

Optimización aerodinámica para mejorar el par de arranque de una Turbina de Viento de Eje Vertical Savonius-Darrieus de 1 kW

Aerodynamic optimization to improve the starting torque of a 1 kW Savonius-Darrieus Vertical Axis Wind Turbine

Giovanni Vidal Flores¹, Isaac Hernandez Arriaga²
CIATEQ A.C., Av. Manantiales 23-A, Parque Industrial Bernardo Quintana,
El Marques, CP 76246, Querétaro, México. Tel (442)1961500.
¹giovanni.vidal@ciateq.mx, ²izaak.hernandez@gmail.com

Resumen

En este trabajo se presenta una serie de mejoras graduales para reducir el par de arranque de un rotor de una turbina de eje vertical híbrido Savonius–Darrieus de capacidad de 1kW. Las mejoras parten de una configuración de diseño para el arranque con velocidades de viento de 7 m/s y con un torque aerodinámico de 6 N-m. Estas mejoras comprenden la implementación de alerones curvos en el rotor Savonius, perfiles asimétricos del rotor Darrieus, acoplamiento directo del tren de potencia al rotor híbrido y finalmente el incremento de la altura de la torre hasta 2m de altura sin comprometer las maniobras de mantenimiento. Los resultados mostraron parámetros de operación satisfactorios pues se logró reducir la velocidad de arranque en un 50% con respecto a la configuración original, alcanzando valores de 3.3 m/s, mientras que el valor del torque de arranque tuvo un decremento del 40% llegando a un valor bajo de 3.5 N-m. Con estas mejoras se incrementa significativamente el aprovechamiento del recurso eólico en entornos urbanos donde las magnitudes de viento no superan los 6 m/s.

Abstract

This work presents a series of gradual improvements to reduce the starting torque of a 1kW capacity of the Savonius–Darrieus Vertical Axis Hybrid Wind Turbine Rotor. The improvements start from a design configuration of a wind turbine with at cut-in wind speeds of 7 m/s and an aerodynamic torque of 6 N-m. These improvements include the implementation of curved fins on the Savonius rotor, asymmetric profiles on the Darrieus rotor, direct coupling of the power train to the hybrid rotor and finally the increase of the tower height up to 2m without compromising maintenance operations. The results showed satisfactory operating parameters since the cut-in wind speed was reduced by 50% with respect to the original configuration, reaching values of 3.3 m/s, while the starting torque value had a decrease of 40% reaching a low value of 3.5 N-m. These improvements significantly increase the use of wind resources in urban environments where wind speeds do not exceed 6 m/s.

Palabras clave:

Turbina eólica de eje vertical VAWT, optimización aerodinámica, topología Darrieus–Savonius, perfil asimétrico, torque de arranque

Keywords:

Vertical Axis Wind Turbine VAWT, Aerodynamic optimization, Darrieus – Savonius Topology, Asymmetrical airfoil, Aerodynamic torque

Introducción

El diseño de aerogeneradores de eje vertical (VAWT) envuelve 3 grandes áreas de conocimiento: dinámica de fluidos, mecánica de materiales y sistemas de control. Aunque son máquinas con más de 100 años de antigüedad, la primera turbina de eje vertical fue diseñada por George Darrieus en la década de 1920, aún hoy en día resulta complicado lograr conectar estas 3 áreas de conocimiento para crear una turbina que arranque a bajas velocidades de viento en el rango de 1 a 3 m/s. De las formulaciones básicas de la dinámica de fluidos se sabe que la velocidad de viento es la variable principal que cuantifica el potencial de conversión de energía y que aumenta exponencialmente por una potencia de 3 [1], es decir; que un aumento del doble de la velocidad de viento aumenta la potencia obtenida por un factor de 8. La energía obtenida se manifiesta como torque en el eje del rotor sobre el resto del sistema. Este torque aerodinámico se transforma

en movimiento del generador eléctrico que finalmente convierte la energía cinética del viento en energía eléctrica. La teoría fundamental de diseño de aerogeneradores establece un límite máximo de obtención de energía eólica establecido por el físico Albert Betz en 59.26%. Este principio implica que la velocidad de viento debe ser tal que el par aerodinámico del rotor sea lo suficientemente grande como para vencer la inercia mecánica tanto del rotor como del generador eléctrico.

De acuerdo con Kumar et al (2018) [2] las VAWT cuentan con la facilidad de autoarranque, esto implica que no es necesario que exista cierta dirección o velocidad del viento y que se necesitan valores relativamente bajos para su funcionamiento. Otra de las ventajas es el diseño efectivo con el que se cuenta a pesar del viento inestable que se presenta en

zonas urbanas, en su mayoría se instalan donde el espacio no es requerido para ninguna otra aplicación, algunos de estos lugares son: divisores de carretera, costados de vías del tren, techo de edificios altos, de tal manera que no causen ningún efecto contradictorio en cuanto a la estética del lugar o a los transeúntes.

Algunos beneficios adicionales de la instalación de esta tecnología en zonas urbanas es la reducción de la contaminación ya que las VAWT realizan la función de ventilación natural, lo que ayuda a la descontaminación de la ciudad, debido a que esta se dispersa [3]. Las VAWT presentan varias ventajas por encima de las turbinas de eje horizontal (HAWT), de las cuales destacan: (1) menor cantidad de material en la estructura de la torre, (2) obtención de energía en cualquier dirección del viento, lo que significa que no requiere un sistema de orientación (Yaw System), (3) mejor eficiencia en un ambiente construido (urbano, con obstáculos) y (4) operación en ambientes con gran intensidad de turbulencia.

Aunado a lo anterior, Ishugah et al (2014) [3] mencionan que es imperativo analizar la situación del viento del ambiente urbano antes de poder diseñar y elegir la turbina que se va a colocar, y, por ende, la misma optimización depende del conocimiento previo de las características del viento en esa zona. También, debido a objetos tridimensionales como edificios, las VAWT deben estar situadas de tal forma que se aproveche la velocidad que genera el flujo de viento y evitar la turbulencia que provoca a menor altura, se debe ser cuidadoso en este aspecto ya que la forma del edificio, la altura y la distancia entre ellos afecta la dirección y la intensidad del viento lo cual afecta la extracción de energía en este tipo de ambientes.

La finalidad de este estudio es mejorar un aerogenerador híbrido que incorpora las tecnologías de rotores Savonius y Darrieus. Por una parte, los rotores Savonius arrancan con velocidades de viento menores (bajo torque de arranque y de tip-speed ratio) mientras que las turbinas Darrieus desarrollan mayores coeficientes de potencia (alto tip-speed ratio). La optimización se realiza sobre un rotor híbrido de eje vertical desarrollado por CIATEQ A.C., mediante el Fondo de Desarrollo Científico De Jalisco (FODECIJAL) para atender problemas estatales dentro de la convocatoria 2019, y cuyo objetivo fue el diseño, desarrollo y pruebas de una turbina eólica de eje vertical para ambientes urbanos con capacidad de 1kW. Es importante mencionar que debido a que la turbina híbrida se ha diseñado con las condiciones de un entorno urbano (velocidades de viento menores a 6 m/s), el rotor Darrieus no interferirá significativamente al rotor Savonius en términos de desempeño y si se aprovechará el arranque a bajas velocidades de viento del rotor Savonius. El sitio de emplazamiento de este aerogenerador se localiza en el techo del Laboratorio de Energías Renovables de las instalaciones de CIATEQ A.C., Jalisco, donde la dirección prominente del viento es (WNW) Oeste-Noroeste, (W) Oeste, y (ESE) Este-Sureste, y la velocidad del viento anual promedio es de

2.5 m/s, en la Figura 1 se muestra la rosa de vientos obtenida a partir de la información del sitio.

De acuerdo con Lee et al (2018) [4] en el caso de turbinas VAWT instaladas en los techos de edificios existirá un momento en que el viento llegue a la turbina de forma vertical, lo que afecta a la energía de salida (eficiencia, potencia de salida, energía), e influye también el ángulo con el que incide, se identifica una generación de más del 90% de la potencia cuando la turbina recibe vientos con un ángulo vertical menor o igual a 45°. La potencia de salida se incrementa en más de 20% en condiciones de viento horizontal de 3 a 4 m/s y cuando se trata de velocidades de más de 7 m/s, la eficiencia decrece en un 10% debido a la intensidad de turbulencia generada.

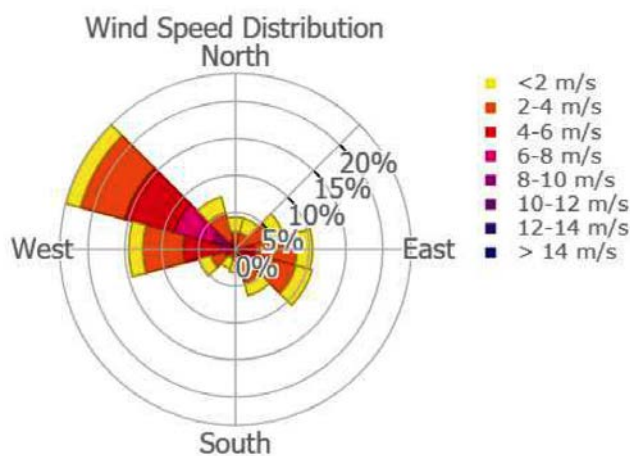


Figura 1 Rosa de los vientos sede CIATEQ, Jalisco.

El diseño de turbinas híbridas reúne las ventajas de las topologías tipo Savonius y Darrieus; por una parte, los rotores Savonius tienden a producir un torque de arranque elevado lo que significa velocidades de arranque más bajas (velocidad de viento más baja para empezar a rotar), mientras que las turbinas Darrieus producen bajo torque de arranque exigiéndoles tener una fuente externa que les ayude a empezar girar, pero cuando comienzan a girar, son mucho más rápidas que las turbinas tipo Savonius. En términos de eficiencia, las turbinas Darrieus son notablemente más eficientes (40%) que las Savonius (30%) a altas velocidades de viento [5].

Análisis de curvas de potencia de turbinas híbridas han demostrado de manera concluyente que la potencia producida por las turbinas híbridas es la suma de la potencia producida por las turbinas individuales Savonius y Darrieus [6]. De acuerdo con Korprasertsak [7] el uso de reforzadores de viento (wind boosters) se pueden implementar con un VAWT no solo para cosechar energía con baja disponibilidad a baja velocidad del viento, sino también mejorar el rendimiento del VAWT a alta velocidad del viento. Al aumentar la velocidad angular de un VAWT, significa un aumento en la potencia mecánica del VAWT.

El diseño de la turbina del presente estudio es una turbina hi-

brida con implementación de alerones en la periferia del rotor Savonius, de tal manera que incrementa el área de barrido del rotor permitiendo aumentar la capacidad de arranque a bajas velocidades de viento.

Prueba de Pre-arranque

Se define pre-arranque a las primeras pruebas que se realizan al aerogenerador inmediatamente después de haberlo instalado. Estas pruebas incluyen:

- Prueba de giro del rotor,
- Reconocimiento de velocidad de arranque,
- Medición del torque de arranque,

La funcionalidad mecánica del aerogenerador se determina con el giro libre del rotor, sin acoplar el tren de potencia y proporcionando un impulso manual para verificar que no existan ruidos derivados de una excesiva fricción o por rodamientos contaminados con polvo.

Para medir la velocidad de arranque se coloca un anemómetro digital frente al rotor a no más de 1m de distancia. Se determina la velocidad de arranque del rotor desacoplado y acoplado (con y sin el sistema de transmisión). Para medir el torque se utiliza un torquímetro colocado sobre la flecha principal del generador eléctrico. En la Tabla 1 se muestran los resultados de la prueba de pre-arranque que son el punto de partida y parámetros a mejorar.

Tabla 1. Velocidad y torque de pre-arranque.

	Velocidad de arranque	Torque de arranque
Rotor desacoplado	4 m/s	2 N-m
Rotor acoplado	7 m/s	6 N-m

El torque incrementa por un factor de 3 cuando este acoplado, lo que implica que el torque aerodinámico del rotor debe ser mayor a 6N-m para poder girar al rotor cuando este acoplado al generador eléctrico.

Mejora del rotor híbrido

Los datos anteriores muestran que el par de arranque necesario para que el rotor comience a girar se incrementa cuando está acoplado al generador eléctrico por un factor de 3, y la velocidad de viento suficiente para arrancar al rotor se incrementa por un factor de 1.75 veces.

A continuación, se proponen las siguientes soluciones de mejora de manera gradual:

- Mejora de alerones en rotor Savonius,
- Mejora de alerones Darrieus con perfil asimétrico,
- Mejora de la relación de transmisión 1:1 (acoplamiento directo),

D) Mejora de la altura de torre.

Se discuten a continuación los 4 puntos dando mayor énfasis a los primeros 2 por el impacto que tienen sobre el diseño.

Mejora de alerones en rotor Savonius

Metodología del modelado numérico

Para el modelado numérico se utiliza el software comercial ANSYS FLUENT 2020 R1. Se considera un flujo completamente desarrollado sobre la entrada del volumen de control y esta entrada a su vez se define lo suficientemente grande como para evitar los efectos de fricción cerca de las paredes. Adicionalmente, el análisis utiliza las siguientes suposiciones:

- Flujo estacionario e incompresible,
- Dirección del viento normal al área de entrada del dominio.

El volumen de control es el que se muestra en la Figura 2. Las dimensiones del volumen son función del diámetro del rotor Darrieus y son las mismas dimensiones que se utilizan para todas las propuestas de mejora.

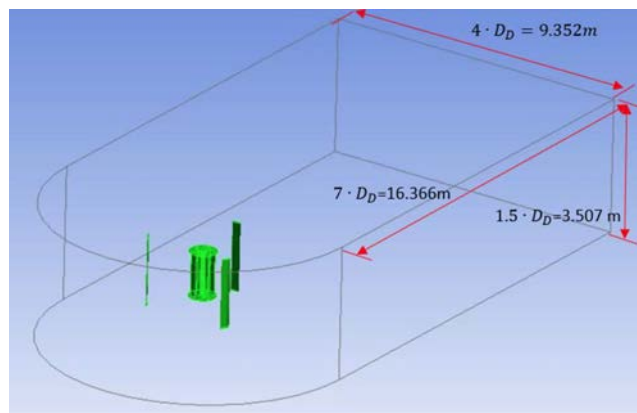


Figura 2. Configuración inicial de rotor Savonius.

Los parámetros de configuración óptimos dentro del rango investigado se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Propiedades del modelo CFD.

Parámetro	Valor
Espacio	Bi-dimensional
Material	Aire
Densidad	1.225 kg/m ³
Viscosidad	1.7894e-05 kg/m·s
Régimen viscoso	Turbulento
Modelo de turbulencia	SST k-omega
Esquema de Solución	Acoplado con modelo de presión estándar y modelo de turbulencia de primer orden
Intensidad de turbulencia	5%
Método de inicialización	Standard
Solver: Pasos de tiempo	Automático
Numero de iteraciones	3000

Estrategia de mallado

Se utiliza el mallador de FLUENT y se lleva a cabo un análisis de sensibilidad de malla creando primero una malla burda, posteriormente una malla fina y finalmente una malla más detallada. Los parámetros de la malla se describen en la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros de mallado del modelo CFD.

Control de malla	Valor
Control de malla global	CFD – Fluent
	Tetraedros
	Proximidad y curvatura
Tamaño de cara	8 mm
	Comportamiento: Hard
Inflación	Geometría: Dominio de flujo
	Frontera: Aspas
	Numero de capas: 12
Tamaño del cuerpo	Control de esfera: Nuevo sistema de coordenadas en aspas
	Radio: 1500 mm
	Tamaño de elemento: 100 mm

En la Figura 3 se muestra el mallado del volumen de control con 1,792,824 elementos.

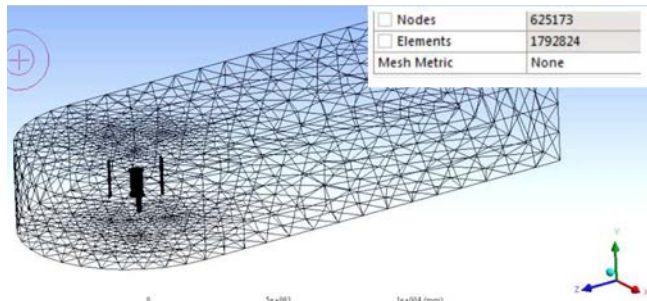


Figura 3. Mallado del volumen de control.

La configuración inicial del rotor Savonius se muestra en la Figura 4. Esta configuración inicial se toma como referencia para las propuestas de mejora.

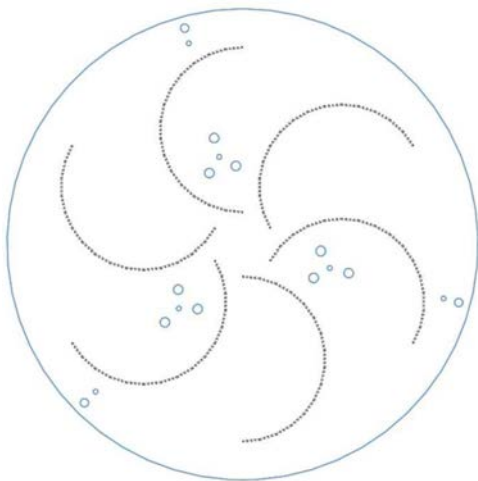


Figura 4. Configuración inicial de rotor Savonius.

Todos los análisis se realizaron en una computadora con 16 GB en RAM con procesador Intel Core i7- 1.7 GHz, el tiempo computacional para cada análisis fue alrededor de 1 h.

Análisis de los resultados del modelo CFD

El primer dato que se verifica es que se cumpla la ecuación de continuidad del flujo. Posteriormente se verifica el contorno de presión a lo largo de un plano horizontal XZ, como se observa en la Figura 5. Se observa que el flujo de aire al frente del rotor crea una zona de alta presión y cuando el viento pasa a través del rotor la presión disminuye. Este comportamiento provoca una circulación de flujo alrededor del rotor que provoca un momento. Este momento es el torque aerodinámico que debe ser mayor al contra torque del tren de potencia del rotor híbrido para provocar el giro de todo el sistema.

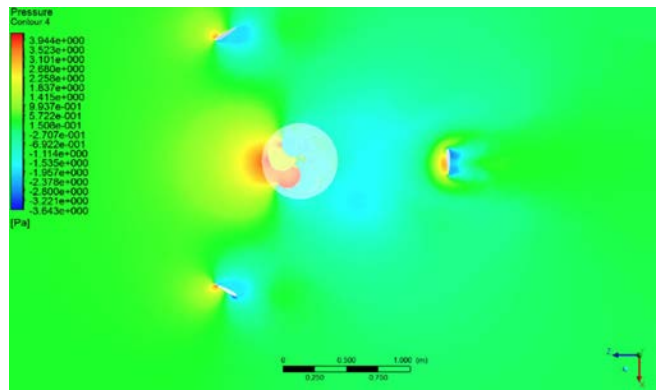


Figura 5. Distribución de presión estática sobre plano XZ a nivel medio del rotor.

El resultado de la simulación dinámica de fluidos computacional (CFD) para el torque aerodinámico de esta configuración es de 0.15 N-m en el eje de rotación principal con una velocidad de viento de 2.5m/s.

Además de la presión, el contorno de velocidades también es importante pues cuantifica las velocidades de viento que ocurren alrededor del rotor y que muestra el comportamiento de los vórtices Von Karman en la estela de turbulencia detrás del rotor (ver Figura 6).

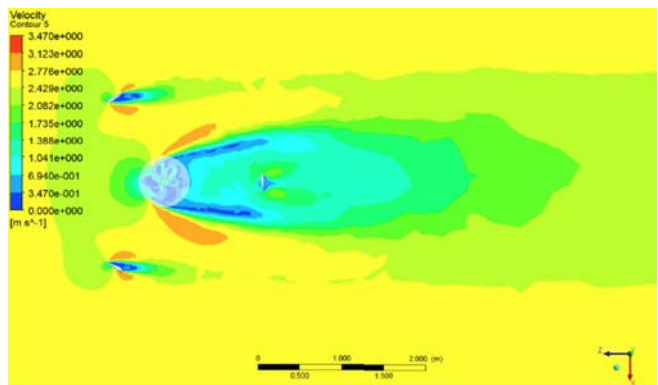


Figura 6. Distribución de velocidad sobre plano XZ a nivel medio del rotor.

Un punto interesante de la distribución de velocidad es que la velocidad del viento disminuye significativamente al chocar con el rotor Savonius, pero inmediatamente después vuelve a subir a velocidad de viento nominal, lo que se traduce como una buena transición de energía cinética en energía mecánica.

En la Figura 7 se muestran las líneas de corriente de aire tridimensionales que interactúan con el rotor híbrido. Se observa que cuando el rotor está estático las líneas de corriente inicialmente golpean al rotor Savonius provocando el arranque del aerogenerador a bajas velocidades de viento. El efecto de la caída de presión detrás del rotor Savonius se disipa casi inmediatamente y la fuerza con que choca el viento al aspa detrás del rotor Savonius es suficiente para provocar también la diferencia de presiones que ayuda a crear fuerza de levantamiento en los perfiles del rotor Darrieus, esto se observa también en la imagen de la Figura 5.

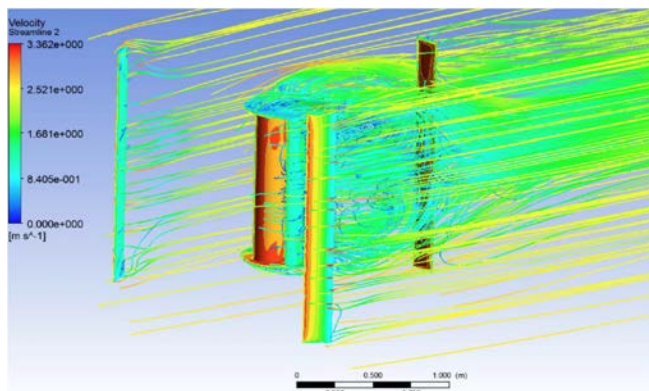


Figura 7. Líneas de corriente sobre el rotor híbrido.

Propuestas de mejora

Primera propuesta de mejora – Alerones planos extendidos

La primera implementación es el uso de alerones planos como se muestra en la Figura 8. Estos alerones son una extensión de las “cunetas” de la configuración original. Con esta configuración se incrementa el torque aerodinámico a 0.43 N-m para una velocidad de viento de 2.5 m/s.

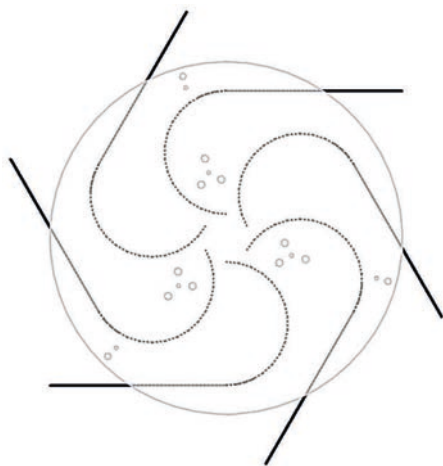


Figura 8. Primera propuesta: Alerones planos extendidos.

Segunda propuesta de mejora – Alerones planos tangentes

Una segunda propuesta es el uso de alerones planos tangentes a las cunetas como se muestra en la Figura 9. Estos alerones se colocan de manera tangente a las “cunetas” de la configuración original y son una variante de la primera propuesta. Con esta configuración se incrementa el torque aerodinámico a 0.308 Nm para una velocidad de viento de 2.5 m/s. Esta configuración es menos eficiente que la primera propuesta.

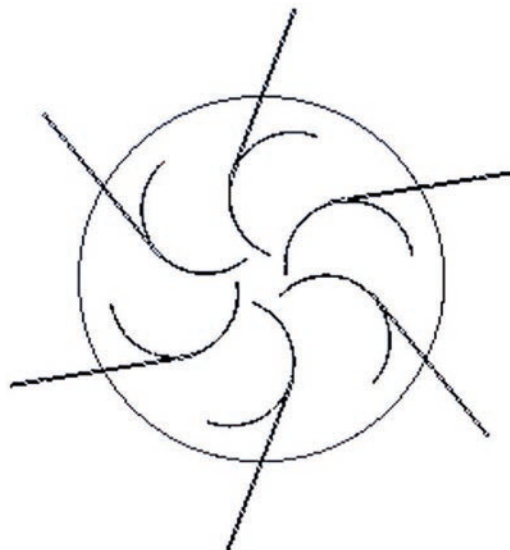


Figura 9. 2da Propuesta: Alerones planos tangentes.

Tercera propuesta de mejora – Alerones curvos

Una tercera propuesta es el uso de alerones curvos como se muestra en la Figura 10. Estos alerones se colocan de manera intermedia entre las “cunetas” de la configuración original de tal manera que permita al flujo de aire llegar hacia el centro del rotor. Con esta configuración se incrementa el torque aerodinámico a 0.53 N-m para una velocidad de viento de 2.5 m/s. Esta configuración es la más eficiente de las propuestas mostradas.

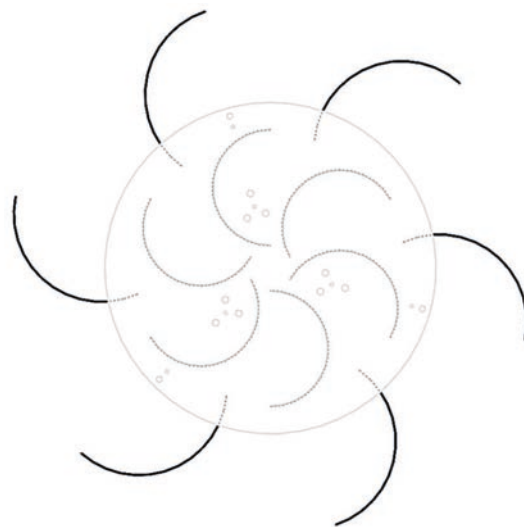


Figura 10. Tercera propuesta: Alerones curvos.

Los resultados del torque aerodinámico para los alerones propuestos se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Resultado de torque aerodinámico de alerones propuestos.

	Propuesta alerones	Torque aerodinámico (N-m)
1	Sin alerones	0.1568
2	Alerones planos extendidos	0.4383
3	Alerones planos tangentes	0.3084
4	Alerones curvos	0.5369

El valor del torque aún con estas propuestas sigue siendo bajo para la velocidad de viento de 2.5 m/s. Se realizan varias corridas para diferentes velocidades de viento (2.5, 3, 5, 7 y 8m/s), usando esta última configuración y obviamente el torque aerodinámico incrementa como se observa en la Figura 11.

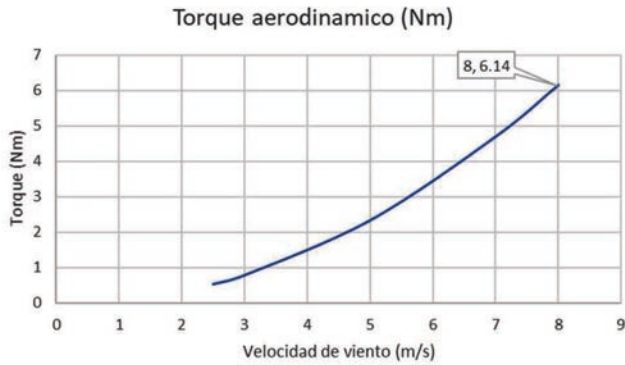


Figura 11. Torque aerodinámico vs Velocidad de viento con configuración de alerones curvos (3ra propuesta).

De la gráfica anterior se puede concluir que con una velocidad de viento de 8m/s, se pueden lograr 6 N-m suficientes para lograr el giro del rotor cuando este acoplado.

Adicionalmente, se realiza un análisis para verificar si es necesario dejar descubiertos a los alerones en los extremos o si funcionan mejor con los extremos cerrados. Dejarlos descubiertos significa que el flujo en los extremos puede fluir de mejor manera, pero al mismo tiempo puede generar vórtices que provocaran arrastre y minimizaran el desempeño de los alerones. Por otra parte, dejarlos cerrados provoca que se forme un túnel de viento donde se restringe la entrada de aire a través del rotor Savonius, lo cual también minimiza el desempeño del rotor.

En la Figura 12 se observa la configuración de los alerones donde la cubierta o tapa del rotor Savonius se extiende hasta cubrir completamente a los alerones. Este arreglo forma una configuración en la que todos los perfiles curvos crean un nuevo rotor con perfiles distribuidos de tal manera que ninguno de ellos interfiere entre sí.

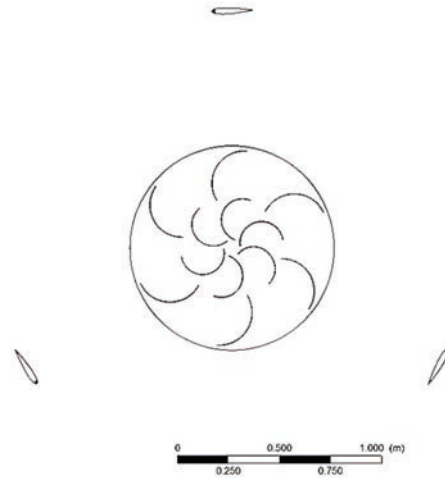


Figura 12. Configuración de alerones curvos con extremo cerrado.

El resultado del análisis para una velocidad de viento de 2.5 m/s muestra que el torque es menor que cuando los alerones están descubiertos en los extremos llegando a valores de 0.51 N-m. Por esta razón, se mantiene la configuración de extremos descubiertos como se observa en la Figura 10.

Mejora de alerones Darrieus con perfil asimétrico

Mejora mediante peso de aspas Darrieus

La masa del rotor juega un papel importante para determinar el torque angular necesario para poder mover al rotor. El cálculo del momento de inercia se determina a partir del modelo CAD como se observa en la Figura 13. El momento de inercia en el eje axial es de $I_{zz} = 28.04 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$. Este valor corresponde a un peso total del rotor de aproximadamente 60 kg, cuyo valor se obtuvo pesando cada componente de manera individual (Rotor Savonius 28kg, brazos de unión 10.2 kg, aspa Darrieus 6.5 kg).

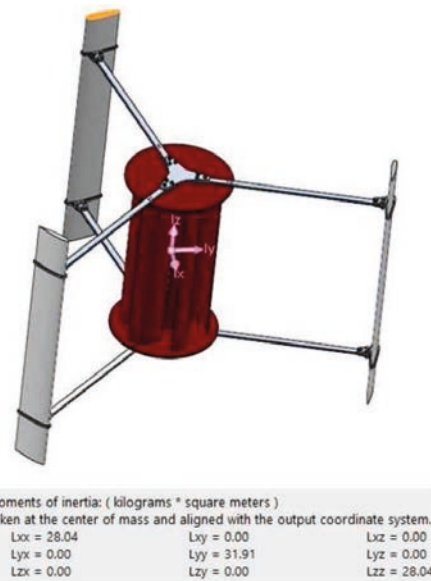


Figura 13. Momento de inercia del rotor híbrido (1ª versión).

A partir del momento de inercia del rotor completo se calcula el torque inercial (τ) como sigue:

$$\tau = I\alpha$$

Donde se considera a la aceleración angular (α) como el ritmo de cambio de la velocidad angular durante 1 segundo (aceleración de giro desde 1 rpm) (suposición de movimiento inicial), esto es:

$$\alpha = \frac{\omega}{t} = \frac{1 \text{ rpm}}{1 \text{ s}} = 0.1047 \text{ rad} / \text{s}^2$$

Por lo tanto:

$$\tau = I\alpha = (28.04 \text{ kg} \cdot \text{m}^2)(0.1047 \text{ rad} / \text{s}^2) = 2.93 \text{ Nm}$$

Lo que implica que el rotor (con las propiedades de los materiales con los cuales fue fabricado) necesita 2.93 Nm para comenzar a moverse a 1 rpm en 1 segundo, y está cerca del valor de 2 Nm medido directamente en el rotor desacoplado (ver Tabla 1).

Ahora, si se reduce la masa de las aspas Darrieus de 6.5kg a 3 kg (valor objetivo). Entonces el momento de inercia del rotor en el eje axial es de $I_{zz} = 19.30 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$.

El nuevo torque angular se calcula como sigue:

$$\tau = I\alpha = (19.30 \text{ kg} \cdot \text{m}^2)(0.1047 \text{ rad} / \text{s}^2) = 2.02 \text{ Nm}$$

Si se toma este valor y tomando como referencia la gráfica de la Figura 11 de torque vs velocidad de viento, entonces el rotor desacoplado estaría girando a una velocidad de 4.5 m/s y con el rotor acoplado a una velocidad de 8 m/s. En la gráfica se observa un comportamiento cuasi-lineal, a 8m/s tendría un torque de 6.14 N-m necesarios para vencer al torque resistivo del generador.

A esta implementación se le suma la ganancia de las aspas Darrieus con mayor área de contacto, y por la relación 1:1 de la transmisión.

Mejora mediante perfiles asimétricos NACA

La realización de nuevas aspas Darrieus más ligeras también consiste en el cambio del perfil aerodinámico por un perfil asimétrico NACA más eficiente durante el arranque y giro del rotor.

Una primera aproximación se logra revisando la literatura y el estado del arte de perfiles asimétricos para mejorar la eficiencia de rotores Darrieus tipo-H en bajas velocidades de viento. Los documentos revisados son Mazarbhuiya et al (2020) para un aspa asimétrica HDarrieus VAWT NACA 63-415 [8], Domínguez et al (2015) para perfiles asimétri-

cos NACA 4418, NACA 2418, S2027 y DU 06-W-200 [9], López Miranda (2014) para un perfil NACA 4415 [10], Beri et al (2011) para un perfil simétrico modificado NACA0018 y un perfil asimétrico NACA2415 [11], Mohamed (2012) realiza una investigación en 20 perfiles aerodinámicos (simétricos y no-simétricos) para maximizar el torque de aerogeneradores de eje vertical [12], el cual concluye que el coeficiente de potencia se ve mejorado por los perfiles asimétricos S-1046, FXLV152 y el S-809, Tiju et al (2015) para diferentes configuraciones de rotores Darrieus con perfil asimétrico S-1046 y perfil simétrico NACA0017 [13], Turcan (2015) para perfil NACA 2412 [14].

Algunas otras investigaciones consideran los perfiles NACA 2027 por su eficiencia, el perfil DU06W200 por su funcionamiento más adecuado para relaciones de velocidades bajas, ofreciendo un mayor coeficiente de potencia y el perfil CN-455332 por su buen desempeño aerodinámico.

La revisión de la información anterior implica analizar los perfiles resumidos en la Tabla 5 para la nueva implementación de un perfil aerodinámico más eficiente.

Tabla 5. Perfiles aerodinámicos potenciales para aspas Darrieus.

	Tipo de perfil aerodinámico
1	NACA 63-415
2	S2027
3	NACA 4415
4	NACA 2415
5	S-1046
6	FXLV152
7	S-809
8	NACA 2412

Siendo los perfiles S-2027 y S-1046 los más prometedores (de acuerdo con la literatura). Esto se verifica sustituyendo los perfiles simétricos originales (NACA0015) por cada uno de los 8 perfiles de la tabla anterior en un análisis CFD (uno a la vez), y observando aquel que presenta el mejor torque aerodinámico para la configuración particular del rotor híbrido. De las publicaciones revisadas, se toma como dato inicial la cuerda de 0.37m de longitud (Domínguez et al (2015) [9]), debido principalmente a que las dimensiones del rotor son similares.

El análisis CFD parte de la configuración de alerones curvos descrita anteriormente, y sobre la cual se reemplazaron los perfiles Darrieus (ver Figura 14). Se realiza la primera corrida a una velocidad de viento de 2.5 m/s.

A continuación, en la Tabla 6 se muestra el resultado del torque aerodinámico para los perfiles asimétricos propuestos.

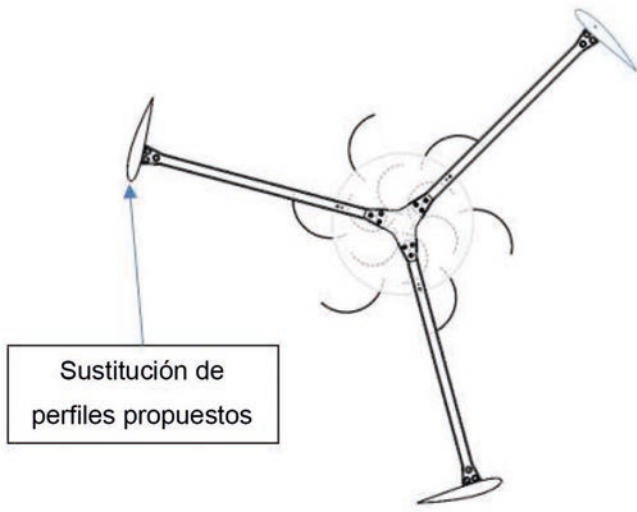


Figura 14. Modelo base para análisis CFD.

Tabla 6. Resultado de torque aerodinámico de perfiles asimétricos.

	Tipo de perfil aerodinámico	Torque aerodinámico (N-m)
1	NACA 63-415	0.7199
2	S2027	0.7217
3	NACA 4415	0.7904
4	NACA 2415	0.8271
5	S-1046	0.2193
6	FXLV152	0.7880
7	S-809	-
8	NACA 2412	0.5975

El perfil con el mejor resultado de acuerdo con la configuración mostrada en la Figura 14 es el NACA 2415 con 0.8271 N-m a una velocidad de viento de 2.5 m/s.

La configuración del perfil S-809 presentó detalles en la convergencia y no se pudo obtener un resultado aceptable mediante CFD, sin embargo, para no dejarla fuera del análisis se comparó la curva de C_l vs C_d con el resto de las curvas de los diferentes perfiles y se observó que el coeficiente de levantamiento C_l está por debajo de 1.5 comparado contra el de los perfiles NACA 2415, 4415 y 2412 más prometedores. Por esta razón, se estima que el torque aerodinámico es inferior a estos perfiles.

Se realizan varias corridas para diferentes velocidades de viento (de 2.5 a 10.5 m/s), utilizando la configuración del perfil NACA 2415 y los alerones curvos, de tal manera que se pueda tener un espectro más amplio de velocidad de viento vs torque aerodinámico. El resultado de este análisis se muestra en la gráfica de la Figura 15. De la gráfica se concluye que con una velocidad de viento de 6.5 m/s se logran ≈ 6 N-m suficientes para lograr el giro del rotor cuando este acoplado.

A manera de complemento se corre un análisis CFD utilizando la configuración del modelo presentado en la Figura 14 removiendo los alerones curvos (solo el rotor Savonius original con los perfiles NACA 2415), para fines comparativos se corre a una velocidad de viento de 2.5 m/s. Con esta configuración se registra un torque aerodinámico a 0.577 N-m.

Este resultado indica que al cambiar los perfiles Darrieus simétricos por perfiles asimétricos sin implementar los alerones se obtiene un incremento significativo del torque aerodinámico de 0.1568 N-m (sin alerones y con aspas Darrieus simétricas) a 0.577 N-m (sin alerones y con aspas Darrieus asimétricas). Incluso este último valor está por encima de la implementación de alerones curvos utilizando los mismos perfiles simétricos (0.5369 N-m), lo que significa que

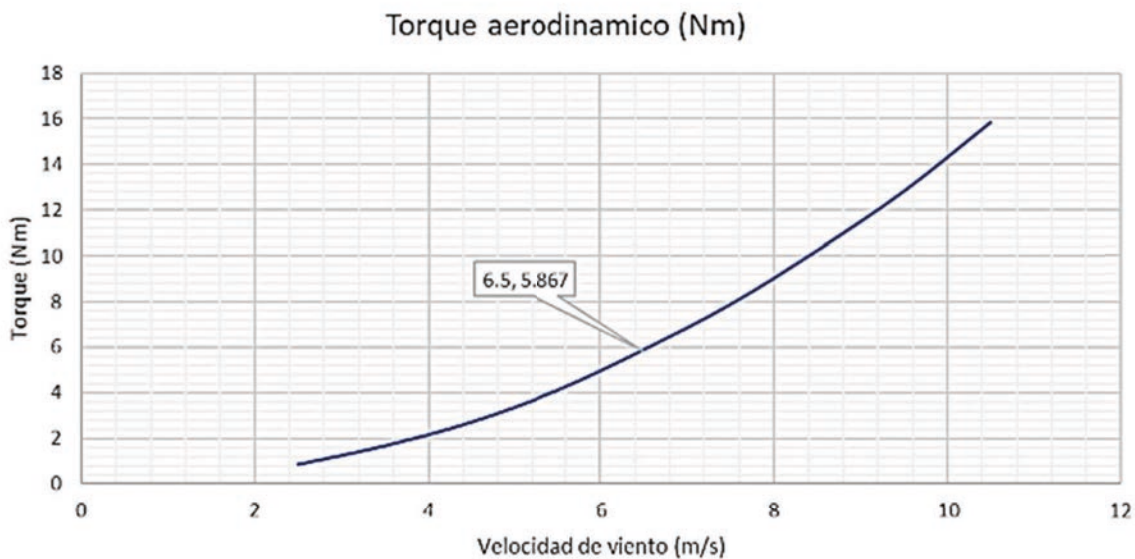


Figura 15. Gráfica de torque aerodinámico vs velocidad de viento para configuración con alerones curvos y perfil asimétrico NACA 2415.

el cambio a alerones asimétricos y con mayor longitud de cuerda tiene un mayor impacto. Por ende, la suma de estas dos implementaciones (alergones más perfiles asimétricos con mayor longitud de cuerda) resulta en un torque de arranque superior (0.8271 N-m), como se demostró en los resultados de la Tabla 6.

Mejora de la relación de transmisión 1:1

El cambio de relación de transmisión es una de las implementaciones de bajo costo. El procedimiento consiste en reemplazar el mecanismo de transmisión de potencia por bandas a un acoplamiento directo, esto tiene el inconveniente de reducir la velocidad rotacional a la entrada del generador eléctrico, sin embargo, permite conservar el torque aerodinámico del rotor hasta el generador eléctrico.

Este torque resistivo ahora solo equivale al torque por generador eléctrico para vencer el campo electromagnético de los imanes, este valor se encuentra en un rango de 1.5 – 2.5 N-m (datos del fabricante) más el torque inercial del rotor desacoplado que es de 2 N-m (calculado en modelo CAD y corroborado con torquímetro). Por lo tanto, en el caso menos favorable, el torque aerodinámico debe ser mayor o igual a 4.5 N-m. En la gráfica de la Figura 15 se puede observar que con una velocidad de viento de ≈ 6 m/s se logran los 4.5 N-m requeridos para arrancar al aerogenerador. En el caso más favorable el torque aerodinámico debe ser mayor o igual a 3.5 N-m y este se logra con una velocidad de viento de ≈ 5 m/s.

Mejora de la altura de torre

La altura actual de la torre original es de 1m. Con esta altura se cumplió la intención de diseño que es librar los obstáculos cercanos, estar a una altura aceptable por encima del suelo y aun así tener al alcance los componentes para minimizar ma-

niobras de mantenimiento. Una de las propuestas sugeridas para mejorar el torque de arranque es elevar la torre al menos a 2 m. Elevarla más allá de los 2m puede resultar en una ganancia muy pequeña de velocidad de viento y la desventaja es que ya no serían tan factible las maniobras de mantenimiento, además con la altura se incrementan los momentos y fuerzas resultantes en la unión de la base de la torre con la zapata de concreto. La Figura 16 muestra la turbina con las implementaciones de mejora.



Figura 16. Turbina con implementaciones de mejora.

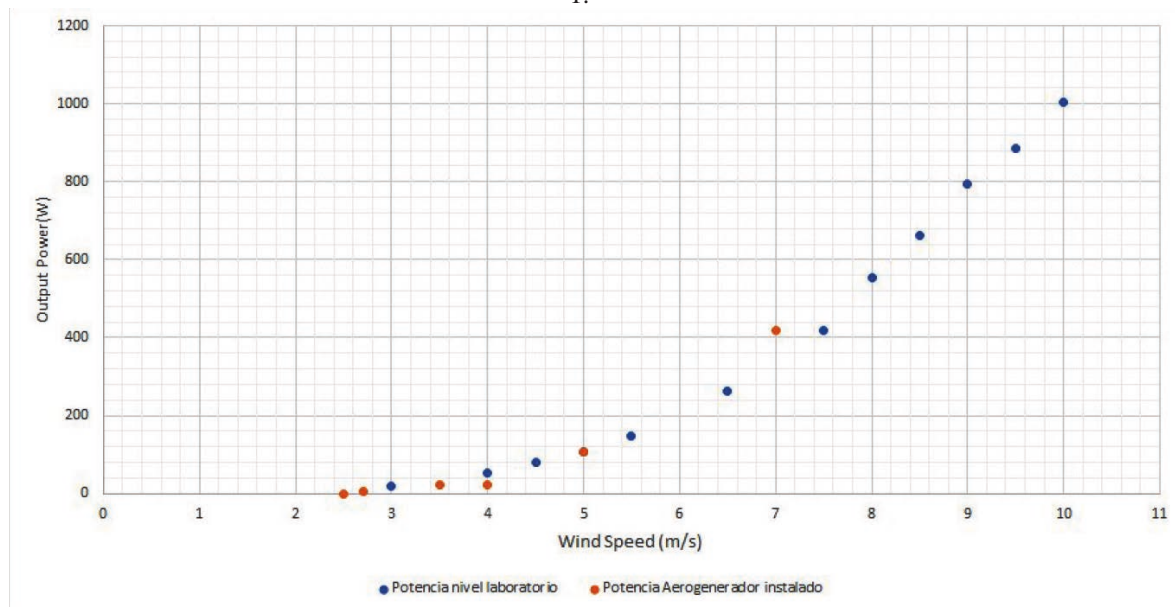


Figura 17. Curva de potencia de la Turbina con implementaciones de mejora.

Resultados de las mejoras del rotor

El primer valor que se revisa es el torque de giro del rotor conectado. La primera lectura se hace en el generador eléctrico y el valor está en el rango de 3.5 - 4 N-m. Antes de haber realizado las implementaciones de mejora se tenía un valor de torque de 6 N-m (ver Tabla 1).

Al monitorear la velocidad de viento y el momento exacto de arranque del rotor con todos los sistemas acoplados se detecta una velocidad de viento de 3.3 m/s.

Con esto se confirma que la implementación tanto aerodinámica como del acoplamiento directo funcionan y que el rotor ahora es capaz de girar a bajas velocidades de viento, lo que representa una mejora para el desempeño del aerogenerador. La Tabla 7 resume los resultados logrados en este artículo.

Tabla 7. Comparación de parámetros de operación antes y después de optimizaciones del rotor híbrido.

	Velocidad de arranque	Torque de arranque
Rotor híbrido antes de las mejoras	7 m/s	6 Nm
Rotor híbrido después de las mejoras	3.3 m/s	3.5 Nm

La velocidad de arranque tuvo una reducción del 52.8% con respecto a la configuración original, mientras que el valor del torque de arranque representa un decremento de alrededor del 41.6%, es decir, el torque aerodinámico que se requiere para mover al rotor ahora es de casi la mitad, lo que implica velocidades de viento más bajas para mover al rotor. Por último, una vez instalada la turbina se realizan las pruebas de desempeño de la turbina con las implementaciones de mejora (ver Figura 17), para esta prueba de desempeño se utilizó un anemómetro para conocer la velocidad del viento en todo momento y un amperímetro para capturar la energía producida, con esta información se construye la curva de potencia.

El objetivo de la curva de potencia es tener una medida de la capacidad del aerogenerador para producir potencia eléctrica a diferentes velocidades de viento. De esta prueba se obtienen los siguientes parámetros:

- Potencia de salida vs velocidad de viento,
- Gráfico de datos brutos,
- Coeficiente de potencia,
- Energía Anual producido.

Para el caso particular, los datos muestran una buena correlación entre los valores de diseño con las mejoras al rotor y de las mediciones en campo, sin embargo, la velocidad de mayor magnitud a la que estuvo operando la turbina fue de 7

m/s, esto provocó que la mayor concentración de datos en la curva de potencia estuviera entre 3 y 7 m/s.

Conclusiones

La serie gradual de optimizaciones descritas en este artículo para un aerogenerador VAWT de 1kW han sido significativas si se toma en cuenta que desde la primera instalación se presentaron dificultades de giro aún con la transmisión desacoplada y a velocidades de viento de 7m/s.

Después de las adecuaciones (alergones curvos en rotor Savonius, aspas asimétricas en rotor Darrieus, acoplamiento de transmisión directo, y altura de torre de 2m) y con el sistema acoplado, el rotor giró a 6rpm con una velocidad de viento de 3.3 m/s y un par de arranque de 3.5 Nm.

El par resistivo del generador eléctrico por sí solo es de 1.5 - 2.5 Nm. El torque aerodinámico de la última configuración híbrida indica que a 3.3 m/s se logra un torque de aprox. 3.5 Nm suficientes para vencer al torque resistivo de la turbina completa.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT).

Al Consejo Estatal De Ciencia Y Tecnología De Jalisco (COECYTJAL).

Al Centro de Tecnología Avanzada (CIATEQ A.C.).

Referencias

- [1] Manwell, J. F., McGowan, J. G., & Rogers, A. L. (2010). *Wind energy explained: theory, design and application*. John Wiley & Sons.
- [2] Kumar, R., Raahemifar, K., & Fung, A. S. (2018). *A critical review of vertical axis wind turbines for urban applications*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 89, 281-291.
- [3] Ishugah, T. F., Li, Y., Wang, R. Z., & Kiplagat, J. K. (2014). *Advances in wind energy resource exploitation in urban environment: A review*. *Renewable and sustainable energy reviews*, 37, 613-626.
- [4] Lee, K. Y., Tsao, S. H., Tzeng, C. W., & Lin, H. J. (2018). *Influence of the vertical wind and wind direction on the power output of a small verticalaxis wind turbine installed on the rooftop of a building*. *Applied Energy*, 209, 383-391.

- [5] Patel, N., & Uddin, M. N. (2012, December). *Design and performance analysis of a magnetically levitated vertical axis wind turbine based axial flux PM generator*. In 2012 7th International Conference on Electrical and Computer Engineering (pp. 741-745). IEEE.
- [6] Jacob, J., & Chatterjee, D. (2019). *Design methodology of hybrid turbine towards better extraction of wind energy*. *Renewable Energy*, 131, 625-643
- [7] Korprasertsak, N., & Leephakpreeda, T. (2016). *Analysis and optimal design of wind boosters for Vertical Axis Wind Turbines at low wind speed*. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 159, 9-18.
- [8] Mazarbhuiya, H. M. S. M., Biswas, A., & Sharma, K. K. (2020). *Low wind speed aerodynamics of asymmetric blade H-Darrieus wind turbine-its desired blade pitch for performance improvement in the built environment*. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42, 1-16.
- [9] Domínguez Fernández, D., Pröhl, M., De Troyer, T., Werner, M., & Runacres, M. C. (2015). *Design of a hydroformed metal blade for verticalaxis wind turbines*. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 7(4), 043135.
- [10] López Miranda, V. A. (2014). *Diseño de un aerogenerador de Eje Vertical de 2.5 kw* (Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur, Perú).
- [11] Beri, H., & Yao, Y. (2011). *Numerical simulation of unsteady flow to show self-starting of vertical axis wind turbine using fluent* *Journal of Applied Sciences*, 11(6), 962-970.
- [12] Mohamed, M. H. (2012). *Performance investigation of H-rotor Darrieus turbine with new airfoil shapes*. *Energy*, 47(1), 522-530.
- [13] Tjiu, W., Marnoto, T., Mat, S., Ruslan, M. H., & Sopian, K. (2015). *Darrieus vertical axis wind turbine for power generation I: Assessment of Darrieus VAWT configurations*. *Renewable Energy*, 75, 50-67.
- [14] Turcan, N. (2015). *Aerogenerador de viento* (Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).