

Prototipo de generación eléctrica eólica con movimientos oscilantes 1

Desarrollo de prototipo de generación eléctrica eólica por medio de movimientos oscilantes

Sergio David Páez Ortiz

Universidad Santo Tomás

División de ingenierías

Facultad de ingeniería mecánica

Bogotá D.C., 2021

Prototipo de generación eléctrica eólica con movimientos oscilantes2

Desarrollo de prototipo de generación eléctrica eólica por medio de movimientos oscilantes

Sergio David Páez Ortiz

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Mecánico bajo la modalidad solución a un problema de ingeniería

Director

Ing. Jesús Antonio Ramírez Pastrán

Codirector

Ing. Jorge René Silva Larrotta

Universidad Santo Tomás

División de ingenierías

Facultad de ingeniería mecánica

Bogotá D.C., 2021

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Tabla de contenido

	Pág.
Resumen.....	8
Introducción	9
Objetivos.....	16
Objetivo general.....	16
Objetivos específicos	16
Generalidades de aerogeneradores no giratorios	17
Movimientos inducidos por flujo.....	17
Vibración inducida por vórtices (V.I.V).....	18
Régimen hidráulico.....	19
Coeficiente de arrastre (Cd).....	20
Material piezoeléctrico.....	21
Despliegue de funciones de calidad (QFD)	22
Estudios previos	26
Patentes de generadores de energía eléctrica que usan materiales piezoeléctricos	29
Propuesta de alternativas.....	33
Entorno de Simulación CFD.....	40
Geometría 3D.....	44
Mallado del dominio computacional	45

Prototipo de generación eléctrica eólica con movimientos oscilantes5

Condiciones de frontera	48
Modelo de turbulencia	49
Método de solución.....	51
Valor de referencia.....	52
Estudio de independencia de la malla computacional	53
Generación de mallas y estudio de independencia para las dos alternativas preseleccionadas	55
Resultados finales del estudio CFD	57
Entorno de simulación estructural	63
CAD detallado de la alternativa seleccionada	64
Selección de materiales.....	65
Modelo de carga y condiciones de frontera	71
Análisis de convergencia	74
Resultados de simulación estructural.....	80
Conclusiones y recomendaciones	89
Referencias.....	92
ANEXOS	101

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Parámetros para configurar simulaciones CFD.	42
Tabla 2. Características de las mallas usadas para simulaciones CFD.	47
Tabla 3. Diámetros hidráulicos de cada dominio computacional.	49
Tabla 4. Valores de área transversal y longitud para las diferentes alternativas.	52
Tabla 5. Valores de coeficiente de arrastre y fuerza de arrastre.	53
Tabla 6. Valores de calidad para mallas más refinadas.	55
Tabla 7. Resultados de simulación para prototipos 4 y 5.	56
Tabla 8. Valor promedio de coeficiente de fricción para alternativas 4 y 5.	57
Tabla 9. Características de las mallas computacionales usadas para simulaciones estructurales.	70
Tabla 10. Frecuencia de desprendimiento de vórtices para diferentes geometrías.	73
Tabla 11. Deformación total y esfuerzo máximo de Von Mises.	75
Tabla 12. Esfuerzo máximo de Von Mises en los 12 puntos de monitoreo.	78
Tabla 13. Porcentaje de error en los 12 puntos de monitoreo.	79
Tabla 14. Esfuerzos máximos generados en los elementos del aerogenerador.	83

Lista de anexos

	Pág.
Anexo A. Imagen patente US3500451.	101
Anexo B. Imagen patente US4387318.....	102
Anexo C. Imagen patente US4536674.....	102
Anexo D. Imagen patente US5039901.	103
Anexo E. Imagen patente US5548177.....	103
Anexo F. Imagen patente US5552657.....	104
Anexo G. Imagen patente US5621264.	104
Anexo H. Imagen patente US20080277941A1.	105
Anexo I Imagen patente CA2683644.	106
Anexo J. Imagen patente US8102072B2.....	106
Anexo L. Contornos de esfuerzos en los elementos que componen el aerogenerador.	106

Resumen

Se realizó el diseño de un prototipo de generación eléctrica eólica que funciona por medio de movimientos oscilante. A través de la metodología de diseño QFD se pudo analizar la viabilidad del producto, para posteriormente y por medio de una revisión bibliográfica, proponer 5 alternativas del dispositivo generador de electricidad, las cuales fueron estudiadas computacionalmente para predecir el comportamiento de un aerogenerador no convencional funcional mediante movimientos oscilantes, verificando el efecto causado por el aire sobre el cuerpo del aerogenerador en simulaciones fluidodinámicas (Software ANSYS-Fluent) y resistencia estructural de elementos (ANSYS-Mechanical-Structural). Se obtuvo un prototipo de aerogenerador generando un coeficiente de arrastre bajo y buen comportamiento estructural. Se inició mediante varias alternativas conceptuales de aerogeneradores revisando investigaciones previas, luego se realizó un estudio de dinámica computacional de fluidos (CFD) tridimensional y bajo condiciones de flujo estacionario, ya que una condición turbulenta implica mayor costo computacional. Las simulaciones fluidodinámicas fueron realizadas con aire como fluido ($V=7,361$ m/s como velocidad promedio en una flota de transporte masivo de pasajeros en Colombia). Se seleccionó el modelo de turbulencia $k-\omega$ SST (Shear-Stress-Transport) por la naturaleza del fluido, sugerencia de estudios previos en simulación de aerogeneradores sin palas. En el estudio CFD de las alternativas se evidencia que uno de estos prototipos genera un bajo coeficiente de arrastre (0,73) comparadas con otras propuestas, indicando idoneidad de la aplicación futura del aerogenerador. Las simulaciones estructurales fueron realizadas bajo una condición de cargas combinadas, obteniendo un perfil de presión estacionaria sobre las caras del aerogenerador a través de las simulaciones CFD y aplicando un valor de presión oscilante ($F_r=634,167$ Hz). La estructura final del aerogenerador se compone de Nylon-6, acero galvanizado y

estructural. El estudio FEM revela deformación máxima en la placa vibratoria (3,19 mm) permitiendo deformar y generar energía mediante las placas de material piezoeléctrico.

Palabras clave: Vibración Inducida por Vórtices (VIV), Dinámica Computacional de Fluidos (CFD), análisis estructural, Energy Harvesting, piezoeléctrico, aerogenerador no giratorio.

Introducción

Actualmente, la disponibilidad de energía eléctrica es indispensable para el desarrollo de actividades tanto cotidianas como industriales. En la vida diaria, se usa constantemente la electricidad, dentro de los ejemplos más comunes se encuentran: conectar un electrodoméstico para uso inmediato, cargar un dispositivo electrónico, encender las luces de la casa, poner en funcionamiento un ascensor y, calentar el agua de la ducha; en cuanto a las actividades industriales, se encuentra el uso de la corriente eléctrica en actividades como: el suministro eléctrico para la operación de minas, el funcionamiento de campos petroleros y de gas natural o, la operación normal de hospitales o centros de salud.

No obstante, la producción de corriente eléctrica mediante métodos que usan combustibles fósiles generan un alto impacto en el medio ambiente, es así como, en términos de ecopuntos de impacto, desde el cual se tiene una proporción directa, es decir, entre más alto el valor mayor el impacto medioambiental, los sistemas de generación de electricidad basados en combustibles fósiles tradicionales (lignito, carbón, petróleo) superan los 1.000 ecopuntos, por lo que resultan ser los más contaminantes (Sis. Lignito: 1.735 ecopuntos; Sis. Petróleo: 1.398 ecopuntos; Sis. Carbón: 1.356 ecopuntos); y, la generación de energía eléctrica por medio de sistemas de gas natural y nuclear, tienen un impacto ambiental intermedio (Sis. Nuclear: 672 ecopuntos; Sis. Gas natural: 267 ecopuntos) [1]. Por lo anterior, las energías renovables como la solar, geotérmica, hidroeléctrica y eólica, juegan un papel muy importante para dar

cumplimiento a la creciente demanda energética, sin dejar de lado el cuidado del medio ambiente; respecto a esto, se estima que el año 2023 el desarrollo sostenible permita que el potencial de instalación crezca hasta el punto de cumplir con el 30% de la demanda [2].

Existen diferentes formas de generar energía eléctrica sin hacer uso de combustibles fósiles, dentro de las cuales se pueden destacar: la energía eléctrica generada a partir de los rayos del sol, donde existen dos métodos para obtener electricidad, el primera se denomina energía solar y consiste en transformar la energía del sol en energía solar térmica a través de células fotoeléctricas; la otra técnica lleva por nombre energía solar fotovoltaica, en donde se hace uso de paneles solares fotovoltaicos, los cuales cuentan con células de silicio que transforman la luz y el calor del sol en electricidad. Estas tecnologías puede ser implementada tanto a nivel doméstico como en grandes instalaciones [3]; la energía geotérmica, que nace en el interior de la tierra, donde se aprovechan las altas temperaturas de yacimientos bajo la superficie terrestre para la generación de energía a través del calor. La temperatura del magma que se encuentra en las profundidades de la tierra se usa para alimentar una central geotérmica que, comúnmente, implementa un ciclo Rankine en su proceso [4]; la energía hidráulica o hidroeléctrica, la cual es la electricidad generada por medio del aprovechamiento de la afluencia de fuentes hídricas, en donde las centrales hidroeléctricas embalsan el agua de ríos en presas y esta se libera de forma controlada, haciendo que el flujo de fluido mueva una turbina, para posteriormente transformar la energía mecánica en potencial eléctrico por medio de un alternador [5]; la energía mareomotriz, se basa en el aprovechamiento del ascenso y descenso de la marea, el cual es producido por la acción gravitatoria del sol y la luna, para obtener energía eléctrica, por lo tanto, se implementa un generador axial, el cual es una barrera con turbinas que se ubican, generalmente, en las entradas de bahías o lagos [6]; y, la energía eólica que hace uso de la

Prototipo de generación eléctrica eólica con movimientos oscilantes 11

energía cinética del viento, en ese sentido, la fuerza del viento impulsa las palas del aerogenerador (descendiente de los molinos de viento) generando energía mecánica recolectada a través de un eje, la cual se transforma en potencial eléctrico por medio de un alternador [7].

Respecto al último tipo de energía, en los últimos años se han desarrollado diversos dispositivos que sirven para el aprovechamiento de la energía cinética contenida en el viento [8, 9, 10, 11, 12, 13]. Dichos artefactos van desde la macro a la micro generación; sin embargo, los aerogeneradores tripala de eje horizontal son los más usados y, aunque producen una buena cantidad de electricidad, su implementación es un problema debido al gran tamaño de las aspas, la velocidad y la fuerza del viento requerida para hacer girar la turbina. Adicionalmente, el aerogenerador debe encontrarse en una zona de régimen laminar, sumándole a esto la necesidad de un amplio terreno para su ubicación, atendiendo a que debe existir una separación para su correcto funcionamiento [14, 15]. Es así como, hacer uso de este tipo de tecnología en las zonas de consumo se convierte en un reto para las compañías energéticas

Colombia cuenta con una de las zonas con mejor viento de Sudamérica, por ejemplo, en La Guajira se pueden encontrar vientos clase 7 (cerca de los 10 m/s) lo que permite estimar un potencial eléctrico de 21 GW, suficiente para satisfacer la demanda energética nacional, sin embargo, la capacidad instalada en el departamento es de solo 19.5 MW en energía eólica perteneciente principalmente al parque eólico de Jeparachi. No obstante, dada la diversidad topográfica con la que cuenta el país y, su ubicación geográfica estratégica, Colombia se convierte en un país indicado para desarrollar proyectos que aprovechen la energía del viento [14].

En este sentido, el desarrollo de otras tecnologías o dispositivos capaces de aprovechar las corrientes del viento con un menor requerimiento de espacio tiene como fin disminuir el

Prototipo de generación eléctrica eólica con movimientos oscilantes¹²

tamaño de los campos eólicos. Sin embargo, es importante resaltar que la cantidad de energía generada por estos dispositivos es baja en comparación a un aerogenerador de gran escala, aún así, la producción y el uso de energía eléctrica a baja escala permite satisfacer las necesidades energéticas particulares en ambientes urbanos o para el funcionamiento de equipos de bajo consumo eléctrico. Es por esto que los aerogeneradores no giratorios, se convierten en una excelente opción, debido a que usan diferentes movimientos inducidos por flujo para obtener energía mecánica y transformarla en energía eléctrica a través de placas de material piezoeléctrico [16, 17].

Los movimientos inducidos por flujo se producen gracias a la fuerza ejercida por los torbellinos al desprenderse del cuerpo sólido, el movimiento más común y que se encuentra presente en la naturaleza es la vibración inducida por vórtices (VIV), fenómeno que se genera en el obstáculo después de que el fluido choca contra él; específicamente, los vórtices de Von Kármán o calle de Von Kármán son una serie de torbellinos que se forman en el fluido posterior al impacto de este con el cuerpo sólido, el desprendimiento de estos vórtices genera una diferencia de presión, la cual es compensada por el obstáculo con un movimiento opuesto a la separación del vórtice, se provoca así una oscilación constante en el cuerpo de farol [18]. Se encuentra que son numerosas las investigaciones que se realizan con base en este fenómeno, ya sean simulaciones computacionales, pruebas de campo y hasta dispositivos capaces de obtener energía eléctrica de este movimiento [19].

De acuerdo a lo anterior, existen diferentes métodos de investigación relacionados con los fenómenos vibratorios inducidos por flujo y el diseño de aerogeneradores que aprovechan estos movimientos para generar electricidad. Estos enfoques investigativos pueden ser pruebas experimentales, estudios analíticos y simulaciones computacionales [20, 21, 22].

Particularmente, la simulación computacional, la cual hace referencia a la implementación de diversas técnicas matemáticas empleadas en computadores para imitar el funcionamiento real de un dispositivo o sistema, ofrece una serie de ventajas sobre los demás métodos investigativos; cuando se llevan a cabo pruebas experimentales, es necesario tener un prototipo del modelo real de modo que se puedan realizar una serie de ensayos, estudiando su comportamiento a escala. Sin embargo, con la introducción de la computadora digital aumentaron las técnicas de simulación y se generó un nuevo orden en las prácticas de estudios científicos. Hoy en día existen diferentes maneras para realizar el desarrollo de un producto, donde los métodos tradicionales y las nuevas tecnologías se combinan, permitiendo a los ingenieros obtener información que ayuda a tener mayor capacidad de éxito en las distintas fases de diseño de un dispositivo, cada caso de estudio es distinto y en algunas ocasiones resulta más factible hacer el prototipo y realizar las pruebas experimentales, y en otras la simulación computacional es el camino más rápido y económico para llegar al producto final, lo cierto es que un método complementa al otro y al combinarlos se obtiene lo mejor de ambos mundos [23].

En el ámbito de la ingeniería, existen diferentes tipos de simulaciones computacionales, tales como el análisis estructural, el comportamiento de fluidos, las simulaciones térmicas, los estudios electromagnéticos, etc. Dentro de la investigación sobre nuevos dispositivos para obtener energía eléctrica a partir de la energía eólica, es necesario analizar el comportamiento no solo del fluido en el cual está inmerso el artefacto, sino también de la estructura del aerogenerador y el efecto causado sobre los elementos gracias a la presión generada por el flujo de fluido. Desde esta perspectiva, las pruebas experimentales en el túnel de viento requieren la construcción de un prototipo, el cual genera un costo económico adicional que no siempre se tiene previsto, sin embargo, como se mencionó anteriormente estas dificultades son solventadas

por medio de un *software* de simulación computacional. Actualmente, el programa *ANSYS* es una de las herramientas computacionales más potentes que nos permiten analizar el comportamiento de distintos materiales, por medio de este *software* podemos estudiar el movimiento de gases y líquidos a través de su módulo *Fluent CFD*, el cual usa métodos numéricos para facilitar el trabajo de los diseñadores y analistas que se desempeñan en esta rama [24]. De la misma manera, el módulo *Mechanical Structural* permite el análisis de piezas sólidas por medio del método de elementos finitos, el cual, al conectarse con otras cualidades del programa genera mayor realismo del comportamiento y desempeño de las simulaciones realizadas [25].

Es así como, con el objetivo de desarrollar un prototipo de generación eléctrica eólica que funcione por medio de movimientos oscilantes, en este trabajo se analizó la viabilidad del producto por medio de la metodología de diseño QFD, para posteriormente y por medio de una revisión bibliográfica, proponer cinco alternativas de aerogenerador no giratorio; a continuación, se hizo uso del *software ANSYS* en su módulo *Fluent CFD*, en donde se plantearon simulaciones en 3D y bajo un régimen de flujo estacionario para disminuir el costo computacional y el tiempo de análisis, con el fin de determinar cuál de las alternativas generaba un menor coeficiente de arrastre y no afectara de gran manera la aerodinámica de un de un vehículo de transporte masivo de pasajero, se identificó la mejor propuesta y se procedió a seleccionar los materiales para las piezas del aerogenerador teniendo en cuenta su funcionamiento y el proceso constructivo; luego, se realizó el estudio estructural en *ANSYS Mechanical Structural* y se verificó que los elementos del aerogenerador resistieran correctamente la fuerza estática aplicada por la presión y, que ninguno de estos sufriera una deformación no reversible que comprometiera el funcionamiento del aerogenerador, así mismo, se confirmó que el desplazamiento obtenido en la lámina vibratoria fuese suficiente para deformar las láminas de material piezoeléctrico y así generarse la

Prototipo de generación eléctrica eólica con movimientos oscilantes¹⁵

energía eléctrica. Finalmente, para las simulaciones se detalló el proceso de construcción del dominio 3D, el proceso de mallado, las condiciones de frontera, el análisis de independencia de la malla computacional y el análisis de resultados.

Objetivos

Objetivo general

Diseñar un prototipo de generación eléctrica eólica que funcione mediante el uso de movimientos oscilantes.

Objetivos específicos

Proponer diferentes alternativas conceptuales de aerogeneradores teniendo en cuenta la información recolectada en el proceso de documentación.

Seleccionar el prototipo a partir de los resultados obtenidos en el proceso de simulación fluidodinámica realizada en el *software ANSYS Fluent*.

Simular mediante elementos finitos el comportamiento mecánico del prototipo seleccionado bajo condiciones de carga estática.

Desarrollar la ingeniería de detalle del prototipo de generación de energía eléctrica con base a los resultados obtenidos de dinámica de fluidos y elementos finitos.

Generalidades de aerogeneradores no giratorios

Un aerogenerador se define como una máquina capaz de aprovechar y transformar la energía del viento en potencial eléctrico, su común clasificación se debe a la orientación del eje del rotor donde están ubicadas las palas, en este sentido, se pueden encontrar turbinas eólicas de eje vertical y de eje horizontal, siendo los más eficientes y utilizados en la actualidad son los tripala de eje horizontal [26]. Sin embargo, gracias al desarrollo e importancia que se le ha dado en los últimos años a la obtención de energía eléctrica a partir de fuentes renovables, se han presentado diferentes diseños de aerogeneradores, lo que lleva a una nueva clasificación de estos artefactos. Hoy en día, se pueden encontrar aerogeneradores giratorios y no giratorios, estos últimos no poseen un aparato giratorio como rotor o hélice, por lo que hacen uso de fenómenos vibratorios inducidos por flujo para obtener un movimiento oscilante y a través de láminas de material piezoeléctrico se produce electricidad [27].

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 [13].

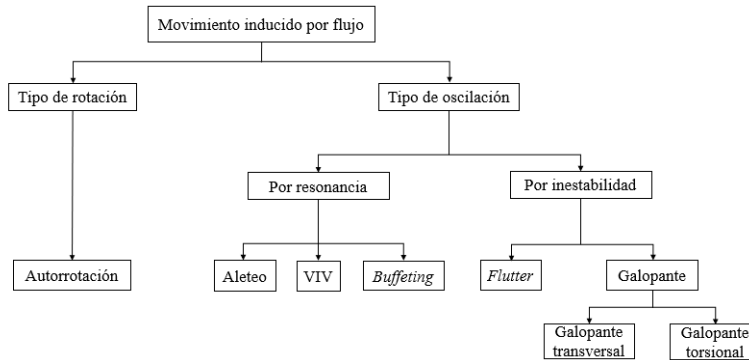
Movimientos inducidos por flujo

Este tipo de movimientos se producen gracias a la fuerza ejercida por los torbellinos al desprenderse de un cuerpo sólido, generalmente son considerados como fenómenos destructivos para las estructuras de ingeniería, sin embargo, los estudios sobre la fenomenología de los movimientos inducidos por vórtices, han mostrado un efecto positivo, refiriéndose a su gran potencial para extraer energía renovable del flujo del fluido. El movimiento generado en el

cuerpo sólido está relacionado con el grado de libertad del mismo; de esta manera, los movimientos inducidos por flujo se clasifican en dos grupos principales, tipo de oscilación y tipo de rotación [16], los cuales se muestran en la figura 1.

Figura 1.

Esquema de tipos de movimientos inducidos por flujo.



Fuente: *Rostami & Armandei* [16].

En este sentido, los movimientos de tipo oscilatorio se pueden clasificar en dos categorías: por inestabilidad, donde las fuerzas generadas por el desprendimiento de los vórtices en el movimiento son variables en el tiempo, lo cual hace aumentar la amplitud de oscilación, siendo los más comunes el *Flutter* y galopante, el primero se produce cuando el dispositivo tiene dos o más grados de libertad, mientras que el galopante, generalmente, se genera en cuerpos que tienen un grado de libertad, este a su vez, se divide en dos tipos: galopante transversal y galopante torsional; y, por resonancia, cuando la frecuencia natural coincide con la frecuencia de las fuerzas de oscilación, se caracterizan en tres tipos de movimientos: *Buffeting*, Vibración Inducida por Vórtices y aleteo [16].

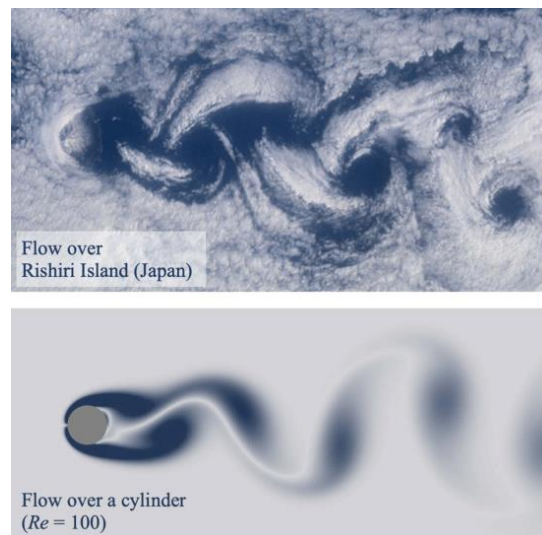
Vibración inducida por vórtices (V.I.V)

El fenómeno de vibración inducida por vórtices se presenta en un obstáculo cuando un flujo de fluido choca con él, generando un efecto en el fluido, el cual se conoce como vórtices de

Von Kármán (*figura 2*). 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 la misma. 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 [18].

Figura 2.

Formación de vórtices de Von Kármán.



Fuente: Kunihiko, et al. [28]

Régimen hidráulico

Un fluido que circular puede estar en dos regímenes básicos: turbulento o laminar. La diferencia entre estos dos radica en el movimiento de las partículas fluidas, las cuales dependen del equilibrio entre las fuerzas de inercias y las fuerzas viscosas que actúan sobre el fluido. El número adimensional que se encarga de expresar este balance se denomina como número de

Reynolds (Re) y es de gran importancia a la hora de definir el régimen de operación de una corriente, por lo tanto, un flujo de fluido que circula al interior de una tubería se puede considerar laminar cuando $Re < 2000$, de transición mientras se mantenga en un rango de $2000 \leq Re \leq 4000$ o turbulento se $Re > 4000$ [29].

El número de Reynolds es muy importante para los estudios del comportamiento de fluidos, particularmente para este trabajo, el número adimensional describe el régimen del flujo de fluido después del impacto contra el cuerpo sólido no aerodinámico; por otro lado, los vórtices de Von Kármán se presentan desde un número de Reynolds superior a 34 y hasta el orden de 1×10^7 , en este sentido, a medida que una partícula fluye sobre la superficie del cilindro, su presión aumenta desde la presión del flujo libre hasta la presión de estancamiento [30]. Para este caso, se debe tener en cuenta la correcta forma de calcular el número adimensional Reynolds debido a que los datos que se pueden obtener del fluido, del flujo y del obstáculo son diferentes, dado que no se habla de un fluido que transita por una tubería. En la ecuación, se relaciona la viscosidad dinámica del fluido (μ), la velocidad de la corriente libre del fluido (V), el diámetro externo del obstáculo (D) y la densidad del fluido (ρ); de esta manera se obtiene el valor de Reynolds que indicará el estado del fluido alrededor del cuerpo obstructor [30].

$$Re = \frac{\rho * D * V}{\mu}$$

Coefficiente de arrastre (Cd)

La fuerza ejercida por un fluido sobre un cuerpo sólido y que tiene la misma dirección del flujo se denomina “fuerza de arrastre” [31]; por lo tanto, todo cuerpo que esté inmerso en un flujo de fluido experimenta el efecto de la fricción, siendo esta, una restricción al movimiento de un cuerpo proporcional al tamaño del mismo. El coeficiente de arrastre es un número adimensional usado para cuantificar la resistencia de un objeto sólido en un medio fluido. Para

efectos de cálculos, se hace necesario tener en cuenta propiedades del flujo, del fluido y de la geometría del cuerpo obstructor [32]; de esta manera, la ecuación para calcular el coeficiente de fricción de un cuerpo es la siguiente:

$$Cd = \frac{2 * Fd}{\rho * U^2 * A}$$

En la ecuación, se define Fd como la fuerza de resistencia, ρ la densidad del fluido, U la velocidad relativa del fluido y A el área, la cual se puede considerar como el área perpendicular al flujo del fluido.

Material piezoeléctrico

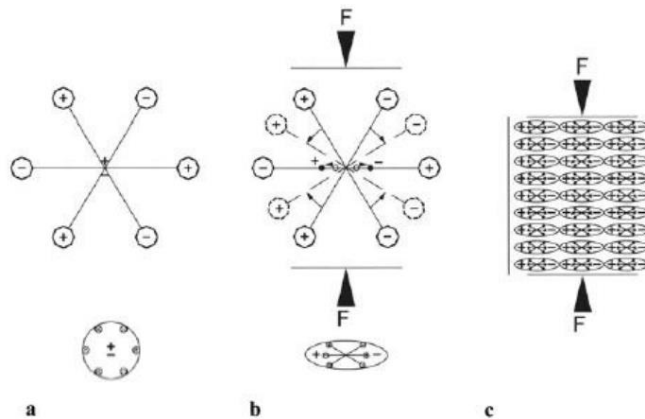
Los materiales pueden caracterizarse eléctricamente por dos propiedades: dieléctrico (aislante) o conductor, sin embargo, existe otra propiedad eléctrica que no es muy común y no está presente en todos los materiales, esta es la piezoelectricidad. El efecto piezoeléctrico es una particularidad presente en ciertos cristales y cerámicos, la cual le confiere la capacidad de generar potencial eléctrico al ser sometido a presión o tensión mecánica [33]. Desde un punto de vista molecular, antes de que el material sea sometido a una presión, los centros de gravedad de las cargas positivas y negativas están alineados, una vez se ejerce cierta tensión, su estructura interna se deforma, desalineando los centros de gravedad de las cargas y generando pequeños dipolos, los polos opuestos enfrentados se cancelan y aparece una distribución de carga en la superficie del material (*figura 3*), de esta manera, el material queda polarizado y se genera un campo eléctrico [34].

En aplicaciones como calentadores, mecheros, plantillas de guitarras eléctricas y pequeños altavoces de sonidos agudos (*tweeters*) se hace uso de minerales, cerámicos y algunos polímeros con propiedad piezoeléctrica para ayudar a cumplir la función a la cual están destinados. Algunos cristales como el cuarzo, el topacio, la turmalina y la sal Rochelle tienen

propiedades piezoeléctricas. De estos el cuarzo es el utilizado comercialmente debido a que todos los demás se obtienen de forma artificial. Si bien los materiales monocristalinos piezoeléctricos se siguen desarrollando, los más usados son los materiales cerámicos policristalinos y los polímeros, aunque para que adquieran propiedades piezoeléctricas primero se les debe hacer una polarización artificial [17].

Figura 3.

Modelo molecular simple de un material piezoeléctrico. a) modelo sin tensión; b) modelo con tensión aplicada; c) distribución de cargas en la superficie.



Fuente: Gómez Molina [35]

Un material piezocerámico se caracteriza por ser rígido y dúctil, por lo que su uso como actuador es ideal, así mismo, su alto módulo de elasticidad facilita el acoplamiento mecánico con la estructura. Los piezopolímeros son más usados como sensores debido a su baja rigidez, lo cual no confiere una solidaridad estructural mínima, además, son muy empleados como sensores de contacto y transductores acústicos en forma de lámina delgada [17].

Despliegue de funciones de calidad (QFD)

Un buen diseño de producto va mas allá que una buena presentación estética, un bajo precio o una funcionalidad excepcional, se debe tener en cuenta la opinión del cliente potencial.

Prototipo de generación eléctrica eólica con movimientos oscilantes²³

El diseño debe traducir las demandas expresadas y latentes por los clientes a las especificaciones del producto, existen diferentes fuentes de información para obtener la opinión del cliente. Sin embargo, la clave está en una buena interpretación de la voz de los usuarios para satisfacer de la mejor manera y en lo posible todas las necesidades y requerimientos expresados.

El despliegue de funciones de calidad o QFD (Quality Function Deployment), es una metodología que permite sistematizar las necesidades del cliente, para llegar a definir las características de calidad del producto, adaptándolo a los requerimientos y expectativas expresadas por los usuarios. Finalmente, se obtiene una idea clara y precisa de cuáles deben ser las especificaciones más relevantes del producto y en qué características se deben enfocar los diseñadores, para conseguir acercarse a las exigencias de los clientes potenciales y ajustar así el producto de modo que los clientes estén satisfechos con el resultado.

Para conocer la opinión, necesidades y requerimientos de los clientes sobre un dispositivo que genere energía eléctrica con la finalidad de ser ubicado en los techos de vehículos de transporte masivo de pasajeros, se realiza un encuesta virtual donde se les pregunta a los usuarios, operarios, personal de mantenimiento e ingenieros, sobre los principales conflictos y problemas presentes en los buses, enfocado en la generación eléctrica para la alimentación de sistemas internos. Adicionalmente, se insinúa la creación de un dispositivo generador de energía eléctrica por medio de métodos amigables con el medio ambiente, se pregunta por la fuente que debería ser usada para obtener el movimiento y generación eléctrica, así como el tamaño del artefacto, almacenamiento de la electricidad y uso de la misma dentro de la operación del automotor. La encuesta fue enviada por medio electrónico a personas y empresas, esperando obtener un buen número de respuestas y una amplia gama de necesidades, requerimientos,

opiniones y exigencias por parte de las diferentes personas que hacen parte del funcionamiento de las flotas de transporte de pasajeros.

Con los resultados obtenidos en la encuesta realizada, se procede a analizar y priorizar cada una de las necesidades y requerimientos, para poder dar solución y respuesta a las problemáticas y opiniones planteadas por los usuarios y personal operativo de los buses. Se ejecuta un despliegue de funciones de calidad (QFD) para satisfacer de la mejor manera lo expuesto por los clientes potenciales en la fase de recolección de la información; se implementa una escala de 1 a 5, donde el número 5 representa un valor importante, el número 3 corresponde a un requerimiento indiferente o no relevante para el diseño y el número 1 se le otorga a una exigencia u opinión que no tiene importancia. En la figura 4 se muestra la matriz de relación entre las necesidades y requerimientos expresados por los clientes, y las soluciones planteadas para dar respuesta a cada una de las exigencias de los usuarios.

Figura 4.

Matriz QFD.

Escala de la matriz: 5: muy importante. 4: importante. 3: indiferente. 2: baja importancia. 1: sin importancia	Importancias de los qué(s)	Requerimientos técnicos - Cómo(s)									
		Aprovechamiento de la energía cinética contenida en el viento para generar energía eléctrica	Implementación de un cuerpo de farol cilíndrico para generar vórtices de Von Kármán	Implementación de láminas de material piezoeléctrico	Ninguna dimensión superior a los 600 mm	La energía obtenida se recolecta en baterías para alimentar los dispositivos electrónicos del autobús	Uso de geometrías aerodinámicas para controlar el coeficiente de arrastre generado	Uso de materiales comunes con una buena resistencia a los cambios climáticos	uso de métodos de fabricación sencillos y conocidos que permitan llegar a las geometrías deseadas	Aplicación de métodos y sistemas de sujeción sencillos y prácticos	Evaluación de importancia de los que
Requerimientos del cliente - Qué(s)											
Genere energía eléctrica sin uso de combustibles fósiles	5	5	5	5	1	3	1	1	1	1	28
Use el fenómeno de Vibración Inducida por vórtices para generar la electricidad	4	5	5	5	1	2	4	1	2	1	30
Se pueda implementar en vehículos de transporte masivo de pasajeros	3	3	2	1	4	5	5	2	4	4	33
Ayude a disminuir el consumo de combustible de los vehículos	5	4	4	4	3	2	3	1	1	1	28
Aea innovador y único	5	2	4	4	2	2	3	2	1	1	26
No le genere inconvenientes a la aerodinámica del vehículo	5	3	3	1	4	1	5	1	1	1	25
Sea resistente a los cambios del clima	4	3	1	4	1	1	1	5	4	3	27
Queda generar electricidad tanto de día como de noche	3	4	4	4	1	3	2	4	2	1	28
Sea fácil de ensamblar	4	1	3	3	4	1	3	3	5	5	32
Sea construido con materiales comerciales	5	1	3	3	1	1	3	5	4	4	30
Estéticamente se vea bien	3	1	2	1	5	1	4	4	5	4	30
Evaluación de importancia de los como		135	155	151	109	88	140	116	117	103	

Fuente: Elaboración propia.

Aplicando la metodología de diseño QFD, se pueden evidenciar los criterios o características más importantes que debe tener el dispositivo generador de energía eléctrica. Se puede resaltar que una de las necesidades más relevantes es que el artefacto genere energía eléctrica sin usar combustibles fósiles, también se sugiere que genere energía tanto de día como de noche, por lo que aprovechar la energía cinética contenida en el viento para generar electricidad resulta ser una excelente alternativa. Los usuarios insinúan que el dispositivo diseñado no afecte la aerodinámica del vehículo, pero se sabe muy bien que cualquier artilugio

que se añada a la carrocería incrementa el coeficiente de arrastre total generado por el automotor, sin embargo, se pueden usar perfiles aerodinámicos que no generen una alta resistencia al paso por el flujo de fluido, sin afectar la generación de vórtices de Von Kármán para aprovechar el movimiento consecuente de la vibración inducida por vórtices. Adicionalmente, como el dispositivo va a estar expuesto a las inclemencias del clima, es de vital importancia construir el aerogenerador con materiales resistentes a los cambios climáticos, pero a su vez deben ser materiales comerciales y los métodos de sujeción usados sean prácticos para un reemplazo rápido y sencillo de los elementos.

Estudios previos

Los antecedentes relacionados con el desarrollo de aerogeneradores diferentes a las turbinas eólicas, para la obtención de energía eléctrica a partir del viento, han llevado a los investigadores a interesarse por el aprovechamiento del fenómeno de vibración inducida por vórtices y, el uso de materiales piezoeléctricos para generar potencial eléctrico a partir de la energía cinética contenida en las corrientes de viento. De esta manera, se puede encontrar gran cantidad de artículos relacionados con el desarrollo de aerogeneradores no giratorios, los cuales usan diferentes fenómenos de movimientos inducidos por flujo para su funcionamiento.

En primera medida, en el año 2012 se publicó el artículo “Tree-inspired piezoelectric energy harvesting”, donde se señaló como objetivo principal recolectar energía eléctrica por medio de materiales piezoeléctricos con dispositivos ubicados de forma similar a un cultivo de árboles. De esta forma, el proyecto estudió la viabilidad de utilizar estructuras cinéticas inspiradas en objetos del entorno para obtener electricidad mediante el balanceo que produce el viento y, de esta manera, alimentar dispositivos eléctricos de pequeña escala. El análisis de resultados se realizó con base en la recopilación de 96 mediciones de potencia piezoeléctrica y,

concluyó que, para generar alta potencia, el espacio entre cilindros y la velocidad del flujo deben ser lo suficientemente grande para que se desarrollen completamente los vórtices de Von Kármán, debido a que una sola calle de Von Kármán es insuficiente. Por tal razón, es necesario azotar los cilindros con una estela completa [35]. En el mismo año, se dio a conocer una investigación enfocada en recolectar energía electromagnética a partir de los vórtices de Von Kármán. Se desarrolló un método analítico y, posteriormente, la fabricación de un prototipo con un volumen de $37,9 \text{ cm}^3$. Con este dispositivo se obtuvo un voltaje de salida de 20 mV y una potencia de $1,77 \mu\text{W}$. Al realizar las pruebas experimentales, se evidenció que el prototipo produce un desplazamiento del imán, gracias a la energía recolectada. Sin embargo, es necesario que la presión oscile con una amplitud de casi 0,3 kPa y una frecuencia de 62 Hz [36].

Más estudios y prototipos se han desarrollado con el fin de obtener energía eléctrica por medio de la vibración inducida por vórtices. Para el año 2014 se dio a conocer la investigación titulada “Modeling and optimization of a vortex induced vibration fluid kinetic energy harvester”. Los resultados del estudio realizado a través de simulación computacional se validan con datos obtenidos en pruebas experimentales. A partir de esto, se comprobó, que al aplicar la estructura optimizada (farol en forma de cubo), la presión inducida por el vórtice podría mejorar 4 veces en comparación con una estructura convencional (farol en forma de cilindro). De este modo se indicó que la presión inducida por el vórtice es un parámetro crucial para el rendimiento del dispositivo; además, los resultados experimentales mostraron que un cuerpo de $33 \text{ mm} \times 12 \text{ mm} \times 33 \text{ mm}$ es capaz de generar hasta 0,4 V a una carga de resistencia de $100 \text{ k}\Omega$ con un flujo de aire a 2 m/s, con lo cual se puede obtener una potencia de $1 \mu\text{W}$ [37].

En 2018 se realizó un estudio de modelado y análisis de un aerogenerador no giratorio, el cual, usando láminas de material piezoeléctrico, logró generar potencial eléctrico bajo el

fenómeno de VIV. El dispositivo desarrollado puede recolectar electricidad a partir de corrientes de viento de baja velocidad, esto debido a la deformación de flexión producida en las láminas piezoeléctricas. La propuesta logró una potencia máxima de $635.04 \mu\text{W}$ a una velocidad de viento de 4.20 m/s [38]. Para este mismo año se publicó el artículo “VIV resonant wind generators”, el estudio se logró enlazar a una iniciativa de la Unión Europea, donde se pretendía crear campos eólicos implementando el dispositivo desarrollado, con el fin de producir bastante energía eléctrica como para abastecer ciudades. En el artículo de investigación se concluyó que la implementación de un dispositivo de generación eólica basado en la resonancia aeroelástica es factible, pues un dispositivo de $2,75$ metros de altura puede entregar 100 W de potencia nominal y un aerogenerador no giratorio de 80 cm es capaz de entregar entre 2 a 3 W de potencia nominal, esto a nivel experimental [13].

En los últimos años se ha impulsado el interés de obtener energía eléctrica por medio de fuentes renovables, por tal razón, los diseños para llegar a este fin se incrementaron. En 2019, el estudio titulado “Harvesting wind energy with bi-stable snap-through excited by vortex-induced vibration and galloping” desarrolló un prototipo que recolectaba energía eléctrica a partir del viento, este diseño consistió en tres vigas en voladizo dispuestas de forma cruciforme, con cuerpo central cilíndrico; los otros dos son, de perfil cuadrado, algo muy diferente al diseño convencional de poste. Además, dispuso de tres imanes, uno que se movía solidario a toda la estructura y dos fijos, esto con el fin de proporcionar estabilidad al dispositivo. Los resultados obtenidos en esta investigación demostraron que el prototipo puede entregar un gran rendimiento si la velocidad del viento está entre 2 m/s hasta 7 m/s [39].

De la revisión bibliográfica se puede concluir que no es necesaria una velocidad de viento muy alta para que un dispositivo que funcione por movimientos oscilantes genere energía

eléctrica, sin embargo, el potencial total entregado es bajo, por lo que este tipo de aerogeneradores serían ideales para alimentar aparatos de bajo consumo eléctrico o almacenar la energía recolectada en baterías o supercapacitores. En cuanto a la geometría, la mayoría de los diseños realizados se basan en un poste de perfil circular posicionado de forma vertical, no obstante, uno de los estudios afirma que un cuerpo de farol de perfil cuadrado es más idóneo, pero requiere de una velocidad de viento más alta; además, hace uso del fenómeno vibratorio galopante, el cual requiere que el dispositivo posea solo un grado de libertad. La mayoría de las investigaciones implementan la simulación computacional para el proceso de diseño de los dispositivos, debido a que este método investigativo permite realizar el estudio en un menor tiempo y tener menor porcentaje de error al momento de realizar pruebas experimentales.

Patentes de generadores de energía eléctrica que usan materiales piezoeléctricos

La obtención de energía eléctrica por métodos convencionales, genera un impacto negativo en el medio ambiente, por esta razón, la producción de potencial eléctrico por medio de métodos amigables con el medio ambiente ha sido un tema de interés para los ingenieros que se dedican a esta área. Se realizó una búsqueda de las patentes de generadores de energía eléctrica existentes, los cuales hacen uso de materiales piezoeléctricos para su funcionamiento y aprovechando principalmente las corrientes del aire y agua. Las imágenes de las patentes mostradas a continuación, se pueden apreciar en la sección de anexos.

Patente US3500451: un generador de voltaje piezoeléctrico adecuado para encender lámparas de *flash* fotográfico de baja impedancia. Se proporciona un elemento de viga en voladizo que consiste en una hoja de material piezoeléctrico adherido a una hoja flexible eléctricamente conductora. Cuando el extremo sin apoyo de la viga se desplaza, la viga rebota momentáneamente tocando un contacto eléctrico en la punta de la viga donde se genera el

máximo desplazamiento. La energía almacenada en la hoja piezoeléctrica se transfiere de manera eficiente a una lámpara de *flash* fotoeléctrica conectada a través del contacto eléctrico. El producto fue patentado por Stephen Yado en 1970 [40] (*anexo A*).

Patente US4387318: un generador de energía eléctrica por medio de material piezoeléctrico que incluye un elemento de flexión piezoeléctrico, medios para montar un extremo del elemento de doblado en una corriente de fluido, medios para impulsar el elemento de flexión piezoeléctrico para que oscile con la energía de la corriente de fluido y medios de electrodo conectados al elemento de flexión piezoeléctrico para conducir la corriente generada por el movimiento oscilatorio del elemento de flexión piezoeléctrico. Inventado por Eric A. Kolm, Henry H. Kolm y patentado el 7 de julio de 1983 [41] (*anexo B*).

Patente US4536674: un generador de energía eléctrica que utiliza un transductor piezoeléctrico montado en una hoja elástica que, a su vez, está montada en un miembro de soporte flexible independientemente. El flujo de fluido contra la cuchilla provoca tensiones de flexión en el polímero piezoeléctrico que produce energía eléctrica. Patente generada por V. Hugo Schmidt y Dr. Bozeman, obtenida el 20 de agosto de 1985 [42] (*anexo C*).

Patente US5039901: un método y aparato para generar electricidad que capitaliza la energía liberada por el vapor a través de una transición repentina a un estado líquido. La corriente eléctrica se genera por elementos piezoeléctricos que están unidos a las paredes de un recipiente equipado con un puerto de salida y dos puertos de entrada. El agua fría ingresa al recipiente por uno de los puertos de entrada. El vapor se introduce en el recipiente por el otro puerto de entrada. El cambio brusco de fase del estado vapor al líquido provocado por el encuentro del vapor con el interior del recipiente produce ondas de choque que cargan

mecánicamente los elementos piezoeléctricos para producir una corriente eléctrica. Patentado por John M. Newbould en 1991 [43] (*anexo D*).

Patente US5548177: un sistema de generación de energía piezoeléctrica para convertir la energía mecánica de las olas en potencial eléctrico. Este dispositivo comprende un flotador y un elemento generador de energía piezoeléctrica suspendido, bajo tensión, entre el flotador y un ancla de fondo. Para evitar un estiramiento vertical excesivo del elemento piezoeléctrico, en respuesta a la presencia de olas excesivamente altas, se acopla un elemento protector entre el flotador y el anclaje inferior para limitar eficazmente la subida del flotador por encima de una altura preseleccionada correspondiente al esfuerzo máximo deseado para el elemento piezoeléctrico. El acoplamiento es automático y ocurre solo en aquellos casos en que el alargamiento del elemento piezoeléctrico se acerca a su cantidad máxima y el desacoplamiento automático ocurre inmediatamente después de que el flotador cae a una altura donde ocurre un esfuerzo no excesivo. Patentado por Charles B. Carroll el 20 de agosto de 1996 [44] (*anexo E*).

Patente US5552657: dispuesto dentro de un flotador en la superficie de una masa de agua hay un elemento piezoeléctrico elástico suspendido verticalmente provisto de una tensión preseleccionada por un peso colgante. El sistema piezoeléctrico funciona como un resorte en espiral con peso que se impulsa a oscilar en respuesta a los movimientos del flotador en respuesta a las ondas superficiales que pasan. Preferiblemente, la frecuencia natural del sistema se selecciona en correspondencia con la frecuencia de las ondas que pasan para hacer que el sistema oscile en resonancia con las ondas que pasan. Además, se proporciona un mecanismo para ajustar automáticamente la frecuencia natural del sistema en respuesta a las condiciones cambiantes de las olas para mantener el sistema en resonancia con las olas. Patentado por Michael Y. Epstein y George W. Taylor en 1996 [45] (*anexo F*).

Patente US5621264: se utiliza una capa flexible de material piezoeléctrico, por ejemplo, un polímero PVDF, conocido para generar energía eléctrica para su uso en una embarcación. En una disposición, la hoja se lamina dentro de un casco artesanal de fibra de vidrio. Se proporcionan electrodos para las principales superficies opuestas de la capa y un material de encapsulación —por ejemplo, fibra de vidrio o una capa del propio polímero— comprende la superficie exterior del casco en contacto con el agua. En agua salada, el agua es un electrodo y se omite una capa encapsulante exterior. Se proporcionan opcionalmente bolsas de aire espaciadas a lo largo de la hoja de polímero para aumentar la flexión de la misma en respuesta al paso del agua, y para inducir turbulencia en el agua que pasa. Láminas alargadas, flexibles y electrificadas que incluyen opcionalmente bolsas de aire, se remolcan detrás o debajo de la embarcación; o se suspenden desde un mástil en la embarcación. Patentado en 1997 por Michael Y. Epstein y George W. Taylor [46] (*anexo G*).

Patente US20080277941A1: dispositivo para la generación de energía eléctrica a partir de un flujo de fluido, y más particularmente para recolectar energía de flujos de fondo de pozo en pozos de petróleo o gas. Comprende un cilindro u otro cuerpo como dispuesto transversalmente al flujo y apoyado en el extremo de un brazo voladizo suspendido sostenido en un soporte fijo con libertad para oscilar en respuesta al desprendimiento de un rastro de vórtice de Von Kármán del cuerpo. El movimiento resultante del cuerpo y del brazo se convierte en energía eléctrica mediante el material piezoeléctrico que se une y se tensiona mediante la flexión del brazo. Se describen otras disposiciones de generación de energía piezoeléctrica e inductiva a partir de la oscilación del dispositivo. Inventado por Adrian Robert Bowles, Stuart John Euton, Jonathan Geoffrey Gore, Richard Carson McBride, Ahmed Yehia Amin Rahman, patentado el 13 de noviembre del 2008 [47] (*anexo H*).

Patente CA2683644: obtención de energía eléctrica a partir de las olas del mar utilizando material dúctil, (polímero electroactivo) tipo SSM (material sintético estirable) que genera electricidad cuando se aplica una carga electrostática al polímero y este se estira. Es un sistema compuesto por un elemento flotante con una parte superior e inferior conectadas por una cantidad de SSM, la parte inferior está a una altura fija del fondo del mar, la parte superior móvil verticalmente para estirar y relajar el SSM. Patentado por Jean, Philippe F, Ardoise, Guillaume A y Pollack, Jack [48] (*anexo I*).

Patente US8102072B2: se proporciona un dispositivo de generación de energía de vibración aerodinámica que incluye, al menos, una riostra y al menos una pala. La hoja está unida a la riostra al menos con un lado. La pala es un elemento de vibración aerodinámico, con al menos un transductor piezoeléctrico incorporado. El transductor piezoeléctrico incrustado en la hoja incluye circuitos relacionados para conectarse eléctricamente a una unidad de carga. Cuando el flujo de aire pasa a lo largo de las superficies de la hoja, la diferencia entre las velocidades del aire en ambos lados de la hoja generará una diferencia de presión en las superficies de la hoja, según el principio de Bernoulli, y la diferencia de presión hace que la hoja se deforme y vibre. Inventado y patentado por Kuei-Sheng Tsou, en enero 24 de 2012 [49] (*anexo J*).

Propuesta de alternativas

A continuación, se presentan cinco diseños conceptuales concebidos en la primera etapa de desarrollo del presente proyecto. Las cinco alternativas hacen uso de un cuerpo de farol de perfil cilíndrico, con un diámetro de 50 mm, a excepción de la primera propuesta, donde el cuerpo solidó posee un diámetro de 70 mm. En cuanto a las láminas vibratorias, todas las alternativas mantienen un espesor estándar de 2 mm; tres diseños ubican el cuerpo de farol de

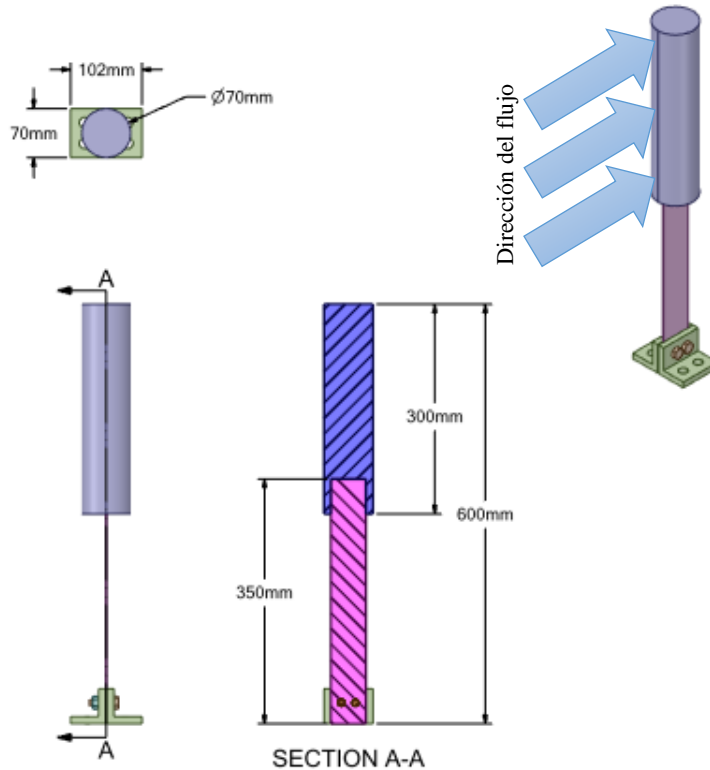
forma vertical. De esta manera, las alternativas se pueden clasificar en alternativas verticales y horizontales, esto de acuerdo con la posición del cuerpo abstruso sólido.

Alternativa vertical 1

Este diseño está conformado por un cuerpo de farol de perfil circular, una lámina vibratoria y un sistema de sujeción para anclar el dispositivo a una superficie. La lámina vibratoria se acopla en uno de sus extremos al cuerpo de farol, posicionado de forma vertical, el cual tiene un diámetro de 70 mm. El otro extremo de la lámina está ensamblado por medio de una unión atornillada a dos perfiles en 'L', los cuales, a su vez, se fijan a una superficie sólida plana y de esta manera anclar el dispositivo al suelo. Las láminas de material piezoeléctrico estarían ubicadas en la lámina vibratoria, en la zona más cercana al extremo acoplado al sistema de sujeción.

Figura 5.

Alternativa vertical 1.



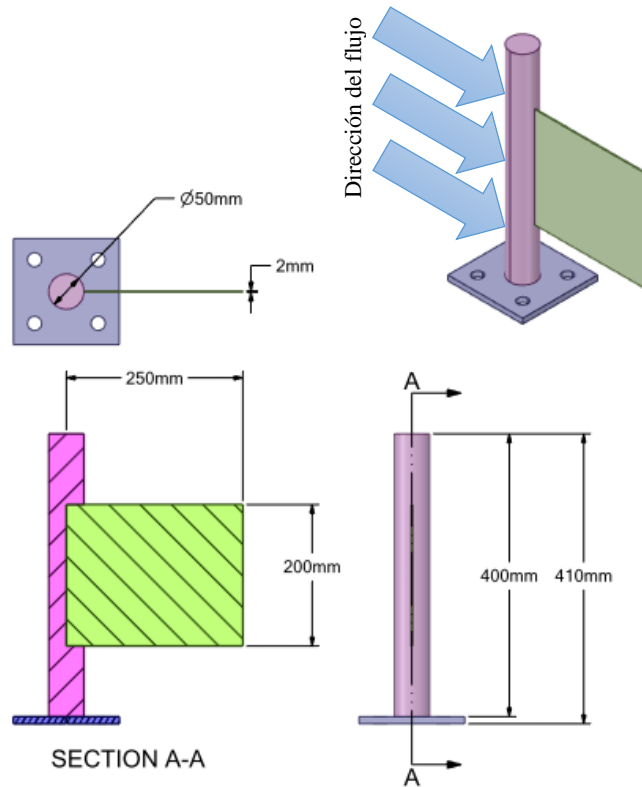
Fuente: Elaboración propia.

Alternativa vertical 2.

El concepto de esta alternativa, está basada en la forma más simple de un dispositivo que funcione por medio de movimientos oscilantes. Un cuerpo de farol posicionado de forma vertical; está sujeto al suelo por medio de una placa acoplada solidariamente a la base del cuerpo sólido; la lámina vibratoria está sujeta al contorno del cilindro. De esta manera, cuando el flujo de fluido choque contra el cuerpo de farol, la presión generada por el desprendimiento de los vórtices de Von Kármán; provocará una deflexión en la lámina, deformando el material piezoeléctrico, ubicado en el acople entre el cuerpo de farol y la lámina vibratoria.

Figura 6.

Alternativa vertical 2.



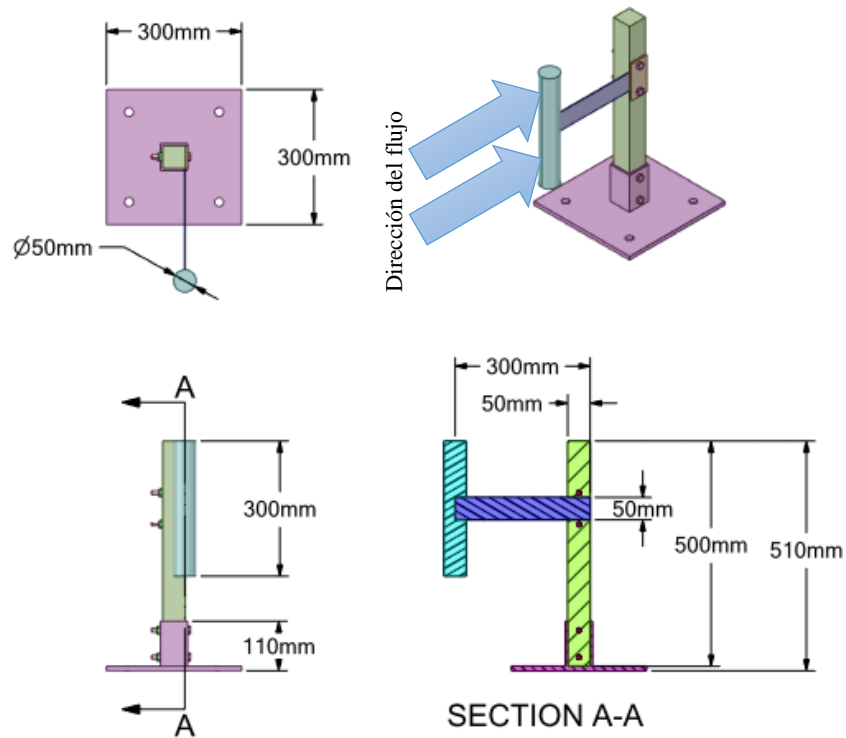
Fuente: Elaboración propia.

Alternativa vertical 3

Esta propuesta cuenta con un mástil, el cual tienen la función de anclar el dispositivo al suelo, adicionalmente; mantiene fijo uno de los extremos de la lámina vibratoria, mientras que el otro extremo está acoplado al contorno del cuerpo de farol, posicionado de forma vertical. Las láminas de material piezoeléctrico estarían ubicadas en la zona más cercana a la unión de la lámina vibratoria con el mástil.

Figura 7.

Alternativa vertical 3.



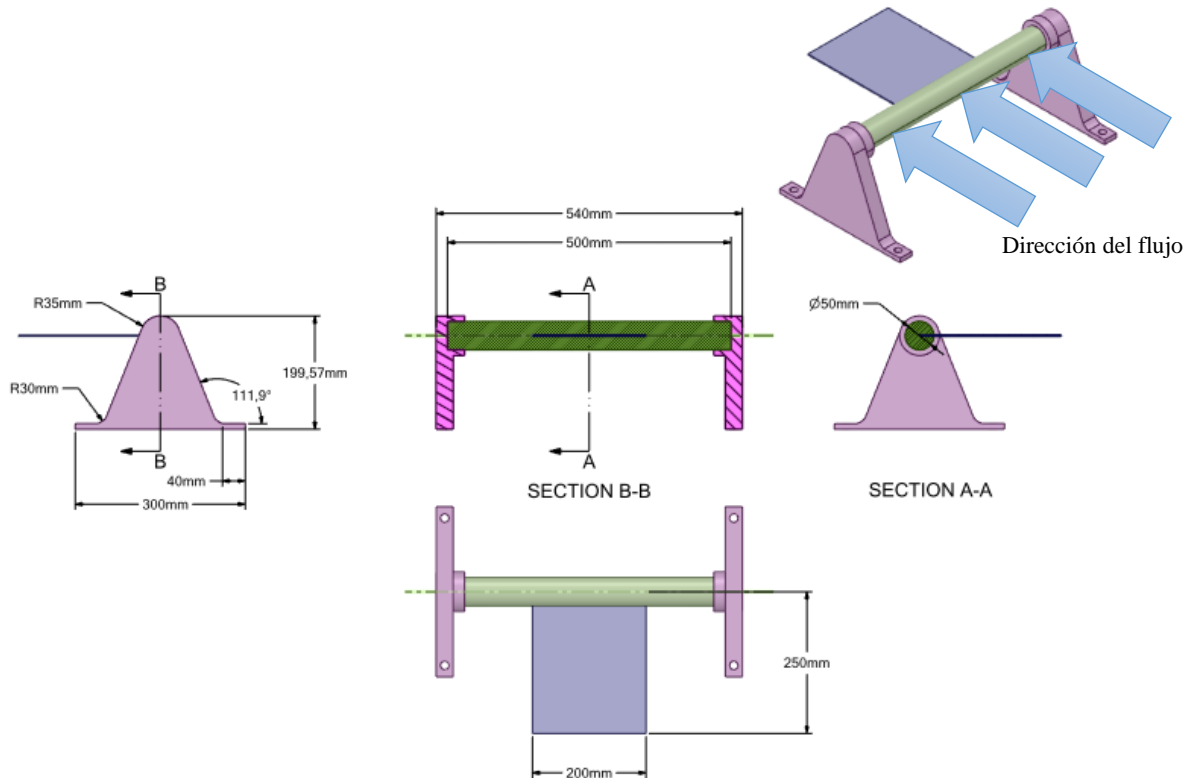
Fuente: Elaboración propia.

Alternativa horizontal 1

Esta propuesta ubica el cuerpo de farol en una posición diferente a los diseños anteriores. Un cuerpo de farol de perfil cilíndrico, posicionado de forma horizontal, está acoplado en sus extremos a dos bases de sujeción, las cuales fijan el dispositivo al suelo. La lámina vibratoria está ensamblada al contorno del cuerpo sólido. El funcionamiento de este dispositivo es similar a la forma de trabajo de la alternativa vertical 2.

Figura 8.

Alternativa horizontal 1.



Fuente: Elaboración propia.

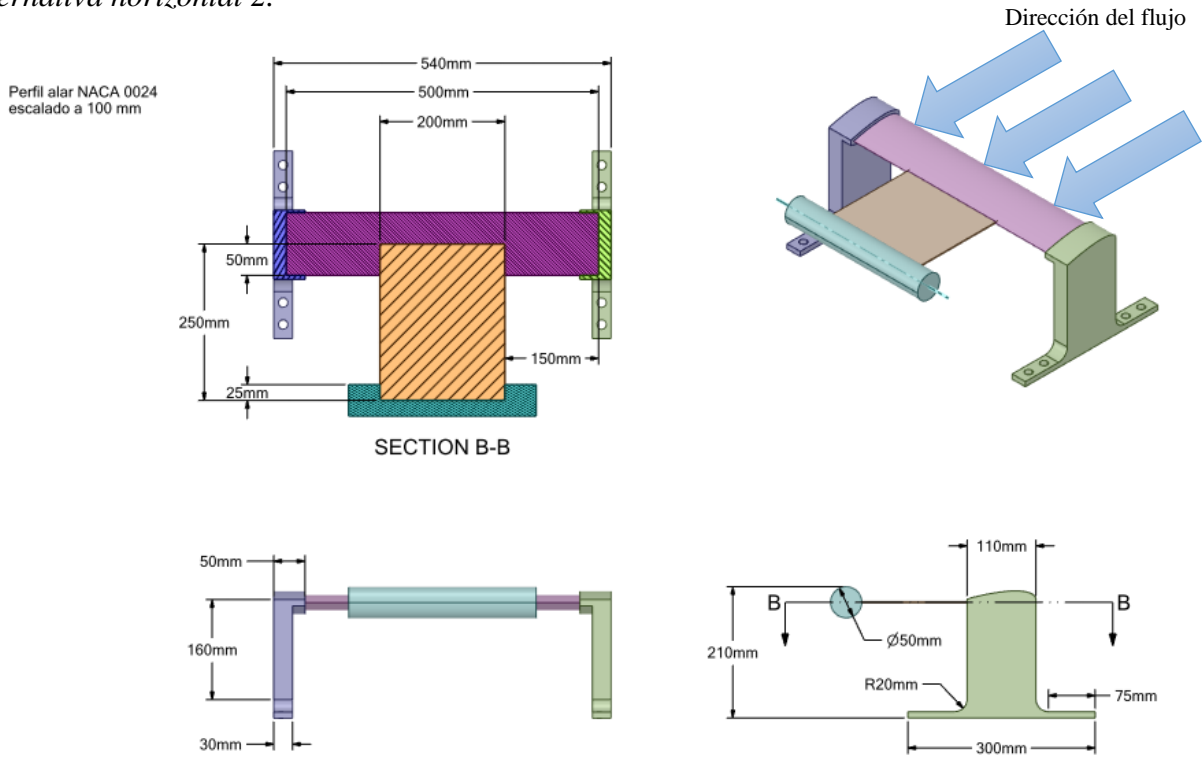
Alternativa horizontal 2

Este diseño conceptual tiene un funcionamiento diferente a las demás alternativas propuestas. En este caso, el flujo de fluido no choca inicialmente con el cuerpo de farol, sino que colisiona con un perfil aerodinámico, haciendo que el dispositivo genere un menor coeficiente de arrastre. Un perfil alar NACA 0024 escalado a 100 mm está sujeto en sus extremos a dos soportes base, anclando el dispositivo a una superficie sólida. La lámina vibratoria está acoplada al perfil alar, manteniendo ese extremo fijo; mientras que en el otro se ubica un cuerpo de farol de perfil circular, posicionado de forma horizontal. El material piezoeléctrico estaría situado en

la zona de unión de la lámina vibratoria con el perfil alar, debido a que en ese acople se presentaría la mayor deformación, pues la presión generada por el desprendimiento de los vórtices haría oscilar el cuerpo sólido provocando una deflexión en la lámina vibratoria.

Figura 9.

Alternativa horizontal 2.



Fuente: Elaboración propia.

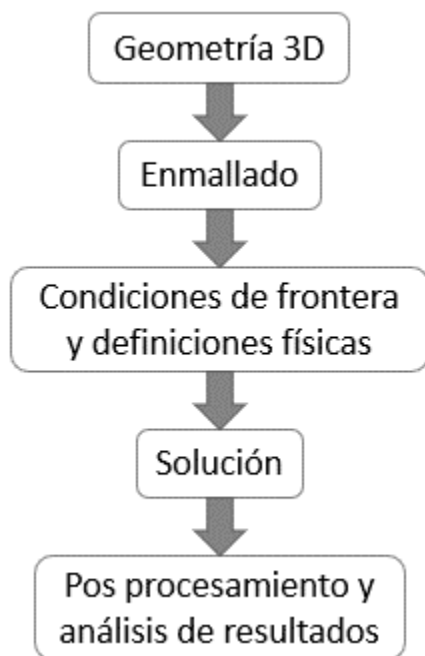
Entorno de Simulación CFD

Antes de referirse al entorno de simulación, se debe conocer el significado de la simulación CFD. La simulación fluidodinámica o CFD por sus siglas en inglés (Computational Fluid Dynamics) nace por la combinación de dos disciplinas: mecánica de fluidos y cálculo numérico, esta área del conocimiento tiene como fin el análisis de sistemas relacionados con el flujo de fluidos [50], con base en ecuaciones de Navier-Stokes se puede conocer el comportamiento del fluido en distintos puntos del sistema, para esto, se hace necesario dividir el flujo en pequeños bloques y analizar el comportamiento en los vértices de cada uno, es decir, en lugar de trabajar con un número infinito de moléculas de fluido, se tratan un número finito de celdas. Este acto recibe el nombre de discretización y permite intercambiar el dominio continuo por un dominio discreto; de esta manera, se pueden aplicar las diferentes ecuaciones originadas en la mecánica de fluidos en cada uno de los volúmenes de control y generar así un sistema de ecuaciones, el cual es resuelto por medio de métodos numéricos [50].

El uso correcto de un *software* de simulación requiere conocimientos previos sobre el fenómeno a estudiar, así como la aplicación de una metodología, la cual facilite y controle el proceso a realizar. En el presente proyecto se hizo uso de una metodología basada en los componentes básicos que debe tener todo software de simulación CFD, así como lo indica *Charles Hirsch* en el libro *Numerical computational of internal and external flows* [51].

Figura 9.

Diagrama de Flujo de una simulación computacional



Fuente: Elaboración propia

En cumplimiento de la metodología planteada, se hace uso de las alternativas propuestas en la sección propuesta de alternativas para crear los dominios computacionales 3D, los cuales serán usados para llevar a cabo las simulaciones CFD. Se hace necesario realizar una limpieza de la geometría, donde se eliminan algunos componentes de los CAD de las alternativas, esto con el fin de facilitar el proceso de mallado del dominio computacional. En el mismo módulo de diseño de ANSYS se nombran las paredes del volumen de control para, posteriormente, introducir las condiciones de frontera, se hace uso del módulo de mallado de ANSYS Fluent para realizar la discretización de cada uno de los dominios computacionales, se controla el tamaño mínimo y máximo de las celdas, así como la adición de un *Inflation* para facilitar y aproximar los cálculos de los efectos presentes en la capa límite. Una vez se ha configurado todo lo referente a la geometría, se procede a insertar las condiciones de frontera y la definición de la física implícita

para un flujo de fluido externo. Se trabaja con aire como fluido a una velocidad de 7,361 m/s (26,5 km/h), debido a que esta es la velocidad promedio de la flota de Transmilenio y como el dispositivo final pretende ser instalado en los techos de vehículos de transporte masivo de pasajeros, este valor permite estudiar el comportamiento del flujo de fluido bajo condiciones de operación [52], adicionalmente, se define una presión de salida de 0 kPa, esto para que el software realice los cálculos en unidades absolutas teniendo como base una presión ambiente de 1 atm. Los parámetros usados para configurar las simulaciones CFD se pueden apreciar en la tabla 1, sin embargo, se hablará de cada uno de los pasos de la metodología con más detalle en las siguientes secciones de este documento.

Tabla 1.

Parámetros para configurar simulaciones CFD.

Tipo de Geometría	Volumen de control 3D
Discretización	Malla no estructurada <i>Inflation</i> de 10 capas
Modelo	Estacionario basado en presión y formulación de velocidad absoluta.
Gravedad	9,81 m/s
Modelo de viscosidad	k-omega SST
Fluido	Aire
Viscosidad del fluido	1.7894 e-05 kg/m*s
Velocidad de entrada	7,361 m/s
Presión de salida	0 KPa
Intensidad turbulenta	10 %
Diámetro hidráulico	

Paredes volumen de control	Diámetro hidráulico para tubería rectangular totalmente llena.
Paredes aerogenerador	Paredes simétricas.
Valores de referencia	Pared estacionaria.
Método de solución	Área transversal de la propuesta (perpendicular al flujo de fluido) Longitud del aerogenerador en dirección 'Z' Velocidad libre del fluido (7,361 m/s)
Numero de iteraciones	<i>Coupled</i> de segundo orden. 4000

Fuente: Elaboración propia

Se hizo uso de valores de referencia para analizar los resultados obtenidos en las diferentes simulaciones. El coeficiente de arrastre es el criterio que se tiene para la selección de la propuesta, pues, como se pretende implementar este dispositivo en los techos de vehículos de transporte masivo de pasajeros, para este caso de estudio se trabaja con datos de la operación de la flota Transmilenio de la ciudad de Bogotá, se hace necesario que el artefacto no afecte demasiado la aerodinámica del autobús, el coeficiente de arrastre varía dependiendo de la sección transversal del obstáculo contra el que choca el flujo de fluido; se tiene como referencia el coeficiente de fricción generado por las áreas transversales más comunes, las cuales se pueden apreciar en la siguiente figura.

Figura 10

Valores de referencia para el coeficiente de arrastre

Shape	Drag Coefficient	Shape	Drag Coefficient
Sphere	0.47	Long Cylinder	0.82
Half-sphere	0.42	Short Cylinder	1.15
Cone	0.50	Streamlined Body	0.04
Cube	1.05	Streamlined Half-body	0.09
Angled Cube	0.80		

Fuente: D. Hofmeister Ruiz [53].

Geometría 3D

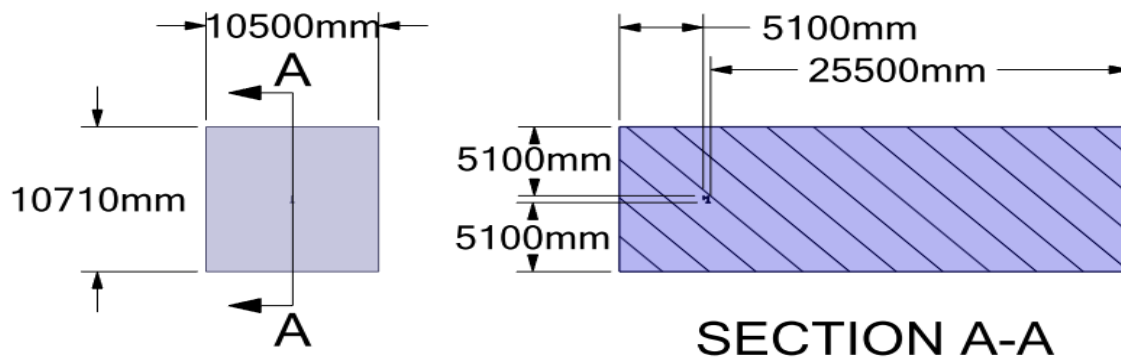
Para llevar a cabo el análisis de la física a través de *ANSYS Fluent*, es necesario el uso de un volumen de control, el cual representa la zona por la cual fluye el fluido. En este caso de estudio, se trabaja con un flujo externo, dado que se quiere observar el comportamiento del fluido después de que este choque con un cuerpo sólido y analizar el coeficiente de fricción generado por el aerogenerador. Inicialmente, se realiza un proceso de limpieza de la geometría, donde el objetivo es eliminar agujeros, elementos y demás características de los sólidos CAD mencionados en la sección de propuestas de alternativas. Esto se hace con el fin de facilitar la discretización del dominio computacional; una vez terminada esta actividad, se procede a usar la herramienta *Enclosure* del módulo de diseño de *ANSYS (SpaceClaim)* para crear una caja alrededor del aerogenerador, dejando un hueco en el centro del volumen de control con la geometría exacta de la propuesta trabajada.

Es necesario el uso de un dominio computacional grande, para que las líneas de flujo se desarrollen completamente posterior al choque del flujo de fluido contra el cuerpo sólido del aerogenerador [51], se tiene en cuenta la dimensión más grande del aerogenerador para construir el dominio rectangular, de esta manera, la profundidad de la geometría para las simulaciones

CFD es 60 veces la medida indicada que, para el caso de las alternativas verticales es la altura y para las alternativas 4 y 5 es el ancho, lo alto y ancho del dominio computacional es 20 veces mayor a la dimensión mayor de cada aerogenerador.

Figura 11

Dimensiones dominio computacional alternativa vertical 3



Fuente: Elaboración propia

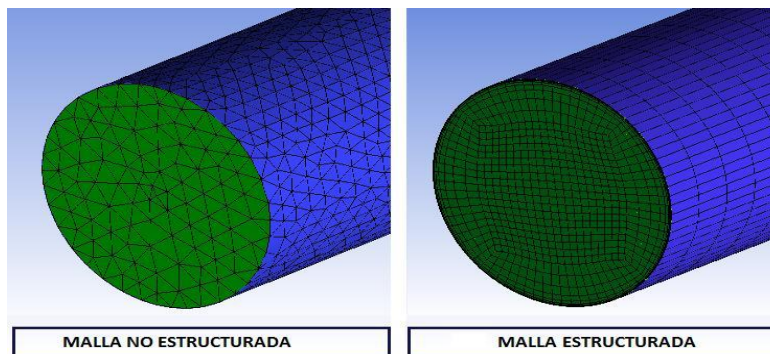
Mallado del dominio computacional

Antes de hablar de la discretización de los volúmenes de control para las simulaciones CFD realizadas en el presente proyecto, se deben conocer los tipos de mallas existentes y cuál de estos fue usado para llevar a cabo el estudio de dinámica de fluidos. El método de volúmenes finitos aplicado a simulación CFD hace uso de diversos algoritmos y aproximaciones para resolver las ecuaciones de Navier-Stokes, uno de los aspectos más importantes es la forma en la que se realiza el mallado del dominio computacional, donde existen dos tipos de mallas computacionales, una malla estructurada es aquella que posee un patrón en forma de red, con elementos de igual tamaño y regularidad; se usa fundamentalmente en elementos cuadriláteros

(2D) o hexaédricos (3D), sin embargo, la creación de este tipo de discretización impone unas fuertes condiciones sobre el contorno del dominio, por lo que en muchos casos presenta una baja calidad o no se puede realizar [54]. Por otro lado, existen las mallas no estructuradas, las cuales no presentan un patrón de conectividad predeterminado, esta libertad de conexión hace posible la discretización de cualquier dominio, por lo cual es más usada que la malla estructurada [54], en la figura 12, se puede apreciar la diferencia entre una malla estructurada y una no estructurada.

Figura 12

Comparación entre una malla no estructurada y una estructurada



Fuente: Utrilla Noriega [55]

La discretización del dominio computacional se realizó en el módulo de mallado de *Fluent*, haciendo uso de una malla no estructurada, pues la forma de las diferentes alternativas planteadas genera una irregularidad del volumen de control; por lo cual, una malla estructurada resultaría irrealizable. Para generar el mallado de los dominios computacionales se controlaron y modificaron los valores del tamaño mínimo y máximo de las celdas; también se insertó un *Inflation* en la zona más cercana al aerogenerador con el fin de aproximar y representar los fenómenos presentes en la capa límite, definiendo un número de capas igual a 12, los demás ítems se dejaron por defecto. Adicionalmente, se insertó un *Improve Volume Mesh* con el fin de mejorar la calidad ortogonal de la malla.

Siguiendo con el estudio, se llevó a cabo un análisis de independencia de malla computacional, esto para verificar y validar que los resultados no dependen de la discretización ejecutada para el volumen de control, de esta manera, se generaron tres mallas variando el número de celdas (70.000, 150.000 y 300.000). En cuanto a la calidad de la discretización del dominio, se tuvo en cuenta que el *Skewness* máximo no superase el valor de 0,9 y la calidad ortogonal mínima fuese superior a 0,2.

Los resultados correspondientes en el proceso de mallado se representan en la Tabla 2, denotando características importantes para cada malla, como el número de elementos, el *Skewness* máximo y la calidad ortogonal mínima.

Tabla 2.

Características de las mallas usadas para simulaciones CFD.

Prototipo	Número de elementos	Características	
		<i>Skewness</i> máximo	Calidad ortogonal mínima
1	72074	0,7851507	0,21
	150019	0,8333468	0,20
	302227	0,825277	0,20
2	81547	0,7032191	0,30
	157979	0,7130316	0,29
	300484	0,7658989	0,23
3	82635	0,7843858	0,22
	151739	0,7722771	0,23
	300675	0,8444277	0,20
4	82112	0,7575105	0,24
	151606	0,824298	0,22
	302459	0,7627559	0,24
5	80224	0,7942853	0,21
	150678	0,7725155	0,23
	290989	0,8388458	0,20

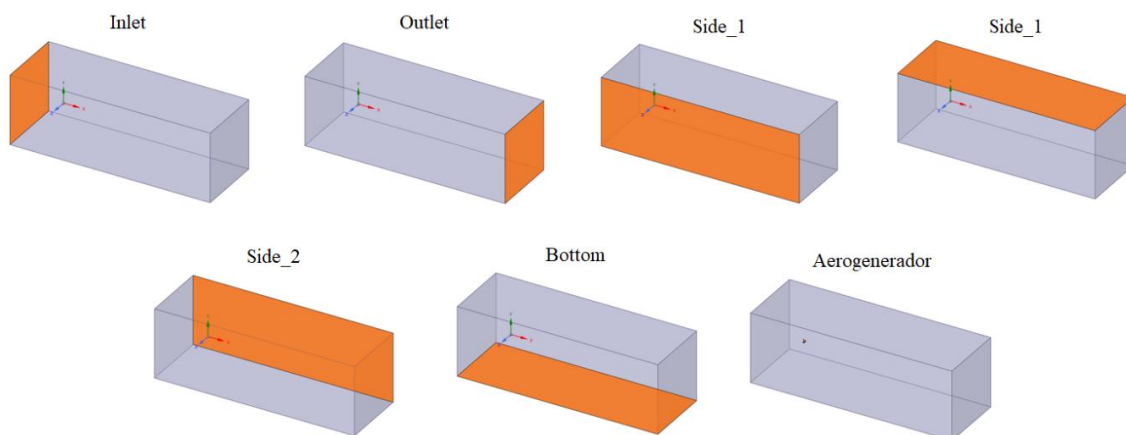
Fuente: elaboración propia

Condiciones de frontera

Durante el proceso de creación de las geometrías se realizó la definición de las condiciones de contorno, en la figura 13 se puede apreciar dicho nombramiento que consiste en una entrada de velocidad, una salida de presión y cuatro paredes fijas; en la cara izquierda del volumen de control se definió una velocidad de entrada (*Velocity Inlet*) con un valor definido en 7,361 m/s, la cual es la velocidad promedio de la flota de TransMilenio [52], en el costado derecho está la salida del volumen de control (*Pressure Outlet*), donde se usó un valor uniforme de presión relativa de 0 Pa., las velocidades se dejaron con gradiente 0 respecto al campo interno, para las paredes laterales, el techo y el piso del volumen de control se definió una condición de simetría (*Symmetry*). Por último, para las paredes de la turbina se consideró una condición de pared sin deslizamiento (*Wall*), cabe aclarar que todas estas condiciones escogidas se deben a que se trabaja con un fluido incompresible debido al bajo número de Mach y que *ANSYS Fluent* las recomienda.

Figura 13

Condiciones de contorno para simulaciones CFD



Fuente: elaboración propia

Para la velocidad de entrada y la presión de salida, se hizo necesario configurar la intensidad turbulenta, la cual se define en 10% debido a que se está trabajando con un flujo externo y el manual de ANSYS recomienda este valor en casos similares [56]. Adicionalmente, se calculó el diámetro hidráulico, el cual corresponde al diámetro hidráulico de un ducto de perfil rectangular completamente lleno, la ecuación 3 muestra la forma de calcularlo y la tabla 3 contiene los valores calculados para cada volumen de control.

$$D_h = \frac{2ab}{a + b}$$

Tabla 3.

Diámetros hidráulicos de cada dominio computacional.

Prototipo	Altura (a) [mm]	Base (b) [mm]	Diámetro hidráulico (Dh) [mm]	Diámetro hidráulico (Dh) [m]
1	12600	12102	12345,980	12,345
2	8610	8350	8478,0070	8,478
3	10710	10500	10603,9604	10,603
4	10050	10500	10270,07299	10,270
5	10050	10500	10270,07299	10,270

Fuente: elaboración propia

Modelo de turbulencia

Un flujo de fluido se caracteriza por tener campos de velocidad fluctuantes los cuales provocan cambios en el flujo de fluidos, comprometiendo así la cantidad de fluido transportado, debido a que estas fluctuaciones pueden ser de pequeña escala y alta frecuencia, resulta muy complejo resolver computacionalmente los cálculos prácticos de ingeniería, sin embargo, las ecuaciones gobernantes se pueden promediar en el tiempo, en conjunto o manipular de otra manera para eliminar el cálculo de pequeña escala, lo que resulta en un sistema de ecuaciones

más sencillo y que requiere de un menor costo computacional para ser resuelto [57]. No obstante, el sistema de ecuaciones modificado contiene variables desconocidas, por lo que se necesitan modelos de turbulencia para determinar estas variables en términos de cantidades conocidas, de tal modo, el módulo *Fluent* de *ANSYS* ofrece ciertos modelos de turbulencia como: Spalart-Allmaras, $k-\epsilon$ estándar, $k-\epsilon$ realizable, $k-\omega$ estándar, $k-\omega$ SST, modelos de tensión de Reynolds (RSM), modelos de simulación de remolinos independientes (DES), modelos de simulación de remolinos grandes (LES) y modelos Navier-Stokes promedio de Reynolds (RANS) [58]. No existe un modelo universalmente superior a los demás, pues la elección del modelo de turbulencia depende de consideraciones tales como la física incluida en el caso de estudio, la práctica establecida para una clase específica de problema, el nivel de precisión requerido, los recursos computacionales disponibles y la cantidad de tiempo disponible para la simulación.

Para el presente proyecto, se implementó el modelo de turbulencia $k - \Omega$ *Shear Stress Transport* ($k-\omega$ SST), el cual es un modelo que combina las ecuaciones de los modelos $k-\epsilon$ y $k-\omega$. Esto permitiría un mejor análisis del fenómeno lejos y cerca la capa límite, debido a que emplea las ecuaciones del modelo $k-\epsilon$ en las zonas de corriente libre y las del modelo $k-\omega$ en las regiones cercanas a las paredes, haciendo que su formulación elimine algunas debilidades de estos dos modelos y permitiendo una simulación de mayor precisión [58], resulta adecuado usar este tipo de modelo de turbulencia debido a que el estudio realizado pretende analizar el coeficiente de fricción generado por las diferentes alternativas propuestas. Ahora, al ser un fenómeno que se desarrolla en la capa límite, es necesario un modelo que permita una mayor proximidad y precisión en esta zona, sin restarle importancia a lo que esté ocurriendo en las regiones más alejadas del dispositivo de generación eléctrica.

Método de solución

Existen distintos métodos para solucionar las ecuaciones que gobiernan la física implícita en cada uno de los problemas de ingeniería, así como las ecuaciones de Navier-Stokes que permiten replicar estos casos mediante un programa de simulación computacional. Mediante el software *ANSYS*, se pueden solucionar problemas basados en presión, resolviendo el flujo de manera separada o acoplada a través de cuatro algoritmos de acoplamiento de presión-velocidad: *SIMPLE*, *SIMPLEC*, *PISO* y *Coupled* [59]. Estos algoritmos se basan en un enfoque predictor-corrector, a excepción del esquema acoplado (*Coupled*), para hacer cumplir la conservación de masa y obtener el campo de presión; de tal manera que existen dos tipos de algoritmos para solucionar el flujo, de manera segregada o separada y de forma acoplada, este último ofrece una serie de ventajas sobre el enfoque segregado [59].

El esquema *Coupled* tiene una sola fase robusta y eficiente para resolver flujos de estado estacionario con un desempeño superior en comparación con los esquemas de solución segregados, adicionalmente, para flujos de estado transitorio, se recomienda usar un enfoque acoplado cuando la calidad de la discretización es deficiente o se utiliza un paso de tiempo grande. De otra parte, el algoritmo acoplado mejora significativamente la velocidad de convergencia en comparación con un esquema separado, sin embargo, el requisito de memoria para solucionar este algoritmo es mayor [59]. A partir de las ventajas antes mencionadas, se tomó la decisión de trabajar con un algoritmo acoplado basado en presión, para solucionar el flujo del presente caso de estudio, principalmente porque se está trabajando con un flujo de fluido en estado estacionario; además, el hecho de obtener la convergencia en un menor tiempo resulta favorable para el proyecto.

Valor de referencia

El *software ANSYS Fluent* permite obtener variables de campo como el coeficiente de arrastre, sustentación y momento. Estos datos se obtienen con base en una serie de valores de referencia que deben ser ingresados por el usuario. El programa requiere datos referentes al dominio computacional como el área y longitud, así como características del flujo y del fluido. Los valores ingresados para realizar las simulaciones CFD de este proyecto se pueden apreciar en la tabla 4. Para este caso, se modificaron el área, la longitud y la velocidad de entrada, la cual es igual a la velocidad libre del viento (7,361 m/s). Los demás valores se dejaron como *Fluent* los recomienda, pues son características propias del fluido con el cual se está trabajando.

Tabla 4.

Valores de área transversal y longitud para las diferentes alternativas.

Prototipo	Área [mm²]	Área transversal [m²]	Longitud [mm]	Longitud [m]
1	23060	0,023060	70	0,07
2	21500	0,021500	325	0,325
3	36500	0,036500	450	0,450
4	25000	0,02500	275	0,275
5	19800	0,019800	325	0,325

Fuente: elaboración propia

Para este caso se desea conocer el coeficiente de arrastre generado por cada uno de los aerogeneradores, así como la fuerza de arrastre, con el fin de comparar los resultados, analizar cuál alternativa genera menor coeficiente de arrastre y tomar la decisión del aerogenerador con el que se va a trabajar en el estudio estructural.

Estudio de independencia de la malla computacional

El estudio de independencia de la malla computacional se debe realizar minuciosamente, puesto que se está poniendo en juego la confiabilidad de la simulación. Es bien conocido que las simulaciones computacionales implican el uso de un computador con excelentes características con el fin de obtener resultados precisos y confiables, al aumentar el número de elementos o celdas en la discretización de una geometría, la obtención de resultados pretende ser más exacta. Sin embargo, esto requiere de un costo computacional alto y un almacenamiento bastante amplio, por esto, se debe realizar un estudio de la malla computacional con el fin de encontrar un equilibrio entre el costo computacional y la precisión de los resultados, este análisis se realiza generando una serie de mallas con aumento progresivo en el número de celdas y estudiando una variable propia de la simulación.

Para efectuar el estudio de independencia de la malla computacional, se realizó un control a una o diversas variables con el fin de encontrar una tolerancia en el estudio. Como se mencionó en la sección de mallado del dominio computacional, se generaron tres mallas diferentes para cada una de las alternativas propuestas, para lograr la independencia de los resultados las mallas creadas, se monitorearon el coeficiente de arrastre y la fuerza de arrastre generada por la alternativa en cada una de las tres simulaciones, se define un porcentaje de error del 5% en los resultados; los valores obtenidos se pueden evidenciar en la tabla 5.

Tabla 5.

Valores de coeficiente de arrastre y fuerza de arrastre.

Prototipo	Numero de celdas	Coeficiente de arrastre	Fuerza de arrastre (n)	Porcentaje de error (%)
1	72074	0,88862342	0,68007496	
	150019	0,91841861	0,70287761	3,24418404

Prototipo de generación eléctrica eólica con movimientos oscilantes54

	302227	0,85733172	0,65612702	6,6513123
	81547	1,1357425	0,8103975	
2	157979	1,040314	0,74230549	8,4023007
	300484	0,95758213	0,68327298	7,95258643
	82635	1,3743665	1,6648501	
3	151739	1,3790341	1,6705044	0,33846879
	300675	1,368756	1,6580538	0,74531152
	82112	0,9181909	0,76182067	
4	151606	0,80841802	0,67074236	11,9553439
	302459	0,83699756	0,69445473	3,41453086
	80224	0,83581199	0,54922907	
5	150678	0,7981823	0,52450184	4,50217159
	290989	0,7429799	0,48822722	6,91601405

Fuente: elaboración propia

No es necesario calcular el porcentaje de error de la fuerza de arrastre y del coeficiente de fricción por aparte, ya que estas dos variables manejan una misma proporcionalidad y por lo tanto el valor del porcentaje de error será el mismo.

Para el análisis de convergencia, se considera un porcentaje de error del 5% entre los resultados de las diferentes mallas, de esta manera se puede evidenciar que, hasta el momento, ninguna simulación llega a una independencia de la malla computacional, sin embargo, en este punto, y con los resultados obtenidos, se decidió continuar con las simulaciones solo para el prototipo 4 y 5, debido a que la alternativa 5 generaba un coeficiente de arrastre inferior a los demás aerogeneradores propuestos y que la alternativa 4 no solo tiene similitud geométrica con el prototipo 1, sino que también generan un coeficiente de fricción similar. Además, las alternativas 4 y 5 pueden compararse mejor al tener la misma orientación del cuerpo de farol.

Con lo dicho anteriormente, se procede a realizar un nuevo mallado del dominio computacional para los prototipos 4 y 5. Esta vez se generan mallas más refinadas con el fin de buscar la independencia de la malla computacional.

Generación de mallas y estudio de independencia para las dos alternativas preseleccionadas

En el estudio de independencia de la malla computacional realizado en la sección de mallado del dominio computacional, se puede evidenciar que los resultados de las diferentes mallas tienen un porcentaje de error superior al 5%, por lo tanto, se hace necesario generar unas mallas más refinadas. Como los prototipos 4 y 5 generan un coeficiente de arrastre menor que las demás alternativas, se tomó la decisión de seguir el estadio CFD con la geometría de estos dos aerogeneradores.

Las nuevas mallas creadas para los dominios computacionales tienen un número de celdas aproximadas a 450.000 y 600.000, se generó una malla adicional para el prototipo 5 para realizar un estudio de independencia más profundo. Para validar la calidad de la discretización de los volúmenes de control, se requiere de un valor de *Skewness* máximo igual o menor a 0,9 y que la calidad ortogonal sea superior a 0,2 (ver tabla 6), al igual que para las otras mallas se considera el fenómeno de la capa límite insertando un *Inflation* de 12 capas en las paredes del aerogenerador.

Tabla 6.

Valores de calidad para mallas más refinadas.

Prototipo	Número de elementos	Características	
		<i>Skewness</i> máximo	Calidad ortogonal mínima
4	447029	0,813561	0,21

	588988	0,828402	0,20
	450223	0,840543	0,20
5	600762	0,818421	0,22
	736172	0,829842	0,21

Fuente: elaboración propia

Una vez que se tiene la discretización de los dominios computacionales, se procedió a configurar las simulaciones fluidodinámicas en *ANSYS Fluent* bajo las condiciones mencionadas en los apartados de condiciones de frontera, modelo de turbulencia, método de solución y, valores de referencia. Los resultados obtenidos se pueden apreciar en la tabla 7.

Tabla 7.

Resultados de simulación para prototipos 4 y 5.

Prototipo	Numero de celdas	Coefficiente de arrastre	Fuerza de arrastre (n)	Porcentaje de error (%)
	82112	0,9181909	0,76182067	
	151606	0,8084180	0,67074236	11,95534611
4	302459	0,8369975	0,69445473	3,414526328
	447029	0,8110700	0,67294273	3,097679503
	588988	0,8188190	0,67937205	0,946362994
	80224	0,8358119	0,54922907	
	150678	0,7981823	0,52450184	4,502161312
5	290989	0,7429799	0,48822722	6,916014048
	450223	0,7526183	0,49456081	1,280649168
	600762	0,7353052	0,48318407	2,300382545
	736172	0,7396711	0,48605295	0,590248828

Fuente: elaboración propia

Al considerar un porcentaje de error del 5% entre los resultados, se puede evidenciar que para la alternativa 4 se logra la independencia de la malla computacional a partir de una discretización aproximada a 150.000 celdas; mientras que para el prototipo 5, los resultados

numéricos no dependen de la malla, cuando esta es de aproximadamente 300.000 celdas. En consecuencia, a partir de este número de celdas de las mallas mencionadas anteriormente, se puede considerar que captan el fenómeno con buena precisión.

Resultados finales del estudio CFD

Una vez se realizó el estudio de independencia de la malla computacional y se definió el número de celdas aproximado, en donde los resultados no dependen de la discretización, se procedió a analizar los resultados obtenidos, se tomó como referencia el valor numérico obtenido después de calcular un promedio del coeficiente de arrastre generado por cada una de las alternativas.

Se comparó el valor del coeficiente de arrastre generado por los aerogeneradores (*ver tabla 8*), se comprobó que el prototipo 5 genera un menor coeficiente de arrastre, puesto que tienen una diferencia de 0,0761 respecto del valor del coeficiente de fricción de la alternativa 4. Con base en lo anterior, se tomó la decisión de trabajar con la quinta alternativa en el estudio estructural, debido a su buen comportamiento aerodinámico en comparación con las demás alternativas propuestas.

Tabla 8.

Valor promedio de coeficiente de fricción para alternativas 4 y 5.

Prototipo	Promedio coeficiente de fricción
4	0,81882613
5	0,74264363

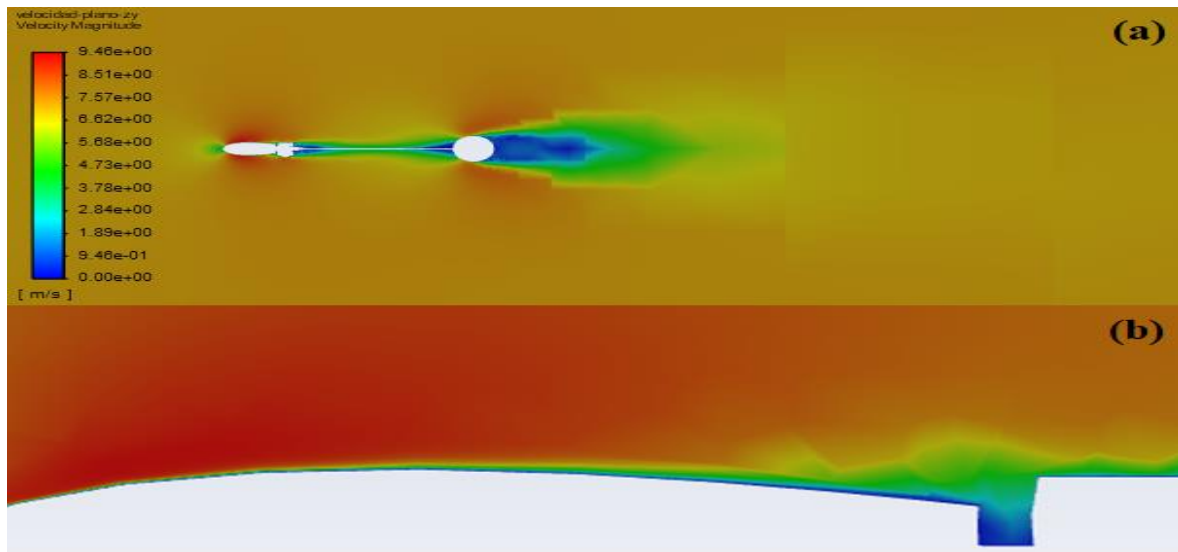
Fuente: Elaboración propia

Al definir el prototipo con el cual se va a trabajar, se deben analizar las propiedades del fluido que interactúa con el aerogenerador, con el fin de comprobar la generación de vórtices y la generación de electricidad, así como el correcto comportamiento del fluido. Como primera

medida se estudia la velocidad del fluido, aquí se puede evidenciar una desaceleración en el flujo de aire cuando este choca contra la punta del perfil alar, donde se obtiene una magnitud promedio de 4,493 m/s, un aumento de velocidad en los extremos inferiores y superiores del perfil alar y el cuerpo de farol con un valor numérico promedio de 8,277 m/s, la velocidad más baja está presente en todo el contorno del aerogenerador debido al fenómeno de capa límite y en la zona posterior al prototipo a causa de la obstrucción del cuerpo sólido, el valor numérico promedio que toma la velocidad en estas zonas es de 1,182 m/s, la velocidad más alta se genera alrededor de la geometría del perfil alar, donde la velocidad toma valores promedios de 8,223 m/s, la demás zonas por donde fluye el fluido se mantiene en un promedio de velocidad de 7,331 m/s. en la figura 14 se puede observar el perfil de velocidades alrededor del aerogenerador.

Figura 14

Contorno de velocidades alrededor del aerogenerador



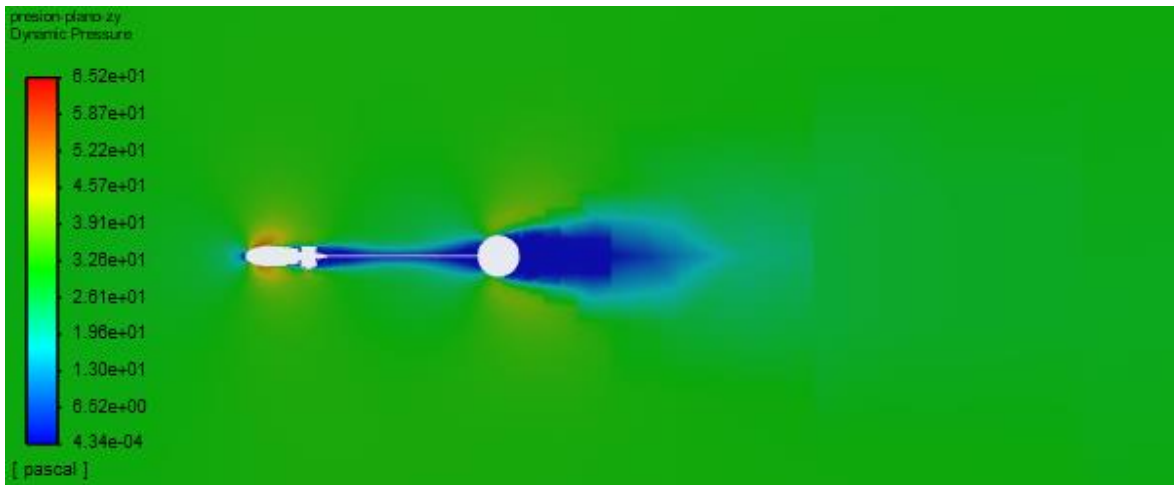
Fuente: elaboración propia; a) Contorno general de velocidades; b) contorno de velocidades con efecto de la capa límite

Se analiza el contorno de presión dinámica alrededor del aerogenerador, este perfil se obtiene del Software de simulación. En la figura 15 se puede observar el comportamiento de la

presión dinámica del fluido alrededor del aerogenerador, se trabaja con esta propiedad del fluido debido a que se está considerando un flujo externo y la inercia del movimiento genera un aumento en la presión cuando el flujo de fluido choca contra un área perpendicular al movimiento, esta propiedad depende de la velocidad y densidad del fluido. Se presenta una zona de baja presión en el área posterior al aerogenerador, además de que en esta zona está presente una baja velocidad, el comportamiento de la presión dinámica es acorde a lo esperado, pues en esta zona es donde se deben generar los vórtices de Von Kármán; la menor presión tiene un valor promedio de $1,631e-6$ MPa. Adicionalmente, se presenta una alta presión, con un valor numérico promedio de $53,823e-6$ MPa, esta presión actúa en la zona inferior y superior del perfil alar, justo en las mismas áreas donde se genera el valor más alto de velocidad del fluido, la zona más alejada del aerogenerador tiene un valor promedio de presión de $34,751e-6$ MPa.

Figura 15

Contorno de presión dinámica alrededor del aerogenerador



Fuente: Elaboración propia

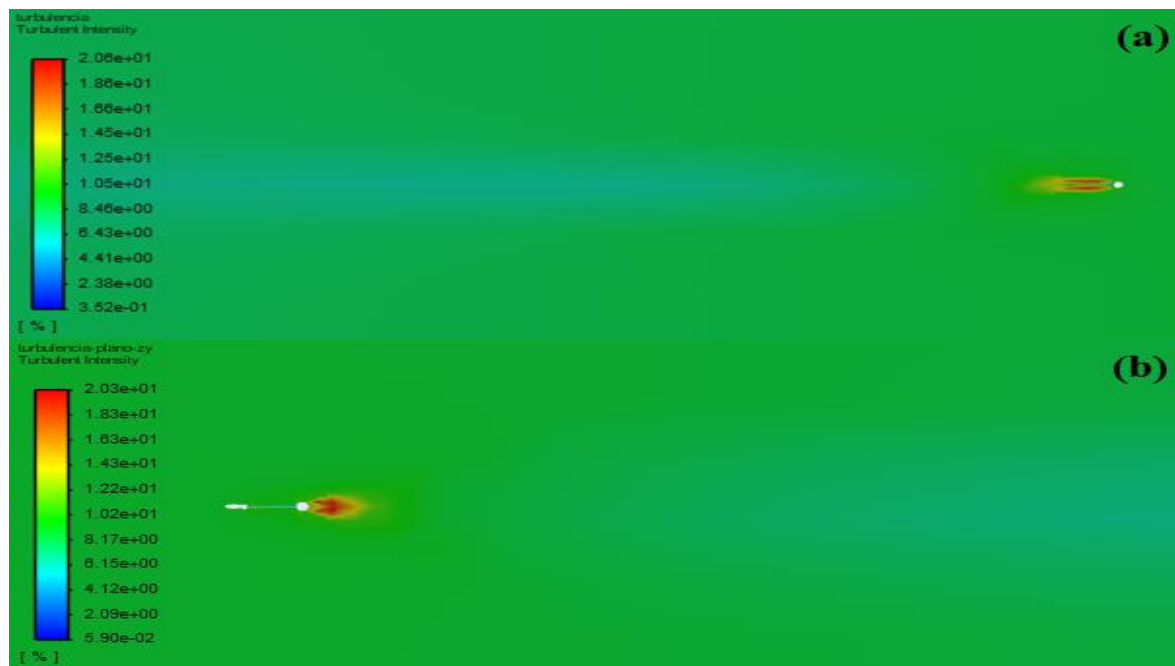
Es necesario analizar la intensidad turbulenta del flujo, esto con el fin de verificar las zonas de alta turbulencia, pues es aquí donde se forman los vórtices de Von Kármán, se hace la

Prototipo de generación eléctrica eólica con movimientos oscilantes⁶⁰

comparación entre la turbulencia generada por la alternativa 4 y la alternativa 5 con el fin de comprobar cuál de estas dos genera una mayor intensidad turbulenta, asumiendo esto como una mayor generación de electricidad. En la figura 16 se pueden apreciar los contornos de turbulencia generados por cada una de las alternativas preseleccionadas, en el prototipo 4 se genera una intensidad turbulenta máxima promedio de 19,105%, mientras que en la alternativa 5 la intensidad turbulenta máxima promedio tiene una magnitud de 19,840%, lo que comprueba una mayor turbulencia generada por la alternativa 5. Adicionalmente, para la alternativa 4 se generan dos zonas de alta turbulencia, estas están presentes en la parte inferior y superior de la lámina vibratoria, mientras que para la alternativa 5 la alta turbulencia se genera en la zona posterior al aerogenerador, este comportamiento es acorde al esperado por el flujo de fluido, pues para que se genere el movimiento oscilatorio es necesario que los vórtices se formen posterior al choque del flujo contra el cuerpo de farol. Cabe aclarar que las simulaciones se realizaron bajo condiciones de flujo estacionario.

Figura 16

Contornos de intensidad turbulenta



Fuente: elaboración propia; a) Contorno de intensidad turbulenta para la alternativa 4; b) contorno de intensidad turbulenta para la alternativa 5

Con lo analizado anteriormente, aunque las dos alternativas generan una intensidad turbulenta similar, el prototipo 5 es más eficiente debido al bajo coeficiente de arrastre generado, adicionalmente, el comportamiento del flujo de fluido alrededor del aerogenerador es acorde a lo esperado, en el contorno de intensidad turbulenta se logra ver una formación de vórtices en el fluido luego de que este choca contra el cuerpo sólido del aerogenerador, adicionalmente, en el contorno de presión y velocidad se puede evidenciar una alteración en el flujo de fluido en las zonas cercanas al aerogenerador, donde los valores numéricos más bajos de estas dos variables se encuentran en la zonas posterior al cuerpo sólido, lo que confirma la formación de vórtices de Von Kármán. Este comportamiento indica que la decisión de trabajar con esta geometría en el análisis estructural es acertada.

Cabe resaltar que las simulaciones fluidodinámicas realizadas son en estado de flujo estacionario, por lo cual no se puede mostrar gráficamente la formación de vórtices de Von

Prototipo de generación eléctrica eólica con movimientos oscilantes⁶²

Kármán ni el desprendimiento de los mismos. Sin embargo, con los resultados numéricos obtenidos se puede confirmar una zona de baja presión y velocidad, donde también se presenta una alta intensidad turbulenta, por lo cual es muy probable que se generen las calles de Von Kármán necesarias para el funcionamiento del prototipo.

Entorno de simulación estructural

Las simulaciones por elementos finitos, son métodos matemáticos implementados en computadoras para resolver ecuaciones asociadas a cuestiones físicas propias de problemas de ingeniería, esto permite estudiar, analizar y determinar el comportamiento de un material bajo ciertas condiciones de funcionamiento de manera virtual. De esta manera se optimiza el proceso de diseño y se logra anticipar posibles fallas futuras en los productos, lo que supone un beneficio económico para las empresas [60]. Dentro de las simulaciones por elementos finitos se encuentra la simulación estructural, a través de la cual, se puede estudiar y analizar el comportamiento de piezas, ensambles y dispositivos sometidos a cargas y restricciones asociadas. Así se hace posible, predecir las zonas susceptibles donde posiblemente se genera una falla o rotura del producto, para posteriormente modificar la geometría afectada previo al proceso de fabricación [60].

Con la finalidad de dar cumplimiento al tercer objetivo del presente proyecto, se hizo uso del módulo *Static Structural* del *Software ANSYS* para poder realizar el estudio estructural del comportamiento del aerogenerador. Se aplicó la misma metodología de simulación implementada en las simulaciones fluidodinámicas (ver figura 9). Para llevar a cabo el estudio estructural, fue necesario realizar un CAD más detallado de toda la estructura del aerogenerador, por esto, se tomaron en cuenta los métodos de unión entre elementos, los materiales y las dimensiones finales de cada pieza. En cuanto a los materiales, se realizó una revisión bibliográfica y se basó en un criterio de funcionalidad y comercialización para la selección de los mismos; para la validación de los resultados obtenidos en dichas simulaciones, se tomó en cuenta la aplicación del aerogenerador, las condiciones a las cuales está sometido y los esfuerzos máximos generados en cada uno de los elementos. Finalmente, se trabajó con la fuerza de

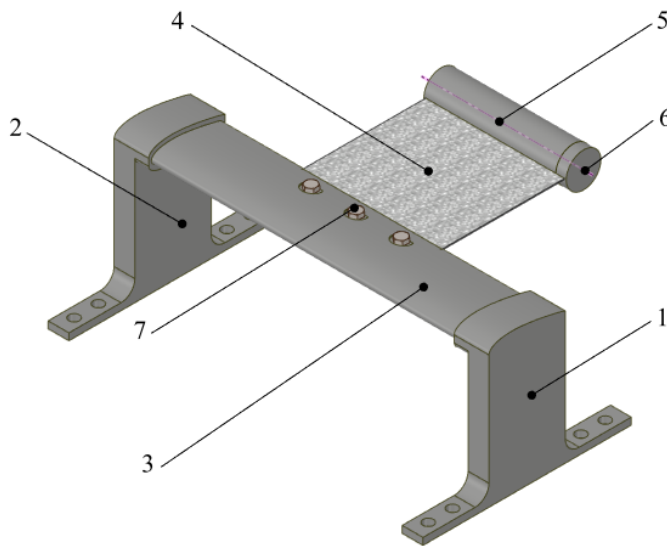
presión ejercida por el fluido sobre el cuerpo del aerogenerador, dado que esta es la única fuerza externa presente en el estudio del comportamiento estructural del dispositivo; para esto se debe enlazar la simulación CFD con la simulación estructural.

CAD detallado de la alternativa seleccionada

Con base en el comportamiento fluidodinámico de las diferentes propuestas realizadas, se definió trabajar con la alternativa 5, pues genera un coeficiente de arrastre menor que las demás. Para realizar el estudio estructural de este aerogenerador, se hizo necesario generar un diseño CAD detallado de la estructura del prototipo; se partió de la forma conceptual de la propuesta y, a partir de criterios propios, de funcionalidad, comercialización y fabricación, se logró la geometría final del aerogenerador (figura 17).

Figura 10.

Geometría final del aerogenerador.



ITEM	COMPONENTE
1	Soporte base izquierdo
2	Soporte base derecho
3	Perfil alar NACA 0024
4	Lamina vibratoria
5	Cuerpo de farol
6	Tapa cuerpo de farol
7	Union atornillada

Fuente: Elaboración propia

Considerando el funcionamiento del aerogenerador y la practicidad en el ensamblado del mismo, muchos de los elementos se acoplan a los demás por medio de un ajuste incierto, como es el caso de la unión entre el perfil alar y los soportes base, así como el acople entre el cuerpo de

farol y la tapa del mismo. En cuanto a la unión entre el perfil alar y la lámina vibratoria, se consideró implementar un sistema de sujeción por medio de tornillos, puesto que si es necesario reemplazar la lámina vibratoria se puede hacer de una manera mucho más sencilla. De la misma manera, y desde el concepto de practicidad, la unión de la lámina vibratoria con el cuerpo de farol se hizo mediante un sistema de encaje, en el cual la placa se dobla en el extremo libre en forma de 'L' y se desliza a través de una ranura presente en el cuerpo de farol sólido, esto se hace con el fin de no alterar la superficie del cuerpo de farol, pues al realizar un agujero para insertar un tornillo se altera la aerodinámica del prototipo y se puede ver dignificada la formación de vórtices. Para cerrar el sistema e impedir que el cuerpo de farol salga expuesto mientras el aerogenerador está en funcionamiento, se implementa una tapa con un ajuste inserto. Se definió un sistema de sujeción fijo para ubicar el aerogenerador a una superficie plana. Los detalles de cada uno de los elementos que componen el aerogenerador se pueden apreciar en los planos que se encuentran en la sección de anexos.

Selección de materiales

Dado que el análisis estructural cambia debido a las propiedades de los materiales con los que se define cada pieza que compone el dispositivo, es necesario tener en cuenta los materiales de cada elemento del aerogenerador. A partir de los criterios de funcionamiento, construcción y comercialización se realizó la selección de los materiales, a continuación, se da a conocer la razón del por qué fueron seleccionados y, las piezas que se pretenden fabricar con ese material.

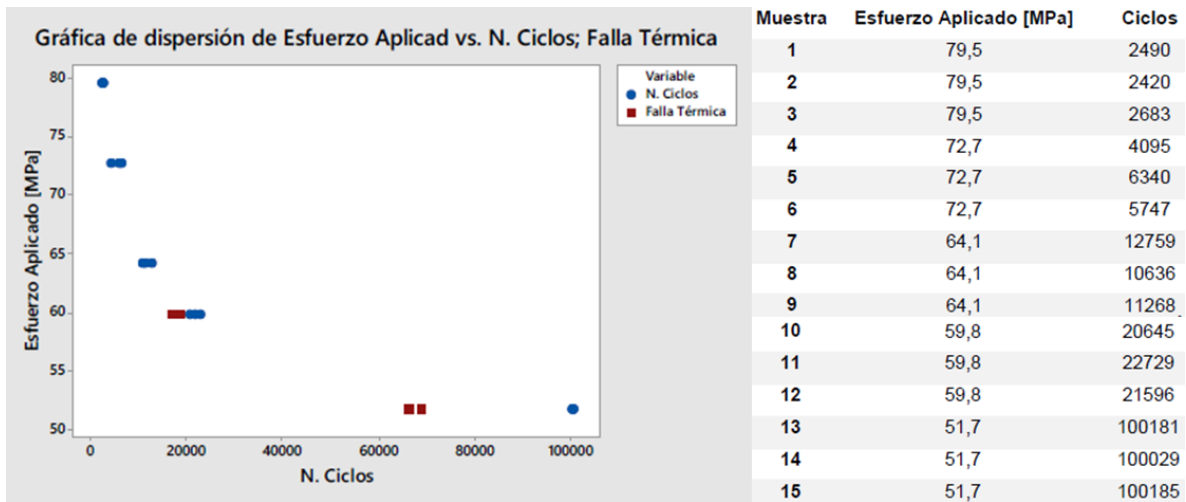
Nylon 6. Dentro de las características de este material se pueden destacar su resistencia mecánica, dureza, rigidez y buena tenacidad, así como su capacidad de amortiguación mecánica, las cuales lo hace un material ideal para múltiples aplicaciones, donde la resistencia a esfuerzos y condiciones ambientales son indispensables. Usar este material en impresión 3D resulta ser muy

factible cuando es necesario imprimir herramientas industriales que serán usadas en ambientes duros [61, 62]. Se seleccionó el Nylon 6 (PA6) para fabricar por medio de impresión 3D los soportes base, perfil alar, cuerpo de farol y tapa cuerpo de farol, esto teniendo en cuenta la aplicación que tendrán estas piezas, pues el dispositivo estará expuesto a diferentes condiciones ambientales, las cuales afectan negativamente los materiales y, como se mencionó anteriormente, este material posee una buena resistencia a condiciones del medio, sin dejar de lado la resistencia a esfuerzos. Adicionalmente, pensando en la fabricación de los elementos del aerogenerador, se hace más práctico y económico usar la impresión 3D de polímeros, dado que consiste en un proceso de fabricación sencillo, con el cual se puede obtener una pieza en poco tiempo y, si se compara con un proceso como inyección de polímero, tiene un costo más bajo, debido a que para la inyección de polímeros es necesario el diseño de un molde y una máquina más robusta. En dado caso de fabricar un prototipo de este dispositivo para realizar pruebas experimentales, se podrían generar diversas piezas en Nylon por medio de impresión 3D.

Para el estudio estructural es necesario insertar la curva de vida del material, pues, aunque se usaron los valores que aparecen por defecto en la biblioteca del *Engineering Data* de ANSYS, este dato hace falta y es necesario para el estudio que se realiza.

Figura 11.

Curva S-N del Nylon 6.



Fuente: Velásquez Salazar [63]

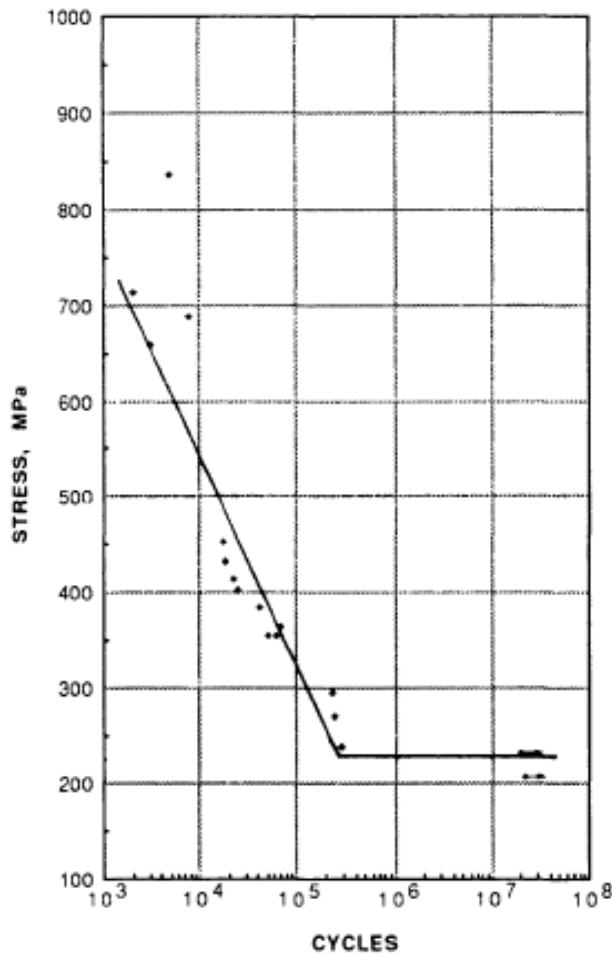
Acero galvanizado. El acero con recubrimiento en zinc, tiene un tiempo de vida útil estimado de 30 a 60 años, dependiendo de la calidad con la cual se fabrique, los materiales usados y el grado de exposición que tenga el acero a agentes corrosivos. El recubrimiento en Zinc protege el acero contra la corrosión y oxidación que la humedad y la contaminación ambiental puede ocasionar, no requiere de un mantenimiento especializado, tiene buen aspecto físico y se puede adquirir a un bajo costo [64]. Las láminas compuestas también se podrían usar en esta aplicación; sin embargo, las propiedades de este material compuesto cambian dependiendo la orientación y la posición de las fibras dentro de la matriz, aunque poseen capacidades muy interesantes como la resistencia a la tracción y ataques químicos, coeficiente de dilatación térmico longitudinal prácticamente nulo, gran resistencia mecánica, etc. Resultan ser poco comerciales y costosos; adicionalmente, no poseen la misma facilidad de formación que el acero galvanizado y, debido a la forma de la lámina vibratoria, se hace necesario su practicidad de uso [65]. Finalmente, se tomó la decisión de usar una lámina de acero galvanizado calibre 16

(1,45 mm), esto debido a sus excelentes propiedades acordes con el uso que se le va a dar y la facilidad de conseguirla comercialmente.

Aunque se usó las propiedades que se encuentran por defecto en el *Engineering Data* de ANSYS, fue necesario insertar la curva de esfuerzo vida (curva S-N).

Figura 12.

Curva S-N del acero galvanizado.



Fuente: P. de la Cruz [66]

Acero estructural: el acero estructural se escogió como material para los elementos de la unión atornillada, esto debido a que comercialmente los tornillos y las tuercas están fabricados de diferentes materiales y aleaciones. Sin embargo, todo depende de su uso y, para este caso

específico, se requiere de un material con buena resistencia mecánica, para lo cual el acero estructural es el indicado; además, se encuentra muy fácil en el comercio. Cabe resaltar que, para efectos de la simulación estructural, las propiedades de los materiales se deben insertar en el *Engineering Data*; sin embargo, la biblioteca de materiales de ANSYS tiene gran variedad, por lo que se podría encontrar y hacer uso de los materiales ya creados, pero siempre es bueno verificar las propiedades, la curva de vida del material esta por defecto en la biblioteca.

Discretización del modelo

Para que el programa de simulación pueda realizar el estudio estructural del prototipo, es necesario realizar una discretización o mallado del conjunto, esto con el fin de que el Software implemente métodos numéricos estudiando cada uno de los elementos en los cuales se seccionó el aerogenerador y así conocer el valor general de diferentes variables. Sin embargo, es necesario realizar un estudio de convergencia para definir el número de elementos a partir del cual los resultados no dependen del mallado, de esta manera, se inicia con una malla generada por defecto y por medio de diferentes métodos de mejoramiento de la malla computacional se incrementa el número de nodos y elementos, buscando que la mayoría de elementos tengan una calidad de 1 o cercano a este valor.

Con el fin de buscar mallas más refinadas, se modificó el valor del tamaño de los elementos, adicionalmente, se insertaron métodos como *Patch Conforming*, *Hex Dominant*, *Patch Independent* y *MultiZone*. Los cuales se combinaron con un *Body Sizing*, esto con el fin de disminuir el tamaño del elemento en cada una de las piezas, obteniendo mayor exactitud en cada una de las discretizaciones y lograr que la calidad de los elementos se acercara a 1.

Los resultados correspondientes en el proceso de mallado están representados en la Tabla 9, denotando características importantes para cada malla, como el número de elementos y el

número de nodos; en la figura 20 podemos observar una comparación entre la malla generada por defecto y la malla más refinada que se pudo obtener.

Tabla 9.

Características de las mallas computacionales usadas para simulaciones estructurales.

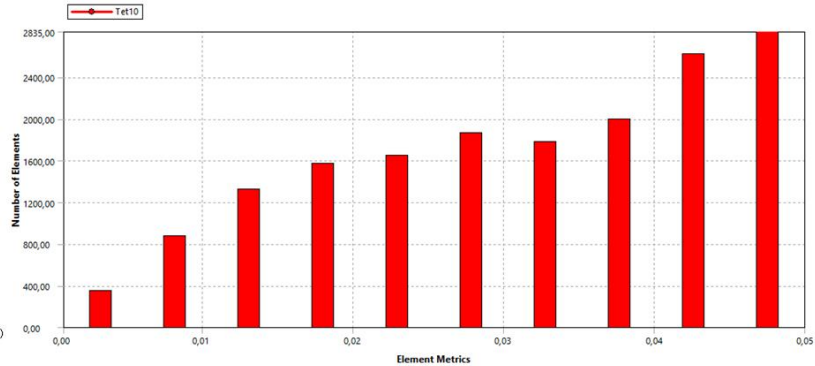
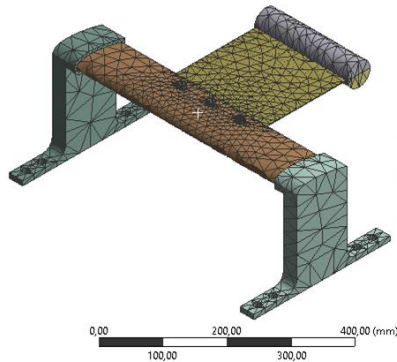
Malla	Número de nodos	Número de elementos
1	32169	16846
2	58621	33787
3	70267	40522
4	95729	53826
5	117414	67402
6	135589	78216
7	159304	92767
8	180478	104587
9	196403	114563
10	218885	128289
11	236695	138491
12	260949	153603
13	285474	168982
14	307975	181696
15	330402	196151
16	349696	207365
17	361278	215214

Fuente: Elaboración propia.

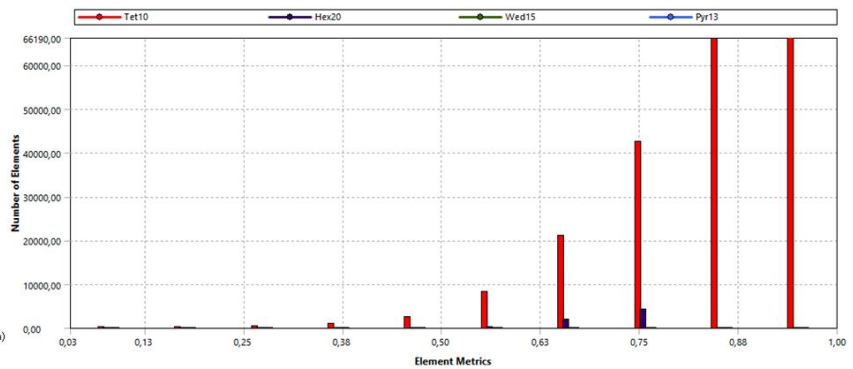
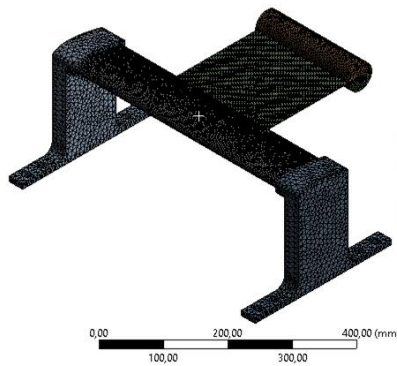
Figura 13.

Comparación de la calidad de los elementos en diferentes discretizaciones.

Malla 1 (32.167 elementos)



Malla 17 (361.278 elementos)



Fuente: Elaboración propia.

Modelo de carga y condiciones de frontera

Antes de hablar sobre el modelo de carga usado en la simulación estructural, es necesario mencionar una serie de condiciones implementadas, esto con el fin de que los resultados del estudio sean lo más aproximados a la realidad; en primera instancia, como se va a estudiar el comportamiento estructural de un ensamble, existen una serie de contactos entre las piezas del aerogenerador, para este estudio se seleccionó un contacto tipo *Bonded* para todos los empalmes entre los elementos del prototipo, esto debido a que no existe un movimiento relativo entre las piezas y que genera un menor costo computacional para darle solución a la simulación, por lo tanto es apropiado el uso de este tipo de conexión para realizar el estudio [67].

Otra de las condiciones de frontera necesarias para realizar las simulaciones, son los puntos de apoyo, debido a que, si se le va a aplicar una fuerza a un cuerpo, es indispensable tener un punto fijo para que la fuerza genere un efecto en el elemento y no simplemente un desplazamiento del cuerpo; para el estudio, se definen apoyos fijos en las caras inferiores de los soportes base y en los agujeros donde irían los tornillos que fijan el aerogenerador a una superficie. Adicionalmente, para que el programa de simulación tome en cuenta el peso de cada elemento, es necesario activar el efecto de la gravedad, el cual se simula con una aceleración vertical en dirección positiva dependiendo la ubicación espacial del modelo [68], en nuestro caso en dirección +Y.

Una vez se tienen las condiciones antes mencionadas, se procede a insertar el modelo de carga; para este caso particular se cuenta con un perfil de presión estática, el cual se aplica en todas las caras del aerogenerador, exceptuando la cara superior e inferior de la lámina vibratoria y el cuerpo de farol, debido a que en estas superficies actúa una presión oscilante.

El perfil de presión estático se obtiene gracias a la fuerza ejercida por el fluido sobre el cuerpo del aerogenerador, es necesario enlazar la solución CFD con el *SetUp* de la simulación estática estructural para compartir la información obtenida en el estudio fluidodinámico. Con el fin de realizar un estudio más aproximado a la realidad, se inserta una presión oscilante en la cara inferior y superior de la lámina vibratoria y el cuerpo de farol, esto para emular la fuerza de presión generada por los vórtices de Von Kármán al momento de desprenderse del cuerpo sólido, como la simulación CFD se realizó bajo condiciones de flujo estacionario, es necesario conocer el número de Reynolds para extrapolar el resultado de la frecuencia, para esto se hizo uso de datos obtenidos en un estudio comparativo de desprendimiento de vórtices en dos geometrías diferentes [69]. Los cuales se pueden observar en la tabla 10.

Tabla 10.

Frecuencia de desprendimiento de vórtices para diferentes geometrías.

Cuerpo de farol	Reynolds	Frecuencia [Hz]
Circular	6709	72,84
	11183	147,28
Rombo	6709	61,76
	11183	128,43
Circular con placa	6709	42,62
	11183	67,43
Rombo con placa	6709	85,71
	11183	57,32

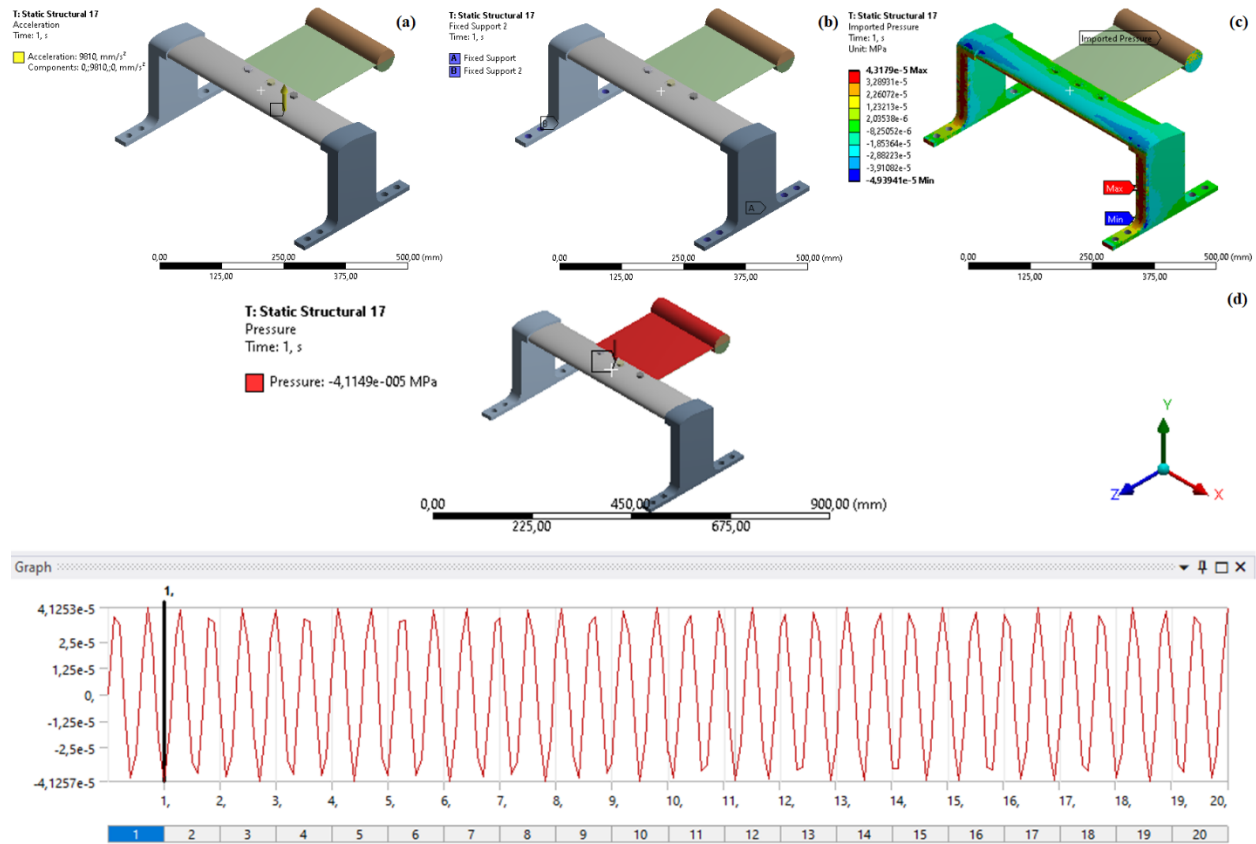
Fuente: Ramirez, Rojas, Forero & Cerón [69].

El número de Reynolds correspondiente a este caso de estudio es igual a 113383,0125; con este dato es posible extrapolar en la tabla de referencia el valor de la frecuencia par un cuerpo de farol de perfil circular con placa, de esta manera, se obtiene una frecuencia de 634,1672173 Hz. Así, es posible configurar la condición de presión oscilante, teniendo como punto de partida la forma de una ecuación senoidal, con una amplitud máxima de $4,12579e^{-5}$ MPa correspondiente a la presión máxima generada en el cuerpo del aerogenerador. La ecuación, expresa la presión oscilante usada en el estudio estructural.

$$P_{(t)} = (4,12579e^{-5}[MPa]) * \sin (634,1672173[Hz] * tiempo[s])$$

Figura 14.

Modelo de carga y condiciones de frontera. a) aceleración de la gravedad; b) soportes fijos; c) perfil de presión estacionaria; d) presión oscilante.



Fuente: Elaboración propia

Análisis de convergencia

El análisis de convergencia que se realiza en el estudio estructural, es el mismo que el de independencia de malla que se lleva a cabo en las simulaciones CFD, este proceso se debe hacer minuciosamente, pues la confiabilidad de la simulación depende en gran parte de las decisiones tomadas en el análisis de convergencia. Las simulaciones computacionales requieren el uso de un computador con excelentes características que le permitan al *software* realizar los cálculos necesarios para arrojar un valor numérico confiable, usar una malla computacional más refinada

pretende resultados más exactos, sin embargo, requiere un costo computacional más alto. Por tal razón, es necesario realizar un análisis de convergencia, con el fin de encontrar un punto de equilibrio, donde la malla computacional no sea tan refinada, pero que los resultados sean confiables para el estudio; este análisis se realiza generando diversas discretizaciones, aumentando gradualmente el número de elementos y nodos, mientras se monitorea una o varias variables propias de la simulación.

Para llevar a cabo el análisis de convergencia se realizó un control de algunos resultados arrojados en las simulaciones, con el fin de encontrar una tolerancia en el estudio. Como se mencionó anteriormente, se generaron diecisiete discretizaciones para la geometría final del aerogenerador, con el fin de ejecutar el análisis de convergencia, se monitorean la deformación total y el esfuerzo máximo de Von Mises, ambas variables estudiadas en la geometría total del aerogenerador. Para ejecutar el análisis de convergencia se definió un porcentaje de error del 5% en los resultados obtenidos entre las diferentes mallas computacionales. Los valores obtenidos se pueden evidenciar en la tabla 11.

Tabla 11.

Deformación total y esfuerzo máximo de Von Mises.

Malla Computacional	Deformación total [mm]	Esfuerzo máximo de Von Mises [MPa]	Porcentaje de error de deformación [%]	Porcentaje de error de esfuerzo [%]
1	2,5954	70,679		
2	0,7704	59,572	70,31671419	15,71471017
3	0,71267	27,386	7,493509865	54,02873833
4	0,91866	13,93	22,4228768	49,13459432
5	0,93998	16,376	2,268133365	14,93649243
6	0,92861	15,76	1,209600204	3,761602345

Prototipo de generación eléctrica eólica con movimientos oscilantes76

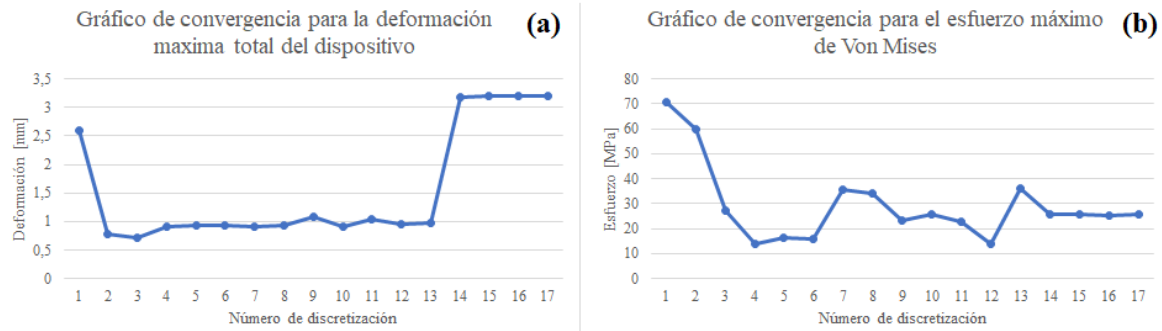
7	0,91733	35,509	1,214718773	55,61688586
8	0,93332	34,071	1,713238761	4,049677547
9	1,0833	23,465	13,84473368	31,12911274
10	0,91621	25,783	15,4241669	8,990420044
11	1,0473	22,892	12,51694834	11,21281465
12	0,95644	14,099	8,675642127	38,41079853
13	0,96879	35,967	1,274786073	60,80017794
14	3,1878	25,87	69,60944852	28,07295577
15	3,1907	25,562	0,090889147	1,190568226
16	3,1924	25,384	0,053251472	0,696346139
17	3,1926	25,656	0,006264487	1,060180854

Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta el porcentaje de error antes mencionado (5%), con el cual se define una independencia de la malla computacional, se puede evidenciar que existe una fluctuación alta en los resultados de las dos variables estudiadas. La independencia de la malla computacional se logra con una discretización de aproximadamente 307.000 nodos y 181.000 elementos, donde se obtiene un valor inferior al 5% en el porcentaje de error entre resultados. En consecuencia, con los resultados obtenidos y el análisis realizado, se definió que la independencia de malla computacional en este estudio se logra a partir de la catorceava discretización (307.975 nodos y 181.696 elementos). En la figura 22 se puede evidenciar el comportamiento de las dos variables usadas para el análisis de convergencia.

Figura 15.

Graficas del comportamiento de la deformación total y el esfuerzo de Von Mises usadas en el análisis de convergencia. a) análisis de convergencia de la deformación máxima total; b) análisis de convergencia del esfuerzo máximo de Von Mises.

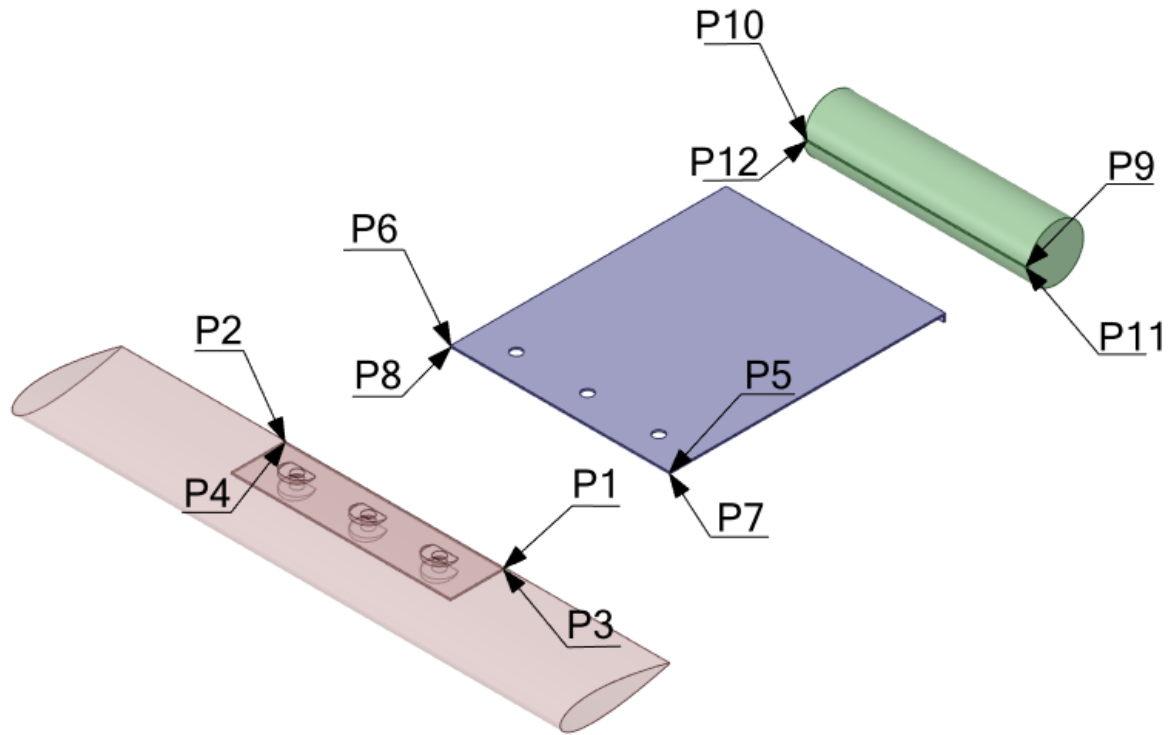


Fuente: Elaboración propia

Adicional al análisis de convergencia realizado con el monitoreo de la deformación máxima total del dispositivo y el esfuerzo máximo de Von Mises en toda la estructura del aerogenerador, se añadió un estudio de independencia de la malla computacional donde se supervisan 12 puntos distribuidos en las zonas más críticas del aerogenerador (ver figura 16), esto se hace con el fin de verificar la convergencia del estudio estructural y que la decisión de trabajar con los resultados de la discretización número 17 sea acertada.

Figura 16.

Distribución de los 12 puntos de monitoreo para el segundo análisis de convergencia.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 12.

Esfuerzo máximo de Von Mises en los 12 puntos de monitoreo.

Malla Computacional	Esfuerzo de Von Mises en los puntos de monitoreo [MPa]											
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12
1	0,6327	0,619	0,6821	0,6621	1,8977	1,6047	1,4985	1,464	0,089	0,037	0,1138	0,0521
2	0,1907	0,1873	0,19	0,1724	0,9058	0,9075	0,8664	0,8843	0,5688	0,5688	2,0421	2,0421
3	0,2165	0,2183	0,173	0,1816	0,6088	0,5111	0,4825	0,4294	0,1808	0,1808	1,1839	1,1839
4	0,1858	0,2218	0,2439	0,2059	0,8812	0,7424	0,7439	0,6929	0,4136	0,4136	1,6449	1,6449
5	0,2915	0,2203	0,2395	0,2247	0,6931	0,6767	0,7214	0,6716	0,3222	0,3222	2,0619	2,0619
6	0,255	0,2522	0,231	0,2271	0,6383	0,6143	0,606	0,6684	0,446	0,446	2,0255	2,0255
7	0,2558	0,2642	0,242	0,2276	0,5785	0,5373	0,5574	0,5521	0,316	0,316	4,084	4,084
8	0,2607	0,2609	0,2151	0,2484	0,6081	0,5229	0,5624	0,5609	0,2505	0,2505	1,9566	1,9566

Prototipo de generación eléctrica eólica con movimientos oscilantes79

9	0,2469	0,246	0,225	0,2744	0,5049	0,6171	0,5387	0,5746	1,4498	1,4498	4,1184	4,1184
10	0,2131	0,2842	0,2401	0,2681	0,4416	0,4529	0,448	0,5174	0,3989	0,3989	1,7513	1,7513
11	0,2771	0,3151	0,249	0,2537	0,4586	0,4633	0,4818	0,5008	0,9438	0,9438	4,5342	4,5342
12	0,2919	0,2303	0,2459	0,2458	0,5666	0,5619	0,5883	0,5681	0,3705	0,3705	8,4625	8,4625
13	0,2873	0,2942	0,2594	0,2374	0,382	0,3932	0,4206	0,4344	0,3943	0,3943	2,8724	2,8724
14	0,4512	0,4281	0,4484	0,4181	0,6243	0,6205	0,6181	0,6463	0,1189	0,0667	0,0807	0,0517
15	0,3978	0,4225	0,3707	0,4352	0,5628	0,5945	0,6048	0,6302	0,1058	0,0952	0,0985	0,0608
16	0,3721	0,42018	0,3653	0,4201	0,5962	0,5759	0,6325	0,66	0,0938	0,08469	0,0752	0,0762
17	0,3699	0,4176	0,3585	0,4283	0,5823	0,7624	0,6285	0,6724	0,0701	0,0828	0,0614	0,0834

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13.

Porcentaje de error en los 12 puntos de monitoreo.

Malla Computacional	Esfuerzo de Von Mises en los puntos de monitoreo [MPa]											
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12
1												
2	69,8593	69,741	72,144	73,961	52,268	43,447	42,182	39,596	84,3530	93,495	94,427	97,448
3	11,9168	14,200	8,9473	5,0660	32,788	43,680	44,309	51,441	68,2137	68,213	42,025	42,025
4	14,1801	1,5779	29,069	11,801	30,912	31,155	35,139	38,028	56,2862	56,286	28,026	28,026
5	36,2607	0,6762	1,8040	8,3667	21,345	8,8496	3,0246	3,0740	22,0986	22,098	20,224	20,224
6	12,5214	12,648	3,5490	1,0568	7,9065	9,2212	15,996	0,4764	27,7578	27,757	1,7653	1,7653
7	0,31274	4,5420	4,5454	0,2196	9,3686	12,534	8,0198	17,399	29,1479	29,147	50,404	50,404
8	1,87955	1,2490	11,115	8,3735	4,8676	2,6800	0,8890	1,5689	20,7278	20,727	52,091	52,091
9	5,29344	5,7110	4,4	9,4752	16,970	15,264	4,2140	2,3842	82,7217	82,721	52,491	52,491
10	13,6897	13,441	6,2890	2,2959	12,537	26,608	16,836	9,9547	72,4858	72,485	57,476	57,476
11	23,0963	9,8064	3,5742	5,3711	3,7069	2,2447	7,0153	3,2083	57,7346	57,734	61,375	61,375
12	5,07022	26,912	1,2449	3,1139	19,061	17,547	18,103	11,846	60,7438	60,743	46,420	46,420
13	1,57588	21,719	5,2043	3,4174	32,580	30,023	28,505	23,534	6,03601	6,0360	66,057	66,057
14	36,3253	31,277	42,149	43,219	38,811	36,631	31,952	32,786	69,8452	83,083	97,190	98,200
15	11,8351	1,3081	17,328	3,9292	9,8510	4,1901	2,1517	2,4911	11,0176	29,936	18,071	14,967
16	6,46053	0,5491	1,4567	3,4696	5,6021	3,1286	4,3794	4,5151	11,3421	11,039	23,654	20,209
17	0,59123	0,6140	1,8614	1,9145	2,3314	24,462	0,6324	1,8441	25,2665	2,2316	18,351	8,6330

Fuente: Elaboración propia.

A partir del análisis de convergencia realizado monitoreando 12 puntos en la superficie de la estructura, podemos concluir que a medida que la discretización es mas refinada, los datos entre una malla y la otra son mas cercanos, esto lo podemos observar en la tabla 13, donde entre la malla 14 y 15 tenemos 5 resultados en el porcentaje de error que son inferiores al 5% y a medida que incrementa el refinamiento de las mallas los porcentajes de error inferiores a 5% son mayor, al comparar los resultados de la malla 16 y la 17, hay 8 valores inferiores al porcentaje de error máximo para considerar independencia de la malla computacional.

Aunque en el primer análisis de convergencia se había dicho alcanzar una independencia de la malla computacional a partir de la discretización 14, con el segundo estudio se revela que esta afirmación no es del todo correcta, ya que para la discretización 17 no se ha logrado que todos los valores tengan un porcentaje de error inferior al 5%. Se debería seguir refinando la malla y comparar valores, hasta lograr que el porcentaje de error entre los datos sea menor a 5% en cada uno de los puntos de monitoreo seleccionados; sin embargo, esto genera un mayor costo computacional y un incremento en el tiempo para realizar el estudio estructural de una manera mas detallada.

Resultados de simulación estructural

Para realizar el análisis de resultados del comportamiento mecánico del aerogenerador bajo una condición de cargas combinadas, se toman como referencia los valores numéricos arrojados en la última simulación estructural realizada con una discretización del modelo de 361.278 nodos y 215.214 elementos. Sin embargo, se podrían usar los resultados obtenidos con mallas computacionales superiores a los 307.975 nodos y 181.696 elementos, esto debido al análisis de convergencia realizado. El presente proyecto toma las siguientes variables de interés: la deformación en dirección Y, el esfuerzo equivalente de Von Mises presentes en cada uno de

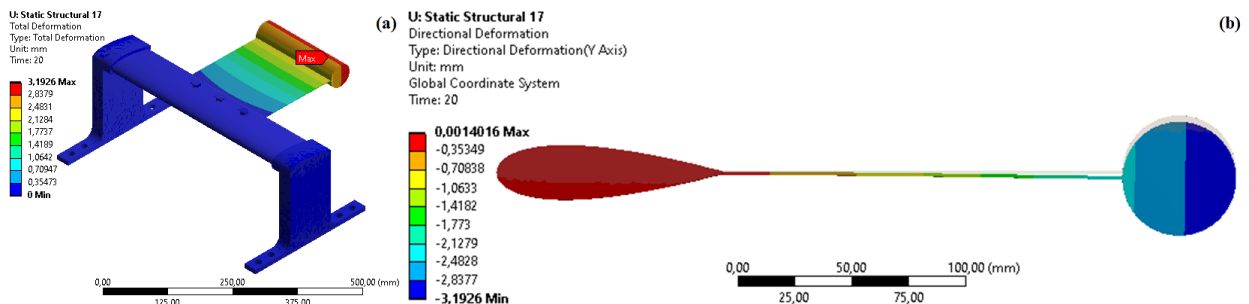
Prototipo de generación eléctrica eólica con movimientos oscilantes⁸¹

las piezas que conforman el aerogenerador y el esfuerzo cortante máximo en los tornillos y la lámina vibratoria. Esto con el fin de verificar que la deformación obtenida en la lámina vibratoria sea suficiente para deformar una lámina de material piezoeléctrico y que el esfuerzo generado en cada elemento no sobrepase el esfuerzo de fluencia propio de cada material, a fin de que el funcionamiento del prototipo no se vea comprometido.

Como primera instancia, se analizó la deformación total presente en el aerogenerador bajo una condición de cargas combinadas. El comportamiento fue acorde a lo esperado, pues se necesitaba un pandeo en la placa vibratoria que permitiera la deformación de las láminas de material piezoeléctrico en la unión de la placa vibratoria con el perfil alar y, de esta manera, generar el potencial eléctrico. En la figura 23 se puede evidenciar un desplazamiento máximo de 3,1926 mm, el cual está en el extremo más alejado del conjunto de la lámina vibratoria y el cuerpo de farol, así como la deformación en dirección Y para el conjunto del perfil alar, la lámina vibratoria y el cuerpo de farol, el valor del desplazamiento es el mismo y es lo necesario para que las láminas de material piezoeléctrico generen energía eléctrica [70, 71].

Figura 17.

Gráficos de desplazamiento de la placa vibratoria bajo la acción de la fuerza de presión ejercida por el aire. a) grafico 3D de deformación total en el aerogenerador, 11 veces la escala real; b) grafico 2D de deformación en dirección Y para el conjunto del perfil alar, lamina vibratoria y cuerpo de farol, escala real.



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo al modelo de carga implementado para el estudio estático estructural, las cargas aplicadas sobre el cuerpo del aerogenerador, provocan una deformación o desplazamiento en las piezas del prototipo, lo que genera una serie de esfuerzos en el interior de los materiales. Para este caso de estudio se tienen en cuenta los esfuerzos equivalentes de Von Mises, debió a que esta magnitud puede dar un indicativo para un buen diseño según la teoría de falla para materiales dúctiles [72]. Adicionalmente, como algunas de las piezas están sometidas a esfuerzo cortante, es necesario analizar la magnitud de este esfuerzo y verificar que no supere el valor del esfuerzo de fluencia propio de cada material.

El esfuerzo máximo equivalente de Von Mises presente en el ensamble, tiene una magnitud de 25,656 MPa, este valor se genera en la lámina vibratoria, justo en la unión de la lámina con el perfil alar; al comparar este valor con el esfuerzo de fluencia propio del material, en este caso, acero galvanizado (314 MPa), es evidente que el esfuerzo ejercido sobre la lámina vibratoria no supera el esfuerzo máximo que puede resistir el material antes de sufrir una deformación plástica, en un resultado cuantitativo es de solo el 8,17% del esfuerzo de fluencia del acero galvanizado. En la tabla 12, se muestran los esfuerzos máximos equivalentes de Von Mises generados en los diferentes elementos que componen el aerogenerador, así como la comparación con el esfuerzo de fluencia para cada material y el coeficiente de seguridad para cada elemento. Este último se calcula dividiendo el esfuerzo de fluencia entre esfuerzo máximo equivalente de Von Mises [72].

Tabla 14.

Esfuerzos máximos generados en los elementos del aerogenerador.

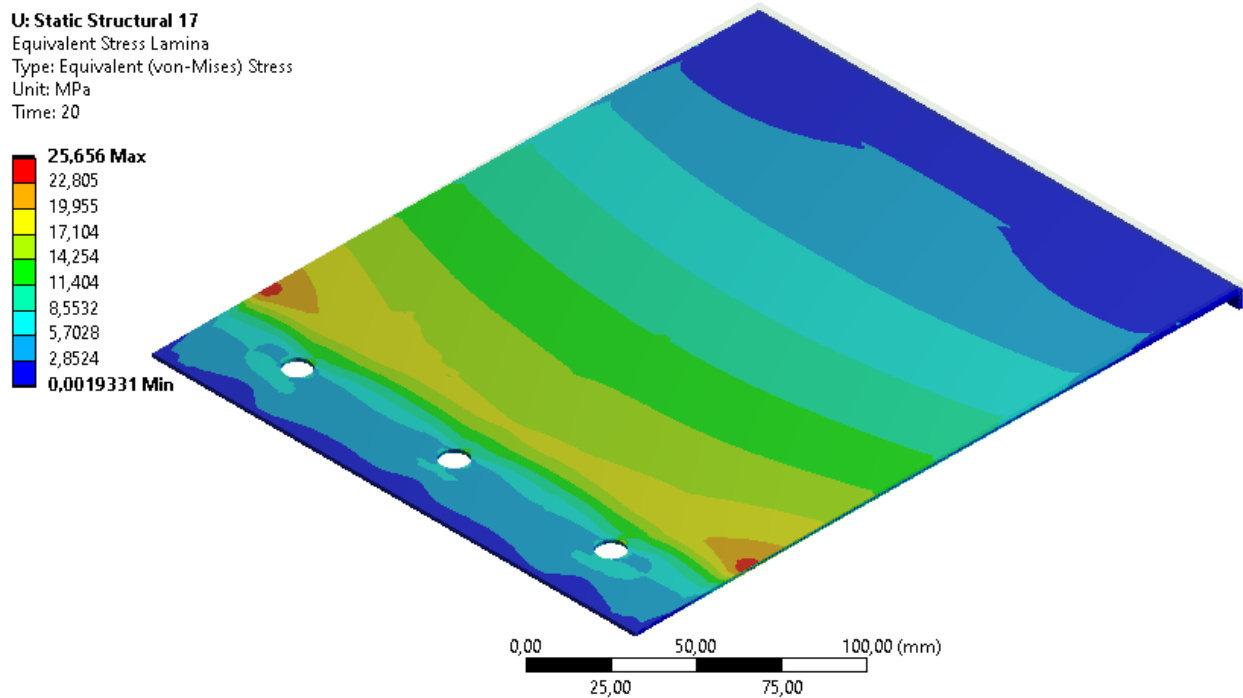
Material	Esfuerzo de fluencia del material [MPa]	Elemento del aerogenerador	Esfuerzo máximo en el elemento [MPa]	Porcentaje comparativo [%]	Coefficiente de seguridad (Cs)
Nylon 6	43,1	Soportes base	0,21636	0,50199536	199,2050287
		Perfil alar	0,52494	1,21795824	82,10462148
		Cuerpo de farol	0,087901	0,20394664	490,3243422
Acero estructural	250	Tuercas	3,6935	1,4774	67,68647624
		Tornillos	3,8279	1,53116	65,30996108
Acero galvanizado	314	Lamina vibratoria	25,656	8,17070064	12,23885251

Fuente: Elaboración propia

Al analizar los resultados presentes en la tabla 12, se hace evidente que el esfuerzo máximo está aplicado en la lámina vibratoria, teniendo un factor de seguridad de 12,239 en la sección donde se une la lámina vibratoria con el perfil alar, ya que es en esta zona donde se genera el más alto esfuerzo (ver figura 24). Con estos resultados numéricos se puede afirmar que el elemento más crítico es la lámina vibratoria, fabricada en acero galvanizado; los demás elementos tienen un factor de seguridad superior a 50, debido a que estos no soportan una magnitud de esfuerzo alta en comparación con el esfuerzo de fluencia que puede soportar cada uno de los materiales de los cuales están fabricadas las diferentes piezas que componen el aerogenerador. En la sección de anexos, se pueden ver gráficamente los contornos de esfuerzo generados en las superficies de los elementos del dispositivo.

Figura 18.

Contorno de esfuerzos equivalentes de Von Mises en la lámina vibratoria.



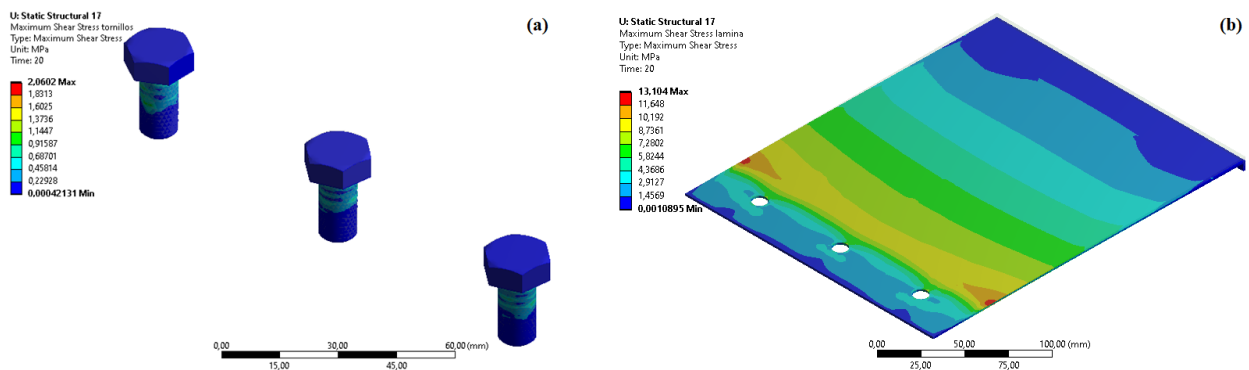
Fuente: Elaboración propia

Debido a la función que cumplen algunos elementos en el ensamble del aerogenerador, se conoce que están sometidos a esfuerzos cortantes, por tal razón, es necesario analizar la magnitud de esfuerzo cortante al cual están sometidas estas piezas. La unión atornillada es de suma importancia para el funcionamiento del dispositivo, si uno de los elementos que componen esta unión llega a fallar, el aerogenerador no cumpliría la acción para la cual está diseñado y en un peor caso, generar un accidente porque la lámina vibratoria y el cuerpo de farol podrían salir expedidos debido a la acción de la fuerza del viento; analizando el esfuerzo cortante en los tornillos, se logra evidenciar en valor numérico máximo de 2,06 MPa, magnitud que no supera el esfuerzo de fluencia del material con el cual se definió este elemento (acero estructural [250 MPa]). Adicionalmente, se estudió el esfuerzo cortante generado sobre la lámina vibratoria,

especialmente en la unión de este elemento con el cuerpo de farol, ya que el extremo de la lámina tiene una dobladura con un ángulo de 90° y el vértice de este puede convertirse en un concentrador de esfuerzos, sin embargo, el valor numérico máximo arrojado por el módulo *Mechanical* de ANSYS es de 13,104 MPa, comparando esta magnitud de esfuerzo cortante con el esfuerzo de fluencia de acero galvanizado, se puede afirmar que el elemento soporta bien las cargas y no hay riesgo de una falla bajo carga estática, pues el valor del esfuerzo cortante máximo es solo 4,17% de lo que resiste el material antes de sufrir deformaciones irreversibles, cabe resaltar que este esfuerzo cortante máximo en la lámina se genera en la unión del perfil alar y la lámina vibratoria, y no en la unión del cuerpo de farol y la lámina vibratoria, donde se esperaban esfuerzos más altos, sin embargo, no resulta ser así pues no existe un movimiento relativo entre estos dos últimos elementos. En la figura 25 se puede observar el contorno de esfuerzo cortante máximo en los tornillos y la lámina vibratoria.

Figura 19.

Contornos de esfuerzo cortante máximo. a) contorno de esfuerzo cortante en los tornillos de la unión atornillada; b) contorno de esfuerzo cortante en la lámina vibratoria.



Fuente: Elaboración propia

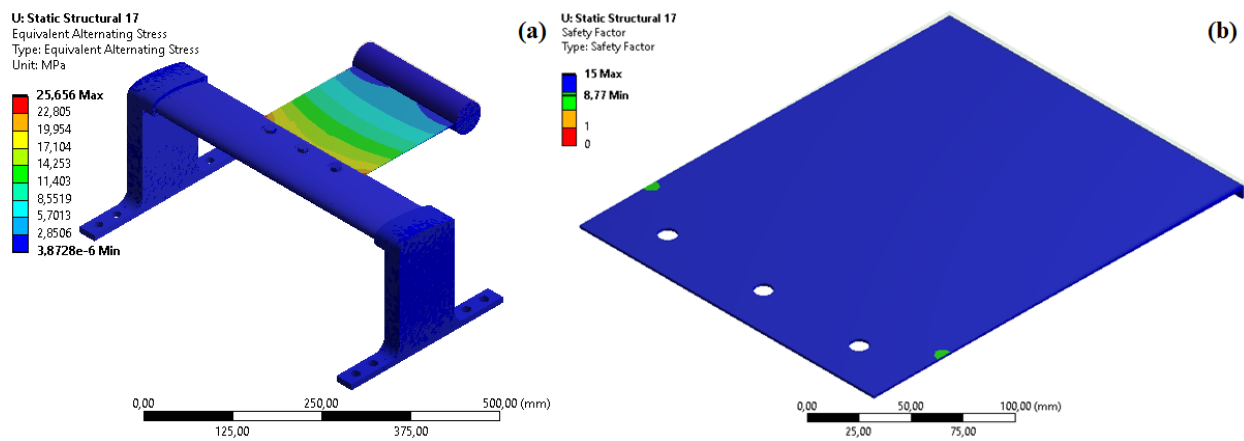
Los aerogeneradores no giratorios funcionan haciendo uso de fenómenos vibratorios inducidos por flujo, movimientos que resultan ser repetitivos y generan estrés por fatiga en los

elementos del dispositivo generador de energía eléctrica. Es por esta razón, que se toma la decisión de estudiar el comportamiento a fatiga del aerogenerador, especialmente de la lámina vibratoria, debido a que este elemento soporta el movimiento oscilatorio generado en el cuerpo sólido (cuerpo de farol) cuando el flujo de fluido choca contra él. Haciendo uso de la herramienta *Fatigue Tool* del módulo *Mechanical* de *ANSYS*, se configuran las condiciones con las que se van a trabajar para hacer el estudio a fatiga del aerogenerador; como primera medida se define una carga totalmente invertida y una teoría de falla basada en el criterio de Goodman.

Con las condiciones de frontera mencionadas anteriormente y, la configuración del *Fatigue Tool*, se procede a realizar el estudio estructural a fatiga. El esfuerzo alternante equivalente de Von Mises máximo generado en toda la superficie del aerogenerador es de 25,656 MPa, magnitud igual al esfuerzo equivalente de Von Mises máximo obtenido en el estudio estructural estático, se asume que este valor es igual, debido a que la geometría del aerogenerador es simétrica y la carga cíclica aplicada para el estudio a fatiga es completamente reversible. Por otro lado, la vida de los elementos que componen el aerogenerador es infinita, pues los esfuerzos no afectan de manera considerable la estructura del aerogenerador, sin embargo, como el aerogenerador está construido de tres materiales diferentes, varía la vida de los elementos, pero aun así gozando de una vida infinita propia de cada material (ver figura 27). En cuanto al factor de seguridad, este criterio es más bajo que la magnitud que toma en el estudio estructural estático, el valor numérico es de 8,77. Situado en la sección donde se genera el esfuerzo más alto (unión de la lámina vibratoria con el perfil alar), la reducción de esta magnitud se debe a que ya no se tiene en cuenta solo el esfuerzo de fluencia para evaluar el factor de seguridad, sino que también se analiza con el esfuerzo último a tensión del material.

Figura 20.

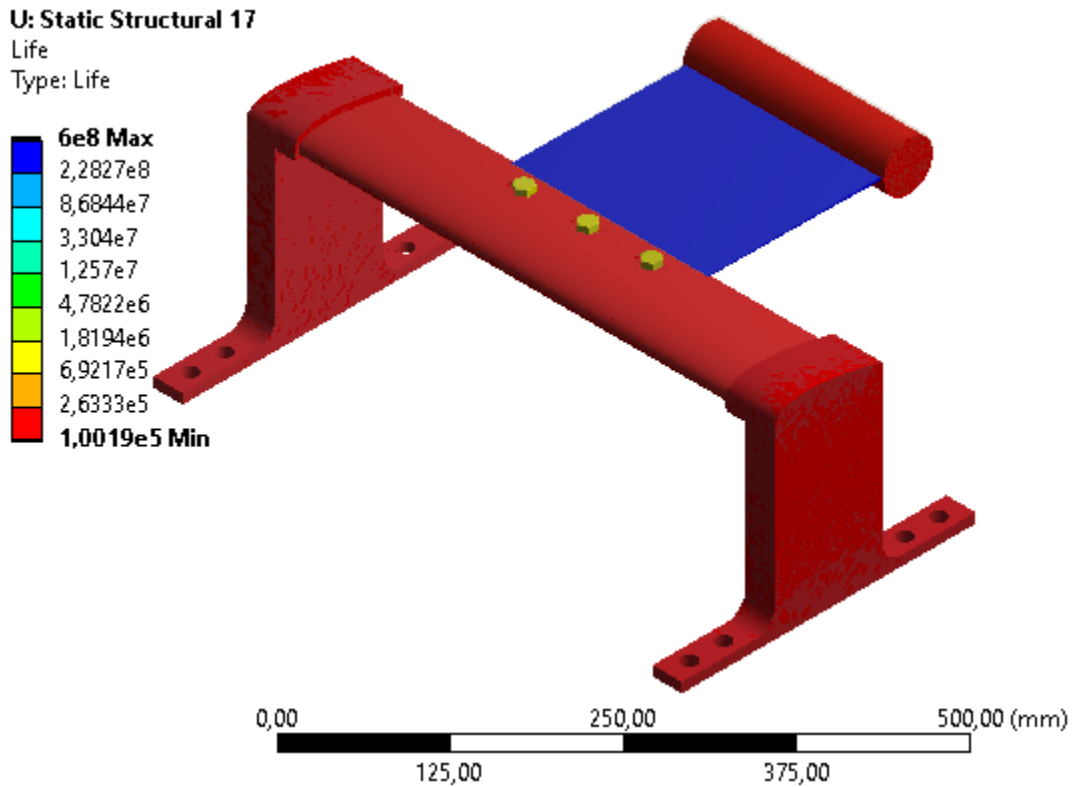
Resultados del estudio a fatiga bajo mismas condiciones de carga. a) contorno de esfuerzo alternante equivalente de Von Mises sobre la superficie del aerogenerador; b) contorno del factor de seguridad sobre la lámina vibratoria.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 21.

Vida de los elementos que componen el aerogenerador.



Fuente: Elaboración propia

Con este estudio a fatiga que se realizó, se comprueba que el aerogenerador puede resistir satisfactoriamente las cargas que se le aplican, los factores de seguridad son superiores a 1, por lo que es un diseño seguro de implementar, sin embargo, es necesario realizar un estudio bajo ambiente y condiciones controladas para probar el dispositivo en un ambiente real y así verificar su correcto funcionamiento.

Conclusiones y recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos con la encuesta realizada y su posterior análisis mediante un despliegue de funciones de calidad, las diferentes geometrías propuestas en los artículos de investigación sobre aerogeneradores no giratorios, la revisión de patentes que usan fenómenos vibratorios inducidos por flujo y materiales piezoeléctricos para generar energía eléctrica, se plantearon cinco alternativas de dispositivos generadores de energía eléctrica que aprovechan el fenómeno de vibración inducida por flujo, con el fin de estudiar el comportamiento del fluido alrededor de los prototipos y verificar cuál de estas genera un menor coeficiente de arrastre. Para la propuesta de estas alternativas se tuvo en cuenta las necesidades, requerimientos y opiniones expresadas por los actores implicados en la operación de las flotas de transporte masivo de pasajeros, así como geometrías convencionales de aerogeneradores no giratorios y accesorios para vehículos.

Se realizaron las simulaciones fluidodinámicas para las cinco alternativas propuestas, se evidenció que el prototipo número cinco es el que genera un menor coeficiente de arrastre, teniendo un valor de 0,742, el perfil alar aerodinámico con el cual cuenta el aerogenerador, permite que este no genere una gran oposición para que el flujo de fluido pase alrededor de él. Adicionalmente, el comportamiento del fluido alrededor del aerogenerador es acorde a lo esperado, dentro del análisis se puede resaltar la presión en la zona posterior al cuerpo de farol, donde el valor promedio de esta propiedad es de $1,631 \times 10^{-6}$ MPa y la intensidad turbulenta máxima tiene un valor numérico aproximado de 19,840%, esto ratifica una formación de vórtices de Von Kármán después de que el fluido choca contra el cuerpo de farol, pues los dos valores antes mencionados están presentes en la zona de interés.

Se ejecutó el estudio estructural bajo condiciones estáticas para la geometría final del prototipo seleccionado. Las condiciones de frontera definidas para este estudio fueron: la presión estática ejercida sobre las caras de los elementos del aerogenerador con una frecuencia de oscilación de 634,167 Hz, dos puntos de apoyo y el efecto de la aceleración gravitatoria. Con las condiciones antes mencionadas se comprobó que la estructura del aerogenerador resiste las cargas a las cuales está sometida, se presenta una deformación máxima de 3,193 mm, lo suficiente para flexar una lámina de material piezoeléctrico y generar potencial eléctrico; el esfuerzo equivalente máximo de Von Mises se genera en la placa vibratoria con una magnitud de 25,656 MPa, este elemento tiene un factor de seguridad de 12,238, valor que garantiza un buen comportamiento mecánico de la pieza. Adicionalmente, se realizó un estudio a fatiga para verificar la vida útil de cada elemento, los cuales presentan vida infinita; el esfuerzo alternante máximo de Von Mises está presente en la misma zona que el esfuerzo máximo equivalente, el factor de seguridad a fatiga para este elemento es de 8,77, aunque es más bajo que el factor de seguridad estático, el valor numérico comprueba el correcto funcionamiento del aerogenerador.

Se elaboraron los planos de fabricación de cada uno de los elementos que componen el aerogenerador, el diseño de cada pieza está pensado para un fácil ensamblaje del dispositivo, así como una sustitución rápida de las piezas si alguna llega a presentar daños que afecten el funcionamiento del prototipo. Los materiales fueron seleccionados bajo criterio de resistencia, comercialización y fácil fabricación de los elementos, con los resultados obtenidos en las simulaciones tanto fluidodinámicas como estructurales, se comprueba el correcto funcionamiento del aerogenerador, así como la resistencia estructural de cada elemento.

Las simulaciones CFD fueron realizadas bajo una condición de flujo estacionario, por lo que la generación de vórtices de Von Kármán no se logra evidenciar de manera gráfica;

sin embargo, los datos arrojados en el estudio fluidodinámico muestran una zona de alta turbulencia, en donde mismo se presenta el menor valor de presión dinámica y velocidad, con lo cual se puede asumir una formación de vórtices. No obstante, se recomienda realizar un estudio CFD bajo condiciones de flujo transitorio con el fin de cerciorar la formación de calles de Von Kármán, de esta manera se puede obtener la frecuencia exacta del desprendimiento de vórtices y así realizar un estudio a fatiga más minucioso el cual valide el correcto funcionamiento del aerogenerador y la vida útil de cada elemento.

A pesar de que con los resultados obtenidos en el estudio estructural se verifica el buen funcionamiento de la lámina vibratoria fabricada en acero galvanizado, cabe la posibilidad de implementar láminas de material compuesto, sin embargo, para esto se debe realizar un estudio del material para obtener las propiedades básicas y así realizar el análisis estructural que compruebe el funcionamiento y buen uso de la lámina vibratoria fabricada en lámina compuesta.

Es importante y necesario realizar pruebas experimentales en túnel de viento para validar los resultados obtenidos en los procesos de simulaciones realizados en este proyecto, con los datos arrojados en un estudio experimental bajo un ambiente controlado. De esta manera se puede ratificar el funcionamiento del aerogenerador propuesto.

Referencias

- [1] Ministerio de ciencia y tecnología de España, «Impactos medioambientales de la producción de electricidad,» Asociación de productores de Energías Renovables, Madrid, 2014.
- [2] The International Energy Agency, «Renewables,» IEA, 12 octubre 2021. [En línea]. Available: <https://www.iea.org/topics/renewables/>. [Último acceso: marzo 24 2021].
- [3] Colegio oficial de ingenieros de telecomunicación, «Energía Solar Fotovoltaica,» Colegio oficial de ingenieros de telecomunicación, Madrid, 2002.
- [4] N. Marzolf, «Emprendimiento de la energía geotérmica en Colombia,» Banco Interamericano de Desarrollo, Colombia, 2015.

- [5] J. Fano, «La generación de energía hidroeléctrica,» *Anales de mecánica y electricidad*, vol. 83, n° 1, pp. 35-40, 2006.
- [6] M. Chingotto, «Energía maeromotriz ¿si? ¿dónde? ¿no? ¿por qué? conclusiones,» *Boletín del Centro Naval*, vol. 1, n° 813, pp. 101-107, 2006.
- [7] C. Espejo Marin, «La energía eólica en España,» *Investigaciones geográficas*, vol. 1, n° 35, pp. 45-65, 2004.
- [8] S. Shah, R. Kumar, K. Raahemifar y A. y Fung, «Design, modeling and economic performance of a vertical axis wind turbine,» *Energy Reports*, vol. 1, n° 4, pp. 619-623, 2018.
- [9] P. Gulve y S. B. Barve, «Design and construction of vertical axis wind turbine,» *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)*, vol. 5, n° 10, pp. 148-155, 2014.
- [10] A. Dhote y V. Bankar, «Design analysis and fabrication of Savonius vertical axis wind turbine,» *International Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 2, n° 3, pp. 2048-2054, 2015.
- [11] X. Jin, G. Zhao, K. Gao y W. Ju, «Darrieus vertical axis wind turbine: Basic research methods,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 42, pp. 212-225, 2015.
- [12] A. Dilimulati, T. Stathopoulos y M. Paraschivoiu, «Wind turbine designs for urban applications: A case study of shrouded diffuser casing for turbines,» *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 175, pp. 179-192, 2018.

- [13] D. Yáñez Villareal, «VIV resonant wind generators,» *Vortex Bladeless*, vol. 2, pp. 1-6, 2018.
- [14] P. Moreno Cortés, *Energía eólica: Ventajas y desventajas de su utilización en Colombia*, Bogotá: Monografía para optar por el título de Especialista en Gerencia Ambiental. Universidad Libre., 2013.
- [15] Revé, «La separación óptima entre aerogeneradores,» *Revé*, 1 enero 2011. [En línea]. Available: <https://www.evwind.com/2011/01/01/la-separacion-optima-entre-aerogeneradores>. [Último acceso: 11 abril 2020].
- [16] A. B. Rostami y M. Armandei, «Renewable energy harvesting by vortex-induced motions: Review and benchmarking of technologies,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 70, pp. 193-214, 2017.
- [17] Ministerio de Ciencia e Innovación España, «Materiales piezoeléctricos,» *Boletín VT*, Madrid, 2010.
- [18] R. Soto Valle, *Conversión de energía eólica mediante vibraciones inducidas*, Santiago de Chile: Tesis para optar al grado de magíster en Ciencias de la Ingeniería, mención Mecánica. Universidad de Chile., 2016.
- [19] H. Gardea Villegas, «Conceptos básicos sobre la formación y teoría de los vórtices,» *Ingeniería Investigación y Tecnología*, vol. 2, n° 2, pp. 81-87, 2001.
- [20] D. A. Wang y H. H. Ko, «Piezoelectric energy harvesting from flow-induced vibration.,» *Journal of micromechanics and microengineering*, vol. 20, 2010.
- [21] R. Blevins, *Flow-induced vibration*, New York, 1977.

- [22] A. Chizfahm, E. A. Yazdi y M. Eghtesad, «Dynamic modeling of vortex induced vibration wind turbines,» *Renewable Energy*, vol. 121, pp. 632-643, 2018.
- [23] J. Durán, «Nociones de simulación computacional: simulaciones y modelos científicos,» *Argumentos de Razón Técnica*, n° 18, pp. 87-110, 2015.
- [24] ESSS, «Software Ansys Fluidodinámica,» ESSS, s.f. [En línea]. Available: <https://www.esss.co/es/ansys-simulacion-computacional/fluidodinamica/>. [Último acceso: 17 marzo 2020].
- [25] ESS, «Software Ansys Análisis estructural,» ESSS, s.f. [En línea]. Available: <https://www.esss.co/es/ansys-simulacion-computacional/analisis-estructural/>. [Último acceso: 17 marzo 2020].
- [26] P. Cobreiro y N. Jiménez, «Aerogeneradores (I): funcionamiento y marco normativo de prevención de riesgos laborales,» *Notas de prevención, Instituto Naiconal de Seguridad e Higiene en el Trabajo*, vol. 1022, pp. 1-6, 2014.
- [27] M. M. S. Sabad, «Aerodynamic Characteristic Of Vortex Bladeless Wind Turbine: A Short Review.,» *Research Progress in Mechanical and Manufacturing Engineering*, vol. 2, n° 1, pp. 177-186, 2021.
- [28] Kunihiko, Maziear, Steven, Yiyang, Karthik, Shervin, Scott y Chi-An, «Modal Analysis of Fluid Flows: Applications and Outlook,» *Aerospace Research Central*, vol. 58, n° 3, 2019.
- [29] J. Díaz y C. Bañol, Número de Reynolds, Bogotá: Tesis para optar por el título de Ingeniero Civil, 2015.

- [30] J. Maqui Santos, Fenomeno De Resonancia De La Vibracion Inducida Por Desprendimiento De Vortices Del Viento Sobre Una Estructura Cilindrica Por El Modelo Armonico, Perú: Unitru, 2017.
- [31] E. Houghton, P. Carpenter, S. Collicott y D. Valentine, «Basic Concepts and Definitions,» *Elservier*, pp. 1-68, 2013.
- [32] J. Roberto Mercado, P. Guido, J. Sánchez Sesma y M. Íñiguez, «Fórmulas para el coeficiente de arrastre y la ecuación Navier-Stokes fraccional,» *Tecnología y ciencias del agua*, vol. 5, nº 2, pp. 149-160, 2014.
- [33] M. Zamora y I. Montiel, «Piezoelectricidad,» *Universidad Autónoma de México*, s.f.
- [34] A. Gómez Molina, Diseño de un Sistema de energy harvesting basado en piezoeléctricos, Alcalá: Universidad de Alcalá. Escuela Politécnica Superior, 2018.
- [35] W. Hobbs y D. Lu, «Tree-inspired piezoelectric energy harvesting,» *Journal of Fluids and Structures*, pp. 1-12, 2011.
- [36] Wang, Chiu y Pham, «Electromagnetic energy harvesting from vibrations induced by Kármán vortex street,» *Mechatronics*, vol. 22, nº 6, pp. 746-756, 2012.
- [37] Q. Wen, R. Schulze, D. Billep, T. Otto y T. Gessner, «Modeling and optimization of a vortex induced vibration fluid kinetic energy harvester,» *Procedia Engineering*, vol. 87, pp. 779-782, 2014.

- [38] J. Jia, X. Shan, D. Upadrashta, T. Xie, Y. Yang y R. Song, «Modeling and analysis of upright piezoelectric energy harvester under aerodynamic vortex-induced vibration.,» *Micromachines*, vol. 9, nº 12, p. 667, 2018.
- [39] Qin, Deng, Pan, Zhou, Du y Zhu, «Harvesting wind energy with bi-stable snap-through excited by vortex-induced vibration and galloping.,» *Energy*, vol. 189, 2019.
- [40] S. Yando, United States Patent 3500451, 1970.
- [41] E. Kolm y H. Kolm, «United States Patent 4387318,» vol. 00, nº 19, 1983.
- [42] Schmidt y Bozeman, «United States Patent 4536674,» nº 19, pp. 1-6, 1985.
- [43] Newbould, «United States Patent 5039901,» nº 19, 1991.
- [44] Carroll, «United States Patent 5548177,» vol. 1, nº 19, 1996.
- [45] Michael, Epstein y Taylor, «United States Patent 5552657,» nº 19, 1996.
- [46] Michael, Epstein y Taylor, «United States Patent 5621264,» nº 19, pp. 1-6, 1997.
- [47] Bowles, Eaton, Gore, McBride y Rhaman, «United States Patent 20080277941A1,» vol. 1, nº 19, pp. 11-14, 2008.
- [48] J. Philippe, A. Guillaume y P. Jack, «Canadian Patent 2683644,» pp. 1-28, 2008.
- [49] K. Tsou, «United States Patent 8102072B2,» vol. 2, nº 12, 2012.
- [50] ESS, «Dinámica de Fluidos Computacional: ¿que es?,» ESS, 24 junio 2016. [En línea]. Available: <https://www.esss.co/es/blog/dinamica-de-fluidos-computacional-que-es/>. [Último acceso: 15 junio 2021].

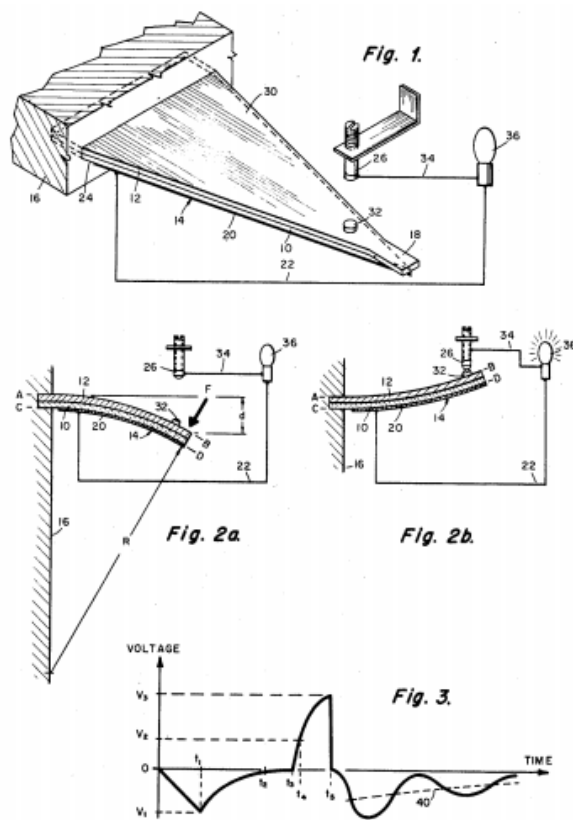
- [51] C. Hirsch, «Numerical computation of internal and external flows: The fundamentals of computational fluid dynamics,» *Elsevier*, pp. 647-656, 2007.
- [52] TransMilenio, «MÁS DE DOS MIL MILLONES DE PASAJEROS MOVILIZADOS EN LOS 8 AÑOS DE OPERACIÓN,» TransMilenio, 2008.
[En línea]. Available:
[https://www.transmilenio.gov.co/publicaciones/146660/mas_de_dos_millonnes_de_pasajeros_movilizados_en_los_8_anos_de_operacion/](https://www.transmilenio.gov.co/publicaciones/146660/mas_de_dos_mil_millonnes_de_pasajeros_movilizados_en_los_8_anos_de_operacion/). [Último acceso: 30 abril 2021].
- [53] D. Hofmeister Ruiz, OBTENCIÓN EXPERIMENTAL DE LA FUERZA DE ARRASTRE EN REDES LOBERAS PARA LA INDUSTRIA ACUÍCOLA MEDIANTE ENSAYO DE REMOLQUE EN CANAL DE PRUEBAS, Chile: Tesis Universidad Austral de Chile, 2018.
- [54] A. Díaz Morcillo, MÉTODOS DE MALLADO Y ALGORITMOS ADAPTATIVOS EN DOS Y TRES DIMENSIONES PARA LA RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS ELECTROMAGNÉTICOS CERRADOS MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS, Valencia: Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Valencia, 2000.
- [55] P. Utrilla Noriega, «Validación de resultados mediante CFD,» Library, 2018.
[En línea]. Available: <https://1library.co/document/y4jj8xry-validacion-de-resultados-mediante-cfd.html>.
- [56] ANSYS, «“FLUENT Tutorial Guide,» 2020. [En línea]. Available:
<http://users.abo.fi/rzevenho/ansys%20fluent%2018%20tutorial%20guide.pdf>.
- [57] ANSYS, «ANSYS FLUENT 12.0 User’s Guide,» *Ansys*, vol. 6, 2009.

- [58] G. Richmond Navarro, «Modelos de turbulencia introductorio,» s.f. [En línea]. Available:
https://www.tec.ac.cr/sites/default/files/media/doc/modelos_de_turbulencia_introductorio.pdf.
- [59] ANSYS, «28.4.3. Pressure-Velocity Coupling,» s.f. [En línea]. Available:
https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v201/en/flu_th/flu_th_sec_uns_solve_pv.html.
- [60] Lendaris, «Structural Modeling - A Tutrial Guide,» *Technol Forecast Soc Chang*, vol. 14, n° 4, pp. 277-428, 1979.
- [61] S. Nebot Montagud, DESARROLLO DE PIEZAS DE POLIAMIDA MEDIANTE IMPRESIÓN 3D, Valencia: Trabajo de grado Universitat Politècnica de València, 2015.
- [62] A. Blanco Prieto, Estudio comparativo entre la obtención de piezas mediante impresión 3D y su obtención mediante moldes u otros procesos de fabricación, Valencia: Tesis Universidad Politécnica de Valencia, 2020.
- [63] F. Velásquez Salazar, Caracterización de las propiedades mecánicas del Duralón, Sangolquí: Universidad de las fuerzas armadas, 2018.
- [64] P. Terán, «PROPIEDADES DEL ACERO USADO EN LAMINADO EN FRIO,» s.f.
- [65] J. Mayugo Majó, Fatiga en materiales compuestos: comportamiento y mecanismos de degradación, s.f.
- [66] P. De la Cruz, FATIGUE OF COATED AND LASER HARDENED STEELS, Linköping, 1990.

- [67] Ozgün, «Ansys Contact Types and Explanations,» MECHEAD, 7 marzo 2021. [En línea]. Available: <https://www.mechead.com/contact-types-and-behaviours-in-ansys/>.
- [68] Prontubeam, «Aprendiendo ANSYS- Aplicar Peso Propio,» Prontubeam, 21 agosto 2019. [En línea]. Available: https://www.prontubeam.com/Aprendiendo-ANSYS/Clases/Aprendiendo-ANSYS-Cargas-Aplicar-peso-propio/#:~:text=Para%20crear%20el%20caso%20de,%2C%20ACEL_X%2C%20ACEL_Y%2C%20ACEL_Z.. [Último acceso: 18 mayo 2021].
- [69] J. Ramirez Patran, C. Rojas Veloza, E. Forero García y H. Cerón Muñoz, POSSIBILITY OF BUFFETING ENERGY HARVESTING: COMPARATIVE STUDY OF THE VORTEX SHEDDING FREQUENCY FOR TWO DIFFERENT BLUFF BODY GEOMETRIES, 2020.
- [70] S. Rincón Murcia, E. Forero García, M. Torres y J. Ramirez Pastrán, «Electronic unit for the management of energy harvesting of different piezo generators,» *Crystals*, vol. 11, n° 6, p. 640, 2021.
- [71] S. Murillo Alejano, Análisis de vigas Con materiales piezoeléctricos, Madrid: Tesis Universidad Carlos III, 2016.
- [72] J. Massa, A. Giro y Giudici, CRITERIOS DE FALLA PARA TENSIONES COMBINADAS 1, Compendio de Cálculo Estructural II, 2015.

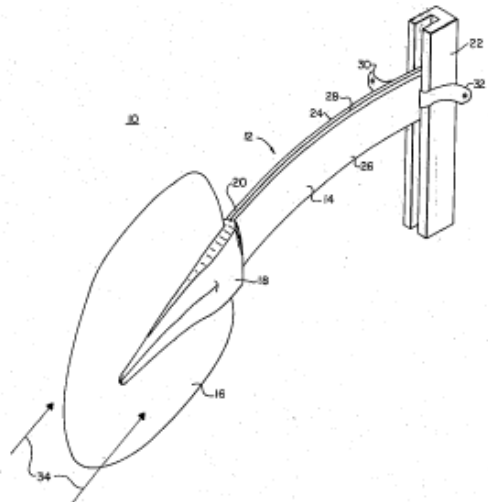
ANEXOS

Anexo A. Imagen patente US3500451.



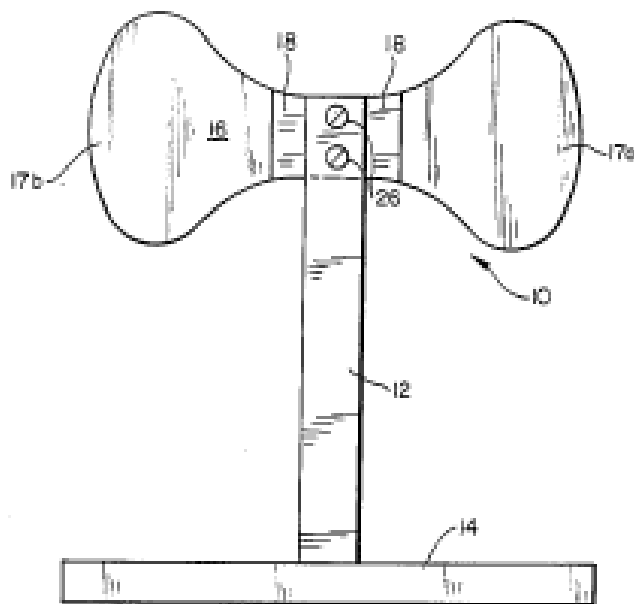
Fuente: Yando, [40].

Anexo B. Imagen patente US4387318.



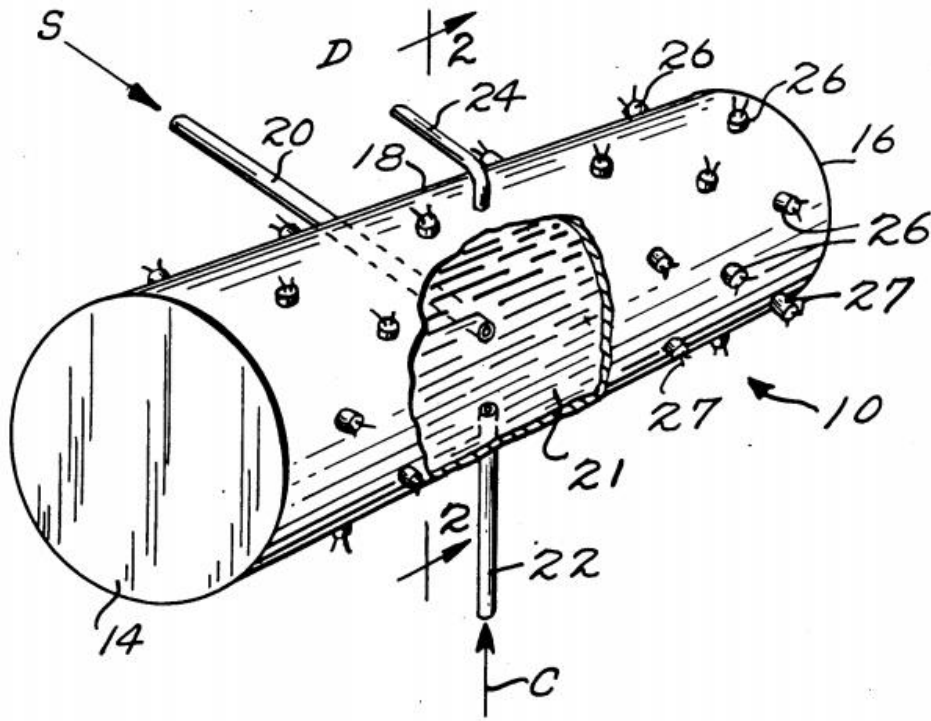
Fuente: Kolm y Kolm. [41].

Anexo C. Imagen patente US4536674.



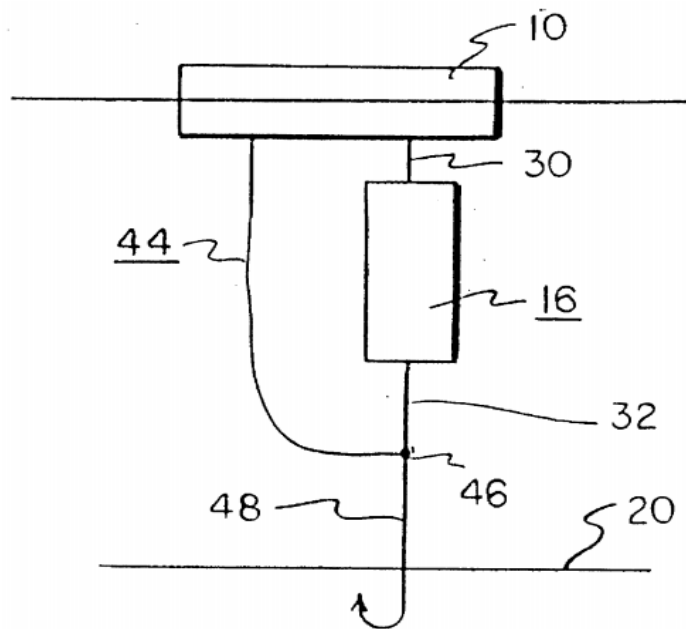
Fuente: Schmidt y Bozeman. [42]

Anexo D. Imagen patente US5039901.



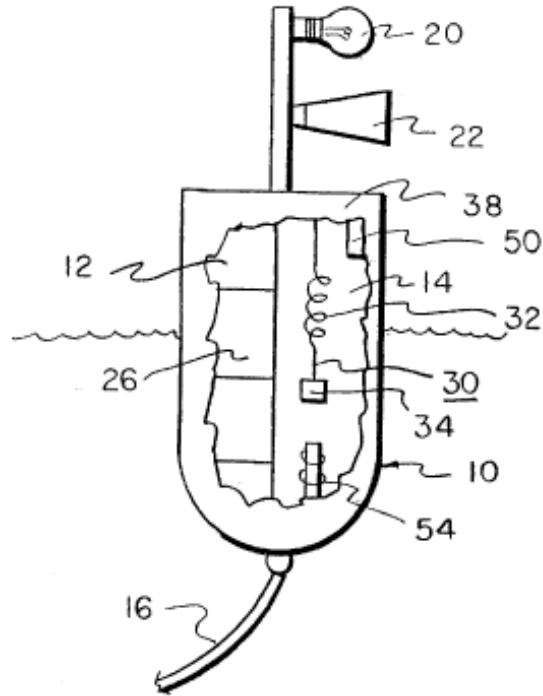
Fuente: Newbould. [43].

Anexo E. Imagen patente US5548177.



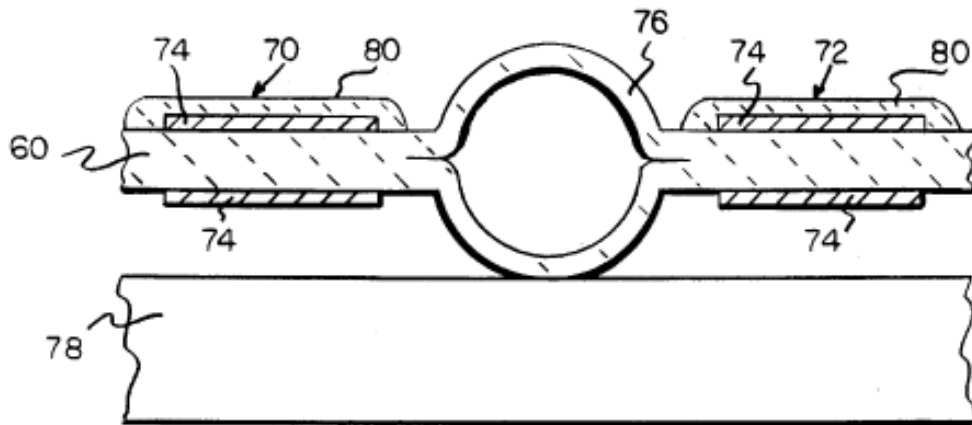
Fuente: Carroll. [44].

Anexo F. Imagen patente US5552657.



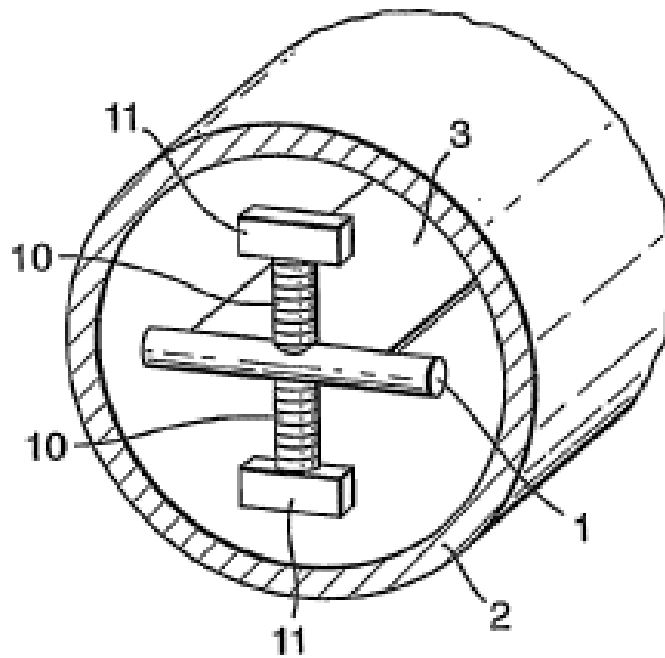
Fuente: Michael, Epstein, George y Taylor. [45].

Anexo G. Imagen patente US5621264.



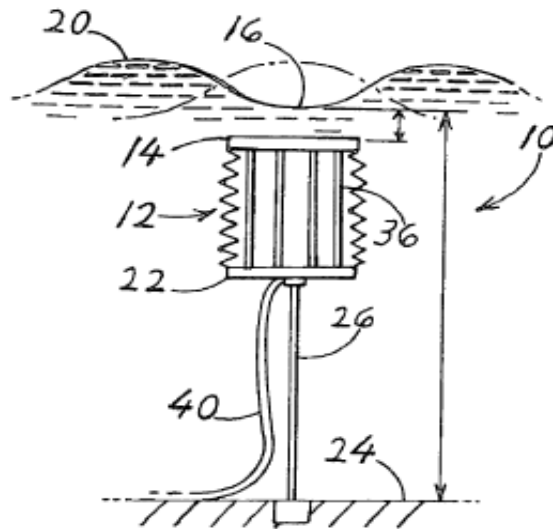
Fuente: Epstein y Taylor. [46].

Anexo H. Imagen patente US20080277941A1.



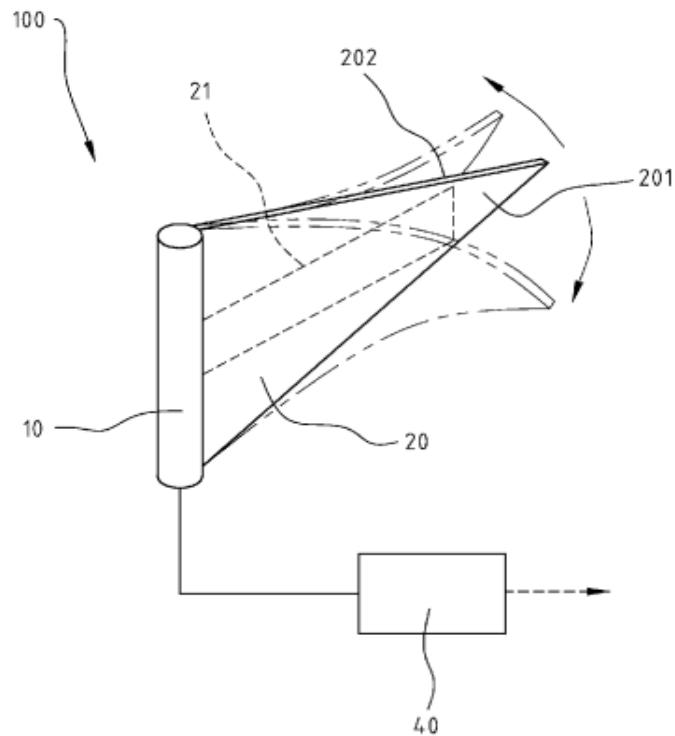
Fuente: Bowles, Eaton, Gore, McBride y Rahman. [47].

Anexo I Imagen patente CA2683644.



Fuente: Philippe, Guillaume y Jack. [48].

Anexo J. Imagen patente US8102072B2.



Fuente: Tsou. [49].

Anexo K. Contornos de esfuerzos en los elementos que componen el aerogenerador.

Prototipo de generación eléctrica eólica con movimientos oscilantes 107

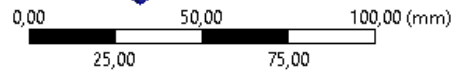
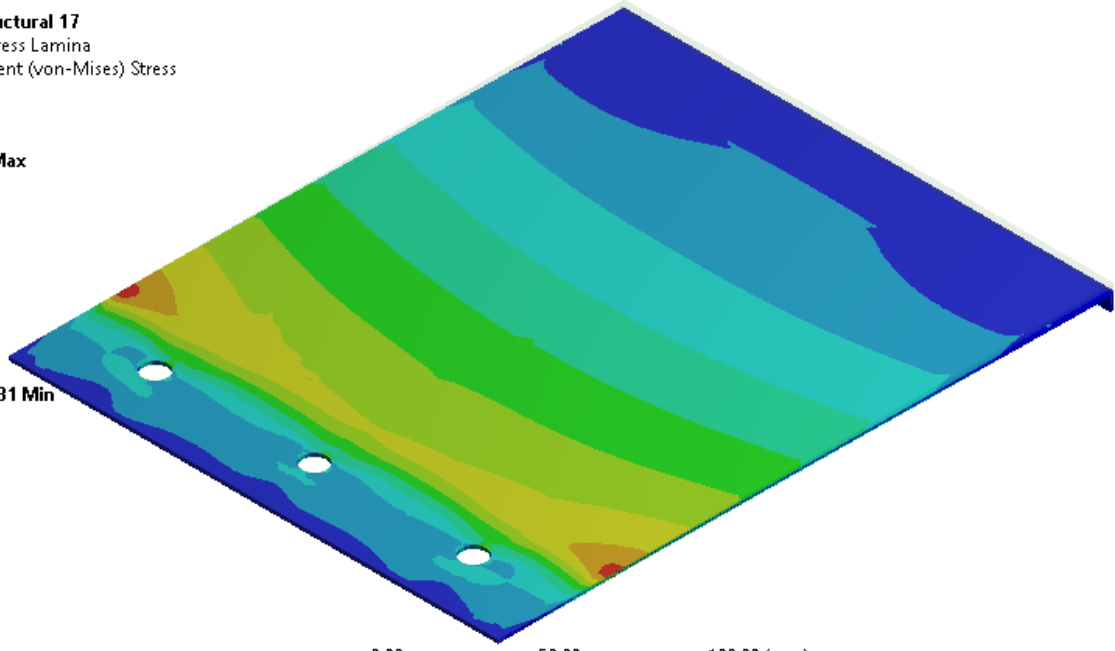
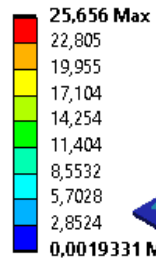
U: Static Structural 17

Equivalent Stress Lamina

Type: Equivalent (von-Mises) Stress

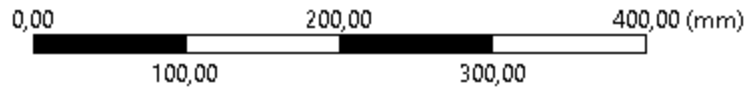
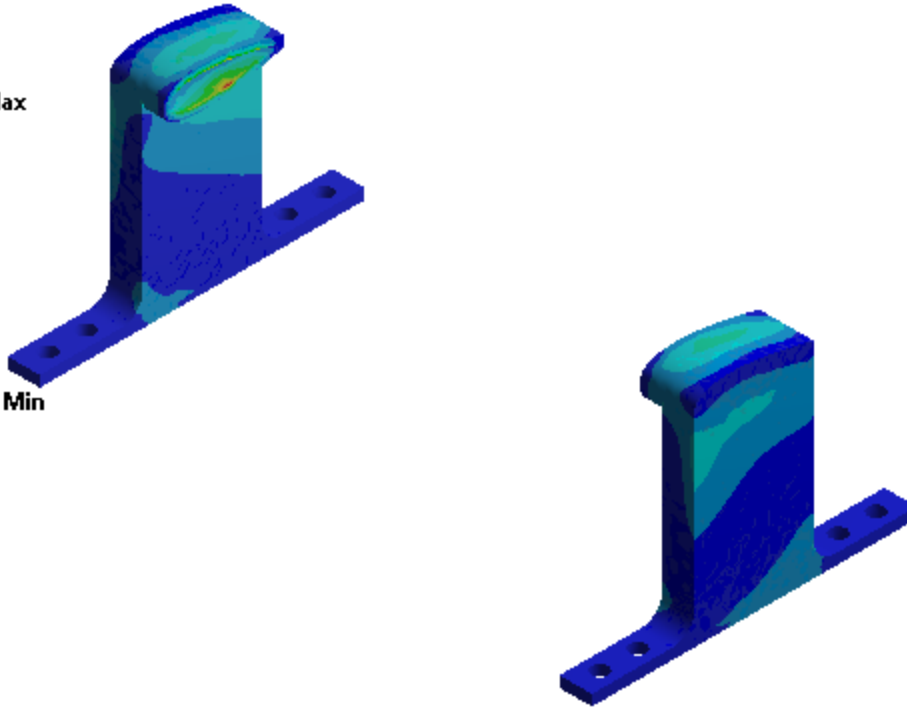
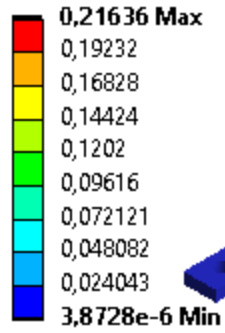
Unit: MPa

Time: 20



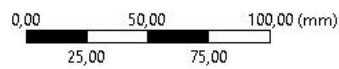
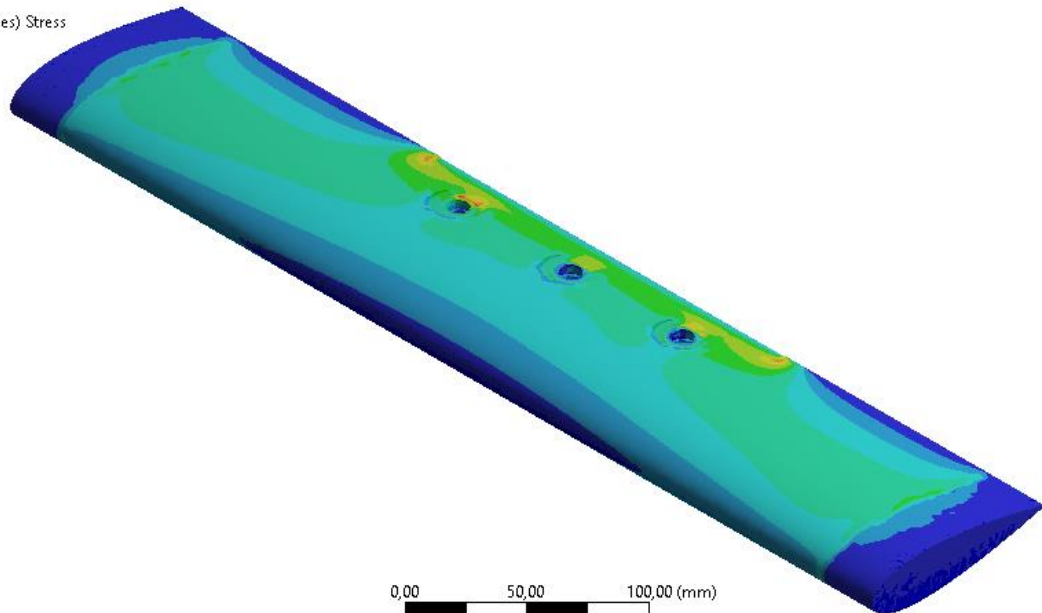
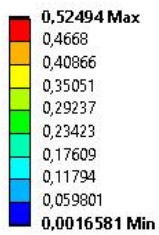
U: Static Structural 17

Equivalent Stress soportes
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 20



U: Static Structural 17

Equivalent Stress perfil
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 20



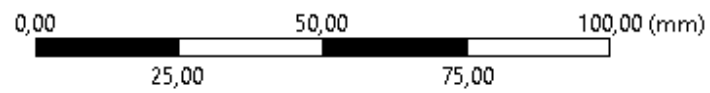
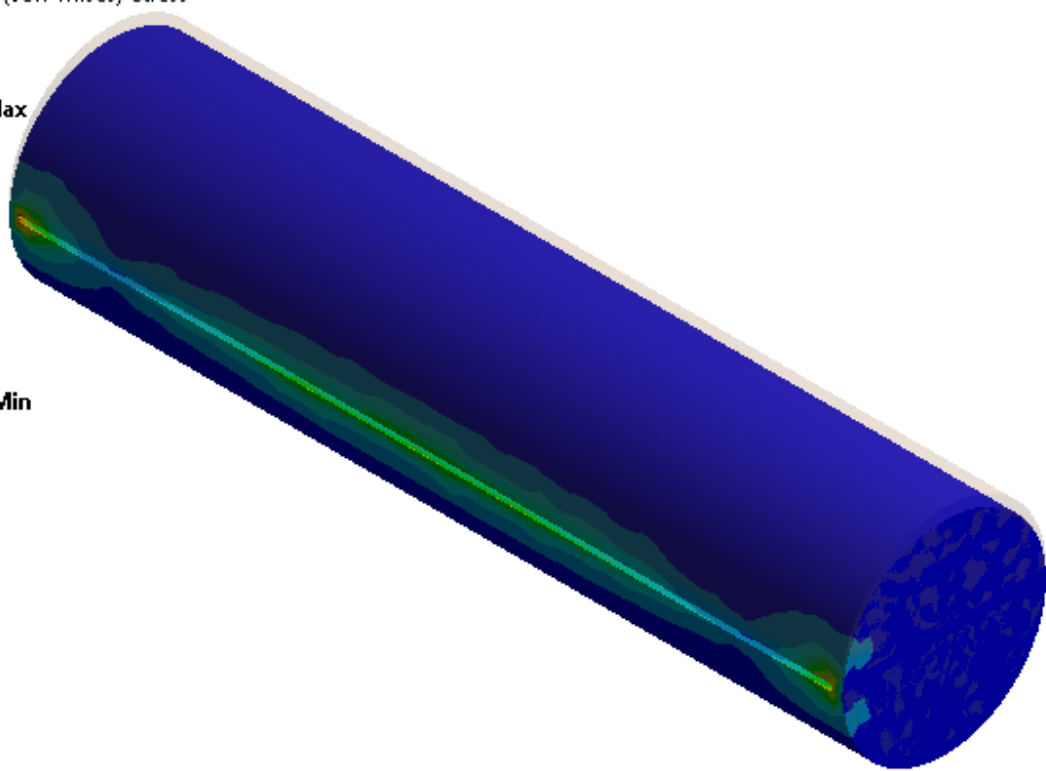
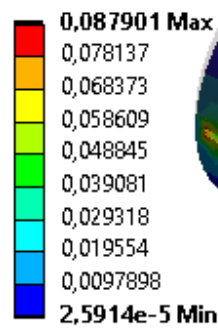
U: Static Structural 17

Equivalent Stress cuerpo

Type: Equivalent (von-Mises) Stress

Unit: MPa

Time: 20



Prototipo de generación eléctrica eólica con movimientos oscilantes 110

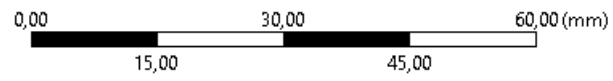
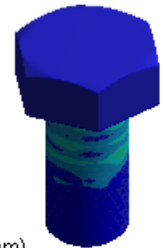
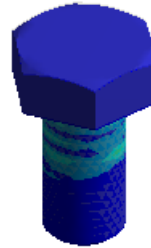
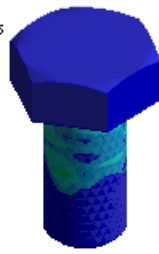
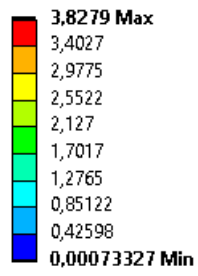
U: Static Structural 17

Equivalent Stress tornillos

Type: Equivalent (von-Mises) Stress

Unit: MPa

Time: 20



Prototipo de generación eléctrica eólica con movimientos oscilantes 111

U: Static Structural 17

Equivalent Stress tuercas

Type: Equivalent (von-Mises) Stress

Unit: MPa

Time: 20

