

Características del viento y potencia eólica disponible en la región andina de la provincia de
Chimborazo



DOI: <http://dx.doi.org/10.23857/dc.v6i3.1338>

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de investigación

*Características del viento y potencia eólica disponible en la región andina de la
provincia de Chimborazo*

*Wind characteristics and wind power available in the andean region of the
province of Chimborazo*

*Características do ambiente e potência eólica disponíveis na região andina da
província de Chimborazo*

Lorenzo Alfredo Enríquez-García ^I
lorenzenriquez@epoch.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-7300-8204>

Hugo Oswaldo Moreno-Avilés ^{II}
h_moreno@epoch.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-3579-0546>

***Recibido:** 14 de mayo de 2020 ***Aceptado:** 23 de junio de 2020 ***Publicado:** 27 de julio de 2020

- I. PhD en Sistemas de Electrónica y Eléctrica y de Control, Ingeniero electromecánico, PhD en sistemas de Eficiencia Energética, Docente Investigador en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Grupo de Investigación Energías Alternativas y Ambiente, FIE-ESPOCH Riobamba, Ecuador.
- II. PhD en Telecomunicaciones, Ingeniero, Docente Investigador, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Grupo de Investigación Energías Alternativas y Ambiente, FIE-ESPOCH, Riobamba, Ecuador.

Características del viento y potencia eólica disponible en la región andina de la provincia de Chimborazo

Resumen

En Ecuador la demanda energética se satisface con la generación hidroeléctricas en un 80% el 12% de termoeléctricas y el 8% de energía renovable. El Gobierno del Ecuador ha ratificado su firme voluntad para la conservación del medio ambiente y un cambio en la matriz energética utilizando fuentes de energías renovables. Por lo que es importante estimar el estudio del potencial energético renovable que el país posee, Lo que dio la oportunidad de realizar este estudio, que nos permitió estimar mediante información meteorológica, la velocidad, dirección de viento y el potencial eólico disponible en las zonas andinas situadas en la provincia de Chimborazo, y se determinó la distribución de probabilidad de Weibull, el factor de forma (k) y factor de escala (c), en las cinco regiones seleccionadas; dos de ellas fueron calificadas como regiones de un buen potencial eólico. En el cantón Riobamba sector Lomas de Rasutambo, y en el cantón Colta sector Rumignokiana vía Cañí. Las velocidades y direcciones de viento fueron muestreados durante un período de dos años, 2015 y 2016. La velocidad media anual en Lomas de Rasutambo es de 11,89m/s, en el sector Rumignokiana de 11,81m/s; con más del 86,91% de horas de viento aprovechables en el año. La densidad baja del viento debido a la altura de estas regiones, se obtuvo un factor de forma (k) entre 2 y 3, con un factor de escala (c) alto permitiendo estimar el potencial disponible mediante el modelo de distribución de Weibull.

Palabras claves: Densidad de potencia; potencial eólico disponible; distribución de Weibull; energía eólica.

Abstract

In Ecuador, energy demand is met with hydroelectric generation, 80% 12% thermoelectric and 8% renewable energy. The Government of Ecuador has ratified its firm will for the conservation of the environment and a change in the energy matrix using renewable energy sources. Therefore, it is important to estimate the study of the renewable energy potential that the country has, which gave us the opportunity to carry out this study, which allowed us to estimate, using meteorological information, the speed, wind direction, and wind potential available in the Andean areas. located in the province of Chimborazo, and the Weibull probability distribution, the form factor (k) and scale factor (c), were determined in the five selected regions; two of them were classified as regions with good wind potential. In the Riobamba canton, the Lomas de Rasutambo sector, and in the

Características del viento y potencia eólica disponible en la región andina de la provincia de Chimborazo

Colta canton, the Rumignokiana sector, via Cañí. Wind speeds and directions were sampled over a period of two years, 2015 and 2016. The average annual speed in Lomas de Rasutambo is 11.89m/s, in the Rumignokiana sector of 11.81m/s; with more than 86.91% of usable wind hours in the year. The low wind density due to the height of these regions, a form factor (k) between 2 and 3 was obtained, with a high scale factor (c) allowing to estimate the potential available using the Weibull distribution model.

Keywords: Power density; available wind potential; Weibull distribution; wind power.

Resumo

No Equador, a demanda de energia é atendida com geração hidrelétrica, 80% 12% termoelétrica e 8% de energia renovável. O governo do Equador ratificou sua firme vontade de preservar o meio ambiente e uma mudança na matriz energética usando fontes de energia renováveis. Portanto, é importante estimar o estudo do potencial de energia renovável que o país possui, o que nos deu a oportunidade de realizar este estudo, o que nos permitiu estimar, utilizando informações meteorológicas, a velocidade, a direção do vento e o potencial eólico disponível nas áreas andinas. localizado na província de Chimborazo, e a distribuição de probabilidade Weibull, o fator de forma (k) e o fator de escala (c), foram determinados nas cinco regiões selecionadas; dois deles foram classificados como regiões com bom potencial eólico. No cantão de Riobamba, no setor Lomas de Rasutambo, e no cantão de Colta, no setor Rumignokiana, via Cañí. As velocidades e direções do vento foram amostradas durante um período de dois anos, 2015 e 2016. A velocidade média anual em Lomas de Rasutambo é de 11,89m/s, no setor de Rumignokiana de 11,81m/s; com mais de 86,91% das horas de vento utilizáveis no ano. A baixa densidade do vento devido à altura dessas regiões, foi obtido um fator de forma (k) entre 2 e 3, com um alto fator de escala (c) permitindo estimar o potencial disponível utilizando o modelo de distribuição Weibull.

Palavras-chave: Densidade de potência; potencial eólico disponível; Distribuição Weibull; energia eólica.

Características del viento y potencia eólica disponible en la región andina de la provincia de Chimborazo

Introducción

En la actualidad la demanda de energía eléctrica va creciendo debido al aumento de la población y de las industrias, por lo que es necesario la producción de mayor cantidad de energía eléctrica.

En el Ecuador una parte de la energía eléctrica es generada por centrales hidroeléctricas y otra por centrales térmicas las cuales producen CO₂ que contamina el ambiente en gran medida (Robalino Quito, 2015).

A pesar de que el Ecuador genera una pequeña parte de emisiones de gases causantes del cambio climático a la atmósfera, ha demostrado ante la comunidad internacional un verdadero compromiso por afrontar este desafío. De esta manera, en 1992 el Ecuador firmó la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC); en 1999, el Protocolo de Kioto; en 2016 el Acuerdo de París y, consecuentemente, participa de forma activa en procesos de negociación internacional sobre cambio climático y genera un marco regulatorio e institucional que le permite al país cumplir con los objetivos establecidos en la Convención (Ministerio del Ambiente (MAE). mayo 2107). Por lo que el Ecuador apuesta por el balance de la matriz energética mediante el impulso de varios proyectos para generar energía eléctrica alternativa, ya que por su posición geográfica las fuentes renovables en el país son abundantes (MEER, 2015).

El viento es un recurso natural prometedor en todas las regiones del país, teniendo información confiable de fuentes satelitales, mediante mapas eólicos (Energías renovables, 2015) y con estaciones meteorológicas en diferentes zonas para estimar su potencial eólico (CELEC 2015).

Este artículo presenta un análisis para poder estimar el potencial eólico de las zonas altas andinas ecuatoriales que servirá de base en los estudios para la instalación de parques eólicos, con este propósito se colocaron en diferentes cantones de la provincia de Chimborazo cinco estaciones meteorológicas automáticas (OMM, 1994) en el año 2014, y luego del análisis de la información eólica obtenida fueron seleccionados dos sitios, ubicados en las regiones de Lomas de Rasutambo-zona Pinguilí y Rumignokiana-vía Cañi.

La estimación de la potencia eólica disponible en estas regiones se la realizó en tres fases. En la primera fase (pre factibilidad) se determinó las características geográficas y eólicas de los lugares más óptimos para el estudio; En la segunda fase (factibilidad) se evaluó el aprovechamiento de la energía del viento, con la información obtenida durante 2 años (2015-2016) tanto de la velocidad, dirección del viento y de la densidad del aire, la misma que es baja en estas zonas por su altitud.

Características del viento y potencia eólica disponible en la región andina de la provincia de Chimborazo

Lo que ocasiona que se produzca una disminución en el rendimiento y en la producción de energía de las turbinas eólicas.

Metodología

Ubicación geográfica de emplazamiento en estudio

En base a un pre-monitoreo en diferentes periodos de año utilizando un anemómetro portátil, se seleccionaron los lugares de estudio considerando parámetros característicos del viento (velocidad y dirección), campos abiertos, sin edificios y colinas suavemente redondeadas preponderantes en la selección de los emplazamientos eólicos que permitan determinar técnica y económicamente, la posibilidad de implementar parques eólicos en estos lugares. En la Figura 1 se muestran la ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas instaladas en el mes octubre del 2014 en la provincia de Chimborazo-Ecuador.

Figura 1: Ubicación geográfica de los lugares seleccionados para la instalación de parques eólicos. Google Earth



Fuente: CEAA-ESPOCH

La Tabla 1, presenta las características geográficas y orográficas de los emplazamientos seleccionados, donde podemos observar sus coordenadas, altura sobre el nivel mar y la densidad de aire.

Características del viento y potencia eólica disponible en la región andina de la provincia de Chimborazo

Tabla 1. Características geográficas de los lugares seleccionados

ESTACIÓN METEOROLÓGICA	ALTURA (msnm)	LATITUD (grados)	LONGITUD (grados)
Lomas de Rasutambo Zona Pinanquil (el Arenal)	4302	1°32'0.43"	78°52'40.27" O
Rumignokiana Vía-Cañi	4328	1°43'53.29"	78°52'45.41" O

Fuente: CEAA-ESPOCH

Tratamiento y recolección de datos

El viento es un fenómeno natural aleatorio por lo que se requiere aplicar técnicas estadísticas para el análisis e interpretación de resultados y con ellas pronosticar el comportamiento del viento de cada emplazamiento seleccionado.

Los datos fueron muestreados en estaciones meteorológicas automáticas con anemómetros instalados a 10 metros de altura en períodos de 10 minutos durante dos años, se procesaron los valores de velocidad y dirección del viento calculando promedios de horas y anuales lo que representa el comportamiento del viento durante en este período muestreado, para realizar estas operaciones se hizo uso del software Microsoft Excel.

Distribución de Weibull

Se determinaron los parámetros de la distribución de Weibull c y k , realizando el ajuste de mínimos cuadrados, c es el factor de escala en m/s que determina la velocidad promedio del viento y k el parámetro de forma k que indica el grado de asimetría o sesgo; las 8760 velocidades de viento registradas por año se organizaron en intervalos constantes con una variación de 1m/s.

La función de probabilidad acumulada de la distribución de Weibull está dada por:

Características del viento y potencia eólica disponible en la región andina de la provincia de Chimborazo

$$F(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (1)$$

Tomando en cuenta que la ecuación (1) es discreta, se requiere un buen ajuste para el cálculo de los parámetros c y k de la función de distribución de Weibull. Se linealizó la ecuación (1) aplicando dos veces logaritmo natural y se obtuvo la ecuación (2).

$$\ln[-\ln(1 - F(v))] = k \ln v - k \ln c \quad (2)$$

Donde:

$$y = \ln[-\ln(1 - F)]$$

$$x = \ln v$$

Lo que corresponde a la ecuación de una recta $y = ax + b$, y se procede al ajuste por mínimos cuadrados para determinar k y c . Donde $k = a$ y $c = e^{-\frac{b}{a}}$. En la mayoría de las condiciones de viento los valores de k están entre 1.5 y 3, (Akpinar y Akpinar, 2004).

Una vez calculado los parámetros de Weibull, se calculó la probabilidad de la velocidad media del viento, luego se multiplicaron cada una de las velocidades del viento registradas por su respectiva probabilidad de ocurrencia aplicando la ecuación (3).

$$p(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (3)$$

Donde:

v es la velocidad del viento

k es el factor de forma.

c es el factor de escala (m/s).

Con la base de datos obtenidos se realizó la estimación del potencial eólico disponible por unidad de área en el emplazamiento, aplicando la ecuación (4). Lo cual nos permitió seleccionar si los lugares de estudio resultan rentables en la explotación de energía eléctrica.

Características del viento y potencia eólica disponible en la región andina de la provincia de Chimborazo

$$P(v) = \frac{1}{2} \rho v^3 \quad (4)$$

Donde:

ρ es la densidad del aire, kg/m^3

v es la velocidad media del viento, m/s

La densidad del aire para cada sitio se obtuvo mediante la ecuación (5):

$$\rho = (0.348444p - h_r(0.0252t - 0.020582)) / (273.15 + t) \quad (5)$$

Donde:

p es la presión barométrica en hPa.

t es temperatura del aire en $^{\circ}\text{C}$.

h_r es humedad relativa del aire en %.

Es necesario validar el modelo de predicción de la distribución de Weibull para garantizar que el modelo que se está aplicando es efectivo, por lo que se evaluó con el error cuadrático medio RMSE (Root Mean Square Error) que aplica la ecuación (6) y con el coeficiente de correlación R^2 , ecuación (7).

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - z_i)^2 - \sum_{i=1}^N (y_i - x_j)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - z_j)^2} \quad (7)$$

Donde:

y_i es el dato actual.

x_j dato pronosticado aplicando la distribución de Weibull.

z_i es el dato promedio actual.

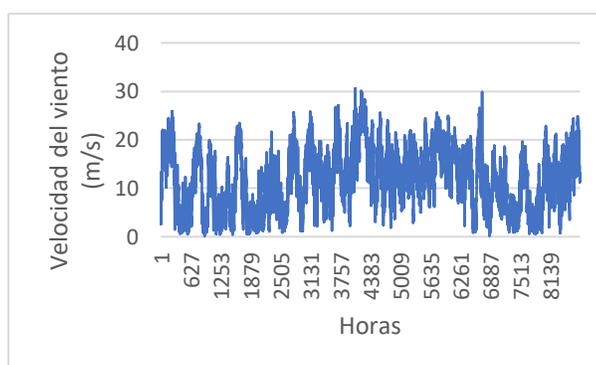
N es el número de observaciones.

Características del viento y potencia eólica disponible en la región andina de la provincia de Chimborazo

Resultados

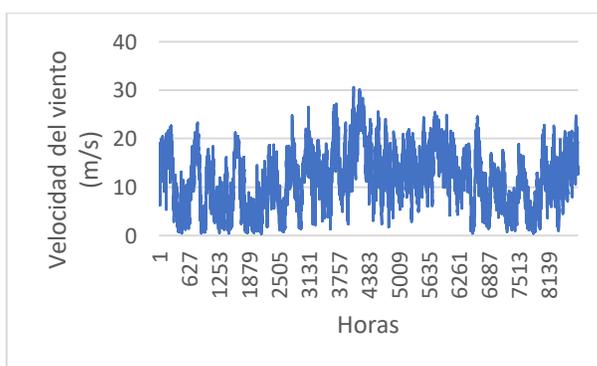
En los gráficos 1,2,3 y 4 se muestra el registro de datos de la velocidad de viento durante el periodo 2015 y 2016 un total de 8760 horas en cada año, dando como resultado un promedio anual de la velocidad del viento en la Estación Meteorológica Chimborazo de 11,89m/s para el año 2015, para el año 2016 es de 10.5m/s, en la Estación Meteorológica Cañi de 11,81m/s en el año 2015, para el año 2016 de 9.86m/s.

Gráfico 1: Registro de la velocidad de viento de la Estación meteorológica Chimborazo en el año 2015



Fuente: CEAA-ESPOCH

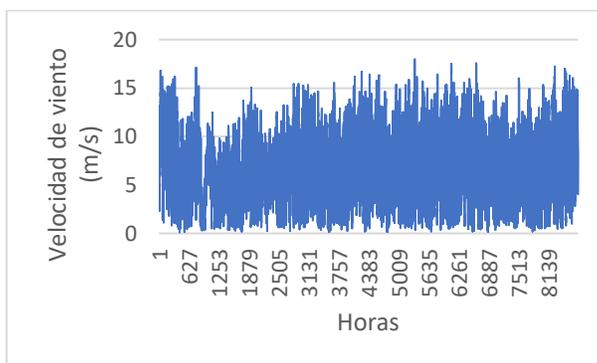
Gráfico 2: Registro de la velocidad de viento de la Estación meteorológica Chimborazo en el año 2016



Fuente: CEAA-ESPOCH

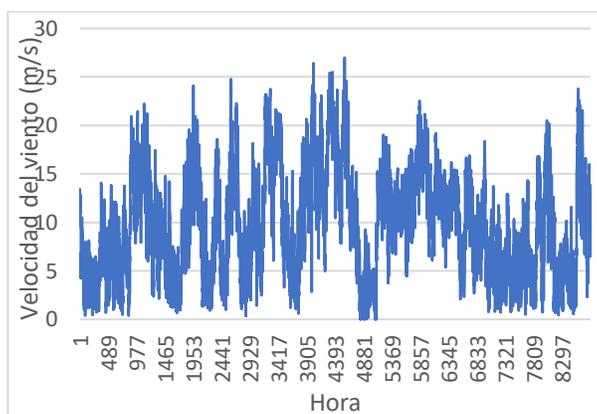
Características del viento y potencia eólica disponible en la región andina de la provincia de Chimborazo

Gráfico 3: Registro de la velocidad de viento de la Estación meteorológica Cañi en el año 2015



Fuente: CEEA-ESPOCH

Gráfico 4: Registro de la velocidad de viento de la Estación meteorológica Cañi en el año 2015

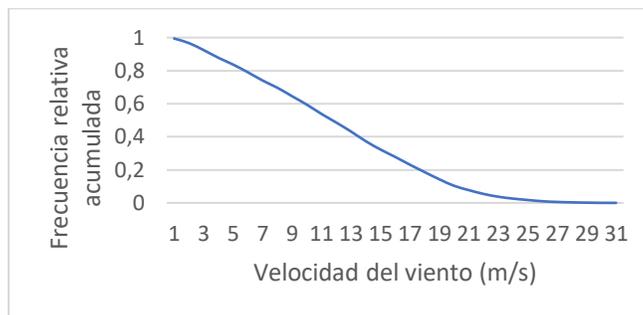


Fuente: CEEA-ESPOCH

Los gráficos 5,6,7 y 8 muestran la curva de duración de viento de las 8760 horas del año, podemos observar que las velocidades de viento mayores a 3m/s y menores a 25m/s son aprovechables para generar energía, en la Estación Meteorológica Chimborazo se tiene un 94,92% de horas aprovechables y en la Estación Meteorológica Cañi el 95,25% e horas aprovechables.

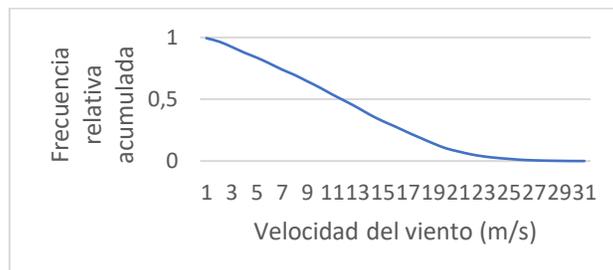
Características del viento y potencia eólica disponible en la región andina de la provincia de Chimborazo

Gráfico 5: Curva de duración del viento. Estación Meteorológica Chimborazo del año 2015



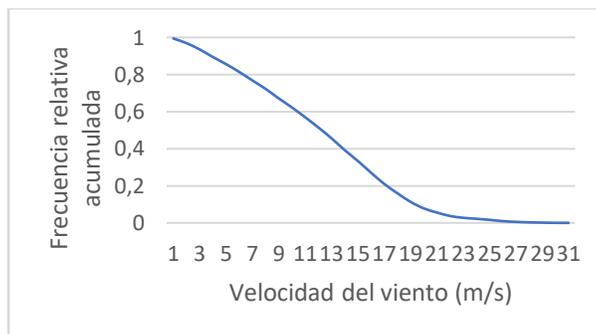
Fuente: CEAA-ESPOCH

Gráfico 6: Curva de duración del viento. Estación Meteorológica Chimborazo del año 2016



Fuente: CEAA-ESPOCH

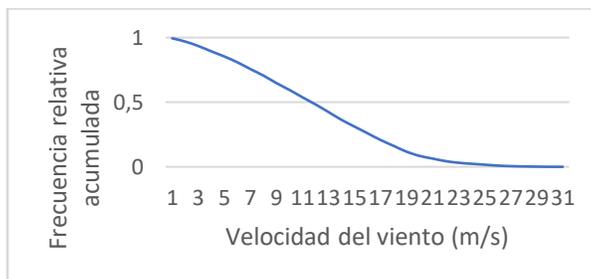
Gráfico 7: Curva de duración del viento Estación Meteorológica Cañi del año 2016



Fuente: CEAA-ESPOCH

Características del viento y potencia eólica disponible en la región andina de la provincia de Chimborazo

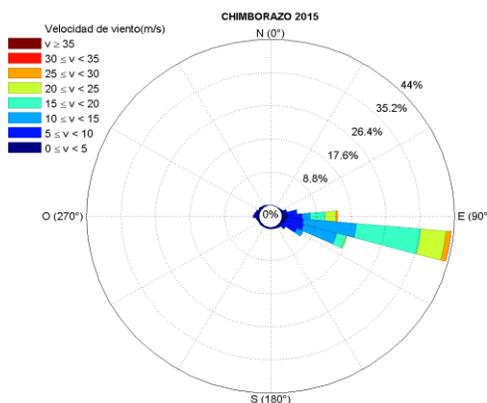
Gráfico 8: Curva de duración del viento Estación Meteorológica Cañi del año 2016



Fuente: CEAA-ESPOCH

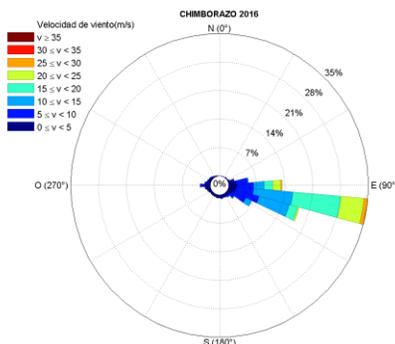
La dirección predominante del viento se muestra en los gráficos 9, 10, 11 y 12, para cada estación y para cada año, es estas figuras se pueden apreciar el rumbo preponderante del viento para un determinado intervalo de la velocidad del viento.

Gráfico 9: Gráfica de la rosa de los vientos. Estación Meteorológica Chimborazo del año 2015



Fuente: CEAA-ESPOCH

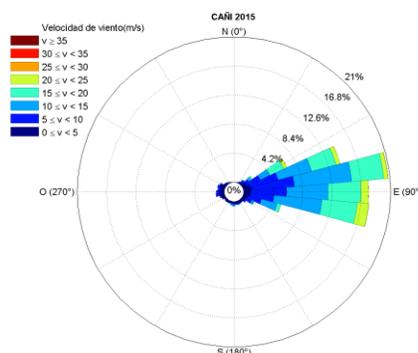
Gráfico 10: Gráfica de la rosa de los vientos. Estación Meteorológica Chimborazo del año 2016



Fuente: CEAA-ESPOCH

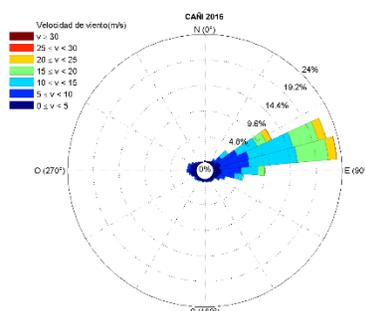
Características del viento y potencia eólica disponible en la región andina de la provincia de Chimborazo

Gráfico 11: Gráfica de la rosa de los vientos en la Estación Meteorológica Cañi del año 2015



Fuente: CEAA-ESPOCH

Gráfico 12: Gráfica de la rosa de los vientos. Estación Meteorológica Cañi del año 2016



Fuente: CEAA-ESPOCH

Aplicando la metodología descrita anteriormente se determina los parámetros de Weibull k y c , para cada emplazamiento correspondiente a cada mes, las gráficas de función de densidad de probabilidad dependen del factor de forma K y factor de escala c , R^2 y el RMSE que muestran las tablas 2 y 3. Estación Meteorológica Chimborazo el R^2 está en el rango de 0,9916 a 0,9917 el RMSE varía de 1.7303 a 3.0322. Estación Meteorológica Cañi el R^2 está dentro del rango 0,9993 a 0,9977, además el RMSE varía de 1.6589 a 3.643

Características del viento y potencia eólica disponible en la región andina de la provincia de Chimborazo

Tabla 2: Parámetros y evaluación de modelo de distribución de Weibull en la Estación Meteorológica Chimborazo

Año	k	c	R ²	RMSE
2015	2.19	13.3	0.9916	1.7303
2016	2.24	11.76	0.9917	3.0322

Fuente: CEEA-ESPOCH

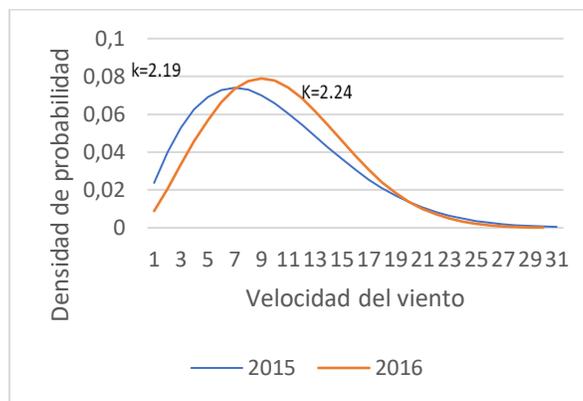
Tabla 3: Parámetros y evaluación de modelo de distribución de Weibull en Estación Meteorológica Cañi

Año	k	c	R ²	RMSE
2015	2.29	13.22	0.9993	1.6589
2016	2.4	10.98	0.9977	3.6439

Fuente: CEEA-ESPOCH

En los gráficos 13 y 14 se muestra la densidad de probabilidad en función de la velocidad de viento

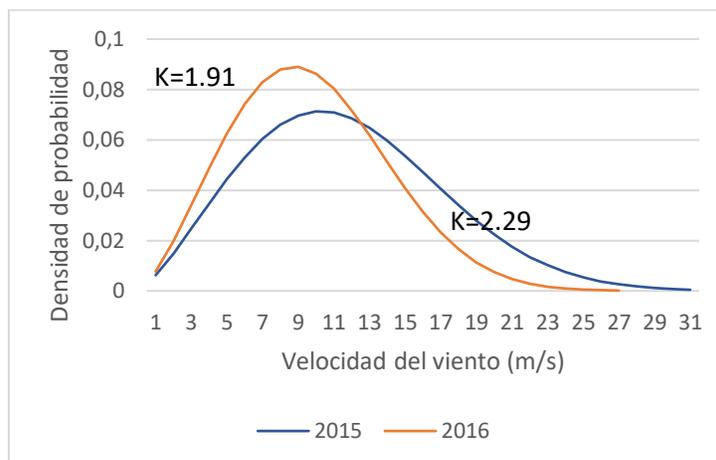
Gráfico 13: Función de la densidad de probabilidad. Estación Meteorológica Chimborazo en los años 2015 y 2016



Fuente: CEEA-ESPOCH

Características del viento y potencia eólica disponible en la región andina de la provincia de Chimborazo

Figura 14: Función de la densidad de probabilidad en la Estación Meteorológica Cañi en los años 2015 y 2016



Fuente: CEAA-ESPOCH

Tabla 4: Velocidad de viento y densidad de potencia

Estación	Velocidad de viento (m/s)	Densidad de potencia (w/m^2)	Potencial de recurso
Chimborazo	11,89	914,08	Magnífico
Cañi	10,84	809,72	Magnífico

Fuente: CEAA-ESPOCH

La densidad calculada de 2 estaciones meteorológicas en estudiadas se muestra en la tabla 2.

Conclusiones

Se obtuvo resultados de k (factor de forma) entre 2 y 2.5, con un c (factor de escala) alto lo que indica que se ajusta eficientemente al modelo de distribución de Weibull para la estimación de potencial disponible. Por consiguiente, el RMSE es menor.

En la estación meteorológica Chimborazo la velocidad promedio de viento es 11.89m/s, se obtuvo una densidad de potencia de 914 w/m^2 la misma que con Optimizing Site Selection el potencial de recurso es magnífico (*), también la estación Cañi con velocidad promedio de viento de 10.84m/s, con densidad de potencia el potencial del recurso es magnífico, además el porcentaje de

Características del viento y potencia eólica disponible en la región andina de la provincia de Chimborazo

aprovechamiento de horas de generación de energía es 94,92% y 95,25% respectivamente de un total de 17520 horas.

Recomendaciones

Se recomienda realizar los cálculos de los parámetros de Weibull con diferentes métodos para evidenciar cual es el más confiable dada las condiciones de altura que se están realizando los estudios.

Dado el alto potencial eólico de los emplazamientos en estudio es recomendable realizar las mediciones a la altura de los posibles aerogeneradores a implementarse para minimizar errores de estimación en la generación de energía eléctrica.

Referencias

1. CELEC. (2015). Identificados sitios con potencial eólico. Recuperado 4 de agosto de 2016, a partir de <https://www.celec.gob.ec/termopichincha/index.php/noticias/274-identificados-sitios-con-potencial-eolico>
2. Energías renovables. (2015). MEER presentó el primer Atlas Eólico del Ecuador. Recuperado 4 de agosto de 2016, a partir de <http://expertosenred.olade.org/energiasrenovables/meer-presento-el-primer-atlas-eolico-del-ecuador/>
3. MEER. (2015). Presentación DNER (Cámara industrias Ecuador-Alemania)-1 cortada [solo lectura] - Luis_Manzano_MEER.pdf. Recuperado 4 de agosto de 2016, a partir de http://ecuador.ahk.de/fileadmin/ahk_ecuador/Uploads-Webseite/Dienstleistungen/Dokumente/Projekte/2015/Luis_Manzano_MEER.pdf
4. Miguel Villarrubia. (2004). Energía Eólica.
5. Nieves Álvarez. (2009). PROYECTO DE DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EXPLOTACIÓN DE UN PARQUE EÓLICO. UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID. Recuperado a partir de http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/8247/PFC_Nieves_Alvarez_Marivela.pdf?sequence=1

Características del viento y potencia eólica disponible en la región andina de la provincia de
Chimborazo

6. OMM. (1994). Guía de Prácticas Hidrológicas OMM No 168 - WMOSPA_v5.pdf. Recuperado 4 de agosto de 2016, a partir de http://hydrologie.org/BIB/OMM/WMOSPA_v5.pdf
7. Robalino Quito. (2015). Generación de energía eléctrica - Situación del sistema eléctrico Ecuador. Universidad Técnica Particular de Loja. Recuperado a partir de <http://es.slideshare.net/ric0608/generacion-de-energa-elctrica-situacin-del-sistema-elctrico-ecuatoriano>
8. Twenergy. (2014, abril 30). ¿Cómo se elige la mejor zona para instalar molinos de viento? Recuperado 4 de agosto de 2016, a partir de <http://twenergy.com/a/como-se-elige-la-mejor-zona-para-instalar-molinos-de-viento-1469>
9. IJRSET. (2016, mayo 12). Investigation of wind Chsracteristics for Bergama in terms of wind energy. Recuperado 23 de junio a partir de http://www.ecreee.org/sites/default/files/event-att/wind_project_site_optimization.pdf
10. The wind energy between Mexico and Spain. (2018, julio 23). Recuperado 23 de junio a partir de [file:///C:/Users/Lorenzo/Downloads/Dialnet-ElSectorEolicoEnMexicoYEspana-7140035%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/Lorenzo/Downloads/Dialnet-ElSectorEolicoEnMexicoYEspana-7140035%20(1).pdf)
11. REVISTA DE ESTUDIOS ECONÓMICOS Y EMPRESARIALES. (2014). EL DESARROLLO EÓLICO EN BRASIL, ECUADOR Y ESPAÑA: REFLEXIONES A PARTIR DEL MARCO NORMATIVO. Recuperado 23 de junio a partir de <https://core.ac.uk/reader/72046046>
12. CIDC. (2017, noviembre). Revista científica. Francisco Eraso, Édison Escobar, Diego Paz. Metodología para la determinación de características del viento y evaluación del potencial de energía eólica en Túquerres – Nariño. Recuperado 23 de junio a partir de <http://www.scielo.org.co/pdf/cient/n31/2344-8350-cient-31-00019.pdf>