

Diseño, construcción y evaluación de aerogeneradores para obtener energía eléctrica del viento

Cristhián Iván Urbano-Sandoval, Víctor Lennin Fernández-González, Jorge Ramírez-Muñoz *

Departamento de Energía, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco, Alcaldía Azcapotzalco, Ciudad de México, México.

* Autor de correspondencia: jrm@azc.uam.mx; Tel.: (+52 55 5318 9000, Ext. 2195)

Artículo de divulgación científica

Recibido: 27 de septiembre de 2024

Aceptado: 19 de noviembre de 2024

Publicado: 29 de noviembre de 2024

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v3i1.189>

Resumen: Se realizó el diseño, construcción y evaluación de tres prototipos de aerogeneradores horizontales usando una impresora tridimensional (3D) de filamentos para la manufactura. La estrategia seguida redujo la cantidad de recursos necesarios para un proyecto de este tipo, y permitió obtener dos diseños de aerogeneradores con eficiencias elevadas. Para la realización del proyecto se usó información de la literatura que se tiene actualmente sobre energía eólica, aerogeneradores y perfiles aerodinámicos, incluyendo a la impresión 3D como parte fundamental de este trabajo. Los prototipos realizados permiten un ensamble rápido en el túnel de viento existente en el laboratorio de termofluidos de la UAM-Azcapotzalco, y pueden ser usados para funciones de docencia o investigación. Se llevaron a cabo tres diseños de aerogeneradores: el primer diseño (SIUC-01) alcanzó una eficiencia neta de 36.99 %, el segundo diseño (SIUC-02) logró un 34.89 %, y el tercer diseño (ALAM-03) obtuvo un 12.19 %. La evaluación se realizó utilizando un tablero de cargas resistivas (focos), y para calcular la eficiencia se midieron la temperatura y velocidad del aire, así como el voltaje y amperaje, variando las cargas resistivas. El proceso de diseño, construcción y evaluación experimental de los tres prototipos tomó aproximadamente diez semanas.

Palabras clave: aerogenerador; energía del viento, diseño de aerogeneradores, eficiencia de aerogeneradores, túnel de viento.

Introducción

Las energías renovables representan el futuro de la energía a nivel global. En ese sentido, México posee un enorme potencial para aprovechar fuentes de energía renovables como solar, biomasa, hidroeléctrica, geotérmica, y la energía eólica (SEMARNAT, 2018). Esta área es un foco importante de investigación en la actualidad, impulsando la curiosidad, nuevos descubrimientos y avances significativos en el campo energético.

Con el paso del tiempo las ciudades crecen y la demanda de energía sube. Podemos decir que para avanzar tecnológicamente necesitamos más energía, pero ¿vamos a seguir sobre explotando nuestros recursos no renovables como los combustibles fósiles? Para nuestra suerte, contamos con tecnologías suficientemente maduras para generar energía eléctrica mediante fuentes renovables y no contaminantes. Una de las más prometedoras es la energía eólica, que aprovecha la energía del viento para producir electricidad sin emitir gases contaminantes, actualmente las energías renovables representan cerca del 20% del consumo de energía eléctrica en nuestro país (Espacios, 2018). Ejemplo de ello es el Parque Eólico la Ventosa, ubicado en La Ventosa, Juchitán de Zaragoza, Oaxaca, el cual es uno de los primeros parques eólicos de México y tan solo la empresa Iberdrola cuenta con una capacidad de 102 MW y tiene instalados 105 aerogeneradores (Iberdrola Renovables México, 2024). Siendo uno de varios parques distribuidos en distintos puntos del país, y con otros más en construcción, esto demuestra que esta tecnología ya está implementada y operando en México. Para evaluar la viabilidad económica de las energías renovables, el Costo Nivelado de la Energía (LCOE, por sus siglas en inglés) permite comparar tecnologías, integrando costos iniciales y de operación. Actualmente, el LCOE de la energía solar y eólica a gran escala es el más bajo, siendo una alternativa competitiva, sostenible y rentable frente a los combustibles fósiles (Iberdrola Renovables México, 2024).

Pero ¿cómo es posible que los aerogeneradores transformen la energía del viento en energía eléctrica? Esto se debe al movimiento que genera el viento sobre las palas del aerogenerador, que, a su vez, produce un movimiento en el rotor del motor el cual induce una corriente eléctrica (Ramírez-Muñoz *et al.*, 2023). La energía eléctrica que se genera es utilizada en distintos lugares, como en la iluminación de una casa o negocio, en electrodomésticos, o incluso puede servir para recargar un celular o vehículo eléctrico.

En cuanto a estrategias de diseño, hoy en día la impresión 3D de modelos para fabricar y evaluar nuevos componentes de aerogeneradores, como rotores, bujes, y palas de aerogeneradores, está en auge. Las impresoras 3D de filamento

permiten la fabricación de prototipos de una manera económica y accesible para el público en general, esto en comparación con las máquinas o herramientas utilizadas en la industria metal-mecánica, como fundidoras, fresadoras, y tornos.

Por lo anterior, el impacto que tiene hoy en día la impresión 3D llega a reflejarse en diversas especialidades, por ejemplo, ingeniería civil y arquitectura; medicina e ingeniería biomédica. Pero ¿cómo la impresión 3D tiene que ver con las energías renovables? Para empezar, la impresión 3D con filamentos es un proceso de manufactura el cual se basa en calentar hasta fundir el filamento a utilizar, el cual se va “imprimiendo” (o extruyendo) capa por capa hasta formar la figura o pieza que previamente ha sido diseñada en un software de diseño asistido por computadora (CAD, por sus siglas en inglés). Este proceso permite crear las piezas deseadas sin la necesidad de gastar una gran cantidad de recursos, pero claro, con sus limitantes (dimensiones, tipo de material, precisión, resolución y geometría compleja, entre otras) que tenga la impresora 3D con la que se cuente.

Al inicio de este proyecto, se investigó el estado del arte en aerogeneradores. Estos dispositivos están compuestos por cinco partes fundamentales: (1) los cimientos, que soportan todas las fuerzas presentes; (2) la torre, que establece la altura adecuada y conecta con el transformador; (3) la góndola, capaz de girar 360° según la dirección del viento, donde se alojan los mecanismos principales; (4) el rotor; y (5) el buje. En estos dos últimos elementos se ensamblan la góndola y las palas, responsables de generar un cambio de presión en el viento, lo que provoca el giro del rotor. Las palas, en particular, desempeñan un papel clave en este proceso (Enel Green Power, 2024), y son el tema central de este artículo de divulgación.

¿Y cómo se diseñan las palas? Estos diseños se crean utilizando software de diseño asistido por computadora (CAD). Hoy en día, existen diversas opciones, como SolidWorks, AutoCAD, Inventor y CATIA, entre otras. Estos programas permiten elaborar diseños detallados de piezas, planos, modelos, ensamblajes o prototipos, aprovechando la potencia de tu computadora. ¡Increíble, verdad!

Existen varios factores a considerar, como la facilidad de fabricación e instalación, además de la eficiencia del aerogenerador. En este proyecto, diseñamos, construimos (utilizando impresión 3D) y evaluamos la eficiencia de varios modelos de aerogeneradores para generar electricidad a partir del viento. Pero, ¿cómo saber cuál era el más eficiente? Con base en la bibliografía, definimos los criterios para validar la eficiencia. Para ello, realizamos varias mediciones, como el área por la que circula el aire, la temperatura del aire para determinar su densidad, y la velocidad del viento (usando un anemómetro). Al mismo tiempo, medimos las variables eléctricas, como el voltaje y la corriente (usando un multímetro). Con estos datos, calculamos la eficiencia que representa el porcentaje de la energía del viento que se convierte en energía eléctrica. Luego, comparamos los resultados para identificar el prototipo más eficiente.

Desarrollo

Se investigó la teoría aerodinámica para entender el movimiento y giro deseado del rotor (FCENA, 2024). Con base en esto, el diseño se realizó visualmente, considerando la geometría de los aerogeneradores actualmente disponibles y se realizaron tres diseños en software CAD para evaluar la eficiencia de conversión de energía eólica a energía eléctrica de cada diseño. Posteriormente se comenzó realizando el diseño de distintos tipos de palas para el rotor. En esta parte se presentaron tres tipos de palas, las cuales se pueden visualizar en la Figura 1 junto con su nomenclatura asignada.

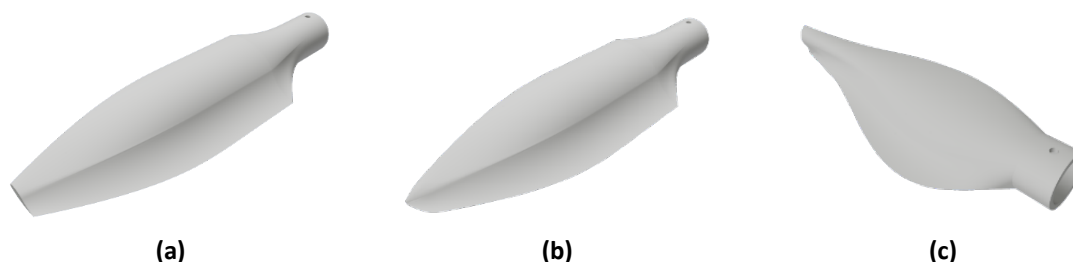


Figura 1. Palas de rotores diseñadas en este estudio: (a) Pala SIUC-01, (b) Pala SIUC-02 y (c) Pala ALAM-03.

Una vez teniendo los diseños de las palas se procedió al procesamiento de esos archivos dentro de un software de impresión 3D, este procesamiento se puede visualizar en la Figura 2 (a). Al igual que los programas de diseño CAD, existe una gran variedad de softwares de impresión 3D, tales como: UltiMaker Cura, Simplify 3D, Eiger, CrealityBelt, entre otros. Estos programas brindan múltiples opciones de configuración, como la selección del tipo de filamento, que determina las temperaturas de la cama de impresión y del extrusor, los soportes necesarios para una impresión precisa, la cantidad de piezas, el tipo y la densidad del relleno, así como la velocidad de impresión, entre otros ajustes. Un ejemplo de una impresión 3D en proceso se muestra en la Figura 2 (b).

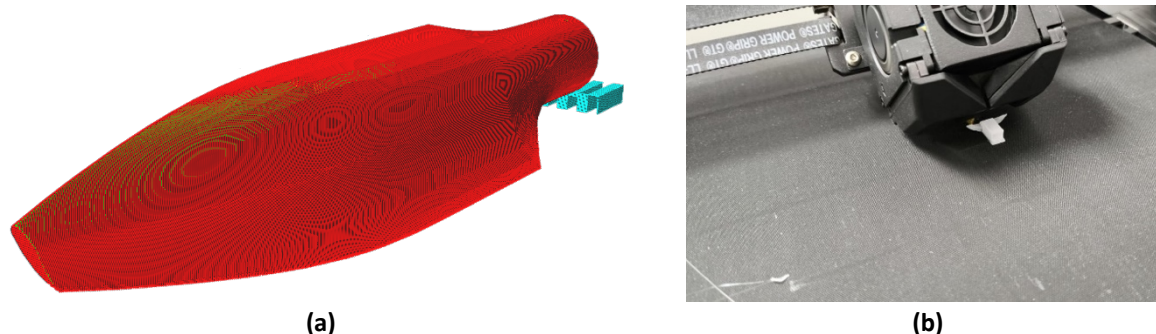


Figura 2. (a) Archivo CAD procesado en CrealityBelt, y (b) comienzo de impresión 3D visualizando un soporte inicial.

Al finalizar la impresión 3D, ésta se acondiciona para su ensamble. En este proceso se realiza un trabajo de manufactura “artesanal” el cual implica el uso de lijas de agua para poder conseguir una mejor resolución que el obtenido con la impresión 3D.

Durante el proceso de ensamblaje surgieron diversas dificultades, como la necesidad de ampliar el tamaño de algunos agujeros (barrenos), la complicación para retirar los soportes internos impresos, o problemas con las temperaturas en la sala de impresión, lo que ocasionaba imperfecciones en la superficie de algunas piezas. Por ello, fue necesario corregir y resolver cada uno de estos inconvenientes hasta obtener el modelo del rotor listo para el ensamble.

El proceso de ensamble consiste en la unión de todas las partes que conforman nuestro aerogenerador las cuales son, las palas, el buje y la aleta, que hace la función de direccionar todo el sistema tal como la góndola, y el motor. Este último está fijado a una estructura metálica que sirve para anclar de forma segura el aerogenerador al túnel de viento. El ensamble completo de cada una de las partes se puede visualizar en la Figura 3.

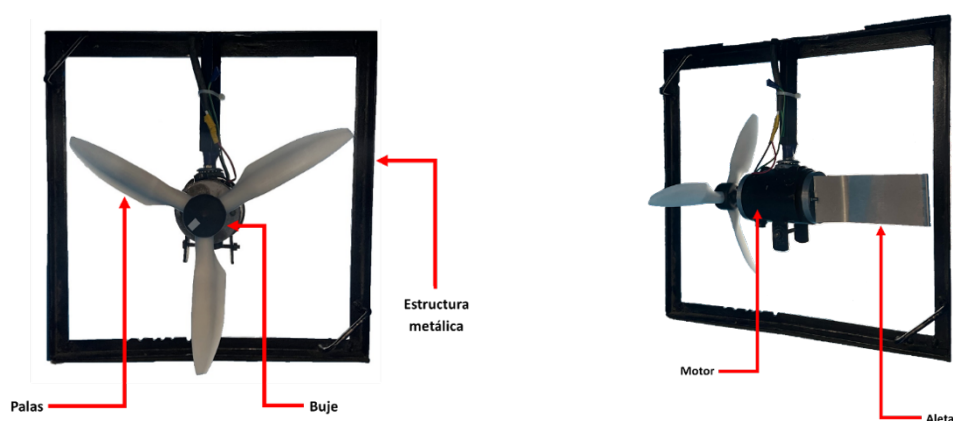


Figura 3. Prototipo de aerogenerador ensamblado y preparado para la experimentación.

¿Y la eficiencia dónde quedó?

Si todo funciona correctamente, se generará electricidad cuando el aire haga girar el rotor, lo que permitirá calcular la eficiencia del aerogenerador. Es importante tener en cuenta que un aerogenerador no puede capturar el 100% de la energía del viento. El físico alemán Albert Betz estableció un límite teórico, conocido como el límite de Betz, que indica

que el máximo porcentaje de energía eólica que un aerogenerador puede capturar (convertir en potencia mecánica de eje del rotor) es aproximadamente 59% (Editorial Académica Española, 2012; Villarrubia, 2013). Por lo que es imposible construir un aerogenerador con una eficiencia mayor a este valor, y cualquier eficiencia experimental en el eje del rotor por debajo del límite de Betz representa una oportunidad para mejorar el diseño del aerogenerador. La fricción aerodinámica y mecánica, la eficiencia del generador eléctrico, entre otros factores, sólo permiten en la práctica, en el mejor de los casos, obtener alrededor del 40% de la potencia eólica disponible.

Una vez instalado el aerogenerador y sus componentes en el túnel de viento, se pone en operación manipulando su compuerta para variar la velocidad del viento. Con la ayuda de un anemómetro, un termómetro y un medidor de voltaje y corriente, se registra: velocidad y temperatura del aire, voltaje (V, volts) y amperaje (I, amperes), que se utilizan para calcular la potencia eléctrica. El voltaje y el amperaje son generados por la interacción entre el movimiento del aerogenerador y las cargas resistivas (focos instalados en los tableros eléctricos) que se oponen al giro del rotor. El túnel de viento con el aerogenerador en funcionamiento y los tableros con focos se muestran en la Figura 4.

La eficiencia de conversión de energía eólica a energía eléctrica para cada diseño de aerogenerador se calcula mediante una división entre la potencia eléctrica generada, $P_{el\acute{e}ctrica} = V \cdot I$, y la potencia eólica disponible del viento, $P_{viento} = 0.5 \cdot \rho \cdot v^3 \cdot A$ (Ecuación 1):

$$\% \eta = \frac{P_{el\acute{e}ctrica}}{P_{viento}} \cdot 100 = \frac{I V}{0.5 \rho v^3 A} \cdot 100 \quad (1)$$

Donde ρ , v y A son la densidad del aire ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), la velocidad del viento ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) y el área que barre el rotor al girar (m^2), $A = \pi R^2$, y R es el radio del rotor (m).

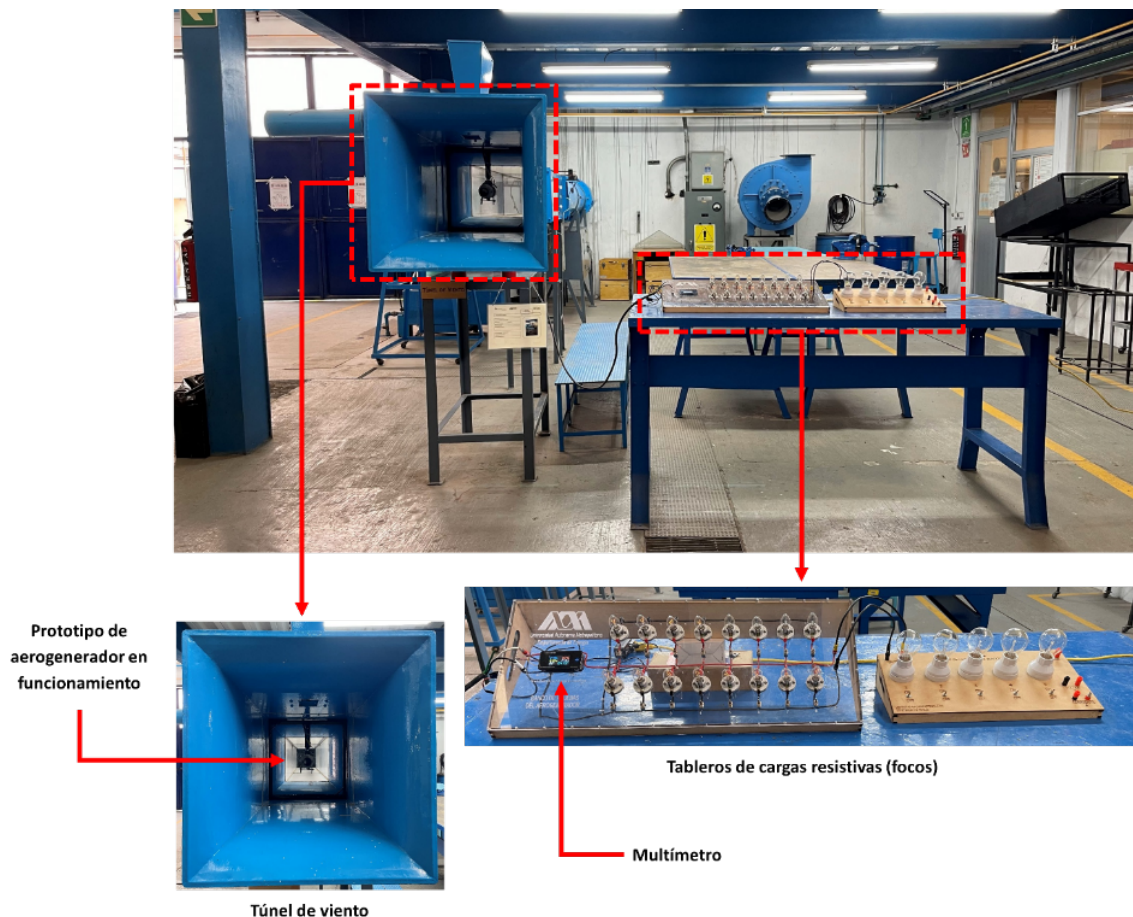


Figura 4. Aerogenerador funcionando en el túnel de viento con acercamiento en la entrada del túnel y en los tableros de cargas resistivas (16 focos de 7.5 W y 5 focos de 25 W, cuando operan a 120 V con corriente alterna).

El cálculo de la eficiencia está casi completo, pero se debe de considerar que en el proceso de conversión de energía eólica a eléctrica existe una pérdida de potencia en el motor y pérdidas por fricción aerodinámica, pero ¿por qué se considera esto? Para evaluar la potencia disipada ($P_{disipada}$) se operó el aerogenerador como motor a la misma velocidad de operación en el túnel de viento y se midió su potencia eléctrica consumida, por lo que esta potencia eléctrica es sumada a la generada por el aerogenerador. Una vez obtenida $P_{disipada}$, ésta se suma a la $P_{eléctrica}$ generada por el aerogenerador. Por lo cual, es posible obtener la eficiencia neta de cada rotor del aerogenerador con respecto a la potencia eólica disponible (Ecuación 2), y con respecto al límite de Betz (Ecuación 3).

$$\% \eta_{neta} = \frac{P_{eléctrica} + P_{disipada}}{P_{viento}} \cdot 100 \quad (2)$$

$$\% \eta_{neta} = \frac{P_{eléctrica} + P_{disipada}}{0.59 * P_{viento}} \cdot 100 \quad (3)$$

Al analizar las eficiencias mediante de cada ecuación anterior, podemos visualizar al aerogenerador “ideal” aquel que logre extraer la potencia más cercana P_{viento} (Ecuación (2)), o a $0.59 * P_{viento}$ (Ecuación (3)). En gran medida, la eficiencia depende de la interacción entre las palas y el viento, por lo que es importante evaluar el diseño de la pala, fabricación, e incluso el ensamble de estos. Las palas diseñadas tienen como objetivo capturar al máximo la energía cinética del viento y convertirla en electricidad. Por ello la forma, longitud, espesor y el ángulo de ataque de las palas influyen directamente en cuánta energía eólica puede capturar el aerogenerador.

Se evaluó la eficiencia neta de los tres diseños de palas (ver Figura 1). En la Figura 5a se presentan las eficiencias netas obtenidas con respecto a la potencia eólica total usando la Ecuación (2). Con propósitos de comparación, también se muestra el límite de Betz en esta figura (línea continua). Se puede visualizar que el álabe más eficiente, es el primer diseño (denominado SIUC-01), con $\% \eta = 36.99\%$, mientras que el segundo diseño (denominado SIUC-02) y el tercer diseño (denominado ALAM-03) alcanzaron $\% \eta = 34.89\%$ y $\% \eta = 12.19\%$, respectivamente. Por otro lado, en la Figura 5b se muestran las eficiencias netas con respecto al límite de Betz usando la Ecuación (3). Se observa $\% \eta = 62.69\%$ para el diseño SIUC-01, mientras que los diseños SIUC-02 y ALAM-03, alcanzaron $\% \eta = 59.13\%$ y $\% \eta = 20.65\%$, respectivamente. El diseño ALAM-03 presentó una menor eficiencia en comparación con los otros diseños, debido a su geometría, la cual ofrece una menor área de ataque al viento en la región donde se alcanza la mayor velocidad periférica.

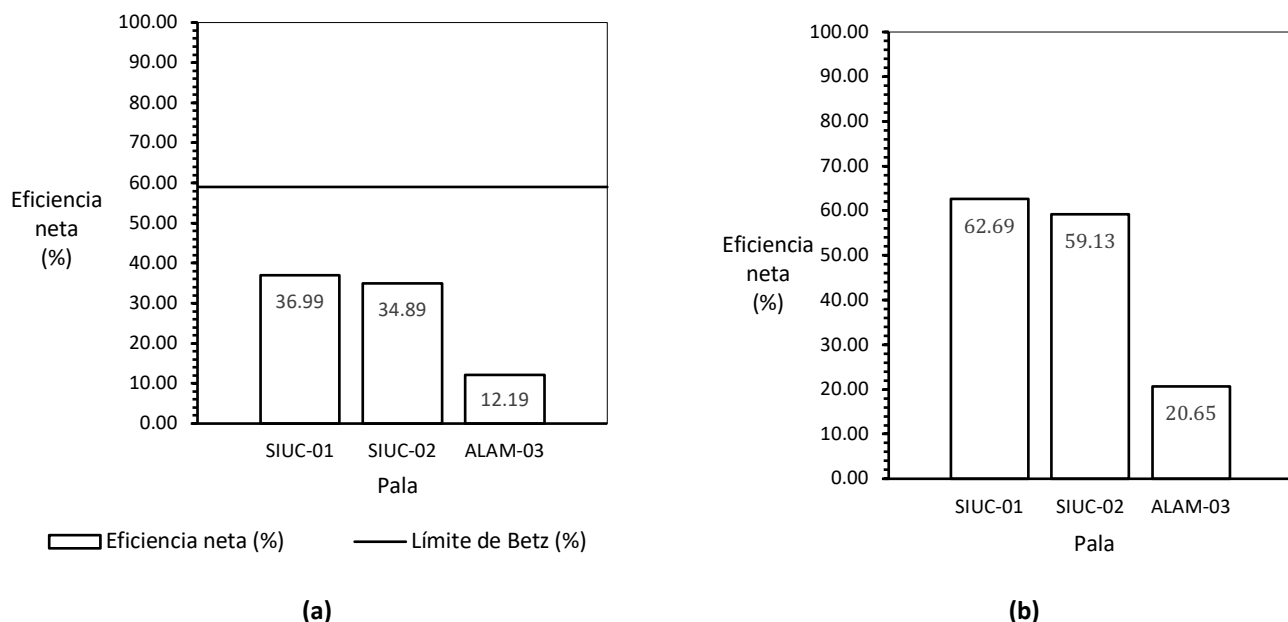


Figura 5. Eficiencias netas de cada diseño de pala: a) con respecto a la potencia eólica total (Ecuación (2)), y b) con respecto al límite de Betz (Ecuación (3)).

Calculamos la eficiencia, pero ¿y la electricidad que íbamos a generar? El mejor aerogenerador diseñado en este trabajo, en su punto más eficiente, generó una potencia eléctrica de 39.94 W. La potencia indica cuanta energía se genera cada segundo. Una idea de lo que genera, un monitor Samsung Odyssey G3 de 24" tiene un consumo de energía máximo de 25 W (Samsung, 2024), por lo que este aerogenerador podría suministrarle el consumo necesario para su funcionamiento y proporciona casi 17 W restantes para dos lámparas de leds de al alrededor de 9 W.

Este trabajo requirió un presupuesto reducido en comparación con otros métodos de manufactura industriales. Los equipos y materiales utilizados incluyen la impresora 3D Creality CR-30, lijas de agua, llaves Allen, tornillos Allen y de cruz según el diseño, una herramienta rotativa TRUPER PRO, pinzas de corte y de presión, y filamento PETG+ en blanco y negro. Los precios de estos elementos pueden variar según la marca y la calidad, pero, en general, son mucho más económicos que los diseños realizados a nivel industrial.

El tiempo necesario para el diseño, construcción y evaluación de cada uno de los modelos presentados osciló entre una semana y media y dos semanas. Puede variar dependiendo del tiempo dedicado diariamente y la velocidad de los distintos procesos.

Conclusiones

La energía eólica a pequeña escala permite analizar retos de proyectos a gran escala, facilitando la resolución de problemas y reduciendo costos de errores en el dimensionamiento y cálculo. De igual forma, el estudio de este tipo de aerogeneradores permite la investigación exhaustiva de los mismos para poder visualizar su desempeño y aplicación, como fuentes de energía de respaldo en aviones en pérdida (SKYbrary, 2024). Por otro lado, el tipo de manufactura aditiva con impresión 3D aquí mencionada posibilita crear piezas de aerogeneradores de mayor tamaño (3Dnatives, 2024), lo que representa una opción económica para su desarrollo.

El trabajo realizado ofrece resultados prometedores, ya que se logró una eficiencia del 39.99% con el diseño de pala SIUC-01, y fue capaz de generar hasta 39.94 watts de potencia. En este trabajo presentó una metodología sistemática de diseño de aerogeneradores que puede ser implementada por el público en general.

El tiempo es un factor clave en este tipo de proyectos. Este trabajo demuestra una forma eficiente y rápida de diseñar aerogeneradores en un lapso de entre una semana y media a dos semanas, sin necesidad de contar con equipos de alto costo, logrando además resultados comparables a otros diseños o prototipos.

Las herramientas, materiales y la impresora 3D usada, evidencian cómo el avance tecnológico ha reducido significativamente los recursos necesarios para realizar proyectos prácticos que en el pasado no hubieran sido posibles. Por lo que la innovación tecnológica ha facilitado enormemente el progreso en la vida cotidiana.

La eficiencia de un aerogenerador está estrechamente ligada al diseño de sus palas, que actúan como el corazón del sistema. Al modificar su geometría, se puede maximizar la conversión de energía eólica en electricidad, acercándonos al límite teórico de aprovechamiento energético dado por el límite de Betz.

Los modelos desarrollados en este proyecto demuestran cómo la ingeniería puede optimizar el uso de los recursos naturales para generar energía limpia de manera más eficiente. La innovación en el diseño de las palas no solo mejoró el rendimiento de los aerogeneradores, sino que también presentó una metodología fácil de asimilar para el público en general que facilita la transición hacia fuentes de energía renovables, como la eólica.

Bibliografía

- SEMARNAT. (2018). *Fuentes de energía en México*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/compendio_2021/dgeiawf.semarnat.gob.mx_8080/approot/dgeia_mce/html/RECUADRO_S_INT_GLOS/D2_ENERGIA/D2_R_ENERGIA01_01.htm.
- Robles, C.A., & Rodríguez, O.A. (2018). Un panorama de las energías renovables en el Mundo, Latinoamérica y Colombia. *Espacios*, 39, 34. <https://www.revistaespacios.com/a18v39n34/a18v39n34p10.pdf>.
- Iberdrola México Renovables. (2024). PEM: El primer parque eólico privado en México. Iberdrola México Renovables. <https://www.iberdrolarenovablesmexico.com/parque-eolico-pem/>.

- Enel Green Power. (2024). *Aerogenerador*. Enel Green Power. <https://www.enelgreenpower.com/es/learning-hub/energias-renovables/energia-eolica/aerogenerador>.
- Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura (FCENA). (2024). *Fundamentos aerodinámicos de las maquinas eólicas*. Universidad Nacional del Nordeste. <https://exa.unne.edu.ar/fisica/maestria/modulo2/eolica/eolo22002.pdf>.
- Ramírez-Muñoz, J. et al. (2023). *Manual de prácticas de la UEA Laboratorio de Termodinámicos II (Clave: 1132065)*. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco. https://drive.google.com/file/d/16braEny3fJhEo7_iXyCgh4QKjDLv1sH/view?usp=drive_link.
- Villarrubia, M. (2013). *Ingeniería de la energía eólica*. Alphaomega Marcombo.
- Carmona, C. et al. (2012). *Análisis de La Respuesta Dinámica de Un Aerogenerador*. Editorial Academia Española.
- Samsung. (2024). *Monitor Gamer 24" con tasa de actualización de 165 Hz color Negro*. Samsung Electronics. <https://www.samsung.com/mx/monitors/gaming/odyssey-g32a-g3-24-inch-165hz---freesync-ls24ag320nlxzx/#specs>.
- SKYbrary. (2024). *Ram Air Turbine (RAT)*. SKYbrary. <https://skybrary.aero/articles/ram-air-turbine-rat>.
- Carol, S. (2024). *La impresión 3D en el ámbito de la energía eólica*. 3Dnatives. <https://www.3dnatives.com/es/impresion-3d-ambito-energia-eolica-160520242/>.