

Modelado y prototipado de sistemas de turbinas eólicas de pequeña escala utilizando técnicas de manufactura aditiva

Jorge Alberto Cárdenas Magaña¹, Francisco Miguel Hernández López², Marco Antonio Celis Crisóstomo³, Emmanuel Vega Negrete⁴.
Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez Unidad Académica Tamazula.

Resumen - Esta investigación tiene como propósito principal diseñar y prototipar turbinas eólicas a pequeña escala mediante el proceso de manufactura aditiva, fomentando su adopción y personalización utilizando técnicas de manufactura digital. El proyecto se centró en desarrollar cuatro modelos específicos de turbinas: dos variantes de Savonius, una de Darrieus y una turbina de eje horizontal con aspas helicoidales, similar al modelo LIAM F1 UWT. El proceso incluyó la investigación y selección de tipos de turbinas y materiales adecuados, eligiendo PLA por su temperatura de operación y resultados estéticos. Se utilizó SolidWorks para el diseño 3D y Ultimaker Cura para el laminado y preparación de impresión, generando archivos STL para la impresión 3D. La manufactura aditiva se realizó con impresoras Ender 3 y Createbot. Los prototipos resultantes cumplieron con las especificaciones de diseño, demostrando potencial para aplicaciones prácticas en generación de energía eólica a pequeña escala. La diversidad en los diseños permitirá futuras investigaciones y mejoras, optimizando su eficiencia y facilitando su acoplamiento a generadores eléctricos.

Índice de Términos – Manufactura aditiva, turbinas eólicas a pequeña escala, prototipado digital, Material PLA, Energía renovable.

Abstract -The main purpose of this research is to design and prototype small-scale wind turbines using additive manufacturing processes, promoting their adoption and customization through digital manufacturing techniques. The project focused on developing four specific turbine models: two Savonius variants, one Darrieus, and a horizontal-axis turbine with helical blades, similar to the LIAM F1 UWT model. The process included the investigation and selection of suitable turbine types and materials, choosing PLA for its operational temperature and aesthetic results. SolidWorks was used for 3D design, and Ultimaker Cura was utilized for slicing and print preparation, generating STL files for 3D printing. Additive manufacturing was carried out with Ender 3 and Createbot printers. The resulting prototypes met the design specifications, demonstrating potential for practical applications in small-scale wind energy generation. The diversity in designs will facilitate future research and improvements, optimizing efficiency and enabling easier integration with electrical generators.

Key words: Additive Manufacturing, Small-Scale Wind Turbines, Digital Prototyping, PLA Material, Renewable Energy.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad la energía eólica juega un papel importante en el desarrollo energético del país. La capacidad instalada para la generación de energía eólica fue en incremento en el periodo de 2011 a 2022 en México. En 2022, se alcanzaron 7.312 megavatios, lo que representó un ligero aumento con respecto al año anterior [1]. Esta tendencia es parte de un fenómeno global, considerando que en los últimos años la energía renovable ha sido un factor de preocupación en esa búsqueda de conversión hacia la sustentabilidad [2]. Esta área de oportunidad ha detonado miradas de investigación enfocadas hacia la energía eólica de pequeña escala. Dentro de las cuales se ha utilizado la tecnología de manufactura aditiva, que permite prototipos rápidos, los cuales facilitan desarrollos

¹Jorge Alberto Cárdenas Magaña, Docente del departamento de Electromecánica. Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico Jose Mario Molina Pasquel y Henríquez Unidad Académica Tamazula. jorge.cardenas@tamazula.tecmm.edu.mx

²Francisco Miguel Hernández López, Docente del departamento de Electromecánica. Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez Unidad Académica Tamazula. francisco.hernandez@tamazula.tecmm.edu.mx

³Marco Antonio Celis Crisóstomo, Docente del departamento de Innovación Agrícola Sustentable. Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez Unidad Académica Tamazula. marco.celis@tamazula.tecmm.edu.mx

⁴Emmanuel Vega Negrete, Docente del departamento de Electromecánica. Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez Unidad Académica Tamazula. emmanuel.vega@tamazula.tecmm.edu.mx

tecnológicos para la producción de energía renovable [3] y aplicaciones [4]. Además, su uso en áreas rurales se ha incrementado con la finalidad de reducir el consumo de energía residencial [5], esto es, debido a la forma en que la arquitectura misma propicia la generación de turbulencias, modificando la velocidad del viento, sin embargo, puede enfrentar algunas limitantes como el impacto visual y las vibraciones entre otros [6].

El proceso de manufactura aditiva se ha utilizado en un enfoque sustentable para la fabricación de modelos de investigación aerodinámica, prototipos de turbinas hidráulicas y, más recientemente, turbinas eólicas a microescala, en todos estos casos, las piezas sirvieron como prototipos que replicaban la construcción y forma de los componentes que se pueden fabricar utilizando distintos materiales y métodos constructivos [7], además de aplicarse significativamente en la fabricación de componentes de turbinas eólicas [8].

Esta investigación busca explorar el uso de la manufactura aditiva aplicada para el modelado y prototipado de sistemas de turbinas eólicas de pequeña escala, con el fin de impulsar su adopción y personalización. En particular, se consideran algunos prototipos de turbinas mini eólicas que serán diseñados con software CAD a partir de consideraciones de microescala. Se evaluarán cuatro modelos específicos: una turbina Savonius, una turbina Darrieus, una turbina de eje vertical, y finalmente una turbina de eje horizontal. Estos modelos fueron seleccionados para representar diferentes configuraciones y principios operativos.

Cada modelo se fabricó utilizando el proceso de manufactura aditiva por deposición fundida (FDM), empleando dos impresoras 3D: Una Ender 3 y una Createbot. El material empleado será ácido poliláctico (PLA). Para el trazado de ruta de impresión y laminado se utilizará el software Ultimaker CURA, debido a su facilidad de uso.

II. DESARROLLO DEL TEMA

A. Marco Teórico.

Las turbinas pueden clasificarse de acuerdo a sus ejes en dos tipos: horizontal (HAWT) y vertical (VAWT). Dentro de las turbinas de eje vertical, destacan los rotores Darrieus y Savonius por la variedad de tipos que existen de cada una de ellas. En 1931, Darrieus desarrolló una turbina de tipo elevación de eje vertical, conocida por su diseño de flujo cruzado, destacaba por tener la mayor eficiencia teórica entre todas las turbinas de eje vertical [9]. Sus variantes principales incluyen los tipos H, tipo Y, ovalado (o tipo F) y diamante (de ángulo variable), esta clasificación está dispuesta de acuerdo a la forma de las aspas en paralelo a la superficie del eje. Las aspas Delta contienen estructuras helicoidales simétricas [10]. Además, los rotores Savonius son turbinas de eje vertical que aprovechan la fuerza del viento sobre sus

palas en forma de copa para generar energía. Esta configuración les permite operar eficientemente incluso a bajas velocidades, haciendo que sean ideales para áreas remotas con menor inversión inicial y costos de mantenimiento reducidos. Además, su diseño flexible les permite instalarse en una variedad de ubicaciones, ofreciendo una solución versátil para la generación de energía renovable [11] [12].

Las turbinas eólicas Savonius poseen una forma simple, la cual resulta de cortar un cilindro por la mitad y desplazar sus ejes de manera simétrica. Una parte del cilindro forma la pala cóncava, mientras que la otra forma la convexa. La diferencia en el par generado entre ambas palas hace que la turbina gire en la dirección del viento entrante. Debido a que pueden captar viento desde todas las direcciones, por lo que no se requiere un sistema adicional para girarlas contra el viento [13].

Las turbinas eólicas de gran capacidad generalmente son del tipo HAWT. Estas pueden ser clasificadas en varias categorías según el tamaño del rotor, que van desde micro, mini y domésticas hasta comerciales de pequeña, mediana y gran escala [14]. La figura 1 ilustra los modelos de las turbinas VAWT y HAWT.

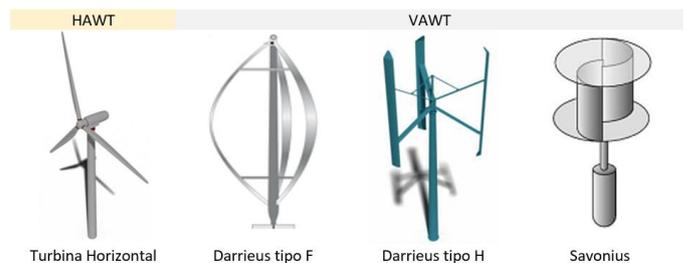


Fig. 1. Tipos de turbinas eólicas.

El modelado de turbinas eólicas a miniescala ha generado grandes oportunidades de aplicación. Este desarrollo ha permitido la creación de prototipos funcionales, como el Árbol del Viento, el cual fue diseñado y construido en material ABS gracias al análisis realizado con el software ANSYS, enfrentando grandes desafíos estructurales y electromagnéticos [15]. También se ha desarrollado un prototipo denominado Pared de Turbina Eólica (Muro del Viento), que consiste en un conjunto de turbinas conectadas a un generador, con la capacidad de captar el viento en cualquier dirección, excepto la vertical [16]. En la figura 2 se aprecian estos dos modelos.



a) Árbol del viento b) Muro del viento

Fig. 2. Prototipos de turbinas eólicas; a) Árbol del viento; b) Muro del viento.

B. Materiales y Métodos.

La metodología que se implementó se muestra en la figura 3. Cada sección del método fue diseñada para abordar aspectos específicos del desarrollo del proyecto, desde la conceptualización hasta la producción física, garantizando un enfoque integral y fundamentado en la creación de prototipos eficientes y funcionales.

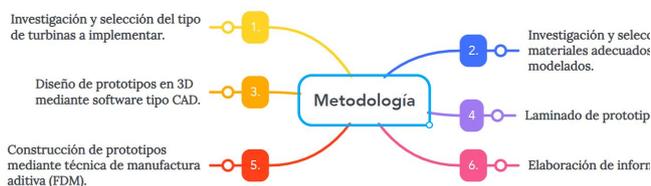


Fig. 3. Metodología empleada

1. Investigación y selección del tipo de turbinas a implementar.

Se llevó a cabo una investigación exhaustiva del estado del arte, evaluando las características constructivas de diferentes tipos de turbinas eólicas. La selección de los modelos más adecuados para ser utilizados en miniescala se basó en su eficiencia, simplicidad constructiva y adaptabilidad a diferentes entornos. La decisión de seleccionar una turbina Horizontal, dos Savonius, y una Darrieus se fundamentó en la necesidad de representar diversas configuraciones y principios operativos para una evaluación comparativa completa.

2. Investigación y selección de materiales adecuados para los modelados.

Se llevó a cabo un análisis detallado para los materiales y dimensiones adecuados para los modelos. Los materiales evaluados incluyeron ABS (Acrilonitrilo butadieno estireno), PETG (polietileno tereftalato y glicol) y PLA (Ácido poliláctico), se seleccionó el material PLA por su adecuada temperatura de operación y resultados estéticos superiores. Con respecto a las dimensiones se propuso una altura de 100 mm para las turbinas de eje vertical (VAWT), y una longitud de 120 mm para la turbina de eje horizontal (HAWT), estas dimensiones se seleccionaron para que los modelos se puedan utilizar posteriormente dentro de un túnel del viento y facilitar futuras comparaciones y mejoras.

3. Diseño de prototipos en 3D mediante software tipo CAD.

En esta etapa se dibujaron prototipos eólicos en 3D utilizando un software del tipo CAD, el software elegido fue SolidWorks, ideal para modelar piezas y ensamblajes en 3D, así como para crear dibujos en 2D, realizar simulaciones y renderizados [17]. Esta etapa es crucial para asegurar que los diseños sean funcionales y optimizados antes de la fabricación física. La figura 4 muestra el prototipo diseñado para la turbina tipo Darrieus.

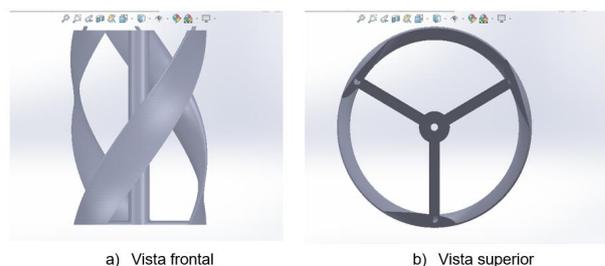


Fig. 4. Turbina Darrieus.

En la figura 5 y 6 se muestran los dibujos de las turbinas Savonius, aunque ambos modelos pertenecen al mismo tipo, se presentan dos variantes que pueden tener diferentes capacidades cinéticas.

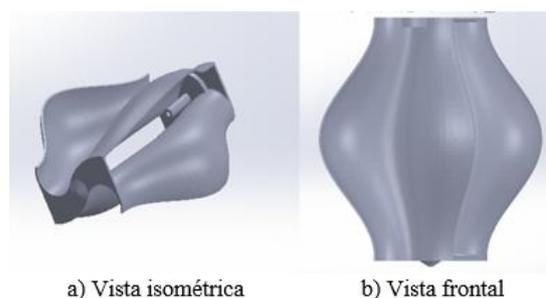


Fig. 5. Turbina Savonius (Modelo 1).

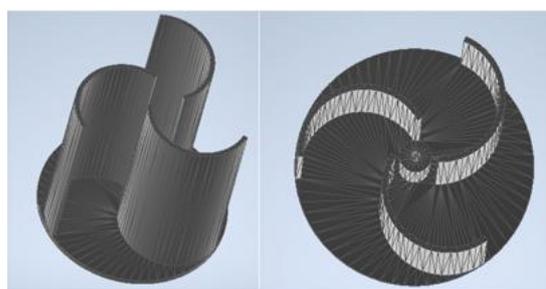


Fig. 6. Turbina Savonius (Modelo 2).

La figura 7 muestra el dibujo de la turbina de eje horizontal. En este caso se optó por un diseño con aspas helicoidales en lugar de las tradicionales aspas largas y delgadas. El diseño propuesto similar a un prototipo desarrollado por una empresa holandesa denominado LIAM F1 UWT, el cual representa una nueva generación de turbinas eólicas para uso doméstico. Este modelo produce una cantidad mayor de energía, generando una mínima cantidad de ruido [18].

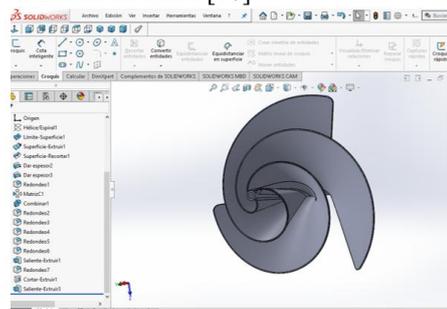


Fig. 7. Turbina Horizontal.

4. Laminado de prototipos.

Una vez elaborados y aprobados los dibujos, se convirtieron al formato de laminado, representado mediante un archivo STL (Standard Tessellation Language). Este archivo es un componente fundamental del proceso de impresión 3D, actuando como un puente entre el diseño digital y la materialización física de un objeto tridimensional. El archivo STL representa la geometría de un objeto tridimensional mediante una malla de triángulos interconectados, definidos en un espacio tridimensional, estos triángulos se unen entre sí para formar una estructura continua que describe digitalmente la forma y la superficie del objeto [19]. En el SolidWorks se obtiene este formato utilizando la opción de guardar como.

Dado que el archivo tiene la extensión STL, se utiliza el software Ultimaker Cura, diseñado específicamente para impresoras 3D. Esta aplicación permite la modificación de los parámetros de impresión y la posterior transformación a código G. Ultimaker Cura se destaca por proporcionar una interfaz gráfica para la preparación de modelos para impresión 3D. esta interfaz se ajusta según el modelo, y el programa determina el escenario de la impresora 3D durante la aplicación secuencial de cada capa [20].

La figura 8 muestra el laminado de la turbina Savonius modelo 1, de igual forma, la figura 9 muestra el laminado de la turbina Savonius modelo 2. En ambas imágenes se muestra el proceso de impresión terminado.

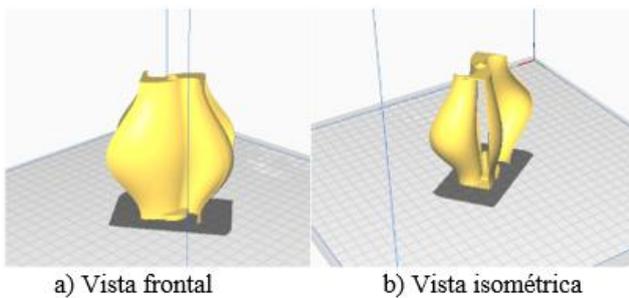


Fig. 8. Turbina Savonius (Modelo 1) en Cura.

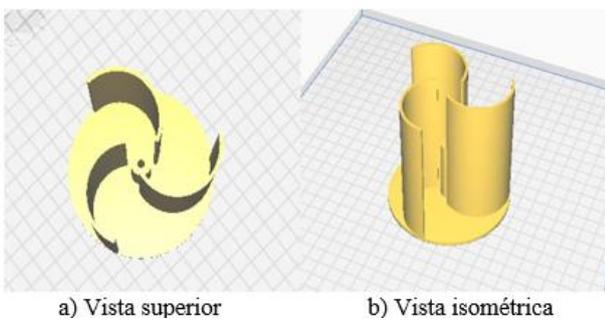


Fig. 9. Turbina Savonius (Modelo 2) en Cura.

En la figura 10 se muestra de igual forma la turbina horizontal, y, en la figura 11 se muestra la turbina Darrieus.

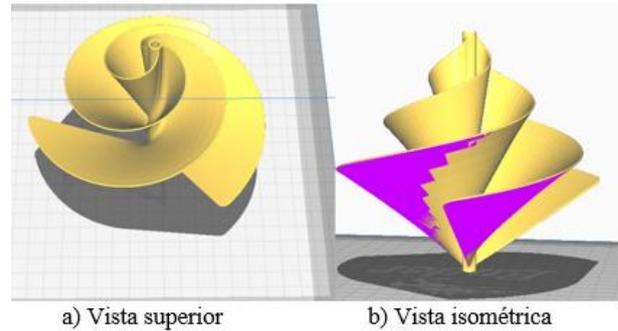


Fig. 10. Turbina Horizontal en Cura.

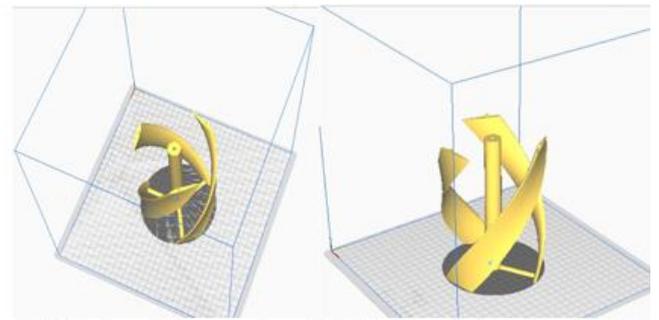


Fig. 11. Turbina Darrieus en Cura.

5. Construcción de prototipos mediante técnica de manufactura aditiva (FDM).

En esta etapa se utilizó la tecnología de manufactura aditiva para construir los prototipos, utilizando dos impresoras 3d, una Ender 3 y una Createbot. La impresora Ender 3 cuenta con un volumen de construcción de 220 x 220 x 250 mm y una precisión de impresión de 0,1 mm. El diámetro estándar de la boquilla es de 0.4 mm, pero también puede ser de 0.3 o 0.2 mm, y puede calentar hasta 255 ° C. La Ender 3 puede imprimir con filamento de 1.75 mm, como ABS, PLA, TPU, madera, cobre, etc. Algunas de las características de esta impresora 3D son la integración de una pantalla táctil para monitorear las impresiones. Incluye una cama caliente que se puede calentar hasta 100°C en 5 minutos para cumplir con los requisitos de impresión rápida [21]. La otra impresora es la Createbot MAX con tecnología FDM, tiene gran capacidad de fabricación al tener una cuba de 280 x 250 x 400 mm. Además, cuenta con doble extrusor por lo que puede trabajar con dos materiales simultáneamente. Puede utilizar materiales de todo tipo, incluidos los que necesitan cama caliente. Una impresora de gran formato para hacer grandes piezas o grandes conjuntos [22]. La elección de estas impresoras se basó en su capacidad para manejar los materiales seleccionados (principalmente PLA), así como en su precisión y volumen de construcción. Este paso permitió la materialización de los diseños, evaluando su viabilidad para aplicaciones prácticas en generación de energía eólica a pequeña escala.

La figura 12 muestra las dos impresoras 3D que se utilizaron.

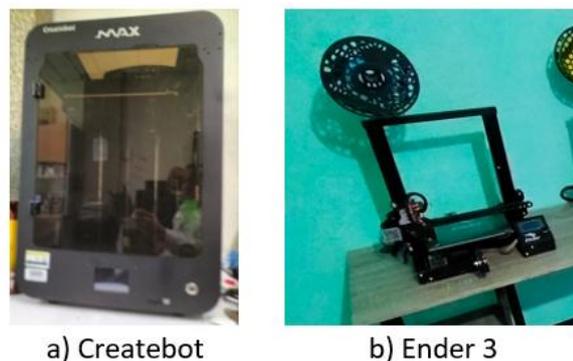


Fig. 12. Impresoras 3D utilizadas; a) Createbot; b) Ender 3.

III. RESULTADOS

Cada una de las piezas modeladas se imprimió bajo condiciones similares, se utilizó una boquilla de 0.4 mm en ambas impresoras, el filamento utilizado fue el PLA de 1,75 mm de grosor, la altura de la capa fue de 0.2 mm, una densidad de relleno del 80 % para las condiciones de resistencia, el patrón de relleno fue de triángulos, excepto para la turbina horizontal, en esa se utilizó el relleno del tipo giroide, con respecto al filamento PLA, se consideró una temperatura de 230°C debido a la gran cantidad de horas de impresión, y la temperatura de la cama se programó para 70°C. En la figura 13 se observan los resultados obtenidos para la turbina Darrius.

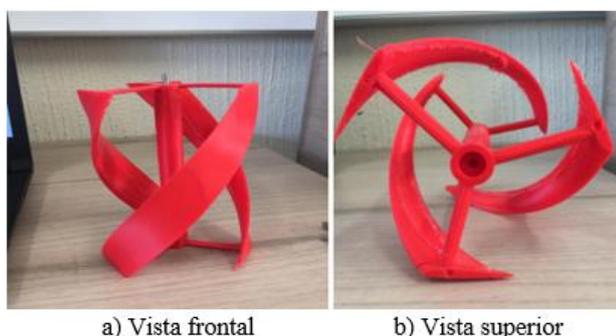


Fig. 13. Turbina Darrius, elaborada con manufactura aditiva.

La figura 14 muestra el desarrollo que se obtuvo para la turbina Savonius (modelo 1).

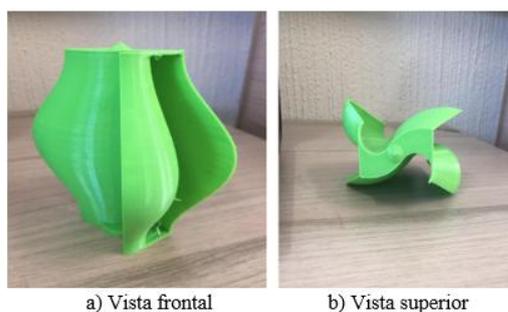


Fig. 14. Turbina Savonius (modelo 1), elaborada con manufactura aditiva.

La figura 15 muestra el desarrollo que se obtuvo para la turbina Savonius (modelo 2).



Fig. 15. Turbina Savonius (modelo 2), elaborada con manufactura aditiva.

La figura 16 muestra el desarrollo que se obtuvo para la turbina tipo horizontal.

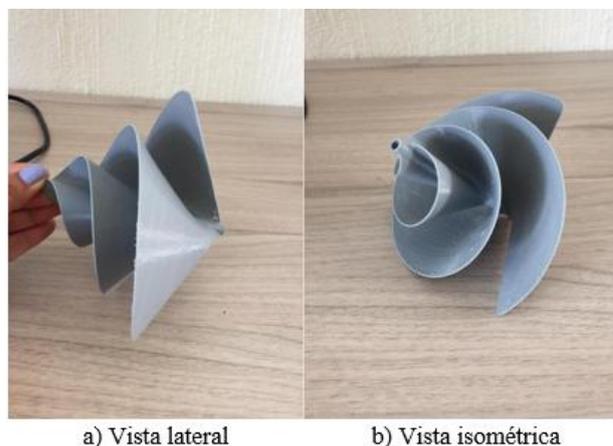


Fig. 16. Turbina tipo horizontal, elaborada con manufactura aditiva.

En la figura 17 se muestran las primeras turbinas impresas, las cuales se adaptaron a las medidas propuestas al inicio de esta investigación, la diversidad de colores se debe al color del filamento, el cual era de la misma marca, pero de diferente color, cabe aclarar que ningún color fue asignado directamente, en esa figura se muestra que a las turbinas ya se les adaptó un conector metálico, el cual es un cilindro que en investigaciones futuras se podrá acoplar a un generador eléctrico.

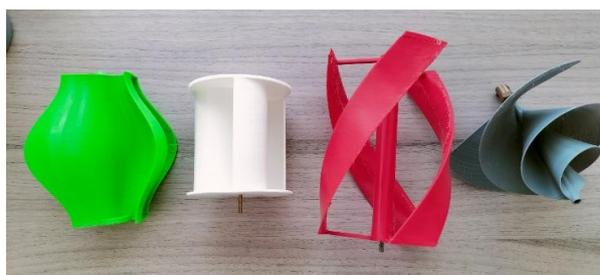


Fig. 17. De derecha a izquierda se muestran las turbinas: Savonius (modelo 1), Savonius (modelo 2), Darrius y tipo horizontal, elaboradas con manufactura aditiva.

En la figura 18 se muestran las mismas turbinas, ahora con diferente vista.



Fig. 18. De derecha a izquierda se muestran las turbinas: Savonius (modelo 1), Savonius (modelo 2), Darrieus y tipo horizontal, elaboradas con manufactura aditiva.

En la figura 19 se muestran todas las turbinas impresas, las cuales se obtuvieron posteriormente al primer desarrollo. Se evaluaron diferentes dimensiones con respecto a los motores con los que las turbinas se pretenden acoplar en un futuro. Las variables evaluadas incluyeron el diámetro del eje, el tamaño de las aspas y la altura total de la turbina. Específicamente, se analizaron diámetros de eje de 50 mm, 80 mm y 100 mm para determinar cuál ofrecía un mejor acoplamiento con los motores disponibles. En cuanto al tamaño de las aspas, se probaron longitudes de 50 mm, 75 mm y 125 mm, mientras que para la altura total de la turbina se consideraron valores de 100 mm, 150 mm y 200 mm. Los resultados indicaron que un diámetro de eje de 80 mm, con aspas de 125 mm y una altura total de 100 mm, proporcionaba el equilibrio óptimo entre estabilidad estructural y eficiencia operativa, facilitando además un acoplamiento eficaz con los motores seleccionados para futuros desarrollos.



Fig. 19. Variedad de turbinas con diferentes dimensiones, elaboradas con manufactura aditiva.

IV. CONCLUSIONES

La investigación y el desarrollo de turbinas eólicas a pequeña escala utilizando tecnología de manufactura aditiva ha demostrado ser una metodología efectiva para la creación rápida y eficiente de prototipos funcionales. Este estudio se centró en el diseño y fabricación de diferentes modelos de turbinas eólicas utilizando software CAD y técnicas de impresión 3D, empleando impresoras Ender 3 y Createbot con filamento PLA.

La selección de turbinas de eje horizontal y vertical (Savonius, Darrieus y un modelo similar al LIAM F1 UWT) permitieron evaluar diferentes configuraciones y principios operativos. Se eligió el material PLA debido a su temperatura de operación adecuada y mejores resultados estéticos en comparación con otros materiales como ABS y PETG. Las pruebas iniciales confirmaron que el PLA es un material viable para la fabricación de estos prototipos.

El uso de SolidWorks para el diseño y de Ultimaker Cura para el laminado y preparación de impresión fue fundamental en el desarrollo de los prototipos. Los archivos STL generados permitieron una transición eficiente del diseño digital a la impresión física, demostrando la capacidad de estos softwares para manejar proyectos complejos y personalizados.

La manufactura aditiva, utilizando impresoras 3D Ender 3 y Createbot, facilitó la producción de prototipos precisos y funcionales. Las impresoras mostraron un buen rendimiento.

Los prototipos fabricados cumplieron con las especificaciones de diseño y demostraron potencial para aplicaciones prácticas en generación de energía eólica a pequeña escala. La diversidad en los modelos y dimensiones de las turbinas permitirá futuras investigaciones y acoplamientos a generadores eléctricos, optimizando la eficiencia energética y operativa de estos sistemas.

V. TRABAJO A FUTURO

A partir de esta investigación, se abren varias líneas de trabajo futuro que podrían profundizar en la optimización y aplicación de las turbinas eólicas a pequeña escala:

1. Se pueden optimizar diseños realizando estudios más detallados sobre la aerodinámica de las diferentes configuraciones de turbinas para mejorar su eficiencia energética. Esto incluiría simulaciones computacionales avanzadas y pruebas en túneles de viento.
2. Se pueden explorar otros materiales con diferentes propiedades mecánicas y térmicas superiores al PLA, que puedan incrementar el rendimiento de las turbinas.
3. El siguiente paso de este desarrollo es la integración con generadores eléctricos, probar diferentes sistemas de acoplamiento, para evaluar su desempeño en condiciones reales de operación.

4. Se puede realizar un estudio para evaluar el impacto ambiental de la producción y uso de estas turbinas en comunidades rurales, así como su aceptación social y potencial para mejorar la calidad de vida mediante la provisión de energía renovable.
5. Estudiar la forma de integración de las turbinas eólicas con otras fuentes de energía renovable, como paneles solares, con la intención de crear sistemas híbridos que maximicen la generación de energía en diferentes condiciones climáticas.

Este artículo no solo conceptualiza el trabajo actual dentro de un marco más amplio de investigación y desarrollo, sino que también proporciona una hoja de ruta para futuros investigadores interesados en avanzar en este campo.

REFERENCIAS

- [1] Statista Research Department, «Capacidad instalada de energía eólica en México de 2011 a 2022 (en megavatios),» Statista, marzo 2023. [En línea]. Available: <https://es.statista.com/estadisticas/1237295/capacidad-instalada-energia-eolica-mexico/#:~:text=La%20capacidad%20instalada%20para%20la,27%25%20respecto%20al%20a%C3%B1o%20anterior.> [Último acceso: 5 mayo 2024].
- [2] Sayed, E.T.; Olabi, A.G.; Alami, A.H.; Radwan, A.; Mdallal, A.; Rezk, A.; Abdelkareem, M.A. Renewable Energy and Energy Storage Systems. *Energies* 2023, *16*, 1415. <https://doi.org/10.3390/en16031415>.
- [3] E. Sanchez-Rexach, T.G. Johnston, C. Jehanno, H. Sardon, A. Nelson. Sustainable Materials and Chemical Processes for Additive Manufacturing. *Chemistry of Materials* 2020 *32* (17), 7105-7119. DOI: 10.1021/acs.chemmater.0c02008
- [4] Shahrubudin N., Lee T.C., Ramlan R. An overview on 3D printing technology: Technological, materials, and applications. *Procedia Manuf.* (2019). <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.089>
- [5] Rouway, Marwan; Nachtane, M.; Tarfaoui, M.; Chakchaoui, N.; Omari, L.; Fraija, F.; Cherkaoui, O. 3D printing: rapid manufacturing of a new smallscale tidal turbine blade. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* (2021). 115. 10.1007/s00170-021-07163-7.
- [6] E. A. Barragán-Escandón, E. F. Zalamea-León, J. Terrados-Cepeda, y A. Parra-González. Las energías renovables a escala urbana. Aspectos determinantes y selección tecnológica. *Bitácora Urbano Territorial*, vol. 29, número 2, pp. 39-48, mayo 2019. <https://doi.org/10.15446/bitacora.v29n2.65720>
- [7] K. Bassett, R. Cariveau, D.-K. Ting. 3D printed wind turbines part 1: Design considerations and rapid manufacture potential. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 11 (2015), pp. 186-193. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2015.01.002>
- [8] Ruiz Morales, J. C., Tarancón, A., canales-Vázquez, J., Méndez Ramos, J., Hernández Alfonso, I., Acosta Mora, PAG., ruedas, J. r. METRO., & Fernández González, r. (2017). Three dimensional printing of components and functional devices for energy and environmental applications. *Energy & Environmental Science.*, 10 (4), 846-859. March (2017). 10.1039/c6ee03526d
- [9] M. Nachtane, M. Tarfaoui, I. Goda, M. Rouway. A review on the technologies, design considerations and numerical models of tidal current turbines. *Renewable Energy.* 157. 274-1288. (2020). <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.04.155>.
- [10] Mabrouk M., Ahmed A., Youssef C., Zied D., Tullio T. Performance improvement of a novel combined water turbine, *Energy Conversion and Management.* 205. (2020). 112473. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112473>.
- [11] Alom, Nur & Saha, Ujjwal. (2019). Drag and Lift Characteristics of a Novel Elliptical-Bladed Savonius Rotor With Vent Augmenters. *Journal of Solar Energy Engineering.* 141. 1. 10.1115/1.4043516.
- [12] Alom, Nur. (2022). Influence of curtain plates on the aerodynamic performance of an elliptical bladed Savonius rotor (S-rotor). *Energy Systems.* 13. 1-16. 10.1007/s12667-021-00428-w.
- [13] Deda Altan, B.; Gultekin, G.S. Investigation of Performance Enhancements of Savonius Wind Turbines through Additional Designs. *Processes.* 11. 1473. (2023). <https://doi.org/10.3390/pr11051473>
- [14] Tummala, A., Velamati, Ratna K., Sinha, D., Indraj, V. & Krishna, V.. (2016). A review on small scale wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 56. 1351-1371. 10.1016/j.rser.2015.12.027.
- [15] EcoInventos green technology, «El árbol del viento. Una innovadora fuente de energía eólica para las ciudades,» 06 08 2022. [En línea]. Available: <https://ecoinventos.com/el-arbol-del-viento-turbinas-silenciosas-para-ciudades/#:~:text=Una%20innovadora%20fuente%20de%20energ%C3%ADa%20e%C3%B3lica%20para%20las%20ciudades,5%20enero%2C%202017&text=Tres%20a%C3%B1os%20de%20investigaci%C3%B3n%20y,e%C3%B3lic.> [Último acceso: 29 05 2024].
- [16] L. Blain, «"Wind turbine wall" turns power generation into an aesthetic feature,» NEW ATLAS, 29 12 2021. [En línea]. Available: <https://newatlas.com/energy/wind-turbine-wall-doucet/>. [Último acceso: 29 05 2024].
- [17] SOLIDWORKS, «CAD 3D de SOLIDWORKS,» SOLIDWORKS, [En línea]. Available: <https://www.solidworks.com/es/product/solidworks-3d-cad>. [Último acceso: 20 05 2024].
- [18] elPeriodico, «LIAM F1: El pequeño y silencioso aerogenerador doméstico para dar luz a una casa,» 16 12 2022. [En línea]. Available: <https://www.elperiodico.com/es/medio-ambiente/20221216/liam-f1-pequeno-silencioso-aerogenerador-79633532>. [Último acceso: 21 03 2024].
- [19] CreaFab3d, «Archivo STL, ¿Qué es y para qué sirve?,» CreaFab3d, [En línea]. Available: <https://creafab3d.com/archivo-stl-que-es/#:~:text=Originado%20en%20el%20campo%20de,una%20malla%20de%20tri%C3%A1ngulos%20interconectados..> [Último acceso: 12 02 2024].
- [20] Darkcritz, «Ultimaker Cura: una excelente aplicación para preparar modelos para impresión 3D,» DesdeLinux, [En línea]. Available: <https://blog.desdelinux.net/ultimaker-cura-una-excelente-aplicacion-para-preparar-modelos-para-impresion-3d/>. [Último acceso: 26 03 2024].
- [21] 3Dnatives, «Ender 3,» 3Dnatives, 2024. [En línea]. Available: <https://www.3dnatives.com/3D-compare/es/impresoras-3d/ender/>. [Último acceso: 05 05 2024].
- [22] undo Systems, «IMPRESORA 3D CREATEBOT MAX,» undo Systems, [En línea]. Available: <https://www.undosystems.es/impresora-3d-createbot-max/>. [Último acceso: 01 05 2024].

Biografía Autores

Jorge Alberto Cárdenas Magaña. Docente del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez –Unidad académica Tamazula, Jalisco, C.P 49650 email: jorge.cardenas@tamazula.tecmm.edu.mx, Maestro en Energías Renovables. Docente del departamento de Ingeniería Electromecánica.

Francisco Miguel Hernández López. Docente del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez –Unidad académica Tamazula, Jalisco, C.P 49650 email: francisco.hernandez@tamazula.tecmm.edu.mx, Maestro en Enseñanza de las Matemáticas. Docente del departamento de Ingeniería Electromecánica.

Marco Antonio Celis Crisóstomo. Docente del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez –Unidad académica Tamazula, Jalisco, C.P 49650 email: marco.celis@tamazula.tecmm.edu.mx, Maestro en Ingeniería en Sistemas. Docente del departamento de Ingeniería en Innovación Agrícola Sustentable.

Emmanuel Vega Negrete. Docente del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez –Unidad académica Tamazula, Jalisco, C.P 49650 email: emmanuel.vega@tamazula.tecmm.edu.mx, Maestro en Ingeniería Electrónica. Docente del departamento de Ingeniería Electromecánica.