

Estimación de la rentabilidad de una turbina eólica comercial de pequeña escala en Costa Rica

Estimation of the profitability of a small-scale commercial wind turbine in Costa Rica

Rosa Matarrita-Chaves¹, Gustavo Richmond-Navarro²,
Gustavo Murillo-Zumbado³, Maximino Jiménez-Ceciliano⁴

Matarrita-Chaves, R; Richmond-Navarro, G; Murillo-Zumbado, G; Jiménez-Ceciliano, M. Estimación de la rentabilidad de una turbina eólica comercial de pequeña escala en Costa Rica⁵. *Tecnología en Marcha*. Vol. 35, especial Programa de Investigación en *Energías Limpias*. Julio, 2022. Pág. 5-18.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v35i7.6329>

- 1 Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Electromecánica. Costa Rica. Correo electrónico: rmmatarrita@tec.ac.cr <https://orcid.org/0000-0002-6309-8733>
- 2 Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Electromecánica. Costa Rica. Correo electrónico: grichmond@tec.ac.cr <https://orcid.org/0000-0001-5147-5952>
- 3 Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Física. Costa Rica. Correo electrónico: gmurillo@tec.ac.cr <https://orcid.org/0000-0002-1947-3567>
- 4 Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Electromecánica. Costa Rica. Correo electrónico: maxjimenez@tec.ac.cr <https://orcid.org/0000-0001-7222-9961>
- 5 Los autores aquí firmantes están de acuerdo con la versión final de este documento y hacen constar que la conceptualización, preparación y corrección del artículo se realizó según la siguiente distribución: RMC 45%; GRN 40%; GMZ 10%; MJC 5%

Palabras clave

Turbina eólica de pequeña escala; energía renovable; producción energética; rentabilidad.

Resumen

Las energías renovables participan cada vez más de la matriz eléctrica en Costa Rica. En este trabajo se determinó la rentabilidad de instalar una turbina eólica comercial de pequeña escala en distintas ubicaciones de Costa Rica. Se utilizó información histórica de la velocidad del viento registrada por 36 estaciones del Instituto Meteorológico Nacional en todo el país, a 10 metros sobre el suelo. Esta información se combinó con la curva de potencia de una turbina comercial y se determinó la producción anual de energía que puede esperarse en cada ubicación, con esta información se obtuvo el ahorro estimado utilizando el costo de la energía en Costa Rica, además se calculó el valor actual neto (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR) de este tipo de inversión. Se obtuvo que, de las 36 estaciones estudiadas, 15 presentan condiciones del recurso eólico con potencial para producir más de 1000 kWh/año lo que representa ahorros anuales máximos de \$ 785. Por las características del recurso eólico en los puntos analizados y el costo de la electricidad disponible, aunque el país apuesta por las energías renovables, no es económicamente rentable la instalación de turbinas comerciales de pequeña escala en las localidades y alturas sobre el suelo que fueron consideradas, se recomienda estudiar alternativas como: generar estudios del recurso eólico a bajas alturas para identificar ubicaciones más ventosas, considerar torres de mayor altura o utilizar turbinas diseñadas de manera específica para el recurso eólico mostrado en esta investigación.

Keywords

Small-scale wind turbine; renewable energy; energy production; profitability.

Abstract

Renewable energies are increasingly participating in the electricity matrix in Costa Rica. This paper determined the profitability of installing a small-scale commercial wind turbine in different locations in Costa Rica. It used historical information from the wind speed recorded by National Meteorological Institute in 36 stations across the country, at 10 meters above the ground. This information was combined with the power diagram of the commercial turbine and the annual energy production that can be expected in each location was determined, with this information the estimated savings using the cost of energy in Costa Rica was obtained, besides the net present value (NPV) and the internal return rate (IRR) of this type of investment were calculated. It was obtained that, of the 36 stations studied, 15 have wind resource conditions with the potential to produce more than 1000 kWh/year which represents maximum annual savings of \$ 785. Because the characteristics of the wind resource in the analyzed points in Costa Rica and the cost of available electricity, although the country bets on renewable energies, it is not economically profitable to install small-scale commercial turbines in the localities and heights above the ground that were considered, it is recommended to study alternatives such as: generate studies of the wind resource at low altitudes to identify more windy locations, consider towers of greater height or use turbines designed specifically for the wind resource shown in this research.

Introducción

El cambio climático avanza a una velocidad alarmante, y luchar contra ello es un desafío para garantizar un planeta habitable para las próximas generaciones. Por su alto potencial de reducción de CO₂, la energía eólica puede contribuir a disminuir el calentamiento global de manera sostenible y económica [1]. En Costa Rica, según la matriz de generación eléctrica, término utilizado para referirse a la estructura de participación de las diferentes fuentes de energía utilizadas para la producción de electricidad, la mayoría de las fuentes son tomadas de recursos naturales renovables (por encima del 98%), que son transformados en electricidad mediante los diferentes tipos de centrales que operan en el país. De ellas, el 15,88% corresponde a fuentes eólicas [2].

También es conocido que en otras latitudes la energía eólica es una buena alternativa en la generación de energía eléctrica a baja escala para satisfacer las necesidades de comunidades que no cuentan con el suministro eléctrico [3], pero es importante determinar la viabilidad de instalar este tipo de generador de electricidad en distintas partes de Costa Rica a partir de las características del recurso eólico disponible, en sustitución del consumo de electricidad disponible por el proveedor local.

Posso [4] afirma que, de todos los vientos generados, sólo una pequeña fracción puede ser aprovechada ya que se requieren condiciones de intensidad y regularidad; y señala que los vientos aprovechables son solo los que presentan velocidades promedio entre 5 y 12 m/s, transformar en energía útil la energía cinética del viento es posible mediante un sistema que permita unir el movimiento rotatorio de un aerogenerador con una aplicación a través del sistema de transmisión.

La respuesta eléctrica de un determinado tipo de aerogenerador depende de las condiciones de viento de una zona específica; a partir de la dirección se define la ubicación del aerogenerador y con la velocidad se determina el potencial eólico del viento expresado en potencia por unidad de área [5], y este según Marco [6] es de los principales problemas de la energía eólica, en comparación con la energía eléctrica convencional, la dependencia con la inestabilidad del viento, ya que solo se puede producir energía cuando sopla el viento, el cual puede ser muy variable incluso en el corto plazo. Es por eso que el análisis de las capacidades de conversión de potencia de la turbina, particularmente en un escenario de prueba de campo con condiciones de viento fluctuantes, es importante para permitir la observación de la variación en la potencia de salida en respuesta a las condiciones de viento en constante cambio [7].

En el mundo se han realizado estudios para estimar la producción esperada de aerogeneradores y su rentabilidad, Henao et al. [3] realizaron un análisis viabilidad de la implementación de una estación eólica instalada en el aeropuerto Camilo Daza de la ciudad de Cúcuta, Colombia, utilizando el factor de capacidad, cuyo resultado fue inferior a 0,2 lo cual era esperable ya que las mediciones en el sitio de estudio mostraban velocidades con valores menores a los 5 m/s. La altura de instalación también es determinante en la producción de las turbinas eólicas de pequeña escala, usualmente es mayor a 10 m y si es instalada en los techos se puede alcanzar mayor altura, y por ende mayores velocidades, sin embargo, requiere consideraciones adicionales de seguridad [8].

Italia posee un sistema de incentivos por el uso de fuentes de energía renovables, por lo que entre las evaluaciones que se deben llevar a cabo previo a la instalación tiene que ver con el umbral de viabilidad financiera (beneficio) para un inversor en la instalación de una planta de energía eólica, es decir, la identificación de las zonas urbanas más productivas para la ubicación de los aerogeneradores de techo [9]. Resultados de un estudio llevado a cabo en Irán [10] demuestran que, para el 30% de las ubicaciones estudiadas, una velocidad del viento de 5 m/s crea las condiciones adecuadas para un uso rentable en entorno residencial con

turbinas de capacidad igual o menor a 3 kW, sin embargo, estos resultados dependen de la época del año y la ubicación en algunos casos las velocidades promedio varían entre 2 m/s y 10 m/s dependiendo del mes [11].

Lo cierto es que los sistemas de energías renovables de pequeña escala son cada vez más utilizados, comúnmente como sistemas domésticos independientes o microrredes comunitarias de zona rural. Sin embargo, existe variedad de tecnologías y configuraciones disponibles [12]. Por lo que el uso de herramientas de simulación resulta útil ya que permiten evaluar distintos escenarios, ejecutar análisis de sensibilidad y analizar toda la información disponible del viento [13].

Costa Rica es un país que figura en Latinoamérica como referente en el campo de la energía eólica y posee desde la década de 1990 parques eólicos, sin embargo, sólo se han desarrollado y concretado tres iniciativas aisladas de investigación en el campo de los aerogeneradores de las cuales ninguna está actualmente en el mercado [14].

Con la caracterización del recurso eólico en una de las provincias en Costa Rica, Cartago, se determinó que los promedios de velocidades del viento se encuentran entre los 3 m/s y 5 m/s a una altura de 10 m sobre la superficie [15]. Producto de la medición del desempeño de un aerogenerador de 3 kW instalado en una zona boscosa se logró determinar que la producción de un 37,75% del estimado de 598 kWh según modelos teóricos. Por lo que realizar la predicción del recurso eólico sin mediciones en sitio resultó poco representativa para el punto geográfico estudiado [16].

También se determinó que es posible seleccionar un sistema híbrido solar-eólico que funcione para satisfacer la necesidad eléctrica de una zona rural relativamente aislada y con viviendas unifamiliares de poco consumo eléctrico [17].

La presente investigación se enfoca en conocer la rentabilidad de una turbina eólica comercial disponible en el mercado de Costa Rica. Se utiliza como base un reporte técnico que muestra la información de varias estaciones meteorológicas ubicadas en las siete provincias de Costa Rica, incluyendo el histograma de velocidades en un periodo de 10 años [18]. Mediante un análisis de viabilidad económica en función del costo de la energía del proveedor local y el ahorro esperado con la instalación del aerogenerador de pequeña escala, se determina si se justifica invertir en este tipo de tecnología con las condiciones particulares de los datos disponibles.

Materiales y métodos

Se tomó la información disponible de 36 estaciones meteorológicas ubicadas a lo largo y ancho de Costa Rica. En cada estación hay un anemómetro y una veleta instalados a 10 m sobre el nivel de suelo, similar al que se muestra en la figura 1. Los equipos instalados para la medición de las variables meteorológicas son fabricados por Campbell Scientific y Davis Instruments, con un rango de medición de 0 a 89 m/s, con un error de + 1 m/s o + 5 %, el mayor de estos valores.



Figura 1. Torre de medición de velocidad de viento típica.

Las estaciones meteorológicas se agruparon en tres grandes regiones según su ubicación, a saber, Valle Central, Vertiente Caribe y Vertiente Pacífico. En la figura 2 se muestra el detalle de la distribución de las estaciones según la región. Para el Valle Central se tienen 12 de las torres de medición, en la Vertiente Caribe 7 y en la Vertiente Pacífico se encuentran las restantes 17, para un total de 36 estaciones de medición. Para el Caribe Norte no se dispone de estaciones y por tanto no se incluye dicha región.

| Valle Central | Vertiente Caribe | Vertiente Pacífico |
|---------------------|----------------------|------------------------------------|
| 1. Juan Santamaría | 13. Ciudad Quesada | 20. Finca Brasilia del Oro |
| 2. Laguna Fraijanes | 14. Los Chiles | 21. Hacienda Mojica |
| 3. Recope La Garita | 15. Aeropuerto Limón | 22. Pinilla |
| 4. Campamento | 16. Canta Gallo | 23. Santa Elena, La Cruz |
| 5. ITCR | 17. La Rebusca | 24. Finca La Ceiba |
| 6. Recope Ochomogo | 18. Manzanillo | 25. Aeropuerto Liberia |
| 7. San Pablo de Cot | 19. Sixaola | 26. Santa Cruz |
| 8. Tierra Blanca | | 27. Puntarenas |
| 9. Terrena Guatuso | | 28. La Lucha 2 |
| 10. Volcán Irazú | | 29. Finca Damas |
| 11. Santa Bárbara | | 30. Río Claro |
| 12. Aranjuez | | 31. Las Brisas Sabalito |
| | | 32. Pindeco |
| | | 33. Montecarlo |
| | | 34. Finca el Patio, Puerto Jiménez |
| | | 35. Coopeagropal, Laurel |
| | | 36. Rancho Quemado |

Figura 2. Distribución de las estaciones meteorológicas por región.

Los datos disponibles tienen una resolución horaria, excepto en las estaciones Campamento, San Pablo de Cot, Tierra Blanca y Terrena Guatuso, numeradas en la figura 2 como 4, 7, 8 y 9 respectivamente, en estas ubicaciones la resolución de los datos es diaria.

En la figura 3 se puede observar la distribución geográfica de las torres de medición y su agrupamiento por región.



Figura 3. Ubicación de las estaciones en Costa Rica.

Para el procesamiento de los datos se utilizó el software Microsoft Excel, con el cual fue posible obtener los histogramas. Para la interpretación de los resultados se debe tener en cuenta que los histogramas muestran los valores de magnitud del viento donde se encuentran el mayor porcentaje acumulado de datos.

La información de ubicación de las 36 estaciones meteorológicas, así como el período de toma de datos, se detalla en los cuadros 1, 2 y 3. Aquí las siglas m.s.n.m. representan metros sobre el nivel del mar.

Cuadro 1. Estaciones en el Valle Central.

| Nombre | Latitud Norte | Longitud Oeste | Altitud (m.s.n.m.) | Periodo | |
|------------------|----------------|----------------|-----------------------|----------|------------|
| | | | | Inicio | Fin |
| Juan Santamaría | 09° 59' 26,45" | 84° 12' 52,93" | 913 | 1/1/2007 | 31/12/2017 |
| Laguna Fraijanes | 10° 08' 14,4" | 84° 11' 36,6" | 1720 | 1/1/2007 | 31/12/2017 |
| Recope La Garita | 10° 00' 19" | 84° 17' 45" | 740 | 1/1/2007 | 31/12/2017 |
| Campamento | 09° 52' 52,65" | 83° 38' 46,28" | 610 | 1/1/2013 | 31/12/2017 |
| ITCR | 09° 51' 08" | 83° 54' 31" | 1360 | 1/1/2007 | 31/12/2017 |
| Recope Ochomogo | 09° 53' 40,21" | 83° 56' 19,41" | 1546 | 1/1/2007 | 31/12/2017 |
| San Pablo de Cot | 09° 56' 14,34" | 83° 50' 06,30" | 2421 | 1/1/2013 | 31/12/2017 |
| Tierra Blanca | 09° 54' 47,16" | 83° 53' 12,85" | 2121 | 1/1/2013 | 31/12/2017 |
| Terrena Guatuso | 09° 49' 18,90" | 83° 56' 37,63" | 1416 | 1/1/2013 | 31/12/2017 |
| Volcán Irazú | 09° 58' 47,53" | 83° 50' 16,14" | 3331 | 1/1/2007 | 31/12/2017 |
| Santa Bárbara | 10° 02' 00" | 84° 09' 57" | 1070 | 1/1/2007 | 31/12/2017 |
| Aranjuez | 09° 56' 16,61" | 84° 04' 10,83" | 1181 | 1/1/2007 | 31/12/2017 |

Cuadro 2. Estaciones en la Vertiente del Caribe.

| Nombre | Latitud Norte | Longitud Oeste | Altitud (m.s.n.m.) | Periodo | |
|------------------|----------------|----------------|-----------------------|----------|------------|
| | | | | Inicio | Fin |
| Ciudad Quesada | 10° 18' 41" | 84° 25' 43" | 700 | 1/1/2007 | 23/3/2017 |
| Los Chiles | 11° 01' 54" | 84° 42' 42" | 40 | 1/1/2007 | 31/12/2017 |
| Aeropuerto Limón | 09° 57' 44" | 83° 01' 29" | 5 | 1/1/2007 | 31/12/2017 |
| Canta Gallo | 10° 29' 48" | 83° 40' 28" | 20 | 1/1/2007 | 31/12/2017 |
| La Rebusca | 10° 29' 00" | 84° 01' 00" | 40 | 1/1/2007 | 31/12/2017 |
| Manzanillo | 09° 37' 53,25" | 82° 39' 39,41" | 80 | 1/1/2007 | 31/12/2017 |
| Sixaola | 09° 31' 39" | 82° 38' 2" | 10 | 1/1/2007 | 25/10/2017 |

Cuadro 3. Estaciones en la Vertiente del Pacífico.

| Nombre | Latitud Norte | Longitud Oeste | Altitud (m.s.n.m.) | Periodo | |
|--------------------------------|----------------|----------------|-----------------------|------------|------------|
| | | | | Inicio | Fin |
| Finca Brasilia Del Oro | 10° 58' 59" | 85° 20' 50" | 380 | 1/1/2007 | 31/12/2017 |
| Hacienda Mojica | 10° 27' 10" | 85° 09' 55" | 33 | 1/1/2007 | 31/12/2017 |
| Pinilla | 10° 15' 36" | 85° 50' 16" | 15 | 1/1/2007 | 31/12/2017 |
| Santa Elena, La Cruz | 10° 55' 12" | 85° 36' 38" | 270 | 1/1/2007 | 31/12/2017 |
| Finca La Ceiba | 10° 06' 40" | 85° 19' 03" | 58 | 1/1/2007 | 31/12/2017 |
| Aeropuerto Liberia | 10° 35' 20,40" | 85° 33' 07,70" | 89 | 1/1/2007 | 31/12/2017 |
| Santa Cruz | 10° 17' 07" | 85° 35' 30" | 40 | 1/1/2007 | 31/12/2017 |
| Puntarenas | 09° 58' 20" | 84° 49' 51,44" | 3 | 1/1/2007 | 31/12/2017 |
| La Lucha 2 | 09° 44' 12" | 84° 00' 02" | 1740 | 1/3/2009 | 31/12/2017 |
| Finca Damas | 09° 29' 43" | 84° 12' 52" | 6 | 8/10/2008 | 31/12/2017 |
| Rio Claro | 08° 40' 29" | 83° 03' 43" | 45 | 11/12/2009 | 31/12/2017 |
| Las Brisas, Sabalito | 08° 52' 48" | 82° 53' 39" | 1040 | 8/1/2007 | 31/12/2017 |
| Pindeco | 09° 08' 49" | 83° 20' 06" | 397 | 1/1/2007 | 31/12/2017 |
| Montecarlo | 09° 21' 28" | 83° 36' 03" | 1005 | 17/6/2008 | 31/12/2017 |
| Finca El Patio, Puerto Jiménez | 08° 36' 02" | 83° 25' 51" | 8 | 1/1/2007 | 31/12/2017 |
| COOPEAGROPAL, Laurel | 08° 28' 17" | 82° 51' 38" | 16 | 9/3/2007 | 31/12/2017 |
| Rancho Quemado | 08° 41' 01" | 83° 34' 08" | 240 | 1/8/2012 | 31/12/2017 |

Con los histogramas para cada ubicación, se selecciona una turbina eólica de 3 kW disponible en el mercado en Costa Rica, cuyo costo de adquisición es de USD 6000 y la curva de potencia se muestra en la figura 4. Es necesario indicar que este producto es el único disponible en el mercado costarricense del cual el proveedor facilita la curva de potencia, razón por la cual no se incluyen precios de otras turbinas eólicas similares. Sin embargo, este procedimiento se puede replicar para cualquier otra turbina si se conoce su curva de potencia en función de la

velocidad del viento. Si bien existe la posibilidad de realizar una importación de este tipo de maquinaria, esto no se recomienda debido a que el aerogenerador carecería de garantía y repuestos en el mercado nacional.

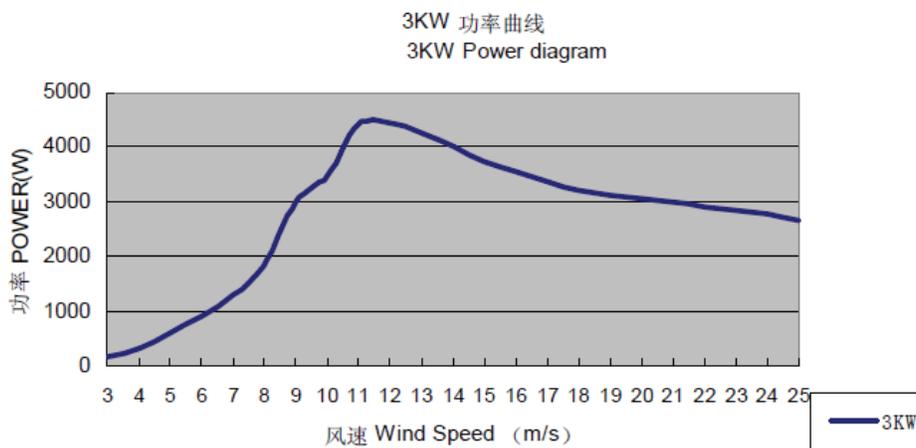


Figura 4. Curva de Potencia de una Turbina comercial de 3 kW. Fuente: [19].

A partir de la curva de potencia del aerogenerador para el rango de velocidades de 3 a 10 m/s, que contiene las velocidades medidas en las estaciones estudiadas, se obtienen los datos de forma discreta de la potencia entregada según la magnitud de velocidad de viento, como se muestra en el cuadro 4.

Cuadro 4. Potencia entregada por la turbina de 3 kW según velocidad del viento.

| Velocidad | Potencia |
|-----------|----------|
| 3 | 118 |
| 4 | 267 |
| 5 | 547 |
| 6 | 868 |
| 7 | 1264 |
| 8 | 1792 |
| 9 | 2943 |
| 10 | 3437 |

Conociendo para cada estación meteorológica la distribución de frecuencias de velocidad del viento y considerando el valor de potencia entregada por la turbina según el cuadro 4, se realizó el cálculo, para cada ubicación, de la producción energética anual del aerogenerador comercial de pequeña escala seleccionado, asumiendo una condición ideal de operación continua todo el año. Se realizó para ello un análisis de velocidades discreto, debido a la resolución de los datos disponibles.

Por último, para aquellas estaciones donde el cálculo de producción de energía fue superior a 1000 kWh/año se aplicó el análisis de ahorro teórico esperado según la tarifa residencial vigente de 62,77 colones por kWh de la Compañía Nacional de Fuerza y Luz. Las tarifas por bloque de consumo se convirtieron a dólares utilizando el tipo de cambio en 612,47 colones por dólar y se muestran en el cuadro 5.

Cuadro 5. Tarifa residencial por bloque de consumo.

| Tipo de tarifa Residencial T-RE | |
|---------------------------------|-------------|
| Bloque de consumo | Tarifa (\$) |
| a. Bloque 0-30 kWh | 0,1025 |
| b. Bloque 31-200 kWh | 0,1025 |
| c. Bloque 201-300 kWh | 0,1573 |
| d. Bloque mayor a 300 kWh | 0,1626 |

Fuente: Compañía Nacional de Fuerza y Luz.

Para determinar la rentabilidad de instalar turbinas comerciales de pequeña escala, se utilizó un escenario optimista y ficticio en el que no se consideran los costos por instalación y mantenimiento, además de un factor de planta igual a 1. De modo que tomando solamente el costo de adquisición de \$6000 para la turbina de 3 kW, y una tasa de descuento del 10% se realizó el cálculo del valor actual neto (VAN) y de la tasa interna de retorno (TIR) para un período de 10 años.

Resultados y discusión

Al procesar los datos de velocidad del viento de las 36 estaciones meteorológicas, se obtienen los histogramas que se agruparon por regiones y a su vez, para la región del Valle Central se dividió en dos grupos. Se muestran los resultados en el rango de 0 a 8 m/s en todos los casos para efectos de facilitar la comparación entre el recurso eólico disponible en cada región. En el caso de la figura 5 los máximos de frecuencia ocurren por debajo de los 3 m/s, que es la velocidad mínima de viento a la cual la turbina entra en operación. Las estaciones de Volcán Irazú y Aeropuerto son las únicas que mantienen una frecuencia superior al 5% para velocidades de viento de 8 m/s. Se observa para esta región que a 10 m sobre el nivel del suelo la mayor frecuencia se da en velocidades por debajo de los 5 m/s.

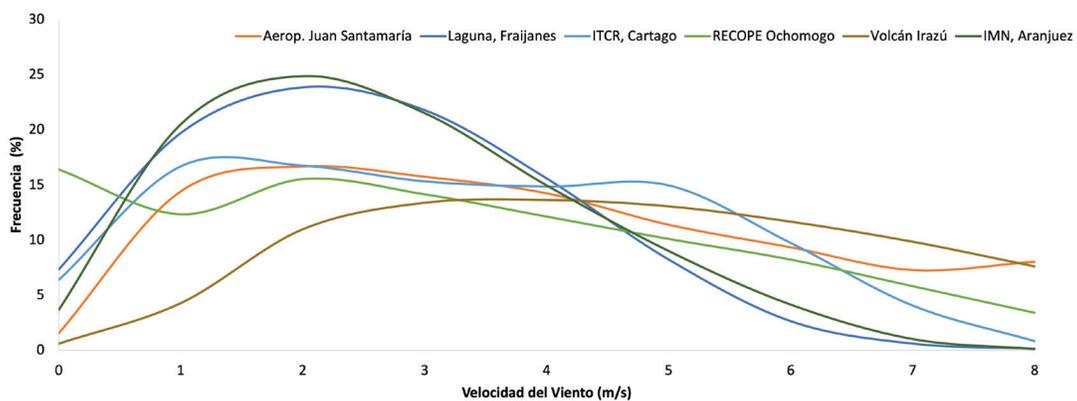


Figura 5. Distribución de frecuencia de la velocidad de viento para estaciones 1, 2, 5, 6, 10 y 12 del Valle Central.

En el segundo grupo de estaciones del Valle Central mostradas en la figura 6 se observa que los registros de velocidad de 8 m/s son escasos. Además, las frecuencias máximas ocurren para velocidades por debajo de 3 m/s, donde la turbina no opera. Las estaciones que presentan mejores resultados son las de San Pablo de Cot y Tierra Blanca.

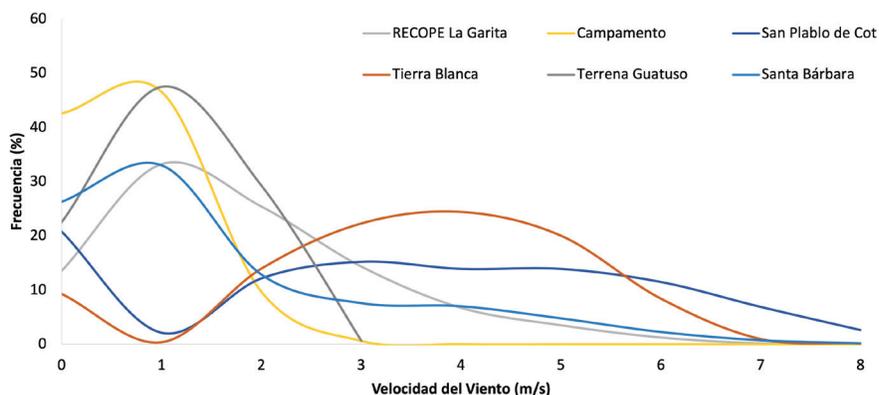


Figura 6. Distribución de frecuencia de la velocidad del viento para estaciones 3, 4, 7, 8, 9 y 11 del Valle Central.

Los datos obtenidos de las estaciones ubicadas en las regiones Vertiente Caribe y Pacífico muestran un comportamiento distinto al del Valle Central, pero similares entre ellas. En la figura 7 de las estaciones de la Vertiente del Caribe destaca muchos periodos de calma, con velocidad de 0 m/s y prácticamente sin registros superiores a 6 m/s.

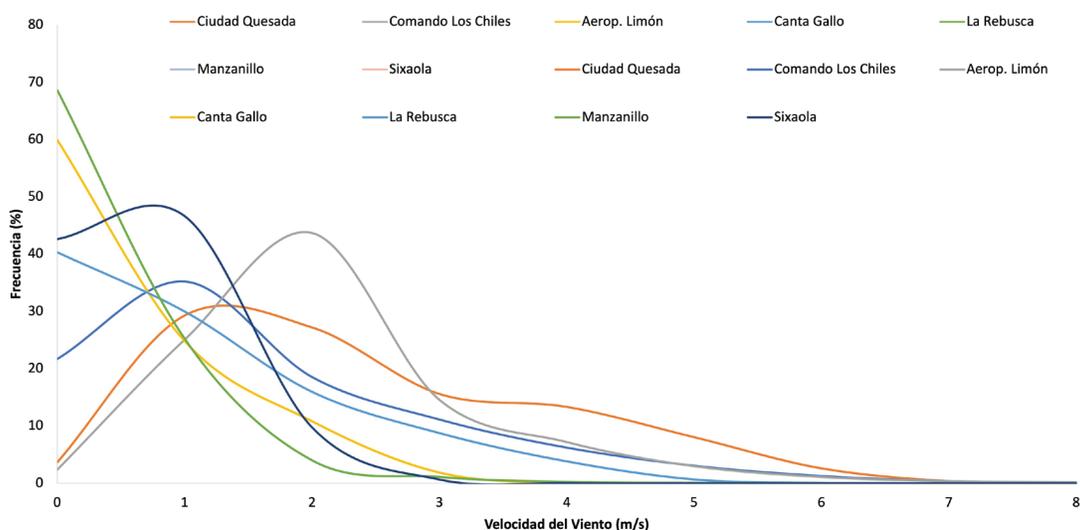


Figura 7. Distribución de frecuencia de la velocidad del viento para estaciones de 13 a 19 de la Vertiente del Caribe.

En la figura 8 para el primer grupo de estaciones de la Vertiente del Pacífico se repite el comportamiento de máximas frecuencias en velocidades por debajo de 3 m/s. El Aeropuerto de Liberia de manera similar al Aeropuerto Juan Santamaría, presenta con frecuencia velocidades superiores a los 3 m/s.

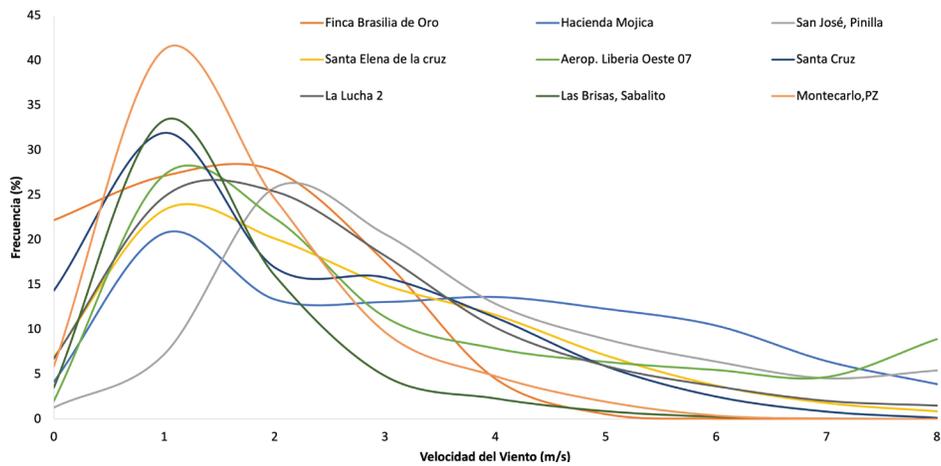


Figura 8. Distribución de frecuencia de la velocidad del viento para estaciones 20, 21, 22, 23, 25, 26, 28, 31 y 33 de la Vertiente del Pacífico.

En la Vertiente del Pacífico, figura 9, presenta la misma tendencia de muchos periodos de calma, lo que hace que las mayores frecuencias sean por debajo de 3 m/s. En este caso a los registros de velocidades mayores a 4 m/s son prácticamente nulos.

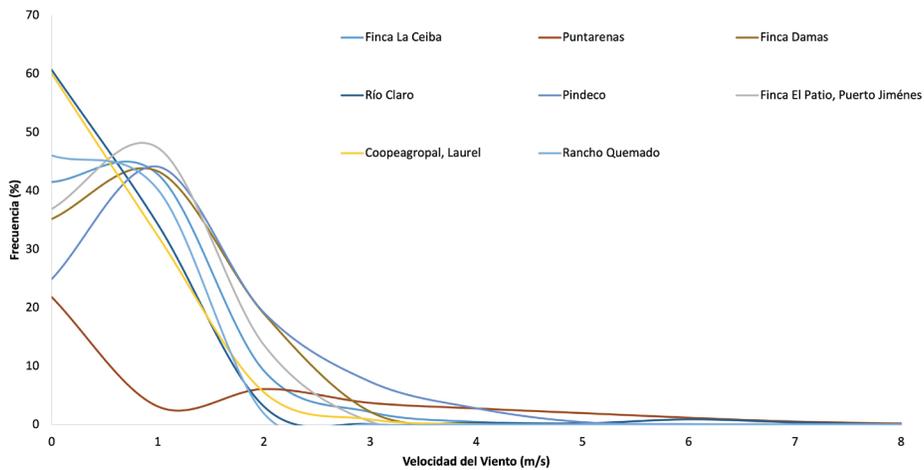


Figura 9. Distribución de frecuencia y velocidad de viento para estaciones de 24, 27, 29, 30, 32, 34, 35 y 36 de la Vertiente del Pacífico.

En las figuras 7, 8 y 9 se puede observar que las frecuencias más altas son de las velocidades por debajo de los 3 m/s, lo que coincide con la velocidad mínima de entrega de energía de la turbina eólica seleccionada en este estudio.

A partir de la información obtenida, se realizó el análisis de manera discreta para determinar la producción energética anual en cada estación, los resultados superiores a 1000 kWh/año se detallan en el cuadro 6, así como el ahorro anual que entregaría el aerogenerador comercial de pequeña escala, con potencia nominal de 3 kW, en cada una de las estaciones, suponiendo un escenario optimista de operación continua.

Cuadro 6. Ahorro anual en dólares para cada estación con producción esperada por encima de los 1000 kWh/año.

| Estación | kWh/año | Ahorro anual (\$) |
|----------------------------|---------|-------------------|
| 10. Volcán Irazú | 7667,0 | 785,8 |
| 1. Juan Santamaría | 3820,7 | 391,6 |
| 7. San Pablo de Cot | 3431,2 | 351,6 |
| 6. RECOPE Ochomogo | 3233,6 | 331,4 |
| 21. Hacienda Mojica | 3159,8 | 323,8 |
| 25. Aeropuerto Liberia | 2938,9 | 301,2 |
| 22. Pinilla | 2782,0 | 285,1 |
| 5. ITCR, Cartago | 2568,3 | 263,2 |
| 8. Tierra Blanca | 2538,3 | 260,1 |
| 12. IMN, Aranjuez | 1454,2 | 149,0 |
| 28. La Lucha 2 | 1447,7 | 148,4 |
| 23. Santa Elena de la cruz | 1384,0 | 141,8 |
| 2. Laguna, Fraijanes | 1274,4 | 130,6 |
| 13. Ciudad Quesada | 1095,5 | 112,3 |
| 26. Santa Cruz | 1016,5 | 104,2 |

Finalmente, para el ahorro más alto que es el de la estación del Volcán Irazú se obtuvo que, para una operación de 10 años, el valor actual neto es de -\$ 1 171,82 y el retorno sobre la inversión del 5% por lo que la inversión debe rechazarse.

El panorama descrito podría beneficiarse si el precio de las turbinas eólicas se redujera en un futuro, lo cual efectivamente es la tendencia de acuerdo con [20]. No obstante, la determinación del punto de equilibrio entre el costo de la tecnología y los beneficios que esta ofrece, está fuera del alcance de esta investigación.

Por otro lado, la situación también podría ser más favorable si continúa el desarrollo en cuanto a eficiencia aerodinámica de los aerogeneradores a pequeña escala y la disminución en el par resistivo de arranque que permita que la turbina genere energía a velocidades de viento menores a 3 m/s. Sin embargo, a pesar de investigaciones como la de [21] que propone velocidades de arranque del aerogenerador para vientos de 2 m/s o bien en [22] para 1 m/s, las turbinas comerciales mantienen la cota de 3 m/s de velocidad de viento como valor mínimo para la generación de electricidad [23].

Conclusiones

Después de analizar el recurso eólico en 36 puntos en distintas regiones en Costa Rica, mediante mediciones realizadas a 10 m de altura durante 10 años y combinar estos resultados con el costo de la energía eléctrica y la potencia entregada por un aerogenerador comercial de pequeña escala, asumiendo condiciones ideales de factor de planta del 100% y cero costos de mantenimiento e instalación, es posible concluir lo siguiente:

Entre la muestra de sitios analizados en este estudio, las dos estaciones que registran el mayor potencial de recurso eólico son los aeropuertos, uno ubicado a 913 msnm y el otro a tan solo 89 msnm.

Las estaciones con mejores condiciones permitirían generar de forma teórica hasta 7 667 kWh/año lo que, desde el punto de vista económico, no se traduce en un proyecto viable porque la tasa interna de retorno es de apenas 5%. Por lo que no es económicamente viable la instalación de turbinas comerciales en las condiciones estudiadas.

Con este panorama, las alternativas viables serían colocar las turbinas a alturas mayores a los 10 metros sobre el suelo, preferiblemente en locaciones más ventosas. Otra alternativa sería utilizar una turbina eólica más adecuada para vientos de baja velocidad, lo cual requiere un diseño específico pues, aunque el aerogenerador seleccionado tiene una velocidad de operación mínima de 3 m/s, esta es una condición usual en las turbinas eólicas comerciales de pequeña escala. Así las cosas, se vislumbra en ese sentido una valiosa línea de investigación en cuanto al desarrollo de turbina eólicas aptas para vientos de bajas velocidades, las cuales aún no existen en el mercado.

Referencias

- [1] Global Wind Energy Council, "Global Wind Statistics", Brussels, 2019.
- [2] Grupo ICE, "Somos electricidad renovable y solidaria", 2020.
- [3] D. Henao León, A. C. Báez Alarcón, y 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>
- [4] Posso, F. (2002). Energía y ambiente: pasado, presente y futuro. Parte dos: Sistema energético basado en energías alternativas. *Geoenseñanza*, 7(1-2), 54-73. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=36070206>
- [5] F. Eraso Checa y E. Escobar Rosero, "Metodología para la determinación de características del viento y evaluación del potencial de energía eólica en Túquerres-Nariño", *Rev. Cient.*, vol. 31, n.º 1, pp. 19-31, ene. 2018. <https://doi.org/10.14483/23448350.12304>
- [6] Marco Carpena, A. "Modelización y predicción de energía eléctrica producida en un aerogenerador utilizando modelos estocásticos temporales a partir de series de viento", Tesis, Universitat Politècnica de València, 2017. <http://hdl.handle.net/10251/84261>
- [7] Cooney, C., Byrne, R., Lyons, W. & O'Rourke, F. "Performance characterisation of a commercial-scale wind turbine operating in an urban environment, using real data." *Energy for Sustainable Development*, vol. 36, pp. 44-54, 2017. <https://doi.org/10.1016/J.ESD.2016.11.001>
- [8] M. Elnaggar, E. Edwan, and M. Ritter, "Wind Energy Potential of Gaza Using Small Wind Turbines: A Feasibility Study," *Energies*, vol. 10, no. 8, p. 1229, Aug. 2017. <https://doi.org/10.3390/en10081229>
- [9] P. Morano, F. Tajani, L. Marco, "GIS application and econometric analysis for the verification of the financial feasibility of roof-top wind turbines in the city of Bari (Italy)", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 70, pp. 999-1010, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.005>.
- [10] R. Hosseinalizadeh, E. Sadat Rafiei, A. Shafiei Alavijeh, S. Farid Ghaderi, "Economic analysis of small wind turbines in residential energy sector in Iran", *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 20, pp. 58-71, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2017.02.018>.
- [11] F. Fazelpour, E. Markarian, N. Soltani, "Wind energy potential and economic assessment of four locations in Sistan and Balouchestan province in Iran", *Renewable Energy*, vol. 109, pp. 646-667, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.03.072>
- [12] A. Jhud Mikhail, A. Gallego-Schmid, L. Stamford, A. Azapagic, "Design and environmental sustainability assessment of small-scale off-grid energy systems for remote rural communities", *Applied Energy*, vol. 258, p. 114004, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114004>
- [13] T. Prabatha, J. Hager, B. Carneiro, K. Hewage, R. Sadiq, "Analyzing energy options for small-scale off-grid communities: A Canadian case study", *Journal of Cleaner Production*, vol. 249, pp. 119320, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119320>
- [14] G. Richmond-Navarro, G. Murillo-Zumbado, P. Casanova-Treto, J. Piedra-Segura. "Estado actual de la investigación sobre turbinas eólicas en Costa Rica". *Tecnología en Marcha*. vol. 32-2, pp. 54-67, 2019. <https://doi.org/10.18845/tm.v32i2.4349>

- [15] G. Murillo, G. Richmond, P. Casanova, J. Rojas. "Generalidades del recurso eólico en Costa Rica: caso de estudio de la provincia de Cartago". *Tecnología en Marcha*. Vol. 34-4, 2021. <https://doi.org/10.18845/tm.v34i4.5274>
- [16] K. Torres-Castro, C. Torres, G. Richmond. "Microgeneración de energía eólica en un entorno boscoso en Costa Rica: estudio de caso". *Tecnología en Marcha*. Vol. 34-3, pp. 61-69, 2021. <https://doi.org/10.18845/tm.v34i3.5063>
- [17] V. Salas-Mora, G. Richmond-Navarro. "Safety Design of a Hybrid Wind-Solar Energy System for Rural Remote Areas in Costa Rica". *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, vol. 10(1), pp. 33-44, 2020. <https://www.ijrer.ijrer.org/index.php/ijrer/article/view/10263>
- [18] G. Murillo, G. Richmond "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>
- [19] M. Alabi. "Nuevo mensaje de Dyscresa.com", Correo personal (03 de abril de 2018).
- [20] A. Elia, M. Taylor, B. Ó. Gallachóir, & F. Rogan. "Wind turbine cost reduction: A detailed bottom-up analysis of innovation drivers". *Energy Policy*, vol. 147, pp. 111912, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111912>
- [21] A. Suresh, & S. Rajakumar. "Design and experimental investigation of a micro wind turbine". *International Journal of Advances in Engineering Research (IJAER)*, 10, 216-224, 2015. https://ijaer.com/admin/upload/1451677792_A_Suresh_22.pdf
- [22] A. Ali, S. Golde, F. Alam, and H. Moria, "Experimental and computational study of a micro vertical axis wind turbine". *Procedia Engineering*, vol. 49, pp. 254–262, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.10.135>
- [23] Electrovento Energía Alternativa. [En línea, última visita el 13/11/2021] <https://www.eletovento.com.br/site/produto/modelo-elv-h2-7-500-w/7/>