

Diseño y estudio de un aerogenerador de 1 kW para uso doméstico

Engineering and analysis of a 1 kW domestic wind turbine

Diego Moisés Almazo Pérez¹ ✉ , Néstor D. Galán H.² , Carlos Alberto Gómez Álvarez¹, Eber E. Orozco G.² 

¹Departamento de Ingeniería Industrial y Manufactura, Instituto de Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Ciudad Juárez, Chihuahua, México

²Profesor de tiempo completo, Ingeniería en Energía, Universidad Politécnica de Sinaloa, Mazatlán, Sinaloa, México

RESUMEN

Los aerogeneradores de eje horizontal de potencia de 1 kW, ofrecen una alternativa viable para la generación de energía limpia en hogares. Mediante la aplicación de los modelos teóricos de Rankine-Froude y Elemento de Pala, este trabajo presenta un diseño detallado que contribuye a la reducción de la dependencia de fuentes de energía fósiles y promueve la sostenibilidad energética. En el presente trabajo, se muestra detalladamente el proceso de diseño de un aerogenerador de eje horizontal con una potencia de 1 kW empleando el modelo teórico de Rankine-Froude y modelo del Elemento de Pala, para las cuales se trabajó con perfiles NACA de cuatro dígitos con una ordenada de 0.4 al 40 % de la cuerda, con diferentes espesores con MATLAB® se ha calculado el perfil alar para posteriormente construir el aerogenerador. El análisis estadístico del recurso eólico (10 m de altura) para la ciudad de Saltillo, Coahuila, México, donde se han realizado las pruebas de funcionamiento muestra que con una velocidad mínima de 6 m/s se puede generar energía eléctrica.

PALABRAS CLAVE: aerogenerador; energía eólica; perfil aerodinámico; sostenibilidad energética; viento.

ABSTRACT

Low-power (1 kW) horizontal axis wind turbines offer a viable alternative for clean energy generation in homes. By applying the theoretical models of Rankine-Froude and Blade Element, this work presents a detailed design that contributes to reducing the dependence on fossil fuels and promotes energy sustainability. This paper presents a detailed design process of a 1 kW horizontal axis wind turbine using the Rankine-Froude and Blade Element theoretical models, for which NACA 44xx series airfoils have been used, and MATLAB® has been used to calculate the airfoil profile to subsequently build the wind turbine. The statistical analysis of the wind resource (10 m height) for the city of Saltillo, Coahuila, Mexico, where the operational tests have been carried out, shows that with a minimum wind speed of 6 m/s, electrical energy can be generated.

KEYWORDS: wind turbine; wind energy; aerodynamic profile; energy sustainability; wind.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Diego Moisés Almazo Pérez

INSTITUCIÓN: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez / Instituto de Ingeniería y Tecnología

DIRECCIÓN: Av. del Charro núm. 450 norte, col. Partido Romero, C. P. 32310, Ciudad Juárez, Chihuahua, México

CORREO ELECTRÓNICO: diego.almazo@uacj.mx

Fecha de recepción: 5 de noviembre de 2025. **Fecha de aceptación:** 20 de marzo de 2025. **Fecha de publicación:** 25 de marzo de 2025.



I. INTRODUCCIÓN

El viento es una fuente de energía libre, limpia e inagotable. Durante décadas ha sido utilizada en el transporte, la industria y la agricultura. Con la aparición de los aerogeneradores se ha aprovechado esta energía para generar energía eléctrica. En el año 2023 en México, el 5 % de la generación eléctrica fue proveniente de la energía eólica, mientras que más del 70 % por energía fósil, siendo esta el mayor contaminante por las emisiones de CO₂. Es importante mencionar que solo nueve estados son productores de esta energía limpia y que el 98.7 % de la población tiene acceso al servicio de energía eléctrica en México [1].

El presente trabajo, pretende motivar a personas interesadas en la generación de energía a través de aerogeneradores de bajo costo, contribuyendo a la reducción de la problemática ambiental, así como a la disminución de gastos por consumo de energía eléctrica al poder ser utilizados en ciudades o lugares donde no se tiene acceso a este servicio.

El Laboratorio Nacional de Energía Renovable [2] ha señalado que los sistemas eólicos de pequeña escala son capaces de aportar una contribución sustancial al suministro eléctrico de los hogares. Aunque su tamaño sea reducido en comparación con las grandes turbinas industriales, estas unidades pueden generar suficiente energía para cubrir una porción significativa del consumo doméstico.

La falta de acceso a electricidad para muchos hogares en México podría reducirse mediante la instalación de aerogeneradores caseros capaces de producir hasta 1 kW de potencia para uso doméstico, como encender focos, prender una estufa o licuadora, calentar el agua, etc.

Los aerogeneradores son máquinas que capturan la energía cinética del viento y, a través de un proceso de conversión, la transforman en energía eléctrica utilizable. Esta transformación consiste en tres procesos cuyo fin es mover un generador eléctrico, los cuales son [3] los siguientes:

- Aerodinámica. Obtención de la mayor cantidad de energía por perfiles aerodinámicos.
- Mecánica. Conversión de energía cinética a energía mecánica por medio del rotor.

- Eléctrica. Conversión de energía mecánica a energía eléctrica por medio del generador.

II. METODOLOGÍA

A. MODELO COMBINADO

El comportamiento de una hélice puede ser modelado a través de dos teorías principales: Rankine-Froude y el modelo del Elemento de Pala, las cuales permiten establecer un conjunto de ecuaciones no lineales que relacionan el ángulo ε de las palas y las velocidades inducidas a y b en el plano del disco de la hélice, donde C_L es el coeficiente de levantamiento y C_D es el coeficiente de arrastre:

$$f(\varepsilon) = \tan(\varepsilon) \frac{Jb + \pi x a}{J(J+a) + \pi x(\pi x - b)} \quad (1)$$

$$a = \frac{\frac{8x}{\sigma} \text{sen}(\vartheta + \varepsilon)(C_L \pi x - C_D) - (C_L^2 + C_D^2)J}{\left[\frac{8x}{\sigma} \text{sen}(\vartheta + \varepsilon) + C_D\right]^2 + C_L^2} \quad (2)$$

$$b = \frac{\frac{8x}{\sigma} \text{sen}(\vartheta + \varepsilon)(C_L J + C_D \pi x) + (C_L^2 + C_D^2)\pi x}{\left[\frac{8x}{\sigma} \text{sen}(\vartheta + \varepsilon) + C_D\right]^2 + C_L^2} \quad (3)$$

Las unidades de velocidad son nD y la velocidad de avance de la hélice, donde n es número de revoluciones y D es el diámetro de la hélice y queda representada mediante el llamado coeficiente de funcionamiento (o factor de avance J), como se establece en la ecuación (4):

$$J = \frac{V}{nD} \quad (4)$$

Del mismo modo, las velocidades inducidas quedarán representadas por los números:

$$a = \frac{a'}{nD} \quad (5)$$

y

$$b = \frac{b'}{nD} \quad (6)$$

Finalmente, se introduce un número adimensional para representar la “densidad” de las palas con respecto al disco de la hélice:

$$\sigma = \frac{Nc}{nD} \quad (7)$$

A este número se conoce con el nombre de solidez σ [4].

B. SELECCIÓN DEL PERFIL AERODINÁMICO

La optimización del rendimiento de una hélice de aerogenerador pasa por la elección de un perfil aerodinámico con un alto coeficiente de sustentación y un bajo coeficiente de resistencia, lo que se traduce en una elevada relación sustentación/resistencia. Esto normalmente se obtiene tomando aquellos perfiles que poseen altos valores de la relación sustentación sobre resistencia, C_L/C_D y luego, se debe considerar otras propiedades relacionadas con la forma en que C_L y C_D varían con el ángulo de ataque. Para las turbinas eólicas se sugieren aquellos perfiles en los cuales el coeficiente C_L alcanza su valor máximo en forma suave, evitando los que tienen picos agudos de C_L en función de α , en los cuales la abrupta caída de la sustentación puede producir fuertes vibraciones [5]. En base a la literatura de Manwell [6] y Abbott [7], los tipos de perfiles de la serie NACA 44xx y NACA 230xx cumplen con lo antes mencionado y son considerados los óptimos para aerogeneradores de baja potencia.

Los perfiles NACA son una familia de perfiles aerodinámicos normalizados, cuyo diseño geométrico está definido por un código numérico, el cual sirve como entrada para ecuaciones matemáticas que permiten generar la geometría exacta del perfil y calcular sus propiedades aerodinámicas.

La descripción de cada dígito de los perfiles de cuatro dígitos es la siguiente:

- El primer dígito determina la curvatura del perfil, especificando la máxima distancia que la línea media se desvía de una línea recta que une los extremos del perfil, como un porcentaje de la longitud total de la cuerda (% C).
- El segundo dígito del código NACA determina la posición a lo largo de la cuerda donde se encuentra la mayor curvatura del perfil. Esta posición se expresa como una fracción del 1 % de la longitud total de la cuerda, medida desde el borde de ataque.
- Los dos últimos dígitos del código NACA definen la ordenada máxima de la línea de espesor del per-

fil, expresada como un porcentaje de la longitud de la cuerda. Esta ordenada máxima indica el espesor máximo del perfil.

Para este proyecto se utiliza el perfil NACA 4412, siendo su descripción la siguiente:

- Flecha máxima del perfil 4 %.
- La abscisa de la ordenada máxima de la línea media del perfil corresponde al 40 % de la longitud de la cuerda.
- La ordenada máxima de la línea de espesor es del 12 % de la cuerda.

En la [Tabla 1](#) se muestran los datos de los valores de C_L y C_D del perfil NACA 4412, de acuerdo con el ángulo de ataque α .

TABLA 1
POLARES DEL PERFIL NACA 4412 [8]

α	C_L	C_D
-7.0	-0.314	0.0118
-4.0	-0.008	0.0102
-2.4	0.140	0.0097
-1.0	0.300	0.0094
0.6	0.453	0.0097
2.1	0.604	0.0100
5.2	0.896	0.0122
8.2	1.185	0.0162
11.4	1.444	0.0243
14.9	1.604	0.0539
16.9	1.595	0.1077
19.2	1.520	0.1922
26.3	1.167	0.4166

Los esfuerzos a los que se someterá el álabe se muestran en la [Figura 1](#) y serán los siguientes:

- Esfuerzo de flexión: los álabes tienden a flectarse debido a las fuerzas de empuje (1).
- Esfuerzos de tracción: los álabes sufren un empuje en la zona del buje debido a las fuerzas centrífugas (2).
- Esfuerzos de torsión: los álabes tienden a retorcerse hacia un ángulo de álabe menor debido a las fuerzas (3).

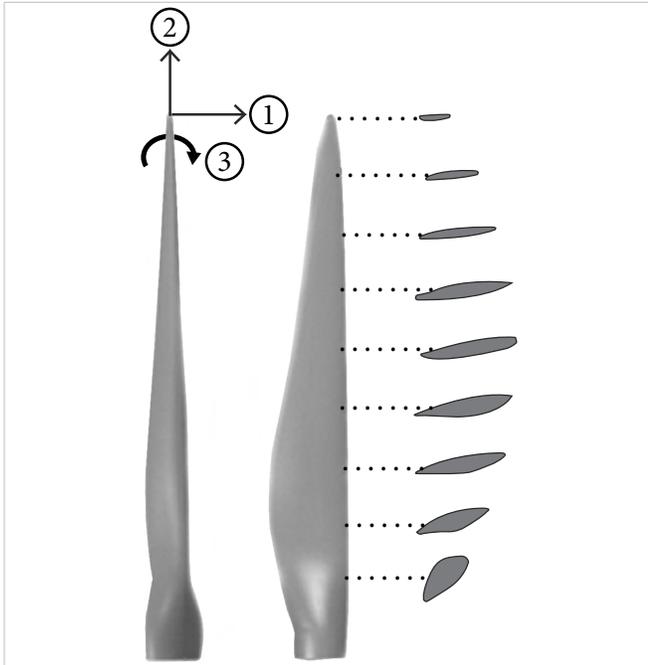


Figura 1. 1) Esfuerzo de flexión. 2) Esfuerzo de tracción. 3) Esfuerzo de torsión.

C. DISEÑO DE PALA Y COMPONENTES DEL AEROGENERADOR

El rotor consta de álabes, buje y cono:

- Álabes: material fibra de vidrio.
- Buje: lámina galvanizada con diámetro de 20 cm.
- Cono: impresión 3D, material PLA, diámetro: 20 cm.

Para determinar el tamaño de la hélice, se desarrolló la metodología descrita en Manwell [6] y Bleier [9], siendo necesario conocer la potencia máxima deseada del rotor, donde el espesor máximo y la envergadura de la pala son funciones principales del rendimiento aerodinámico deseado. En este proyecto, al ser la potencia requerida de 1 kW, las dimensiones recomendadas según la literatura son; una envergadura de 1.47 m, ideal para satisfacer lo requerido. En la [Tabla 2](#) se muestran los datos de la matriz de rotor.

TABLA 2
MATRIZ DE ROTOR

Perfil alar	NACA 4412
Diámetro de rotor	3 m
Envergadura	1.47 m
Espesor máximo	15.50 cm
Cuerda	2.50 cm

Otros componentes del aerogenerador son los siguientes:

- Eje de baja velocidad: tubo galvanizado 2.5 cm longitud de 16 cm.
- Multiplicador: tren de engranajes con estrellas de bicicleta de 45, 14, 40 y 10 dientes.
- Eje de alta velocidad: tubo galvanizado 2.5 cm longitud de 11 cm.
- Torre: tubo galvanizado 2.55 m de longitud.
- Sistema de orientación: lámina galvanizada 34 × 27.5 cm.

D. DISEÑO DE COMPONENTES EN CAD

La [Figura 2](#) ofrece una vista general de un generador eólico de eje horizontal. Este aerogenerador cuenta con un rotor de tres palas y tiene unas dimensiones totales de 3 metros de diámetro de rotor y 4.02 metros de altura.

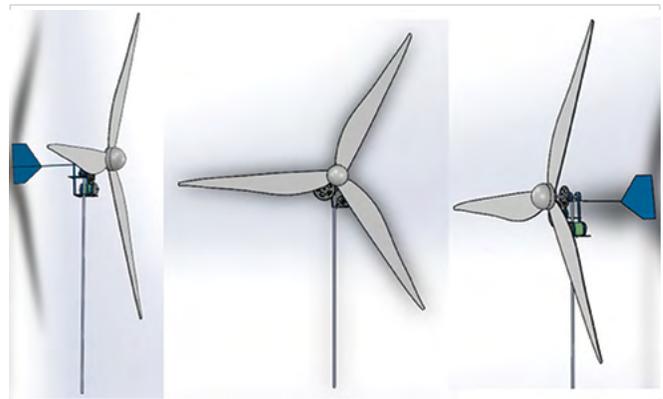


Figura 2. Ensamble del aerogenerador en CAD.

Álabe

Es la parte más importante del aerogenerador y la que más requiere de talento e ingeniería. Existen diversas formas para diseñar la pala o álabe. La sección transversal se diseñó a partir de la ecuación de perfil alar de 4 cifras NACA 4412 (ecuación (8)) para obtener la sección transversal del álabe ([Figura 3](#)). A partir de esta sección transversal se genera el alabe completo mostrado en la [Figura 4](#), donde y es la línea de curva, c es la cuerda, x es la distancia desde la punta y t es el espesor.

$$y_t = \frac{t}{0.2} c \left[0.2969x \sqrt{\frac{x}{c}} - 0.1260 \left(\frac{x}{c}\right) - 0.3516 \left(\frac{x}{c}\right)^2 + 0.2843 \left(\frac{x}{c}\right)^3 - 0.1015 \left(\frac{x}{c}\right)^4 \right] \quad (8)$$

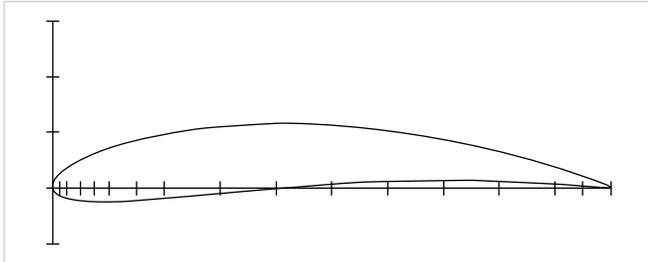


Figura 3. Perfil alar para el alabe del aerogenerador generado en Matlab.

La cuerda, el ángulo de ataque, el espesor y otros parámetros del álabe, se van variando en la programación en base a las velocidades de viento promedio de diseño.

Finalmente, después de modelar en Matlab (Figura 4), se obtuvo el álabe (Figura 5), con las características y formas deseadas, el cual se diseñó con el software SolidWorks.

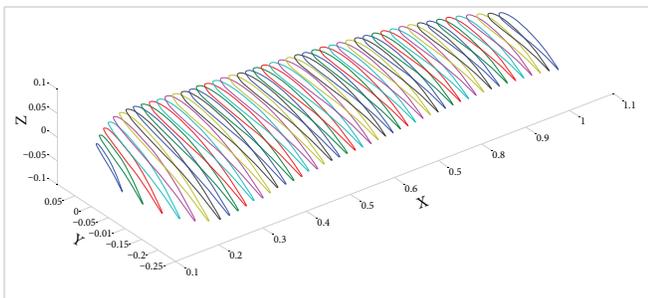


Figura 4. Álabe generado en Matlab a partir de 50 perfiles alares NACA 4412 con variación de cuerda, torcimiento y espesor del álabe.

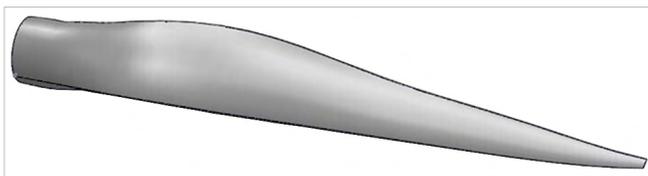


Figura 5. Álabe del aerogenerador en SolidWorks.

La manufactura de los alabes, puede ser realizada en un centro de maquinado CNC o en impresión 3D.

Una vez obtenidos los álaves del aerogenerador, se procedió a fabricarlos y a ensamblar el aerogenerador para realizar las pruebas (Figura 6).

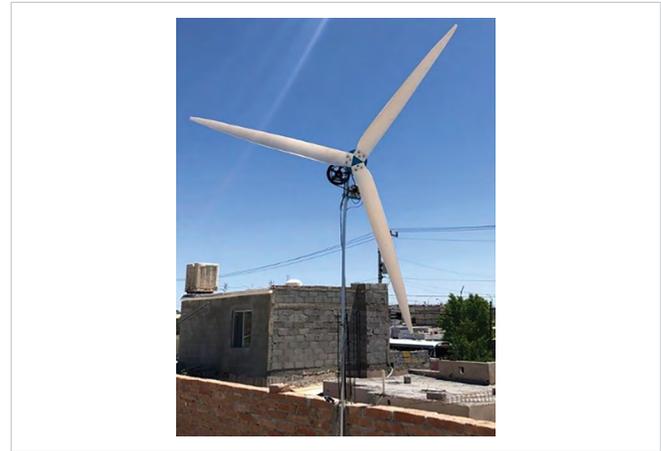


Figura 6. Aerogenerador instalado y funcionando.

E. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL VIENTO

Se realizó un estudio de potencial eólico en la ciudad de Saltillo, Coahuila, a 10 m de altura, para determinar las condiciones de operación del aerogenerador en generación distribuida. Además de los parámetros estadísticos tradicionales, como la velocidad media y la desviación estándar, se incluyeron indicadores energéticos, como la densidad de potencia y la potencia eólica disponible para una evaluación más exhaustiva del recurso eólico.

Estos resultados de velocidad media y desviación estándar permitirán estimar el factor de forma k ,

$$k = \left(\frac{\sigma}{\bar{v}}\right)^{-1.086} \quad (9)$$

y el factor de escala c en (m/s) es,

$$c = \bar{v} \left(0.568 + \frac{0.433}{k}\right)^{-1/4} \quad (10)$$

de la Función de Densidad de Probabilidad (FDP) de Weibull, que, a partir de la distribución de velocidades del viento, permite estimar tanto el potencial energético del sitio como la energía eléctrica que puede producir un aerogenerador en un año [10]. La FDP es expresada como sigue:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (11)$$

Debido a que las estaciones meteorológicas suelen medir la velocidad del viento a 10 metros sobre el suelo, es necesario aplicar la ley de Hellman para estimar la velo-

cidad del viento a la altura de rotor del aerogenerador, que en este caso es de 20 metros:

$$\frac{v'_w}{v_w} = \left(\frac{h'}{h}\right)^\alpha \quad (12)$$

donde v_w es la velocidad de viento medida a la altura h , v'_w es la velocidad del viento a la altura h' del buje, el factor α depende del tipo de rugosidad de la superficie y de la estabilidad atmosférica [11]. Numéricamente, α se encuentra en el rango de 0.1-0.3, adoptando para terrenos de asentamiento eólico el valor de 1/7.

F. CURVA DE POTENCIA

La curva de potencia de un aerogenerador es un gráfico que muestra la relación entre la velocidad del viento y la potencia eléctrica que puede generar el aerogenerador [12]. La curva de potencia depende de varios factores, como el diseño de las palas, el tamaño del rotor, la densidad del aire y el rendimiento del generador [13]. Para obtener la curva de potencia de un aerogenerador de 3 metros de diámetro a diferentes velocidades del viento desde 1 m/s a 10 m/s, se puede utilizar la siguiente fórmula:

$$P_e = \frac{1}{2} \rho A v_w^3 C_p \eta_G \quad (13)$$

donde P es la potencia eléctrica en Watts (W), ρ es la densidad del aire en kilogramos por metro cúbico (kg/m^3), A es el área barrida por el rotor en metros cuadrados (m^2), C_p es el coeficiente de potencia, que depende de la velocidad específica y el ángulo de paso, v_w es la velocidad del viento en metros por segundo (m/s) y η_G es la eficiencia del generador.

Con esta expresión, se puede calcular la potencia eléctrica para cada velocidad del viento desde 1 m/s a 16 m/s y graficar las curvas de potencia resultante.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. RECURSO EÓLICO

Del análisis estadístico de la velocidad de viento promedio horario anual se obtuvo el comportamiento de la velocidad del viento a la altura de medición (10 m) y su extrapolación a 20 m de altura (Figura 7), observando una velocidad media anual de 3.1 m/s a los 10 m de

altura y de 3.8 m/s a los 20 m de altura, con una desviación estándar de 1.4 m/s y 1.6 m/s respectivamente, con una intensidad de turbulencia de 0.47.

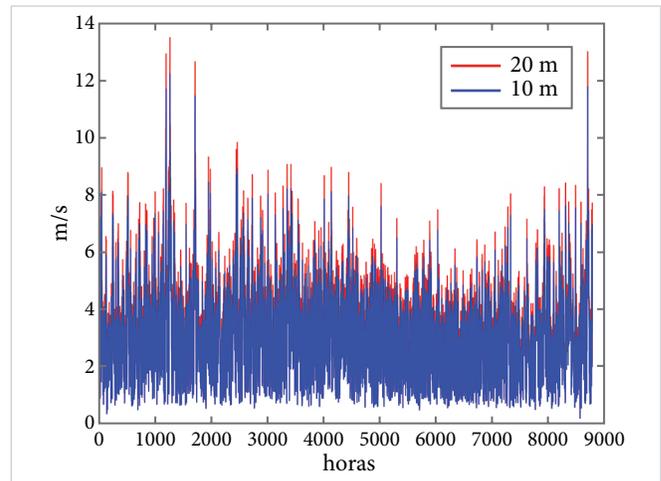


Figura 7. Velocidad de viento medio horario en Saltillo, Coahuila.

En la FDP de Weibull (Figura 8), el factor de forma para zonas propicias de asentamientos eólicos es de 2 a 2.5, donde existen vientos no turbulentos e intensos y el factor de escala debe ser muy cercano a la velocidad media anual, en este estudio se obtienen valores de $k_{10} = 2.22$ y $k_{20} = 2.47$ con factores de escala $c_{10} = 3.4$ m/s y $c_{20} = 3.8$ m/s, que indican que el lugar propuesto es apto para la microgeneración eólica.

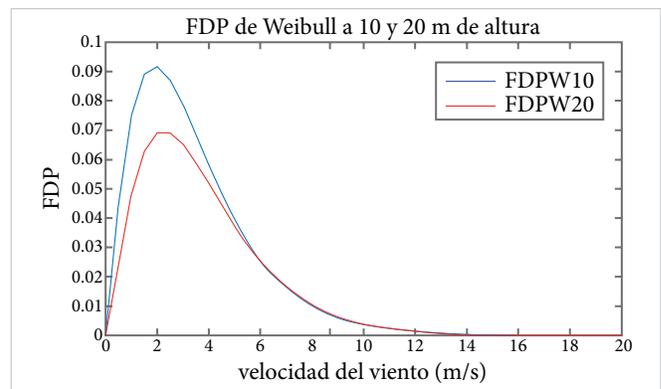


Figura 8. Distribución de Weibull para velocidades de viento a 10 y 20 m de altura.

Las curvas de potencia mostradas en la Figura 9 se estimaron para el área de barrido de la turbina del aerogenerador desarrollado y la velocidad del viento. Se obtuvo una potencia eólica disponible (en verde) con un crecimiento exponencial conforme se incrementa la velocidad del viento y con la eficiencia de la turbina se estimó la potencia aerodinámica (azul) que puede

extraerse de la energía cinética del viento y la potencia eléctrica generada considera la eficiencia del generador.

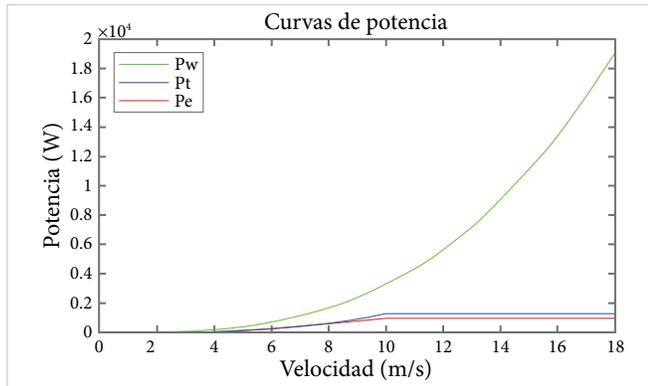


Figura 9. Potencia eólica disponible, aerodinámica y eléctrica en el aerogenerador.

B. PRUEBAS

Para realizar las pruebas correspondientes del aerogenerador se utilizó un multímetro digital, el cual permite medir magnitudes eléctricas, siendo las más comunes el voltaje e intensidad de corriente, lo que posibilitó estimar la potencia.

En la Figura 10 se muestra la gráfica del voltaje generado en un tiempo de 24 s, el mínimo es de 1.48 V y su pico máximo 18.97 V, estableciéndose a los 24 s en 18.31 V, con una velocidad promedio del viento de 6 m/s.

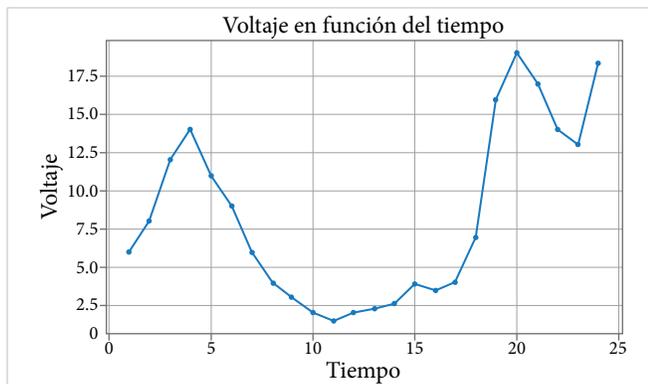


Figura.10. Gráfica del comportamiento del voltaje en función del tiempo.

IV. CONCLUSIONES

El viento es un recurso que está a disposición de todos. El que las personas puedan implementar proyectos como este, genera un cambio social, sobre todo en aquellos

lugares donde no se cuenta con energía eléctrica y se puede producir mediante un aerogenerador casero. La importancia de que este proyecto es significativa, ya que se puede realizar a partir de materiales reciclables y comúnmente encontrados en el mercado, además, de ser manufacturado de una manera sencilla, lo que hace posible que pueda ser replicado. El comprender cuál es la funcionalidad de cada componente ayuda a que puedan ser remplazados por otros que se tengan a la disposición cuando así sea necesario. El diseño propuesto para cada componente cumple con su finalidad de trabajo logrando el objetivo principal de construir un prototipo de aerogenerador y que este produzca energía eléctrica.

El aerogenerador resulta fácil de instalar y una vez puesto en marcha no se encuentran fallas en los componentes que impidan su funcionamiento. Los gastos que se generaron en la realización del proyecto se pueden ver como una inversión, ya que, desde el punto de vista económico, es posible recuperar la inversión a corto plazo por la producción de energía eléctrica.

REFERENCIAS

- [1] Secretaría de Energía, *Balance Nacional de Energía 2023*. México, 2025.
- [2] NREL, *Sistemas Eólicos Pequeños para Generación de Electricidad*. Santa Fe, Nuevo México: Departamento de Energía EE.UU., 2007.
- [3] L. De Miguel, "Estudio de viabilidad de la introducción al mercado y diseño de un molino aerogenerador lento para uso doméstico", proyecto final de grado, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2015.
- [4] D. M. Almazo, "Diseño y Manufactura de una Hélice para el Ventilador del Túnel de Viento A-X/8M", tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, 2012.
- [5] A. Ramírez, "Diseño de Álabes, Rotor y Transmisión de un Generador Eólico de eje Horizontal de 500 W", tesis de maestría, Instituto Tecnológico de Pachuca, Pachuca de Soto, 2019.
- [6] J. F. Manwell, J. G. McGowan y A. L. Rogers, *Wind Energy Explained: Theory, design and application*, 2.ª ed. Wiley, 2009.

- [7] I. H. Abbott y A. E. Von Doenhoff, *Theory of Wing Sections. Including a Summary of Airfoil Data*. Nueva York: Dover Publications, 1958.
- [8] E. N. Jacobs y R. M. Pinkerton, “Test of N.A.C.A. airfoils in the variable density wind tunnel. Series 44 and 64”, NASA, rep. n.º NACA-TN-401, 2013.
- [9] F. P. Bleier, *Fan Handbook: Selection, Application, and Design*. Nueva York: McGraw-Hill Education, 1998.
- [10] Z. R. Shu, Q. S. Li y P. Chan, “Statistical Analysis of Wind Characteristics and Wind Energy Potential in Hong Kong”, *Energy Convers. Manag.*, vol. 101, pp. 644-657, 2015, doi: [10.1016/j.enconman.2015.05.070](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.05.070).
- [11] M. Villarubia, *Ingeniería de la Energía Eólica*. España: Alfaomega, 2013.
- [12] “Curvas de Potencia de los Aerogeneradores”. AeroGeneradores.com. <https://aerogeneradores.com/curvas-de-potencia-de-los-aerogeneradores/> (accedido: sept. 10, 2023).
- [13] “Comparar las curvas de potencia de los aerogeneradores”. wind-turbine-models.com. <https://es.wind-turbine-models.com/powercurves> (accedido: sept. 10, 2023).

RECONOCIMIENTOS

A mi exalumna Laura Pamela Castro, por su contribución para este trabajo. Al CONHACYT por los fondos para la realización de este proyecto. Al Instituto Politécnico Nacional, la Universidad Politécnica de Sinaloa y la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez por las facilidades otorgadas y el apoyo.