

Análisis de desplazamientos resultantes en palas de aerogeneradores verticales empleando SolidWorks

Analysis of resulting displacements in vertical wind turbine blades by SolidWorks

Luis A. Peña-Hernández ^a, José L. Rodríguez Muñoz ^b, José S. Pacheco Cedeño ^c, Jean F. Ituna Yudonago ^d, Carlos E. Borja Soto ^e

Abstract:

Wind turbine blades are mechanisms that have the purpose of receiving wind currents to transmit the force that they receive into electricity. During their operation, wind turbine blades experience torsional and compressive stresses due to the force exerted by the air on them, which is mainly affected by the type of blade and the type of material used for its manufacture. For this reason, the present work focuses on the analysis of the forces applied to the blades in two different configurations of wind turbines, called Model A and Model B. A static study was applied to both models, with the aim of determining and comparing the deformations suffered by the structure and blades to each of the proposed models, under the same operating conditions and the same type of material. In addition, the effect of ambient pressure and average blade speeds of the proposed models is compared using a wind tunnel developed in SolidWorks software, to determine the minimum speeds required for their operation and application. The results show that Model A had a maximum deformation of 45,289 mm at the top of the blades. Under the same operating conditions, the Model B experiences a maximum deformation of 18,344 mm, which occurs at the side edges of the wind turbine blade. Therefore, the Model B has 40.50% less deformation and better aerodynamic utilization than the Model A, which make it as the most viable configuration.

Keywords:

Turbine, design, analysis, models, SolidWorks

Resumen:

Las palas de los aerogeneradores son mecanismos que tienen la finalidad de recibir corrientes de viento para convertir la fuerza que reciben en electricidad. Durante su funcionamiento, las palas de los aerogeneradores experimentan esfuerzos de torsión y compresión debido a la fuerza que ejerce el aire sobre éstas, la cual se ve afectada principalmente por el tipo alabe y del tipo de materia que se utilice para su fabricación. El presente trabajo se centra en el análisis de las fuerzas aplicadas en las palas en dos configuraciones diferentes de aerogeneradores, llamados Modelo A y Modelo B. En ambos modelos se aplicó un análisis estático, con el objetivo de determinar y comparar las deformaciones que sufre la estructura y las palas a cada uno de los modelos propuestos, bajo las mismas condiciones de operación y mismo tipo de material. Además, se compara el efecto de la presión atmosférica (Presión del aire) y las velocidades promedio de las palas de los modelos propuestos utilizando el software SolidWorks, para determinar las velocidades mínimas requeridas para su funcionamiento y aplicación. Los resultados muestran que el Modelo A presentó en la parte superior de las palas una máxima deformación de 45.289 mm. Bajo las mismas condiciones de operación, el Modelo B experimenta una máxima deformación de 18.344 mm, el cual ocurre en los bordes laterales de la pala del aerogenerador. Por lo tanto, el Modelo B presenta

^a Autor de Correspondencia, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Ciudad Sahagún | Ciudad Sahagún-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0009-0001-7583-390X>, Email: pe352968@uaeh.edu.mx

^b Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Ciudad Sahagún | Ciudad Sahagún-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0002-4108-9414>, Email: jose_rodriguez@uaeh.edu.mx

^c Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Ciudad Sahagún | Ciudad Sahagún-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0002-3400-518X>, Email: sergio_pacheco@uaeh.edu.mx

^d Universidad Politécnica Metropolitana de Hidalgo | Pachuca-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0002-5766-3644>, Email: jituna@upmh.edu.mx

^e Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Ciudad Sahagún | Ciudad Sahagún-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0003-3385-8348>, Email: carlos_borja@uaeh.edu.mx

40.50% menor deformación y un mejor aprovechamiento aerodinámico, en comparación que el Modelo A, lo que lo hace como la configuración más viable para su implementación.

Palabras Clave:

Turbina, diseño, análisis, modelos, SolidWorks

Introducción

Los problemas relacionados a la revolución industrial, derivados por la crisis del petróleo ocasionó la búsqueda de máquinas, equipos y sistemas que produjeran energía eléctrica de manera renovable y eficiente. Dentro de las diferentes fuentes alternativas de energía se encuentran: la energía eólica, solar, hidráulica, entre otras. Sin embargo, dentro de la que se puso mayor atención en los años 70s fue la energía eólica, por ser eficiente, segura, sin emisiones e inagotable (Acciona, 2019). No fue hasta finales de esa década que se construyeron los primeros aerogeneradores, los cuales se comenzaron a comercializar con capacidades que podrían llegar a decenas de MW (Diago Vidal, 2019). A partir de estos avances, la energía eólica se disparó de forma imparable, sobre todo, derivado de los inconvenientes que presentó la producción de la energía eléctrica a partir de elementos reactivos, como es el caso de la energía nuclear.

La búsqueda por encontrar mejoras en el campo de la energía eólica llevo a que en la última década del siglo XX se realizarán avances significativos que hicieron de esta tecnología una fuente de energía alternativa viable a las fuentes convencionales de energía. Por tal motivo, la humanidad ha descubierto que la energía eólica presenta la ventaja de utilizar la fuerza del viento y convertirla en electricidad. En términos físicos, significa que se genera una energía cinética gracias al efecto de las corrientes del viento (Turcan, 2015).

La energía eólica es una fuente de energía renovable y limpia, debido a que proviene del viento. Además, es un recurso inagotable, el cual permite reducir el impacto ambiental, ya que no emite gases de efecto invernadero, efluentes líquidos, ni residuos sólidos. Por cada MWh de energía eólica producida se evita enviar a la atmósfera 600 kg de CO₂, que contribuyen directamente al efecto invernadero; 1,33 kg de SO₂, causante de la lluvia ácida que puede destruir la vegetación y alterar el ciclo del agua, y 1,67 kg de NO₂, contaminantes químicos que reducen notablemente la calidad del aire (Talayero y Martínez, 2011).

Es importante mencionar que México es uno de los países que cuentan con velocidades del viento favorables en varias regiones del país, cuyo rango oscila entre 5.4 m/s y 8.5 m/s, por lo tanto, México tiene un potencial eólico de

40,000 MW, que se encuentra distribuido principalmente en la parte central de la península de California, Península de Yucatán y en el Istmo de Tehuantepec (Beato, 2023). Para aprovechar la velocidad del viento y transformarla en energía eléctrica, se pueden emplear aerogeneradores del tipo Savonius y Darrieus (Méndez y Sausedo, 2023). La diferencia que existe entre ellos es la forma del rotor, la dirección del eje del rotor y la forma de las palas. También podemos encontrar turbinas de viento, las cuales se clasifican de manera similar a los aerogeneradores (Savonius y Darrieus) de eje vertical y horizontal. La superioridad de las turbinas de eje vertical consiste solamente en que no exigen la orientación en la dirección del viento, aunque el tipo Savonius presenta la ventaja de ser más simple de construir, lo cual resulta más atractivo para los fabricantes de estos sistemas (Voronin, et al., 2012).

En base a lo anterior, Miranda y Gil, 2023 presentaron el diseño y construcción de un sistema experimental para la evaluación de un Aerogenerador Mixto del tipo Darrieus – Savonius, con el objetivo de medir sus parámetros de funcionamiento como son: potencia, velocidad angular y voltaje, principalmente. Su diseño resulta adecuado para operar en condiciones donde la velocidad promedio sea de entre 2,14 y 2,31 m/s y se determinó que el sistema de generación de electricidad puede trabajar de forma satisfactoria bajo condiciones críticas. Velandia, 2023 realizó el diseño y construcción de un aerogenerador de 1 kW de potencia, orientado principalmente a la micro generación eólica urbana. Para validación del desempeño y la capacidad de adaptación del prototipo experimental, se empleó como herramienta de simulación el software MATLAB/Simulink bajo diferentes condiciones del viento, resultando que el modelo es capaz de predecir el rendimiento del sistema en 90,71%. También, el autor determinó que el sistema puede producir hasta 1114,3 Watt si opera dentro de un rango de velocidad de rotación de 150 a 800 rpm. Por su parte, Zezatti, 2019 analizó el rotor de una turbina eólica de 2 MW de capacidad, empleando dinámica de fluidos computacional (CFD). Los resultados obtenidos muestran que, la raíz del álabe presentó una distribución de esfuerzos y una relación de temperatura, respecto a la densidad del aire y la potencia generada. Gómez, 2022 desarrolló un micro aerogenerador de turbinas múltiples, Savonius y Darrieus de 1 kWh en promedio al día. En base a su estudio

realizado en CFD, los álabes 1 y 3 del generador Darrieus estarían trabajando con velocidades de viento de 10 km/h, mientras que el álabe 2, no produciría trabajo, debido a que no se presentó una diferencia de presiones entre la parte superior e inferior del álabe. De acuerdo con sus resultados experimentales, se pudo encontrar que la turbina Savonius permite generar el arranque a la turbina Darrieus cuando se encuentre sometida a bajas velocidades del viento (2.5 m/s). Aliaga et al., 2015, realizaron un estudio del comportamiento de un generador de eje horizontal para su implementación en la región de Piura. El trabajo consiste en analizar la velocidad y dirección del viento a 58 metros de altura y los resultados obtenidos fueron registrados por medio del software WASP (Wind Atlas Analysis and Application Program, por sus siglas en inglés). Las simulaciones realizadas muestran que es posible generar electricidad para dicha región en aerogeneradores con capacidades de 5 a 20 kW.

Otros trabajos se enfocan en analizar el flujo de entrada del aire en los aerogeneradores, tanto en simulaciones como en aplicaciones físicas, por medio del uso de túneles de viento. Estos permiten estudiar el comportamiento dinámico, cinemático o estático de un objeto inmerso en un fluido. Es decir, se trata de una sección en la cual se genera un flujo de aire controlado que permite simular las condiciones reales que experimentará un objeto, que puede estar modelado a escala o no, y generar gran cantidad de datos confiables (Contreras, 2021). En este sentido, Hernández, 2016 diseñó un aerogenerador vertical tipo Darrieus con tres palas de 330 mm de longitud y 6 cm de longitud de cuerda, en el que un túnel de viento fue empleado para realizar las pruebas experimentales, encontrando que los valores críticos de la fuerza normal y tangencial fueron de -1.91 y 0.26 N, respectivamente. Díez, 2016 presentó el diseño, control y validación experimental en un túnel de viento de turbinas Darrieus, empleando CFD como herramienta de análisis. El autor concluye que es necesario considerar las condiciones de diseño para lograr un sistema eficiente.

Este trabajo tiene como objetivo el diseño de dos tipos de configuraciones de aerogeneradores Darrieus para la generación de electricidad (Modelo A y Modelo B) empleando el software SolidWorks. Además, se comparan los esfuerzos originados en cada una de las palas de ambos generadores empleando el mismo software y de esta manera, incluir condiciones de operación (Velocidad, presión y temperatura) que ayuden a determinar la configuración más viable, desde el punto de vista de diseño.

Planteamiento del problema

Las palas y ejes de los aerogeneradores son parte esencial para transmisión de potencia, ya que esta se transmite por medio del eje principal a una caja que está conectada a una transmisión de engranes que, a su vez transmitirá el trabajo realizado a un generador eléctrico que estará produciendo electricidad. Una parte importante de los aerogeneradores del tipo vertical son los ejes que conectan las palas y a su vez transmiten la fuerza de rotación a la transmisión, los cuales son sometidos a una fuerza y esta puede llegar a desalinearse el centro de gravedad del aerogenerador.

Este eje soporta la fuerza de los brazos que están unidos a las palas y si no se diseña correctamente, puede llegar a ocasionar que surja un momento de deflexión, ocasionando una deformación en las mismas. Por tal motivo, se analizará en cada uno de los modelos la fuerza del viento y los esfuerzos que actúan sobre el eje principal, lo que permitirá determinar el modelo que resulte más eficiente, bajo las mismas condiciones de operación, empleando como material de construcción una aleación de aluminio 6061, debido a que esta aleación exhibe un excelente rendimiento de procesamiento, excelente soldabilidad, buena resistencia a la corrosión y alta tenacidad. Vale la pena mencionar que la estructura densa de la lámina de aluminio 6061 no se deforma después del procesamiento, puede ser fácilmente pulida, presenta una excelente resistencia a la oxidación y su módulo de elasticidad es de 60GPa, el cual es suficiente para soportar las fuerzas a las que estará expuesto el sistema. Con base a estos datos se realizará un análisis estático en SolidWorks para determinar la mejor configuración, la cual sea tomada como modelo para su futura implementación.

En la Figura 1, se muestra el esquema correspondiente a la distribución de los álabes de los modelos propuestos de aerogeneradores de eje vertical. En la Figura 1a, se ilustra el diseño del Modelo A, el cual está constituido por un soporte principal que conecta a cuatro álabes que se encargan de transmitir la potencia a la transmisión y así generar electricidad, mientras que en la Figura 1b, se puede observar el diseño del Modelo B, el cual difiere respecto al Modelo A, en que los álabes se encuentran posicionados a una separación fija a lo largo del eje principal.

Además, se aplicó un análisis de esfuerzos en ambos modelos mediante el uso del software SolidWorks y análisis aerodinámicos de esta manera se determinan los desplazamientos generados en cada una de las palas de los álabes, debidos a la fuerza del viento y su comportamiento aerodinámico para determinar qué modelo es mejor para su fabricación. Dichos resultados se

comparan entre el Modelo A y Modelo B, con el objetivo de determinar cuál configuración resulta más eficiente, desde el punto de vista de diseño.

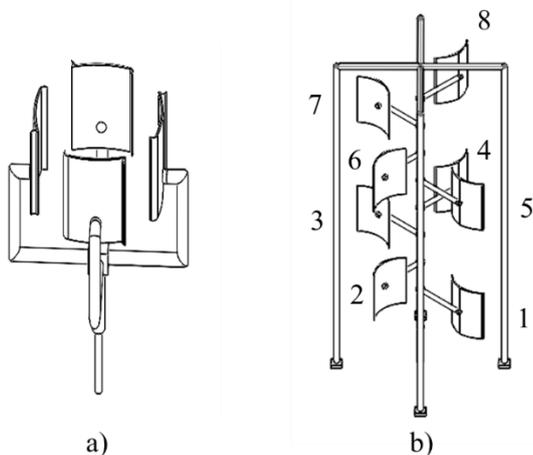


Figura 1. Diseño de palas y ejes propuestos para un aerogenerador de eje vertical: a) Modelo A y b) Modelo B. Elaboración: Fuente propia.

Metodología de análisis

En el Modelo A mostrado en la Figura 1a, se observa que el eje principal cuenta con un soporte cuadrado en la parte superior que sostiene a los cuatro brazos alineados sobre un mismo radio de rotación. Dicho modelo cuenta con 4 palas geoméricamente iguales que parten de un eje principal desde la base hasta los soportes de las palas y dichas palas forman un diámetro de arrastre de 64 cm, como se ilustra en la Figura 2.

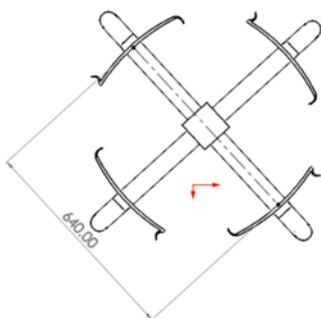


Figura 2. Diámetro de arrastre del Modelo A. Elaboración: Fuente propia.

Para reducir material y con esto, costos de fabricación del aerogenerador, se propuso que se fuera reduciendo el espesor a lo largo de su eje. Por ejemplo, el primer espesor, tomando como referencia la base de la estructura hasta una longitud de 30 cm, tiene un diámetro

de 5 cm y un espesor de 1.5 cm. El segundo eje cuenta con un diámetro de 6 cm, el cual comprende desde el primer eje hasta el extremo, así como una caja cuadrada como cuatro ranuras para soporte de las palas, cuya dimensión es de 10cm x 10 cm x 10 cm, como se muestra en la Figura 3. Es importante mencionar que las dimensiones de cada uno de los componentes del aerogenerador fueron consideradas acorde a la capacidad de fabricación de piezas de una impresora 3D, las cuales servirán para el desarrollo del prototipo en el que se realizarán las pruebas experimentales.

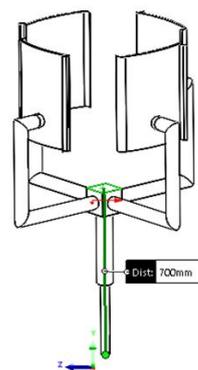


Figura 3. Altura del eje principal del Modelo A. Elaboración: Fuente propia.

En la Figura 4 se muestran las características geométricas para las 4 palas del aerogenerador, las cuales cuentan con una dimensión de 30 cm de ancho x 40 cm de altura y 1 cm de espesor. Además, para aprovechar la velocidad del viento, dichas palas tienen una curvatura de 2 cm de radio (Figura 4a) y un ala de 3 cm en cada extremo y con ello, mejorar la eficiencia de la misma (ver Figura 4b).

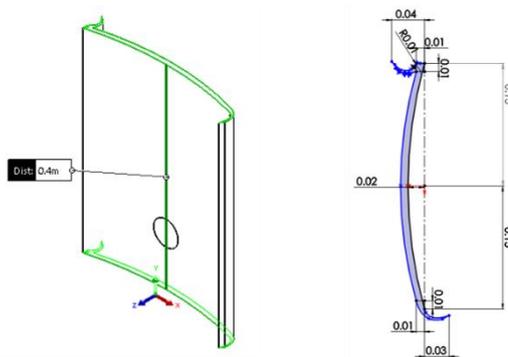


Figura 4. Dimensiones de las palas del Modelo A. Elaboración: Fuente propia.

Por su parte, las palas del Modelo B se encuentran ensambladas a lo largo del eje principal, presentando 8 niveles escalonados de igual radio de arrastre, por ende,

las fuerzas aplicadas en cada una de las palas son iguales debido al área de barrido que cada una recorre, dicha configuración es presentada en la Figura 1b. Las características geométricas de las palas del Modelo B se muestran en la Figura 5. A diferencia de las palas del Modelo A, el modelo B presenta una configuración similar a la de una parábola, cuyo radio de giro es de 8 cm y cada una de las palas está sujeta por la parte interior para brindar un mejor soporte.

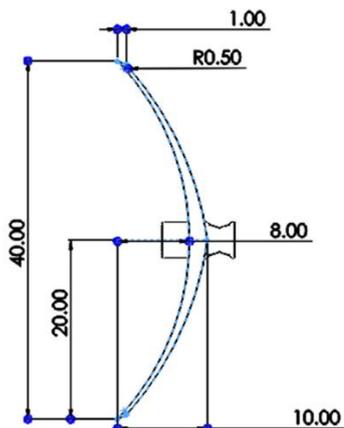


Figura 5. Geometría de las palas del Modelo B (cm). Elaboración: Fuente propia.

Simulación y resultados

Se realizó un análisis estático para el Modelo A, con el objetivo de evaluar si dicha propuesta soporta las cargas del aire a las que estará expuesto dicho sistema. Para lo anterior, se consideró que las palas del aerogenerador cuentan con un mismo centro de rotación, de 0.33 m de área de barrido, lo cual permite que las palas tengan una distancia entre el eje de igual dimensión. Para determinar los desplazamientos resultantes fue necesario emplear dos condiciones distintas: 1) el modelo se encuentre estático, por lo cual se estableció que la base se encuentra completamente fija y 2) es necesario la aplicación de la fuerza centrífuga al modelo estático, la cual se determinó aplicando la siguiente ecuación:

$$F_c = m * R * \omega^2 \tag{1}$$

Donde F_c es la fuerza centrífuga aplicada a cada álabes (N), m es la masa del álabes (kg), mientras, ω es la velocidad de giro en (rad/s).

A partir de la ecuación 1, se obtuvo que la fuerza aplicada a las palas en el Modelo A, resultó ser de 57.77 N, cuya masa del álabes es de 2.05 kg y radio de 0.155 m. Por otra

parte, la fuerza centrífuga obtenida para el Modelo B es de 115.55 N, en el cual cuenta con una masa de 3.78 kg y un radio de 0.20m. La diferencia entre ambos modelos se debe a que el diseño del modelo B cuenta con 8 palas ordenadas de forma escalonada y una altura de 3.30 m, mientras que en el Modelo A, la altura es de 1.56 m. Es importante mencionar que la simulación en ambos modelos se realizó a la misma velocidad máxima del aire ($V_{max} = 27.77$ m/s), la cual es la velocidad máxima que generalmente se estudian los aerogeneradores de eje vertical. Debido a que se tiene considerado implementar el aerogenerador en el Estado de Hidalgo y que las velocidades promedio en esta región oscilan entre los 2.77 m/s y 5.55 m/s, dichas velocidades se considerarán como la velocidad mínima y promedio en este estudio. Dichas velocidades fueron obtenidas del clima del Estado de Hidalgo, a una altitud de 10 m del suelo, una temperatura de 25°C y una humedad del 48% (WeatherSpark, 2024). Los parámetros empleados para la simulación y análisis para cada modelo se ilustran en la Tabla 1.

Tabla 1. Variables de los modelos diseñados A y B. Elaboración: Fuente propia.

| Parámetro | Modelo A | Modelo B |
|-----------------------|----------------------|----------------------|
| Masa | 2.6 kg | 5.2 kg |
| Volumen de las alabes | 0.001 m ³ | 0.002 m ³ |
| Área de barrido | 0.372 m ² | 0.696 m ² |

Empleando los valores mostrados en la Tabla 1, se determinó la fuerza que será ejercida para cada uno de los modelos para posteriormente, realizar el análisis estático y así, determinar su comportamiento aerodinámico mediante el uso del software de diseño SolidWorks. En la Figura 6, se muestra la distribución de fuerzas aplicadas a una de las palas, así como el área de sujeción, para poder llevar a cabo el análisis estático.

La figura muestra la aplicación de la fuerza en dirección X y una sujeción en la parte inferior del eje. El Modelo A está constituido por 4 alabes fabricados de fibra de vidrio reforzado, el cual es un material utilizado para entornos exteriores, ya que presenta un buen desempeño bajo diferentes tipos de condiciones ambientales. Además, es un material ligero, el cual permite una menor resistencia al movimiento debido a su peso.

Por su parte, el eje principal y soporte de las palas está diseñado con una aleación de aluminio 6061 que presenta la característica de tener una resistencia a la corrosión.

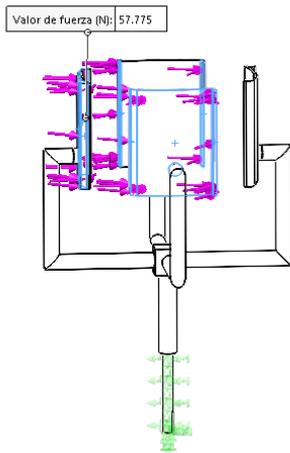


Figura 6. Aplicación de la fuerza y sujeción del Modelo A.
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 7 se muestran los desplazamientos resultantes que se generaron en el Modelo A aplicando la fuerza de 57.775 N. Los resultados muestran que el máximo valor de deformación de 45.289 mm es encontrado en la parte superior de las palas, mientras las menores deformaciones se obtienen en la estructura del aerogenerador (4.529 mm). Una manera de reducir la deformación en las palas del aerogenerador, es cambiando el tipo de material o en su caso, el tipo de arreglo en el mismo.

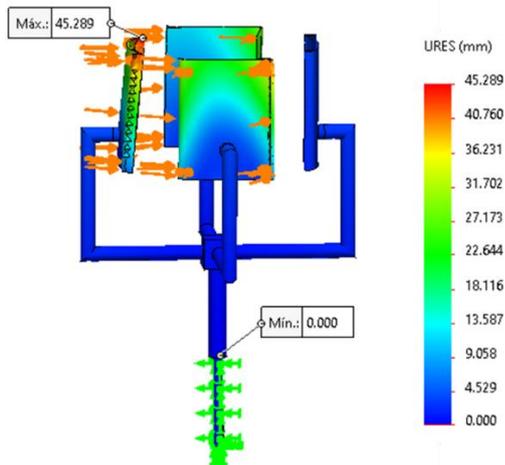


Figura 7. Desplazamientos resultantes del Modelo A.
Fuente: Elaboración propia

Respecto al modelo B, se procedió a realizar el mismo análisis estático, con la única diferencia que el valor de la fuerza que se le aplicará es de 115.55 N, la cual fue obtenida a partir de la ecuación 1. La sujeción y cargas aplicadas se muestran en la Figura 8.

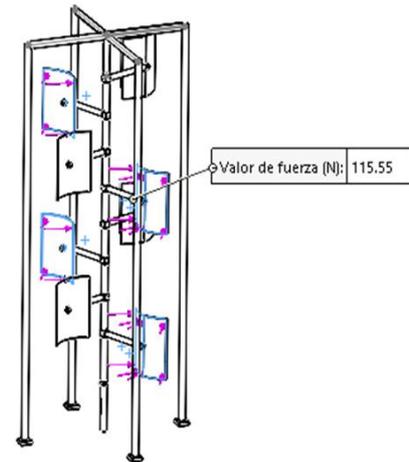


Figura 8. Aplicación de la fuerza y sujeción del modelo B.
Fuente: Elaboración propia.

Como se mencionó anteriormente, la fuerza ejercida en cada una de las palas al modelo B fue de 115.550 N, la cual se aplicó en la misma dirección que el Modelo A (dirección al eje X), simulando que la fuerza del viento impacte de forma unidireccional. Además, el modelo cuenta con una sujeción en la parte inferior del eje principal y 4 sujeciones más en las bases del soporte que rodea al aerogenerador, con el objetivo de disminuir su deformación y evitar una posible falla en el material. Los resultados del análisis se observan en la Figura 9.

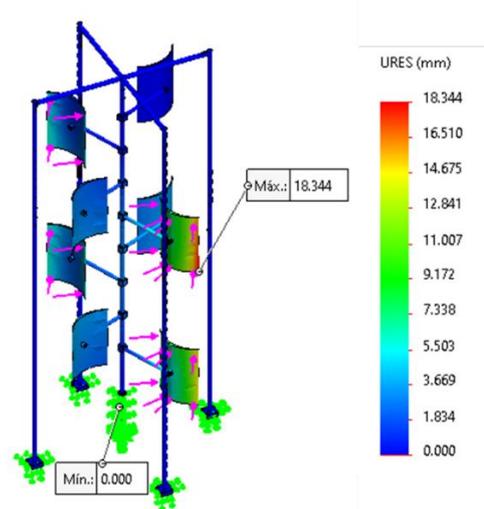


Figura 9. Desplazamientos resultantes del modelo B.
Fuente: Elaboración propia

El Modelo B presenta un desplazamiento máximo de 18.344 mm en los bordes de las palas, por lo tanto, el

Modelo B muestra un mejor desempeño aerodinámico respecto al Modelo A, aun cuando el Modelo B presenta un eje más largo y una fuerza mayor con respecto al Modelo A. Una manera de reducir la deformación en el Modelo B, es cambiar el tipo de material o modificar la configuración de sus palas, sin embargo, esto lo puede hacer más robusto y menos eficiente.

Para determinar la presión que experimentarán cada uno de los alabes de ambos modelos y poder determinar la configuración que muestra la mayor eficiencia, es necesario usar la ecuación 2:

$$P_{viento} = \frac{1}{2} \times \rho \times v^2 \tag{2}$$

Donde P es la presión del viento (Pa) y v , la velocidad del viento en m/s, la cual fue determinada a una temperatura de 25°C y una presión de 1 atm.

En la Tabla 2 se puede observar que la presión aplicada en las palas para ambos modelos es de 462.937 Pa. El motivo por el cual la presión es igual para ambos modelos, se debe a que la presión que el viento ejerce en los alabes depende únicamente de la densidad (1.2 kg/m³) y de la velocidad del mismo (27.777 m/s), por lo que ambos valores sean iguales.

Tabla 2. Presiones ejercidas en cada una de las palas. Elaboración: Fuente propia.

| Modelos | P_{viento} |
|----------|--------------|
| Modelo A | 462.93 Pa |
| Modelo B | |

Dicha presión se aplicó a la parte exterior de las palas del Modelo A, las cuales se encuentran en contacto directo con la fuerza del viento. Es importante mencionar que el Modelo A se evaluó bajo condiciones estáticas, para ello, se realizó una sujeción fija en la parte donde se une con el eje del soporte, tal como se ilustra en la Figura 10.

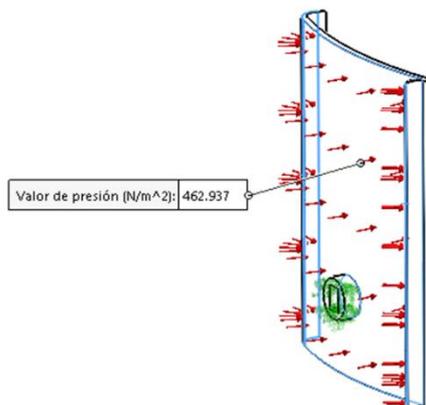


Figura 10. Sujeción del Modelo A y aplicación de la presión. Fuente: Elaboración propia.

Una vez aplicada la presión en el exterior de las caras de los alabes del aerogenerador, se pudieron predecir los desplazamientos del sistema. Los resultados muestran que en la parte superior de las palas se experimenta el máximo desplazamiento, el cual corresponde a 21.32 mm, mientras en la superficie de sujeción de las palas, los desplazamientos resultantes resultan ser inferiores a 4 mm. Esto se debe a la estructura donde se conecta el eje principal, su espesor y su centro de gravedad brindan una mayor estabilidad. Sin embargo, las palas presentan un desplazamiento significativo en la parte superior, debido al tipo de material empleado, ya que para este estudio se empleó fibra de vidrio reforzada, debido a que cuentan propiedades favorables a la deformación y su resistencia a la ruptura, como se muestra en la Figura 11.

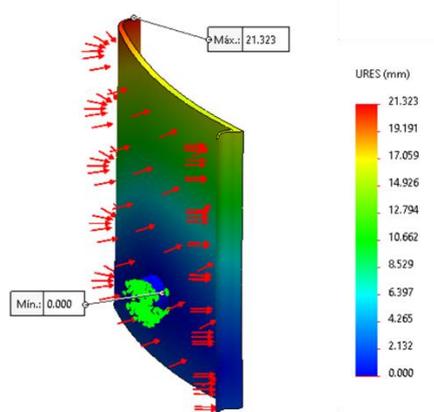


Figura 11. Resultados de los desplazamientos resultantes de las alabes del Modelo A. Elaboración: Fuente propia.

A continuación, se procedió a realizar el mismo análisis estático para el Modelo B, considerando la presión de 462.93 Pa y considerando que estos están fijos en base al esquema mostrado en la Figura 8. Al igual que el Modelo A, los alabes están fabricadas de fibra de vidrio reforzado y cuentan con una sujeción fija en la parte de posterior, tal como se muestra en la Figura 13.

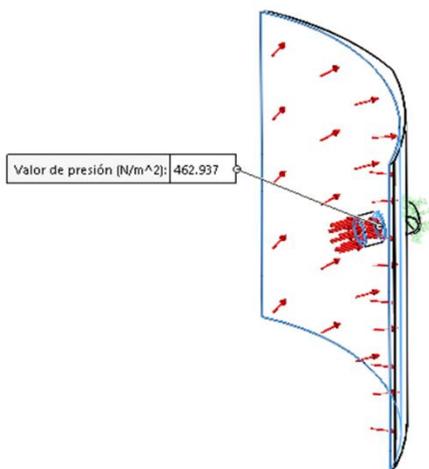


Figura 13. Sujeción del Modelo B y aplicación de la presión. Fuente: Elaboración propia.

Con base a la simulación, se pudo encontrar que las palas del Modelo A experimentaron un desplazamiento máximo de 7.124 mm en los bordes de las palas, los cuales en comparación al Modelo A (Figura 12), estos resultaron ser menores, concluyendo que su estructura muestra un mejor desempeño en comparación con la estructura usada en el Modelo A.

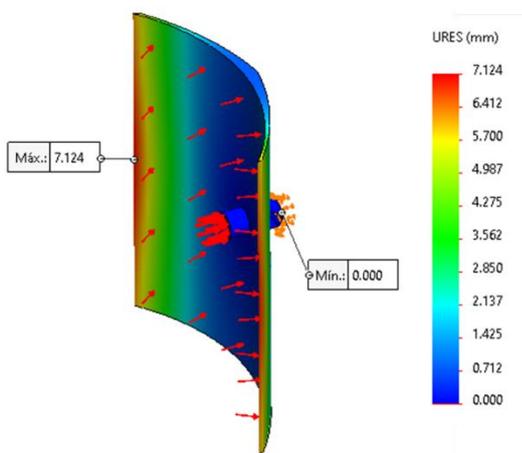


Figura 14. Resultados de los desplazamientos resultantes de las alabes del Modelo B. Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, se realizó un análisis aerodinámico del Modelo A y Modelo B utilizando el complemento del software SolidWorks, llamado FlowSimulation, el cual permite evaluar su desempeño aerodinámico y determinar si el modelo propuesto es viable para su implementación. Para tal efecto, se diseñó una cámara cerrada, la cual simula un túnel de viento y de esta manera evaluar sus condiciones de operación (Monge et al, 2016). Las condiciones de operación aplicadas a ambos modelos se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Condiciones de operación aplicas a ambos modelos. Elaboración: Fuente propia.

| Parámetro | Condición/Valor |
|-----------|----------------------|
| Fluido | Aire |
| Flujo | Laminar y turbulento |
| Presión | 101.325 kPa |
| Velocidad | 1.38889 m/s |

Las condiciones de frontera empleadas en el Modelo A fueron tomadas de los datos mostrados en la Table 3, se procedió a aplicar las condiciones de Frontera al Modelo A y su comportamiento aerodinámico se ilustra en la Figura 15. Los resultados de la simulación que permiten determinar el modelo que presenta un mejor desempeño aerodinámico, se basaron principalmente en la retención del aire en las palas y que los modelos no generen vorticidad, ya que al existir presencia de vorticidades ocasiona una resistencia al movimiento en las palas de los aerogeneradores analizados. Para el análisis del flujo de aire al que pasa por el Modelo A, se utilizaron los Isosurfaces, los cuales son representaciones graficas tridimensionales que sirven como método de visualización de datos en la dinámica de fluidos computacionales (CFD), lo que permite estudiar las características de flujo de algún fluido en estado líquido o gaseoso, tal como se observa en la Figura 15.

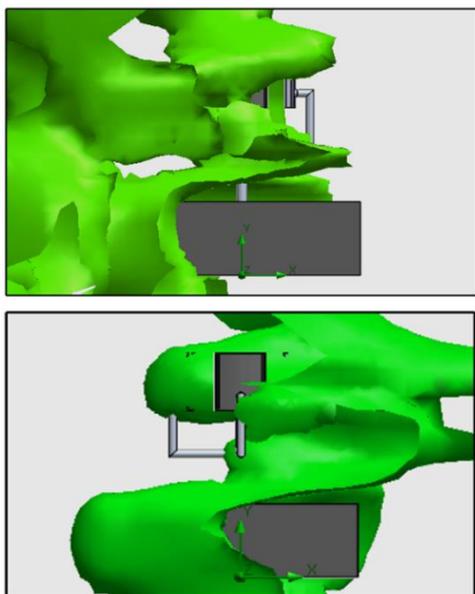


Figura 15. Comportamiento aerodinámico de las palas del Modelo A. Elaboración: Fuente propia.

En la Figura 16 se muestran como es el flujo del aire entra en contacto con los alabes del Modelo A, lo cual ayuda a identificar si el viento genera vorticidad, los cuales ocasionen que genere una resistencia al movimiento, un desbalanceo y una posible falla. Como se observa en el modelo A, el viento presenta vorticidades al interior de las alabes que son de hasta 12 m/s, ocasionando una resistencia aerodinámica, la cual puede impedir su correcto funcionamiento. Además, la presencia de vorticidad en los modelos de aerogeneradores de eje vertical, ya que ralentiza su velocidad de giro, ocasionan una menor producción de electricidad y que puedan ser mucho menos eficientes.

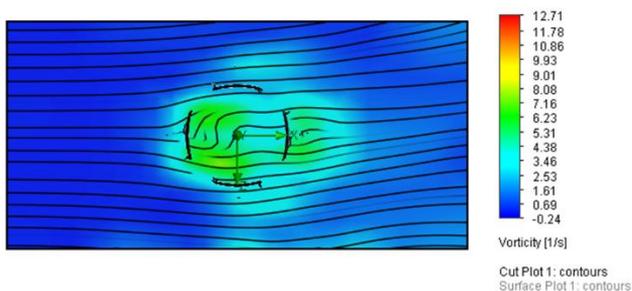


Figura 16. Vorticidad en el Modelo A. Elaboración: Fuente propia.

En la Figura 17 se observa el túnel de viento implementado para el análisis aerodinámico del Modelo B. Para el estudio, se consideraron las mismas condiciones de operación empleadas en el Modelo A. Los

resultados muestran que las velocidades del viento en el interior del túnel de viento son del orden de magnitud de 1.67 m/s, las cuales están dentro del rango de velocidades de viento registradas en el Estado de Hidalgo.

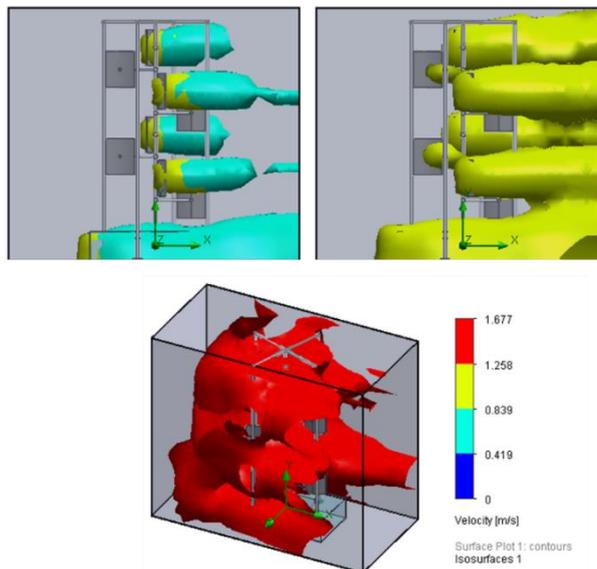


Figura 17. Comportamiento aerodinámico de las palas del Modelo B. Elaboración: Fuente propia.

En la Figura 18 se muestran el desempeño aerodinámico del Modelo B, donde se aprecia que esta configuración no genera vorticidad que ocasione una reducción en la velocidad de giro, ni que presente afectaciones en el desempeño aerodinámico del mismo, como inicialmente se había estimado. Por lo tanto, esta configuración puede ser una buena alternativa para su posible desarrollo e implementación.

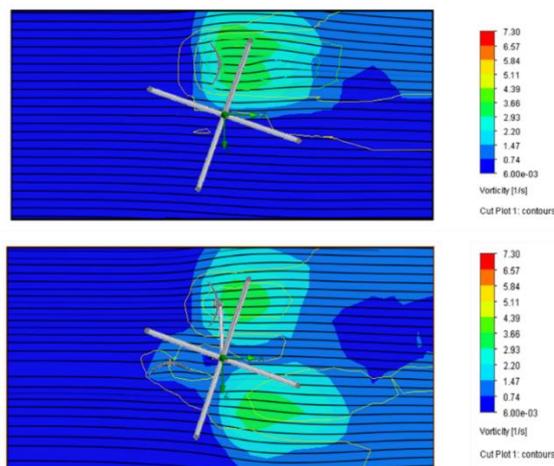


Figura 18. Vorticidad en el Modelo B. Elaboración: Fuente propia.

Límite de Betz

El modelo matemático del límite de Betz aplica para todos los modelos diseñados de aerogeneradores, este parámetro hace referencia a la fracción máxima de energía que se puede aprovechar de un corriente aire, como máximo solo se puede diseñar un aerogenerador con un rendimiento máximo de 59.26 %. Generalmente las turbinas eólicas trabajan a un 40% de su capacidad, ya que se consideran perdidas por fricción, perdidas mecánicas y variables del viento. Otro parámetro importante en el diseño de aerogeneradores, es el coeficiente de potencia (C_p), que resulta de combinar el coeficiente de flujo y el coeficiente de altura. Una manera de determinar el coeficiente de Betz, es a partir de la siguiente expresión:

$$C_p = \frac{\text{Potencia de la turbina}}{\text{Potencia disponible del fluido}} = \frac{P_r}{P_i} \quad (3)$$

Donde el máximo valor que se puede obtener para turbinas eólicas es el siguiente:

$$C_p = \frac{16}{27} \quad (4)$$

Para el aerogenerador tipo Darrieus propuesto, el coeficiente de Betz obtenido fue de 0.26, el cual puede ser mejorado desentendiendo de la resistencia aerodinámica de las palas, las pérdidas mecánicas y las condiciones variables del viento.

Conclusión

La propuesta de dos aerogeneradores tipo Darrieus (Modelo A y B) para la generación de electricidad fueron comparados mediante un análisis estático y aerodinámico realizado en el Software SolidWorks. Dentro de las conclusiones más relevantes del trabajo se describen las siguientes:

El Modelo A presentó una máxima deformación en sus palas en aproximadamente 45.289 mm, el cual se encontró en la parte superior de las palas. Bajo las mismas condiciones de operación, el Modelo B experimenta una máxima deformación de 18.344 mm, el cual ocurre en los bordes laterales de la pala del aerogenerador. Por lo tanto, el Modelo B presenta 40.50% menor deformación que la obtenida por el Modelo A.

Las simulaciones realizadas en SolidWorks revelan que la que el comportamiento aerodinámico del modelo B es el ideal para su construcción, ya que en los tres análisis realizados mostró un mejor desempeño en comparación a los resultados obtenidos por el Modelo A. Además, el máximo coeficiente de potencia obtenido por el aerogenerador propuesto fue de 0.26.

Finalmente, las deformaciones son menores, en comparación con el Modelo B, el cual tendría menos problemas con el material usado en la estructura, así como en las palas del aerogenerador, resultando que el Modelo B es el adecuado para su implementación en el Estado de Hidalgo, debido a que los vientos oscilan entre los 5 y 50 km/hr (1.388-13.888 m/s).

Como trabajo futuro, se realizará la construcción de un prototipo experimental de aerogenerador, empleando el Modelo B, el cual sirva de base para realizar pruebas experimentales y determinar que este cumpla con las características de diseño propuestas en este trabajo.

Referencias

- Acciona. (2019). *El Impacto ambiental de las energías no renovables: Cambio climático y más*. Recuperado de: https://www.sostenibilidad.com/energias-enovables/impactoambiental-energias-no-renovables/?_adin=02021864894
- Aliaga, A., Estrada, C., & Arellano, C. (2015). Estudio del Comportamiento del Recurso Eolico para Caracterizar la Generacion de Energia con generadores Eolicos de eje Horizontal en la region Piura. *XXII Simposio Peruano de Energía Solar y del Ambiente (XXII- SPES)*, 17, págs. 1-12. Arequipa.
- Álvaro Lucas, S. R. (2012). *Diseño de un aerogenerador para uso particular* [Título de Grado en Ingeniería Mecánica., Universidad Carlos III de Madrid]. Recuperada de: https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/20245/TFG_Alvaro_Lucas_San_Roman.pdf
- Beato a. (2023). *Energía eólica en México*. Recuperada de: [https://ammper.com/noticias/energia-eolica-en-mexico/#:~:text=El%20Laboratorio%20Nacional%20de%20Energ%C3%ADa,California%20\(ver%20Imagen%201\).](https://ammper.com/noticias/energia-eolica-en-mexico/#:~:text=El%20Laboratorio%20Nacional%20de%20Energ%C3%ADa,California%20(ver%20Imagen%201).)
- Contreras Torres, O. (2021). *Sistema de control e instrumentación de un túnel de viento para pruebas de aerogeneradores*. Recuperada de: http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/bitstream/20.500.12744/4113/1/Contreras_2020_TG.pdf
- Diago Vidal, C. (2019). *Diseño de un aerogenerador Savonius para uso doméstico* (Tesis de maestría). Universitat Politècnica de Valencia, España. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10251/131197>
- Diez, A. (2016). *Diseño, control y validación experimental en túnel de viento de turbinas Darrieus impresas en 3D*. file:///C:/Users/JLRM/Documents/UAEH%202024/Tesis%20Pe%C3%B1a/Referencias%20nuevas/TFG%20Asier%20Diez%20de%20Uzurrún%20versi%C3%B3n%20final.pdf
- Gómez, D. G. (2023). *Desarrollo de un micro aerogenerador de turbinas múltiples, Savonius y Darrieus conectadas con transmisión epicicloidal*

para producir 1 kWh en promedio al día. Recuperada de: <https://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/8673>

Hernández Bravo, L. R. (2016). *Diseño de un aerogenerador vertical modelo darrieus para ensayos en el túnel de viento del laboratorio de energía de la PUCP*. Recuperada de: file:///C:/Users/JLRM/Documents/UAEH%202024/Tesis%20Pe%C3%B1a/Referencias%20nuevas/HERN%C3%81NDEZ_LESLIE_DISE%C3%91O_AEROGENERADOR.pdf

Méndez-Bautista, M. T., & Sausedo-Solorio, J. M. (2023). Metodología para el cálculo numérico y simulación de generadores eólicos de baja velocidad. *Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 11(Especial3), 143-150. <http://dx.doi.org/10.29057/icbi.v11iEspecial3.11504>

Miranda, J. S. & Gil, A. F. (2023). *Diseño y Construcción de un Montaje Experimental para la Evaluación de un Aerogenerador Mixto Darrieus-Savonius*. Recuperada de: <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/52586/2023MirandaJuanGilAndres.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Turcan N. (2015). *Aerogenerador de viento*. Tesis de Licenciatura. Recuperada de: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/80895/Memoria%20Proyecto%20Aerogenerador%20de%20viento%20Nicolai.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Talayero A.P., Telmo E. (2011). *Energía eólica*. Prensas de la Universidad de Zaragoza (Colección de Textos Docentes; Serie energías renovables, 140). Zaragoza. Recuperado de: [file:///C:/Users/JLRM/Downloads/Dialnet-AerogeneradoresYAvifaunaEnAragon-8091994%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/JLRM/Downloads/Dialnet-AerogeneradoresYAvifaunaEnAragon-8091994%20(1).pdf)

Velandia, J. J. (2023). *Diseño y construcción de generador eléctrico y drive de potencia para el control eléctrico en baja tensión y potencia 1 Kw orientada a la micro-generación eólica urbana* (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia). Recuperada de: <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/84963/1026278217.2023.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

Voronin, B., & Zerquera-Izquierdo, M. D. (2012). Estudio de las características cualitativas de aerogeneradores mediante un modelo a escala. *Científica*, 16(1), 3-9. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61424633001>

WeatherSpark (2024). *Clima y tiempo promedio en todo el año en Hidalgo*. Recuperada de la página: <https://es.weatherspark.com/y/5168/Clima-promedio-en-Hidalgo-M%C3%A9xico-durante-todo-el-a%C3%B1o>

Zeatti M.K. (2019). *Análisis numérico de la interacción fluido-estructura en el rotor de un generador eólico*. Tesis de Maestría. Recuperada de: <http://riaa.uaem.mx/handle/20.500.12055/3128>