

Desarrollo de una turbina de eje vertical para entornos urbanos

Development of Vertical Axis Wind Turbine for Urban Environment

Isaac Hernandez Arriaga^{1*}, Giovanni Vidal Flores², José Guadalupe Rico Espino³, Ivan Juarez Sosa⁴

CIATEQ A.C., Parque Industrial Bernardo Quintana, Av. Manantiales 23-A

El Marques, CP 76246, Querétaro, México. Tel (442)1961500.

isaac.hernandez@ciateq.mx^{1*}, giovanni.vidal@ciateq.mx², jose.rico@ciateq.mx³, ivan.juarez@ciateq.mx⁴

Resumen

En este artículo se presenta el desarrollo tecnológico de una turbina eólica de eje vertical con topología Darrieus-Savonius para ambientes urbanos con capacidad de 1 kW. Los clientes de esta tecnología son desarrollos urbanos, con uso residencial y uso comercial, principalmente donde se utilizan tarifa Doméstica de Alto Consumo (tarifas DAC) con un tiempo de retorno de la inversión menor. La metodología utilizada en este estudio comienza con la selección del sitio con el mayor recurso disponible y aprovechable, para ello se utilizó Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), se realizó un estudio del estado del arte de las tecnologías eólicas utilizadas en entornos urbanos, la ingeniería conceptual, básica y de detalle, la fabricación, la instalación y la puesta en operación de la turbina. Los resultados de las pruebas de pre-arranque mostraron que la velocidad de arranque fue de 7 m/s mientras que en el cálculo teórico era de 3 m/s, debido a esto se implementaron mejoras en el diseño, tales como; cambio a perfiles asimétricos en el rotor Darrieus, alerones curvos en el rotor Savonius, acoplamiento directo de los rotores al tren de potencia y una altura mayor de la torre, con esto se logró una velocidad de arranque de 3.3 m/s y un par de arranque de 2.5 Nm. Las pruebas de desempeño tuvieron una duración de 6 meses y mostraron resultados satisfactorios, la velocidad de mayor magnitud de 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.

Abstract

This article presents the technological development of a 1 kW vertical axis wind turbine with Darrieus-Savonius topology for urban environments. The customers for this technology are located at urban developments, with residential and commercial needs, where high Consumption Domestic Tariffs (DAC) are typically applied, therefore, the return time investment is shorter. The methodology used in this development begins with the selection of site based on the availability of wind resource, Computational Fluid Dynamics (CFD) was used for this purpose, a study of the state of the art of wind technologies used in urban environments was performed, followed by conceptual, basic, and detailed engineering, manufacturing, installation and testing of the turbine. The results of the pre-startup tests showed that the start-up wind speed was 7 m/s while in the theoretical calculation it was 3 m/s; after applying design improvements such as an asymmetric profile in the Darrieus rotor, curved spoilers in the Savonius rotor, direct coupling of the rotor to the power train, and a greater length of the tower, a start-up wind speed of 3.3 m/s and start-up torque were achieved. The performance tests lasted 6 months and showed satisfactory results, operating turbine speed was 7 m/s, and the range of data for the power curve was between 3-7 m/s.

Palabras clave:

Energía Eólica, Turbina de Eje Vertical, Entorno Urbano, Topología Darrieus-Savonius

Keywords:

Wind Energy, Vertical Axis Wind Turbine, Urban Environment, Darrieus-Savonius Topology

Introducción

Actualmente, la concentración global de gases de efecto invernadero debido a la combustión de compuestos basados en carbono, así como la deforestación, la erosión de suelos y la agricultura ha llegado a niveles alarmantes, principalmente en grandes ciudades. La propuesta es generar electricidad en ambientes urbanos mediante turbinas de eje vertical, con ello reducir emisiones y mitigar los efectos del cambio climático. Los clientes potenciales de esta tecnología son fundamentalmente desarrollos urbanos, con uso residencial y uso comercial, tales como; edificios, hospitales, escuelas, centros comerciales, fraccionamientos, casas habitación, etc., principalmente donde se utilizan tarifa Doméstica de Alto Consumo (tarifas DAC) con tiempos de retorno de la inversión

menores, por ejemplo; entre 5 a 10 años.

Para los entornos urbanos, las turbinas de eje vertical son más adecuadas que las de eje horizontal [1] [2] y [3], las turbinas de eje vertical son máquinas de poca altura; tienen menores riesgos de daño por vientos fuertes y funcionan en cualquier dirección cambiante de viento; además su operación es silenciosa. Otra de sus grandes ventajas es que se pueden colocar cercanas unas de otras, investigaciones recientes apuntan a que se puede obtener mejores eficiencias utilizando turbinas verticales combinando diferentes topologías en una sola [4], [5] y [6], por ejemplo; Savonius con Darrieus.

A continuación, se presentan algunos datos de las turbinas de eje vertical; los rendimientos de las turbinas Savonius van de 0.3 a 0.35 con capacidad de generación de 0 a 500 kw [7], las turbinas Darrieus llegan hasta rendimientos cercanos a 0.47 mientras que las de topología híbrida Darrieus-Savonius llegan hasta 0.41 [4], sin embargo, los avances más recientes combinan característica que muestran potencial de aplicación en condiciones bajas y medias de velocidad del viento (3 a 6 m/s) [1], [2], [3], [4] y [6]. Se ha investigado que la generación de energía por turbinas de eje vertical de potencia nominal entre 1.0 a 10.0 kW llegar a ser de 167 a 833 W/m², mientras que en las de eje horizontal se llegan a ser entre 146 y 331 W/m² [7]. Para potencias superiores a los 100 KW; los costos son razonables y se puede tener valores de 1.410 a 2.475 USD/W, para potencias menores, pueden implicar costos mayores de 3.0 a 6.0 USD/W [8]. Sin embargo, el incremento acelerado de los combustibles fósiles hará rentable esta tecnología en poco tiempo.

Por estas razones este estudio se centra en el diseño, fabricación, instalación y pruebas de una turbina de eje vertical tipo Savonius-Darrieus con capacidad de 1 kW, para la generación de energía eléctrica distribuida para ambientes urbanos.

Metodología

Para este estudio, la metodología comienza con la evaluación y caracterización del sitio más adecuado para la instalación de la turbina, se utiliza la dinámica de fluidos computacional (CFD), esta caracterización incluye la determinación de las velocidades de viento en el sitio, los niveles de turbulencia y la energía extraíble, esto permite determinar los parámetros de operación de la turbina, por ejemplo; la potencia nominal de la máquina.

Se realiza la ingeniería de la turbina, la cual comienza con una revisión y análisis del estado del arte de las tecnologías de turbinas de eje vertical (artículos, patentes, productos comerciales, etc.), esto con el fin de identificar información de las tendencias tecnológicas predominantes que ayuden a formular propuestas conceptuales, se realiza la ingeniería conceptual, donde se estudiaron tres conceptos y se seleccionó la mejor opción, se realiza la ingeniería básica para determinar la factibilidad técnica, el dimensionamiento de todos los componentes de diseño propio y la especificación y selección de los componentes y sistemas comerciales, se realiza la ingeniería de detalle donde se elaboran los planos de fabricación y los diagramas de ingeniería (eléctricos y de control). Se realiza la fabricación de todos los componentes de diseño propio, por ejemplo; aspas, flechas, torre, etc., se adquieren los componentes y sistemas comerciales, tales como; generador eléctrico, convertidor e instrumentación, etc. y el ensamble de la turbina. Finalmente, se realiza la instalación y pruebas de desempeño de la turbina donde se determina la curva de potencia en función de la velocidad del viento.

Evaluación y caracterización del sitio para la instalación de la turbina

La evaluación y caracterización del lugar donde se pretende instalar la turbina es un paso imprescindible [3], ya que el viento tiene magnitud, dirección y frecuencia que son muy particulares para cada lugar. Normalmente, el primer paso es realizar mediciones previas del viento durante un rango de 6 a 12 meses para determinar si existe disponibilidad del recurso y asegurar que se tendrá un retorno de la inversión en un tiempo razonable. En caso de que no se cuenta con estas mediciones, una alternativa para la caracterización del sitio es la modelación mediante CFD, se requieren datos de mapas a meso y microescala del recurso eólico de la zona y/o datos disponibles de torres anemométricas cercanas al lugar de interés, estos datos son consideradas como condiciones de frontera de entrada para el análisis, por ejemplo; la rosa de vientos (magnitud, dirección y frecuencia del viento).

Para esta investigación, se realizó una búsqueda de sitios promisorios para la instalación de la turbina en los municipios de San Pedro Tlaquepaque, Tonalá, Guadalajara y Zapopan, se realizaron entrevistas a personal residente con conocimientos en energía eólica y que identifican lugares históricos potenciales con recurso, se identificaron tres sitios importantes. En el municipio de Zapopan se identificaron dos edificaciones; 1) Ciudad Judicial y 2) CIATEQ Unidad Jalisco y en el municipio de Guadalajara, se identificó la edificación de la Secretaría de Educación del Estado de Jalisco.

Para la selección del sitio, el factor más importante es el recurso eólico disponible, sin embargo, existen otros factores que hay que tomar en cuenta, tales como; disponibilidad de espacios, disponibilidad de infraestructura eléctrica e inclusive si el edificio cuenta con la integridad estructural para la instalación. Con ello se asegura que el recurso no solo está disponible, sino que también es aprovechable.

Con la información de mapas eólicos disponibles en la red de los sitios de interés, (<http://sag01.iie.org.mx/sig/>), se evaluó el recurso eólico disponible en los entornos urbanos mediante CFD. Los análisis numéricos fueron realizados en 3D utilizando el Método de Volumen Finito, para tal propósito se utilizó el software ANSYS Workbench, específicamente, el módulo de Dinámica de Fluidos Computacional ANSYS FLUENT 2020 R1. Para la solución de los modelos numéricos se consideró un modelo turbulento K- ω , con mallado poliédrico, con una solución pseudotransitoria y función exponencial como condición de frontera de entrada del viento. Para el volumen de control del viento se consideró un cilindro de 400 m de diámetro y 50 metros de altura (Figura 1). La Figura 2 muestra el mallado considerado para los análisis, es tipo hexaédrico, con capa límite en las paredes de los edificios, con un total de 18,000,000 de elementos.

Para estos análisis se utilizaron las siguientes propiedades del aire; densidad (kg/m³) de 1.225, viscosidad (Pa-s) de 1.7894e-

05, calor específico (J/kg-K) de 1006.43 y conductividad térmica (W/m-K) de 0.0243. Se consideró una velocidad de viento acorde a la rosa de vientos del sitio (Figura 4) y una función matemática exponencial acorde a la Ley de Hellmann.

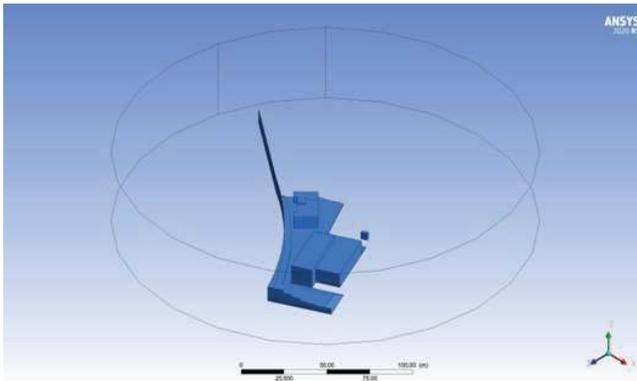


Figura 1. Volumen de control de las instalaciones de CIATEQ Unidad Jalisco

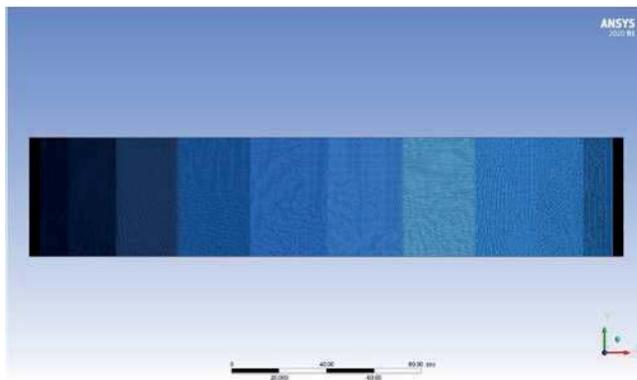


Figura 2. Mallado del volumen de control de las instalaciones de CIATEQ Unidad Jalisco

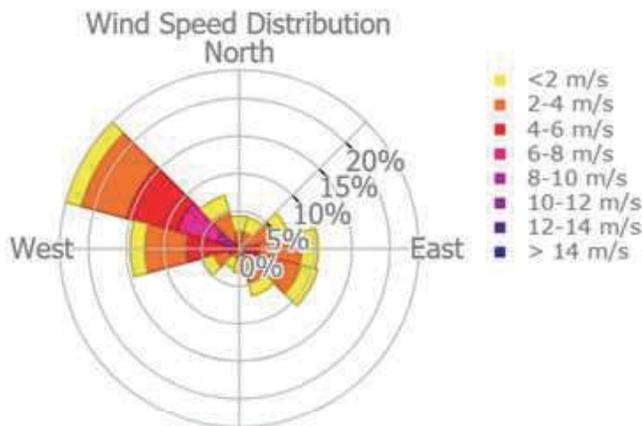


Figura 3. Rosa de viento de las instalaciones de CIATEQ Unidad Jalisco. (<http://sag01.iie.org.mx/sig>).

Los análisis mostraron que el sitio con la velocidad de viento mayor es la Ciudad Judicial, con una velocidad promedio de 4.3 m/s (Figura 4), sin embargo, se encuentra a partir de 6 metros de altura sobre el techo de la edificación, esto implica considerar una torre alta y costosa, que puede pro-

ducir vibraciones mecánicas y problemas de acceso para el mantenimiento, por lo tanto, este lugar tiene recurso eólico disponible pero no aprovechable. Por otra parte, las instalaciones de CIATEQ Unidad Jalisco presentan velocidades de viento promedio de 3.5 m/s a una altura de 2 metros sobre el techo de la edificación (Figura 5), además la distribución del viento se mantiene homogénea ya que se encuentra en una zona relativamente despejada (sin obstáculos), por ejemplo, en la dirección de los vientos predominantes se encuentra un campo de golf. Sumado a ello, las instalaciones de CIATEQ Unidad Jalisco cuentan con infraestructura que complementa la instalación y las pruebas de la turbina, por ejemplo; cuenta con una red eléctrica inteligente donde se inyecta la energía eléctrica producida y una torre anemométrica que permite determinar la curva de potencia bajo normativa (IEC- 61400-2). Debido a esta infraestructura, se selecciona como el mejor sitio para la instalación de la turbina.

Dentro de las instalaciones de CIATEQ Unidad Jalisco, se identifican diferentes zonas con velocidades de viento que van de los 2 m/s a los 3.5 m/s (Figura 6), dentro de estas zonas, la zona con mayor recurso es la zona (c), con una velocidad de viento de 3 m/s, sin embargo, esta edificación no cuenta con la integridad estructural para la instalación, la siguiente zona más favorable (a) tiene una velocidad de viento de 3 m/s y la edificación cuenta con la integridad estructural requerida, por lo tanto, esta zona presenta el mejor recurso disponible y aprovechable. Las velocidades de viento en la Secretaría de Educación no son favorables, la velocidad de viento tiene una magnitud de 2.1 m/s (Figura 7).

Revisión y Análisis del Estado del Arte

Se realizó una revisión y análisis del estado del arte de turbinas eólicas de eje vertical utilizados en ambientes urbano, esto permite definir las consideraciones generales de diseño de la turbina, asegurando que no se estará invadiendo propiedad intelectual de terceros e identificando posible protección en el desarrollo. De las consideraciones más importantes, se pueden mencionar las siguientes:

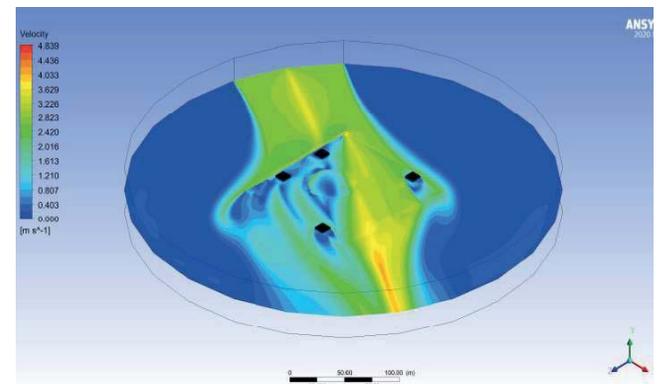


Figura 4. Campo de velocidades a 25 metros de altura en edificio de Ciudad Judicial, Zapopan, Jalisco

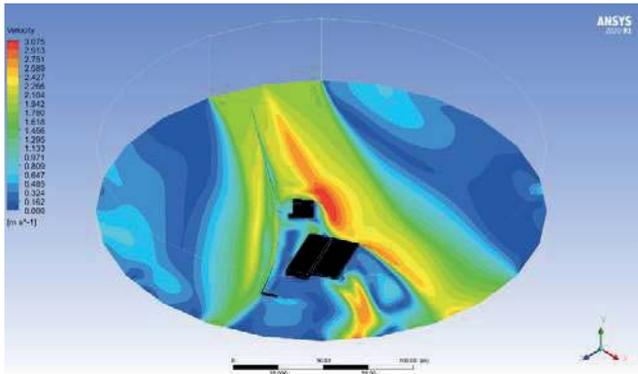


Figura 5. Campo de velocidades a 8 metros de altura en CIATEQ Unidad Jalisco

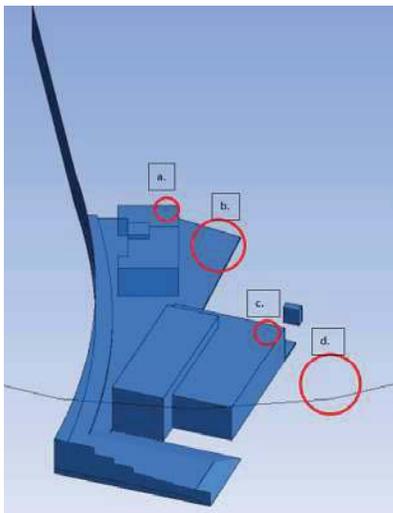


Figura 6. Zonas con mejor potencial de recurso eólico para instalación de la turbina en CIATEQ Unidad Jalisco

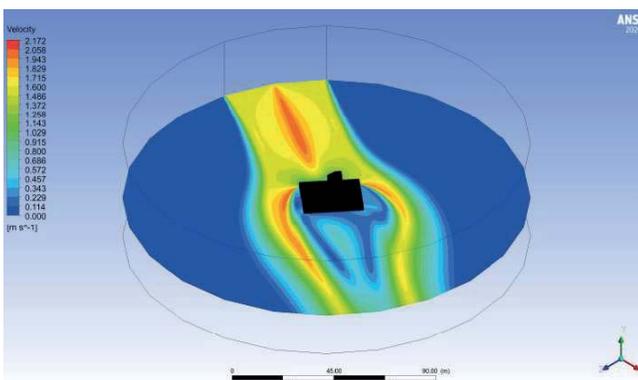


Figura 7. Campo de velocidades a 21 metros de altura en Secretaría de Educación de Jalisco

- La topología híbrida Savonius-Darrieus es de las más adecuadas para los entornos urbanos, ya que los análisis de la curva de potencia de las turbinas híbridas han demostrado de manera concluyente que la potencia producida es la suma de las potencias producidas por las turbinas individuales Savonius y Darrieus [6].

- La turbina Darrieus tipo H presenta simplicidad en su diseño, alta eficiencia y bajos costos de manufactura [9] y [10].
- El número de aspas para la turbina Darrieus será de tres alabes, ya que con este número arrancarían automáticamente, independientemente de su posición inicial, se tiene este problema de arranque con turbinas de uno o dos alabes [11], más alabes en la turbina representa un incremento de costo de materiales y de producción.
- Los alabes de la turbina pueden ser helicoidales o rectos, por un lado, los alabes helicoidales aumentan el coeficiente de potencia en comparación con el arreglo de alabes rectos (Tipo H), sin embargo, los alabes rectos presentan costos de producción menores [12].
- Los alabes de la turbina Darrieus pueden ser simétricos o asimétricos, los perfiles simétricos arrancarían por sí mismos a velocidades de viento inferiores mientras que los perfiles asimétricos desarrollan mayores coeficientes de levantamiento (high lift) y baja resistencia (low drag) [11]. El perfil simétrico disminuye costos por su relativa facilidad de fabricación comparado con los perfiles asimétricos. Se seleccionan álabes simétricos.
- El material más utilizado para los alabes de las turbinas Darrieus es el plástico reforzado con fibras, ya que estos compuestos tienen baja densidad, buena relación resistencia-peso, excelente resistencia a la corrosión, mejores características a la fatiga y versatilidad de métodos de fabricación [13] y [14].
- Las turbinas Savonius convencionales están limitadas para la generación de electricidad debido a su incapacidad para girar más rápido que la velocidad del viento, una consideración lógica puede ser la implementación de una caja multiplicadora para aumentar la rotación del generador [4]. Se selecciona un mecanismo de poleas para multiplicar la velocidad de giro a la entrada del generador eléctrico con relación 1:2.

Ingeniería conceptual de la turbina

Se elaboraron alternativas conceptuales para la turbina híbrida, se estudiaron y evaluaron 3 conceptos, se seleccionó la propuesta más adecuada basados en una matriz de decisión.

La alternativa 1 consiste en una turbina híbrida Darrieus-Savonius, el rotor Savonius está inscrito en el rotor Darrieus, ambos rotores tienen alabes rectos (Figura 8.a), la alternativa 2 consiste en una turbina híbrida Darrieus-Savonius con alabes helicoidales, el rotor Savonius también está inscrito en el rotor Darrieus (Figura 8. b) y la alternativa 3 propone una turbina Darrieus con la implementación de un acelerador-reforzador de viento (Figura 8. c).

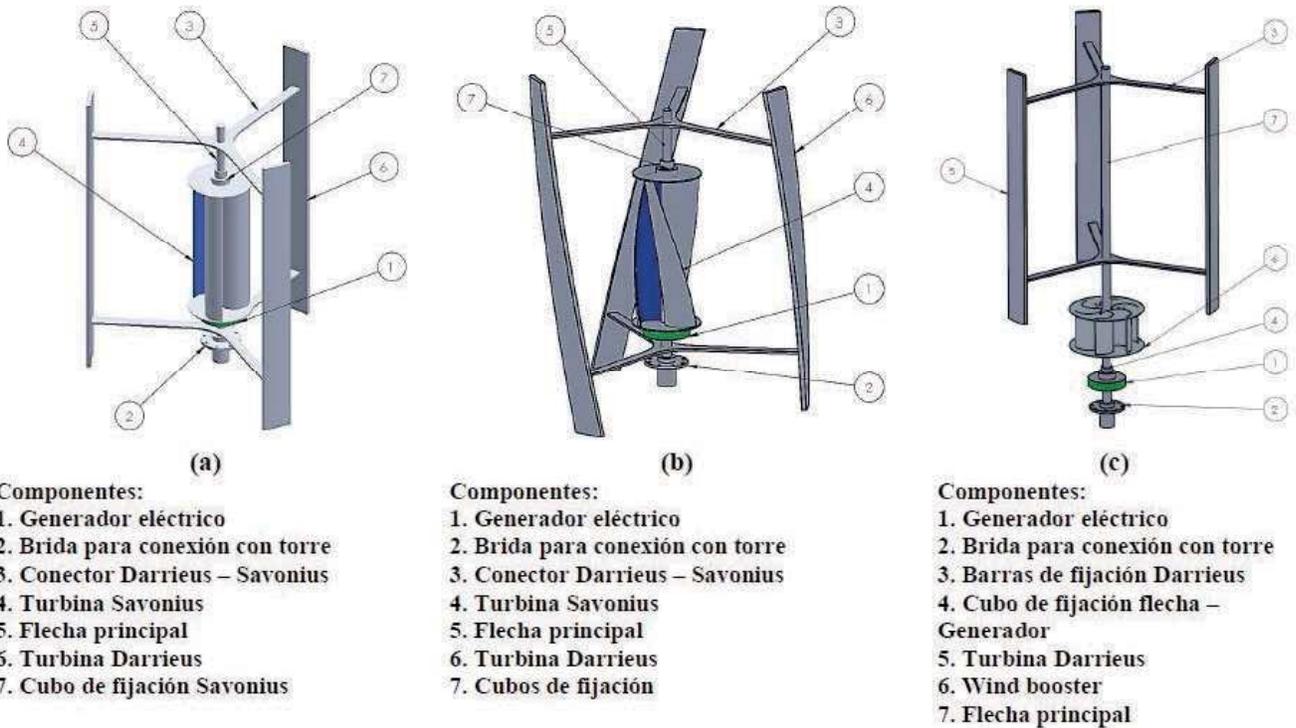


Figura 8. A) alternativa conceptual 1. Turbina eólica híbrida Darrieus-Savonius con alabes rectos y conos de aceleración de viento, b) alternativa conceptual 2. Turbina eólica híbrida Darrieus-Savonius con alabes helicoidales y c) Iternativa conceptual 3. Turbina híbrida Darrieus-Savonius con reforzador de viento (wind booster)

	Factores funcionales					Factores de construcción			Factores económicos		
	Prioridad										
Prioridad	3	2	3	2	1	3	2	2	3	3	
Características	Rendimiento	Mantiobrabilidad	Confiabilidad	Peso del conjunto	Espacio que ocupa	Facilidad de construcción	Facilidad de montaje	Facilidad de mantenimiento	Costos	Material	
	Alcanzar la potencia producida (1 kW) y Eficiencia superior a 40%	Facilidad para realizar operaciones de montaje y mantenimiento	Probabilidad de que los mecanismos funcionen satisfactoriamente	Menor peso de la turbina	Adecuaciones menores al sitio	Menor número de elementos y piezas fáciles d construcción	Facilidad de ensamblar y desensamblar	Facil acceso a mantenimiento	Métodos de fabricación económico	Material económicos	Total
Alternativas	3	3	3	2	2	2	2	2	3	3	62
Alternativa 1	3	3	3	2	2	2	2	2	3	3	62
Alternativa 2	2	2	3	3	3	2	3	3	1	2	55
Alternativa 3	3	2	2	1	1	1	1	1	2	2	41
Peso ponderado por cada criterio											
Alternativa 1	0.145	0.097	0.145	0.065	0.032	0.097	0.065	0.065	0.145	0.145	1
Alternativa 2	0.109	0.073	0.164	0.109	0.055	0.109	0.109	0.109	0.055	0.109	1
Alternativa 3	0.220	0.098	0.146	0.049	0.024	0.073	0.049	0.049	0.146	0.146	1

Figura 9. Matriz de decisiones

La ingeniería conceptual incluye la identificación de la metodología de diseño a utilizar, las consideraciones generales de diseño, las especificaciones y los requerimientos de diseño. De acuerdo con la evaluación mediante la matriz de decisión (Figura 9), se determinó que la alternativa 1 (Rotor híbrido con alabes rectos) es la opción que más se adecua a las necesidades planteadas en el estudio y servirá como punto de partida en el diseño.

En este estudio, los criterios de mayor importancia fueron: el criterio de rendimiento para alcanzar 1kW de potencia, la eficiencia superior a 40%, la confiabilidad, la facilidad y costos de construcción y costos de materiales son los criterios de mayor importancia global.

Parámetros de operación

Una vez seleccionado el concepto de la turbina vertical, se determinaron los parámetros de operación y de diseño bajo las condiciones del viento del sitio, entre los cuales se encuentran; la velocidad de punta de alabe, el coeficiente de potencia, el área de barrido, el torque del rotor, la potencia nominal, el efecto de solidez (relación entre el área de las aspas y el área de barrido del rotor) y la relación de aspecto. Con estos parámetros se realizó el dimensionamiento general de la turbina (Figura 10 y Figura 11), dentro de los cuales se encuentran; el diámetro y la altura del rotor Savonius, la longitud de cuerda, el radio y la altura del rotor Darrieus, el número de aspas de ambos rotores, el cálculo de la relación de aspecto del rotor híbrido y la solidez.

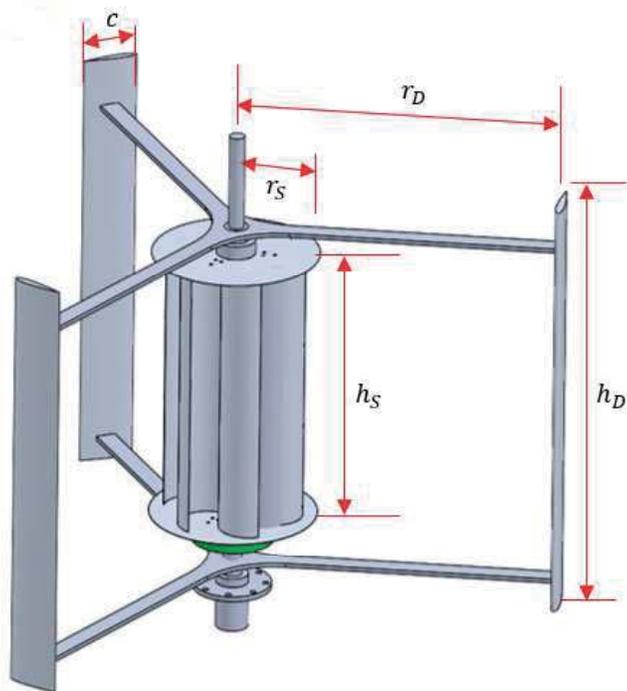


Figura 10. Dimensiones principales de la turbina

Rotor Darrieus	
Radio de la turbina Darrieus:	$r_D=1.169 \text{ m}$
Altura de la turbina Darrieus:	$h_D=1.552 \text{ m}$
Número de aspas: 3	
Longitud de cuerda:	$c=0.194 \text{ m}$
Solidez:	$\sigma=0.5$
Rotor Savonius	
Radio de la turbina Savonius:	$r_S=1.169 \text{ m}$
Altura de la turbina Savonius:	$h_S=1.552 \text{ m}$
Número de aspas: 3	
Solidez:	$\sigma=3$

Figura 11. Dimensionamiento de la turbina

Ingeniería básica de la turbina

Se realizaron los cálculos necesarios para dimensionar todos los componentes y sistemas de la turbina, esto mediante la ingeniería básica. La turbina se dividió en 4 sistemas fundamentales:

- Sistema del rotor híbrido: formado por tres aspas rectas tipo Darrieus y un rotor con 6 alabes tipo Savonius (Figura 12).
- Sistema del tren de potencia: comprende la flecha principal, dos baleros cónicos para la transmisión de movimiento y cargas y arreglo de poleas para el incremento de velocidad y transmisión de potencia del rotor al generador eléctrico.
- Sistema de generación eléctrica: comprende tanto al generador eléctrico como los dispositivos comerciales (controlador e inversor), por medio de los cuales se podrá integrar a la red eléctrica.
- Elementos estructurales: comprende a todos los componentes que soportan y conectan a la turbina, dentro los cuales se encuentra la torre, el soporte del tren de potencia, generador eléctrico y la cimentación.

A continuación, se presentan los resultados de la modelación mediante la técnica de elementos finitos (FEM) y de volúmenes finitos (CFD) de las componentes principales, se determinaron valores de los esfuerzos de von Mises del rotor Savonius (Figura 13) y del rotor Darrieus (Figura 14), los desplazamientos de la flecha principal (Figura 15), las líneas de corriente (Figura 16) y factores de seguridad, entre otros.

Ingeniería de Detalle de la turbina

En esta ingeniería se desarrollaron todos los planos de manufactura de los componentes de diseño propio (Figura 17) y los diagramas eléctricos y de control de los sistemas de la turbina (Figura 18). También, se elaboró la ingeniería de los procesos de manufactura de las aspas del rotor Darrieus,

por ejemplo; proceso de manufactura con plástico reforzado con fibras de vidrio mediante el proceso de transferencia de resina asistido con bolsa de vacío (VARTM), se elaboran las listas de materiales y consumibles tanto para las aspas como para los modelos maestros y moldes.

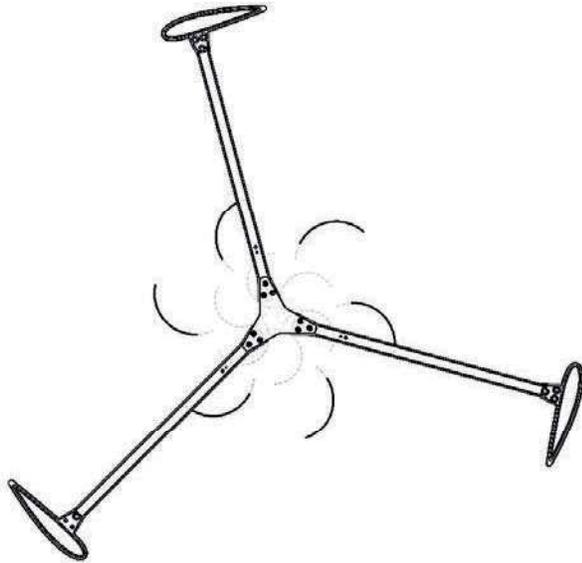


Figura 12. Perfil NACA 2415 para el rotor Darrieus y rotor Darrieus

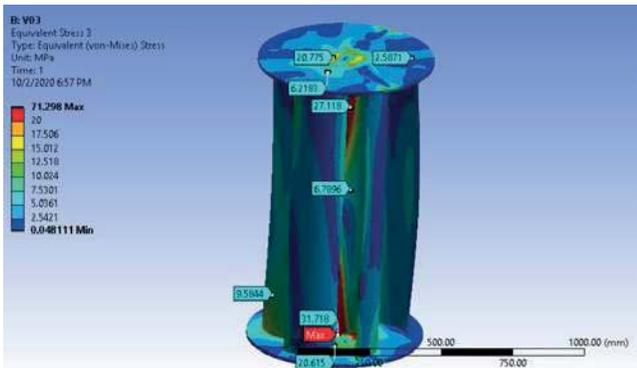


Figura 13. Esfuerzo Von Mises máximo de rotor Savonius, 71.29 Mpa

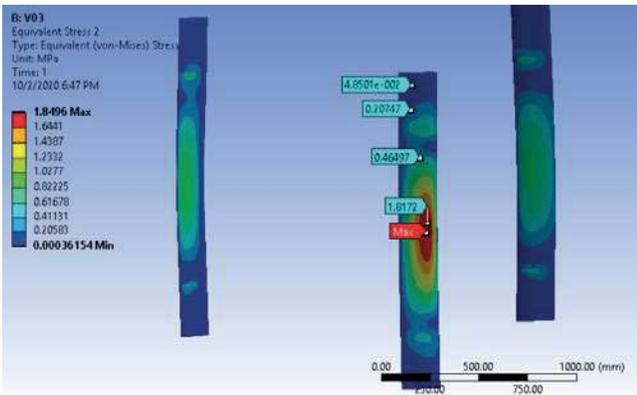


Figura 14. Esfuerzo Von Mises máximo de aspa rotor Darrieus, 1.84 Mpa.

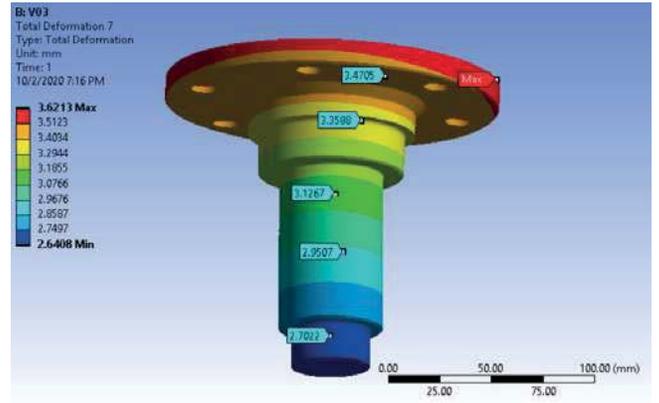


Figura 15. Desplazamiento de flecha principal, 3.62 mm.

Especificación, selección y adquisición de componentes y sistemas comerciales de la turbina

Se requiere realizar la especificación, selección y adquisición de componentes y sistemas comerciales y la adquisición de materiales y consumibles para la fabricación de componentes de diseño propio.

Dentro de los componentes comerciales se encuentran: 1) tren de potencia (bandas, poleas, rodamientos, etc.), 2) sistema de conversión de energía eléctrica (generador eléctrico, inversor y transformador) y 3) instrumentación. Dentro de las componentes de diseño propio se encuentran: 1) componentes estructurales; torre, chasis, flechas, bridas, soportería, etc.), 2) rotor Darrieus, que incluye modelo maestro, molde y herramientas, 3) rotor Savonius, 4) sistema de transmisión de potencia y 5) tornillería.

Fabricación de la turbina

Para la fabricación de todos los componentes de la turbina, esta se divide en 8 grupos principales:

1. Fabricación del modelo maestro y molde para manufacturar las aspas Darrieus (Figura 19). Para el modelo maestro se utilizó la técnica de apilamiento de maderas mdf y mecanizado de las superficies aerodinámicas mediante máquina CNC. El molde se fabricó de polímero reforzado con fibra de vidrio mediante el proceso de transferencia de resina asistida por bolsa de vacío (VARTM).
2. Fabricación de aspas del rotor Darrieus (Figura 20). Estas aspas se fabricaron de polímero reforzado con fibra de vidrio mediante el proceso VARTM y pintadas con pintura de poliuretano.
3. Fabricación de aspas del rotor Savonius (Figura 21). Los alabes de este rotor son de lámina de aluminio y requirieron de un proceso de doblado y de unión por soldadura.

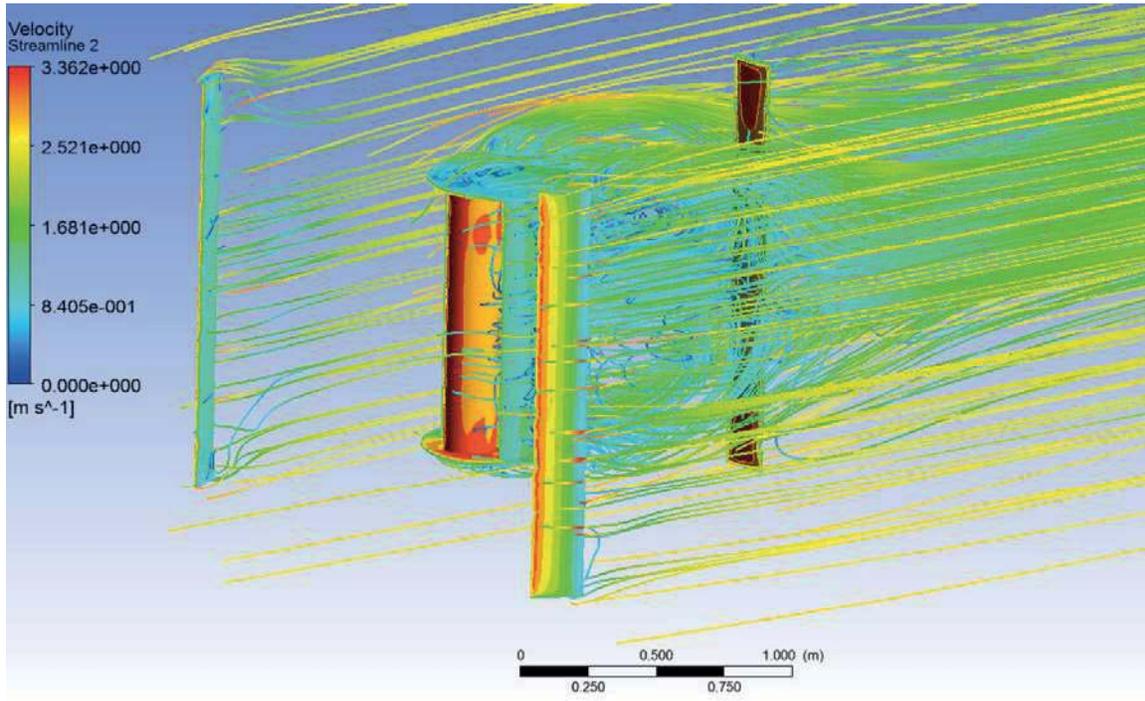


Figura 16. Líneas de corriente de velocidad sobre rotor híbrido

EDICIÓN DIGITAL

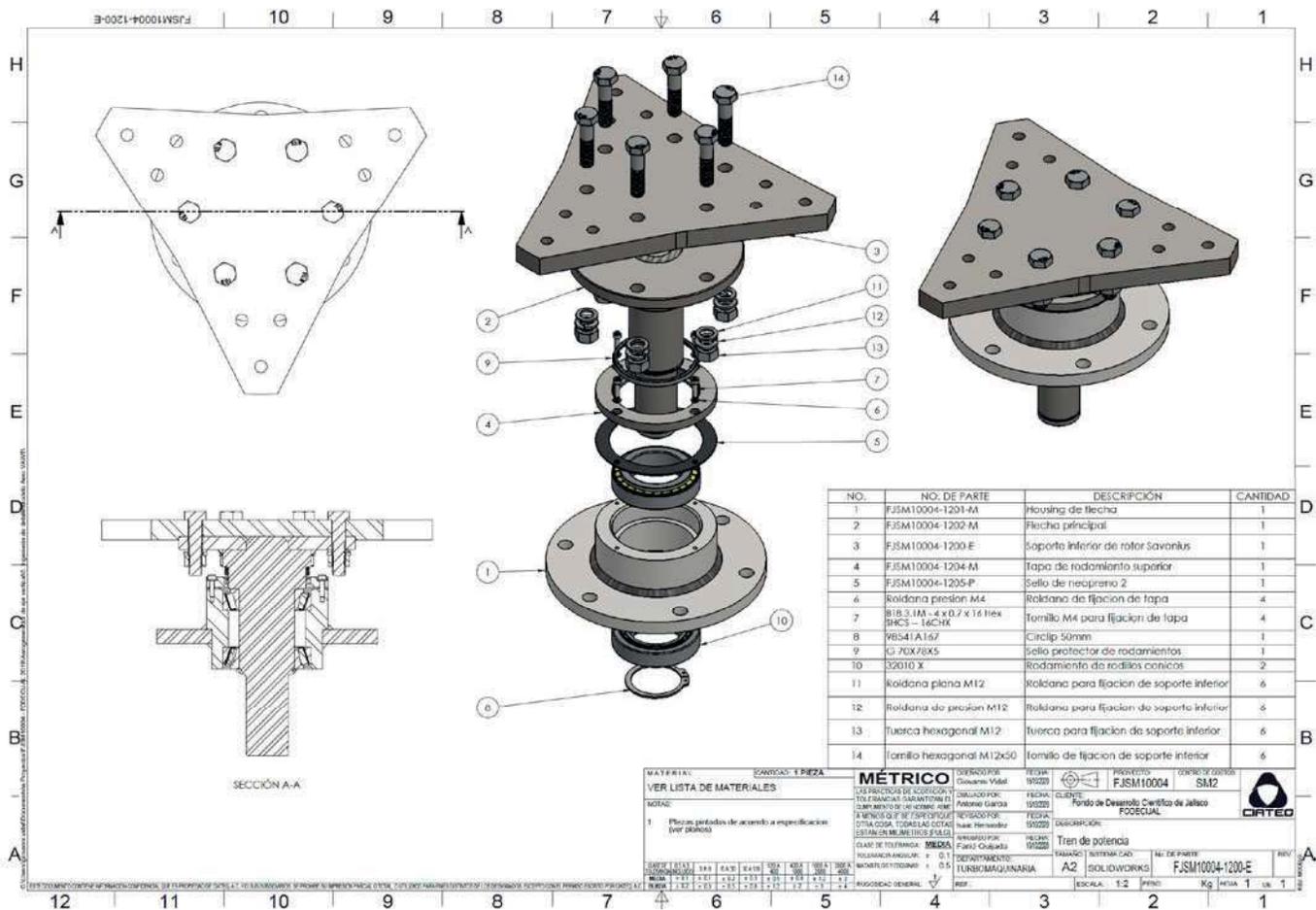


Figura 17. Plano del ensamble del tren de potencia

ISSN 2448-5837

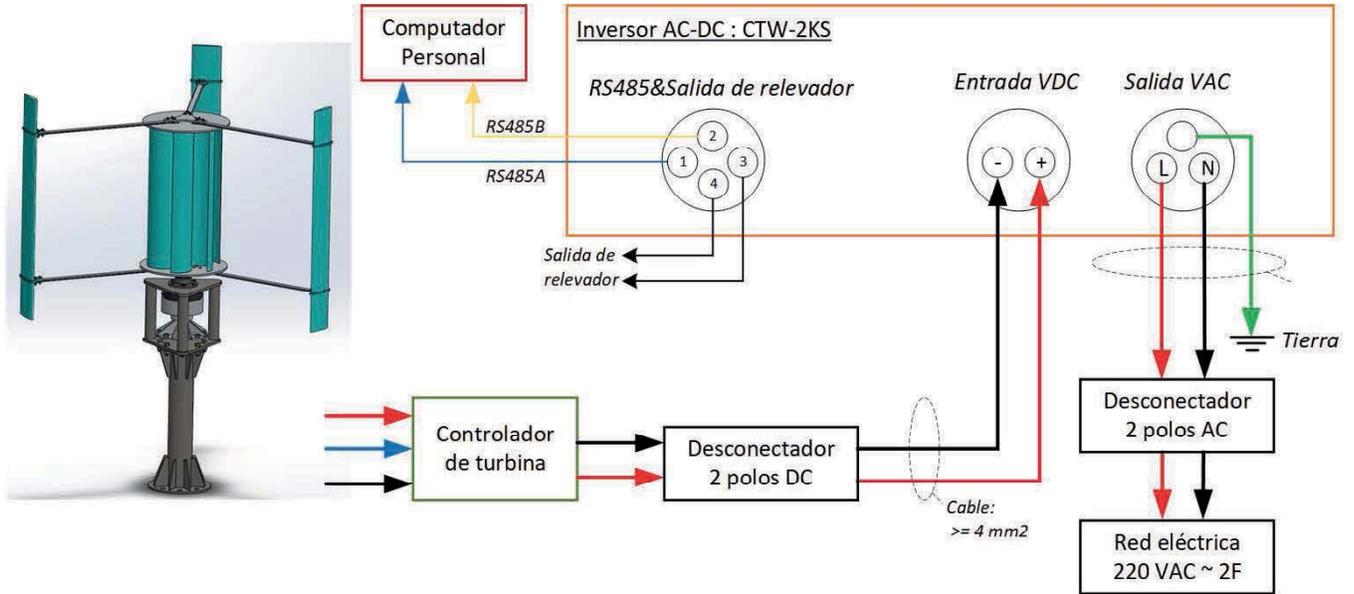


Figura 18. Diagrama de conexión eléctrica del inversor a la red

4. Fabricación de la torre (Figura 22), fue fabricada en acero al carbono mediante procesos de mecano-soldado.
5. Fabricación de los componentes del tren de potencia (Figura 23). Se utilizó maquinado CNC para la fabricación de flechas y maquinado convencional para bujes y chaveteros, estas piezas fueron pavonadas para resistir la corrosión.
6. Fabricación de la soportería de la turbina (Figura 24), se utilizaron métodos de manufactura de mecano-soldado.
7. Fabricación de los brazos de sujeción del rotor híbrido Savonius-Darrieus, son de aluminio y se mecanizaron con métodos convencionales de arranque de viruta.
8. Fabricación del soporte-chasis para instalación de torre del aerogenerador insitu (Figura 25). Se construyó un chasistipo zapata de concreto.

nicos necesarios, también se realizó la conexión eléctrica y de comunicación entre el generador eléctrico, el controlador y el inversor (ver de la Figura 26 a la Figura 29). Se hizo el desensamblado y las componentes se pintaron y se trasladaron al lugar de la instalación.



Figura 20. Aspas del rotor Darrieus



Figura 19. Fabricación del molde para las aspas Darrieus

Ensamble de la turbina

Se realizó un ensamble preliminar de la turbina en piso para verificar el ensamble completo y realizar los ajustes mecá-



Figura 21. Rotor Savonius



Figura 22. Torre de la turbina



Figura 23. Flecha principal del tren de potencia



Figura 24. Soportería para los rotores Savonius y Darrieus



Figura 25. Soporte-chasis para la instalación del aerogenerador

Instalación de la turbina

La turbina de eje vertical se instaló en la azotea del edificio de Energías Renovables de CIATEQ Unidad Jalisco, se utilizó la siguiente secuencia de montaje: el primer paso en la instalación es la adecuación de las zapatas de concreto para montar la torre y realizar la nivelación con contratuercas, el siguiente paso es montar la estructura principal del soporte del generador eléctrico y a su vez el generador (Figura 30), posteriormente se monta el rotor Savonius, en este paso se fijan los brazos del rotor Darrieus tanto los superiores como los inferiores, el siguiente paso es ensamblar el tren de potencia con el subensamble del rotor Savonius-Darrieus (Figura 31). Después se montan las aspas del rotor Darrieus (Figura 32), la conexión mecánica del generador eléctrico con los dos rotores y por último la conexión eléctrica del generador eléctrico al convertidor y de comunicación (Figura 33).



Figura 26. Componentes de comerciales y fabricadas de la turbina

Pruebas de pre-arranque de la turbina

En las pruebas de pre-arranque se realiza la prueba de giro del rotor para determinar la velocidad y torque de arranque de la turbina y la prueba para verificar la conexión eléctrica entre el generador, el controlador y el inversor. La velocidad de arranque en la flecha principal de la turbina con el tren de potencia desacoplado fue 4 m/s, mientras que la velocidad

con el sistema acoplado fue de 7 m/s, por otra parte, el torque de arranque en la flecha principal sin el acoplamiento fue de 2Nm, mientras que para la flecha principal con acoplamiento fue de 6 Nm, esto implica un par de arranque de 3 Nm sobre la flecha del generador eléctrico. Los valores de diseño son de 3 m/s (sobre la flecha principal) y 0.5 Nm (sobre la flecha del generador), respectivamente.



Figura 27. Ensamble del tren de potencia



Figura 29. Ensamble final de la turbina de eje vertical



Figura 28. Ensamble preliminar de rotor Savonius sobre estructura principal



Figura 30. Montaje de la torre y el generador eléctrico



Figura 31. Montaje del tren de potencia



Figura 33. Conexión eléctrica y de comunicación de la turbina

Como puede observarse, los valores obtenidos en estas pruebas de prearranque son de mayores a los valores de diseño, se procede a realizar algunas implementaciones para incrementar el par aerodinámico de la turbina y por ende incremental el par en la flecha del generador eléctrico.

Implementaciones para mejorar el par aerodinámico de la turbina

Para incrementar el par aerodinámico de la turbina, se realizan las siguientes implementaciones:

- Alerones curvos en el rotor Savonius.
- Perfiles asimétricos y mayor longitud de cuerda en las aspas del rotor Darrieus.
- Reducción de la relación de transmisión por bandas a 1:1.
- Incremento de altura de la torre.
- Acoplamiento directo entre la flecha principal y el generador eléctrico.

La Figura 34 muestra la turbina en su versión original (V.0). La Figura 35 muestra la turbina (V.1) con alerones curvos en el rotor Savonius, con perfiles asimétricos y una longitud de cuerda mayor en las aspas del rotor Darrieus, con una altura mayor de la torre y la reducción de relación de transmisión 1:1. La Figura 36 muestra la turbina (V.2) con acoplamiento directo entre la flecha principal y el generador eléctrico. Con estas implementaciones, se logró alcanzar una velocidad de arranque de 3.3 m/s y un par de arranque de 2.5 Nm.

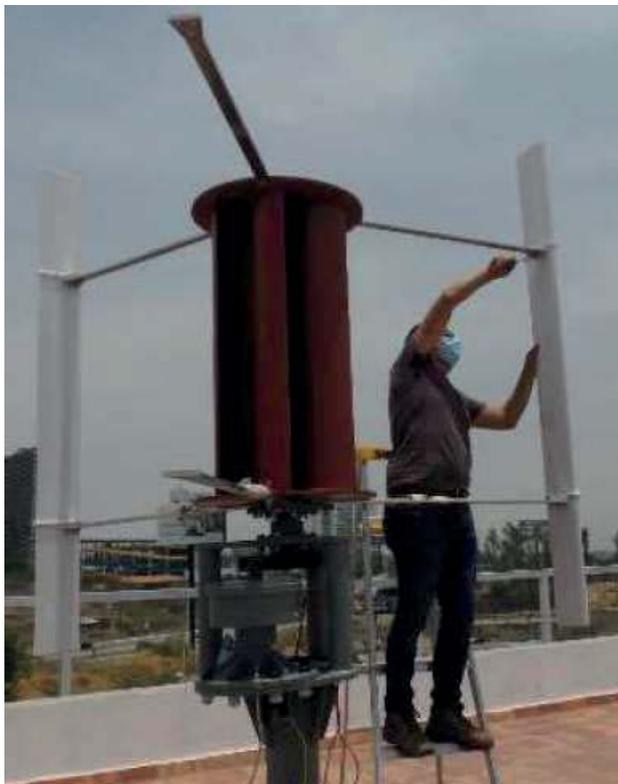


Figura 32. Montaje del rotor Savonius y Darrieus

La Tabla 1 muestra un resumen de los parámetros para las diferentes versiones de la turbina.

Tabla 1. Resumen de los parámetros de la turbina con implementaciones para mejorar el desempeño

Parámetro	Diseño	Turbina V.0	Turbina V.1	Turbina V.2
Velocidad de arranque (m/s)	3.0	7	4.8	3.3
Par de arranque (Nm)	2.93	6	3.5	2.5

Pruebas de desempeño de la turbina

Con respecto a la prueba de desempeño, se determina la curva de potencia (Figura 37), para esta prueba 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 producida.



Figura 34. Turbina en su versión original



Figura 35. Turbina en su versión V.1



Figura 36. Turbina en su versión V.2

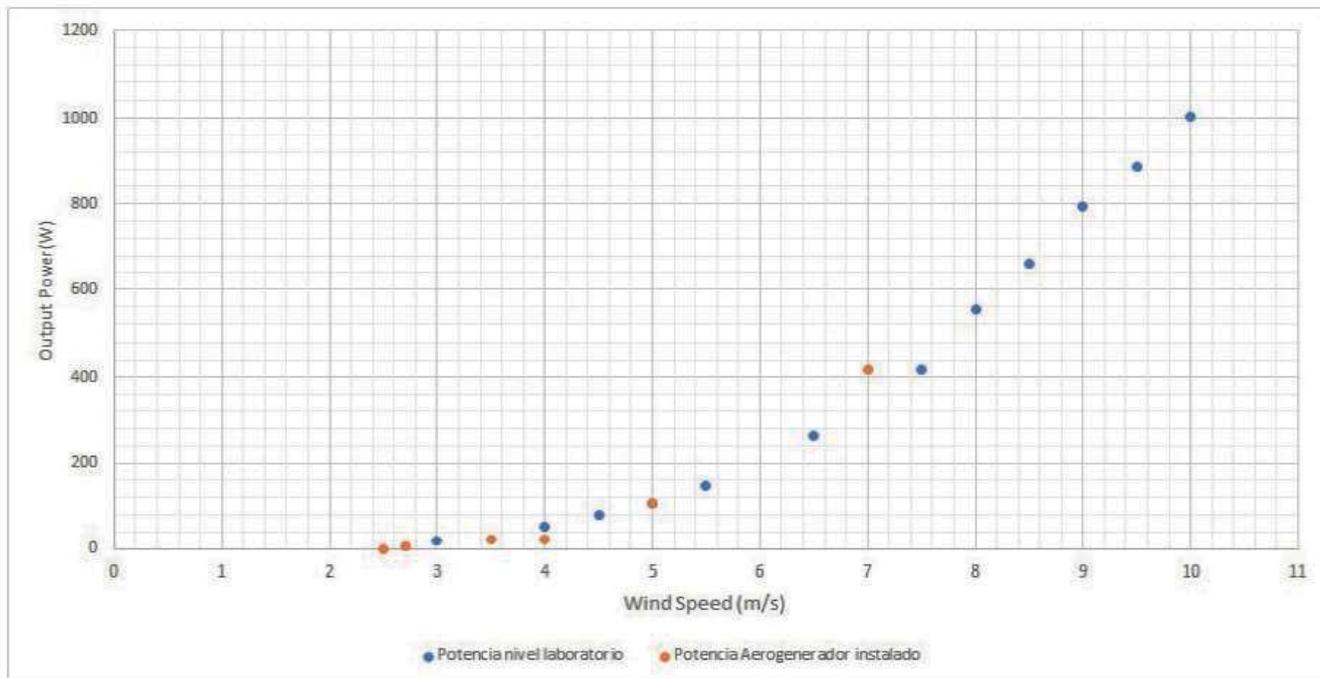


Figura 37. Curva de potencia de la turbina

Con los parámetros obtenidos, se logra una fácil comparación entre los aerogeneradores comerciales o de diseño propio, esto debido a sus valores de EAP (Energía Anual Producida). Este parámetro es de vital importancia ya que es necesario para realizar inversiones futuras.

Para el caso del monitoreo de datos de parámetros eléctricos, se utiliza un monitor de energía comercial, este sistema adquiere los datos capturados por un transformador de corriente alterna y un sensor de voltaje, en este caso se capturan datos cada 10 segundos y se obtiene el valor de potencia eléctrica, que es resultado de la generación eléctrica del generador de 1 kW. De igual forma, el monitor de energía genera los datos de medición de potencia eléctrica en una base de datos que es utilizada para correlacionar los valores de velocidad de viento y la potencia eléctrica generada. Finalmente, el sistema de adquisición proporciona información respecto a la velocidad de viento y potencia eléctrica generada, que son base del cálculo de la curva de potencia de un aerogenerador. Para el caso particular, los datos muestran una buena correlación entre los valores de diseño 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

- De acuerdo con los análisis CFD se concluyó que el mejor lugar para instalar la turbina fue en CIATEQ Jalisco porque presentó el mejor recurso eólico disponible y aprovechable.

- La implementación de una topología híbrida, por ejemplo, Savonius-Darrieus; permite arrancar a velocidades menores (>3 m/s), sin embargo, uno de los rotores puede desarrollar un frenado aerodinámico al otro rotor en velocidades superiores (>6 m/s). La potencia máxima registrada fue de 400W a 7 m/s.
- En la fase del desarrollo de un prototipo, es imprescindible ensayar la turbina en un lugar donde se desarrollan todas las magnitudes de vientos de la curva de potencia teórica, por ejemplo; para esta turbina la curva de potencia teórica va de los 3m/s a los 10 m/s, mientras que en las pruebas se trabajó en un rango de los 3 m/s a 7 m/s, lo que provocó que hubiera una concentración de datos a bajas velocidades y sin datos en velocidades cercanas a la velocidad nominal (10 m/s).
- La implementación de una multiplicadora aumenta la velocidad de giro de la flecha del generador eléctrico, sin embargo, reduce el par aerodinámico que produce la turbina, esto según la relación de multiplicación, que para este caso es 1:2, esto significa que, con este sistema, la flecha del generador eléctrico solo recibe la mitad del par aerodinámico que produce la turbina, por lo que se eliminó este sistema.
- Un área de oportunidad para investigaciones futuras es el desarrollo de un generador eléctrico para bajas velocidades, ya que el que se implementó tiene una velocidad de arranque de 3 m/s pero con una producción de energía eléctrica nominal a 10 m/s, lo que podría significar poca producción de energía eléctrica.

Agradecimientos

Este trabajo es parte de las actividades del proyecto “Diseño y desarrollo de turbina eólica de eje vertical para ambientes urbanos” que se desarrolla en el Fondo de Desarrollo Científico de Jalisco (FODECIJAL) para atender problemas Estatales 2019 del Consejo Estatal de Ciencia y Tecnología de Jalisco (COECYTJAL).

Referencias bibliográficas

- [1] Bianchini, A., Ferrara, G., & Ferrari, L. (2015). *Design guidelines for HDarrieus wind turbines: Optimization of the annual energy yield*. Energy Conversion and Management, 89, 690-707.
- [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] Yusof, A., & Mohamed, M. R. (2020). *Vertical Axis Wind Turbines: An Overview*. In InECCE2019 (pp. 821-835). Springer, Singapore.
- [5] Edition, S., 2013. *Wind and solar power systems: design, analysis, and operation*. Choice Rev. Online, 43(06), pp.43-3410.
- [6] Jacob, J., & Chatterjee, D. (2019). *Design methodology of hybrid turbine towards better extraction of wind energy*. Renewable Energy, 131, 625-643.
- [7] Gipe, Paul (2009). *Wind Energy Basics Revised: A Guide to Home and Community-scale Wind Energy Systems*. 2nd edition. Chelsea Green Publishing. U.S.A.
- [8] SENER; “*Prospectiva de Energías Renovables 2012-2026*”; México 2012.
- [9] Li, Y. (2019). *Straight-bladed vertical axis wind turbines: history, performance, and applications*. In Rotating Machinery. IntechOpen.
- [10] Li, C., Xiao, Y., Xu, Y. L., Peng, Y. X., Hu, G., & Zhu, S. (2018). *Optimization of blade pitch in Hrotor vertical axis wind turbines through computational fluid dynamics simulations*. Applied Energy, 212, 1107-1125
- [11] Dominy, R., Lunt, P., Bickerdyke, A., & Dominy, J. (2007). *Selfstarting capability of a Darrieus turbine*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 221(1), 111-120.
- [12] Chinchilla, R., Guccione, S., & Tillman, J. (2011). *Wind power technologies: a need for research and development in improving VAWT's airfoil characteristics*. Journal of Industrial Technology.
- [13] Islam, M., Ahmed, F. U., Ting, D. S., & Fartaj, A. (2008). *Design analysis of fixed-pitch straightbladed vertical axis wind turbines with an alternative material*. Retrieved May, 5, 2010
- [14] Tangler, J. (2000). *The evolution of rotor and blade design (No. NREL/CP-500-28410)*. National Renewable Energy Lab., Golden, CO (US).