

Evaluación del potencial de generación fotovoltaica en la ciudad de Quibdó, Chocó

Evaluation of the Feasibility of Implementing Photovoltaic Electric Power in Quibdó, Chocó

Héctor David Agudelo Arias^{1*}, Lubin Delgado Arroyo^{1**}, Andrés Julián
Aristizabal Cardona^{3***}

¹ Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Maestría en Ingeniería – Gestión
Sostenible de la Energía

² Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Departamento de Ingeniería, Bogotá,
Colombia

FECHA DE ENTREGA: 19 DE ENERO DE 2016
FECHA DE EVALUACIÓN: 10 DE MARZO DE 2016
FECHA DE APROBACIÓN: 22 DE ABRIL DE 2016

Resumen En este trabajo se presentan los resultados de la evaluación realizada a series de datos climáticos para obtener los promedios de radiación solar y temperatura en el Municipio de Quibdó, con el fin de determinar la factibilidad en la implementación de sistemas de generación de energía eléctrica fotovoltaica conectados a la red eléctrica.

Para esta evaluación se tomaron como referencia las bases de datos de la estación meteorológica instalada en la Universidad Tecnológica del Chocó y la del IDEAM-110450010; que se encuentra ubicada en el Aeropuerto el Cariño de la Ciudad de Quibdó.

Los resultados obtenidos muestran que los meses con mayor radiación son Junio y Julio alcanzando valores aproximados de 3.83 kWh/m² y los de menor radiación Abril, Agosto y Noviembre con valores aproximados de 1.59 kWh/m². La temperatura presenta un comportamiento bastante definido con valores promedios máximos de 26 °C y promedios mínimos de 22 °C.

Abstract This paper presents the results of the evaluation carried out to a series of climatic data in order to obtain the average of solar radiation and temperature in the municipality of Quibdó. This was done in order to determine the feasibility of implementing photovoltaic electric power generation systems connected to the electric network.

For this evaluation, we used as a reference the database of the meteorological station located at the Universidad Tecnológica del Chocó and the one belonging to the IDEAM - 110450010, located at *El Cariño* Airport in Quibdó.

* hectord.agudelo@utadeo.edu.co

** lubin.delgado@utadeo.edu.co

*** andresj.aristizabal@utadeo.edu.co

The results obtained show that the months with greater radiation are June and July, reaching approximated values of 3.83 kWh/m² and the ones with less radiation are April, August, and November, approximated values of 1.59 kWh/m². The temperature presents a well-defined behavior with maximum average values of 26 °C and minimum of 22 °C.

Palabras Clave: radiación solar, temperatura, energía solar.

Keywords: solar radiation, temperature, solar energy.

1. Introducción

La energía solar fotovoltaica (FV) es única dentro de las diversas tecnologías de generación de electricidad. No requiere consumo de combustible y a menudo no involucra partes móviles, genera electricidad libre de emisiones con costos de operación y mantenimiento relativamente bajos; aún en lugares remotos. Adicionalmente, la energía FV es altamente modular y escalable, con rangos de instalación desde a escala de potencia de luces de jardín hasta a escala de potencia del orden de los megavatios de grandes centrales de electricidad.

El departamento del Chocó posee gran biodiversidad e importancia ecológica que contribuye al equilibrio ambiental a nivel mundial. Se encuentra ubicado al noroccidente de Colombia y su capital es Quibdó (05° 43'N, 76° 37'W, 53m).

Para evaluar el comportamiento y producción de sistemas fotovoltaicos conectados a la red (SFCCR) eléctrica, es importante tener en cuenta las variables de las cuales este depende: el recurso solar disponible y temperatura ambiente en el sitio de instalación. En el Municipio de Quibdó se presentan comportamientos variados para la radiación solar. Dichos comportamientos están dados por las abundantes lluvias, nubosidad y humedad. Se registran datos para precipitación aproximados de 1,500 mm anuales, con un comportamiento altamente irregular y un 80 % de humedad relativa. La temperatura presenta un máximo y un mínimo marcadamente definido con un comportamiento monomodal donde se presentan valores de temperatura máxima entre 27 y 31 °C, y los mínimos entre 22 y 24 °C.

En Colombia, en el año 2001 se decretó la Ley 697 mediante la cual se declara el uso racional y eficiente de la energía (URE) con el objetivo de fomentar el uso de energías renovables como un asunto de interés nacional y de compromiso con el medio ambiente. Posteriormente, en Mayo de 2014 se decreta la Ley 1715 con el fin de regular la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional. Estas acciones gubernamentales crean nuevos escenarios energéticos en materia de regulación, mercados, economía, instalación y tecnología en energía que representan un nuevo reto para el país.

En este documento se presentan inicialmente (sección 2), las características del sistema de medición de radiación y temperatura. En una segunda instancia (sección 3) se aborda el análisis de los resultados de las series de datos de radiación y temperatura adquiridos y finalmente en esa misma sección, se discute la factibilidad para el uso de energía solar fotovoltaica en la ciudad de Quibdó; al tiempo que se compara con Bogotá y Berlín (Alemania). Por último se exponen las conclusiones del estudio.

2. Materiales y métodos

El procedimiento metodológico empleado en este trabajo consta de dos etapas: en la primera se evalúan las variables meteorológicas involucradas (radiación solar y temperatura ambiente) y en la segunda se realiza un análisis de factibilidad de generación eléctrica utilizando la herramienta de *software* Retscreen.

Dentro de las primeras actividades del proyecto, se seleccionaron los sensores adecuados para la medición de cada una de las variables físicas, así como el lugar de instalación de la estación de medición en la Universidad Tecnológica del Chocó - UTCH. Una vez analizados estos criterios es conveniente instalar una torre en un lugar que permita la incorporación a una distancia razonable del piranómetro para medir la radiación solar global.

Luego de este proceso es necesario recopilar o adquirir la información en una computadora para su posterior análisis. Para ello es necesario utilizar un datalogger como sistema de adquisición de datos para convertir y guardar la información de los sensores involucrados. La figura 1 presenta el diagrama de bloques general de la estación de medición.



Figura 1. Esquema de instalación de equipos de la estación meteorológica UTCH.

El acondicionamiento de los sensores del sistema de medida sigue siendo tradicional, es decir que se debe seguir el proceso normal de traducción de las señales análogas de cada uno de los sensores para que los valores de tensión y corriente sean acordes a cada una de las variables físicas establecidas.

En principio se realizó un estado del arte de dispositivos similares para determinar las necesidades técnicas para la implementación de la plataforma de estudio y el acondicionamiento de los sensores para adquirir la información.

Luego de establecer dichas necesidades se asignaron las siguientes prioridades para obtener mejores resultados en el proyecto.

- Diseño físico de la estación para instalar los sensores.
- Elementos de hardware necesarios para la estación.
- Caracterización de la variable y adquisición de la misma.

2.1. Medición de radiación solar

Los datos obtenidos de la estación meteorológica de la UTCH para los años 2010 a 2012, fueron proporcionados por el piranómetro Eppley 8-84. En este radiómetro la dependencia de la temperatura está dentro de más o menos 1,5 % por encima de la temperatura ambiente, y dentro del rango de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a más $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. La linealidad está dentro de 1 % de 0 a 1400 W/m^2 . Su respuesta Coseno es de 2 % desde 0 a 70° ángulo zenit, y un 5 % desde 70 a 80° ángulo zenit. Su sensibilidad es de $10\text{ }\mu\text{V/W/m}^2$ y su impedancia es de 350 Ohms aproximadamente.

Para los años 2013 a 2015 los datos fueron adquiridos por el piranómetro de marca Hukseflux Thermal Sensor: en este radiómetro la dependencia de la temperatura está dentro de más o menos 3 % por encima de la temperatura ambiente y dentro del rango de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ a más $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$. La linealidad está dentro de $\pm 1\%$ de 100 a 1000 W/m^2 . Su sensibilidad es de $15\text{ }\mu\text{V/W/m}^2$. De acuerdo a la norma ISO 9060 es un pirómetro de segunda clase.

Heliógrafo (Campbell-Stokes): Es utilizado para medir el brillo solar, es decir el número de horas que brilla el sol por día en una determinada localidad. Este instrumento consta de una lente esférica que produce una imagen del sol sobre el papel tratado químicamente y que además tiene impresa una escala horaria. El papel se alcanza a quemar cuando el nivel de radiación global es superior a 120 W/m^2 . De esta forma se puede medir sobre el papel el número de hora que brilla el sol en un día. El heliógrafo que registra las horas de brillo solar es un instrumento de uso manual.

Las series de datos de radiación solar global para el año 2012 que no se encontraban disponibles en la estación UTCH fueron obtenidas de la estación del IDEAM- 110450010; que se encuentra ubicada en el Aeropuerto el Cariño de la Ciudad de Quibdó.

2.2. Medición de temperatura ambiente

Para medir la temperatura ambiente en la estación UTCH se empleó una sonda 083E-L que permite además de medir la humedad relativa del ambiente, medir la temperatura utilizando un termistor con un rango de medición comprendido entre $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ y una exactitud de $0.18\text{ }^{\circ}\text{C}$.

2.3. Sistema de adquisición de datos

El datalogger empleado marca Campbell Sicientific referencia CR-1000 es controlado por un computador que realiza un barrido cada un segundo de los distintos

canales conectados, midiendo la tensión correspondiente a cada señal que es transferida al computador que la transforma en irradiancia (W/m^2). Los valores de irradiancia son integrados cada hora y almacenados para análisis posteriores.

3. Análisis y resultados

3.1. Análisis estadístico descriptivo de los datos de radiación solar

La radiación solar (Figura 1) durante los 4 años analizados (2011-2014) presenta grandes variaciones en cuanto la incidencia en esta zona, donde se puede observar que su máxima radiación se presenta en el mes de Junio y su mínima radiación en los meses de Abril y Noviembre. El valor máximo mensual de los promedios de radiación durante los cuatro años analizados (Figura 2) es de $4.80 \text{ kWh}/m^2$. La temperatura ambiente registró un promedio anual de $28,3 \text{ }^\circ\text{C}$ para los cuatro años analizados como se presenta en la figura 3.

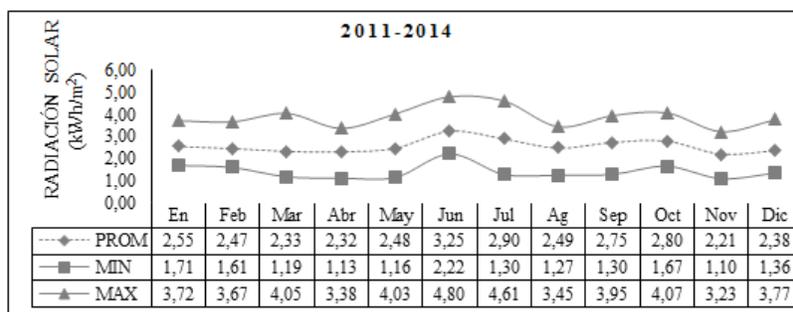


Figura 2. Valores medios, máximos y mínimos de radiación solar, 2011-2014. Estación UTCH.

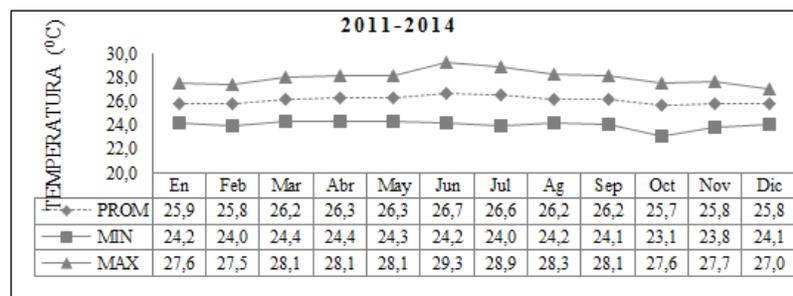


Figura 3. Valores medios, máximos y mínimos de temperatura, 2011-2014. Estación UTCH.

En la figura 4, se muestran los perfiles diarios de radiación solar medidos con la estación desarrollada para los días 4 y 21 de Abril del año 2014, con lo cual se pretende mostrar el comportamiento de la irradiación solar para diferentes días en Quibdó, donde se puede observar que para el día 4 de abril de 2014, el promedio de irradiancia fue aproximadamente de $300,85 \text{ W/m}^2$. Además su irradiancia máxima la alcanzó a las 12 horas del mediodía con un aproximado de 838 W/m^2 y su irradiancia mínima de $0,049 \text{ W/m}^2$, la cual se presentó a las 6 de las mañana. Para el día 21 de abril el promedio de irradiancia fue aproximadamente de $280,2 \text{ W/m}^2$, con una irradiancia máxima de $648,6 \text{ W/m}^2$ la cual fue alcanzada a las 13 horas del día y la irradiancia mínima fue de $0,48 \text{ W/m}^2$, la cual se presentó a las 6 de las mañana. Por lo anterior podemos afirmar que la irradiancia Quibdó presenta un comportamiento monomodal ya que el pico de irradiancia se puede dar entre las 12m y las 13 horas.

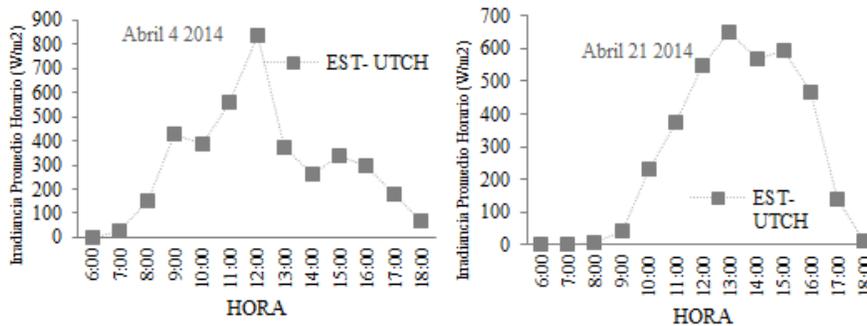


Figura 4. Perfiles diarios de radiación solar tomados con la Estación - UTCH.

En la figura 5, se presentan los resultados del promedio diario de radiación solar global medida para el mes de Octubre del 2012 escogido a manera de ejemplo. Análogamente, se hace el análisis estadístico descriptivo por año, lo cual permite obtener series de tiempo mes para la radiación solar en kWh/m^2 . La figura 5, resume también los resultados de este proceso para cuatro años entre 2011 y 2014.

Los resultados anteriores muestran un comportamiento periódico de la radiación solar global a lo largo del año, por efectos astronómicos y meteorológicos. Se observa que los meses de mayor radiación solar en Quibdó son Junio y Julio durante los cuales se alcanzan valores superiores a $3,83 \text{ kWh/m}^2$ y los de menor radiación solar son Abril, Agosto y Noviembre, en los cuales la radiación promedio diaria es alrededor de $1,59 \text{ kWh/m}^2$. Estos resultados revelaron también que los promedios diarios anuales de radiación solar en Quibdó durante el 2011 y el 2012 fueron de $2,85 \text{ kWh/m}^2$ y $3,41 \text{ kWh/m}^2$, mientras que para el 2013 es de 1.73 kWh/m^2 y de $2,30 \text{ kWh/m}^2$ para el 2014.

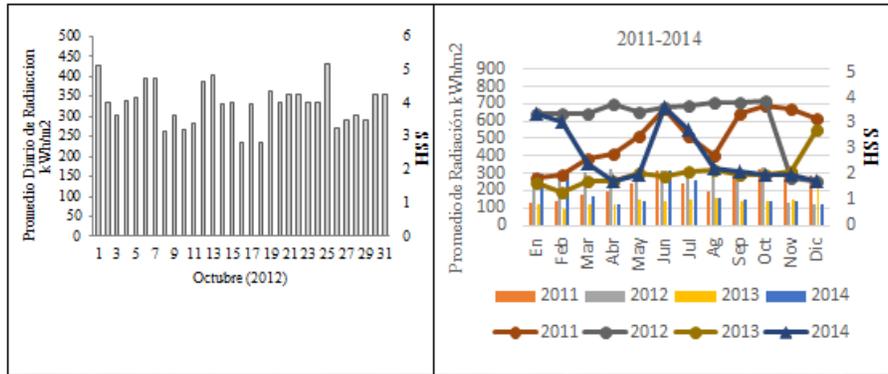


Figura 5. Promedio diario de radiación solar para el mes de Octubre de 2012. Promedios diarios mensuales de radiación solar, durante los años 2011, 2012, 2013, 2014 y 2015.

En la figura 6, se resumen los valores calculados para los principales parámetros que describen el comportamiento estadístico mensual de la radiación solar para los cuatro años estudiados.

Como se observa en la figura 6, la varianza más alta corresponde al año 2011, con un valor de 1,3 kWh/m², lo cual nos indica que en ese año se presentó la mayor variabilidad o dispersión en los valores mensuales de la radiación solar para Quibdó. La menor dispersión en la radiación solar se presentó en al año 2013 con un valor de 0,54 kWh/m², para el cual la radiación total fue de 20,76 kWh/m².

Estadísticas Descriptivas (kWh/m ²)	2011	2012	2013	2014
Suma	1039,81	1248,52	638,59	836,68
Mediana	2,81	3,50	1,74	1,98
Varianza	1,30	1,15	0,54	1,20
Desviación St.	1,14	1,07	0,73	1,10
Mínimo	0,10	0,34	0,04	0,29
Máximo	5,84	5,49	5,69	5,75
Rango	5,74	5,15	5,69	5,45
Suma de valores medios	34,21	40,93	20,76	27,60

Figura 6. Parámetros que describen el comportamiento estadístico mensual de la radiación solar para los cuatro años analizados.

El promedio acumulado de los valores de radiación promedio diaria mensual en los cuatro años, da como resultado 2,51 kWh/m², con una desviación estándar de 0,70 kWh/m². Esto representa un rango de ±27,88% de desviación en los

promedios. Estos resultados demuestran que el promedio de radiación solar, medida localmente, está en el intervalo entre $1,81 \text{ kWh/m}^2 \leq \text{Rad.} \leq 3,21 \text{ kWh/m}^2$, lo cual representa una alta probabilidad para los valores de irradiancia promedio medidos y para los que el rango de $\pm 27,88\%$ del valor promedio son de alta precisión.

Es importante aclarar que aunque se han tenido en cuenta las diferentes causas de error y las dificultades concernientes al tratamiento estadístico de los datos, así como la incertidumbre del instrumento de medición (en general derivada por la precisión del piranómetro y los diferentes componentes en hardware y software aplicados, que contempla el instrumento virtual desarrollado), también se debe tener en cuenta la naturaleza aleatoria del comportamiento de la radiación solar, la cual fluctúa en forma drástica estadísticamente. Por esta razón, es de mayor relevancia un análisis estadístico representativo de los datos, en términos de “intervalos de confianza” para los valores promedios de radiación obtenidos y tiene más significado si se analiza la evolución de estos valores con base en series de tiempo. Aunque cuatro años, es una muestra restringida en el acumulado, el analizar mes por mes a lo largo de los años, da un mayor nivel de confianza en las medidas de irradiancia solar global.

Conforme a los resultados presentados en la figura 5, se han tomado los meses de Octubre (por presentar alta radiación solar promedio diaria mensual) y Noviembre (por presentar baja irradiancia solar promedio diaria mensual) como meses representativos para un análisis estadístico descriptivo por mes; con un 95 % de intervalo de confianza en las medidas, correspondientes a los meses de Octubre y Noviembre respectivamente, de los años 2011 a 2014.

En el caso tomado para Octubre, $\sigma = 1,11 \text{ kWh/m}^2$, así que $\pm 2\sigma$ representa $\pm 80\%$ del valor promedio; esto da un error porcentual del $\pm 80\%$ del valor promedio mensual, lo cual corresponde a un intervalo de confianza del 95 %, el rango tan amplio del error porcentual es debido a los parámetros a y b utilizados en el modelo de ARMSTRONG, ya que por razones de correlación generan mayores variabilidades en los datos. De esta forma se puede establecer a manera de predicción, que el estado de radiación solar promedio diaria para los meses de Octubre próximos estará en el intervalo:

$$1,69 \text{ kWh/m}^2 \leq \text{RAD} \leq 3,91 \text{ kWh/m}^2$$

Por tanto se puede afirmar que para los meses de Octubre la radiación solar promedio diaria, es igual a $2,80 \text{ kWh/m}^2 \pm 80\%$.

Análogamente para los meses de abril, $\sigma = 0,97 \text{ kWh/m}^2$, por tanto para $\pm 2\sigma$ se tiene $\pm 84\%$ del valor promedio mensual, luego el intervalo está dado por:

$$1,33 \text{ kWh/m}^2 \leq \text{RAD} \leq 3,63 \text{ kWh/m}^2$$

Luego el estado de radiación solar global promedio diaria para los meses de abril, es igual a $2,30 \text{ kWh/m}^2 \pm 84\%$. La figura 7, resume los parámetros de incertidumbre para las medidas de los promedios diarios mensuales de radiación solar en la ciudad de Quibdó. Se incluye la desviación estándar σ y el porcentaje de $2\sigma/\text{RAD}$.

	Ene	Feb	Mar	Abr	Ma	Jun	Jul	Ag	Sep	Oct	Nov	Dic	PROM
RAD	2,55	2,44	2,33	2,30	2,48	3,25	2,90	2,49	2,75	2,80	2,21	2,38	2,573
σ	1,06	1,06	0,79	0,97	0,83	0,92	0,73	0,87	1,02	1,11	0,90	0,90	0,930
2σ/RAD	83,08	86,82	67,54	84,46	66,67	56,55	50,32	69,81	74,13	79,55	81,65	75,60	73,014

Figura 7. Parámetros de incertidumbre del promedio diario mensual de radiación solar para la ciudad de Quibdó.

3.2. Análisis estadístico descriptivo de los datos de temperatura ambiente

El análisis estadístico descriptivo para los datos de temperatura registrados en la base de datos generada, es análogo al realizado para la radiación solar.

La temperatura (Figuras 8 y 9) durante los 4 años analizados muestra un comportamiento bastante igual en cuanto la incidencia en esta zona, donde se puede observar que su temperatura está dada para un mínimo de 22 a 24 °C y un máximo de 27 a 32 °C, lo cual está dentro de los parámetros estándar de funcionamiento de cualquier tipo de generador solar.

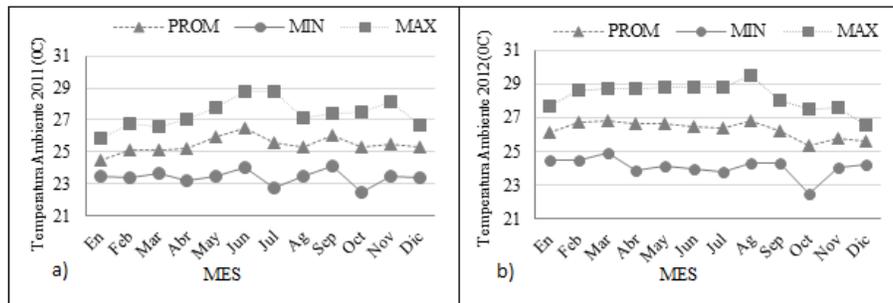


Figura 8. Promedios diarios mensuales de temperaturas ambiente y correspondientes valores de temperaturas máximas y mínimas medidos para los años 2011 a 2014.

Con los datos de los promedios de temperaturas registrados en la base de datos, se obtuvo una media general para la temperatura ambiente medida en las cercanías del Departamento de licenciatura en Matemáticas y Física de 26,1 °C, con una desviación estándar σ de $\pm 0,4$ °C. Esto significa que el rango de variación de la temperatura media diaria del sector, estimada con un intervalo de confianza del 95 %, es de: $25,7$ °C $\leq T \leq 26,5$ °C. Por tanto, se puede concluir que la temperatura media diaria obtenida a partir de las medidas hechas en los últimos tres años es de $T = 26,1$ °C $\pm 0,4$ %.

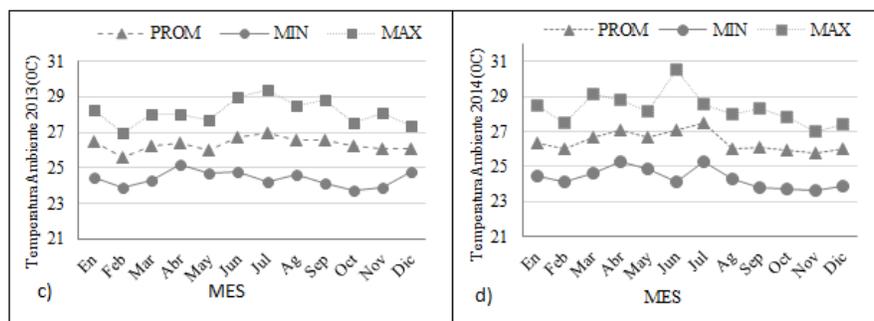


Figura 9. Promedios diarios mensuales de temperaturas ambiente y correspondientes valores de temperaturas máximas y mínimas medidos para los años 2011 a 2014.

4. Factibilidad de uso de generación eléctrica fotovoltaica

El análisis de la factibilidad de generación de energía eléctrica realizado con la herramienta RETScreen, tuvo en consideración dos ciudades de Colombia (Quibdó y Bogotá) y una ciudad de Alemania (Berlín/Dahlem) (debido a que este país es pionero a nivel mundial en energía solar fv). La herramienta RETScreen cuenta con diferentes parámetros financieros y técnicos que permiten evaluar la viabilidad en implementación de proyectos con energía renovable. Para nuestro caso del análisis se utilizó el método 1 (Pre-Factibilidad) en red central. Entre los parámetros financieros se cuenta con la tarifa de exportación a la red, tasa de inflación, incentivos y donaciones, que difieren de un país a otro según figura 10.

Alemania es un país fuerte en energía renovable por lo que han desarrollado políticas que hacen viable su implementación, para la promoción de las FNCER (Fuentes No Convencionales de Energía Renovables). En la mayoría de los países del mundo se utilizan instrumentos que propician, facilitan y procuran mantener las condiciones en estos proyectos; los instrumentos en mención son: impuesto al carbono, topes de emisiones que están incluidos dentro los instrumentos para las reducciones, el *Feed-In Tariff* (FIT), cuotas, subastas, certificados de energías renovables (REC), *Contract for Difference* (CFD) que se encuentran incluidos dentro de los esquemas de mercado. Para el caso de Alemania, los instrumentos que fomentan las FNCER son el FIT y CFD; el FIT en Alemania garantiza una tarifa de exportación como se refleja en la figura 10, los CFD garantizan un precio por un periodo de tiempo casi similar al FIT. Por lo tanto se escogió el precio de FIT para la evaluación del sistema FV expuesto en la parte técnica de este apartado y una tasa de inflación de 0.187 %.

En Colombia a partir del año 2014 se han establecido mecanismos de apoyo para las FNCER que aún están en proceso de reglamentación con la expedición de la ley 1715 de 2014. Cabe mencionar la posibilidad de auto generadores para entregar sus excedentes a la red y sus reconocimientos como créditos de energía (medición bidireccional) para el caso de proyectos de pequeña escala, la creación de un fondo de energías no convencionales y gestión eficiente de la energía,

Parámetros Financieros		
	COLOMBIA	ALEMANIA
Tarifa de exportación a la red	NO DEFINIDA	0.14 \$ USD/kW
Tasa de inflación	2,5%	0.187%
Instrumentos de Incentivos y donaciones (FNCER)	NO DEFINIDO	Feed- In tariff Contract for difference

Figura 10. Descripción de parámetros financieros.

destinados a financiar programas y proyectos en dichas áreas y la disposición de incentivos fiscales explícitos: posibilidad de deducir de la renta gravable hasta el 50 % de la inversión con FNCER, exención arancelaria, depreciación acelerada, entre otros.

Lo anterior nos lleva a fijar una tarifa de exportación teniendo en cuenta la tarifa de exportación actual a la red del sistema energético Colombiano de 126 USD/MWh sin ningún tipo de incentivos y una tasa de inflación de 2.4 %. Los parámetros técnicos, se establecieron de acuerdo a una demanda dada de 4.92 kWh y el diseño del sistema fotovoltaico como se muestra en la figura 11.

Parámetros Técnicos	
Tipo de Paneles a Emplear	Poli Silicio
Capacidad de generación eléctrica por unidad	300W
Fabricante	Canadian Solar
Modelo	poliSi - CS6X-300P - MaxPower
Eficiencia	15,60%
Temperatura normal de operación de las celdas	45°C
Coefficiente de temperatura	0,40%
Cantidad de Módulos Solares	20
Capacidad de generación eléctrica	6kW
Inversor	SMA SUNY BOY 5kW
Eficiencia del Inversor	90%
Capacidad	5kW
Perdidas Varias	10%

Figura 11. Descripción de parámetros técnicos del sistema fotovoltaico empleado.

De acuerdo a RETScreen, en la comparación de la viabilidad en la generación de energía eléctrica tanto en Colombia como en Alemania; es importante mencionar que ambos presentan comportamientos variados en cuanto a radiación

solar. En Colombia se cuenta con un máximo de radiación para Quibdó de 3.80 kWh/m² en el mes de Enero y un mínimo de 2.64 kWh/m² para Junio y en Bogotá un máximo de 5.35 kWh/m² para el mes de enero y un mínimo de 2.55 kWh/m², mostrando comportamientos similares en cuanto a los meses de mayor y menor radiación.

Alemania (Berlín/Dahlem) registra valores de radiación máxima de 4.63 kWh/m² en Mayo y una mínima de 1.43 kWh/m² para Diciembre (Figura 12).

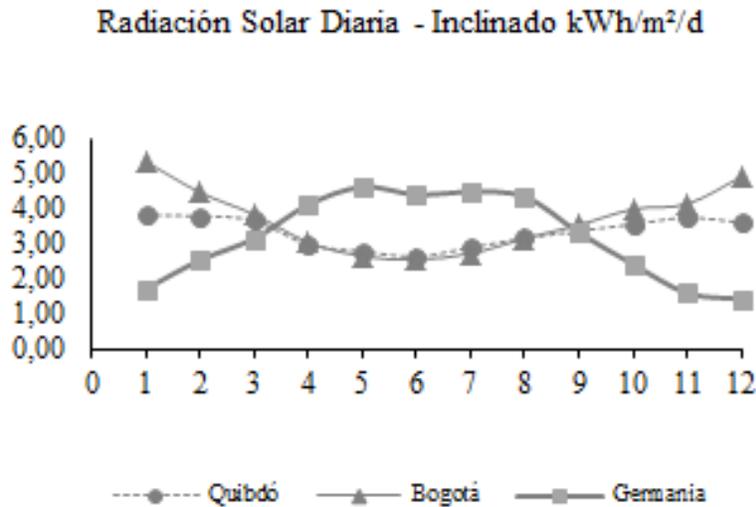


Figura 12. Comparación de la radiación solar entre dos ciudades de Colombia y una de Alemania, mediante la herramienta RETScreen.

En cuanto a la generación de energía eléctrica se aprecia que a partir de la radiación (Figura 12) y con el mismo sistema fotovoltaico diseñado (Figura 11) para cubrir la demanda de 4,92 MWh/año, se obtienen valores para Quibdó de 5,072 MWh/año, para Bogotá de 5,75 MWh/año y para Alemania (Berlín/Dahlem) 5,01 MWh/año. Según la herramienta RETScreen tanto Bogotá como Quibdó, cuentan con mayores posibilidades en cuanto a la generación de energía eléctrica a través del empleo de sistemas solares fotovoltaicos dado a que presenta mejores condiciones de radiación solar que Alemania.

Tanto Colombia como Alemania presentan parámetros financieros con valores distintos, lo que hace que los proyectos de generación con tecnología renovable sean más viables. Tal es el caso de Alemania que cuenta con incentivos para la implementación de proyectos que disminuyan la carga contaminante de CO₂ en el ambiente. Las siguientes figuras muestran los tiempos en que se puede recuperar la inversión (repago) realizado en la implantación del sistema fotovoltaico planteado en la (Figura 11) para la ciudad de Quibdó, Bogotá y Alemania (Berlín/Dahlem) y que además lograría una reducción anual de 0.9t CO₂ Equivalente a 0.2 autos y camiones no utilizados.

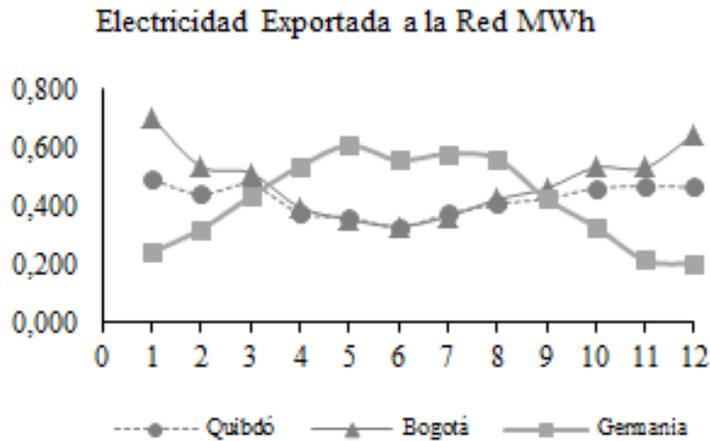


Figura 13. Comparación de la electricidad exportada a la red entre dos ciudades de Colombia y una de Alemania, mediante la herramienta RETScreen.

La figura 14 muestra que para un proyecto en las condiciones antes mencionadas en la ciudad de Quibdó, se logra una tasa interna de retorno del 5.3 % y un periodo de repago de capital en 14.7 años; condiciones que son favorables para un proyecto con un periodo de vida de 25 años. La gráfica 15 muestra que para un proyecto en las condiciones antes mencionadas en la ciudad de Bogotá, se logra una tasa interna de retorno del 6.5 % y un periodo de repago de capital en 13.1 años; condiciones que son igualmente favorables. Finalmente, la gráfica 16 muestra que para un proyecto en las condiciones antes mencionadas en la ciudad de Berlín, se logra una tasa interna de retorno del 3.8 % y un periodo de repago de capital en 16 años; condiciones que también son favorables.

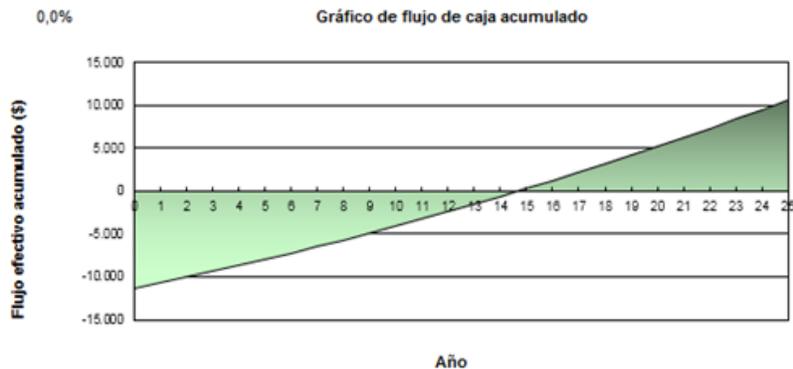


Figura 14. Flujo efectivo acumulado para la ciudad de Quibdó – RETScreen.

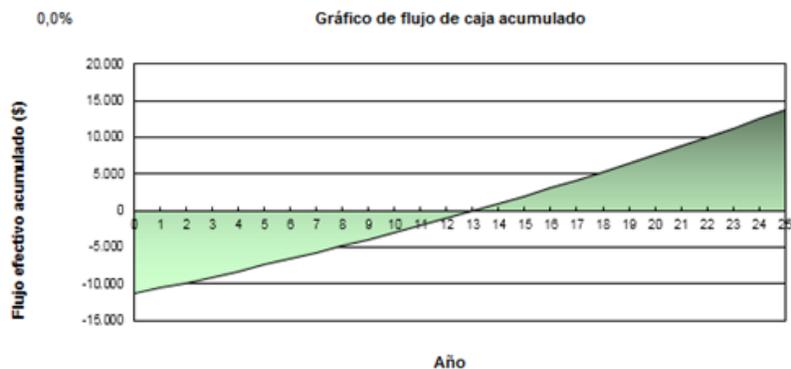


Figura 15. Flujo efectivo acumulado para la ciudad de Bogotá – RETScreen.

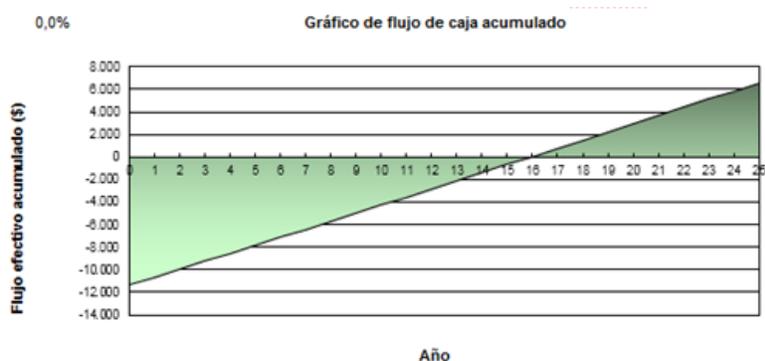


Figura 16. Flujo efectivo acumulado para la ciudad de Berlín – RETScreen.

5. Conclusiones

En este trabajo se realizó un análisis descriptivo de las variables de radiación solar y temperatura ambiente para la ciudad de Quibdó; cuyos resultados obtenidos muestran las características típicas para estas zonas tropicales. La radiación presenta comportamientos periódicos parametrizados por ciertas condiciones climáticas propias de la región. Se concluye que el pico máximo de la curva del perfil diario de la radiación solar está dado entre las 12m y las 13pm. El promedio de la radiación para los años de estudios en este trabajo es de 2.573 kWh/m².

La temperatura presenta un comportamiento regular en cuanto a máximos y mínimos presentes en todos los meses del año. Se determinó que en la región se registran temperaturas máximas entre 27 y 31 °C y temperaturas mínimas entre 22 y 23 °C.

La implementación de un sistema fotovoltaico con las características establecidas es viable, gracias a que la recuperación de la inversión se alcanza antes del tiempo de vida del proyecto; tanto en Alemania como en Colombia y en específico para la ciudad de Quibdó. Si en Colombia existiese el mismo escenario

de regulación en la venta de electricidad que existe en Alemania, la generación por energía renovable podría presentar mayores crecimientos.

Agradecimientos

Este trabajo fue realizado gracias al apoyo brindado por la Gobernación del Chocó en el marco de la convocatoria 694 “Formación de capital humano de alto nivel” y el apoyo del grupo de investigación en Energía Renovable y Meteorología de la Universidad Tecnológica del Chocó “Diego Luis Córdoba”, liderado por el Msc. William Murillo López.

Referencias

1. Ponoum, R., Rutberg, M., & Bouza, A. (2013). Energy storage for pv power. *ASHRAE Journal*, 55 (11): 80 - 53.
2. Pabón, J., Palomino, R., & Murillo, W. (2005). Sobre el Régimen diario de las variables climatológicas en el Municipio de Quibdó. *Meteorología Colombiana*, 9:59-66.
3. Lee, K., Lee, D., Baek, N., Kwon, H., & Lee, C. (2012). Preliminary Determination of optimal size for renewable energy resources in buildings using RETScreen. *Energy*, 47 (1): 83 - 96.
4. Murillo, W., Valois, G., & Aragón, G. (2008). Medición y estimación de la radiación solar en Quibdó. *La imprenta imaginaria*. Valencia-España, pp 178.
5. Vélez, A., Vergara, E., Barraza, W., & Agudelo, D. (2013). Determinación de un modelo paramétrica para estimar la radiación Solar. *Ingenium*, 7 (18): 11 - 17.
6. Troccoli, A., & Morcrette, J-J. (2014). Skill of direct solar Radiation predicted by the ECMWF Global atmospheric model over Australia. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 53 (11): 2571 - 2588.
7. Hernández, J., Sáenz, E., & Vallejo, W. (2010). Estudio del Recurso Solar en la ciudad de Bogotá para el diseño de sistemas Fotovoltaicos interconectados residenciales. *Revista Colombiana de Física*, 42 (2): 161 - 165.
8. Campoccia, A., Dusonchet, L., Telaretti, E., & Zizzo, G. (2009). Comparative analysis of different supporting measures for the production of electrical energy by solar PV and Wind systems: Four representative European cases. *Solar Energy*, 83(3): 287-297.
9. Cheng, C. L., Jiménez, C. S. S., & Lee, M. C. (2009). Research of BIPV optimal tilted angle, use of latitude concept for south orientated plans. *Renewable Energy*, 34(6): 1644-1650.