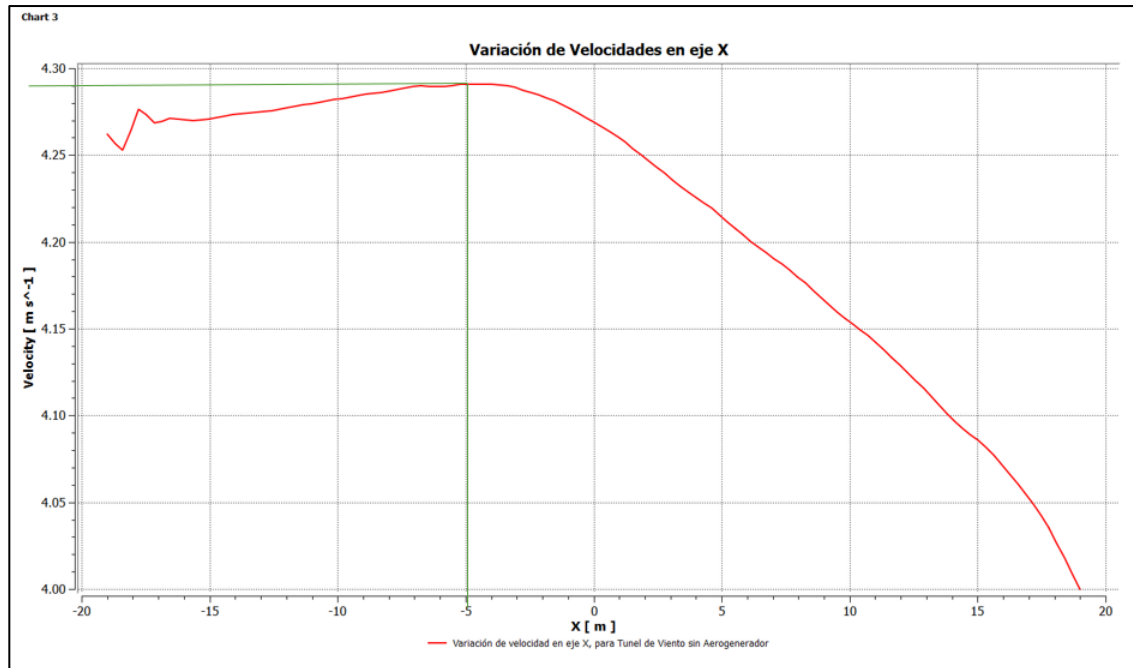
Referencias

- ANSYS, Inc. (2021). *Ansys Fluent Theory Guide*. Canonsburg: ANSYS, Inc.
- AEE, A. E. (24 de 04 de 2020). *UNE*. Obtenido de Revista UNE: <https://revista.une.org/24/une-en-iec-61400-1-referente-para-el-sector-eolico-espanol.html>
- Ambiente, M. d. (1993). *LEY 99 DE 1993*. DIARIO OFICIAL.
- ANSYS, I. (28 de 03 de 2025). *Ansys*. Obtenido de Ansys: <https://www.ansys.com/academic/students/ansys-student>
- Çengel, Y. A. (2006). *FLUID MECHANICS: FUNDAMENTALS AND APPLICATIONS*. New York: McGraw-Hill.
- ciencias, m. d. (3 de 10 de 2001). *minciencias*. Obtenido de mininsterio de ciencias: <https://minciencias.gov.co/node/288>
- CREG. (29 de 06 de 2011). *Gestor normativo*. Obtenido de Gestornormativo: https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_creg_0075_2011.htm
- Forbes Staff. (21 de Enero de 2022). *¡Histórico! Colombia inaugura parque eólico en La Guajira*. Obtenido de Forbes Colombia: <https://forbes.co/2022/01/21/actualidad/historico-colombia-inaugura-parque-eolico-en-la-guajira>
- García, J. (2019). *Simulación del aprovechamiento del recurso eólico urbano con tecnología Vortex Bladeless*. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid.
- Gautschi, G. (2002). *Piezoelectric Sensorics*. Zúrich: Springer.
- Martínez, P. M. (2021). *TRANSDUCTORES PIEZOELÉCTRICOS APLICADOS A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA. ESTUDIO EXPERIMENTAL*. Elche: UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE .

- Mott, R. L. (2006). *Mecánica de Fluidos: Principios y aplicaciones*. Ciudad de México: PEARSON EDUCACIÓN.
- Paéz, D. S. (2021). *Desarrollo de Prototipo de Generación Eléctrica por Medio de Movimientos Oscilantes*. Bogotá D.C.: Universidad Santo Tomás.
- Rao, S. S. (2011). *Vibraciones mecánicas 5 ed.* Pearson Educación.
- República, C. d. (28 de 01 de 1982). *alcaldiabogota*. Obtenido de alcaldiabogota: <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Normal.jsp?i=3431>
- republica, C. d. (13 de mayo de 2014). *secretariassenado*. Obtenido de secretaria senado: http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/ley_1715_2014.html
- Salvador, C. S., Teresa, J. A., Matinez, J. M., Bacasnot, M. C., Vicent, O. K., Cabana, R. J., & Ladaran, W. I. (Agosto de 2017). *ResearchGate*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/321407575_Design_and_Construction_of_Arc_Shaped_and_Disc_Shaped_Pendulum_for_Vortex_Bladeless_Wind_Generator
- SolidWorks Corporation. (28 de 03 de 2025). *solidworks*. Obtenido de solidworks: <https://www.solidworks.com/product/students>
- UNAM. (10 de 10 de 2024). *UNAM. (s.f.)*. Obtenido de Facultad de Ciencias Universidad Nacional Autónoma de México: https://www.paginaspersonales.unam.mx/files/977/2014-01-30-025301_Teoria_de_Errores.pdf
- UPME. (09 de 05 de 2021). *upme*. Obtenido de upme: https://www1.upme.gov.co/Normatividad/155_2025.pdf
- White, F. M. (2012). *Mecánica de Fluidos (7 ed.)*. McGraw-Hill.
- www.dw.com. (16 de Noviembre de 2022). *www.dw.com*. Obtenido de <https://www.dw.com/es/otra-forma-de-energ%C3%ADa-e%C3%B3lica-aerogeneradores-sin-palas/video-63775501>

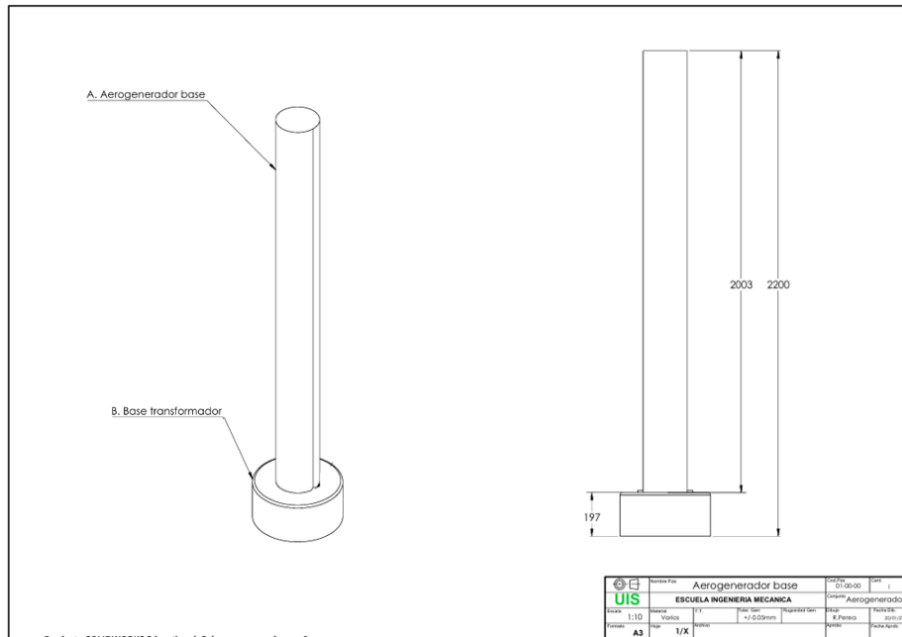
Apéndices

Anexo 1: Variación de velocidad en el eje Z, para el Túnel de Viento sin Aerogeneradores. Elaboración propia tomado de ANSYS®, 2025.

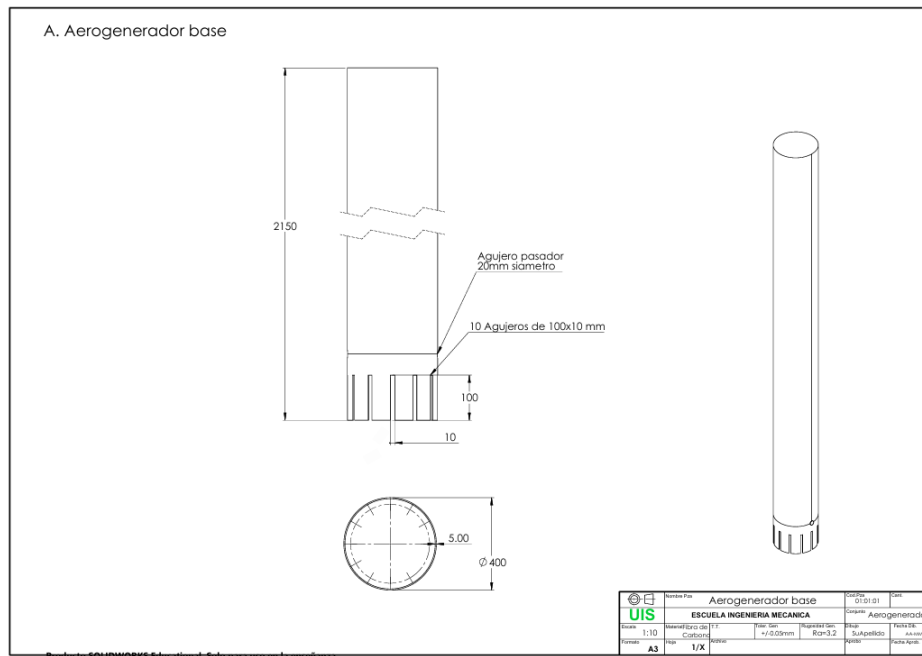


En el **Anexo 1**, tenemos el perfil de velocidad en el eje X a una altura de 2,2 m, altura donde se evidencia que al inicio de la gráfica ($x = -20 \text{ m}$) la velocidad oscila ligeramente hasta estabilizarse alrededor de $4,92 \frac{m}{s}$, a una distancia de 15 m donde alcanza su máximo valor y comienza a decrecer indicando la pérdida de energía del flujo debido a la resistencia aerodinámica del túnel de viento.

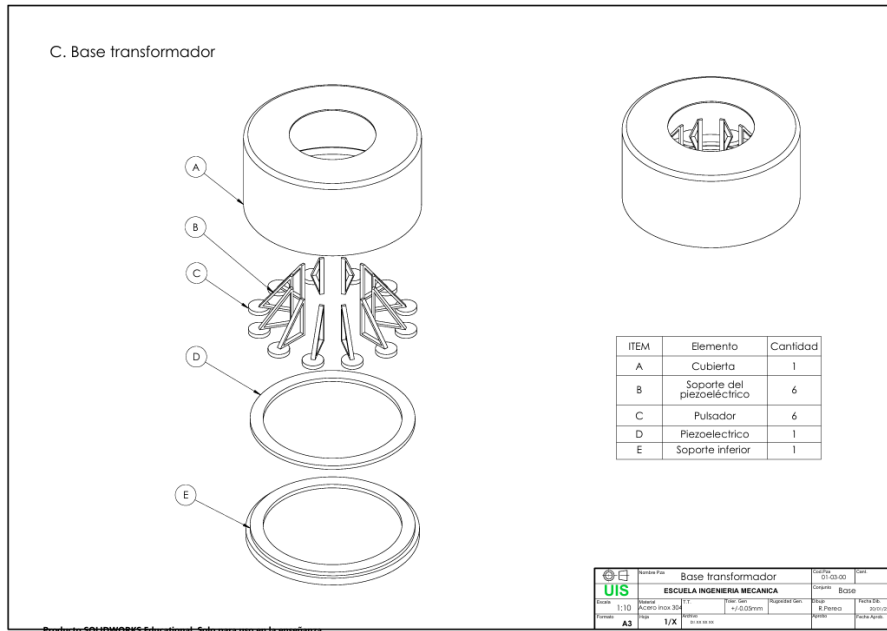
Anexo 2: Vista de conjunto de aerogenerador tipo base. Elaboración propia tomado de SolidWorks 2022



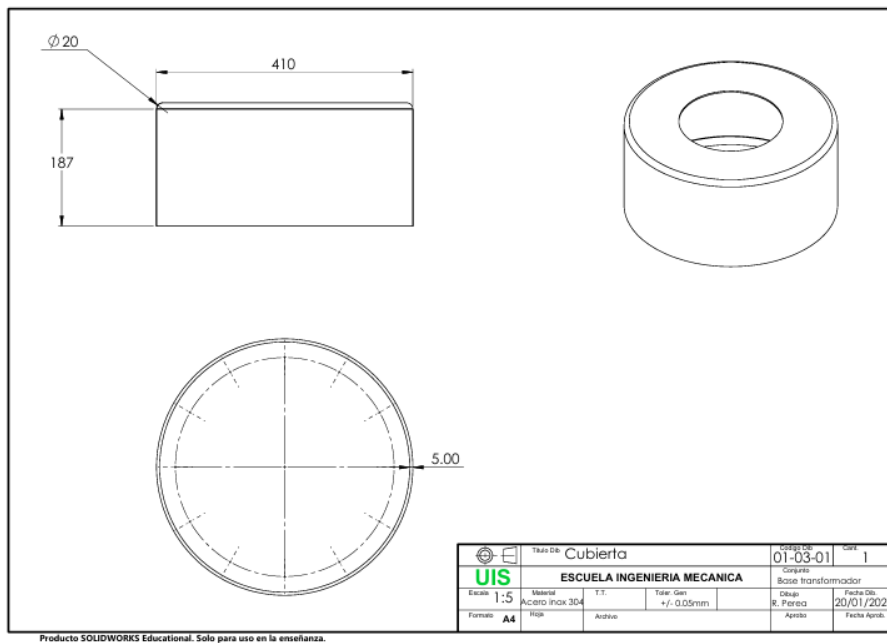
Anexo 3: Vista de subconjunto A de aerogenerador tipo base. Elaboración propia tomado de SolidWorks 2022



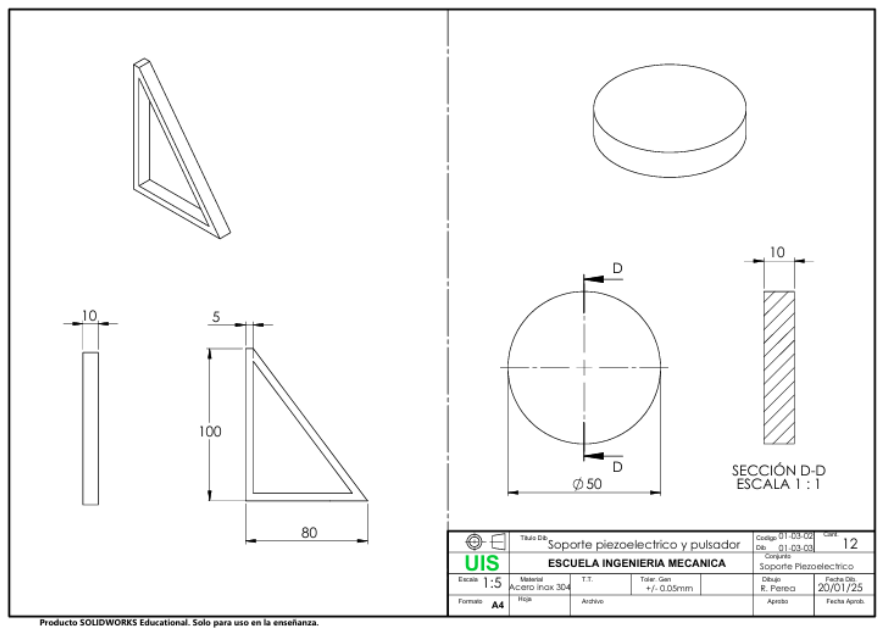
**Anexo 4: Vista de subconjunto B de aerogenerador tipo base. Elaboración propia
tomado de SolidWorks 2022**



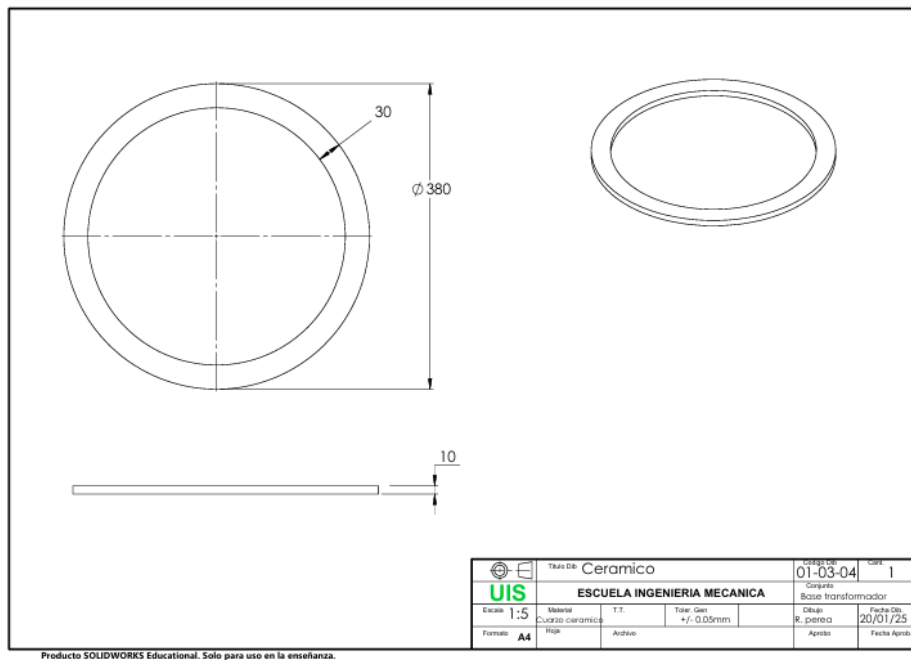
**Anexo 5: Vista del elemento Cubierta del subconjunto B de aerogenerador tipo
base. Elaboración propia tomado de SolidWorks 2022**



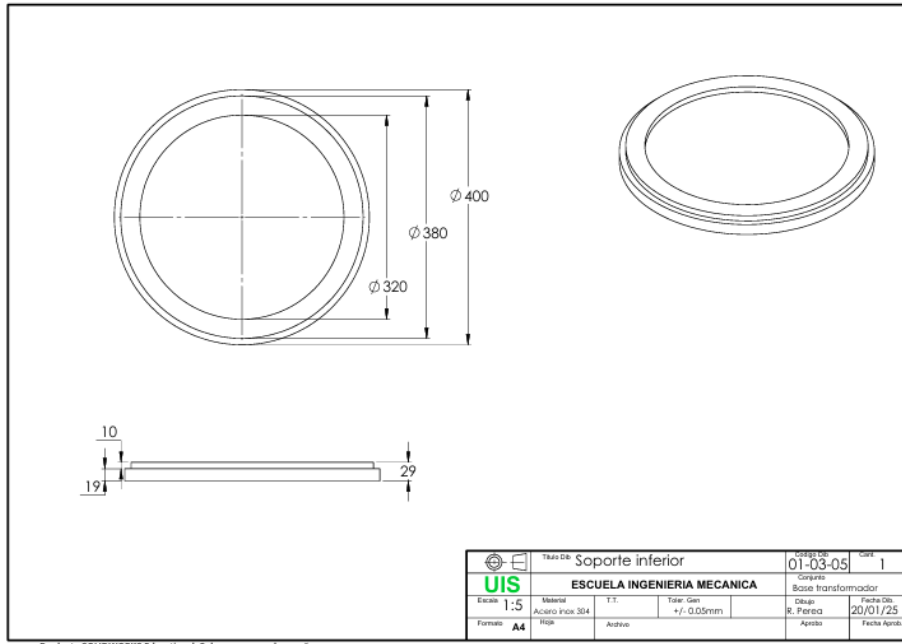
Anexo 6: Vista del elemento Piezoeléctrico del subconjunto B de aerogenerador tipo base. Elaboración propia tomado de SolidWorks 2022



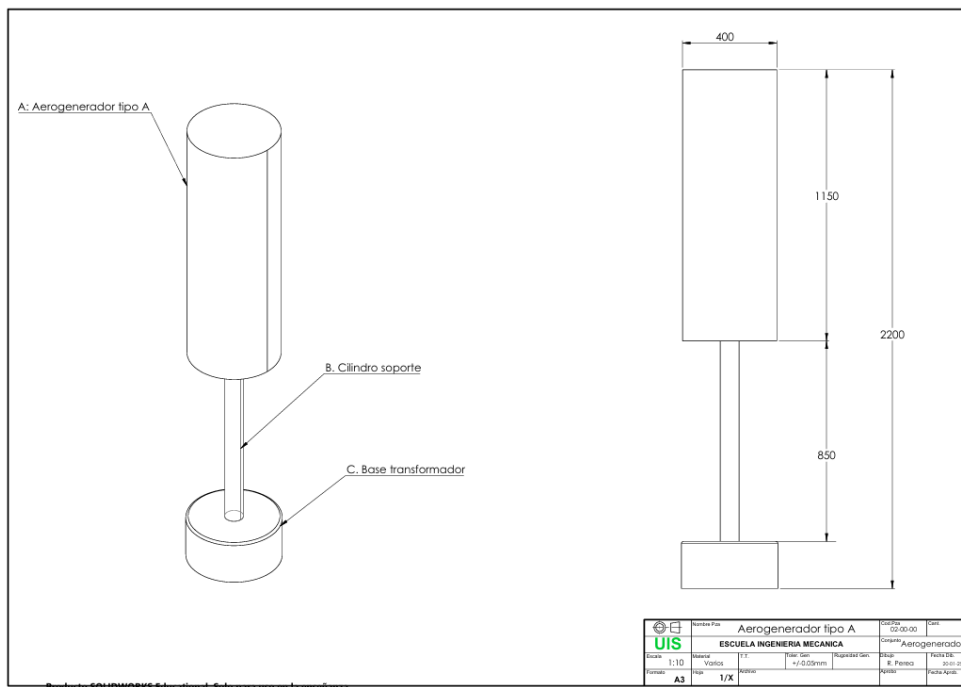
Anexo 7: Vista del elemento Cubierta del subconjunto B de aerogenerador tipo base. Elaboración propia tomado de SolidWorks 2022



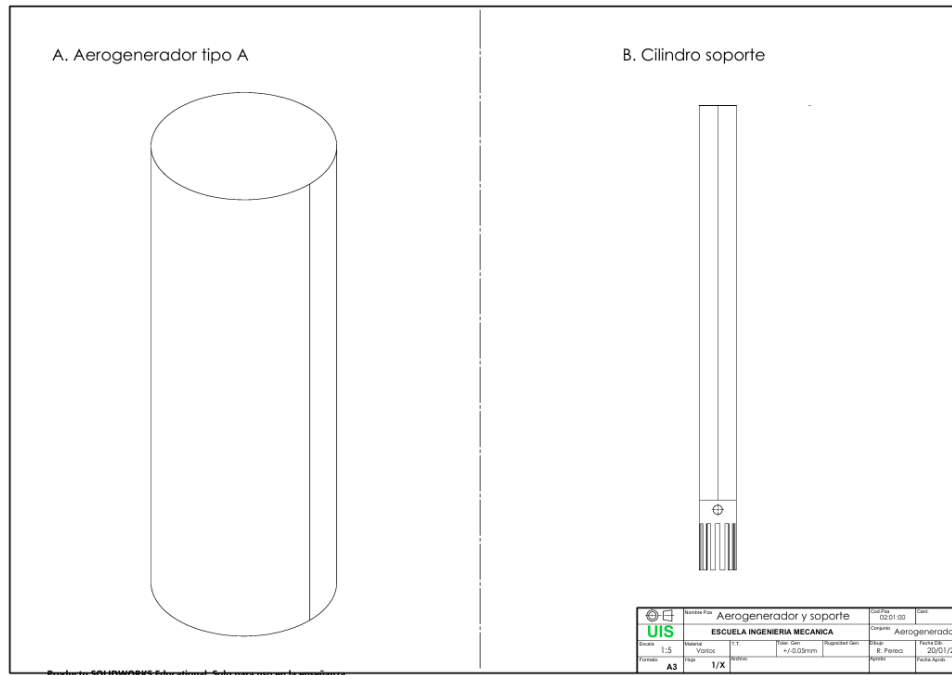
Anexo 8: Vista del elemento Soporte interno del subconjunto B de aerogenerador tipo base. Elaboración propia tomado de SolidWorks 2022



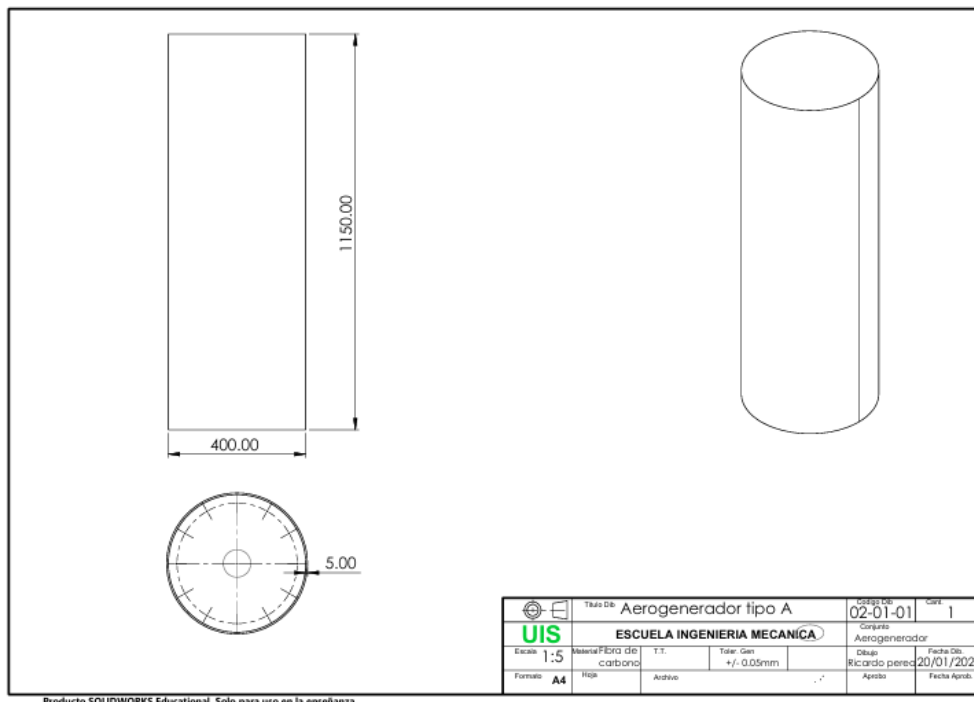
Anexo 9: Vista de conjunto de aerogenerador tipo A. Elaboración propia tomado de SolidWorks 2022



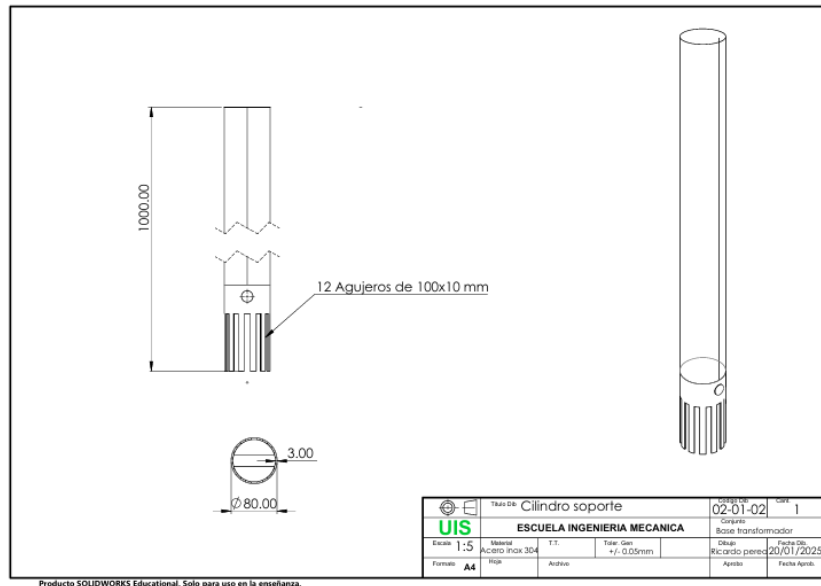
**Anexo 10: Vista general de subconjunto A y B de aerogenerador tipo A.
Elaboración propia tomado de SolidWorks 2022**



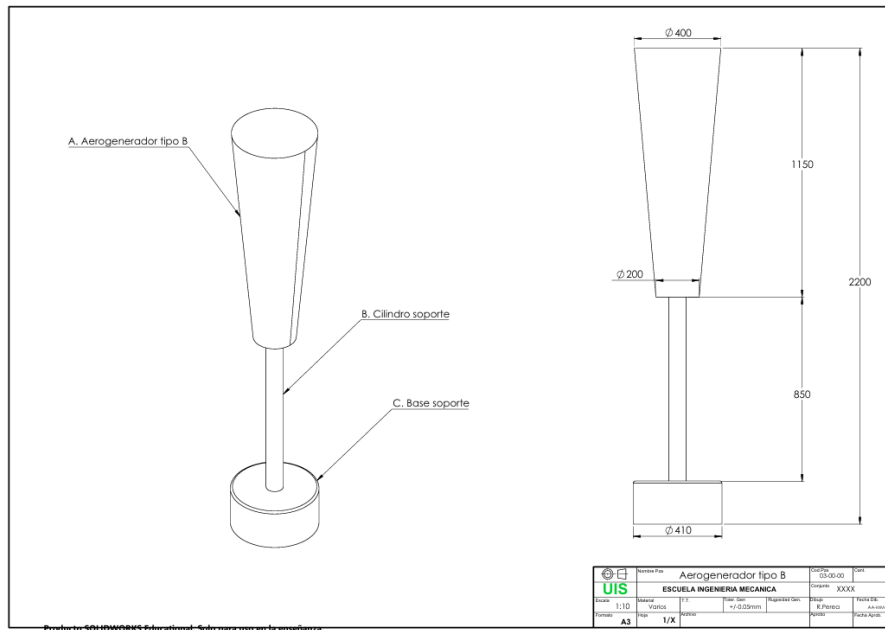
Anexo 11: Vista detalle de subconjunto A de aerogenerador tipo A. Elaboración propia tomado de SolidWorks 2022



Anexo 12: Vista detalle de subconjunto A de aerogenerador tipo A. Elaboración propia tomado de SolidWorks 2022



Anexo 13: Vista de conjunto de aerogenerador tipo B. Elaboración propia tomado de SolidWorks 2022



Anexo 14: Vista detalle de subconjunto A de aerogenerador tipo B. Elaboración propia tomado de SolidWorks 2022

