

Evaluación Experimental de Turbinas Eólicas de Pequeña Escala con Generadores de Corriente Directa y Pruebas en Túnel de Viento

Jorge Alberto Cárdenas Magaña¹, Estudiante de Doctorado en Universidad TENAM. Colegio de Formación Educativa TENAM S.C./ Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez Unidad Académica Tamazula, 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 objetivo evaluar la eficiencia de cuatro modelos de turbinas eólicas de pequeña escala (dos turbinas Savonius, una Darrieus y una de eje horizontal), todas diseñadas en SolidWorks y fabricadas en 3D con PLA, a través de dos experimentos: con flujo de viento variable y otro en un túnel de viento. Se midieron voltaje, corriente, potencia y velocidad del viento para comparar el rendimiento de los modelos. En condiciones de viento variable, la turbina horizontal LIAM F1 UWT mostró la mayor eficiencia, mientras que las turbinas Savonius fueron más efectivas a bajas velocidades. En el túnel de viento, con flujo constante, las turbinas Savonius destacaron, especialmente el modelo 2, que fue el más eficiente tanto a bajas como a altas velocidades de viento. Este estudio proporciona una base para la selección de diseños de turbinas eólicas eficientes y sugiere futuras investigaciones en optimización aerodinámica, nuevos materiales y evaluación del impacto ambiental y social.

Índice de Términos – Manufactura aditiva, turbinas eólicas a pequeña escala, Pruebas en túnel de viento, Eficiencia de energía renovable, Evaluación experimental.

Abstract - This research aims to evaluate the efficiency of four small-scale wind turbine models (two Savonius turbines, one Darrieus turbine, and one horizontal-axis turbine), all designed in SolidWorks and 3D printed with PLA, through two experiments: one with variable wind flow and another in a wind tunnel. Voltage, current, power, and wind speed were measured to compare the performance of the models. Under variable wind conditions, the horizontal LIAM F1 UWT turbine exhibited the highest efficiency, while the Savonius turbines were more effective at low wind speeds. In the wind tunnel, with constant airflow, the Savonius turbines stood out, especially model 2, which proved to be the most efficient at both low and high wind speeds. This study provides a solid foundation for selecting efficient wind turbine designs and suggests future research in aerodynamic optimization, new materials, and the evaluation of environmental and social impacts.

Key words: Additive Manufacturing, Small-Scale Wind Turbines, Wind tunnel testing, Renewable Energy efficiency, Experimental evaluation.

I. INTRODUCCIÓN

El desarrollo económico ha impulsado significativamente los avances tecnológicos. Las nuevas necesidades generadas buscan obtener el mejor rendimiento, abarcando el ahorro en todos los sectores [1]. Uno de los sectores más impactados es el de las energías renovables, ya que su aprovechamiento está condicionado por las fuentes disponibles en cada región. Por lo tanto, la transición hacia un suministro de energía renovable demanda evaluaciones precisas de recursos y el uso de tecnologías apropiadas. [2]. En lo que respecta a la energía eólica, su evolución no se centra únicamente en los grandes parques generadores, sino que también incluye la evaluación la producción a pequeña escala.

Los diferentes diseños de turbinas eólicas buscan adaptarse a entornos específicos según la aplicación de esos nuevos diseños. El uso de la tecnología de manufactura aditiva ha facilitado los desarrollos tecnológicos mediante la creación rápida de prototipos [3] y diversas aplicaciones [4]. Estos modelos buscan, por un lado, minimizar el impacto visual y las vibraciones, y por otro, adaptarse a la arquitectura del entorno, ya que la generación de turbulencias imprevistas modifica la velocidad del viento, [5]. La búsqueda de sostenibilidad en esta área está generando un fenómeno global que se fortalece cada vez más como una tendencia de investigación [6].

II. DESARROLLO DEL TEMA

Evaluación y Pruebas Experimentales

Esta investigación tiene como objetivo llevar a cabo una evaluación experimental de cuatro modelos específicos de

turbinas eólicas a pequeña escala acopladas a diferentes generadores de corriente directa: una turbina Savonius, una turbina Darrieus, una turbina de eje vertical, y finalmente una turbina de eje horizontal. Éstas turbinas se diseñaron utilizando SolidWorks y se crearon mediante el proceso de manufactura aditiva por deposición fundida (FDM), empleando dos impresoras 3D: Una Createbot MAX y una Ender 3. El material empleado fue PLA, el software Ultimaker CURA se empleó para el laminado.

Se realizaron dos experimentos. Uno de ellos es con flujo de viento no uniforme aplicado a las turbinas, que presenta la ventaja de aumentar o disminuir rápidamente el flujo de viento. El segundo experimento implementa un túnel del viento construido para la prueba, que presenta una superficie de flujo axial de 160 por 160 mm, con una profundidad de 500 mm.

Cada modelo se fabricó con una altura de 100 mm, con la finalidad de que la turbina pudiera quedar centrada dentro del túnel del viento. Las variables seleccionadas fueron: Voltaje, corriente, potencia y velocidad del viento. La variable controlada en ambos experimentos fue la velocidad del viento, a partir de esta, con un multímetro digital se determinaron las variables de voltaje y corriente. La potencia se calculó empleando una fórmula específica

Tipos de Turbinas Eólicas

Una turbina eólica es un dispositivo que convierte la energía cinética del viento en energía eléctrica. Esto se logra mediante el uso de palas o aspas que giran cuando son empujadas por el viento. Este movimiento rotatorio es transferido a un generador, generalmente a través de un eje y un conjunto de engranajes, produciendo electricidad. Las turbinas pueden ser clasificadas en función de la potencia de salida nominal como [7, 8]: Turbinas eólicas de gran escala; aerogeneradores de mediana escala y turbinas eólicas de pequeña escala.

Las turbinas se pueden dividir en dos categorías según la orientación de sus ejes: de eje horizontal (HAWT) y de eje vertical (VAWT). Entre las turbinas de eje vertical, los rotores Darrieus y Savonius son especialmente notables debido a la diversidad de sus diseños [9]. En 1931, Darrieus diseñó una turbina de eje vertical tipo elevación, conocida por su diseño de flujo cruzado. Esta turbina se destacó por tener la mayor eficiencia teórica entre todas las turbinas de eje vertical [10]. Sus principales variantes incluyen los tipos H, Y, ovalado (o tipo F) y diamante (de ángulo variable), clasificados según la forma de las aspas en paralelo a la superficie del eje. Las aspas Delta cuentan con estructuras helicoidales simétricas. [11]. La figura 1 ilustra los modelos de las turbinas VAWT y HAWT.

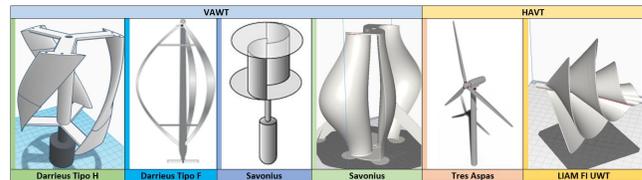


Fig. 1. Tipos de turbinas eólicas. Fuente: creación propia

Aplicaciones y Desafíos

Los rotores Savonius son turbinas VAWT que utilizan la fuerza del viento sobre sus palas en forma de copa para generar energía. Esta configuración les permite operar eficientemente incluso a bajas velocidades, lo que las hace ideales para áreas remotas debido a su menor inversión inicial y costos de mantenimiento reducidos. Su diseño flexible permite su instalación en diversas ubicaciones, ofreciendo una solución versátil para la generación de energía renovable. [12] [13].

Las turbinas eólicas del tipo HAWT generalmente son de gran capacidad. Estas pueden ser clasificadas en varias categorías que van desde micro, mini y domésticas hasta comerciales de pequeña, mediana y gran escala, dentro de las que destacan las de tres aspas [9].

Innovaciones en Diseño y Fabricación

Entre los estudios destacados, se ha analizado la eficiencia de las turbinas eólicas a pequeña escala ha permitido la realización de numerosos estudios a partir de prototipos [14]. Utilizando distintos métodos constructivos, diversos materiales [15] y componentes innovadores [16]. Entre los estudios destacados se ha examinado el impacto de la energía eólica en la estabilidad de pequeñas señales en un sistema de distribución aislado. [17]. También las cargas transitorias en hélices bajo condiciones de flujo no axial en un túnel de viento [18]. Así como un análisis comparativo entre un rotor tipo cicloide y un rotor tipo S para una turbina eólica de eje vertical [19], de igual forma se han centrado en el diseño, realización y prueba de un ala inteligente en un túnel de viento equipado con un generador de turbulencia [20]. Se han evaluado los equipos de fabricación aditiva y el proceso de impresión 3D considerando la sostenibilidad y los factores humanos [21]. Se ha analizado cómo mejorar el rendimiento de las turbinas eólicas Savonius mediante modificaciones de diseño adicionales [22]. También se han realizado revisiones científicas sobre el diseño y rendimiento de turbinas hidrocínicas de eje vertical con configuración helicoidal. [23] y de los modelos comerciales de turbinas eólicas a pequeña escala, tanto horizontales como verticales [8].

Túneles de Viento

Los túneles de viento son instalaciones de prueba aerodinámica diseñadas para proporcionar condiciones de prueba controladas y repetibles en un entorno de laboratorio, lo que permite simular adecuadamente algunas condiciones del mundo real [24]. Suelen tener un diseño de "circuito cerrado", donde el aire circula repetidamente a través de la

sección de prueba. Alternativamente, pueden usar un diseño de "retorno abierto", donde el aire se toma de un reservorio (como la atmósfera) y se expulsa después de una pasada.

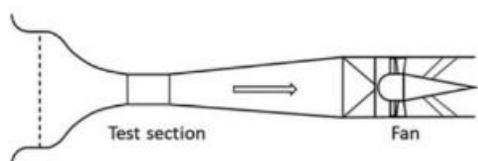


Fig. 2. Túnel del viento de retorno abierto [24].

Prototipos Destacados

Existe una amplia variedad de aplicaciones de turbinas a pequeña escala, ya que generan una cantidad de energía eléctrica muy reducida. Hay dos prototipos que destacan debido a su comercialización y utilización. Uno de ellos es el prototipo denominado Pared de Turbina Eólica (Muro del Viento), compuesto de una combinación de turbinas conectadas a un generador [25]. El otro dispositivo se denomina Árbol del viento, que presenta una serie de turbinas dispuesta en forma de ramas, de tal manera que el flujo de aire no altere a ninguna turbina [26]. En la figura 3 se aprecian estos dos modelos.



Fig. 3. Prototipos de turbinas eólicas; a) Árbol del viento [26]; b) Muro del viento [25].

III. MATERIALES Y MÉTODOS.

La investigación tiene como objetivo evaluar el comportamiento de cuatro modelos de turbinas eólicas a pequeña escala, cada una de ellas conectadas a tres tipos de generadores de corriente directa. Se consideraron dos variables principales: la velocidad del viento, que es la variable controlada y la potencia generada, que es la variable dependiente. La potencia se evaluará a partir de dos variables adicionales: voltaje y corriente. La metodología implementada se muestra en la figura 4.

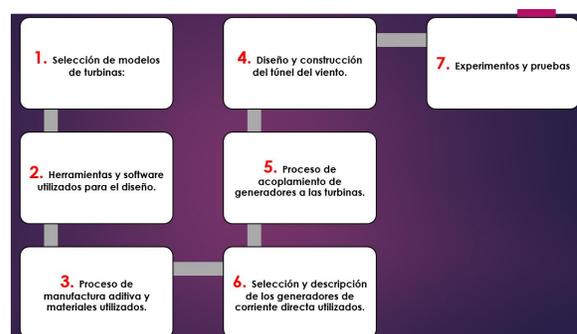


Fig. 4. Metodología empleada.

1. Selección de modelos de turbinas.

Se realizó una investigación exhaustiva del estado del arte, analizando las características constructivas de varios tipos de turbinas eólicas. La selección de los modelos más adecuados para su uso a pequeña escala se fundamentó en las características de construcción de un túnel del viento, que tiene un espacio cuadrado de 160 mm, considerando además criterios de eficiencia, simplicidad constructiva y adaptabilidad a diversos entornos. Cada modelo se adaptó a una altura total de 100 mm para poder ser utilizado dentro del túnel de viento. Estas dimensiones facilitan un acoplamiento eficaz con los generadores eléctricos de corriente directa utilizados en el experimento. Los modelos seleccionados fueron: una turbina Horizontal, una Darrius y dos modelos diferentes de turbina Savonius. Esta selección se fundamenta en la necesidad de representar diversas configuraciones y principios operativos, permitiendo así una evaluación comparativa integral.

2. Herramientas y software utilizados para el diseño.

Se utilizó SolidWorks para el diseño 3D, lo cual facilitó el proceso de dibujo y creación de los prototipos, Esta herramienta es muy intuitiva para la construcción de las figuras deseadas, permitiendo trabajar en dos ejes y tres ejes según lo requiera el proceso de diseño. SolidWorks es un software de diseño CAD 3D que permite modelar piezas y ensamblajes en tres dimensiones, además de crear dibujos en 2D. Es el programa de diseño mecánico e industrial más popular entre empresas, universidades y escuelas de ingeniería, gracias a su interfaz intuitiva y su amplia gama de funciones. [27].

La figura 5 ilustra el proceso de diseño de la turbina horizontal.

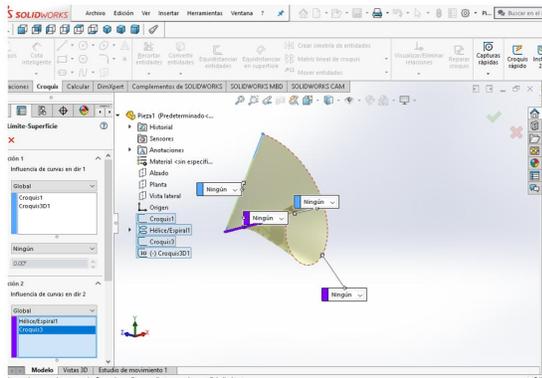


Fig. 5. Dibujo de turbina horizontal en SolidWorks.

Una vez terminado el diseño, el archivo tiene una extensión SLDPRJT, que corresponde al formato de salida de SolidWorks para piezas. Esta figura debe cambiar su extensión a un formato de laminado para que pueda ser leída en otra aplicación que convierte esa figura en líneas que se acumulan para crear una forma física. Para aplicar este formato al diseño, se debe seleccionar la opción “Guardar como” en el menú de archivo y elegir el formato STL (Standard Tessellation Language). El archivo STL es el formato estándar en la industria para la creación rápida de prototipos y es indispensable para la interacción con Quick parts. Este formato representa la superficie de un modelo sólido mediante la aproximación con triángulos. Por ejemplo, un modelo simple puede representarse con doce triángulos, mientras que una superficie más compleja requiere más triángulos [28].

Una herramienta muy útil para leer archivos con ésta extensión es el software Ultimaker Cura. En este software al cargar el archivo y abrirlo, puedes ajustar parámetros de impresión, como la altura de la capa, la velocidad de impresión, los soportes, el porcentaje de relleno y las temperaturas de la cama y de la boquilla, entre otros. Una vez seleccionados los parámetros adecuados, Cura ofrece una opción para segmentar la figura, permitiéndote visualizar el proceso de laminado y evaluar si tu configuración es la más adecuada [29]. La figura 6 muestra el proceso de segmentación en Ultimaker Cura para una turbina Savonius.

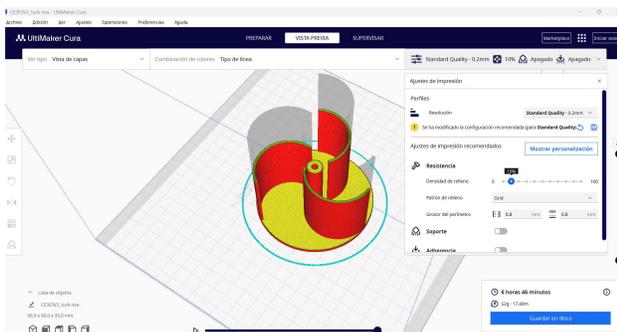


Fig. 6. Segmentación de un objeto en Ultimaker Cura.

3. Proceso de manufactura aditiva y materiales utilizados. Para la construcción de los prototipos, se consideraron tres tipos de materiales con características muy similares, pero con valores que difieren de acuerdo a sus propiedades constructivas. Los materiales evaluados fueron: PETG (polietileno tereftalato y glicol), PLA (Ácido poliláctico) y ABS (Acrilonitrilo butadieno estireno), De estas tres opciones, se seleccionó el material PLA por su adecuada temperatura de operación y resultados estéticos superiores. Aunque el ABS ofrecía mejor resistencia, presentaba inconsistencias al imprimir, ocasionando que se tapara la boquilla.

En esta etapa se utilizaron dos impresoras. Una de ellas fue la Ender 3 de la empresa Creality, que es una impresora de gama baja con características muy buenas para la impresión. Tiene una cama de impresión de 220 por 220 mm y una altura de 250 mm. La Ender 3 es una impresora 3D FDM (Fused Deposition Modeling) de nivel básico, reconocida por ofrecer una excelente relación calidad-precio. Es famosa por su facilidad de uso, confiabilidad y buena calidad de impresión. [30]. La otra impresora es la Createbot MAX con tecnología FDM, que es de una gama media. Tiene una cama de impresión de 280 por 250 mm y una altura de 400 mm. La figura 7 muestra ambas impresoras utilizadas [31].

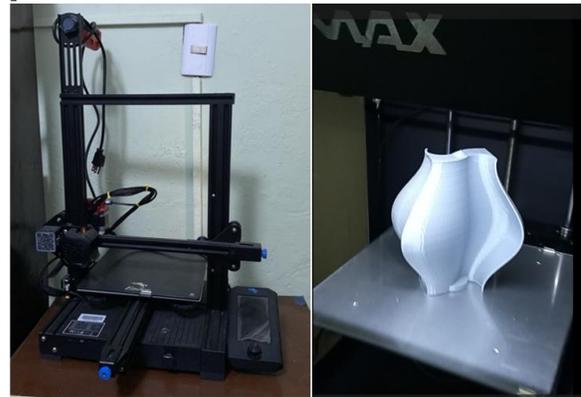


Fig. 7. Impresoras 3D utilizadas; a) Ender 3; b) Createbot MAX.

Con estas impresoras se fabricaron diferentes turbinas. En la figura 8 se presentan los modelos seleccionados para el estudio experimental. En la figura 7 b) se muestra un modelo de turbina Savonius impreso en 3D, que tuvo una duración en la impresión de 8 horas 24 minutos. En la figura 8 se muestran los cuatro modelos seleccionados para los experimentos.



Fig. 8. Turbinas elaboradas mediante tecnología FDM, de derecha a izquierda, Savonius (modelo 1), Savonius (modelo 2), Darrieus y LIAM F1 UWT.

4. Selección y descripción de los generadores de corriente directa utilizados.

En el estudio se utilizaron diferentes generadores de corriente directa con la intención de evaluar dos aspectos: la velocidad a la que se empieza a generar energía eléctrica y la velocidad a la que esta energía eléctrica puede ser utilizada para alimentar una carga mínima. A continuación, la tabla 1 muestra las características de los generadores utilizados.

Generador	Voltaje	RPM	Modelo
Generador 1	12 V	3500	770 Series
Generador 2	12-24 V	10500	FM-43E
Generador 3	12 V	6000	Imán Permanente

Tabla.1. Características de los generadores utilizados.

La selección de estos generadores fue muy importante, ya que se consideraron aquellos con dimensiones similares, un torque muy pequeño y la capacidad de generar energía eléctrica incluso a partir de velocidades de viento muy bajas. En la figura 9 se muestran los generadores utilizados.



Fig. 9. Generadores de corriente directa seleccionados

5. Proceso de acoplamiento de generadores a las turbinas.

Para acoplar los modelos con los generadores de corriente directa se diseñaron dos bases: una para las turbinas verticales y otra para la turbina horizontal. En uno de los diseños, se agregó un soporte para poder sujetar el anemómetro, lo que permitió medir el flujo de viento sin obstruir el paso hacia la turbina. La figura 10 muestra los soportes diseñados para el experimento.

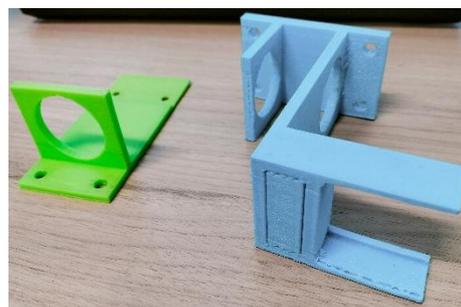


Fig. 10. Bases de soporte para los generadores, de izquierda a derecha, para turbina horizontal, para turbina vertical.

Para el acoplamiento entre el modelo impreso y el generador, se le hizo un orificio de 3mm a cada modelo. En el orificio se agregó un perno roscado, con la finalidad de que la rosca hiciera presión interna dentro del modelo y quedara lo más fija posible. En la figura 8 se aprecia este perno saliente en tres modelos. En el otro extremo del perno se colocó un adaptador hexagonal, que de un lado tiene rosca para fijarse al perno roscado y del otro lado un hueco sin rosca para fijarse en el eje del motor. La figura 11 muestra el acoplamiento mencionado, además de la forma en que ambos elementos se montan en la base soporte.

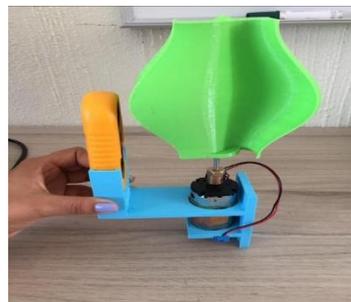


Fig. 11. Modelo acoplado a generador montado en la base de soporte

6. Diseño y construcción del túnel del viento.

El diseño del túnel del viento se realizó utilizando SolidWorks, con un área de viento de 160 por 160 mm y una profundidad de 500 mm, la figura 12 muestra el diseño del túnel.

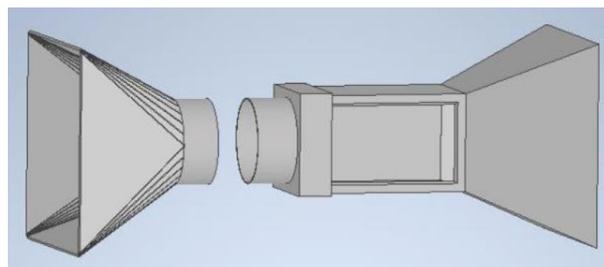


Fig. 12. Diseño de túnel del viento en SolidWorks

El proceso de construcción permitió crear un túnel del viento a partir de un diseño en 3D, utilizando acero inoxidable de 3 mm de espesor y adaptando un ventilador, que permitía una velocidad del viento uniforme que se

aplicaba al espacio donde se colocaban las diferentes turbinas. La figura 13 muestra el túnel del viento construido.



Fig. 13. Túnel del viento construido

Para validar el funcionamiento del túnel del viento, se realizaron pruebas sin la base soporte, con el fin de verificar si la cantidad de viento era suficiente para nuestro propósito. La figura 14 muestra una prueba de funcionamiento de la turbina horizontal dentro del túnel de viento.



Fig. 14. Pruebas de funcionamiento del Túnel del viento

7. Experimentos y pruebas

Se realizaron dos pruebas con las diferentes turbinas. La primera consistió en aplicar un flujo de aire a través de una manguera con flujo de viento controlado. Esta prueba tiene la ventaja de incrementar rápidamente el flujo de viento, pero la desventaja de una distribución no uniforme del flujo de aire, resultando en lecturas anormales en algunos valores. La segunda prueba se realizó en el túnel de viento, el cual ofrece la ventaja de generar un flujo constante de viento, distribuido de manera axial sobre la superficie de la turbina, pero la desventaja de no modificar rápidamente las cantidades de viento aplicadas. La figura 15 muestra las dos opciones de experimentos implementados.



Fig. 15. Experimentos aplicados a turbina Savonius a) flujo de viento dirigido; b) flujo de viento a través de túnel del viento

Las variables seleccionadas fueron: Voltaje, corriente, potencia y velocidad del viento. La variable controlada para ambos experimentos fue la velocidad del viento. En el primer experimento no se logró controlar adecuadamente la dirección del viento aplicado sobre la turbina. Sin embargo, en el segundo experimento se logró un mejor control de esta variable, ya que el dispositivo utilizado ofrecía una velocidad del viento distribuida axialmente. Al colocar las turbinas a diferentes distancias, se sometían a diferentes velocidades de flujo de viento controlado.

IV. RESULTADOS

En el primer experimento se realizaron pruebas a las turbinas para obtener valores de voltaje y corriente que permitieran identificar su comportamiento con diferentes generadores. En la tabla 2 se muestran los resultados de la turbina Savonius (modelo 1) con los diferentes generadores de corriente directa.

velocidad de viento m/s	Generador 1			Generador 2			Generador 3		
	voltaje mV	corriente mA	Potencia mW	voltaje mV	corriente mA	Potencia mW	voltaje mV	corriente mA	Potencia mW
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	1.6	7.5	0.01	6.6	7.6	0.05	1.5	32	0.05
5	1.8	9.2	0.02	8.1	17.6	0.14	2.8	38.9	0.11
6	2.8	11.8	0.03	11.4	18.8	0.21	6.7	67.9	0.45
7	5.8	24.6	0.14	12.4	19.5	0.24	7.2	68.8	0.50
8	6.7	19.8	0.13	13.4	27.7	0.37	9.7	74.5	0.72
9	7.3	20.6	0.15	15.6	49	0.76	10.3	79	0.81
10	10.2	45	0.46	17.3	58.4	1.01	12.2	83.8	1.02
11	11.6	59	0.68	18.1	65.6	1.19	18.3	117.7	2.15
12	15.9	83.2	1.32	19.5	90.1	1.76	23.3	100.8	2.35

Tabla 2. Resultados del experimento uno aplicado a turbina Savonius (modelo 1) con diferentes generadores.

Estos resultados indican la cantidad de voltaje y corriente generados por esta turbina sometida a diferentes velocidades del viento. El gráfico resultante de esta tabla genera la figura 16, que muestra los valores de potencia generada (voltaje * corriente) vs la velocidad del viento aplicada en el experimento uno.

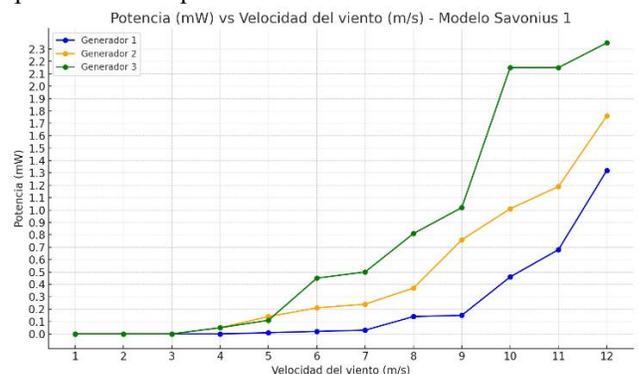


Fig. 16. Potencia generada de la turbina Savonius (modelo 1) con diferentes generadores de corriente directa.

De igual forma, en la tabla 3 se muestran los resultados de la turbina Savonius (modelo 2) con diferentes generadores de corriente directa.

Modelo Savonius 2									
velocidad de viento m/s	Generador 1			Generador 2			Generador 3		
	voltaje mV	corriente mA	Potencia mW	voltaje mV	corriente mA	Potencia mW	voltaje mV	corriente mA	Potencia mW
1	0	0	0.00	0	0	0.00	0	0	0.00
2	3.5	18.5	0.06	0.8	1.5	0.00	0	0	0.00
3	4.8	19.1	0.09	2	10.3	0.02	3.6	22.1	0.08
4	5.8	21.9	0.13	3.7	20.9	0.08	5.8	41.4	0.24
5	6.1	22.3	0.14	4.85	22	0.11	6.9	39.8	0.27
6	6.2	23.1	0.14	5	25	0.13	8.1	51.5	0.42
7	6.7	28.5	0.19	5.5	29.3	0.16	8.8	68.8	0.61
8	7.2	39.9	0.29	5.8	34.8	0.20	12.5	72.2	0.90
9	9.8	56.3	0.55	6.5	39.2	0.25	17	93.9	1.60
10	10.8	54.4	0.59	7.5	42.6	0.32	17.6	99.5	1.75
11	11.9	55.5	0.66	8.3	50.4	0.42	19.4	111.6	2.17
12	12.8	63.9	0.82	9.1	58.7	0.53	20.6	119.9	2.47

Tabla 3. Resultados del experimento uno aplicado a turbina Savonius (modelo 2) con diferentes generadores.

La figura 17 muestra el comportamiento de la potencia del segundo modelo, destacando el generador 3 con mayor capacidad de generación de energía.

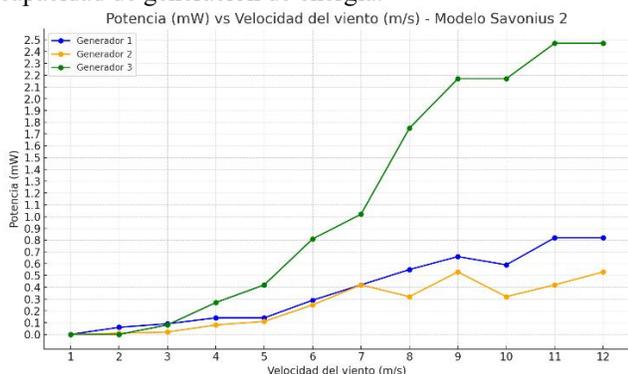


Fig. 17. Potencia generada de la turbina Savonius (modelo 2) con diferentes generadores de corriente directa.

Este experimento también se aplicó a la turbina horizontal LIAM F1 UWT. La tabla 4 muestra sus resultados de acuerdo al primer experimento.

LIAM F1 UWT									
velocidad de viento m/s	Generador 1			Generador 2			Generador 3		
	voltaje mV	corriente mA	Potencia mW	voltaje mV	corriente mA	Potencia mW	voltaje mV	corriente mA	Potencia mW
1	0	0	0.00	0	0	0.00	0	0	0.00
2	2.7	12	0.03	0.6	7.5	0.00	3.1	10.6	0.03
3	3.6	15.3	0.06	1.4	11.3	0.02	4.1	20.2	0.08
4	4.5	18.4	0.08	2.6	18.2	0.05	5.4	39.5	0.21
5	4.8	20.1	0.10	3.4	21.2	0.07	6.3	50.11	0.32
6	5.1	22.6	0.12	3.5	26.4	0.09	7.6	60.4	0.46
7	5.9	27.6	0.16	3.9	31.2	0.12	8.5	73.6	0.63
8	6.1	34.5	0.21	4.2	38.8	0.16	10.8	90.4	0.98
9	8.5	48.3	0.41	4.8	43.6	0.21	13.3	100.7	1.34
10	9.1	59.6	0.54	5.9	51.4	0.30	19.5	110.5	2.15
11	9.9	65.8	0.65	6.5	60.9	0.40	23.6	122.8	2.90
12	10.9	79.4	0.87	7.9	72	0.57	25.9	130.1	3.37

Tabla 4. Resultados del experimento uno aplicado a turbina horizontal (LIAM F1 UWT) con diferentes generadores.

Esta tabla también permite identificar el comportamiento de los diferentes generadores y, a partir de la potencia generada, se puede apreciar cuál de los tres generadores es el que más produce energía eléctrica.

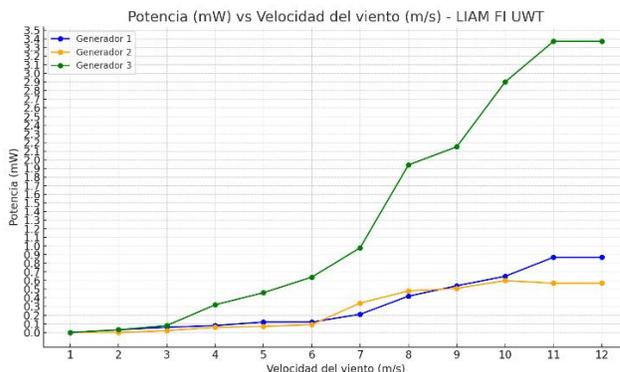


Fig. 18. Potencia generada de la turbina Horizontal con diferentes generadores de corriente directa.

En cuanto a la turbina Darrieus, este experimento quedó descartado debido a la dificultad de hacerla girar. Cuando se lograba, los resultados obtenidos eran muy pobres comparados con los demás modelos. Por lo tanto, este modelo quedó descartado en el primer experimento. El generador 3 presentó la mejor eficiencia energética en comparación con los demás. En cuanto a las gráficas, se observó que la turbina LIAM F1 UWT es la más eficiente y adecuada para aplicaciones donde se espera una amplia gama de velocidades de viento, mostrando un excelente rendimiento en condiciones de viento más fuerte. La figura 19 muestra la gráfica comparativa entre las tres turbinas, acopladas al generador 3.

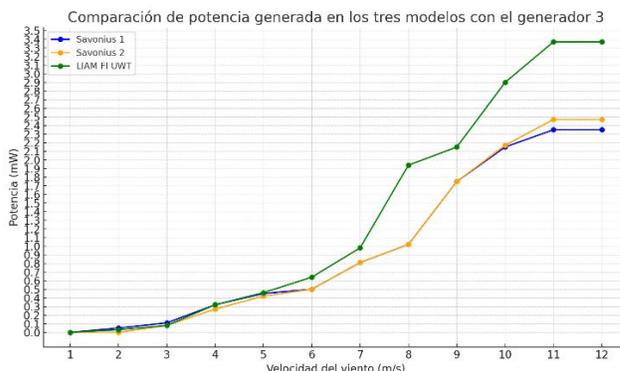


Fig. 19. Potencia generada de diferentes turbinas bajo las mismas condiciones utilizando el generador 3 del experimento uno.

Para el segundo experimento se utilizó un túnel del viento. Antes de realizar el experimento, se midió la velocidad que entregaba el ventilador. A una distancia de 30 cm entre el ventilador y la base, se obtuvo una velocidad de 2m/s; a una distancia de 7 cm, la velocidad máxima alcanzada fue de 7 m/s. La tabla 5 muestra las distancias correspondientes para cada velocidad dentro de ese rango establecido.

Modelo Savonius 1										
distancia cm	velocidad de viento m/s	Generador 3			Generador 2			Generador 1		
		voltaje mV	corriente mA	Potencia mW	voltaje mV	corriente mA	Potencia mW	voltaje mV	corriente mA	Potencia mW
30	2	0	0	0.00	0	0	0.00	0	0	0.00
25	3	1.5	5.2	0.01	0	0	0.00	0	0	0.00
20	4	7	21.3	0.15	0	0	0.00	0	0	0.00
15	5	50	26.9	1.35	66	23.2	1.53	3	12	0.04
10	6	112	35.5	3.98	108	50.4	5.44	71	32	2.27
7	7	129	47.2	6.09	116	57.2	6.64	84	39.6	3.33

Tabla 5. Resultados del segundo experimento aplicado a la turbina Savonius (modelo 1) con diferentes generadores.

La figura 20 muestra la gráfica de potencia de este modelo aplicado a los tres generadores bajo el experimento del túnel del viento.

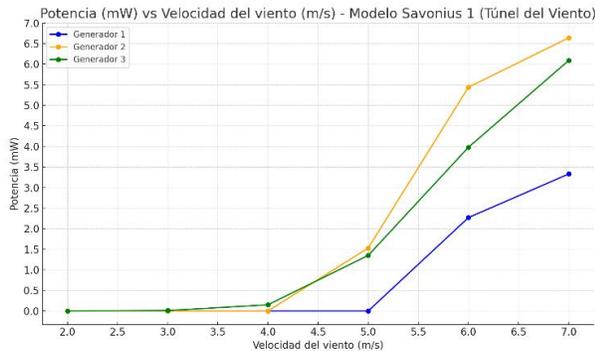


Figura 20. Potencia generada de la turbina Savonius (modelo 1) con diferentes generadores de corriente directa.

El segundo modelo de Savonius ofreció mejores resultados que el modelo 1. La tabla 6 muestra los resultados obtenidos al someter esta turbina al túnel del viento con diferentes generadores eléctricos.

Modelo Savonius 2										
distancia cm	velocidad de viento m/s	Generador 3			Generador 2			Generador 1		
		voltaje mV	corriente mA	Potencia mW	voltaje mV	corriente mA	Potencia mW	voltaje mV	corriente mA	Potencia mW
30	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	3	2.1	8.7	0.02	0	0	0.00	0	0	0
20	4	8.4	32.4	0.27	15	18	0.27	0	0	0
15	5	43.6	46.3	2.02	72	31.7	2.28	6.1	15	0.09
10	6	115.2	55.4	6.38	112	62.5	7.00	80.2	30	2.41
7	7	162.1	72.3	11.72	120	67.3	8.08	91.3	36.5	3.33

Tabla 6. Resultados del segundo experimento aplicado a turbina Savonius (modelo 2) con diferentes generadores.

Estos datos permitieron graficar el comportamiento de la turbina en función de la potencia generada, en la figura 21 se aprecian los resultados de manera gráfica.

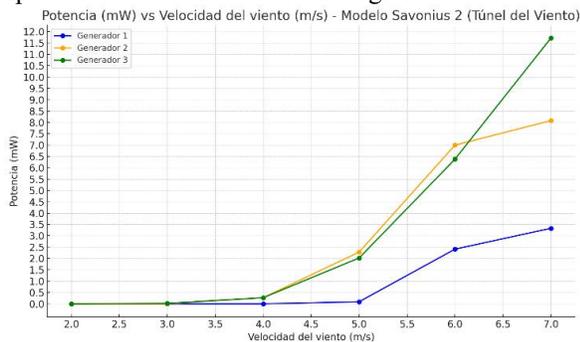


Figura 21. Potencia generada de la turbina Savonius (modelo 2) con diferentes generadores de corriente directa.

En este segundo experimento aplicado a la turbina horizontal, se obtuvo la siguiente información:

Modelo LIAM F1 UWT										
distancia cm	velocidad de viento m/s	Generador 3			Generador 2			Generador 1		
		voltaje mV	corriente mA	Potencia mW	voltaje mV	corriente mA	Potencia mW	voltaje mV	corriente mA	Potencia mW
30	2	2.1	1.5	0.00	0	0	0	2.1	1.5	0.00
25	3	7	7.1	0.05	0	0	0	3.3	7	0.02
20	4	28	10.9	0.31	4.2	8.7	0.04	18.2	10.9	0.20
15	5	23	25.6	0.59	11.3	19.9	0.22	47.6	25.6	1.22
10	6	47	44	2.07	24.8	27	0.67	53.9	34.5	1.86
7	7	53	64.5	3.42	48.9	56.9	2.78	70.7	44	3.11

Tabla 7. Resultados del segundo experimento aplicado a turbina horizontal (LIAM F1 UWT) con diferentes generadores.

La grafica de potencia de esta turbina fue la siguiente.

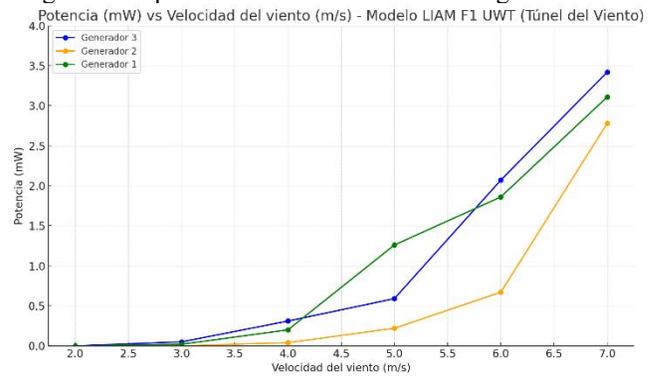


Fig. 22. Potencia generada por la turbina horizontal con diferentes generadores de corriente directa.

Ahora, con respecto a las gráficas, se observó que la turbina Savonius (modelo 2) es la más eficiente y adecuada para aplicaciones donde se espera una amplia gama de velocidades de viento, mostrando un excelente rendimiento en condiciones de viento más fuerte. La figura 21 muestra la gráfica comparativa entre las tres turbinas, acopladas al generador 3.

Comparación de potencia generada de los tres modelos utilizando el generador 3 en prueba de Túnel del viento

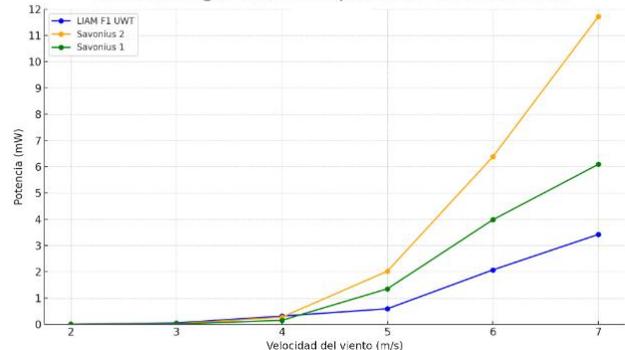


Fig. 21. Potencia generada de diferentes turbinas bajo las mismas condiciones utilizando el generador 3 utilizando el túnel del viento.

Con los resultados obtenidos de este segundo experimento se observó que la turbina Horizontal (LIAM F1 UWT) genera menor potencia en comparación con los otros dos

modelos a todas las velocidades del viento evaluadas en este segundo experimento. Mientras tanto, la turbina Savonius (Modelo 2) muestra un rendimiento mejorado respecto a la turbina Savonius (Modelo 1), mostrando un incremento considerable en la potencia generada a medida que aumenta la velocidad del viento, superando significativamente a las turbinas Savonius (Modelo 1) y a la turbina horizontal, especialmente a velocidades más altas de viento. A 7 m/s, genera la mayor potencia, destacándose como la opción más eficiente entre las tres.

V. CONCLUSIONES

En el primer experimento, la turbina LIAM F1 UWT se destacó como la más eficiente y adecuada para velocidades de viento en el rango de 5 a 12 m/s, mostrando un excelente rendimiento en condiciones de viento fuerte. Sin embargo, aunque ambas turbinas Savonius presentan un diseño más simple y son buenas para vientos bajos y moderados, el Modelo 2 ofrece una ventaja sobre el Modelo 1 en términos de eficiencia energética, ya que mostró mayor eficiencia con los tres generadores. Con este experimento de flujo variable y analizando las condiciones climáticas de las regiones se recomienda que, para ubicaciones con vientos suaves y consistentes, una turbina Savonius podría ser más económica y sencilla de mantener. Sin embargo, para ambientes donde la energía eólica es más variable o en entornos urbanos, la LIAM F1 UWT sería una elección más acertada.

En el segundo experimento, se observó que, con flujos más constantes, las turbinas Savonius ofrecen una mejor alternativa para velocidades de viento entre 4 y 6 m/s, siendo el segundo modelo el que ofreció mayor eficiencia energética. En cuanto a la turbina LIAM F1 UWT, su comportamiento bajo un flujo constante es más moderado que las turbinas Savonius, aunque la cantidad de energía en el rango de 3 a 5 m/s a pesar de ser menor ofrece valores muy cercanos a los otros modelos.

VI. DISCUSIONES

En ambos experimentos se observó que la turbina horizontal LIAM F1 UWT presenta una mejor eficiencia cuando los flujos del viento son distribuidos de manera no uniforme, pero cuando el flujo es distribuido uniformemente, su eficiencia energética disminuye considerablemente. Aun así, sigue siendo muy recomendada para instalarse en lugares con velocidades del viento arriba de 5 m/s. Con esto se corroboran los resultados de estudios anteriores realizados [14, 15].

Con respecto a la turbina Savonius (Modelo 1), se observó que es muy buena para velocidades bajas (entre 2 y 5 m/s), ya que en ambos experimentos se comportó de una manera muy similar.

La turbina Savonius (Modelo 2) mostró un mejor rendimiento que el otro modelo, por lo que puede ser una mejor opción de ser utilizada en bajas velocidades, y puede ser considerada donde haya altas velocidades de viento con poca variabilidad.

VII. 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, que incluyan simulaciones y diferentes pruebas en túneles del viento.
2. Investigar 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. Estudiar el impacto de la producción y uso de estas turbinas en comunidades rurales, así como su aceptación social y su potencial para mejorar la calidad de vida mediante la provisión de energía renovable.
5. Investigar la integración de las turbinas eólicas con otras fuentes de energía renovable, como paneles solares, para crear sistemas híbridos que maximicen la generación de energía en diferentes condiciones climáticas.

Este artículo no solo enmarca el trabajo actual en un contexto más amplio de investigación y desarrollo, sino que también traza un camino para que futuros investigadores puedan seguir avanzando en este campo.

REFERENCIAS

- [1] R. Said, M. Bhatti, y A. Hunjra, "Toward Understanding Renewable Energy and Sustainable Development in Developing and Developed Economies: A Review," *Energies*, vol. 15, 2022.
- [2] N. D. Y. N. H. M. S. K. Poul Alberg Østergaard, "Sustainable development using renewable energy technology," *Renewable Energy*, vol. 146, pp. 2430-2437, 2020.
- [3] T. J. C. J. H. S. A. N. E. Sanchez-Rexach, "Sustainable materials and chemical processes for additive manufacturing," *Chemistry of Materials*, vol. 32, no. 17, pp. 7105-7119, 2020.
- [4] T. L. R. R. N. Shahrubudin, "An overview on 3D printing technology: Technological, materials, and applications," *Procedia Manufacturing*, vol. 35, pp. 1286-1296, 2019.
- [5] E. A. BARRAGÁN-ESCANDÓN, "Las energías renovables a escala urbana. Aspectos determinantes y selección tecnológica," *Bitácora Urbano Territorial*, vol. 29, no. 2, pp. 39-48, 2019.
- [6] E. T. Sayed, "Renewable Energy and Energy Storage Systems," *Energies*, vol. 16, no. 3, 2023.
- [7] N. J. H. P. G. P. M. Raymond Byrne, "Observed site obstacle impacts on the energy performance of a large scale urban wind turbine using an electrical energy rose," *Energy for Sustainable Development*, vol. 43, pp. 23-37, 2018.
- [8] A. Rosato, A. Perrotta, y L. Maffei, "Commercial Small-Scale Horizontal and Vertical Wind Turbines: A Comprehensive Review of Geometry, Materials, Costs and Performance," *Energies*, vol. 17, no. 3125, 2024.
- [9] A. Tummala, R. Velamati, D. Sinha, V. Indrajya, y V. Krishna, "A review on small scale wind turbines," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 56, pp. 1351-1371, 2016.

- [10] M. Nachtane, M. Tarfaoui, I. Goda, y M. Rouway, "A review on the technologies, design considerations and numerical models of tidal current turbines," *Renewable Energy*, vol. 157, pp. 1274-1288, 2020.
- [11] M. Mosbahi, A. Ayadi, Y. Chouaibi, Z. Driss, y T. Tucciarelli, "Performance improvement of a novel combined water turbine," *Energy Conversion and Management*, vol. 205, no. 112473, 2020.
- [12] N. Alom y U. Saha, "Drag and lift characteristics of a novel elliptical-bladed Savonius rotor with vent augmenters," *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 141, no. 051007, 2019.
- [13] N. Alom, "Influence of curtain plates on the aerodynamic performance of an elliptical bladed Savonius rotor (S-rotor)," *Energy Systems*, vol. 13, pp. 265-280, 2021.
- [14] R. & F.-J. A. & F. P. V. M. & Y. A. & Á. E. Espina Valdés, "Análisis experimental de la influencia del ángulo de torsión de los álabes de turbinas hidrocínicas Darrieus helicoidales," *Ingeniería del Agua*, vol. 26, no. 10.4995, pp. 205-216, 2022.
- [15] R. C. D. K. T. K. Bassett, "3D printed wind turbines part 1: Design considerations and rapid manufacture potential," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 11, pp. 186-193, 2015.
- [16] J. C. Ruíz-Morales, "Impresión tridimensional de componentes y dispositivos funcionales para aplicaciones energéticas y medioambientales," *Energía y Ciencias Ambientales*, vol. 10, no. 4, pp. 846-859, 2017.
- [17] A. y C. F. M. y R.-A. M. Santos Fuentefría, "Influencia de la energía eólica en la estabilidad de pequeñas señales de un sistema de islas de distribución," *Ingeniería Energética*, vol. XL, pp. 171-180, 2019.
- [18] C. Moreira y N. Herzog, "Wind Tunnel Investigation of Transient Propeller Loads for Non-Axial Inflow Conditions," *Aerospace*, vol. 11, no. 274, 2024.
- [19] J. González-Durán, J. Olivares-Ramírez, M. Luján-Vega, J. Soto-Osornio, J. García-Guendulain, y J. Rodríguez-Resendiz, "Experimental and Numerical Analysis of a Novel Cycloid-Type Rotor versus S-Type Rotor for Vertical-Axis Wind Turbine," *Technologies*, vol. 12, no. 24, 2024.
- [20] I. Ursu, G. Tecuceanu, D. Enciu, A. Toader, I. Nastase, M. Arghir, y M. Calcea, "A Smart Wing Model: From Design to Testing in a Wind Tunnel with a Turbulence Generator," *Aerospace*, vol. 11, no. 493, 2024.
- [21] I. Mendoza-Muñoz, M. Montoya-Reyes, A. Maldonado-Macías, G. Jacobo-Galicia, y O. Vargas-Bernal, "A Hierarchical Axiomatic Evaluation of Additive Manufacturing Equipment and the 3D Printing Process Based on Sustainability and Human Factors," *Processes*, vol. 12, no. 1083, 2024.
- [22] B. Deda Altan y Gultekin, "Investigation of Performance Enhancements of Savonius Wind Turbines through Additional Designs," *Processes*, vol. 11, no. 1473, 2023.
- [23] R. P.-S. Gabriel Pico-Saltos, "Revisión TURBINAS HIDROCINÉTICAS DE EJE VERTICAL HELICOIDAL," *Revista científico-educacional de la provincia Granma*, vol. 14, no. 1, 2018.
- [24] C. B. y D. Landman, Wind Tunnel Test Techniques, *Elsevier Science*, 2022.
- [25] L. Blain, "'Wind turbine wall' turns power generation into an aesthetic feature," NEW ATLAS, 29-Dec-2021. [En línea]. Available: <https://newatlas.com/energy/wind-turbine-wall-doucet/>. [Último acceso: 29-May-2024].
- [26] EcoInventos green technology, "El árbol del viento. Una innovadora fuente de energía eólica para las ciudades," 06-Aug-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-May-2024].
- [27] CIMWORKS LUTECH, "SOLIDWORKS CAD 3D," CIMWORKS. [En línea]. Available: <https://www.cimworks.es/solidworks-3d-cad/>. [Último acceso: 02-Aug-2024].
- [28] 3D SYSTEMS, "¿Qué es un archivo .STL?," 3D SYSTEMS. [En línea]. Available: <https://es.3dsystems.com/quickparts/learning-center/what-is-stl-file.> [Último acceso: 02-Aug-2024].
- [29] 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-Mar-2024].
- [30] CABALLERO 3D, "Impresora Ender 3 V3 Creality," CABALLERO 3D, 2024. [En línea]. Available: <https://www.caballero3d.com/tienda-2/creality-ender-3-v3-impresora-3d/>. [Último acceso: 02-Aug-2024].
- [31] 3D Systems, "IMPRESORA 3D CREATEBOT MAX," 3D Systems. [En línea]. Available: <https://www.3dsystems.com/quickparts/learning-center/what-is-stl-file.>

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. Estudiante de Doctorado en Universidad TENAM. Colegio de Formación Educativa TENAM S.C.

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.