



**IV CONFERENCIA INTERNACIONAL DE DESARROLLO
ENERGÉTICO SOSTENIBLE
CIDES 2025**

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y VALIDACIÓN DE ROTOR DE
ALABES CURVOS TRUNCADOS CON GEOMETRÍA DE LA
ESPIRAL DE FIBONACCI PARA AEROGENERADOR DE EJE
VERTICAL**

***DESIGN, CONSTRUCTION AND VALIDATION OF A ROTOR WITH
TRUNCATED CURVED BLADE WITH FIBONACCI SPIRAL
GEOMETRY FOR A VERTICAL-AXIS WIND TURBINE***

**José del Carmen Onofre López¹, Emilio Augusto Álvarez García², Cristóbal
Patiño Carachure³, Manuel May Alarcón⁴, Xóchilt Aguilar Osorio⁵, Francisco
Ismael Celis Rodríguez⁶, Francisco Eneldo López Monteagudo⁷.**

1-José del Carmen Onofre López. Universidad Autónoma del Carmen, México. E-mail:
jonofre@pampano.unacar.mx

2-Emilio Augusto Álvarez García. Universidad Tecnológica de Campeche, México. E-
mail: alvarezgarciaemi@gmail.com

3-Cristóbal Patiño Carachure. Universidad Autónoma del Carmen, México. E-mail:
cpatino@pampano.unacar.mx

4-Manuel May Alarcón. Universidad Autónoma del Carmen, México. E-mail:
mmay@pampano.unacar.mx

5-Xochil Aguilar Osorio. Universidad Tecnológica de Campeche, México. E-mail:
x.a.o.2712@gmail.com

6-Francisco Ismael Celis Rodríguez. Universidad Autónoma del Carmen, México. E-
mail: 001478@mail.unacar.mx

7-Francisco Eneldo López Monteagudo. Universidad Autónoma de Zacatecas, México.
E-Mail: eneldolm@yahoo.com



Resumen: El presente trabajo se centra en el diseño, fabricación y validación de un rotor eólico vertical de álabes curvos basado en la geometría de la espiral de Fibonacci y relación aspecto considerando la proporción áurea, respaldada por ensayos a nivel de laboratorio en túnel de viento y condiciones reales de explotación.

Para estudiar el comportamiento del rotor se establece un diseño estadístico de experimentos factorial $N=3^K$, con un número de factores o variables de entrada (K) igual a Dos. Tales factores son: número de álabes (NA) 2, 4 y 6, velocidad del viento (V_v), nivel mínimo 6.4 m/s, nivel medio 7.6 m/s y nivel alto 8.8 m/s. Variables de salida: potencia eólica (P_e), potencia del rotor (P_r), el TSR (Tip-Speed Ratio); eficiencia de la turbina en función del coeficiente de potencia (C_p) y velocidad de rotación (rpm). Se utilizó un túnel de viento para tales efectos que permite variar la velocidad del viento en rango de 2.5 a 10 m/s. Modelos matemáticos empíricos muestran la influencia de los factores objeto de estudio sobre la potencia, la eficiencia, las revoluciones de la turbina y el TSR. Los resultados muestran una eficiencia de $C_p=0.55$ a 0.57, una potencia eólica de 0.588 kW a 1.586 kW, una potencia en el rotor de 0.344 kW a 0.887 kW; un $TSR=0.64$ a 0.85 y velocidad angular de 155.6 rpm a 288.62 rpm. El rotor propuesto resulta eficiente para la generación de energía en sistemas de mini - eólica y sistemas híbridos mini-eólico-solar.

Abstract: *This work focuses on the design, manufacture, and validation of a vertical wind rotor with curved blades based on the Fibonacci spiral geometry and aspect ratio considering the golden ratio, supported by laboratory tests in a wind tunnel and real operating conditions.*

To study the behavior of the rotor, a statistical design of factorial experiments $N=3^K$ is established, with a number of factors or input variables (K) equal to Two. These factors are: number of blades (NA) 2, 4 and 6, wind speed (V_v), minimum level 6.4 m/s, medium level 7.6 m/s and high level 8.8 m/s. Output variables: wind power (P_e), rotor power (P_r), the TSR (Tip-Speed Ratio); turbine efficiency as a function of the power coefficient (C_p) and rotational speed (rpm). A wind tunnel was used for these effects, which allows varying the wind speed in the range of 2.5 to 10 m/s. Empirical mathematical models show the influence of the factors under study on power, efficiency, turbine revolutions and TSR. The results show an efficiency of $C_p=0.55$ to 0.57, a wind power of 0.588 kW



to 1.586 kW, a power in the rotor of 0.344 kW to 0.887 kW; a TSR= 0.64 to 0.85 and angular speed of 155.6 rpm to 288.62 rpm. The proposed rotor is efficient for the generation of energy in mini-wind systems and mini-wind-solar hybrid systems.

Palabras Clave: Turbina eólica vertical; Perfiles aerodinámicos; Potencia eólica; Coeficiente de Potencia.

Keywords: Vertical wind turbine; Airfoil profiles; Wind power; Power coefficient

1. Introducción

Debido al aumento del consumo eléctrico y la inquietud de la generación de energía convencional con alto impacto ambiental, actualmente se ha incrementado el desarrollo de sistemas de generación, basados principalmente de fuentes renovables, conectados a la red eléctrica y aislado (Guillen, O. 2015).

En los últimos años, los países desarrollados han tenido grandes avances en la tecnología para el aprovechamiento adecuado de la energía eólica, esto asociado al hecho que el aprovechamiento de la energía fotovoltaica aún se encuentra en proceso de perfeccionamiento y las hidroeléctricas son proyectos complejos y costosos. Sin embargo, en países en vías de desarrollo aún existe cierta sensibilidad sobre la inclusión de la energía eólica a gran escala debido a su intermitencia y su efecto en los sistemas interconectados. Si bien este es un riesgo latente en todo tipo de generación, los avances actuales en la tecnología [permiten disminuirlo, además de generar interés de potenciales inversores, viabilizando proyectos (Ponta, F., Seminara, J., & Otero, A. (2006).

En México, el 75% de los habitantes de zonas rurales, vive en pobreza energética. Esto significa que carecen de servicios y tecnologías adecuadas para cubrir necesidades básicas como calentamiento de agua, iluminación, cocción, refrigeración de alimentos, calefacción y ventilación, entre otras. La falta de acceso a la energía obstaculiza el cumplimiento de derechos humanos básicos, ya que la energía es un medio indispensable para garantizar viviendas dignas, salud, agua potable o educación, por citar algunos ejemplos. En otras palabras, la energía es esencial para acceder a servicios básicos que pueden mejorar la calidad de vida de los sectores más vulnerables. (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, (2025)).



Gran parte de la energía de la tierra tiene su origen en la radiación solar. Así, la energía eólica constituye una manifestación de la energía solar, ya que el viento se debe a la circulación del aire atmosférico producida por las diferencias de temperatura. La energía cinética que está contenida en las corrientes de aire es aprovechada a través de las turbinas eólicas para generar energía eléctrica, para poder usar tal energía, se realiza a través de un eje acoplado a un generador eléctrico. Con base en lo anterior se debe señalar que no toda la energía del viento puede ser aprovechada a través de la turbina, sumado a esto, existirán pérdidas en la turbina eólica (aerodinámicas, mecánicas y eléctricas). Para que una turbina eólica funcione, necesita un valor mínimo de viento para comenzar a producir trabajo útil, este valor es denominado velocidad de conexión (Cut-in), esta velocidad por lo regular comprende entre los 3 y 5 m/s. A partir de estas velocidades, dependiendo del fabricante, comenzará a rotar convirtiendo la energía cinética en mecánica, siguiendo de esta forma hasta que alcance la potencia nominal, generalmente la máxima que puede entregar. También las turbinas eólicas tienen una velocidad de desconexión (Cut-off), donde por razones de seguridad (carga aerodinámica excesiva sobre la estructura), se detiene, normalmente esta velocidad se considera a partir de 25 m/s.(Sánchez, E. R. (2019)).

La tendencia de los aerogeneradores tipo horizontal o (HAWT's), debido a su gran capacidad de generación dentro de un área específica. Para la implementación de estos se requiere una serie de estudios que garanticen su viabilidad: estudios anemométricos, de suelo, proyecciones de generación, fluctuación de la dirección del viento y el impacto medio ambiente que puede ocasionar. A todo ello se añade la rentabilidad del proyecto, que, gracias a su gran potencial de generación, pueden ser competitivos respecto a otras alternativas de generación de energía. Los HAWT's son proyectos complejos que no pueden competir en mercados a microescala por las exigentes condiciones de operación que enfrentan (Chaichana, T., & Chaitep, S. (2010).

Una tecnología relegada pero no menos importante son los aerogeneradores de eje vertical o VAWT's; las cuales tienen un alza en su demanda gracias a la necesidad de aprovechar los recursos en entornos limitados. Estas permiten una fácil integración al mercado de productos para generación eléctrica y la instalación en áreas urbanas con destino a la micro generación y la generación distribuida. Si bien las tecnologías de las VAWT's están consolidadas en sus bases y fundamentos, existe una tendencia en la investigación en esta



área que amplía el horizonte de aplicaciones; derivando en múltiples tipos de generadores que intentan reducir la barrera entre la eficiencia de estos aerogeneradores respecto al límite de Betz. Asimismo, las VAWT's resaltan debido a la posibilidad de autoinicio de la generación al igual que la capacidad omnidireccional de los vientos para la generación; factores que son limitantes para HAWT's. Además, nuevos estudios ponen en consideración el uso de conjuntos de VAWT's en diferentes configuraciones para incrementar la eficiencia o nuevos tipos de perfiles alares con el mismo propósito, aprovechando la mecánica del fluido y los fenómenos ocurridos en su funcionamiento. (Herrera Beltrán, J. D., Campos Amezcua, R., Zagoya Juárez, V., Ricoy Zárate, E. G., & Rosado Tamariz, E. (2023)).

Blanco D.J. (2022) en su tesis doctoral, realizó un estudio comparativo de optimización mediante modelo CFD parametrizado en 3D, con el objeto de mejorar la eficiencia de una turbina eólica de eje vertical tipo Savonius y propone el uso de un perfil de pala de diseño bioinspirado basado en la espiral de Fibonacci: forma presente en numerosas ocasiones en la naturaleza. A partir de dicha geometría, investigó el incremento de la eficiencia de la turbina por medio de sucesivos estudios comparativos, en los cuales modificó parámetros geométricos que afectan a su eficiencia y se determinó el valor óptimo para cada uno de ellos.

Otra ilustración del desarrollo de turbinas de eje vertical se encuentra en la patente WO2008/003802 A1 (2008), consiste en un aerogenerador de eje vertical para el aprovechamiento de energía eólica, que permite obtener un gran rendimiento debido a que dispone de unos sistemas de abatimiento y plegado de las palas, que permiten una mínima resistencia al viento cuando las palas se desplazan en contra del mismo.

Así mismo la patente WO2008/056003A1 (2008), refiere un aerogenerador de eje vertical con rotor compuesto por brazos en estrella y paralelos que soportan en cada uno de ellos una pala articulada sobre ejes verticales. Los brazos poseen elementos de fijación que permanecen fijos y pueden moverse libremente con relación a estos.

Otro desarrollo es el referido en la patente US 10,844,834 B2 (2020), en la que se describe una turbina eólica flotante que comprende una plataforma flotante y una turbomáquina que reposa sobre la plataforma, así como una turbomáquina: la primera y segunda turbina son de flujo axial transversal y dispuestas simétricamente con respecto a un primer plano,



conteniendo cada turbina palas que forman las partes centrales y que se prolongan en los extremos mediante brazos, conectadas a elementos de eje mediante conexiones pivotantes, que contienen además en cada turbina carenados superior e inferior; y una estructura de sujeción de las turbinas que comprende una columna central vertical entre las turbinas y aguas arriba de un segundo plano que contiene los ejes de rotación de las palas de las turbinas.

En otros intentos en la patente US 10, 316, 821 B2 (2019) se propone un aerogenerador que posee un mástil vertical con una o más unidades de turbina soportadas sobre el mismo y se pueden mover verticalmente a lo largo de la altura del mástil mediante un sistema de cabrestante.

En la patente US 9, 909, 566 B2 (2018) se muestra un dispositivo que comprende una turbina eólica de eje vertical, con un brazo de fijación, una carcasa acoplada al brazo, un generador alojado dentro de la carcasa y cuatro palas con perfil NACA (Comité Asesor Nacional de Aeronáutica) colocadas a 90 grados a lo largo de la carcasa exterior verticalmente.

Al analizar la patente US 9, 938, 962 B2 (2018), se tiene que la misma se fundamenta en un aerogenerador de álabes curvos torcidos respecto a su eje central y equidistantes alrededor de un eje central perpendicular a la dirección del viento. La turbina eólica incluye una porción inflable que comprende una o más palas y un dispositivo para accionar de manera giratoria la porción inflable a una velocidad y tiempo predeterminados.

La patente W02005/085633 (2005), se refiere a un sistema generador de energía a través del viento que comprende un rotor con un eje vertical y un cuerpo central desviado. Presenta hojas laterales y un cuerpo interior desviado que se conectan por platos paralelos. El ancho de estos platos es mayor que la de las hojas laterales. De Igual manera la patente US 5494407 (1996), trata de un rotor con dos alas, donde cada una tiene un eje interior con un eje exterior de las alas posicionados en un círculo que define el diámetro del rotor. Ambas invenciones se refieren a turbinas eólicas, que pueden tener gran irregularidad dependiendo de las condiciones climatológicas predominantes.

La patente ES 2 313 854 B1 (2010), se refiere a un sistema multifuncional de generación de energía eléctrica, agua caliente sanitaria y climatización, compuesto por un generador



de eje vertical formado por la combinación de un Savonius de dos alabes y un rotor H de 2 alas con perfil NACA, situados a 180 grados.

Otra de las turbinas de eje vertical es la que se refiere en la patente ES 2 364 977 T3 (2008), y se basa en un rotor que está constituido por una estructura de soporte dotada de palas ajustables, y está dispuesta en el extremo superior de una columna de apoyo.

En la patente ES 2 377 258 A1 (2009), se muestra un aerogenerador eólico con una turbina de eje vertical que posee un acumulador de energía hidráulico de nitrógeno y turbina izable con cinco, seis u ocho brazos, provistos de velas rotativas por su eje central, brazos con sistema de contrapesos, sobre guía de desplazamiento lineal según la velocidad de giro, contando con una bomba hidráulica, un acumulador generador, un motor y freno hidráulico. Adicionalmente, el mástil se sitúa sobre una plataforma enclavada en el mar incorporando paletas y flotadores que, por oleaje, accionan una bomba hidráulica que genera energía que se acumula en un depósito de aceite hidráulico con nitrógeno. También, incorpora hélices sumergidas en los puntales de la plataforma, que, movidas por las corrientes marinas, transmiten energía hidráulica al acumulador.

La turbina y aerogenerador eólico de eje vertical para la generación de energía referida en la patente ES 2 578 554 A1 (2016), comprende una serie de palas con perfil NACA que se encuentran torcidas tantos grados como el resultado de dividir 360° por el número de palas existentes, para que así todas ellas cubran los 360° de rotación y comprende un báculo, un dispositivo de iluminación y un generador eléctrico acoplado a la base de dicha turbina. La turbina es capaz de iniciar su movimiento a partir de velocidades bajas de viento. Su aplicación fundamental es en alumbrados públicos.

En esencia en la patente ES 2 586 662 T3 (2016), se hace referencia a un aerogenerador cuyo rotor de eje vertical es accionado por medio de perfiles alares genéricamente designados como "cometas".

En el documento de patente ES 2 620 927 (2017) se tiene una turbina de eje vertical que comprende una turbina eólica que se compone de una pluralidad de álabes compuestos, dispuestos en posición vertical, que están formados exteriormente por un anverso con superficie convexa y por un reverso con superficie cóncava, con la finalidad de generar una fuerza horizontal de arrastre que provoca un movimiento angular de una turbina eólica, y en cuyo interior cada álabe compuesto dispone de una pluralidad de palas con perfil aerodinámico, dispuestas en posición horizontal, situadas en la parte central de una



pluralidad de deflectores, cuya finalidad es generar una fuerza vertical de arrastre, opuesta a la dirección de la gravedad, y una fuerza horizontal de sustentación que favorece el movimiento angular.

Otro documento de patente en el que se describe una turbina eólica de eje vertical es el denominado D01 con número de publicación US 10 7344353 B2 (2008), titulado: "Helical wind turbine".

En otro documento de patente referido como D02 con número de publicación ES 2364828 B2 (2010) y titulado: "Rotor eólico de eje vertical", se describe un rotor constituido por un eje vertical, dos soportes horizontales extremos y una pluralidad de álabes alternos de arrastre y de sustentación.

En el documento de la patente ES 2 661 060 A1 (2018), se refiere a una turbina eólica de eje vertical, con paso y geometría de pala fractal variable, controlada por computadora, lo que proporciona mejores prestaciones y rendimiento frente a las turbinas convencionales.

Considerando lo anterior, se observa que en los últimos años varias utilidades de generación de electricidad han concebido la necesidad de promover la generación distribuida de la electricidad como un medio de descentralización de la red eléctrica comercial, que sufre de plantas de generación centralizadas y líneas de conmutación. Por lo tanto, como el interés en cogeneración crece, hay una necesidad de mejorar la eficiencia en los dispositivos de generación de electricidad utilizando energías renovables.

Por lo tanto, en esta investigación se expone el desarrollo de un prototipo de mini turbina eólica de eje vertical, con álabes curvos truncados basados en la espiral de Fibonacci, diseñada para alta eficiencia con las velocidades de viento del sureste de México.

2. Metodología

El trabajo se estructuró en tres etapas fundamentales, el diseño, la fabricación y validación del rotor basado en la geometría de la espiral de Fibonacci y relación aspecto considerando la proporción áurea.

Para estudiar el comportamiento del rotor se establece un diseño estadístico de experimentos factorial a tres niveles del tipo $N=3^K$, con un número de factores o variables de entrada (K) igual a Dos. Tales factores son: número de álabes (NA) 2, 4 y 6, velocidad del viento (Vv), nivel mínimo 6.4 m/s, nivel medio 7.6 m/s y nivel alto 8.8 m/s. Variables



de salida: potencia eólica (P_e), potencia del rotor (P_r), el TSR (Tip-Speed Ratio); eficiencia de la turbina en función del coeficiente de potencia (C_p) y velocidad de rotación (rpm). Los experimentos se realizaron según la matriz experimental descrita en la Tabla 1.

Tabla 1- Matriz de los experimentos. Fuente: Elaboración propia.

N	Vv (m/s)	NA
1	6.4	2
2	8.8	4
3	8.8	2
4	7.6	6
5	7.6	4
6	6.4	4
7	6.4	6
8	8.8	6
9	7.6	2

Para cada corrida experimental se asignó un numero de réplicas igual a cinco. A partir de la matriz experimental se diseñaron y fabricaron tres prototipos de rotores con 2, 4 y 6 álabes (figura 1, 2 y 3).

En la fabricación de los álabes se utiliza material compuesto, matriz polimérica, reforzado con fibras naturales (bambú, fibra de coco y bagazo de caña de azúcar, lo que lo hace ligero, resistente a las condiciones de operación y ambientales, así como elevada durabilidad.

El rotor que se propone aprovecha vientos bajos y turbulentos, por lo que facilita su colocación a baja altura, y funcionamiento a bajas velocidades de viento, garantizando un alto rendimiento, menor ruido en funcionamiento, lo que reduce de manera sustancial la contaminación acústica. El rotor es de fácil ensamblaje, montaje y mantenimiento, así como compacto, robusto y de elevada eficiencia, generando la tensión y la potencia necesaria a bajas velocidades de rotación.

El rotor tiene como ventajas la transformación de la energía del viento, a bajas velocidades con un par de arranque a velocidades de 2 m/s y baja altura. De igual manera no requiere de dimensiones grandes de los álabes de la turbina, lo que lo hace fácilmente aplicable a diferentes tipos de generadores en la mini eólica, para satisfacer las necesidades energéticas requeridas en una vivienda.

En la concepción del rotor se establecen varios elementos importantes tales como: los álabes ajustados a la espiral de Fibonacci con puntas redondeadas se fijan aun plato soporte y un eje tubular perpendicular a la base (Figura 1). Todo el rotor se coloca en el eje de giro del generador eléctrico de imanes permanentes.

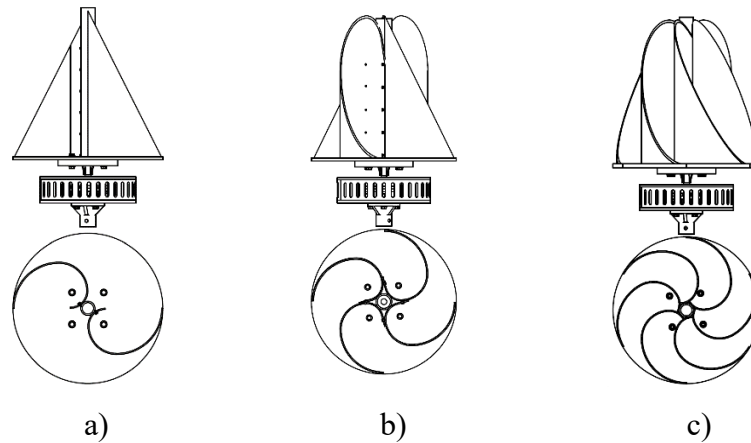


Figura 1. Rotor de alabes curvos truncados con perfil Fibonacci, a) Rotor de 2 álabes; b) Rotor de 4 álabes y c) Rotor de 6 álabes. Fuente: elaboración propia.

3. Resultados y discusión.

El estudio del comportamiento del rotor se realizó en el túnel de viento (TVE CIEX-5/10) del laboratorio de Tribología, Ingeniería de materiales y Energía de la Universidad Tecnológica de Campeche (figura 2).



Figura 2. Túnel de viento. Fuente: Elaboración propia.

El túnel permite varias velocidades en un rango de 5 a 10 m/s. Para los experimentos se reguló y calibró el túnel a velocidad mínima de 6.4 m/s, velocidad media de 7.6 m/s y velocidad máxima de 8.8 m/s. Estas velocidades semejan las condiciones de viento del sureste de México a bajas alturas.



Como variables del estudio se tienen: Cp, Pe, TSR y las rpm.

Del manejo, análisis y procesamiento de los resultados se tienen los siguientes resultados:

3.1 Análisis del coeficiente de potencia para el rotor de espiral de Fibonacci de álabes curvos truncados

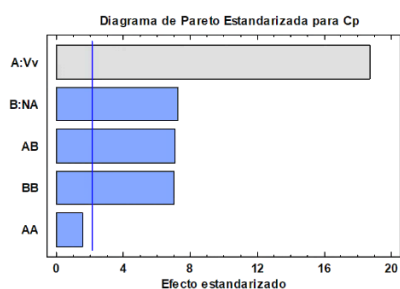
Para conocer el comportamiento del Cp, la Pe, el TSR y los rpm se realizó un análisis de varianza (ANOVA), el cual muestra la influencia de las variables objeto de estudio sobre la eficiencia del rotor tipo espiral de Fibonacci como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Análisis de varianza (ANOVA), para el Cp, Pe, TSR y los rpm. Fuente: Elaboración propia.

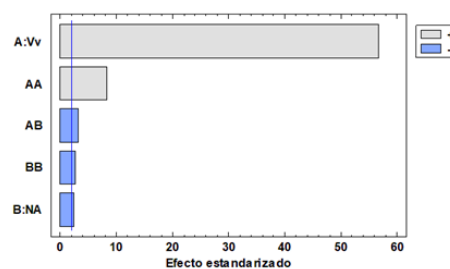
Variables	Valor-P para Cp	Valor-P para Pe	Valor-P para TSR	Valor-P para rpm
A:Vv	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
B:NA	0.0000	0.0280	0.0000	0.0000
AA	0.1356	0.0000	0.1807	0.0000
AB	0.0000	0.0036	0.0000	0.0000
BB	0.0000	0.0102	0.0000	0.0000
R-cuadrada	97.21%	98.95 %	97.47 %	99.98 %
R-cuadrada (ajustada por g.l.)	95.82 %	98.69 %	96.82 %	99.97 %

Como se puede observar en la tabla 2, se tiene que tanto la velocidad del viento como el número de álabes tiene influencia significativa sobre el Cp, Pe, el TSR y las rpm, dado que el valor-p es menor 0.05. De igual manera se tiene que el estadístico R-Cuadrada ajustado, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes en todos los casos es superior al 95%, lo que valida dichos modelos para predecir el comportamiento del Cp, Pe, TSR y las rpm.

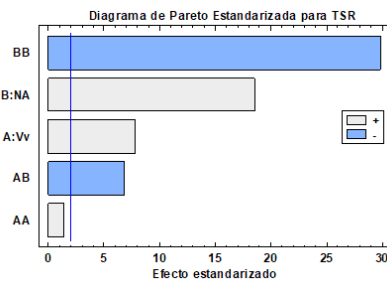
Con el objetivo de conocer el efecto de factores (velocidad del viento y el número de álabes), sobre las variables objeto de estudio se realiza el análisis de Pareto (Figura 3).



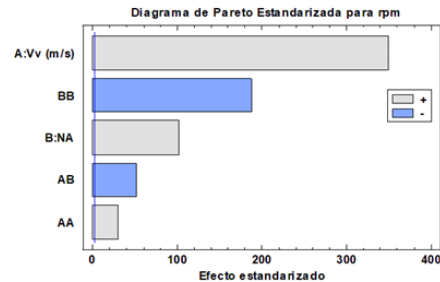
a)



b)



c)



d)

Figura 3. Diagrama de Pareto estandarizado; a) Coeficiente de potencia (C_p); b) Potencia eólica (P_e), c) Coeficiente específico de Velocidad (TSR), d) Velocidad de giro del rotor (rpm). Fuente: Elaboración Propia.

Como se observa en las figuras 3a-d) se tiene que tanto para el coeficiente de potencia, la potencia eólica, el coeficiente específico de velocidad y la velocidad de giro del rotor, la velocidad del viento tiene una influencia significativa positiva. Es decir que mientras mayor sea y lo hace de manera positiva, es decir mayor velocidad de viento, mayores valores del C_p , la P_e , el TRS y los rpm. De igual manera se tiene que el número de álabes tiene influencia significativa sobre las variables objeto de estudio, con un efecto positivo sobre el TSR, y los rpm. Incremente el número de álabes, incrementa estas dos variables. Para el caso de la potencia eólica y el coeficiente de potencia el incremento del número de álabes trae consigo una disminución de ambas.

A partir del manejo y procesamiento de los resultados experimentales se obtuvieron los modelos matemático empírico que predice el comportamiento del coeficiente de potencia (ecuación 1), la potencia eólica (ecuación 2), el coeficiente de velocidad específica (ecuación 3), y los rpm (ecuación 4), todos aplicables a la región experimental objeto de estudio. Las ecuaciones del modelo ajustado se presentan a continuación.

Para el coeficiente de Potencia:

$$C_p = 0.46 + 0.017 \cdot V_v + 0.013 \cdot NA - 0.00056 \cdot V_v^2 - 0.00089 \cdot V_v \cdot NA - 0.00089 \cdot NA^2 \quad (1)$$

Para la potencia eólica (P_e):

$$P_e = 2111.49 - 764.07 \cdot V_v + 162.54 \cdot NA + 78.44 \cdot V_v^2 - 12.71 \cdot V_v \cdot NA - 9.39 \cdot NA^2 \quad (2)$$

Para el coeficiente específico de velocidad (TSR):

$$TSR = 0.134 - 0.011 \cdot V_v + 0.33 \cdot NA + 0.0038 \cdot V_v^2 - 0.0081 \cdot V_v \cdot NA -$$

$$- 0.030 \cdot NA^2 \quad (3)$$

Para la velocidad de giro del rotor (rpm):

$$\text{rpm} = -28.09 - 17.22 \cdot V_v + 100.82 \cdot NA + 4.049 \cdot V_v^2 - 2.94 \cdot V_v \cdot NA - 9.097 \cdot NA^2 \quad (4)$$

Los valores de las variables están especificados en sus unidades originales.

Considerando los modelos matemáticos se analizó el efecto de las variables objeto de estudio, donde se tiene que, con el incremento de la velocidad del viento, incrementan el C_p , Pe , TSR y las rpm. El C_p varía en el rango de 0.562 a 0.573, la Pe en un rango de 600 a 1,550 Watt, el TSR en un rango de 0.88 a 0.88 y los rpm de 210 a 290 min^{-1} , mientras que alrededor del número de alabes igual a 4, afecta dichas variables de manera parabólica como se muestra en las figuras 4a-d).

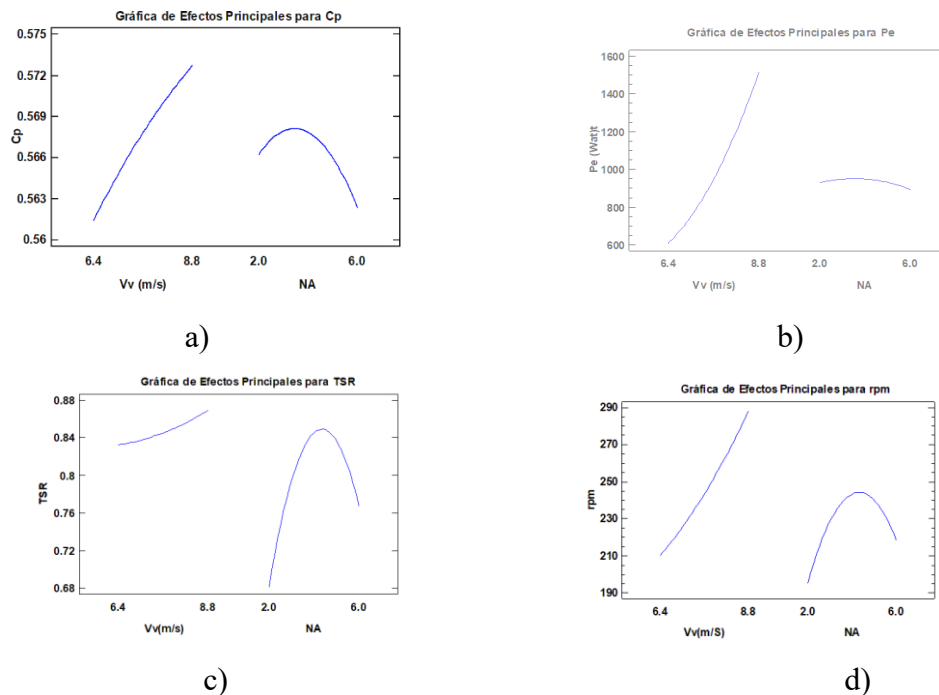


Figura 4. Efectos principales de la velocidad del viento y el número de álabes sobre: a) C_p ; b) Pe ; c) TSR y d) rpm. Fuente: Elaboración propia.

Al estudiar el comportamiento de las variables mediante el análisis de la superficie de respuesta se observa que las mismas tienen un comportamiento no lineal aumentando y disminuyendo y pasando por un valor máximo para el caso del número de álabes, este valor máximo corresponde al número de álabes igual a cuatro (Figuras 5a-d).

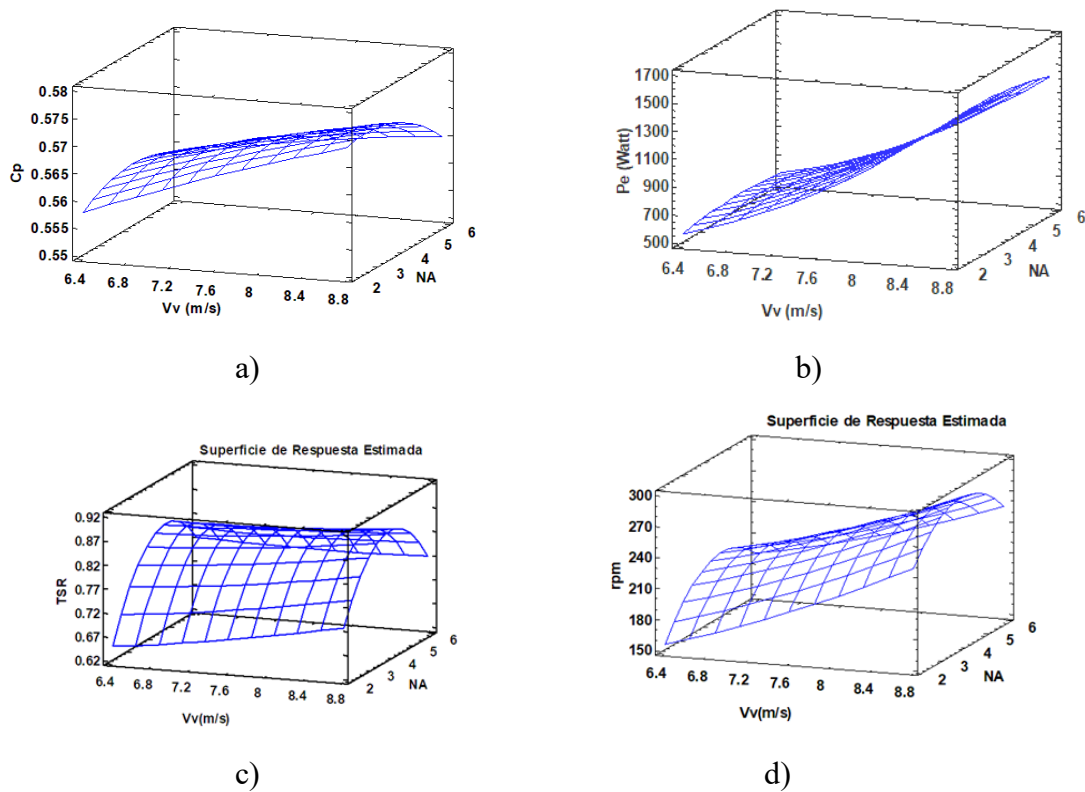
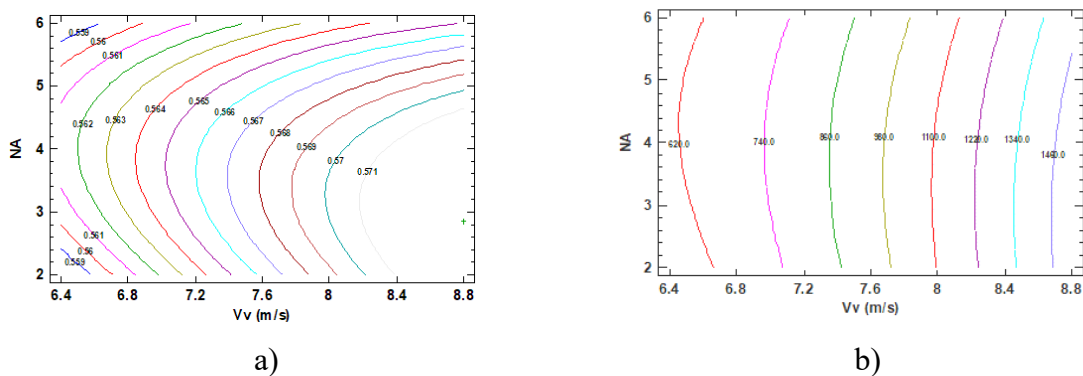


Figura 5. Superficie de respuesta del comportamiento de la velocidad del viento y el número de álabes sobre: a) C_p ; b) P_e ; c) TSR y d) rpm. Fuente: Elaboración propia.

Cuando se fija el número de álabes igual a 4 y se varia la velocidad del viento la tendencia es siempre al incremento del C_p , P_e , TSR y las rpm.

Finalmente se construyen las isolíneas de respuesta para el coeficiente de potencia C_p , P_e , TSR y la velocidad de giro del rotor, las cuales permiten obtener las superficies de contorno para la respuesta estimada.



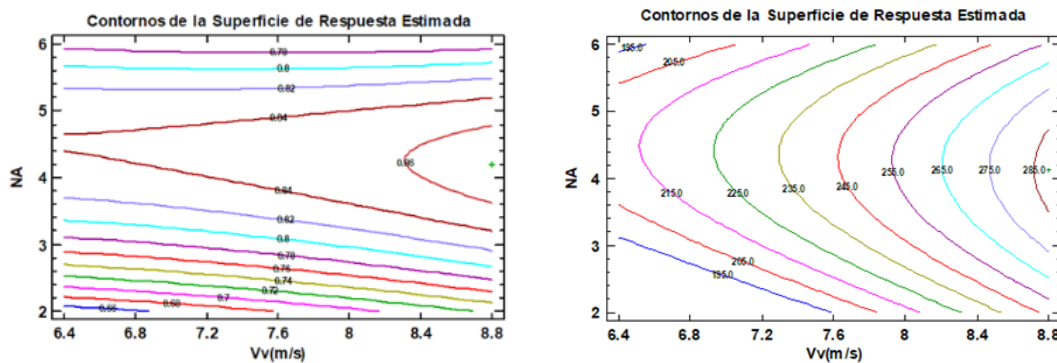


Figura 6. Isolíneas de respuesta del comportamiento de la velocidad del viento y el número de álabes sobre: a) C_p ; b) P_e ; c) TSR y d) rpm. Fuente: Elaboración propia.

Esta representación gráfica de las isolíneas permite visualizar las regiones de validez de las variables de entrada que se encuentran interactuando con las variables de respuestas, así, no solo permite visualizar de manera clara la variación del C_p , P_e , TSR y los rpm con respecto en dependencia de la velocidad del viento y el número de álabes, sino que también constituye una herramienta útil para la toma de decisiones de diseño, así como para consideraciones constructivas y la evaluación del desempeño aerodinámico del rotor.

4. Conclusiones

1. El análisis ANOVA mostró que tanto la velocidad del viento como el número de álabes afectan significativamente el coeficiente de potencia (C_p), la potencia eólica (P_e), el coeficiente específico de velocidad (TSR) y la velocidad de giro del rotor (rpm), con valores-p inferiores a 0.05. Además, los modelos empleados fueron validados por un R-cuadrada ajustado superior al 95 %, confirmando su alta capacidad predictiva.
2. El análisis de Pareto mostró que la velocidad del viento influye positivamente y de forma significativa en el coeficiente de potencia (C_p), potencia eólica (P_e), coeficiente específico de velocidad (TSR) y velocidad de giro del rotor (rpm). El número de álabes también tiene un impacto significativo, aumentando el TSR y los rpm, pero provocando una disminución en el C_p y la P_e al incrementarse.
3. El análisis de los modelos matemáticos reveló que el aumento en la velocidad del viento eleva el coeficiente de potencia (C_p), la potencia eólica (P_e), el coeficiente específico de velocidad (TSR) y la velocidad de giro del rotor (rpm), destacando



la velocidad del viento como un factor clave en el rendimiento de los sistemas eólicos.

4. El análisis de la superficie de respuesta reveló un comportamiento no lineal respecto al número de álabes, con un máximo en cuatro álabes, mientras que al mantener fijo este número y aumentar la velocidad del viento, todas las variables (C_p , P_e , TSR y rpm) mostraron una tendencia creciente, confirmando el efecto conjunto de ambas variables en el rendimiento del sistema eólico.
5. La generación de isolíneas y superficies de contorno para C_p , P_e , TSR y rpm permitió visualizar claramente su variación según la velocidad del viento y el número de álabes, constituyéndose en una herramienta útil para el diseño, la construcción y la evaluación aerodinámica del rotor.

5. Referencias bibliográficas

- 1.- Aranovich, J, Cooper F, Gayarre J. (2019). Vertical axis wind turbine system with one or more independent electric power generation (Patent Núm. 10316821B2). En us (Núm. 10316821B2).
- 2.- Bastán Pascual, J. (2009). Aerogenerador eólico de turbina de eje vertical con acumulador de energía hidráulico de nitrógeno (Patente Núm. 2 377 258). En España (2 377 258).
- 3.- Benesh, A. H. (1996). WINDTURBINE WITH SAVONIUS-TYPE ROTOR (Patent Núm. 5,494.407). En US (5,494.407).
- 4.- Blanco Damota, J., Rodríguez García, J. de D., Couce Casanova, A., Telmo Miranda, J., Caccia, C. G., & Galdo, M. I. L. (2022). Optimization of a nature-inspired shape for a vertical axis wind turbine through a numerical model and an artificial neural network. *Applied Sciences* (Basel, Switzerland), 12(16), 8037. <https://doi.org/10.3390/app12168037>
- 5.- Chaichana, T., & Chaitep, S. (2010). Wind power potential and characteristic analysis of Chiang Mai, Thailand. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 24(7), 1475–1479. <https://doi.org/10.1007/s12206-010-0415-3>
- 6.- Eguizabal García, J. (2010). ROTOR EÓLICO DE EJE VERTICAL (Patent Núm. 2364828 B2). En España (2364828 B2).
- 7.- Estrada Ignacio, G.-A. D. (2010). Dispositivo multifuncional de generación de energía eléctrica, agua caliente sanitaria y climatización (Patent Núm. 2 313 854). En España (2 313 854).



- 8.- Estratégicos, P. N. (s/f). Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. Secihti.mx. Recuperado el 1 de septiembre de 2025, de https://secihti.mx/wp-content/uploads/pronaces/micrositios/energia_y_cambio_climatico/energia/policy_briefs/Policy_Brief_IV_Pronaces_ECC.pdf.
- 9.- Garcia, A. (2008). Aerogenerador de eje vertical para el aprovechamiento de energía eólica (Patent Núm. 2008/003802A1). En World Patent (2008/003802A1).
- 10.- Herrera Beltrán, J. D., Campos Amezcua, R., Zagoya Juárez, V., Ricoy Zárate, E. G., & Rosado Tamariz, E. (2023). Cálculo de coeficientes aerodinámicos de perfiles de aerogeneradores mediante OpenFOAM. Tendencias en energías renovables y sustentabilidad, 2(1), 401–414. <https://doi.org/10.56845/terys.v2i1.382>.
- 11.- Guillen, O. (2015). energía eolica para generacion eléctrica. México: trillas
- 12.- Jean-Luc, A. (2020). Floating wind turbine having twin vertical-axis turbines with improved efficiency. En US.
- 13.- Jones, T. (2018). VERTICAL AXIS WIND TURBINES (Patent Núm. 9,909,566 B2). En US (9,909,566 B2).
- 14.- Manzano Kharman, A. M. (2018). Turbina Eólica Fractal de eje vertical DE EJE, (Patent Núm. 2 661 060). En España (2 661 060).
- 15.- Massimo, I., Taddei F. (2016). Sistema eólico para convertir energía a través de una turbina de eje vertical accionada por medio de cometas (Patent Núm. 2586662). En España (Núm. 2586662).
- 16.- Niederkofler, R. (2005). Aerogenerador con eje de rotación vertical y deflexión central (Patent Núm. W02005/085633). En Internacional (W02005/085633).
- 17.- Pertti H. Naskali, Angus MacLean ,Neil Herbert C. C. Gray, J. Harry Lewis, A. Patrick Newall. (2008). Helical wind turbine (Patent Núm. 7,344,353 B2). En US (7,344,353 B2).
- 18.- Ponta, F., Seminara, J., & Otero, A. (2006). On the aerodynamic of variable-geometry oval-trajectory Darrieus wind turbines. Renewable Energy, 32(1), 35-56. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.12.007>.
- 19.- Rosell Regla, C, Fortuny López, J. (2016). Turbina y aerogenerador eólico de eje vertical para la generación de energía (Patent Núm. 2 578 554). En España (2 578 554).
- 20.- Sáenz-Díez Muro, J. C., Jiménez Macías, E., Blanco Fernández, J., Niño Martín, D., García Alcaraz, J. L., Maldonado Macías, A. A., & Luis y Báez López, Yolanda Angélica, H. A. J. (2017). Aerogenerador de eje de rotación vertical con turbina eólica de álabes compuestos (Patent Núm. 2 620 927). En España (2 620 927).



- 21.- Sánchez, E. R. (2019). Obtención de la curva de potencia de un aerogenerador de 2mw, mediante un modelo cfd, para el pronóstico de generación, Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp).
- 22.- Saquet, T. M. (10-05-2018). Method for controlling a wind turbine (Patent Núm. 9938962). En US (Núm. 9938962).
- 23.-Suarez, A. (2008). Generador Eólico (Patent Núm. 2008/056003A1). En World Patent (2008/056003A1).
- 24.- Taus, J. (2008). Turbina eólica con eje de rotación vertical (Patent Núm. 2 364 977). En España (2 364 977).