

## CARACTERÍSTICAS DEL VIENTO Y DEL POTENCIAL EÓLICO DEL ALTIPLANO CENTRAL

### WIND CHARACTERISTICS AND WIND POWER POTENTIAL IN BOLIVIAN'S ALTIPLANO REGION

JESUS ENCINAS, RENÉ TORREZ, FLAVIO GHEZZI, & EDUARDO R. PALENQUE

Instituto de Investigaciones Físicas, Carrera de Física

Universidad Mayor de San Andrés

c. 27 Cota-Cota, Campus Universitario, Casilla de Correos 8635

La Paz - Bolivia

(Recibido 9 de septiembre de 2015; aceptado 22 de diciembre de 2015)

#### RESUMEN

Se describen las principales características de la atmósfera sobre el Altiplano Central (3800 *msnm*) para poder estimar el potencial eólico de la región. Se recolectó simultáneamente datos de la dirección e intensidad del viento, temperatura y humedad relativa del aire, y presión atmosférica; en intervalos de cinco minutos, durante el período septiembre de 2010 a enero de 2012. Los sensores estaban a 3 metros sobre el nivel del suelo. Se analizan los promedios de la energía eólica en periodos estacionales, mensuales y diarios. También se consideran parámetros como variaciones de la densidad del aire e intensidad de la turbulencia. Los resultados obtenidos muestran una correlación interesante entre la disponibilidad y la demanda local de energía.

Código(s) PACS: 92.70.Cp, 47.85.Gj, 07.05.Hd

*Descriptor:* Física de la atmósfera — Dinámica de fluidos — Adquisición de datos.

#### ABSTRACT

This work sets out to study the atmospheric features of Bolivia's Altiplano region at 3800 *masl*, as a means to estimate the region's wind power potential. We simultaneously collected data: wind speed and direction as well as temperature, air pressure and humidity, at five-minute intervals at 3 meters above ground level during the period September 2010 to January 2012. Density and turbulence intensity variations were also considered. We analyzed average wind power levels for seasonal, monthly and daily time periods. The obtained results indicate an interesting coincidence between energy demand and supply.

*Subject headings:* Atmosphere physics — Fluid dynamics — Data acquisition.

#### 1. INTRODUCCIÓN

La política energética boliviana incluye una componente de energía eólica para cubrir las demandas actuales y futuras, en especial en las áreas rurales, donde la distribución de energía eléctrica es difícil y costosa. La falta de datos validados sobre los parámetros atmosféricos, y por consiguiente de los modelos de vientos, en especial a nivel de superficie, significan que la producción de energía eólica recién está comenzando. En este trabajo se presentan resultados sobre datos recolectados en la estación meteorológica de Patacamaya, en el altiplano central, (parte del IIF). Se eligió esa localidad por ser representativa de las características topográficas del altiplano, y por su posición económica estratégica. Mientras Patacamaya tiene principalmente actividades agropecuarias, es también el centro de abastecimiento para el comercio entre Bolivia y el Océano Pacífico. Además la zona presenta un nivel de contaminación muy bajo, por lo que se convierte en un sitio ideal para realizar estudios que

pudiesen tener influencia en el mercado energético.

#### 2. CARACTERÍSTICAS Y MEDICIONES LOCALES

Se instaló una estación meteorológica autónoma (Fischer Barometer G-bH) en la localidad de Patacamaya ( $17^{\circ}15'39''S, 67^{\circ}56'53''O, 3798$  *msnm*) que mide presión atmosférica, temperatura y humedad del aire, e intensidad y dirección del viento. Los sensores están colocados a tres metros sobre el nivel del suelo. Patacamaya está en el altiplano central, al sur del Departamento de La Paz, y es un área representativa del altiplano boliviano por sus características geográficas, que incluyen la altura geográfica, una superficie plana sin vegetación alta y la lejanía de las montañas de las Cordillera de los Andes. Los valores típicos que se midieron en la región incluyen los siguientes: en los meses de verano, la radiación solar alcanza valores máximos de  $1594$   $W/m^2$  entre las 12 : 00 y 13 : 00 horas. El máximo de temperatura de  $25.2^{\circ}C$  se da entre las 13 : 00 y 14 : 00 horas en primavera, mientras que la temperatura mínima, de  $-11.7^{\circ}C$  se da entre las 06 : 00 y 07 : 00 en invierno.

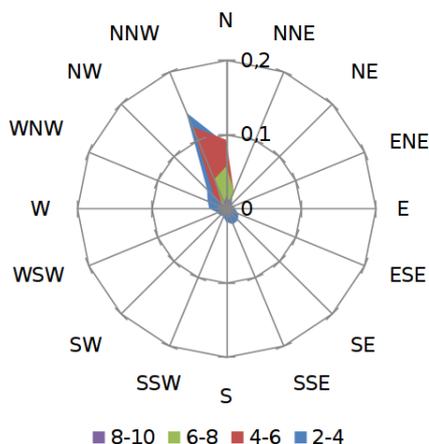


FIG. 1.— Rosa de vientos de la región de Patacamaya.

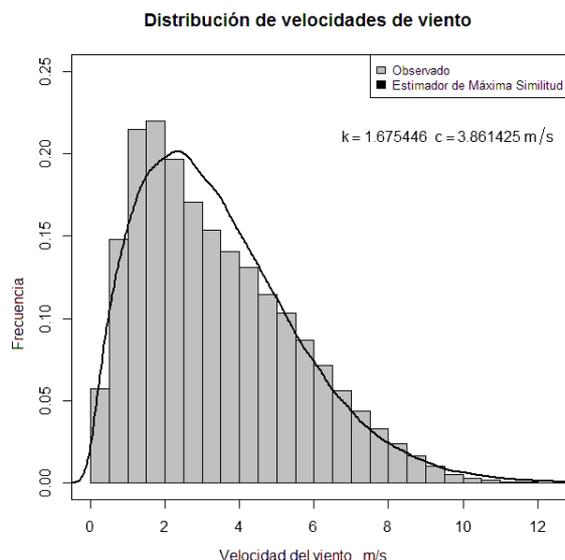


FIG. 2.— Función de distribución de probabilidades de la velocidad del viento en la región de Patacamaya.

La humedad relativa del aire tiene un valor medio de 50.16% en los días sin lluvias. Este estudio sobre las características del viento y la estimación de la energía eólica en el área de Patacamaya se basa en los datos de: dirección y velocidad del viento; presión atmosférica; y temperatura y humedad relativa del aire; los cuales se tomaron a intervalos de cinco minutos entre el 21 de septiembre de 2010 hasta el 20 de enero de 2012. A fin de tener una mejor comprensión del potencial eólico, se dividió la base de datos de la siguiente forma:

- **Primavera 2010:** del 21-09-2010 al 20-12-2010
- **Verano 2011:** del 21-12-2010 al 20-03-2011
- **Otoño 2011:** del 21-03-2011 al 20-06-2011
- **Invierno 2011:** del 21-06-2011 al 20-09-2011
- **Primavera 2011:** del 21-09-2011 al 20-12-2011
- **Verano 2011:** del 21-09-2011 al 20-12-2011

Para poder determinar el potencial eólico de una área en particular es necesario conocer las características del viento en la misma. Para ello, estudiamos el patrón de comportamiento (diario y estacional) de los vientos, la dirección predominante de los mismos, los niveles de turbulencia; y la influencia de la densidad y humedad atmosférica sobre el comportamiento de los vientos.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Dirección del viento

Es necesaria para determinar la orientación de los álabes y las turbinas para optimizar la producción de energía eólica. Se construyó una rosa de vientos a partir de los datos de las medidas de la dirección del viento, expresada en grados respecto de la dirección norte. En la Figura 1 se muestra en carácter unidireccional del viento, lo que indica que éste circula dentro del mismo rango de direcciones, en forma independiente de la estación, el mes, o el día en que se haya medido.

El rango obtenido de las medidas está entre los 337.5° a 360 en relación al norte (ó desde 0° a 22.5° si se mide contra las manecillas del reloj) Existen fluctuaciones fuera de este rango, pero que no son frecuentes.

#### 3.2. Distribución de la velocidad de vientos

Para poder construir la función de distribución de probabilidades de la velocidad del viento mostrada en la Figura 2; se utilizó un rango de intervalos de 0.5 m/s y una distribución de Weibull bi-paramétrica (Caretto 2014). El ajuste fue realizado con el Método de Máxima Verosimilitud (Maximum Likelihood Method MLM) (Caretto 2014; Shamshad et al. 2014) para estimar el factor de forma (k) y el factor de escala (c) de la ecuación 1:

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

Después del proceso de ajuste, se obtuvo la siguiente función de distribución (ec.2) donde v es la velocidad del viento:

$$f(v) = 0.174v^{0.674} e^{-\left(\frac{v}{3.861}\right)^{1.675}} \quad (2)$$

Una vez que se conocen los parámetros de la distribución de probabilidades, se pueden calcular la curtosis (3.1087), la asimetría (0.7518), la velocidad más probable ( $v_{mp} = 2.245 \text{ m/s}$ ) y velocidad promedio ( $v_{ave} = 3.448 \text{ m/s}$ )

#### 3.3. Intensidad del viento

Para poder determinar el potencial eólico es necesario conocer la intensidad del viento en los diferentes periodos. En este trabajo se utilizaron promedios diarios, mensuales y estacionales para estimar el potencial eólico local. Como se muestra en la Figura 3a, sobre datos de más de un año, la velocidad media del viento alcanza máximos entre 4 y 4.3 m/s, en los meses de noviembre y diciembre; durante

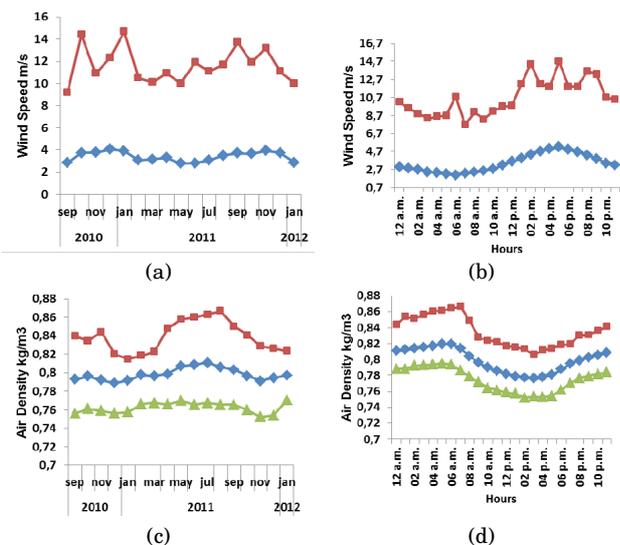


FIG. 3.— Parámetros atmosféricos característicos para Patacamaya, a 3 metros sobre el nivel del suelo. Valores diarios y mensuales de la velocidad del viento y la densidad del aire: máximas cuadrados rojos, medias rombos azules, mínimas triángulos verdes.

el periodo de transición de primavera a verano. Para comparación, al inicio del invierno, en los meses de mayo y junio, los mínimos se dan entre 2.5 y 3.0 m/s. En la Figura 3b se observa que, durante un ciclo diario, el máximo de la velocidad media, con valores entre 5.0 y 5.2 m/s se da entre las 16:00 y 17:00 horas, cercano al ocaso. También se observa que la velocidad mínima media entre 2.3 y 2-0 m/s se produce entre las 05:00 y 06:00, al alba.

#### 3.4. Densidad del aire

La densidad del aire es un factor clave para poder estimar el potencial eólico, por lo que fue incorporada al análisis, considerando valores diarios y mensuales. La densidad local del aire se calculó utilizando el modelo CIPM 2007 (Picard et al. 2008; Farkas 2014) para asegurar la precisión y un mejor estudio de sus variaciones. Se encontró que la densidad del aire se incrementa en los periodos de transición de primavera a verano y de otoño a invierno; pero disminuye al pasar de invierno a primavera, como se puede ver en la Figura 3c. El análisis de los datos diarios demuestra que la densidad llega a su máximo valor (0.820 kg/m<sup>3</sup>) entre las 05:00 y 06:00 horas, cuando la velocidad del viento llega a valores de 2.0 m/s. El valor mínimo diario (0.778 kg/m<sup>3</sup>) ocurre entre las 14:00 y 15:00 horas, cuando la velocidad del viento alcanza el valor máximo de 5.0 m/s; tal como se aprecia en las Figuras 3d y 3b.

#### 3.5. Humedad del aire

A pesar que la humedad del aire no está en forma explícita en el cálculo del potencial eólico, es importante considerar su influencia sobre la velocidad del viento y la densidad del aire. Comparando la densidad del aire y la humedad relativa, como se muestran en las Figuras 3c y 4a, encontramos una relación inversa entre estas dos variables so-

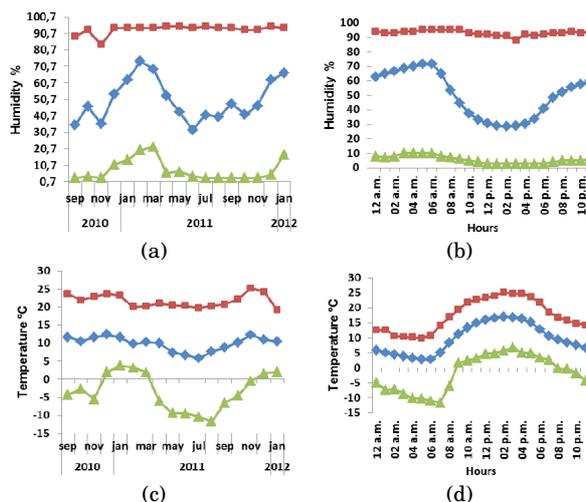


FIG. 4.— Valores diarios y mensuales de humedad y temperatura: máxima cuadrados rojos, medias diamantes azules, mínimas triángulos verdes

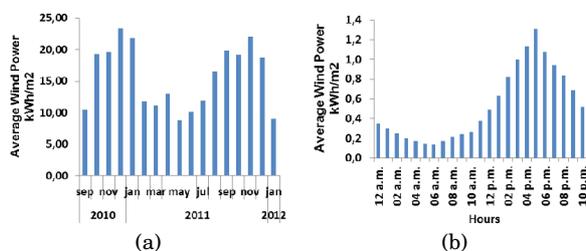


FIG. 5.— Potencia eólica en la región de Patacamaya a) promedio mensual b) promedio diario

bre periodos mensuales, y también se observa que la humedad del aire incrementa durante los meses de primavera, verano e invierno, pero disminuye en otoño. Se encuentra que los valores diarios de la humedad alcanzan máximos de 71.5% entre las 05 : 00 y 06 : 00 horas; mientras el mínimo de 29% se alcanza entre las 14 : 00 y 15 : 00 horas. Analizando las figuras 3d y 4b se encuentra que durante los periodos diarios, existe una relación directa entre la densidad del aire y humedad relativa.

#### 3.6. Temperatura

Las variaciones de las temperaturas son más significativas que las variaciones de la densidad del aire o las de humedad relativa. Esas variaciones nos ayudan a describir y entender mejor las fluctuaciones locales de la velocidad del viento. En las figuras 4c y 5a se observa que a inicios de primavera y hasta el final del verano, se tienen los valores más altos de potencial eólico, mientras que en los meses de otoño e invierno, se tienen los valores más bajos, en concordancia con los incrementos de temperatura. Las mismas relaciones se encuentran en una escala diaria. Se destaca que durante los periodos mensuales, los valores de temperatura varían en un rango desde  $-14^{\circ}C$  hasta  $20^{\circ}C$ .

#### 3.7. Intensidad de Turbulencia

El indicador más común para la turbulencia local es la desviación estándar de la velocidad del viento.

TABLA 1  
INTENSIDAD DE TURBULENCIA A 3 M SOBRE EL NIVEL DE SUELO

2010		2011		2012	
Mes	$I_t$	Mes	$I_t$	Mes	$I_t$
Sep	0.71	Ene	0.59	Ene	0.60
Oct	0.59	Feb	0.64		
Nov	0.59	Mar	0.57		
Dic	0.57	Abr	0.58		
		May	0.63		
		Jun	0.66		
		Jul	0.63		
		Ago	0.61		
		Sep	0.61		
		Oct	0.63		
		Nov	0.57		
		Dic	0.58		

Al normalizar este valor en relación al valor medio, se obtiene la intensidad de la turbulencia, como se ve en la ecuación 3.

$$I_t = \frac{\sigma}{\langle v \rangle} \quad (3)$$

Este valor nos permite evaluar el nivel de turbulencia local, y como indicador de niveles bajos, con valores menores a 0.10, niveles moderados de 0.25 y valores altos a mayores que 0.25. La Tabla 1 muestra las intensidades estimadas para la intensidad de la turbulencia para cada mes, mostrando que todos los valores son mayores a 0.5, con una media de 0.62 para el periodo de estudio. Como no existen obstáculos naturales para la altura del anemómetro, la turbulencia está producida por fricción del viento contra el suelo.

### 3.8. Potencial Eólico:

Para estimar el potencial eólico para periodos diarios, mensuales y estacionales, se utilizó la ecuación 4, que considera valores discretos de la velocidad del viento y la densidad del aire.

$$\frac{P}{A} = \frac{C_P}{N} \sum_i^N \frac{1}{2} \rho_i v_i^3 \quad (4)$$

donde  $P(W)$  es la potencia,  $\rho(kg/m^3)$  es la densidad del aire, que no es constante;  $v(m/s)$  es la velocidad horizontal del viento,  $A (m^2)$  es la sección transversal, y  $C_P$  es el coeficiente máximo de potencia (límite de Betz) del aero-generador, cuyo valor es 0.5927 (16/27) (Torrez et al. 2009). La Tabla 2 muestra las variaciones estacionales de la potencia eólica y la energía disponible. En la Tabla 2 se observa que la primavera es el periodo de mayor potencia eólica. En la figura 4 a se observa que se alcanzaron los

valores máximos de  $23.32 kWh/m^2$  y  $22.03 kWh/m^2$  respectivamente en los meses de diciembre de 2010 y noviembre de 2011; mientras que los mínimos de  $8.87 kWh/m^2$  y  $10.12 kWh/m^2$  a los que se llegan en los meses de mayo y junio. Estos resultados concuerdan con el comportamiento estacional descrito en la Tabla 2.

TABLA 2  
POTENCIA EÓLICA ESTACIONAL EN LA REGIÓN DE PATACAMAYA DURANTE EL PERIODO 21/09/2010 A 20/01/2012.

Temporada	P [W/m <sup>2</sup> ]	Tiempo [horas]	Energía [KWh/m <sup>2</sup> ]
Primavera 2010	26.73	1939.41	51.85
Verano 2010	21.21	1789.08	37.96
Otoño 2011	13.88	2020.08	28.04
Invierno 2011	21.48	2057.41	44.2
Año Completo	20.82	7805.98	162.52
Primavera 2011	29.44	2180.41	64.2
Verano 2012	13.44	679.44	9.11
Periodo Completo de Estudio	22.06	10665.83	235.36

### 3.9. Potencia Eólica

En cuanto a la potencia Eólica a escalas diarias en la figura 5b se encuentra que entre las 16 : 00 y 17 : 00 horas, se alcanzan respectivamente valores máximos de  $1.13 kWh/m^2$  y  $1.30 kWh/m^2$ ; mientras que el valor mínimo de  $0.14 kWh/m^2$  se alcanza entre las 05 : 00 y 06 : 00. Estos valores concuerdan con el comportamiento medio diario para la velocidad del viento y la densidad del aire.

## 4. CONCLUSIONES

En este estudio se describen las principales características atmosféricas del altiplano boliviano. Nuestro análisis indica que los valores del potencial eólico son suficientemente altos como para permitir el aprovechamiento del viento como una fuente alternativa (o complementaria) de energía para cubrir la demanda básica de los habitantes del altiplano boliviano (Geerts et al. 2006; García et al. 2007). Utilizando un análisis estadístico estimamos que el potencial eólico en el altiplano central tiene vientos básicamente unidireccionales, con una curva de distribución de curtosis ( $k$ ) 3.1087 y un valor medio de  $3.448 m/s$ ; que nos llevan a concluir que sí es posible utilizarlos como fuente de energía. Además, ocurre que los valores máximos diarios ocurren al atardecer, justo al tiempo del pico de mayor demanda en la red eléctrica. Nuestro estudio es único en el sentido que se basa sobre datos recolectados en campo, a intervalos específicos y cortos, por lo que podría ser importante para verificar futuros modelos y simulaciones. Confiamos que este será un punto de partida para el desarrollo y diversificación de la matriz energética del altiplano, en especial en el altiplano central.

## REFERENCIAS

- Caretto L. (2014), <http://www.csun.edu/~lcaretto/me483/09-windPDF.pdf>  
 Farkas Z. (2014), <http://arxiv.org/pdf/1103.2198v1.pdf>  
 García M., Raes D., Jacobsen S. E. & Michel T. (2007), *Journal of Arid Environments* **71**, 109.  
 Geerts S., Raes D., García M., Del Castillo C. & Buytaert W. (2006), *Agricultural and Forest Meteorology* **139**, 399.

- Shamshad A., Wam Hussim W. M. A., Bawardi, M. A., & Mohd Samusi, S. A. (2014), [http://eprints.usm.my/10959/1/Analysis\\_of\\_Wind\\_Speed\\_Variations\\_and\\_Estimation\\_of\\_Weibull\\_Parameters\\_for\\_Wind\\_Power\\_\(PPK\\_Awam\).pdf](http://eprints.usm.my/10959/1/Analysis_of_Wind_Speed_Variations_and_Estimation_of_Weibull_Parameters_for_Wind_Power_(PPK_Awam).pdf)
- Picard A., Davis R. S., Gläser M. & Fujii K. (2008), *Metrología* **48**, 149.
- Torrez R., Ghezzi F. & Palenque E. (2009), *Revista Boliviana de Física* **15**, 8.