

Estudio experimental de una turbina de viento sin aspas bio-inspirada en cactus columnares

Experimental Investigation of a Columnar Cactus-Inspired Bladeless Wind Turbine

Hernández-Arriaga Isaac^{a*}, Muñoz-Hernández Guillermo^b, Mejía-Hernández Guillermo Eduardo^a, Real-Enciso Christian Adrian^c, Arteaga-Ferruzca Natalia Jocelyn^d

^aDepartamento de Metal Mecánica, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Querétaro, Av. Tecnológico s/n esq. Gral. Mariano Escobedo, Colonia Centro Histórico, Querétaro, C.P. 76000, México.

^bCIATEQ A.C., Parque Industrial Bernardo Quintana, Av. Manantiales 23-A, El Marques, Querétaro, CP 76246, México.

^cEstudiantes de la carrera de Ingeniería Mecatrónica del Instituto Tecnológico de Querétaro.

*isaac.ha@queretaro.tecnm.mx,

Resumen

En esta investigación se presenta el estudio aerodinámico de un prototipo escalado de una turbina de viento sin aspas con un mástil bio-inspirado en los cactus columnares. Se estudiaron las vibraciones inducidas por vórtices (VIV) mediante el valor eficaz RMS de las micro-deformaciones registradas en una celda de carga. Se evaluaron las geometrías de cactus columnares de 5, 6 y 7 costillas y se compararon con un mástil cilíndrico de referencia. La manufactura y ensamble de los prototipos se realizaron mediante un control estricto para asegurar que las diferencias en los desempeños aerodinámicos se debieran únicamente a factores aerodinámicos y no estructurales. Para corroborar esto, se midieron las frecuencias naturales de todos los prototipos con una diferencia menor al 2%. Los resultados mostraron que todas las geometrías de cactus presentan mayores VIV que el mástil cilíndrico, lo que significa un mejor desempeño, por ejemplo; para una velocidad de viento de prueba de 6 m/s, el cactus de 5 costillas presentó hasta 3 veces más VIV mientras que el cactus de 6 costillas 2 veces más y el cactus de 7 costillas 2.5 veces más. Se realizó un análisis estadístico de los datos experimentales mediante el coeficiente de variación (CV) y un ajuste matemático con resultados aceptables. Este estudio demuestra que la implementación de un mástil bio-inspirado mejora el desempeño aerodinámico de este tipo de turbinas, al tratarse de geometrías con generadores de vórtices que promueven las VIV y mejoran la sincronización del desprendimiento de vórtices.

Abstract

This research presents an aerodynamic study of a scaled prototype of a bladeless wind turbine with a columnar cacti bioinspired mast. Vortex-induced vibrations (VIV) were studied using the root mean square (RMS) value of the micro-strain recorded by a "load cell". Three cactus geometries with 5, 6, and 7 ribs were evaluated and compared with a cylindrical reference mast. The manufacturing and assembly of the prototypes were carried out under rigorous control to ensure that differences in their aerodynamic performance were due solely to aerodynamic factors rather than structural factors; to verify this, the natural frequencies of all prototypes were measured with a difference of less than 2%. The results showed that all cactus geometries exhibit higher VIV values than the cylindrical mast, indicating better performance. For example, at a test wind speed of 6 m/s, the 5-rib cactus exhibits up to 3 times higher VIV, while the 6-rib cactus exhibits 2 times higher and the 7-rib cactus 2.5 times higher. A statistical analysis of the experimental data was performed using the coefficient of variation (CV) and a mathematical fit, with acceptable results. This study demonstrates that the implementation of a bio-inspired mast improves the aerodynamic performance of this type of turbine, as these geometries feature vortex generators that promote VIV and improve the synchronization of vortex shedding.

Palabras clave:

Turbina de viento sin aspas, Vibraciones Inducidas por Vórtices, Generadores de Vórtices, Diseño bio-inspirado

Keywords:

Bladeless wind turbine, vortex-induced vibrations, vortex generators, bio-inspired design

Introducción

Actualmente, uno de los principales problemas que enfrenta la humanidad es el incremento en la concentración global de gases de efecto invernadero (GEI), asociado principalmente a la combustión de compuestos basados en carbono para satisfacer la demanda energética, particularmente en los sectores de generación eléctrica y transporte [1]. En México, esta problemática es especialmente relevante debido a la alta dependencia de combustibles fósiles, principalmente gas natural [2]. Ante esta

situación, se han desarrollado diversas tecnologías para la generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables, entre las que destacan la energía solar, eólica e hidráulica, debido a su creciente capacidad instalada y contribución a la transición energética global [3].

Una de las principales ventajas de la energía solar fotovoltaica es la ausencia de partes móviles, lo que permite sistemas relativamente económicos y de bajo manteni-

miento. Sin embargo, su aprovechamiento efectivo se limita a las horas de irradiación solar, con densidades energéticas típicas del orden de 150–250 W/m² y eficiencias comerciales cercanas al 20–23%, dependiendo de las condiciones operativas [4]. Por otra parte, la energía eólica de gran escala requiere una elevada inversión económica para su construcción, transporte e instalación, además de extensas áreas de operación. Asimismo, puede generar ruido y efectos ambientales asociados a la interacción con aves migratorias [5]. Adicionalmente, las turbinas eólicas convencionales incorporan componentes rotatorios, tales como; rotor, caja de engranes y rodamientos, lo que incrementa los costos de operación y mantenimiento. A esto se suma que muchas turbinas comerciales presentan velocidades nominales de operación superiores a 8 m/s, lo que limita su aprovechamiento en regiones con velocidades de viento moderadas y bajas [6].

Una tecnología innovadora que puede hacer frente a estas desventajas de ambas energías son las turbinas eólicas sin aspas que operan con el principio de vibraciones inducidas por vórtices (VIV), algunas de las características más importantes de estas turbinas son [7-8]; 1) no tienen partes rotatorias, lo que reduce considerablemente las fallas de las máquinas aumentando su confiabilidad y vida útil, 2) operan a velocidades de viento bajas, a partir de 2 m/s y hasta 10 m/s, lo que permite aplicaciones para la pequeña escala y autoconsumo (entornos urbanos), 3) su costo representa cerca del 10%-20% con respecto a las turbinas eólicas convencionales de eje horizontal y vertical, 4) no requieren de mucho espacio para su instalación y 5) no son ruidosas, tienen bajo impacto ambiental y no comprometen la vida de las aves por impactos.

El principio de funcionamiento de las turbinas de viento sin aspas se basa en el fenómeno de resonancia aeroelástica [9], ya que existe una transferencia de energía de un fluido a una estructura que se deforma elásticamente. Para que se presente la resonancia aeroelástica debe coincidir la frecuencia natural de la turbina (f_n) con la frecuencia de desprendimiento de vórtices (f_v), el rango de velocidades donde se da este fenómeno de resonancia se le conoce como “rango de bloqueo” (lock-in). El desprendimiento de vórtices se desarrolla cuando se hace pasar un fluido por una estructura, por lo regular de sección transversal circular, con el paso del fluido se desarrollan vórtices o remolinos que producen fuerzas de sustentación que son perpendiculares a la dirección del viento y fuerzas de arrastre que se desarrollan en la dirección del viento. Las fuerzas de sustentación producen oscilaciones laterales sobre la estructura a la misma frecuencia del desprendimiento de vórtices, esta frecuencia es directamente proporcional a la velocidad del viento. De esta manera, las oscilaciones son convertidas en energía por medio de un generador eléctrico, por ejemplo; con el principio de inducción electromagnética.

Para optimizar el desempeño de las turbinas de viento sin aspas VIV, se puede implementar alguno de los siguientes métodos o alguna combinación entre ellos; y que se enfocan en maximizar el fenómeno de bloqueo o resonancia aeroelástica y por consiguiente en la producción de energía; 1) optimización geométrica y materiales de los componentes principales de la turbina [10-16], p. ej. diámetro, longitud y material del mástil y de la viga flexible, 2) optimización aerodinámica mediante generadores de vórtices en el mástil [17-21] y 3) optimización durante la operación de la turbina mediante la implementación de sistemas de sintonización para operar bajo la condición de resonancia aeroelástica [9, 22-27]. La presente investigación se relaciona al método de optimización aerodinámica mediante generadores de vórtices.

Metodología

El mástil tipo cactus columnar que se pretende implementar en la turbina eólica sin aspas VIV es montado en el extremo libre de una viga flexible que se encuentra empotrada en su otro extremo en el piso (ver Figura 1). La viga flexible es sólida de sección circular de polímero reforzado con fibra de vidrio o de carbono.

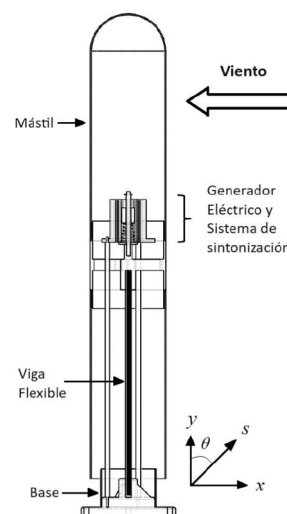


Figura 1. Turbina de viento sin aspas [28].

La metodología de la presente investigación comienza con una breve descripción de la morfología de los cactus columnares, donde se resalta que su geometría beneficia el enfriamiento del cactus cuando se generan vórtices de corriente de aire mediante la forma de sus costillas y que permite establecer la siguiente hipótesis de trabajo “La incorporación de una geometría transversal inspirada en los cactus columnares altera los mecanismos de separación de la capa límite y de la formación de vórtices, promoviendo la aparición de desprendimientos de vórtices más organizados y una condición de sincronización aerodinámica (lock-in) más favorable con respecto a la frecuencia natural de la turbina. Este fenómeno genera mayores diferencias instantáneas de presión sobre la superficie del mástil, aumentando las fuerzas de sustenta-

ción responsables de las vibraciones inducidas por vórtices (VIV) y, por ende, una mayor captación de energía mecánica del flujo incidente". Se presenta el diseño del prototipo escalado de la turbina con un mástil cilíndrico. Luego, se presenta el diseño de una celda de carga que permite medir las VIV de los diferentes prototipos por medio de galgas extensiométricas y el diseño de una montadura para fijar la celda de carga y aislar las vibraciones de los prototipos con el túnel de viento. Seguido, se presenta el diseño de los prototipos con geometría tipo cactus columnar, este diseño comprende la obtención de las secciones transversales de los cactus y su modelado CAD incluyendo los detalles para su ensamble. Posterior a este diseño, se presenta la fabricación y ensamble de los cuatro prototipos, así como la medición de su masa. Posteriormente, se presenta la preparación del túnel de viento que comprende el montaje del ensamble mástil-viga flexible-celda de carga, la definición del rango de velocidades de viento de prueba y las características de la instrumentación a utilizar. Por último, se presenta la configuración de las pruebas a realizar comprendiendo dos grupos, el primer grupo permite determinar la frecuencia natural de los prototipos y el segundo grupo de pruebas se enfocan en determinar el desempeño aerodinámico de los prototipos. Los resultados de las pruebas, su análisis y las conclusiones de la investigación se presentan en la parte final del artículo.

Morfología de los cactus columnares

Los cactus columnares pertenecen a la subfamilia "Cactoideae" dentro de la familia de las "Cactáceas" que se caracterizan por no presentar hojas ni gloquidias. La distribución de las cactáceas columnares se circunscribe a las regiones tropicales y subtropicales del continente americano, incluyendo reservorios importantes de diversidad en Brasil, México y Perú [29]. Las características principales de los cactus columnares son [30]; tallo alargado, cilíndrico y denso, tienen costillas verticales en forma de "V". El número de costillas puede variar, por ejemplo, de cinco a siete. Pueden medir pocos centímetros y hasta varios metros de altura.

Las costillas verticales de los cactus columnares cumplen varias funciones importantes, de las que destacan; resistencia estructural [31], almacenamiento de agua y regulación de la temperatura [32]. Las costillas, que son crestas longitudinales en el tallo, ayudan a que el cactus sea más resistente a la flexión y al viento, especialmente en climas áridos. Además, estas costillas permiten que el cactus se expanda y contraiga al absorber y liberar agua, lo que es crucial para su supervivencia en ambientes secos. Por último, la forma de las costillas crea una superficie que ayuda a reducir la cantidad de luz solar que incide directamente en el tallo y cuando incide el viento crean patrones de flujo de aire turbulentos que reducen la temperatura del cactus. En esta investigación se trabajó con

la geometría del cactus llamado "chilayo", "cactus órgano" o "jarritos" (*Lophocereus marginatus*), debido a que este cactus se distribuye principalmente en la zona centro de México. El cactus chilayo es una planta mexicana de entre 3 a 5 metros de altura, tallo recto verde oscuro de 8 a 15 centímetros de diámetro y tiene de 5 a 7 costillas verticales prominentes [33].

Diseño del prototipo con mástil cilíndrico

El primer paso para la realización de los estudios experimentales fue el dimensionamiento del prototipo escalado de la turbina de viento sin aspas. En estos estudios solo se considera el análisis del mástil ya que es el componente encargado de la captación de energía del viento. Se trata de un mástil cilíndrico recto de diámetro nominal de 28 mm acoplado en el extremo libre de una viga flexible de polímero reforzado con fibra de vidrio ($EI=29\text{GPa}$ [módulo de Young 0°], $\rho=2,100\text{ kg/m}^3$) de 5 mm de diámetro y 160 mm de longitud efectiva. El otro extremo de la viga flexible está montado a una celda de carga de diseño propio que a su vez se fija a la montadura que se ubica en el área de prueba del túnel de viento. Se considera una longitud de 20 mm para cada extremo de la viga flexible para la fijación con el mástil y con la celda de carga. El mástil es hueco con un espesor de aproximadamente 3 mm, sin embargo, cuenta con un núcleo sólido para conectarse con la viga flexible. Este núcleo sirve también para ajustar la masa del prototipo, de tal manera que todos los prototipos tengan la misma masa y las variaciones de las VIV solo se deban a efectos aerodinámicos y no estructurales. La configuración y dimensiones del prototipo escalado de la turbina con mástil cilíndrico se muestran en la Figura 2.

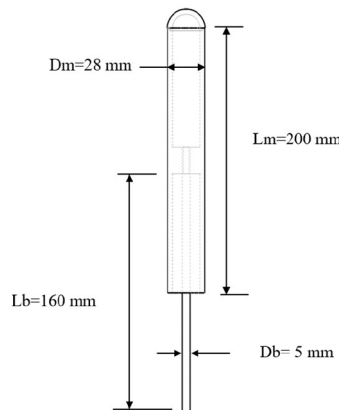


Figura 2. Dimensiones del prototipo escalado de la turbina con mástil cilíndrico.

Estas dimensiones son similares a los prototipos presentados en los trabajos [13] y [34]. Esto en función de las capacidades del túnel de viento y con el fin de realizar estudios experimentales comparativos en un futuro. La optimización aerodinámica de la turbina de viento sin aspas se centra en la sección transversal del mástil, donde las características geométricas de los cactus tipo columnar pueden facilitar la generación y la sincronización del

desprendimiento de vórtices, promoviendo las VIV y por consiguiente generar mayor potencia.

Diseño de la celda de carga

La celda de carga es una viga tipo “I”, donde su lado estrecho está alineado al plano de oscilación principal, de tal manera que puedan registrarse las micro-deformaciones a lo largo de su longitud debido a su flexión. La celda está instrumentada sobre su “alma” con dos galgas extensiométricas, una en cada lado, de tal manera que miden las micro-deformaciones ($\mu\epsilon$ o 1×10^{-6} m/m) o cambios de voltaje (m V/V) en ambos lados (tensión y compresión). Estas galgas son ubicadas lo más cercano posible a la parte inferior de la celda de carga donde se desarrollan las deflexiones máximas, por ser las regiones más alejadas del mástil donde se inducen las fuerzas del viento. Esto maximiza la señal producida por las galgas extensiométricas.

Se utilizó una configuración de medio puente de Wheatstone para medir la micro-deformación asociada a flexión pura en el alma de la celda. El arreglo está constituido por dos galgas extensiométricas uniaxiales, orientadas en la misma dirección de medición y colocadas en caras opuestas de la sección, de manera que durante la flexión una galga experimenta micro-deformación a tensión y la otra a compresión. Al conectarse adecuadamente en el medio puente, ambas contribuciones se suman en la señal de salida, mientras que las deformaciones comunes a ambas galgas, como las producidas por cargas axiales uniformes y variaciones térmicas, tienden a cancelarse. Esta configuración permite, por tanto, incrementar la sensibilidad a la flexión y aislar su contribución respecto de otros componentes de deformación.

Estas micro-deformaciones registradas por las galgas extensiométricas se relacionan a las fuerzas inducidas por el viento sobre el mástil mediante las ecuaciones de la mecánica de materiales, aerodinámica y de vibraciones mecánicas. Es importante mencionar que este estudio no se enfoca en determinar con precisión la magnitud de estas fuerzas inducidas por el viento, si no cuantificar la variación de estas fuerzas debido a las diferentes geometrías de los mástiles tipo cactus columnar, esto a través de la medición de la micro-deformación en la celda de carga. Se utilizó un sistema de adquisición de datos para monitorear en tiempo real estas micro-deformaciones en la celda de carga y la velocidad del viento. El diseño de esta celda de carga influye en la dinámica del prototipo en términos de la frecuencia natural resultante al agregar masa al sistema, sin embargo, tiene poco efecto en los coeficientes aerodinámicos, fuerzas de sustentación y desplazamientos laterales del mástil.

La celda de carga se fijó a la montadura mediante un mandril de boquilla tipo ER auto-bloqueante que no se afloja durante las pruebas debido a las vibraciones mecánicas

inducidas. Esta montadura tiene una rigidez alta comparada con el ensamble mástil-viga flexible-celda de carga, de tal manera que no introduzca ruido en la medición. A su vez esta montadura cuenta con amortiguadores tipo “tacón” para no transferir vibraciones del túnel de viento al ensamble y viceversa. La Figura 3 muestra el ensamble de la celda de carga con la viga flexible y el mástil sobre la montadura.

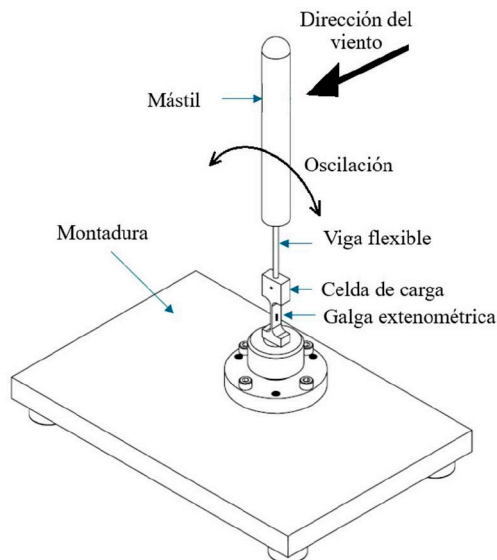


Figura 3. Ensamble de la celda de carga con la viga flexible y el mástil sobre la montadura.

Para la medición de las micro-deformaciones se utilizaron galgas extensiométricas modelo CEA-06-240UZ-120, conectadas a un sistema de adquisición de datos Micro-Measurements MM01-120. Las señales se registraron a una frecuencia de muestreo de 80 Hz, equivalente a 80 muestras por segundo, suficiente para caracterizar adecuadamente la respuesta dinámica analizada en el presente estudio. El sistema permite registrar las señales en unidades de micro-deformación ($\mu\epsilon$) y mV/V. Finalmente, los datos experimentales se almacenaron en formato *.CSV en una unidad de memoria USB para su posterior procesamiento y análisis.

Diseño de los prototipos de mástil tipo cactus columnar

Para ampliar el estudio y demostrar la hipótesis de trabajo, se sometieron a prueba tres prototipos con geometría tipo cactus y adicionalmente se consideró el prototipo mástil cilíndrico con fines comparativos. Los prototipos tienen una forma geométrica tipo cactus columnar de 5, 6 y 7 costillas, también con un diámetro nominal de 28 mm. El proceso para determinar las geometrías de los cactus fue el siguiente; se realizó un corte transversal de cada uno de los cactus columnares con diferentes números de costillas. Se escanearon estos segmentos en un escáner de cama plana, las imágenes generadas se insertaron en el Software SolidWorks®, donde el perfil de cada una de las geometrías de los cactus se formó mediante el comando “spline”, luego mediante el comando “arco”, el “spline” se sustituyó por líneas tipo “ar-

cos” para facilitar su procesamiento CAD y la fabricación de los prototipos. Se debe asegurar que este proceso de sustitución no afecte la geometría original del cactus. Luego, el perfil del cactus se escaló a una dimensión nominal de 28 mm de diámetro, manteniendo este diámetro entre las puntas de las costillas. Por último, se usó el comando “equidistar entidades” hacia adentro para dar espesor al cuerpo del cactus. La magnitud de este espesor permite ajustar la masa de todos los cactus debido a la variación en sus geometrías, esto desde el modelado CAD y que ayuda en el proceso de ajuste una vez fabricados los prototipos.

Fabricación de los prototipos de mástil tipo cactus columnar

Posterior al diseño de los mástiles, se procedió a su manufactura y ensamble. Estos prototipos fueron impresos mediante la técnica MDF en una impresora 3D con material ePA-CF (Nylon 6 con Fibra de Carbono). Los mástiles fueron unidos a las vigas flexible con un adhesivo epoxi grado profesional asegurando la colinealidad y la longitud efectiva de la viga flexible. Se preparó la superficie de los mástiles con pasta automotriz para cubrir las porosidades del proceso de impresión y se pintaron con primer y esmalte acrílico. La Figura 4 muestra los cuatro tipos de mástiles, de izquierda a derecha; mástil cilíndrico, mástil tipo cactus de 5 costillas, mástil tipo cactus de 6 costillas y mástil tipo cactus de 7 costillas.



Figura 4. Mástiles fabricados con impresión 3D.

Esta manufactura y ensamble de prototipos se realizó bajo controles de calidad estrictos para asegurar que las diferencias en el comportamiento de los mástiles se deban únicamente a las formas geométricas de las secciones transversales y no a efectos o variaciones en la masa o en la longitud efectiva de las vigas flexibles que podrían modificar los resultados por el cambio en sus frecuencias naturales. La Tabla 1 muestra la masa de cada uno de los prototipos. La diferencia máxima que se presenta en los prototipos es de 0.37 g entre el prototipo más ligero y más pesado, lo que representa una diferencia del 0.48%.

Tabla 1. Masa de los diferentes prototipos escalados.

Mástil	Masa (g)
Cilíndrico	76.89
Cactus 5 costillas	76.99
Cactus 6 costillas	77.26
Cactus 6 costillas	77.26

Preparación del túnel de viento

Las pruebas se realizaron en el túnel de viento modelo HM 170 de la marca G.U.N.T. Gerätebau GmbH. Es un túnel de viento abierto del tipo “Eiffel” con una sección de trabajo de 292x292 mm con una longitud de 420 mm. A través de un variador de frecuencia se puede controlar con precisión la velocidad de viento en un rango de 2.5 a 25 m/s, con una precisión de 0.1 m/s. La Figura 5.a muestra el montaje del ensamble mástil-viga flexible-celda de carga en la montadura dentro del área de prueba del túnel de viento. El mástil y la viga flexible se alinean con la celda de carga, esta celda de carga se alinea con la montadura y a su vez, la montadura con el área de trabajo del túnel. La Figura 5.b muestra el detalle de la celda de carga instrumentada con galgas extensiométricas montada en el mandril de boquilla tipo ER auto-bloqueante.

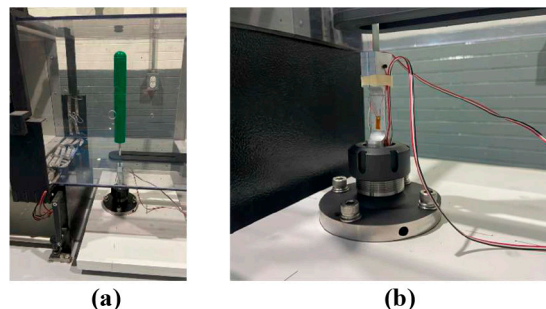


Figura 5. Túnel de viento. a) montaje del ensamble, b) detalle de la celda de carga.

El rango de velocidad de viento experimental seleccionado para las pruebas fue de 3 a 8 m/s. Esta velocidad se confirma utilizando un anemómetro de hilo caliente modelo testo 405i del fabricante Testo SE & Co. KGaA ubicado en el área de prueba aguas arriba del prototipo (ver Figura 6).



Figura 6. Anemómetro de hilo caliente para la medición de la velocidad de viento de prueba.

Configuración de las pruebas de los prototipos

Se realizaron dos grupos de pruebas a los prototipos, el primer grupo de pruebas corresponde a la medición de las frecuencias naturales y el segundo grupo corresponde a medición del desempeño aerodinámico de los prototipos.

El procedimiento para determinar la frecuencia natural de los prototipos consistió en perturbar manualmente el mástil mediante la aplicación de un desplazamiento inicial en el plano de oscilación y liberarlo posteriormente para obtener su respuesta en vibración libre sub-amortiguada, registrada mediante las galgas extensiométricas. Dentro del régimen de comportamiento lineal del sistema, la frecuencia natural obtenida es independiente de la magnitud del desplazamiento inicial aplicado, ya que este únicamente modifica la amplitud inicial de la respuesta y no la frecuencia de oscilación. Por lo tanto, pequeñas variaciones en la magnitud de la perturbación manual no afectan de manera significativa la determinación experimental de la frecuencia natural.

Con esta información se determinó el decremento logarítmico (δ) al medir dos oscilaciones adyacentes. Con este valor del decremento logarítmico se obtuvo la relación de amortiguamiento (ζ) y con esta relación se determinó la frecuencia natural amortiguada (ω_d), con ambos parámetros se determinó la frecuencia natural (ω_n). Por último, se determinó la frecuencia lineal (f_n) que está relacionada a la frecuencia natural con la constante 2π . Se realizaron tres réplicas para la medición de la frecuencia natural a cada prototipo, en total se realizaron 16 pruebas.

Se desarrolló un código en Python para determinar las frecuencias naturales con el método de decremento logarítmico. Este código toma los datos experimentales de micro-deformación, se filtra la señal para eliminar ruido de alta frecuencia (Filtro pasa-bajo Butterworth), se calcula la frecuencia de muestreo y se define la frecuencia de corte del filtro. Se detecta los máximos de vibración, se calcula el decremento logarítmico entre picos consecutivos y se usa la reducción de amplitud entre picos para calcular el amortiguamiento y la frecuencia natural.

Con respecto a las pruebas aerodinámicas de los prototipos, cada uno de los cuatro mástiles fueron evaluados a diferentes velocidades de viento de prueba, a decir; 3, 4, 5, 6, 7 y 8 m/s, con tres replicas cada una de las pruebas, es decir; se realizaron 96 pruebas en total. La duración de cada prueba fue de 300 segundos.

Las pruebas experimentales se realizaron en cuatro bloques, cada uno en un día diferente, dentro de un horario comprendido entre las 10:00 y las 14:00 h, con el propósito de mantener condiciones térmicas similares y minimizar la influencia de la temperatura sobre las mediciones. Durante las pruebas se registró una temperatura promedio de 25 ± 1 °C, correspondiente a un intervalo aproximado de 24 a 26 °C. La temperatura se monitoreó mediante el sensor integrado en

el anemómetro (testo 405i) utilizado durante los ensayos. Estas condiciones permitieron mantener un entorno térmico relativamente estable durante la adquisición de los datos y reducir la posible influencia de las variaciones de temperatura sobre la respuesta de las galgas extensiométricas. En cada bloque de pruebas, se verificó la velocidad de viento de prueba entre réplicas y entre cambios de velocidad de viento de prueba.

Como se mencionó anteriormente, se utilizó la magnitud de la micro-deformación registrada en la celda de carga como una medida de las vibraciones inducidas por vórtices. Se utilizó el valor de la raíz cuadrada media (RMS) o valor eficaz para determinar el desempeño aerodinámico de cada uno de los prototipos. El valor RMS es una medida del valor equivalente en energía de una señal variable, tales como; voltaje, corriente, velocidad, potencia, deformación, etc. La ec. (1) muestra la fórmula para el cálculo del valor RMS para datos discretos utilizando los valores de las micro-deformaciones [35]:

$$\varepsilon_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2} \quad (1)$$

Donde ε_i es el valor de la micro-deformación en función del tiempo y N es el número total de datos.

Resultados

La frecuencia natural de cada prototipo depende de la masa del mástil y de la rigidez de la viga flexible. A pesar de que la variación en masa presentada en la Tabla 1 representa menor al 0.5% entre el prototipo más ligero y el más pesado y que durante el ensamble se controló la longitud efectiva de la viga flexible, se requiere medir la frecuencia natural experimentalmente de cada uno de los prototipos para asegurar que las variaciones en las VIV de los prototipos se deban únicamente a efectos aerodinámicos y no a efectos estructurales. La Figura 7 muestra la respuesta sub-amortiguada en términos de las micro-deformaciones registradas por la celda de carga para el mástil cilíndrico.

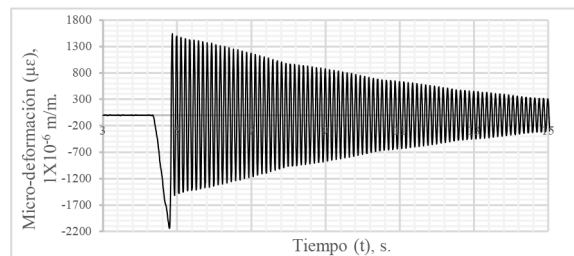


Figura 7. Frecuencia natural del mástil cilíndrico.

Se realizó un análisis estadístico del coeficiente de variación (CV) de las mediciones, donde este coeficiente permite evaluar la dispersión relativa del conjunto de datos en relación con sus valores medios. Este valor CV se determinó mediante la siguiente ecuación [36]:

$$CV = \frac{S}{\bar{\varepsilon}} \times 100 \quad (2)$$

Donde: $\bar{\varepsilon}$ es la media de las micro-deformaciones y S es la desviación estándar. Para todos los casos, este valor fue inferior al 0.4%, indicando una excelente repetibilidad experimental, mediciones confiables y poco ruido experimental. La Tabla 2 muestra los valores de la frecuencia natural, así como su desviación estándar y el CV en términos de porcentaje para cada prototipo.

Tabla 2. Frecuencia media de los diferentes prototipos.

Mástil	Frecuencia media (Hz)	Desviación estándar	CV (%)
Cilíndrico	8.278	0.002	0.025
Cactus 5 costillas	8.409	0.005	0.055
Cactus 6 costillas	8.252	0.029	0.356
Cactus 7 costillas	8.268	0.008	0.094

Se empleó un diagrama de caja y bigotes (boxplot) para visualizar la dispersión de los datos experimentales y detectar posibles valores atípicos. Los resultados mostraron baja variabilidad en todas las geometrías de los mástiles, consistente con los bajos coeficientes de variación observados. Si se compara la magnitud de las frecuencias naturales de los prototipos tipo cactus columnar con el mástil cilíndrico, el cactus de 5 costillas presenta una diferencia del 1.57 %, el cactus de 6 costillas -0.31% y el cactus de 7 costillas -0.12 %. Basados en estos resultados se puede concluir que los efectos estructurales de los mástiles no tendrán efecto en las VIV, solo se deberá a efectos aerodinámicos.

Para la realización de las pruebas del desempeño aerodinámico de los mástiles, estos se orientaron en la dirección del viento para que primero incida en una de las puntas de sus costillas. De esta manera, se favorece la formación de desprendimiento de vórtices, por el contrario, si el cactus se orienta para que incida primero en una de sus cavidades, se incrementan las fuerzas de arrastre reduciendo significativamente las fuerzas de sustentación y por consiguiente las VIV. Por tal motivo, el estudio de la incidencia del viento en las cavidades de los mástiles esta fuera del alcance de esta investigación.

Por otra parte, para medir cuantitativamente el desempeño de los mástiles, se utilizó el valor medio de las micro-deformaciones RMS, como se mencionó anteriormente. Este valor eficaz cuantifica la intensidad o magnitud de las variaciones alrededor de su valor medio, ya que en este tipo de fenómenos VIV el valor medio suele ser cero o cercano a este debido a las fluctuaciones alternantes que por lo regular tienen la misma magnitud, pero en sentidos opuestos. Este valor eficaz es determinado por las mediciones de la prueba y tres réplicas. Es importante mencionar que se parte de la consideración de que un valor mayor RMS significa mayores VIV y por consiguiente una mayor producción de energía por parte de la turbina de viento sin aspas [13].

La Figura 8 muestra las micro-deformaciones del mástil de 5 costillas para una velocidad de viento de prueba de $U_f=6$ m/s durante 30 segundos. En esta figura se puede observar que las amplitudes de oscilación de las micro-deformaciones no son constantes, este comportamiento se debe a la naturaleza viscoelástica de la varilla flexible de fibra de vidrio, que, por un lado, almacena energía potencial (efecto de resorte) y, por otro lado, disipa energía durante la vibración (efecto de amortiguamiento). Este comportamiento viscoelástico en los polímeros es mayor que el observado en los metales. Los otros mástiles también presentan el mismo comportamiento y donde las micro-deformaciones pico-pico varían significativamente entre mástiles, por ejemplo, para el mástil cilíndrico esta magnitud es aproximadamente de 130 $\mu\epsilon$, para el cactus de 5 costillas de 330 $\mu\epsilon$, para el cactus de 6 costillas de 260 $\mu\epsilon$ y para el cactus de 7 costillas de 390 $\mu\epsilon$.

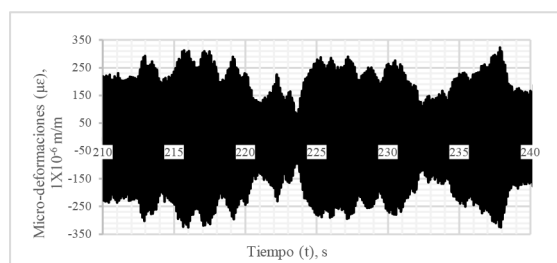


Figura 8. Micro-deformaciones del mástil tipo cactus de 5 costillas.

La Figura 9 muestra las micro-deformaciones de todos los mástiles para una velocidad de viento de prueba de $U_f=7$ m/s. En esta figura se han traslapado los valores de las micro-deformaciones de todos los mástiles para visualizar claramente como la geometría de los cactus presenta mayores magnitudes de micro-deformación, lo que significa mayor VIV. Por ejemplo; para el mástil de 7 costillas se presenta una micro-deformación pico-pico por encima de 600 $\mu\epsilon$, para el mástil de 5 costillas de 300 $\mu\epsilon$, para el mástil de 6 costillas 200 $\mu\epsilon$ y para el mástil cilíndrico de 100 $\mu\epsilon$. En este estudio de las mediciones del desempeño de los mástiles también se realizó un análisis estadístico del coeficiente de variación CV y un ajuste matemático con la ayuda de un código en Python. Se emplearon diagramas de caja y bigotes (boxplot) para visualizar la dispersión de los datos experimentales y detectar posibles valores atípicos.

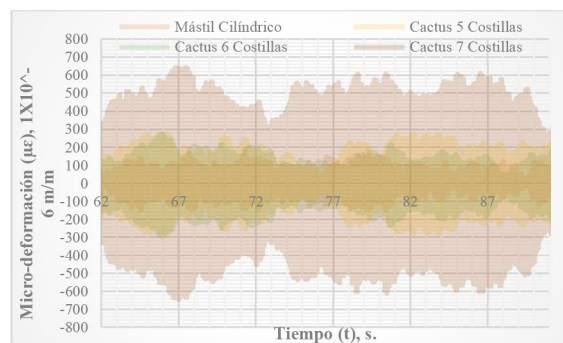


Figura 9. Micro-deformaciones de todos los mástiles para $U_f=7$ m/s.

La Figura 10 muestra el diagrama de caja y bigotes de las medias de las micro-deformaciones RMS del cactus de 7 costillas. En esta figura se ve claramente que a una velocidad de 7 m/s se presenta la mayor dispersión de las mediciones. Esto se atribuye a la presencia de la condición de resonancia aeroelástica. Este comportamiento de dispersión es similar para el mástil de 5 y 6 costillas. La dispersión en el mástil cilíndrico es la más baja que todos los mástiles tipo cactus, sin embargo, también presenta un incremento en su dispersión a la velocidad de viento de 6 m/s, a pesar de que no se ve claramente un rango de resonancia aeroelástica.

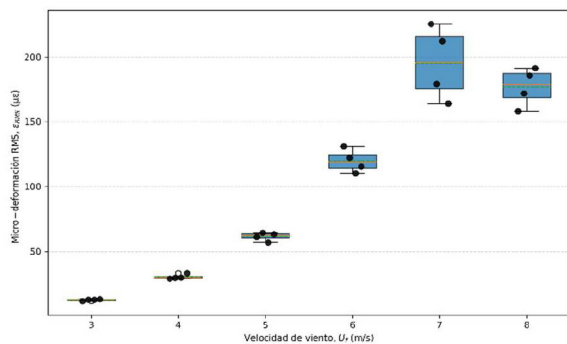


Figura 10. Diagrama de caja y bigotes de las micro-deformaciones para el mástil de 7 costillas.

La Figura 11 muestra la media de las micro-deformaciones RMS de los diferentes mástiles en función de la velocidad de viento de prueba. En esta figura se puede observar que el mástil cilíndrico tiene un comportamiento monótonico, es decir; se presenta un incremento progresivo de la magnitud de la micro-deformación RMS con respecto a la velocidad de viento, no se observa una velocidad de viento de resonancia aeroelástica claramente. Los mástiles tipo cactus muestran un comportamiento no-monotónico, lo que sugiere la presencia de la condición de resonancia aeroelástica, es decir; presentan un incremento de las VIV, un alcance del pico y un posterior descenso. Los mástiles de 5 y 6 costillas muestran una velocidad de viento donde ocurre la resonancia aeroelástica de 6 m/s mientras que el mástil de 7 costillas a 7 m/s. Estos resultados permiten identificar una mejor geometría para situaciones diferentes de velocidad media anual de viento.

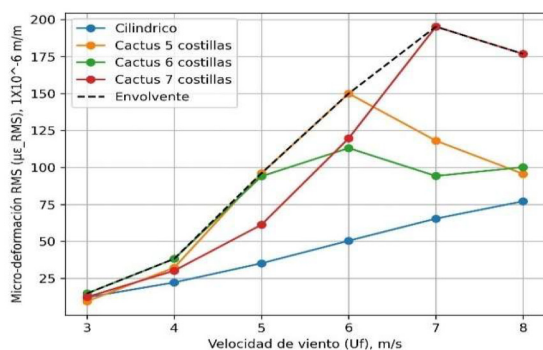


Figura 11. Micro-deformación RMS de los mástiles en función de la velocidad de viento.

La Figura 12 muestra el coeficiente de variación RMS de todos los mástiles en función de la velocidad de viento. En esta figura se puede observar que el mástil cilíndrico presenta un CV aproximadamente entre 4% y 6%, indicando una variabilidad experimental de nivel bueno con mayor dispersión a 6 m/s y una micro-deformación RMS máxima a 8 m/s. Por otro lado, el mástil de 5 costillas presenta un CV aproximadamente de 3 a 10 %, lo que representa un nivel moderado con mayor variabilidad dinámica y mayor sensibilidad aerodinámica a una velocidad de viento de 7 m/s con una micro-deformación RMS máxima en 6 m/s. Esto claramente por la condición de operación en resonancia cerca de ambas velocidades de viento. Este comportamiento es típico en VIV [37].

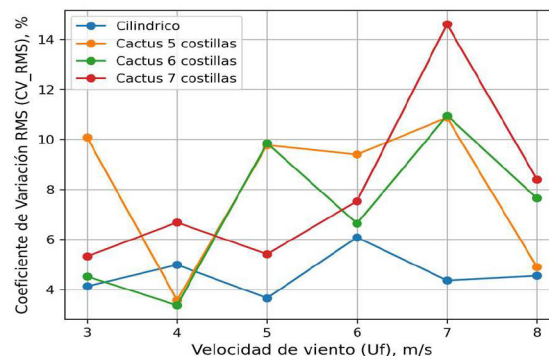


Figura 12. Coeficiente de variación RMS de los mástiles en función de la velocidad de viento.

De la misma manera, el mástil de 6 costillas presenta un comportamiento similar al mástil de 5 costillas, solo que este mástil presenta un CV aproximadamente de 3 a 11 %, lo que también representa un nivel moderado con mayor variabilidad a una velocidad de 7 m/s con una micro-deformación RMS máxima en 6 m/s. Por último, el mástil de 7 costillas presenta un CV de aproximadamente de 5 a 15 %, lo que representa un nivel de moderado a alta dispersión, principalmente a 7 m/s debido a la condición de operación de resonancia aeroelástica, aquí las micro-deformaciones RMS máximas se presentan a la misma velocidad de viento. Por lo tanto, el mástil de 7 costillas presenta la mayor VIV, muestra la mayor sensibilidad dinámica y desplaza la velocidad de resonancia a una de velocidad de viento de prueba mayor.

Sumado a ello, se realizó un ajuste matemático para los mástiles tomando en cuenta el coeficiente de determinación R^2 como métrica de calidad, ya que este coeficiente indica qué tan bien un modelo explica la variabilidad de los datos experimentales. Se utilizó un ajuste cuadrático para el mástil cilíndrico y un ajuste VIV para los mástiles tipo cactus, este último es un modelo físico tipo “resonancia + sustentación” que se emplea en fenómenos como el que se presenta en este estudio y tiene la siguiente forma [37]:

$$\varepsilon(U) = A \cdot \frac{U^2}{1 + \left(\frac{U - U_c}{\Delta} \right)^2} \quad (3)$$

Donde: U_c es la velocidad crítica, A y Δ son constantes de ajuste. La Figura 13 muestra el ajuste matemático con el modelo VIV del mástil de 7 costillas, en esta figura se puede observar que el valor de R^2 es de 0.985, también se puede observar un crecimiento aproximadamente U^2 , un pico en la velocidad crítica U_c y posteriormente una caída, un comportamiento típico del modelo VIV. Se muestra la comparación con un ajuste cuadrático con un R^2 de 0.876.

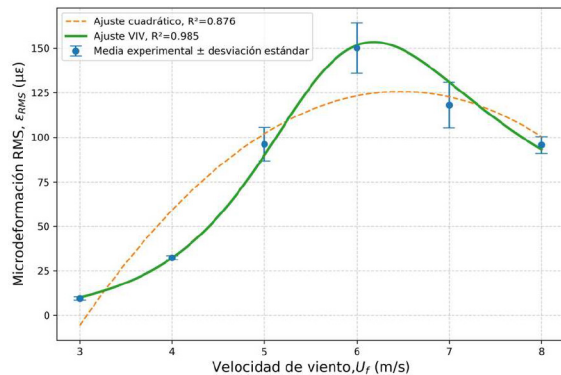


Figura 13. Ajuste matemático VIV del mástil de 7 costillas.

La Tabla 3 muestra los tipos de ajustes matemáticos que se realizaron a los datos experimentales a cada uno de los mástiles, también se muestra el valor R^2 , el error absoluto (RMSE) y el error porcentual absoluto medio (MAPE).

Tabla 3. Tipos de ajustes matemáticos de los mástiles.

Mástil	Tipo de ajuste	Valor R^2	RMSE ($\mu\epsilon$)	MAPE (%)
Cilíndrico	Cuadrático	0.99740	1.1800	3.68
Cactus 5 puntas	VIV	0.98466	5.9887	4.56
Cactus 6 puntas	VIV	0.93879	8.9131	7.15
Cactus 7 puntas	VIV	0.96315	13.4344	5.11

En una interpretación típica en ingeniería experimental se suele manejar los siguientes rangos del RMSE [36], [38], [39]; de 1-5% (excelente), de 5-10 % (muy bueno), de 10-20% (aceptable) y >20 % (deficiente). Esto con respecto al valor máximo de la micro-deformación RMS para cada mástil. Por ejemplo, para el mástil cilíndrico 1.18 $\mu\epsilon$ representa un RMSE=1.57%, para el cactus de 5 costillas 5.9887 $\mu\epsilon$ representa un RMSE=3.93%, para el cactus de 6 costillas 8.9131 $\mu\epsilon$ representa un RMSE = 7.9% y para el cactus de 7 costillas 13.4344 $\mu\epsilon$ representa el RMSE=6.7%. Por otra parte, el valor de MAPE se interpreta siguiendo criterios comúnmente usados en modelos predictivos con rangos típicos de [38]; <5% (excelente), del 5-10% (muy bueno), del 10-20% (bueno), del 20-50% (regular) y >50% (malo).

Con base en estos resultados, se confirma la hipótesis de trabajo de que la geometría bioinspirada en cactus columnares puede favorecer la respuesta aeroelástica del mástil. Aunque en los cactus naturales las costillas cumplen principalmente funciones asociadas con la resistencia estructural, el almacenamiento de agua y la regulación térmica, su incorporación en la sección transversal del mástil modifica la interac-

ción entre el flujo y la estructura, favoreciendo la formación de vórtices y su sincronización con la frecuencia natural del sistema. En una sección circular lisa, la separación de la capa límite y el desprendimiento alternado de vórtices pueden presentar un comportamiento relativamente regular; sin embargo, esto no implica necesariamente que se generen las mayores fluctuaciones de sustentación. En contraste, las costillas de una sección tipo cactus actúan como elementos geométricos que modifican localmente el flujo alrededor del cuerpo y pueden establecer puntos preferenciales de separación de la capa límite. Los resultados experimentales sugieren que este efecto intensifica las fluctuaciones de presión y, consecuentemente, las fuerzas transversales que excitan las vibraciones inducidas por vórtices (VIV). Asimismo, las costillas modifican el área proyectada y la dimensión efectiva expuesta al flujo, lo que puede contribuir al incremento de las fuerzas aerodinámicas. Dependiendo de la geometría y de las condiciones de operación, estas modificaciones también podrían favorecer mecanismos de inestabilidad aeroelástica adicionales a las VIV, como el galope.

Por lo tanto, el número y la distribución de las costillas desempeñan un papel relevante en la interacción fluido-estructura y pueden favorecer una estela más coherente, una mayor fluctuación de la fuerza de sustentación y una respuesta oscilatoria más intensa dentro de la región de “lock-in”.

En las condiciones evaluadas experimentalmente, las geometrías bioinspiradas alcanzaron amplitudes de respuesta de hasta aproximadamente tres veces a las obtenidas con la sección cilíndrica convencional, evidenciando el potencial de las secciones inspiradas en cactus columnares para incrementar la respuesta aeroelástica del sistema. En consecuencia, estas geometrías representan una alternativa prometedora para el diseño de mástiles de turbinas de viento sin aspas orientadas al aprovechamiento de VIV, donde el incremento controlado de la amplitud de oscilación puede favorecer la conversión de energía.

Conclusiones

- Basados en los resultados experimentales, se demostró la hipótesis de trabajo, ya que todas las geometrías de los cactus amplificaron las micro-deformaciones de la celda de carga significativamente a una misma velocidad de viento de prueba. Lo que confirma que las geometrías de los cactus no solo promueven la formación de vórtices, sino que mejoran la sincronización del desprendimiento de vórtices con la frecuencia natural del mástil. Por ejemplo; el mástil de 5 costillas presentó un factor de amplificación de 3.0 a 6 m/s con respecto a las micro-deformaciones RMS del mástil cilíndrico, mientras que el mástil de 6 costillas de 2.25 a 6 m/s y el mástil de 7 costillas de 3.0 a 7 m/s.
- Con respecto a los resultados de las mediciones de las frecuencias naturales de los mástiles, la diferencia entre el mástil con mayor frecuencia y con el de menor

frecuencia, solo se presentó un 2% de diferencia. Lo que confirma que las variaciones en el desempeño aerodinámico de los mástiles solo se atribuyen a efectos aerodinámicos y no a efectos estructurales. De la misma manera, el valor del CV fue inferior al 0.4%, indicando una excelente repetibilidad experimental, mediciones confiables y poco ruido experimental.

- Con respecto a las mediciones del desempeño aerodinámico de los mástiles, en la mayoría de las pruebas, el valor del CV estuvo por debajo o cercano del 10%, con una sola medición del mástil de 7 costillas cercano al 15%. Por lo tanto, se puede concluir que se alcanzó un nivel moderado de variabilidad en las mediciones con respecto a la media del conjunto de datos. Esto indica que, si bien existe cierta dispersión en los datos, esta no es excesivamente alta, lo que sugiere un conjunto de mediciones relativamente estable. Este comportamiento es típico en los cosechadores de energía VIV, donde se presenta mayor dispersión donde ocurre el fenómeno de resonancia aeroelástica.
- Con respecto a los ajustes matemáticos de los datos experimentales de los mástiles, se tuvo valores de R^2 muy aceptables, el mástil con el modelo cuadrático presentó el mejor valor de R^2 de 0.99740 y el menos favorable fue el mástil tipo cactus de 5 costillas con un valor R^2 de 0.93879. Todos los errores absolutos RMSE estuvieron dentro de un rango de 1.57-7.9%, lo que se puede interpretar como un nivel de ajuste muy bueno, por otra parte, el error relativo MAPE estuvo entre un rango de 3.68-7.15%, interpretando un nivel de ajuste de excelente a muy bueno.
- En el diseño de turbina de viento sin aspas, dependiendo de la velocidad de viento nominal, el cactus de 6 costillas es más adecuado para un rango de velocidad de viento de 3 a 5 m/s, el cactus de 5 costillas para un rango de 5 a 6 m/s y el cactus de 7 costillas para una velocidad de viento superior a 6 m/s.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Querétaro por el apoyo otorgado para el desarrollo del Proyecto 25597.26 P. Implementación de mejoras de una turbina de viento sin aspas para la cosecha de energía en entornos urbanos.

Referencias

- [1] «AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023». Accedido: 21 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>
- [2] Secretaría de Energía (SENER), «Plan de Desarrollo del Sector Eléctrico 2025–2039», México, 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/sener/articulos/plan-de-desarrollo-del-sector-electrico-pladese>
- [3] Instituto Mexicano para la Competitividad (IMCO), «Generación eléctrica limpia en México 2025», México, 2025.
- [4] «Solar», IEA. Accedido: 29 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.iea.org/energy-system/renewables/solar-pv>
- [5] «Wind», IEA. Accedido: 29 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.iea.org/energy-system/renewables/wind>
- [6] «Renewable Power Generation Costs in 2024». Accedido: 29 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.irena.org/Publications/2025/Jun/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2024>
- [7] A. El-Shahat, «Bladeless Wind Turbine as Wind Energy Possible Future Technology», doi: 10.1002/gas.21942.
- [8] A. T. Bardakjian, P. P. Mandadakakis, y A. Tingle, «Efficiency comparison of horizontal axis wind turbines and bladeless turbines», PAM Rev. Energy Sci. Technol., vol. 4, pp. 59-75, jun. 2017, doi: 10.5130/pamr.v4i0.1461.
- [9] D. J. Yáñez, «VIV resonant wind generators», jun. 2018.
- [10] Z. Mohamed, M. Soliman, M. Feteiha, y E. Saber, «A novel optimal design approach for bladeless wind turbines considering mechanical properties of composite materials used», Sci. Rep., vol. 15, n.o 1, p. 1355, ene. 2025, doi: 10.1038/s41598-024-82385-9.
- [11] A. Chizfahm, E. A. Yazdi, y M. Eghtesad, «Dynamic modeling of vortex induced vibration wind turbines», Renew. Energy, vol. 121, pp. 632-643, jun. 2018, doi: 10.1016/j.renene.2018.01.038.
- [12] M. P. Thomai, L. Kharsati, N. Rama Samy, S. Sivamani, y H. Venkatesan, «Experimental Analysis of Vortex Induced Vibration in the Bladeless Small Wind Turbine», doi: 10.1115/GTINDIA2019-2484.
- [13] «Optimizing Bladeless Wind Turbines: Morphological Analysis and Lock-In Range Variations». Accedido: 26 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/7/2815>
- [14] J. Breen, W. Mallik, y S. Adhikari, «Performance analysis and geometric optimization of bladeless wind turbines using wake oscillator model», Renew. Energy, vol. 254, p. 123549, dic. 2025, doi: 10.1016/j.renene.2025.123549.
- [15] A. Das y N. Azimi, «CFD Modeling of the Movement of Bladeless Wind Turbines», Iran. J. Chem. Eng. IJ-ChE, vol. 20, n.o 4, pp. 40-55, ene. 2024, doi: 10.22034/ijche.2024.435315.1515.

- [16] M. A. Alnounou y S. Samantaray, «*A Numerical Study to Choose the Best Model for a Bladeless Wind Turbine*», en Recent Advances in Mechanical Engineering, P. Pradhan, B. Pattanayak, H. C. Das, y P. Mahanta, Eds., Singapore: Springer Nature, 2023, pp. 359-369. doi: 10.1007/978-981-16-9057-0_38.
- [17] R. Yadav, B. Pokharel, S. Poudel, y A. Gupta, «*Design and Simulation of Vortex Bladeless an Attachable Fin that Harvest Energy Using Piezoelectric Technology*», en 2021 International Conference on Simulation, Automation & Smart Manufacturing (SASM), ago. 2021, pp. 1-6. doi: 10.1109/SASM51857.2021.9841123.
- [18] «*Design and Development of Bladeless Vibration-Based Piezoelectric Energy-Harvesting Wind Turbine*». Accedido: 26 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/15/7769>
- [19] A. Tripathi, S. Thakur, y T. Aggarwal, «*Modal and Static Analysis of Vortex Bladeless Wind Turbines with Different Geometries*», E3S Web Conf., vol. 430, p. 01254, 2023, doi: 10.1051/e3sconf/202343001254.
- [20] C. Samy, H. Ahmadi, Y. Atfah, S. S. Dol, y M. Alavi, «*Design of Portable Vortex Bladeless Wind Turbine: The Preliminary Study*», pp. 32-43, feb. 2023, doi: 10.37934/aram.102.1.3243.
- [21] «*Experimental and Numerical Study of Novel Vortex Bladeless Wind Turbine with an Economic Feasibility Analysis and Investigation of Environmental Benefits*». Accedido: 26 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/1/214>
- [22] I. Bahadur, «*Dynamic Modeling and Investigation of a Tunable Vortex Bladeless Wind Turbine*», Energies, vol. 15, n.o 18, p. 6773, ene. 2022, doi: 10.3390/en15186773.
- [23] H. Kang, J. Kook, J. Lee, y Y.-K. Kim, «*A Novel Small-Scale Bladeless Wind Turbine Using Vortex-Induced Vibration and a Discrete Resonance-Shifting Module*», Appl. Sci., vol. 14, n.o 18, p. 8217, ene. 2024, doi: 10.3390/app14188217.
- [24] Yañez Villareal David, J., «*Aerogenerador Resonante por Vorticidad*», WO 2012/017106, 9 de febrero de 2012
- [25] W. Barday, Z. S. Bahri, S. Ez-Zabri, y Y. Salih-Alj, «*An Off-Grid Hybrid Piezoelectric-Electromagnetic Tuning System for Vortex Induced Vibration Bladeless Turbines*», en 2023 7th IEEE Congress on Information Science and Technology (CiSt), dic. 2023, pp. 342-349. doi: 10.1109/CiSt56084.2023.10409962.
- [26] E. Azadi Yazdi, «*Optimal control of a broadband vortex-induced vibration energy harvester*», J. Intell. Mater. Syst. Struct., vol. 31, n.o 1, pp. 137-151, ene. 2020, doi: 10.1177/1045389X19888711.
- [27] E. A. Yazdi, «*Nonlinear model predictive control of a vortex-induced vibrations bladeless wind turbine*», Smart Mater. Struct., vol. 27, n.o 7, p. 075005, may 2018, doi: 10.1088/1361-665X/aac0b6.
- [28] Hernández-Arriaga Isaac, Pérez-Meneses Joaquín, y Mendoza-López María Luisa, «*Diseño de una Turbina Eólica sin Aspas para Entornos Urbanos*», en MEMORIAS DEL XXX CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL DE LA SOMIM, Querétaro, Qro.: Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica, sep. 2024, pp. 276-284. [En línea]. Disponible en: https://somim.org.mx/memorias/memorias2024/articulos/DM/A1_123.pdf
- [29] E. Bustamante y A. Búrquez, «*Fenología y biología reproductiva de las cactáceas columnares*», 2005, Accedido: 28 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.14330/PER01000336113>
- [30] «*Botanipedia: Caracteres vegetativos de las cactáceas - Botanipedia*». Accedido: 28 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.botanipedia.org/index.php?title=Botanipedia:Caracteres_vegetativos_de_las_cact%C3%A1ceas
- [31] Aldo Humberto Ceroni Stuva y Viviana Castro Cepero, «*Manual de Cactus, Identificación y origen*», Dirección General de Diversidad Biológica, Lima, Perú, Manual 584.15, 2013. [En línea]. Disponible en: <https://www.minam.gob.pe/diversidadbiologica/>
- [32] «*Cactus Ribs Keep Them Cool — Biological Strategy — AskNature*». Accedido: 28 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://asknature.org/strategy/shape-shades-and-enhances-heat-radiation/>
- [33] «*Árboles y arbustos de la Facultad de Ciencias - Laboratorio de Plantas Vasculares, Facultad de Ciencias UNAM*». Accedido: 29 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: https://plantasvasculares.fcencias.unam.mx/ArbolesArbustosFCiencias/Angiospermas/lophocereus_marginatus.html
- [34] M. Á. S. Hidalgo, R. A. Pascual, y D. Y. Villareal, «*DISEÑO Y OPTIMIZACION DE UNA ESTRUCTURA GEOMÉTRICA CILÍNDICA PARA UN DESPRENDIMIENTO UNIFORME DE VORTICES DE VON KARMAN*», Tecnol. Desarro., vol. 15, dic. 2017, Accedido: 29 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: https://revistas.uax.com/index.php/tec_des/article/view/1181
- [35] Daniel J. Inman, *Engineering Vibration*, Fifth Edition. Pearson, 2022.
- [36] Douglas C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, Tenth Edition. Wiley, 2021.
- [37] T. Sarpkaya, «*A critical review of the intrinsic nature of vortex-induced vibrations*», J. Fluids Struct., vol. 19, n.o 4, pp. 389-447, may 2004, doi: 10.1016/j.jfluids-struct.2004.02.005.

- [38] Hyndman, R.J. y Athanasopoulos, G., *Forecasting: principles and practice*, 3rd edition. Melbourne, Australia: OTexts, 2021.
- [39] Norman R. Draper y Harry Smith, *Applied Regression Analysis*, Third Edition. en Wiley Series in Probability and Statistics. John Wiley & Sons, 1998.