

A performance projection of small-scale wind turbines in Costa Rica

Lezzin Leiva-Leiva¹; Juan José Montero-Jimenez¹; Rosa Matarrita-Chaves¹; Gustavo Richmond-Navarro¹

¹Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica, lleival@estudiantec.cr, juan.montero@itcr.ac.cr, rmatarrita@itcr.ac.cr, grichmond@itcr.ac.cr

Abstract– The considerable wind resource present in Costa Rica is exploited on a large scale by the various electricity companies in the country for power generation. However, the use of smaller-scale turbines for the supply of energy to homes or small industries is rarely observed. There is limited information available to conduct feasibility studies for the installation of small-scale wind turbines, despite the existence of multiple commercial turbine models on the market. This study presents a comparison of electricity generation projections for different small-scale commercial turbines. To calculate generation projections, wind speed data from 36 meteorological stations distributed across Costa Rica were used, along with wind speed projections at different heights. Using the power curves of various commercial turbines available on the market, their projected Annual Energy Production (AEP) at different heights was obtained. The results obtained can be used to conduct feasibility studies for the installation of small-scale turbines. This information is highly valuable for decision-making in small-scale wind energy utilization projects.

Keywords– AEP, power curves, wind energy, small- scale turbine, wind speed projection.

Proyección del rendimiento de turbinas eólicas de pequeña escala en Costa Rica

Lezzin Leiva-Leiva¹; Juan José Montero-Jimenez¹; Rosa Matarrita-Chaves¹; Gustavo Richmond-Navarro¹
¹Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica, lleival@estudiantec.cr, juan.montero@itcr.ac.cr, rmatarrita@itcr.ac.cr, grichmond@itcr.ac.cr

Resumen— *El abundante recurso eólico presente en Costa Rica es explotado a gran escala por las distintas compañías de electricidad del país para la generación de energía, sin embargo, pocas veces se observa la utilización de turbinas de pequeña escala para el abastecimiento de hogares, comercios o pequeñas industrias. Existe poca información que permita realizar estudios de viabilidad para la instalación de turbinas eólicas de pequeña escala, a pesar de la existencia de múltiples modelos de turbinas comerciales disponibles en el mercado. Este estudio presenta una comparativa de las proyecciones en generación eléctrica de diferentes turbinas comerciales de pequeña escala. Para realizar el cálculo de proyecciones de generación se utiliza datos de velocidad de viento obtenidos de 36 estaciones meteorológicas distribuidas en todo el territorio de Costa Rica y se realizan proyecciones de velocidad de viento a diferentes alturas. Utilizando las curvas de potencia de diferentes turbinas comerciales disponibles en el mercado, se logra obtener su producción anual de energía (AEP por sus siglas en inglés) proyectado a diferentes alturas. Los resultados obtenidos pueden ser utilizados para realizar estudios de viabilidad para la instalación de turbinas de pequeña escala. Esta información resulta de gran utilidad para tomar una decisión en proyectos de aprovechamiento de energía eólica de pequeña escala.*

Palabras clave— *AEP, curvas de potencia, energía eólica, pequeña escala, proyección de velocidad del viento.*

I. INTRODUCCIÓN

Como consecuencia del continuo aumento de la población, la demanda energética para abastecer a todo un país es cada vez mayor, surge la necesidad de recurrir a alternativas de generación eléctrica de manera limpia y para autoconsumo. Esto con el fin de abaratar los costos eléctricos y disminuir el impacto ambiental generado, así como de evitar un desequilibrio entre la oferta y demanda eléctrica en un país, que podría resultar en desabasto energético.

Ante esta necesidad, existen en el mercado diversas turbinas de pequeña escala capaces de suplir la demanda de un hogar o una pequeña industria; estas han sido utilizadas para abastecer tanto zonas urbanas como rurales en países como Japón, Reino Unido, Estados Unidos y Países Bajos, donde el interés del gobierno y la creciente industria han facilitado el acceso a estas fuentes de energía [1]. Sin embargo, existe poca información que permita realizar estudios de prefactibilidad para proyectos eólicos de pequeña escala. Un ejemplo es la investigación presentada por Henao et al. [2], donde se realizó

una estimación de producción esperada de aerogeneradores y su viabilidad de implementación en la ciudad Cúcuta, Colombia. Alkawsy et al [3], presenta un estudio de diferentes turbinas eólicas pequeñas montadas en elevaciones altas para evaluar la viabilidad de su instalación para uso doméstico en Malasia. Zalewska et al [4], muestra un estudio similar de estimación de eficiencia de pequeñas turbinas eólicas para diferentes ubicaciones en Polonia. Alam and Jin [5] evidencian que el potencial del uso de pequeñas turbinas eólicas en zona urbanas es importante, sin embargo, se cuentan con muchos retos tecnológicos y de legislación antes de su implementación a mayor escala.

Los estudios consultados muestra en común la necesidad de conocer la capacidad del recurso eólico local y determinar si este es suficiente para garantizar la rentabilidad de la colocación de turbinas de pequeña escala. Es importante resaltar que la altura de instalación es determinante en la producción de las turbinas eólicas de pequeña escala, donde la regla general es que a mayor altura se tiene mayores velocidades de viento y por consecuencia mejores rendimientos de generación [6]. En el caso de Costa Rica, no se cuenta con ningún estudio que permita saber el rendimiento de generación eólica para turbinas de pequeña escala.

A pesar de que Costa Rica es un referente en fuentes de generación eléctrica renovables, se puede decir que los insumos de investigación y desarrollo en energía eólica en Costa Rica son muy limitados. Dentro de las investigaciones relevantes se puede resaltar [7], que muestra una caracterización del recurso eólico en Costa Rica, información determinante para realizar estudios de factibilidad técnica de turbinas eólicas de pequeña escala. Otro estudio importante, relacionado con la presente investigación es [8], que presenta un estudio de rentabilidad de una turbina eólica de pequeña escala en Costa Rica. No se cuenta con un estudio que permita evaluar el desempeño de diferentes turbinas eólicas comerciales, en diferentes localidades de Costa Rica, para facilitar el proceso de diseño para proyectos de generación eléctrica de pequeña escala a partir del recurso eólico disponible. Es importante considerar que, para regular el aprovechamiento de fuentes de energía renovable, en el año 2022 fue aprobada la ley 10086 por el Poder Legislativo de Costa Rica [9]. Dicha ley pretende regular establecer las condiciones necesarias para interconectar equipos

de generación eléctrica de pequeña escala a la red eléctrica nacional. Esta legislación es una vía para que personas particulares o pequeñas empresas puedan producir su propia energía limpia y puedan ahorrar dinero de su factura eléctrica y de ser posible, cobrar su excedente energético a la red eléctrica nacional.

En este artículo se utiliza la información existente del recurso eólico en distintos puntos del país [10], obtenida a partir de investigaciones anteriores, con el fin de analizar el rendimiento de turbinas eólicas de pequeña escala para contribuir con la generación de energía a partir de fuentes alternativas en el país. Tomando las curvas de potencia de algunas turbinas presentes en el mercado que estén catalogadas como de pequeña escala, se proyecta el AEP (del inglés Annual Energy Production), el cual es la cantidad de energía generada por una turbina en un año. Además, en las localidades se proyecta la velocidad del viento a distintas alturas con el fin de analizar la altura óptima para la generación de energía eólica. A partir de estos datos es posible determinar si este tipo de turbina genera una cantidad de energía sostenible con el recurso eólico disponible. Este estudio tiene como objetivo, proveer una base de conocimiento para proyectos de generación eólica de pequeña escala en el territorio de Costa Rica.

II. METODOLOGÍA

Utilizando registros del recurso eólico provenientes de 36 estaciones meteorológicas distribuidas a lo largo del territorio de Costa Rica [10], se proyectan las velocidades de los vientos en cada región a diferentes alturas y se plasman en histogramas de distribución de frecuencias. Dichos histogramas son filtrados según su forma, esto con el fin de estudiar aquellos cuya distribución de frecuencia sea similar a una distribución de Weibull. La distribución de Weibull ha sido ampliamente utilizada con éxito para realizar modelos a partir de datos de velocidad del viento [11]. Este filtro de los histogramas permite identificar ubicaciones donde la mayor parte del tiempo el viento se mantiene con velocidades cercanas a 0 m/s y no presenta una distribución de Weibull, descartando la ubicación para el presente estudio. Una vez filtradas, se reducen las localidades a 18, las cuales pasan a ser analizadas contra las curvas de potencia de una selección de turbinas comerciales de pequeña escala. A partir de las curvas de potencia de las turbinas y las distribuciones de frecuencia de velocidades de viento en las localidades seleccionadas, se calcula la producción de energía anual (AEP), con el fin de determinar en qué regiones se genera una mayor energía y con cuáles turbinas se aprovecharía más este recurso.

En este estudio se utilizan dos conjuntos distintos de estaciones meteorológicas: por un lado, 36 estaciones distribuidas a lo largo del país, y por otro, 4 estaciones ubicadas en Cartago. Estas últimas cuentan con múltiples anemómetros y una alta frecuencia de muestreo, lo que las hace especialmente

adecuadas para realizar cálculos precisos de energía contenida en el viento. Por esta razón, las estaciones de Cartago se utilizan en una primera etapa para evaluar el desempeño de las turbinas comerciales disponibles y filtrar aquellas con bajo rendimiento. Posteriormente, una vez seleccionadas las mejores turbinas, se emplean los datos de las estaciones a nivel nacional —específicamente las 18 que superaron el filtro de Weibull— para calcular el AEP y determinar en qué zonas del país se aprovecharía mejor el recurso eólico con dichas turbinas.

A. Selección de estaciones

Aprovechando el recurso existente generado a partir de la investigación realizada para determinar la rentabilidad de una turbina eólica comercial en Costa Rica [10], se conocen las mediciones de 36 estaciones meteorológicas instaladas a lo largo de todo el territorio costarricense, las cuales consisten en datos tomados entre los años 2007 y 2017 con una frecuencia de muestreo horaria en la mayoría de los casos. Dichas estaciones meteorológicas están compuestas por una veleta y un anemómetro ubicados a 10 metros de altura desde el suelo, dichas mediciones fueron facilitadas por el Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica y el Instituto Costarricense de Electricidad. Adicionalmente se cuenta con la información de cuatro estaciones de medición en la provincia de Cartago instaladas con fines de investigación en energía eólica [10], tres en el Tecnológico de Costa Rica y una más en el Complejo Educativo Ambiental Naciente Arriaz (CEANA). La ventaja de estas 5 estaciones de medición es que proveen información real en alturas mayores a los 10 m, lo que permite una mejor validación de las proyecciones de velocidad de viento a las alturas deseadas para el presente estudio.

Para seleccionar las estaciones, se filtran los histogramas de todas las estaciones según su forma, con el objetivo de analizar aquellos cuya distribución de frecuencia se asemeje a una distribución de Weibull (ver Fig. 1). De este modo es posible determinar los sitios donde existen amplios periodos de calma (viento a 0 m/s), descartando así estas ubicaciones para el estudio.

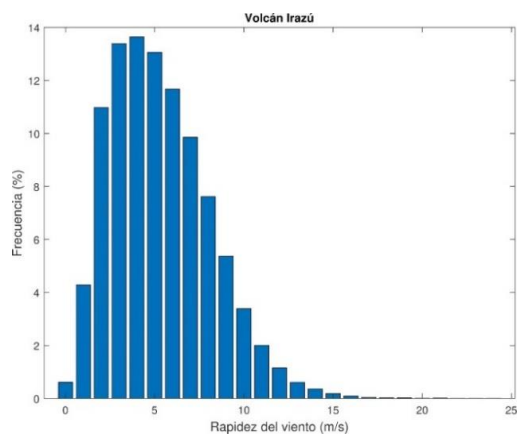


Fig. 1 Histograma de la magnitud de la velocidad del viento a 10 metros de altura medido en el Volcán Irazú [10].

Las estaciones utilizadas en este estudio se encuentran distribuidas en zonas representativas del territorio costarricense, tanto urbanas como rurales, lo que asegura una amplia cobertura geográfica y variabilidad en las condiciones de viento. La rugosidad superficial, un factor clave en la distribución vertical de las velocidades del viento, es similar en las ubicaciones de las estaciones de medición y en otras áreas del país donde se consideraría la instalación de turbinas eólicas para uso doméstico o pequeñas industrias. Por lo tanto, los datos obtenidos de estas estaciones son representativos de las condiciones que se esperan en las distintas regiones del país donde se podrían utilizar las turbinas. Como se detalla en la sección de resultados, tras aplicar el filtro, el número de localidades se reduce a 18.

B. Selección de turbinas

Basándose en la revisión literaria de artículos de desarrollo de diferentes turbinas eólicas [12] - [17] y en la información disponible en la web de fabricantes reconocidos de pequeñas turbinas eólicas, se identifican una serie de turbinas consideradas de pequeña escala. Para el presente estudio se limita a turbinas con potencia nominal máxima de 5.5kW y cuya antigüedad de diseño sea menor a 10 años. Se toman en cuenta únicamente aquellas turbinas cuyas curvas de potencia versus la velocidad del viento estén disponibles, al ser esta curva determinante para el presente estudio. La tabla I resume las veinte turbinas que cumplen con los criterios de selección, a las cuales se les asigna un identificador para efectos de este estudio y se presenta su potencia nominal. La Fig. 2 muestra un ejemplo de la curva de potencia de la turbina Eevance-5000, que forma parte de la tabla I.

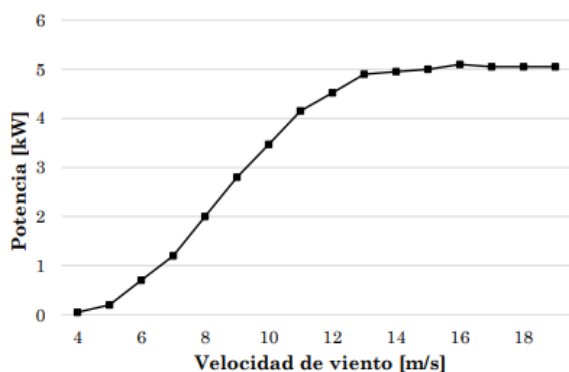


Fig. 2 Curva de potencia versus la velocidad del viento para la turbina Eevance-5000 [17].

Todas las turbinas de la tabla I son de eje horizontal, debido a su mayor eficiencia aerodinámica respecto a las de eje vertical. Los precios oscilan entre aproximadamente 3,000 USD para turbinas de 1 kW, como el modelo SW1-1000, y hasta 20,000 USD para turbinas de 5 kW, como la Fortis5-5000. La vida útil declarada por los fabricantes se encuentra en un rango de 15 a 20 años, siempre que se cumplan los programas de mantenimiento recomendados. El costo por kilovatio-hora

(kWh) generado depende del recurso eólico disponible, los costos de instalación y operación, y las condiciones específicas de financiamiento; por esta razón, no se reporta un valor único en el presente estudio.

TABLA I
Turbinas de pequeña escala seleccionadas para análisis

Identificador de turbina	Referencia	Potencia nominal
Aerogenesis-5000	[12]	5 kW
High-900	[13]	900 W
Low-900	[13]	900 W
Airx-400	[14]	400 W
ATT-400	[14]	400 W
MFN-5500	[15]	5.5 kW
SR-75	[16]	7.5 W
SWT5-5000	Marca Comercial Senwei, Modelo SWT-5kW	5 kW
SWT3-3000	Marca Comercial Senwei, Modelo SWT-3kW	3 kW
SW1-1000	Marca Comercial Senwei, Modelo SWT-1kW	1 kW
SW2-2000	Marca Comercial Senwei, Modelo SWT-2kW	2 kW
SW3-3000	Marca Comercial Senwei, Modelo SW-3kW	3 kW
SW5-5000	Marca Comercial Senwei, Modelo SW-5kW	5 kW
Eevance-5000	[17]	5 kW
Fortis5-5000	Marca Comercial Fortis Wind Energy Montana 5kW	5 kW
Fortis14-1400	Marca Comercial Fortis Wind Energy Passaat 1.4kW	1.4 kW
Raum-1500	Marca Comercial Raum Energy 1.5kW Wind Turbine	1.5 kW
DS-3000	Marca comercial Hivawt, Modelo DS-3000	3 kW
H3-1000	[18]	1 kW
Fd4-3000	Marca comercial PWG, Modelo Fd4.0.-3000	3 kW

Seguidamente, se establecen cuatro localizaciones en la provincia de Cartago, tres de estas dentro del campus central del Tecnológico de Costa Rica (ITCR o bien TEC) y una en el Complejo Educativo Ambiental Naciente Arriaz (CEANA). En cada una de estas localizaciones, son ubicadas torres meteorológicas con la finalidad de tomar mediciones de la velocidad del viento en dichos lugares durante varios años. Cada una de las localidades seleccionadas se detallan a continuación:

- **Centro de Investigación e Innovación Forestal (CIF):**

En los alrededores de la escuela de Ingeniería Forestal del Tecnológico de Costa Rica se instala una torre meteorológica equipada con 5 anemómetros con veletas ubicados a 6, 8, 10, 12 y 14 metros de altura. Las coordenadas de esta torre son las

siguientes: 9° 51' 46.564" Norte y 83° 54' 59.861" Oeste. Dicha estación ha estado recopilando datos desde junio del 2018 hasta septiembre del 2022.

- **Complejo Educativo Ambiental Naciente Arriaz (CEANA):**

Aprovechando la torre que soporta el pararrayos ubicado en el Complejo Educativo Ambiental Naciente Arriaz en Cartago, se instalan 8 anemómetros con veleta a alturas de 2, 9.85, 12.2, 12.7, 15, 18, 19.4 y 21 metros. Las coordenadas de esta torre son las siguientes: 9°89'04.9" Norte y 83°93'42.0" Oeste. Esta torre ha estado registrando datos de velocidades del viento desde octubre del 2020 hasta enero de 2025.

- **Escuela de Ingeniería Electromecánica del TEC (EM):**

Ubicado a un costado del edificio de la Escuela de Ingeniería Electromecánica en el Tecnológico de Costa Rica se ubica un punto de medición equipado con dos anemómetros a alturas de 8 y 10 metros capaces de medir la velocidad del viento en esta zona. Las coordenadas de la estación son: 9° 51' 17.696" Norte y 83° 54' 40.392 " Oeste. Dicha torre tiene registro de datos de velocidades del viento desde diciembre de 2018 hasta diciembre de 2020.

- **Planta de tratamiento de aguas residuales (PT):**

En los alrededores de la planta de tratamiento de aguas negras del Tecnológico de Costa Rica, se instala una torre meteorológica denominada como "Davis" capaz de medir temperatura, presión y humedad relativa, dicha estación está equipada con 5 anemómetros con veletas situados a 4, 6, 8, 10 y 12 metros de altura. Sus coordenadas son: 9°51'07.0" Norte y 83°54'23.0" Oeste. Esta torre tomó datos desde diciembre de 2018 hasta septiembre de 2020.

Estas cuatro estaciones fueron seleccionadas en la provincia de Cartago debido a razones logísticas y de seguridad, ya que el equipo instalado requiere supervisión frecuente y resguardo adecuado. Además, las condiciones topográficas y de cobertura vegetal de estos sitios —caracterizados por terrenos irregulares y presencia de árboles— permiten obtener perfiles verticales de velocidad del viento representativos de una amplia variedad de entornos presentes en el país. Así, aunque las estaciones se ubican en Cartago, sus mediciones son consideradas apropiadas para caracterizar el comportamiento vertical del viento a nivel nacional.

De las veinte turbinas seleccionadas, se hace una primera evaluación utilizando los datos de las estaciones de medición instalados en el Tecnológico de Costa Rica y en el CEANA. Pues estos sitios tienen una topografía que es representativa del territorio en general.

De esta primera evaluación se definen las 3 turbinas con mejor desempeño y estas se utilizarán para hacer el análisis con

los datos obtenidos de las demás estaciones de medición seleccionadas.

Para la selección de las turbinas se desarrolla un código en el lenguaje Python, el cual emplea el Método Cronológico [19], que consiste en analizar una a una las mediciones de velocidad de viento obtenidas y el intervalo de tiempo entre cada medición. Cada una de las mediciones se compara con la curva característica de potencia vs velocidad de la turbina analizada, por ejemplo, la curva de la Fig. 2 correspondiente a la turbina Eevance-5000. Y se obtiene la potencia eólica generada durante el intervalo de dicha medición. Esto da como resultado una serie temporal de la potencia generada durante todo el periodo de mediciones, la cual al conocer el intervalo de tiempo en el que está presente cada potencia, es posible calcular así la energía generada durante dicho periodo en kWh. Finalmente, al analizar cada medición durante todo un año, es posible sumar todos los resultados de energía para obtener así la energía anual generada o AEP (Annual Energy Production) por sus siglas en inglés. En la Fig. 3 se muestra gráficamente el proceso descrito para el cálculo de la potencia generada según el intervalo de tiempo en el cual se realizaron las mediciones de velocidad del viento.

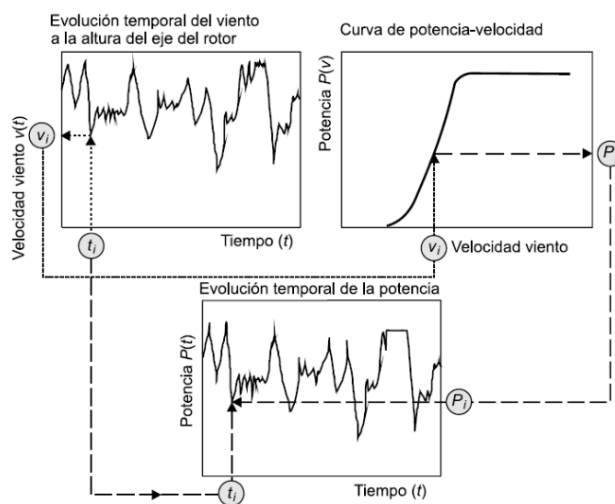


Fig. 3 Proceso de cálculo de la potencia total generada [19].

C. Cálculo de potencia y AEP generado

Para el cálculo de AEP, se toman los histogramas de los sitios seleccionados para simular el comportamiento que tendría el viento de cada localidad a alturas de 15, 20, 25 y 30 metros sobre el nivel del suelo; dicha proyección se obtiene aplicando un modelo logarítmico de velocidad del viento en función de la altura para una longitud de rugosidad en la superficie de 2 metros de altura [11].

$$u_2 = u_1 \frac{\ln\left(\frac{z_2}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_1}{z_0}\right)} \quad (1)$$

La ecuación (1) muestra el modelo mencionado, este relaciona la velocidad del viento conocida (u_1), medida a una altura dada (Z_1), con una altura de rugosidad según sea la superficie (Z_0), con el fin de encontrar una velocidad (u_2) según la altura deseada (Z_2).

Al aplicar la ecuación (1) es posible proyectar los histogramas a las alturas indicadas. Luego, se aplica de nuevo el Método Cronológico combinando los histogramas de cada sitio y todas las turbinas seleccionadas, para calcular así el AEP y finalmente generar un gráfico con las 5 mejores localizaciones, indicando también los datos de las turbinas con mejor rendimiento.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Selección de estaciones

Las localidades resultantes de la filtración por histogramas que presenten una forma similar a una curva de Weibull son 18 de las 36 estaciones analizadas. Las otras 18 poseen una frecuencia de 40 % o más en calma, por lo que son descartadas.

La Fig. 4 muestra la distribución de las ubicaciones seleccionadas en el mapa de Costa Rica, y la Fig. 5. detalla las ubicaciones mostradas en la Fig. 4. Como se logra observar en la Fig. 4, no en todo el país se dan condiciones favorables para la instalación de turbinas eólicas, ya que el recurso eólico aprovechable se concentra desde el centro hacia el noroeste. Este resultado coincide con lo que se puede observar en cualquier mapa de potencial eólico de Costa Rica.

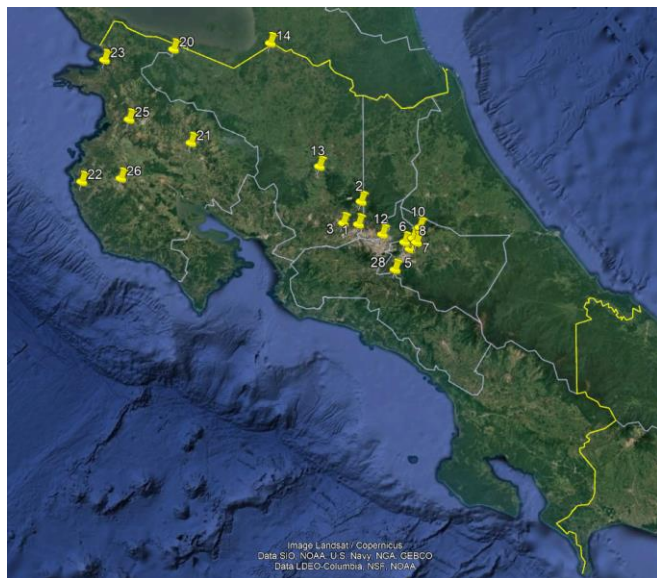


Fig. 4 Ubicación de las estaciones elegidas en el territorio costarricense.

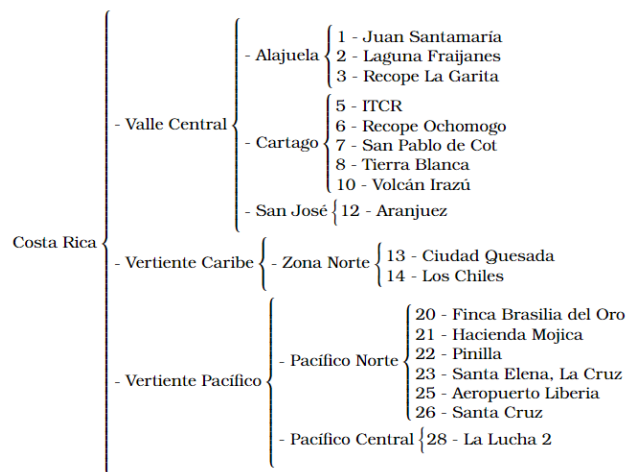


Fig. 5 Nueva división de estaciones según la región.

Seguidamente, se realiza la proyección de la magnitud de la velocidad del viento a alturas de 15, 20, 25, y 30 metros para las localidades seleccionadas. En la Fig. 6 se muestra uno de los histogramas resultantes al proyectar a las alturas de interés, correspondiente a la estación 10 - Volcán Irazú.

B. Selección de turbinas

Como resultado de los cálculos del Método Cronológico empleado para la selección de las turbinas, en la Fig. 7 se observa el desempeño de las 5 turbinas con una mayor generación de AEP para la estación CIF en el TEC. Seguidamente, en la Fig. 8, se observan los resultados de las mejores 5 turbinas en la zona de CEANA, y en la Fig. 9 los resultados referentes a la estación de la Escuela Electromecánica del TEC, donde aparece la turbina “29-ELV-2000” como quinta mejor, la cual no aparecía en los resultados anteriores. Finalmente, en la Fig. 10, es posible observar los resultados referentes a la estación de Planta de Tratamiento del TEC, en la cual se observa que aparecen como mejores cinco turbinas las mismas que en las estaciones CIF y CEANA. Al realizar el análisis de las turbinas para las estaciones instaladas en el Tecnológico de Costa Rica, se determina que las mejores tres turbinas en términos de AEP son la 9-SWT3-3000, la 15-evance-5000 y la 31-fd4-3000. El detalle de estas turbinas se presenta en la Tabla II.

TABLA II
TURBINAS CON MEJOR RENDIMIENTO DE AEP CALCULADO

Identificador de turbina	Turbina	Potencia nominal
9-SWT3-3000	SWT-3kW wind turbine	3 kW
15-evance-5000	Evancewind R9000 5kW Wind turbine	5 kW
31-fd4-3000	Fd4.0.-3000	3 kW

Es importante resaltar que a pesar de que se tomaron en cuenta turbinas de hasta 5.5 kW, no siempre son las turbinas de mayor potencia las que tienen mejores AEP. Esto se debe a que, una mayor potencia nominal no necesariamente corresponde con una mayor generación de potencia en un sitio específico, pues en los sitios de interés, las condiciones de recurso eólico difícilmente alcanzan las velocidades de viento que generan la potencia nominal de las turbinas.

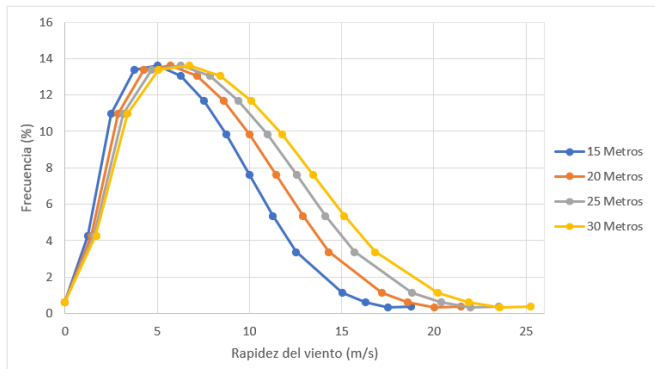


Fig. 6 Histogramas proyectados a alturas de 15, 20, 25 y 30 metros. [13].

C. Cálculo de potencia y AEP generado

En general, la zona donde se obtuvieron mayores valores de AEP generados fue el Volcán Irazú, donde se calculó un AEP mínimo de 14.130 kWh/año con la turbina Evancewind R9000 5 kW a 15 metros de altura, y el AEP máximo calculado de 22.534 kWh/año, obtenidos con la misma turbina a 30 metros de altura.

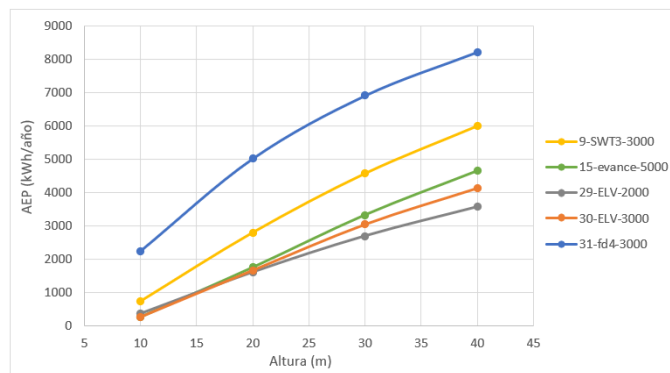


Fig. 9 Resultados de las 5 mejores turbinas en la estación Electromecánica, TEC.

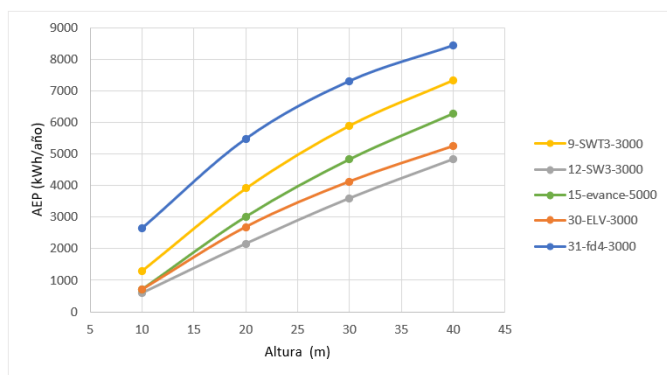


Fig. 7 Resultados de las 5 mejores turbinas en la estación CIF.

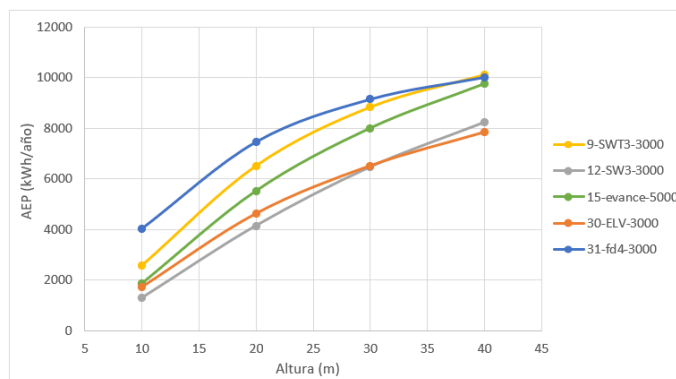


Fig. 10 Resultados de las 5 mejores turbinas en la estación Planta de Tratamiento, TEC.

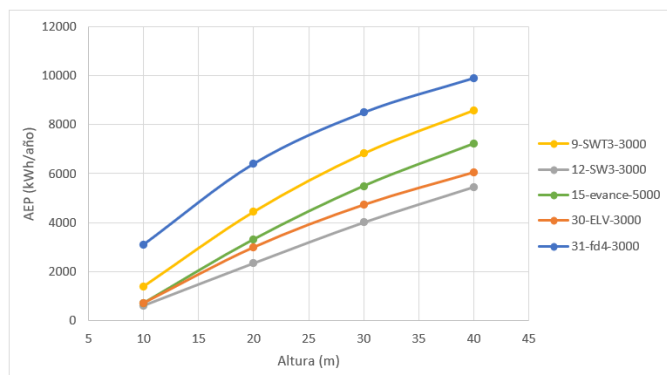


Fig. 8 Resultados de las 5 mejores turbinas en la estación CEANA.

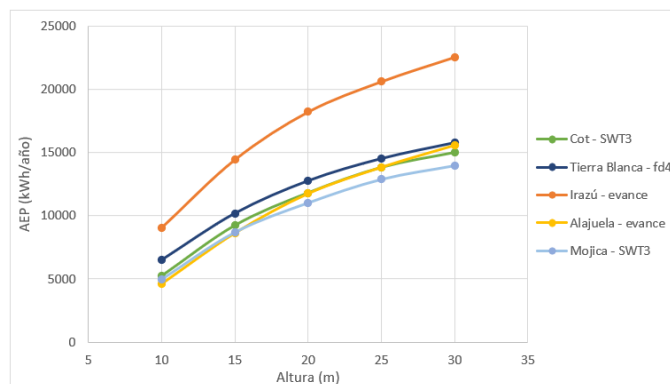


Fig. 11 Producción anual proyectada de las mejores turbinas según alturas.

IV. CONCLUSIONES

En la Fig. 11, se grafican los principales resultados de AEP proyectados en las localidades con un mayor recurso eólico calculados a 4 alturas diferentes, 15 metros, 20 metros, 25 metros y 30 metros, y las turbinas que mayor rendimiento energético presentan en dichas localidades.

Es evidente el impacto de la altura en el desempeño general de cada turbina, la curva de AEP según la altura es ascendente en todos los casos, con lo cual, se analiza a continuación el porcentaje de incremento de la energía generada para los casos descritos anteriormente, respecto a la altura inicial de 10 metros. La Tabla III muestra los resultados de mejora de la generación de las turbinas seleccionadas a diferentes alturas, con respecto a los 10 m de altura.

TABLA III
PORCENTAJES DE INCREMENTO EN ENERGÍA GENERADA SEGÚN ALTURA

Localidad-turbina	Altura proyectada			
	15 m	20 m	25 m	30 m
San Pablo de Cot – SWT3	76.59%	125.94%	164.46%	187.07%
Tierra Blanca -fd4	56.88%	96.53%	123.59%	142.99%
Volcán Irazú – evance-5000	59.57%	101.34%	127.81%	149.19%
Juan Santamaría – evance-5000	87.91%	156.27%	201.77%	239.79%
Hacienda Mojica – SWT3	75.63%	123.05%	160.83%	182.89%

Como resultado, se enlistan seguidamente en la Tabla IV, las cinco localidades en las que cada turbina seleccionada se produce una mayor generación de energía anual.

TABLA IV
LOCALIDADES EN LOS QUE SE GENERA MAYOR ENERGÍA POR TURBINA

Fd4.0.-3000	SWT-3kW Wind Turbine	Evancewind R9000 5kW
1. Volcán Irazú	1. Volcán Irazú	1. Volcán Irazú
2. Tierra Blanca	2. Juan Santamaría	2. Juan Santamaría
3. Juan Santamaría	3. San Pablo de Cot	3. San Pablo de Cot
4. San Pablo de Cot	4. Tierra Blanca	4. Hacienda Mojica
5. Hacienda Mojica	5. Hacienda Mojica	5. Recope Ochomogo

Siendo la turbina Fd4.0.-3000 la que generó mayor energía en la mayor cantidad de localidades, 12 ubicaciones en total. Mientras que las turbinas SWT-3kW Wind Turbine y Evancewind R9000 5kW fueron las mejores en solamente 3 localidades cada una.

Después de seleccionar las turbinas eólicas de pequeña escala con mejor rendimiento de las 20 preseleccionadas, y proyectar su generación de energía anual en las estaciones planteadas con mayor recurso eólico dentro de la muestra disponible, es posible concluir lo siguiente:

1. Las localidades con un mayor recurso eólico y cuya distribución de velocidades se asemejan a una curva de Weibull, corresponden a las estaciones de Juan Santamaría, Laguna Fraijanes, Recope La Garita, ITCR, Recope Ochomogo, San Pablo de Cot, Tierra Blanca, Volcán Irazú, Aranjuez, Ciudad Quesada, Los Chiles, Finca Brasilia del Oro, Hacienda Mojica, Pinilla, Santa Elena La Cruz, Aeropuerto Liberia, Santa Cruz y La Lucha 2.
2. Las turbinas de pequeña escala que mejor rendimiento energético presentaron corresponden a las siguientes, SWT-3kW wind turbine, Evancewind R9000 Wind turbine y Fd4.0.-3000.
3. De todas las localidades analizadas, la zona donde se producirían mejores AEP fue el Volcán Irazú, en esta estación se obtuvo un rendimiento mínimo de 14.130 kWh/año a 15 metros de altura, y un máximo de 22.534 kWh/año a 30 metros, dichos datos fueron calculados para la turbina con la turbina Evancewind R9000.
4. Al proyectar la producción energética de 10 a 30 m de altura, da como resultado un incremento de AEP de un 56.88% en el peor de los casos, y un 239.79% en el mejor escenario analizado.
5. En general, la turbina que presentó el mejor rendimiento en la mayoría de las localidades fue la Fd4.0.-3000, la cual produce una mayor cantidad de energía en 12 de las 18 localidades seleccionadas.

Con estos resultados, se destaca que, a pesar de la variabilidad del recurso eólico, es posible incrementar hasta un 240% la producción de energía, empleando torres para la colocación de las turbinas eólica. Así, la altura mínima en la mayoría de los casos corresponde a 30 metros sobre el nivel del suelo, para garantizar un funcionamiento durante el mayor tiempo del año.

Un trabajo futuro corresponde al análisis financiero para evaluar la rentabilidad, acompañado de una evaluación de factibilidad en cuanto a regulaciones constructivas locales. Todo con miras a aprovechar el recurso eólico a pequeña escala en Costa Rica.

DISPONIBILIDAD DEL CÓDIGO PARA CÁLCULOS

El código utilizado para la realización de los cálculos del presente estudio está disponible en el repositorio <https://github.com/LezzinLIENE/Calculo-de-AEP-por-turbina>

AGRADECIMIENTOS Y CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Se agradece la colaboración en esta investigación a Luis Diego Murillo, Gustavo Murillo Zumbado, Iván Araya Meneses y a los asistentes del LIENE, del Instituto Tecnológico de Costa Rica. También se agradece a la misma institución por el financiamiento para el desarrollo de esta investigación, mediante el proyecto VIE 1341021.

Los investigadores declaran que la contribución en este documento es la siguiente: LLL 15 %, JJMJ 55 %, RMC 15 % y GRN 15 %.

CONFLICTO DE INTERESES

Ningún fabricante de turbinas eólicas proporcionó financiamiento a los investigadores para el desarrollo de esta investigación.

Este estudio no pretende hacer ninguna propaganda comercial, los datos de las turbinas se utilizan como insumo para posibles estudios de factibilidad para generación eléctrica con turbinas eólicas de pequeña escala, así como referente para futuras investigaciones en la mejora de rendimiento de turbinas de pequeña escala.

REFERENCIAS

- [1] WINEUR, "Wind energy integration in the urban environment" [En línea]. Disponible en: <http://www.urbanwind.net/pdf/D1.1%20Final.pdf> [Accedido: 22-mar-2024].
- [2] D. Henao León, A. C. Báez Alarcón, J. B. Pedroza Rojas, "Metodología para determinar la viabilidad de generación de energía eléctrica por medio del recurso eólico", *Investigación e Innovación en Ingenierías*, vol. 6, n.º 2, pp. 6-15, jun. 2018. <https://doi.org/10.17081/invinno.6.2.3108>
- [3] G. Alkaws, Y. Baashar, A. Alkahtani, C. W. Lim, S. K. Tiong, M. Khudari, "Viability assessment of small-scale on-grid wind energy generator for households in Malaysia", *Energies*, vol. 14, n.º 12, 2021. <https://doi.org/10.3390/en14123391>
- [4] J. Zalewska, K. Damaziak, J. Malachowski, "An energy efficiency estimation procedure for small wind turbines at chosen locations in Poland" *Energies*, vol. 14, n.º 12, 2021. <https://doi.org/10.3390/en14123706>
- [5] F. Alam, Y. Jin, "The utilization of small wind turbines in built-up areas: prospects and challenges", *Wind*, vol. 3, n.º 4, 2023. <https://doi.org/10.3390/wind3040024>
- [6] M. Elnaggar, E. Edwan, M. Ritter, "Wind Energy Potential of Gaza Using Small Wind Turbines: A Feasibility Study", *Energies*, vol. 10, n.º 8, p. 1229, ago. 2017. <https://doi.org/10.3390/en10081229>
- [7] G. Murillo, G. Richmond-Navarro, "Características del recurso eólico en Costa Rica". Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2019. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.33796.68482/1>
- [8] R. Matarrita-Chaves, G. Richmond-Navarro, G. Murillo-Zumbado, M. Jiménez-Ceciliano, "Estimación de la rentabilidad de una turbina eólica comercial de pequeña escala en Costa Rica". *Revista Tecnología en Marcha*, vol. 35, n.º 7, 2022.
- [9] Asamblea Legislativa de Costa Rica, "Ley 10086 del 2022: Promoción y regulación de recursos energéticos distribuidos a partir de fuentes renovables" [En línea]. Disponible en: https://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=96064#up. [Accedido: 10-oct-2025].
- [10] G. Richmond-Navarro, "Histogramas de velocidad del viento en Costa Rica, proyectados a una altura de hasta 30 metros sobre el suelo", 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/32074945561_Histogramas_de_velocidad_del_viento_en_Costa_Rica_proyectados_a_una_altura_de_hasta_30_metros_sobre_el_suelo [Accedido: 24-abr-2025].
- [11] G. Richmond-Navarro, G. Murillo-Zumbado, F. Marín-Guillén, P. Casanova-Treto, "Modelo dinámico de la velocidad del viento en una zona boscosa tropical", *Tecnología en Marcha*. Vol. 35, n.º 2, pp 3-15, abr.-jun. 2022. <https://doi.org/10.18845/tm.v35i2.5465>
- [12] S.P. Evans, D.R. Bradney, P.D. Clausen, "Development and experimental verification of a 5kW small wind turbine aeroelastic model". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol 181, pp. 104-111, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.08.011>
- [13] M. Refan, H. Hangan, "Aerodynamic Performance of a Small Horizontal Axis Wind Turbine", *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 134, n.º 2, 2012. <https://doi.org/10.1115/1.4005751>
- [14] S. N. Akour, M. Al-Heydari, T. Ahmed, K. A. Khalil, "Experimental and theoretical investigation of micro wind turbine for low wind speed regions", *Renewable Energy*, vol. 116, pp. 215–223, feb. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.09.076>
- [15] E. Mohammadi, R. Fadaeinedjad, H.R. Naji "Platform for design, simulation and experimental evaluation of small wind turbines" *IET Renewable Power Generation*, 2019. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2018.5507>
- [16] A Suresh, S Rajakumar, "Design and experimental investigation of micro wind turbine", *International Journal of Advances in Engineering Research*, vol. 10, 2015. e-ISSN: 2231-5152.
- [17] J. C. Solís Sánchez, "Evaluación del Potencial Eólico para la Instalación de un Aerogenerador de 5 kW en la Región del Istmo de Tehuantepec, Oaxaca," Tesis de Maestría, Universidad Politécnica de Chiapas, Tuxtla Gutiérrez, México, agosto de 2016. DOI: 10.13140/RG.2.2.32229.22248
- [18] E. de Oliveira-Feitosa, T Salviano, D. Albiero, A. Casto-Praciano, L. de Almeida-Monteiro, "Curvas de potencia de aerogeneradores para bajavelocidad del viento en la generación de energía eléctrica para agricultura familiar" *Revista Energía NA Agricultura*, vol 29, no. 3, pp 190-196, 2014. DOI: 10.17224/EnergAgric.2014v29n3p190-196
- [19] J. A. Carta-González, R. Calero-Pérez, A. Colmenar-Santos, M. A. Castro-Gil, *Centrales de energías renovables. Generación eléctrica con energías renovables*, 2a ed. Madrid: Pearson, 2013, ISBN-13: 978-8483229972.