

Rentabilidad prevista de un aerogenerador de minieólica en cuatro ciudades de Colombia acorde a los incentivos de Ley 1715

Expected return of investment for a small wind turbine in four cities of Colombia considering Law 1715's incentives

Fabian León-Vargas¹, Edwing Krejci², Maira García-Jaramillo³

Universidad Antonio Nariño, Bogotá, Colombia.

Artículo recibido en mes XX de año; artículo aceptado en mes XX de año

Citación del artículo: Primer apellido,J. & Primer apellido,M. (año). Efectos de la ejercitación gestual mediante sensores faciales en la expresión pro social de la ira. *I+D Revista de Investigaciones*, 1(2), pp-pp.

Resumen

En este trabajo se analiza la estimación de la rentabilidad que puede tener un proyecto de generación de energía eólica para autoabastecimiento de un hogar promedio a partir de la estimación del potencial eólico en ubicaciones de diferentes ciudades de Colombia y un ejercicio de análisis de pre-factibilidad a partir de características técnicas y económicas de un aerogenerador de minieólica de 3.5 kW. Para ello se ha dispuesto una estación

¹ Research Group in Energy and Materials (REM), Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Antonio Nariño, Bogotá, Colombia, Calle 22S, 12D 81 Bogotá, Colombia, fabianleon@uan.edu.co

² Research Group in Energy and Materials (REM), Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Antonio Nariño, Bogotá, Colombia

³ Laboratory for Advanced Computational Science and Engineering Research, Facultad de Ingeniería de Sistemas, Universidad Antonio Nariño, Bogotá, Colombia

meteorológica en cada una de las cuatro ciudades incluidas en el estudio a lo largo de un año con el fin de obtener mediciones de velocidad y dirección de viento así como otras variables de interés. Los resultados indican que no se logra amortizar la inversión necesaria en ninguna de las ubicaciones bajo estudio, incluso considerando la aplicación de incentivos legales contemplados por la ley 1715 tales como exclusión de IVA e impuestos arancelarios.

Palabras clave: Autoabastecimiento; Energía eólica; Generación; Rentabilidad; Urbana.

Resumen en inglés.

This paper presents the estimation of cost effectiveness that can have a project of wind power generation for self-supply of an average household is analyzed. Wind potential of different cities in Colombia and a pre-feasibility analysis using technical and economic characteristics of a 3.5 kW minieolic wind turbine was performed. Measurements over a year for wind speed and direction and other climatological variables were obtained from four meteorological stations. Results indicate that return on investment is not possible at any of the locations under study even considering application of legal incentives laid down by law 1715 such as excluding VAT and customs taxes.

Introducción

Los incentivos regulados por los diferentes países para la generación de energía renovable ha motivado el estudio de viabilidad de la implementación de este tipo de sistemas. En la literatura se encuentran varios estudios sobre análisis tecno-económicos de sistemas basados en energías no convencionales para cubrir necesidades energéticas en entornos urbanos [1-5]. Sin embargo, a nivel nacional se encuentran en su mayoría análisis centrados únicamente en la estimación del potencial eólico a partir de estaciones meteorológicas distribuidas en una misma ciudad [6-7].

En este trabajo se presentan resultados de un estudio sobre la estimación de la rentabilidad prevista en proyectos de generación de minieólica en ubicaciones predominantemente urbanas en las ciudades de Bogotá, Cúcuta, Manizales y Pasto; en las que se ha dispuesto una estación meteorológica en instalaciones de la Universidad Antonio Nariño. Se caracterizó estadísticamente la velocidad del viento en cada ubicación a partir

I+D Revista de Investigaciones ISSN 22561676 Volumen 1 Número 1 Año 01 Enero-Junio 2013 pp.xx-xx

del ajuste de los datos a la distribución de probabilidad de Weibull y se realizó una estimación del porcentaje de cobertura energética que podría ser aprovechado en un hogar promedio a través de la implementación de un aerogenerador comercial de uso doméstico como lo es el Eanir 70. Se presenta un análisis de pre-factibilidad de la inversión en autogeneración de energía eléctrica a partir de esta clase de tecnología teniendo en cuenta el recurso eólico presente en las ubicaciones bajo estudio y considerando los efectos económicos de incentivos de la ley 1715 que ya se encuentran regulados en Colombia.

Materiales y Métodos

Las ciudades elegidas para la realización de este estudio preliminar corresponden a Bogotá, Cúcuta, Manizales y Pasto. En la Tabla 1 se presenta la ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas y la altura de medición en cada caso. Es importante señalar que los datos de velocidad del viento y demás variables meteorológicas fueron obtenidos con una periodicidad de 2 minutos y corresponden a los meses de Julio 2015 (07/2015) a Julio 2016 (07/2016).

Tabla 1. Ubicación de las estaciones meteorológicas y altura de medición local.

<i>Ubicación</i>	<i>Longitud (O)</i>	<i>Latitud (N)</i>	<i>Altura de medición (m)</i>
Bogotá	74°:6':2,86"	4°:34':46,372"	20
Cúcuta	72°:30':7,836"	7°:52':52,241"	12
Manizales	75°:31':45,717"	5°:2':43,601"	15
Pasto	77°:17':24,039"	1°:12':2,808"	20

Fuente: "Elaboración propia"

Estimación del potencial eólico

La estimación del potencial eólico se determina a partir de datos de velocidad del viento (u) y su ajuste a un modelo matemático basado en la densidad de probabilidad de la distribución de Weibull. Los parámetros de forma y escala en dicho modelo pueden ser estimados a través de distintos métodos [8].

La densidad de potencia eólica media disponible, o potencial eólico P_e , es proporcional a la densidad del aire (ρ) y a la integral del cubo de las velocidades ponderadas por la función de densidad $p(u)$, ecuación (1).

$$P_e = \frac{1}{2} \rho \int_0^{\infty} u^3 p(u) du \quad (1)$$

Estimación de potencia y energía

Para estimar la potencia media final P_m obtenida a partir de un aerogenerador, se calcula la integral de la curva de potencia del aerogenerador $W(u)$ ponderada por la función de densidad de probabilidad de Weibull $p(u)$, ecuación (2).

$$P_m = \int_0^{\infty} p(u)W(u) du \quad (2)$$

Sin embargo, la estimación debe ser corregida si la densidad del aire es distinta de la estándar (1,225 kg/m³). Para ello se aplica un factor k_d , ecuación (3), que depende de la temperatura T (° centígrados) y h la altura sobre el nivel del mar (m).

$$k_d = \left(\frac{288}{T+273} \right) e^{-\frac{h}{8435}} \quad (3)$$

La ecuación (4) es usada finalmente para el cálculo de la potencia media real de salida P_{mr} [9].

$$P_{mr} = k_d \int_0^{\infty} p(u)W(u) du \quad (4)$$

La energía generada depende entonces de la potencia media real de salida P_{mr} y del tiempo t (horas) de aplicación.

Estimaciones de pre-factibilidad

En el análisis de rentabilidad se hace uso de indicadores como el costo por kWh y tiempo de amortización. Para determinar el costo por kWh producido se utiliza la ecuación (5) [10]. Donde CE es el costo de los equipos, CI es el costo de instalación, CMA es el costo de mantenimiento anual, VU es el tiempo de vida útil en años y P_{mr} es la potencia media real de salida del aerogenerador.

$$\text{Costo por kWh} = \frac{CE+CI+(CMA*VU)}{365*24*VU*P_{mr}} \quad (5)$$

Resultados

Potencial eólico

En la Tabla 2 se presenta la media de las velocidades de viento obtenidas en cada ubicación. En la Tabla 3 se presentan los valores medios de temperatura ambiente, humedad relativa, presión atmosférica, altura sobre el nivel del mar y la respectiva densidad del aire de cada ubicación teniendo en cuenta implicaciones del vapor de agua en el ambiente [11].

Tabla 2. Velocidad del viento media y media máxima en cada una de las ubicaciones de las estaciones meteorológicas.

Ubicación	μ (m/s)
Bogotá	2,23
Cúcuta	2,75
Manizales	1,47
Pasto	3,34

Fuente: “Elaboración propia”

Tabla 3. Temperatura, presión atmosférica, humedad relativa, altura sobre el nivel del mar y densidad del aire en cada ubicación.

Ubicación	Temperatura (° C)	Presión Atmosférica (hPa)	Humedad relativa (%)	Altura sobre nivel del mar (m)	Densidad del aire (kg/m ³)
Bogotá	15,49	749,76	66	2580,2	0,643
Cúcuta	29,01	974,47	58	321,4	1,071
Manizales	18,68	809,88	78	1940,3	0,749
Pasto	14,04	742,78	73	2653,6	0,633

Fuente: “Elaboración propia”

Para este estudio se ha elegido una altura de referencia de 20 m con el fin de hacer comparable los resultados obtenidos entre las distintas ubicaciones. En la Tabla 4 se presentan los valores de velocidad media del viento a 20 m de altura obtenidos a partir de las fórmulas de ajuste de Justus-Mikjail [9]. Teniendo en cuenta que cada ubicación de medición presenta características orográficas a su alrededor muy distintas una de otra, el valor de longitud de rugosidad asociada se estimó considerando clasificaciones orientativas de

acuerdo al tipo de superficie, homogeneidad del terreno, resguardo por obstáculos y la clase de rugosidad que presentan distintas tablas relativas a este parámetro [9, 12-13].

Tabla 4. Velocidad media del viento a una altura de 20 m en cada ubicación.

<i>Ubicación</i>	<i>μ' (m/s)</i>
Bogotá	2,23
Cúcuta	3,16
Manizales	1,59
Pasto	3,34

Fuente: “Elaboración propia”

Finalmente, en la Tabla 5 se presentan los valores del potencial eólico disponible o densidad de potencia media de entrada en cada ubicación teniendo en cuenta los resultados de las Tablas 3 y 4.

Tabla 5. Potencial eólico disponible en cada ubicación.

<i>Ubicación</i>	<i>Densidad de potencia (W/m²)</i>
Bogotá	10,90
Cúcuta	36,83
Manizales	3,05
Pasto	29,36

Fuente: “Elaboración propia”

Potencia y energía en cada ubicación

Para este estudio se eligió el aerogenerador de eje horizontal de baja potencia Enair 70, el cual presenta un desempeño de alto rendimiento certificado por el CIEMAT en España y SEPEN en Francia; además de cumplir con normativas de alta calidad de acuerdo con la certificación MSC [14]. Algunas de sus características técnicas más atractivas para el desarrollo de proyectos de minieólica en el entorno urbano son: diámetro 4.1 m, velocidad de arranque (cut-in) de 2 m/s, potencia nominal de 3,5 kW y bajo nivel de sonoridad (1% por encima del medio ambiente).

La ecuación (6) es usada para el cálculo de la potencia media a partir de valores tabulados de la curva de potencia del aerogenerador. Esta ecuación corresponde a la versión discretizada de la ecuación (4), donde $p(n)$ y $W(n)$ corresponden a la densidad de probabilidad de Weibull y la potencia de salida del aerogenerador respectivamente para

I+D Revista de Investigaciones ISSN 22561676 Volumen 1 Número 1 Año 01 Enero-Junio 2013 pp.xx-xx

velocidades de 0 a 25 m/s con un paso $\Delta u = 1$ (m/s). El parámetro k_d se obtiene a partir de la ecuación (3) y valores de la Tabla 3.

$$P_{mr} = k_d \Delta u \sum_{n=0}^{25} p(n)W(n) \quad (6)$$

En la Tabla 6 se presentan los valores de potencia media de salida, energía total producida para los meses de 07/2015 a 04/2016 (asumiendo que no hay pérdidas adicionales en la disposición del potencial eólico), y el factor de carga del aerogenerador calculado en función de la potencia media de salida y la potencia nominal de este.

Tabla 6. Potencia media de salida, energía total producida para los meses de 07/2015 a 07/2016, y factor de carga del aerogenerador Enair 70 en cada ubicación.

<i>Ubicación</i>	<i>Potencia media de salida (W)</i>	<i>Energía Total (kWh)</i>	<i>Factor de carga (%)</i>
Bogotá	71	521,5	2,0
Cúcuta	190	1388,8	5,4
Manizales	11	80,9	0,3
Pasto	202	1476,3	5,76

Fuente: “Elaboración propia”

De la Tabla 6 y estimando un consumo energético de 200 kWh mensuales para un hogar promedio colombiano (4 personas), en la Tabla 7 se muestra el porcentaje de cobertura energética que podría satisfacer el aerogenerador en cada ubicación para los meses de 07/2015 a 07/2016.

Tabla 7. Cobertura energética obtenida a partir del Enair 70 para los meses de 07/2015 a 07/2016 en cada ubicación.

<i>Ubicación</i>	<i>Cobertura energética promedio (%)</i>
Bogotá	26,1
Cúcuta	69,4
Manizales	4,1
Pasto	73,8

Fuente: “Elaboración propia”

Costos del proyecto de minieólica doméstico

Los costos base para el análisis incluyen el costo total de los equipos (CE), el costo de instalación (CI) y el costo de mantenimiento anual (CMA). En este estudio se ha utilizado un valor de CI y CMA igual al 10% y 1% de CE respectivamente. La Tabla 8 muestra los

costos estimados de los equipos para un proyecto de generación eólica con el Enair 70. Estos costos contemplan un IVA (impuesto de valor agregado) del 16% y un valor de aranceles de 5% [14].

Tabla 8. Costos originales para proyecto de generación eólica usando el Enair 70.

<i>Equipo</i>	<i>Costo (miles de pesos)</i>
Enair 70	28.500
Inversor MP 3K-60A	1.739
6 Baterías 8OPZS	5.835
<i>Subtotal</i>	36.074
<i>Subtotal con IVA</i>	41.844
<i>Total con aranceles</i>	43.936

Fuente: “Elaboración propia”

En la Tabla 9 se muestra el costo por kWh de referencia C_{ref} promedio obtenido de la generación eléctrica convencional durante el último año para los estratos 4 y 5 en cada ubicación. Estos son valores de referencia obtenidos de las empresas de energía eléctrica presentes en cada ubicación.

Tabla 9. Costo por kWh de referencia C_{ref} para estratos 4 y 5 durante el último año en cada ubicación.

<i>Ubicación</i>	<i>C_{ref} estrato 4 (pesos)</i>	<i>C_{ref} estrato 5 (pesos)</i>
Bogotá	414,7	497,6
Cúcuta	440,2	526,3
Manizales	414,7	497,6
Pasto	488,1	586,9

Fuente: “Elaboración propia”

Efecto de incentivos legales en pre-factibilidad

En Colombia existen actualmente incentivos legales que benefician la implementación de sistemas de generación eléctrica a partir de fuentes no convencionales de energía (Ley 1715 de 2014). En la Tabla 10 se muestra el costo por kWh obtenido a partir de la ecuación (5) que resulta del proyecto de generación eólica en cada ubicación con y sin los incentivos de exclusión del IVA e impuestos arancelarios. En este cálculo se ha usado un tiempo de vida útil (VU) de 20 años.

Tabla 10. Costo por kWh del proyecto de generación eólico, con y sin incentivos económicos.

NOMBRE NOMBRE APELLIDO APELLIDO, NOMBRE NOMBRE APELLIDO APELLIDO
Efectos de la ejercitación gestual mediante sensores faciales en la expresión de la ira.

<i>Ubicación</i>	<i>Costo por kWh (pesos) Sin Incentivo</i>	<i>Costo por kWh (pesos) Con Incentivo</i>
Bogotá	4.591	3.768
Cúcuta	1.713	1.407
Manizales	29.643	24.337
Pasto	1.614	1.324

Fuente: “Elaboración propia”

Se observa que el precio por kWh del proyecto de generación eólica no resulta inferior al precio de referencia (Tabla 9) para ninguna de las ubicaciones bajo estudio. Esto implica que el tiempo de amortización con y sin los incentivos de exclusión de IVA e impuestos arancelarios, resultaría en todos los casos superior al tiempo de vida útil de proyecto de generación eólica.

Discusión

En Colombia existen seis niveles de estratificación que determinan el porcentaje de facturación de los servicios públicos. En este estudio se han realizado estimaciones de prefactibilidad únicamente a los estratos 4 y 5 debido a que en estos se presenta el costo por kWh más alto, lo que en teoría resultaría en un proyecto de generación más atractivo. Se debe tener en cuenta que el costo por kWh para el estrato 6 es igual que para el estrato 5.

La estimación del consumo para un hogar promedio se realizó con base en estadísticas del Sistema de Información Eléctrico Colombiano (SIEL) en su balance energético del consumo residencial para el año 2015 y datos poblacionales de Colombia.

Los incentivos de la ley 1715 en Colombia ya se encuentran reglamentados en su mayoría. Sin embargo, en este trabajo sólo se han incluido los relacionados con la exclusión del IVA y de impuestos arancelarios para determinar la viabilidad económica de un proyecto de minieólica. Una estimación más precisa del alcance económico que puede tener la ley 1715 debería incluir adicionalmente escenarios para incentivos relacionados con el impuesto sobre la renta y aspectos contables relevantes.

Conclusión

A partir de la estimación del potencial eólico presente en las cuatro ubicaciones Colombianas de carácter predominantemente urbano, y de acuerdo con el análisis de pre-factibilidad realizado para un proyecto de generación de minieólica doméstico, no se lograría amortizar la inversión necesaria en ninguna de las ubicaciones, incluso considerando el caso con aplicación de incentivos legales contemplados por la ley 1715 tales como exclusión de IVA e impuestos arancelarios. Los resultados indican que las necesidades energéticas de un hogar promedio colombiano estimadas en 200 kWh mensuales, no logran ser cubiertas de manera satisfactoria.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la Universidad Antonio Nariño a través del proyecto No. 20141110..

Referencias

- [1] W.T. Chong, M.S. Naghavi, S.C. Pho, T.M.I. Mahlia, K.C. Pan, “Techno-economic analysis of a wind-solar hybrid renewable energy system with rainwater collection feature for urban high-rise application”, *Applied Energy*; 88(11):4067-4077, 2011.
- [2] J.D. Ortiz, “Viabilidad técnico-económica de un sistema fotovoltaico de pequeña escala”, *Revista Visión Electrónica*; 7(1):103-117, 2013.
- [3] J. Barbosa et ál, “Estudio para el uso de la tecnología solar fotovoltaica”, *Revista Ingeniería Solidaria*; 6(10):69-81, 2010.
- [4] C.D. González Cantillo, “Análisis del potencial técnico, económico y ambiental del aprovechamiento de energía eólica en la Ciénaga de la Virgen”, Trabajo de grado, 2014. Disponible en: <http://bibliotecadigital.usbcali.edu.co:8080/jspui/handle/10819/2792>
- [5] S. Ruiz-Romero, A. Colmenar-Santos, R. Gil-Ortego, A. Molina-Bonilla, “Distributed generation: The definitive boost for renewable energy in Spain”, *Renewable Energy*; 53:354-364, 2013.

- [6] P.P. Vergara-Barrios, J.M. Rey-López, G.A. Osma-Pinto, G. Ordoñez-Plata, “Evaluación del potencial solar y eólico del campus centra de la Universidad Industrial de Santander y la ciudad de Bucaramanga, Colombia”, *UIS Ingenierías*, 13(2):49-57, 2014.
- [7] E. Vera-Duarte, A. Vásquez-Vega, J. Rojas-Serrano, “Evaluación y caracterización del recurso eólico en la Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, y prospectiva para el aprovechamiento energético en el Norte de Santander”, *El Hombre y la Máquina*, 46:144-152, 2015.
- [8] Y. Lei, “Evaluation of three methods for estimating the Weibull distribution parameters of Chinese pine (*Pinus tabulaeformis*)”, *Journal of Forest Science*; 54(12):566-571, 2008.
- [9] M. Villarrubia López, “Ingeniería de la Energía Eólica”, *Nuevas Energías*, Marcombo, 2011.
- [10] Wind Power Program, <http://www.wind-power-program.com>
- [11] R. Shelquist, Density Altitude Calculator, http://wahiduddin.net/calc/calc_da_rh.htm
- [12] I. Troen, E.L. Petersen, “El Atlas Eólico Europeo”, Roskilde, Risø National Laboratory, 1990.
- [13] J.F. Manwell, J.G. Mcgowan, A.L. Rogers, “Wind energy explained, Theory design and application”, J Wiley, 2009.
- [14] Enair company, <http://www.enair.es>