

El LIENE avanza hacia una turbina eólica adaptada al viento de Costa Rica

Gustavo Richmond-Navarro

Escuela de Ingeniería Electromecánica
Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica
✉ grichmond@tec.ac.cr

Maximino Jiménez-Ceciliano

Escuela de Ingeniería Electromecánica
Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica
✉ maxjimenez@tec.ac.cr

Juan José Montero-Jiménez

Escuela de Ingeniería Electromecánica
Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica
✉ juan.montero@tec.ac.cr

Fecha de recepción: 15 de mayo 2025 | Fecha de aprobación: 4 de setiembre de 2025

Resumen

El Laboratorio de Investigación en Energía Eólica (LIENE), de la Escuela de Ingeniería Electromecánica del Instituto Tecnológico de Costa Rica, trabaja en el desarrollo de un rotor de turbina eólica adaptado a las condiciones particulares del viento costarricense. Este esfuerzo comenzó en 2018 con la instalación de torres meteorológicas para caracterizar el recurso eólico del país. A partir de los datos obtenidos, se realizó una revisión de literatura sobre perfiles aerodinámicos adecuados para el tipo de flujo predominante. Con esa base, se diseñó un rotor experimental, que posteriormente fue manufacturado y puesto a prueba en condiciones controladas de laboratorio. Los resultados mostraron mejoras de hasta un 218% en comparación con un rotor comercial. A futuro, la investigación se enfocará en el estudio del número óptimo de aspas, el refinamiento del diseño aerodinámico y el acoplamiento eficiente entre el rotor y el generador eléctrico.

Palabras clave

Turbina eólica, rotor, microgeneración, turbulencia, pequeña escala.

Abstract

The LIENE lab (Laboratorio de Investigación en Energía Eólica) of the Department of Electromechanical Engineering at the Instituto Tecnológico de Costa Rica is working on the development of a wind turbine rotor adapted to the particular wind conditions of Costa Rica. This effort began in 2018 with the installation of meteorological towers to characterize the country's wind resource. Based on the obtained data, a literature review was carried out on aerodynamic profiles suitable for the predominant flow type. On that basis, an experimental rotor was designed, later manufactured, and tested under controlled laboratory conditions. The results showed improvements of up to 218% compared to a commercial rotor. In the future, the research will focus on studying the optimal number of blades, refining the aerodynamic design, and achieving efficient coupling between the rotor and the electric generator.

Key words

Wind turbine, rotor, microgeneration, turbulence, small scale.

Introducción

Costa Rica ha dado pasos firmes hacia la generación de energía a partir de fuentes renovables, destacándose por su matriz eléctrica principalmente renovable [1]. Sin embargo, aún queda camino por recorrer en el aprovechamiento distribuido de esas fuentes, especialmente en lo que respecta a la energía eólica de pequeña escala. Esta modalidad resulta especialmente atractiva para comunidades rurales o aisladas, o para proyectos que buscan autosuficiencia energética. No obstante, su desarrollo enfrenta un obstáculo fundamental: la mayoría de las turbinas disponibles en el mercado no están diseñadas para operar con eficiencia en las condiciones de viento típicas de Costa Rica, caracterizadas por entornos boscosos e irregulares.

En efecto, la mayoría de los rotores comerciales están optimizados para velocidades de viento en torno a los 10 m/s, mientras que en muchas regiones de Costa Rica —y también de otros países de la región— los vientos alcanzan su mayor densidad de potencia en el rango de los 5 a 7 m/s. Esta discrepancia fue evidenciada en estudios previos realizados en el país, donde se ha documentado que el desempeño de las turbinas comerciales es limitado en entornos como los nuestros, tal como se mostró en un caso de estudio sobre microgeneración eólica en una zona boscosa [2].

Para abordar este desafío, el LIENE ha desarrollado una iniciativa desde 2018 para diseñar un rotor de turbina eólica adaptado al viento costarricense. El primer paso fue obtener información confiable sobre el comportamiento del viento en distintos puntos del país. Para ello, se instalaron torres meteorológicas equipadas con anemómetros en sitios con topografía compleja y presencia de obstáculos, como bosques y edificaciones [3], específicamente en el Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC), donde se seleccionaron dos puntos que simulan adecuadamente estas condiciones. Además, se utilizaron datos del Instituto Meteorológico Nacional para enriquecer y validar los resultados [4].

Con esta base de datos consolidada, se realizó una revisión de literatura científica que permitió identificar qué perfiles aerodinámicos resultan más adecuados para operar en flujos turbulentos y de baja velocidad, especialmente en zonas con cobertura forestal [5]. Esta información se utilizó para definir una geometría de aspa que pudiera maximizar el rendimiento bajo estas condiciones. Tras varias iteraciones, se seleccionó un perfil modificado y se diseñó un rotor utilizando el software libre Small Wind-Turbine Rotor Design Code (SWRDC), el cual fue proporcionado por sus diseñadores a solicitud [6]. Posteriormente, este rotor fue manufacturado en el LIENE y probado bajo condiciones controladas en el laboratorio de transferencia de calor de la Universidad de Costa Rica (UCR) donde está disponible un túnel de viento.

El objetivo de este artículo es presentar el proceso de evaluación experimental del rotor desarrollado por el LIENE y compararlo con el desempeño de un rotor comercial. La comparación pone en evidencia el potencial que tiene un diseño local y específico para mejorar significativamente el aprovechamiento del viento en regiones donde los dispositivos comerciales simplemente no son eficientes.

Metodología

El diseño del rotor se realizó utilizando el software SWRDC, tomando en cuenta las condiciones de viento características de Costa Rica y, en particular, los perfiles aerodinámicos modificados derivados del SG6043. El SG6043 es una forma aerodinámica diseñada específicamente para optimizar la respuesta de la fuerza de sustentación a bajas velocidades del viento, lo que lo hace especialmente adecuado para entornos con flujo turbulento, como los que predominan en muchas regiones del país. Estos perfiles fueron definidos a partir de ensayos realizados en túneles de viento, con el fin de mejorar el comportamiento del rotor en condiciones de baja velocidad y alta turbulencia. Además, se exploraron variantes orientadas al control del flujo, optimizando así el rendimiento aerodinámico del diseño.

Una vez definido el diseño, se fabricó el rotor en el LIENE mediante impresión 3D utilizando una impresora Artillery Sidewinder X1. El modelo digital se dividió en secciones para facilitar su manufactura y luego se ensambló para obtener el rotor completo.

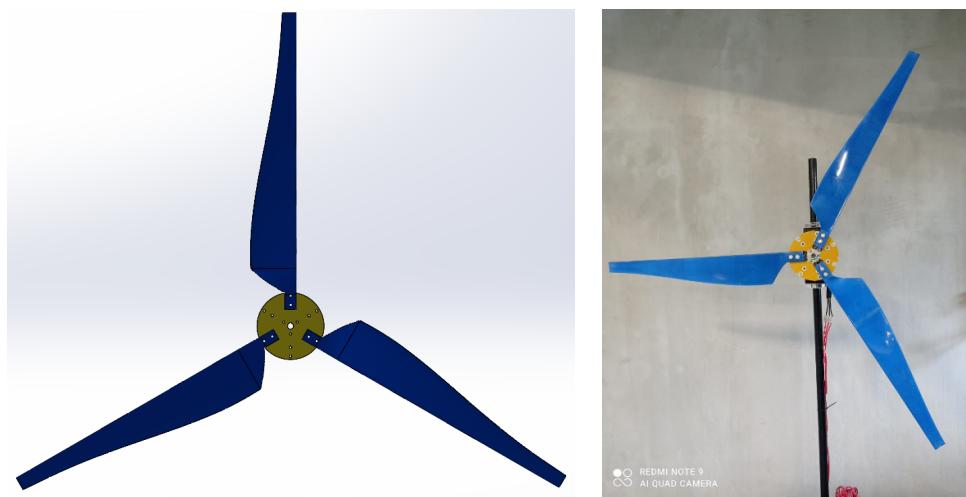


Figura 1. Diseño del rotor (izquierda) y rotor manufacturado (derecha). Fuente: los autores.

Con el rotor construido, se realizaron pruebas experimentales en el túnel de viento de la UCR. Para aproximarse a las condiciones de turbulencia características de entornos naturales, el rotor se colocó a 1 metro de la salida del túnel, donde el flujo deja de ser laminar debido a la formación de vórtices al descargarse hacia la atmósfera, efecto acentuado por la geometría rectangular de la boquilla de salida. Además, al ser el rotor un disco y la salida del túnel un rectángulo de menor altura que su diámetro, el flujo incidente sobre la turbina no era homogéneo. Para comparar su desempeño, se utilizó una turbina comercial de pequeña escala, a la que se le retiraron las aspas originales para instalar el rotor diseñado por el LIENE, manteniendo el mismo generador eléctrico de fábrica.

El generador fue conectado a una resistencia de 3 ohms y 500 watts, lo que permitió disipar la energía generada y medir con precisión la potencia entregada. Las pruebas consistieron en variar la velocidad del viento en el túnel dentro del rango de 5 a 10 m/s, y registrar la potencia generada en cada caso. La velocidad del viento se midió con un tubo de Pitot y se registró con una frecuencia de muestreo de 10 Hz. Para medir la potencia, se registraron la corriente y el voltaje con una frecuencia de 1 Hz, y la potencia se calculó utilizando la fórmula $P = V * I$, donde P es la potencia, V el voltaje y I la corriente.

Cada prueba tuvo una duración de 60 segundos, pero antes de iniciar la medición se dejó un periodo de 15 segundos para que el sistema alcanzara la velocidad y condiciones de operación adecuadas. Además, antes de cada serie de pruebas, se dejó el equipo funcionando durante 10 minutos a una velocidad de 6 m/s para permitir que los sistemas alcancaran temperaturas de operación. Este procedimiento se repitió para ambos rotores, lo que permitió realizar una comparación directa de su rendimiento bajo las mismas condiciones.

Resultados

La Figura 2 presenta las curvas de potencia obtenidas en el túnel de viento para ambos rotores: el comercial y el prototipo del LIENE. Se observa que el rotor prototipo supera ampliamente al comercial en todo el rango de velocidades evaluado. Las curvas se construyeron a partir del promedio de las mediciones de potencia realizadas durante 60 segundos en cada velocidad. Estos promedios se calcularon a partir de 4 réplicas del experimento realizadas el mismo día, y luego se promediaron con los resultados de réplicas completas realizadas en 4 días diferentes entre noviembre de 2023 y octubre de 2024.

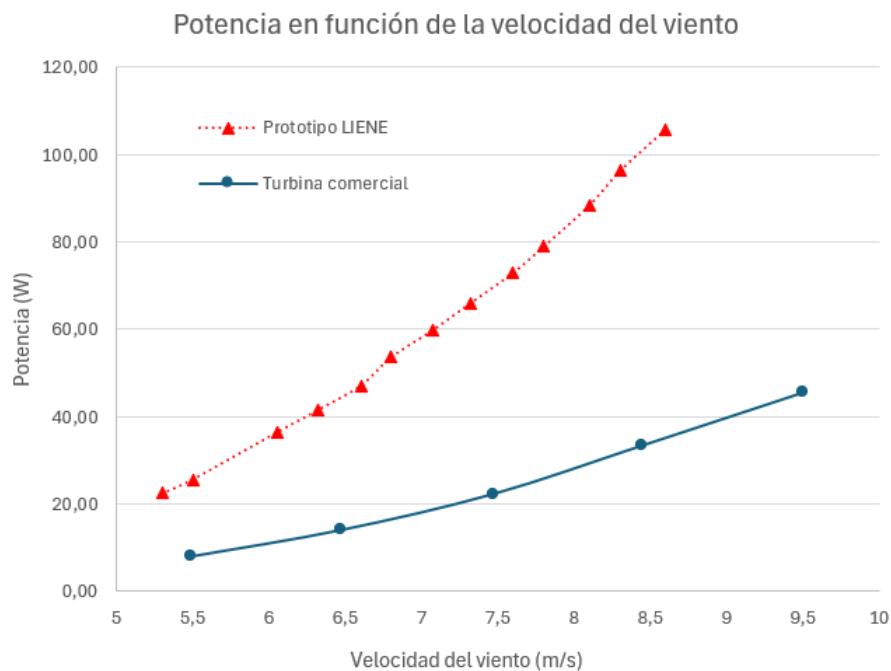


Figura 2. Curvas de potencia de los rotores. Fuente: los autores.

En particular, el rotor diseñado en el LIENE entrega entre un 200% y un 218% más potencia que el rotor comercial, lo que significa que, en la mayoría de los casos, su rendimiento se triplica o más. Este resultado confirma que un diseño optimizado para las condiciones reales de viento en Costa Rica permite un aprovechamiento mucho más eficiente del recurso eólico, especialmente en entornos de baja velocidad y alta turbulencia.

Sin embargo, aún hay aspectos por mejorar. Uno de ellos es la velocidad de arranque (cut-in), ya que actualmente el rotor comienza a generar potencia a partir de aproximadamente 5,3 m/s, mientras que sería ideal que lo hiciera desde 2,5 m/s. Una posible estrategia para lograrlo es incrementar la cantidad de aspas, lo que podría mejorar el torque a bajas velocidades.

Además, aunque la comparación se realizó con el mismo generador eléctrico de la turbina comercial (para aislar el efecto del rotor), esto implica que el prototipo no está necesariamente operando en su

punto óptimo. Por ello, en etapas futuras se considera fundamental diseñar un generador específico para este rotor.

Finalmente, se debe mencionar que la potencia máxima no alcanza los 500 W nominales indicados por el fabricante de la turbina. Esto se debe en parte a que, por razones prácticas, el sistema fue ubicado fuera del túnel de viento, lo que impidió que el flujo impactara uniformemente sobre toda el área barrida por el rotor, afectando así su desempeño.

Comentarios finales

Los resultados obtenidos demuestran que es posible diseñar un rotor de turbina eólica más eficiente que los modelos comerciales actualmente disponibles para condiciones de viento como las que predominan en Costa Rica. El rotor desarrollado en el LIENE logró triplicar la potencia generada en comparación con una turbina comercial utilizando el mismo generador, lo que evidencia el impacto de un diseño adaptado a velocidades de viento entre 5 y 8 m/s con altos niveles de turbulencia.

A partir de este avance, los próximos pasos deben enfocarse en mejorar el arranque a velocidades más bajas –idealmente desde 2,5 m/s–, lo que podría lograrse explorando configuraciones con más aspas o disminuyendo la inercia del sistema. También será necesario desarrollar un generador eléctrico específico para este rotor, de forma que se maximice su desempeño. Además, se debe investigar una solución robusta de manufactura para intemperie, ya que el prototipo actual fue fabricado en 3D con fines de validación en laboratorio. Igualmente, será importante optimizar el sistema de conversión y transferencia de energía, especialmente si se pretende utilizar en zonas aisladas o con acceso limitado a redes eléctricas.

Este trabajo también pone en evidencia los retos de hacer investigación desde cero: diseñar, fabricar, probar, ajustar... Cada paso demanda tiempo, recursos, financiamiento y, sobre todo, un equipo interdisciplinario comprometido. No obstante, los resultados obtenidos justifican plenamente el esfuerzo realizado.

Contar con una turbina eólica pequeña y eficiente, pensada desde el inicio para el contexto costarricense, sería un gran logro para el país. Este tipo de tecnología puede ser especialmente útil en zonas rurales o comunidades indígenas no conectadas a la red eléctrica, contribuyendo así a su desarrollo y autonomía energética. Además, representa una oportunidad clave para fomentar la generación distribuida, especialmente ahora que está vigente la Ley 10086, que promueve el aprovechamiento de fuentes renovables a pequeña escala en beneficio de la población.

Referencias

- [1] Instituto Costarricense de Electricidad, *Reporte de generación eléctrica 2020*, 2020. [Online]. Available: <https://www.grupoice.com/wps/portal/ICE>
- [2] K. Torres-Castro, C. Torres-Quirós, and G. Richmond-Navarro, "Microgeneración de energía eólica en un entorno boscoso en Costa Rica: estudio de caso," *Revista Tecnología en Marcha*, vol. 34, no. 3, pp. 61–69, 2021. <https://doi.org/10.18845/tm.v34i3.5063>
- [3] G. Richmond-Navarro, R. F. Sanabria-Sandí, L. E. Castro-Rodríguez, J. J. Rojas, and W. R. Calderón-Muñoz, "Evolución vertical de la intensidad de turbulencia del viento en terreno complejo con obstáculos," *Tecnología en Marcha*, vol. 35, no. 7, pp. 46–57, 2022. <https://doi.org/10.18845/tm.v35i7.6332>
- [4] G. Murillo-Zumbado, G. Richmond-Navarro, P. Casanova-Treto, and J. C. Rojas-Gómez, "Generalidades del recurso eólico en Costa Rica: caso de estudio de la provincia de Cartago," *Revista Tecnología en Marcha*, vol. 34, no. 4, pp. 130–145, 2021. <https://doi.org/10.18845/tm.v34i4.5274>

- [5] G. Richmond-Navarro, M. Montenegro-Montero, and C. Otárola, "Revisión de los perfiles aerodinámicos apropiados para turbinas eólicas de eje horizontal y de pequeña escala en zonas boscosas," *Revista Lasallista de Investigación*, vol. 17, no. 1, pp. 233–251, 2020. <https://doi.org/10.22507/rli.v17n1a22>
- [6] M. Sessarego and D. Wood, "Multi-dimensional optimization of small wind turbine blades," *Renewables*, vol. 2, p. 9, 2015. <https://doi.org/10.1186/s40807-015-0009-x>

Sobre los autores

Gustavo Richmond-Navarro

Ingeniero en Mantenimiento Industrial, Máster en Ciencias de la Ingeniería, Doctor en Ingeniería y Bachiller en Física. Profesor e investigador en la Escuela de Ingeniería Electromecánica del Instituto Tecnológico de Costa Rica y coordinador del Laboratorio de Investigación en Energía Eólica (LIENE). ORCID <https://orcid.org/0000-0001-5147-5952>

Maximino Jiménez-Ceciliano

Ingeniero en Mantenimiento Industrial. Profesor e investigador en la Escuela de Ingeniería Electromecánica del Instituto Tecnológico de Costa Rica. ORCID <https://orcid.org/0000-0001-7222-9961>

Juan José Montero-Jiménez

Ingeniero en Mantenimiento Industrial, Máster en Ciencias en Ingeniería Aeroespacial, Doctor en Ingeniería Industrial e Informática. Profesor e investigador en la Escuela de Ingeniería Electromecánica del Instituto Tecnológico de Costa Rica. ORCID <https://orcid.org/0000-0002-3215-3736>