

Análisis estadístico del índice de claridad atmosférica para la ciudad de Bogotá

Statistical Analysis Of Clearness Index For Bogotá

Análise Estatística Clarity Index atmosférica para a cidade de Bogotá

Diego Julián Rodríguez Patarroyo¹

Johann. Hernández²

Ovidio Simbaqueva³

Fecha de recepción: junio 2014

Fecha de aceptación: noviembre 2014

Para citar este artículo: Rodríguez, D., Hernández, J. y Simbaqueva, O. (2015). Análisis estadístico del índice de claridad atmosférica para la ciudad de Bogotá. *Revista Científica*, 21, 65-70. Doi: [10.14483/udistrital.jour.RC.2015.21.a6](https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.RC.2015.21.a6)

Resumen

La Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital ha desarrollado en los últimos años investigaciones en el área de los sistemas eléctricos sustentados en energías limpias, dentro de los cuales encontramos las microrredes eléctricas. Una de las fuentes más importantes de energía para estos sistemas es la energía solar. Por medio de un radiómetro Kipp and Zonen ubicado en la terraza de la sede de la Universidad Distrital de la calle 40 (latitud 4° 37' 41''N y longitud 76° 3' 57'' W), en la Ciudad de Bogotá, se midió la radiación global; con esta información se determinó el índice de claridad atmosférica. Para caracterizar el comportamiento de la radiación diaria se determinó la curtosis y la simetría que permite cuantificar la variabilidad del recurso energético. Se observó una radiación promedio para este punto geográfico de 14 MJ/m², acompañada de un índice de claridad atmosférica de 0.33(1).

Palabras Clave: radiación solar, índice de claridad atmosférica, radiación global, Bogotá.

Abstract

The Faculty of Engineering of the University District has developed in recent years research in the area of electrical systems based on clean energy, among which are electric microgrids. One of the most important energy sources for these systems is solar energy. Through a Kipp and Zonen radiometer located on the roof of the headquarters of 40th Street in the City of Bogotá global radiation was measured, with this information the rate of atmospheric clarity is determined. To characterize the behavior of daily radiation kurtosis and symmetry to quantify the variability of energy resources was determined. An average radiation for this geographical point of 14 MJ / m² include a list of atmospheric clarity of 0.33 (1) was observed.

Keywords: solar radiation, atmospheric clarity index, Global radiation, Bogotá.

¹ Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá-Colombia. Contacto: djrodriguezp@unal.edu.co

² Fundación Universitaria Los Libertadores. Grupo de Investigación en Energía Solar Bogotá – Colombia. Contacto: johann.hernandez@gmail.com

³ Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá-Colombia. Contacto: djrodriguezp@unal.edu.co

Resumo

A Faculdade de Engenharia da Universidade do Distrito tem desenvolvido nos últimos anos, as pesquisas na área de sistemas elétricos baseados em energia limpa, entre os quais estão microgrids elétricos. Uma das fontes de energia mais importantes para estes sistemas é a energia solar. Através de um radiômetro Kipp e Zonen localizado no telhado da sede da 40th Street na cidade de radiação global Bogotá foi medido, com esta informação a taxa de clareza atmosférica. Para caracterizar o comportamento de curtose radiação diariamente e simetria para quantificar a variabilidade dos recursos de energia foi determinada. Uma radiação média para este ponto geográfico de 14 MJ / m² incluir uma lista de clareza atmosférica de 0,33 (1) foi observada.

Palavras-chave: radiação solar, de índice de claridade atmosférica, radiação global, Bogotá.

Introducción

La investigación en fuentes renovables de energía requiere caracterizar el comportamiento del recurso base. El conocimiento del comportamiento de la radiación solar y en general de todo el clima es insumo necesario para la investigación en producción de fuentes de energía renovable, calentamiento de agua, secado de frutos, iluminación arquitectónica, entre otras.

Para el caso de aplicaciones fotovoltaicas, el insumo principal es la distribución de la radiación global. El comportamiento de insumo de energía depende de múltiples factores, algunos de ellos aleatorios, como la nubosidad (Karakoti, Das y Bandyopadhyay, 2013). La información sobre la radiación solar se encuentra en el *Atlas de Radiación Solar de Colombia* (UPME e IDEAM, 2004) desarrollado con el patrocinio de la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), el cual contiene la radiación global discriminada mensualmente. Estos mapas fueron realizados con información hasta el 2004, lo que implica una desactualización en la información de 10 años.

Además, este atlas no presenta información sobre la variabilidad del recurso, que es necesario para evaluar el comportamiento de los sistemas basados en la energía solar.

Para la ciudad de Bogotá, Forero, Mesa, Martínez, Caicedo y Gordillo (2008) mostraron el comportamiento del índice de claridad atmosférica, por medio de mediciones piranométricas obtenidas en la Universidad Distrital, sede Circunvalar, en el año 2008. Muestran que para este punto geográfico el índice de claridad atmosférica diario tiene un valor promedio anual de 0.358.

Baudescu y Paulescu (2011) muestran cómo las características básicas de la radiación solar se pueden analizar a través del tratamiento estadístico de la transmitancia de la atmósfera, cuantificada por medio del índice de claridad atmosférica K_t , el cual es un parámetro óptico que está ligado a las condiciones atmosféricas locales, lo que implica que se ve afectado por los ciclos atmosféricos naturales, así como por variación externas como las producidas por los aerosoles provenientes de los sistemas que utilizan la combustión de hidrocarburos (Badescu, 2008)

El presente trabajo es un estudio estadístico del índice de claridad atmosférica, determinado por medio de mediciones piranométricas en la estación radiométrica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas – Sede 40, en la ciudad de Bogotá. Las mediciones se realizaron por medio de un piranómetro Kipp and Zonen, en el periodo de agosto del 2012 hasta agosto del 2013. Para cuantificar la variabilidad del recurso solar se determinó la curtosis y la asimetría estadística a la distribución de frecuencias de K_t .

Método y Técnica

El índice de claridad atmosférica (K_t) sobre superficies horizontales está definido como:

$$K_t = \frac{H_g}{H_0} \quad (1)$$

Donde H_g es el promedio de la radiación solar diaria que incide sobre una superficie horizontal en la superficie terrestre. La radiación solar extra-terrestre H_0 es la energía por unidad de área acumulada en kWh/m^2 , en un día sobre la superficie de la atmósfera. Esta se puede determinar usando la siguiente expresión:

$$H_0 = \left(\frac{24}{\pi}\right) I_{sc} E_0 \cos(\varphi) \cos(\delta) \left[\sin(w_s) - \left(\frac{\pi}{180}\right) w_s \cos(w_s) \right] \quad (2)$$

Donde φ es la latitud del emplazamiento, δ es la declinación, I_{sc} es la constante solar que tiene un valor de $1.367 kWh/m^2$, E_0 es el factor de corrección de la excentricidad de la órbita de la Tierra. El ángulo horario (w_s) puede ser de la siguiente forma:

$$w_s = \cos^{-1}(-\tan\varphi \tan\delta) \quad (3)$$

Los tres indicadores estadísticos usados para analizar los datos son la desviación estándar (σ), curtosis y asimetría. La curtosis es una forma de cuantificar la forma del pico comparada con la distribución gaussiana. Para una distribución normal, tiene un valor de curtosis de 0. Si los picos de las distribuciones son más planos comparados con la distribución normal, se tienen valores inferiores a 0 y se denominan distribuciones *platicurtica*. Por otro lado, para valores superiores a 0, los picos son mucho más cerrados y las distribuciones que presentan este comportamiento se llaman *leptocurtica*.

La asimetría cuantifica el grado de simetría de una distribución. Una asimetría de 0 indica una simetría en la variancia; valores negativos indican que la distribución es asimétrica y que tiende a valores negativos; en contraste, asimetrías positivas indican una distribución con distribución que tiende a valores positivos.

Iqbal (1983) postuló ciertos límites para definir los tipos de días basado en K_t .

Tabla 1. Escala de Iqbal donde se define el tipo de día basado en K_t

Índice de claridad	Tipo de día
$K_t \geq 0,6$	Días claros
$0.3 < K_t < 0,6$	Días parcialmente nublados
$K_t \leq 0.3$	Días nublados

Aunque esta división es arbitraria puede ser considerada para definir el tipo de día según el estado de su atmósfera. Los valores de asimetría y curtosis pueden ser utilizados para definir la amplitud de la distribución y su simetría. Basado en estos momentos estadísticos de las distribuciones Badescu (Badescu, 2008) propone la siguiente escala en la Tabla 2.

Según la escala en la Tabla 2, los tipos de distribución más adecuados para los sistemas de conversión de energía solar, en orden descendente, son: V > IV > I > VI > II y III. Cabe aclarar que la intensidad de la irradiación solar media en un sitio, ya sea global o directa, es de la mayor importancia en el diseño de un sistema de conversión solar, pero la distribución de la intensidad de irradiación es también un parámetro relevante en el dimensionamiento.

Aspectos Experimentales

En la terraza de la sede calle 40 de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, ubicada en latitud $4^\circ 37' 41''N$ y longitud $76^\circ 3' 57'' W$, se encuentra emplazada una central meteorológica estándar que cuenta con un piranómetro Kipp and Zonen CPM3 de referencia 0338920A. Se midió la radiación global recolectando los datos cada minuto de forma continua en tiempo real por medio de una tarjeta de adquisición de LabView, durante el periodo comprendido desde agosto del 2012 hasta el mismo mes del año 2013.

Tabla 2. Clasificación de las curvas de distribución basado en la asimetría y curtosis

Distribución tipo	Curva de distribución	Asimetría	Curtosis
I	Normal	$-0,4 < A_s < 0,4$	$-0,8 < K < 0,8$
II	Casi normal con cola positiva	$A_s \geq 0,4$	$K \leq -0,8$
III	Pico estrecho con cola positiva	$A_s \geq 0,4$	$K \geq 0,8$
IV	Casi normal con cola negativa	$A_s \leq -0,4$	$-0,8 < K < 0,8$
V	Pico estrecho con cola negativa	$A_s \leq -0,4$	$K \geq 0,8$
VI	Bimodal, simétrica con pico plano	$-0,4 < A_s < 0,4$	$K \leq -0,8$

Se desarrolló un software para el procesamiento de datos en la plataforma ROOT, que permite almacenar la información en bases de datos estructuradas para su procesamiento, analizar el comportamiento temporal de la radiación solar diaria, determinar la radiación solar extraterrestre y realizar el cálculo del índice de claridad atmosférica.

Resultados

En la figura 1 se muestra el comportamiento de la irradiación para el día 1 de enero del 2013, que permite ejemplificar el comportamiento de la irradiancia en este sector de la ciudad. En el periodo comprendido entre las 6 a las 11 a.m. se observa una radiación acumulada superior al resto del día. La irradiancia más alta registrada fue de 1.200 W/m^2 .

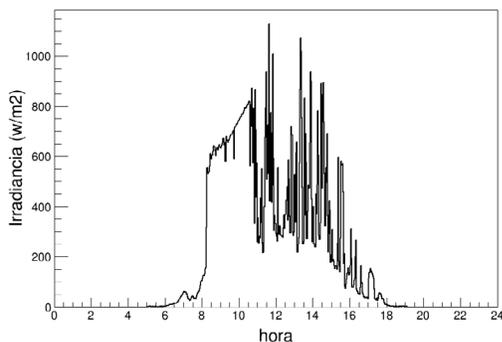


Figura 1. Irradiancia en función del tiempo para el día 1 de enero de 2013

La figura 2 muestra el comportamiento K_t diario. Esta serie de datos no presenta una tendencia regular y se evidencian grandes cambios de las condiciones ópticas de la atmósfera en periodos cortos de tiempo. El mayor K_t fue de 0.65, que contrasta con el menor, de 0.1; esto indica la variabilidad de las condiciones climáticas del emplazamiento.

En la figura 3 se registran los datos del K_t promedio mensual para el periodo comprendido entre agosto del 2012 y el mismo mes del 2013. Para esta ventana se observa una radiación promedio de 14 MJ/m^2 y un índice de claridad atmosférica promedio anual de 0,33.

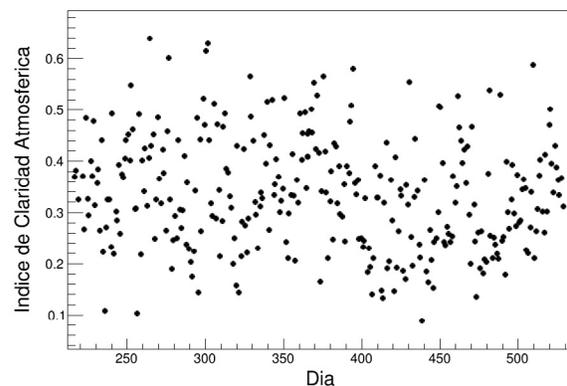


Figura 2. Índice de claridad atmosférica diaria para el periodo comprendido entre agosto del 2012 y agosto del 2013

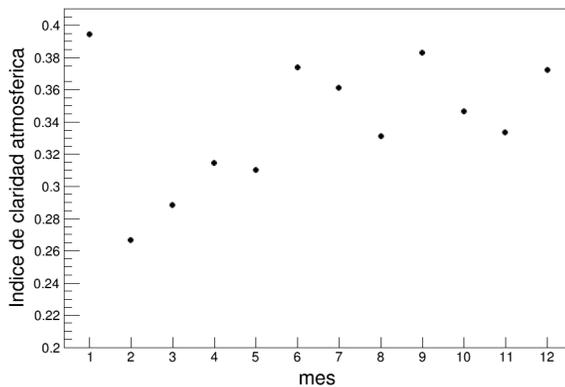


Figura 3. Índice de claridad atmosférica mensual para el periodo de observación, donde 1 corresponde al mes de enero y 12 al mes de diciembre

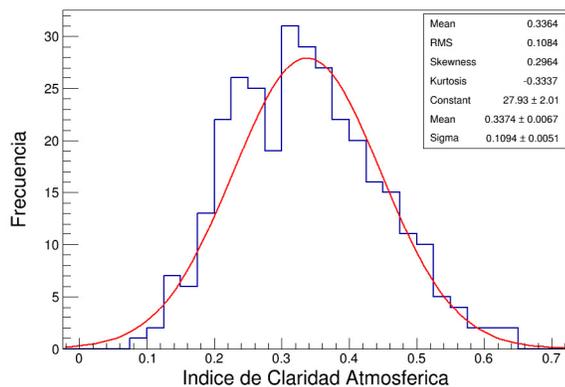


Figura 4. Histograma de frecuencias del índice de claridad atmosférica para la ciudad de Bogotá

Se observa que el pico de claridad atmosférica se presenta en la temporada seca de diciembre y enero, y los menores valores, para los meses de febrero y marzo, que corresponden al inicio de la temporada de lluvias en la ciudad de Bogotá. De acuerdo con la clasificación de Iqbal (tabla 1), el lugar del emplazamiento muestra condiciones parcialmente nubladas para todo el año, excepto en la temporada de lluvias, cuando el comportamiento más característico es el nublado.

En la figura 4 se muestra el histograma de frecuencias con la distribución de K_t . En él se puede ver que el promedio K_t es de 0,33. Realizando una aproximación gaussiana se obtiene un valor de $\sigma = 0.01(1)$. El valor de la curtosis negativa

de la figura 4 muestra la baja concentración en el valor medio de K_t , lo que implica una tendencia a la variabilidad de las propiedades ópticas de la atmósfera. Dentro de la escala de la tabla 2 se tiene que la distribución de K_t en la región de estudio es de tipo I.

Conclusiones

Se midió la irradiación solar en la sede calle 40 de la Universidad Distrital (Bogotá) por medio de un piranómetro Kipp and Zonen. Se observó una radiación acumulada diaria promedio de 14 MJ/m². Se determinó el coeficiente de claridad atmosférica para esta serie de datos y se observó K_t promedio de 0.33(1) con un σ de 0.1, con una curtosis de -0.33, lo que muestra la variabilidad del recurso energético en este punto de la ciudad. Se encontró que en la escala definida por Badescu [4] la distribución del índice de claridad atmosférica es de tipo I, lo que indica una variabilidad normal y simétrica del sistema.

Referencias

- Badescu, V. (2008). *Modeling solar radiation at the Earth's surface* (1st ed.). Bucharest: Springer.
- Badescu, V. y Paulescu, M. (2011). Statistical properties of the sunshine number illustrated with measurements from Timisoara (Romania). *Atmospheric Research*, 101(1-2), 194–204. doi:10.1016/j.atmosres.2011.02.009
- Forero, N., Mesa, W., Martínez, M., Caicedo, L. y Gordillo, G. (2008). Estimación del valor medio mensual del índice de claridad atmosférico (K_t) para Bogotá, a partir de datos de radiación solar global. *Revista Colombiana de Física*, 40(1), 167–169.
- Karakoti, I., Das, P. K., & Bandyopadhyay, B. (2013). An analytical study on daily solar radiation data. *Current Science*, 105(2), 215–224.
- UPME e IDEAM. (2004). *Atlas de Radiación Solar de Colombia*. Bogotá.
- Iqbal, M. (1983). *An Introduction to solar radiation* (1st ed.). New York: Academic Press.



