

Comparative Analysis of the Performance of Mono-crystalline and Polycrystalline PV modules in weather conditions of Fusagasugá

Análisis Comparativo del Rendimiento de los Módulos Fovoltaicos Monocristalino y Policristalino bajo Condiciones Climáticas de Fusagasugá

Luisa F. Sanabria Pérez¹ Luz A. Cruz Pardo¹ Yimy E. García Vera² Carlos H. Montufar Benavides¹

¹Universidad de Cundinamarca Fusagasugá – Colombia, ²Universidad de San Buenaventura Bogotá - Colombia.
Correspondence: yegarcia@usbbog.edu.co

Recibido: 24/08/2018. Modificado: 16/11/2018. Aceptado: 22/01/2019.

Abstract

Context: To meet the world's energy demand, photovoltaic solar energy has emerged as a sustainable, environmentally friendly renewable energy, used as an alternative to mitigate climate change caused by the use of energy from fossil fuels. therefore, it is very important to study the behavior of these photovoltaic modules under real operating conditions.

Method: Two stand-alone photovoltaic systems were implemented, one of monocrystalline technology and another polycrystalline, each of data acquisition system of temperature, humidity, voltage and current, which are acquired in a synchronized manner over a period of 3 months, under local weather conditions of Fusagasugá.

Results: The temperature, humidity, irradiance, voltage and current data are used to obtain curves showing the energy performance of the polycrystalline and monocrystalline modules.

Conclusions: The results of this study can help predict the output characteristics of photovoltaic system, mainly when the weather conditions change such as temperature, humidity and irradiance. A better performance of the monocrystalline module in the polycrystalline is evidenced.

Keywords: Irradiance, monocrystalline, photovoltaic module, polycrystalline.

Language: Spanish

Open access



Cite this paper as: L. F. Sanabria; L. A. Cruz; Y. E. García and C. H. Montufar, "Comparative Analysis of the Performance of Monocrystalline and Polycrystalline PV modules in wheater conditions of Fusagasugá", Ingeniería, Vol. 24, Num. 1, pp. 49-63, January-April 2019.

© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

DOI: <https://doi.org/10.14483/23448393.13751>

Resumen

Contexto: Para satisfacer la demanda de energía mundial, la energía solar fotovoltaica ha emergido como una energía renovable, sostenible y amigable con el medio ambiente, usada como alternativa para mitigar el cambio climático causado por uso de energías provenientes de los combustibles fósiles; pensando en ello, es muy importante estudiar el comportamiento de los módulos fotovoltaicos en condiciones reales de funcionamiento.

Método: Se implementan dos sistemas fotovoltaicos autónomos similares, uno con módulo policristalino y otro monocristalino, cada uno con sistema de adquisición de datos de temperatura, humedad, voltaje y corriente, los cuales son adquiridos de forma sincronizada por un periodo de tres meses bajo condiciones climáticas locales de Fusagasugá.

Resultados: Los datos de temperatura, humedad, irradiancia, voltaje y corriente se utilizan para obtener curvas que muestran el rendimiento energético de los módulos policristalinos y monocristalinos .

Conclusiones: Los resultados de este estudio pueden ayudar a predecir el comportamiento de salida de un sistema fotovoltaico, principalmente cuando las condiciones climáticas como humedad, temperatura y radiación cambian. Se evidencia un mejor desempeño del módulo monocristalino que el policristalino.

Palabras clave: Irradiancia, módulo fotovoltaico, monocristalino, policristalino.

Idioma: Español

1. Introducción

En la actualidad, 6.6 billones del total de la población mundial disponen de energía eléctrica, sin embargo, cerca de 1 billón de personas no la tienen o tienen un acceso limitado a esta [1]; gran parte de esta energía es obtenida de combustibles fósiles como gas, carbón y petróleo, causantes de las emisiones de gases efecto invernadero y el calentamiento global.

Es evidente el aumento de la preocupación de muchos países por reducir la dependencia de combustibles fósiles, por lo cual muchos de ellos han optado por el uso de fuentes alternativas de energía que permitan, de alguna manera, asegurar su suministro energético, contribuyendo a la reducción de gases efecto invernadero y de forma paralela a la mitigación del cambio climático [2].

Una de las fuentes de energía alternativa y renovable que ha crecido de forma vertiginosa es la energía solar fotovoltaica, principalmente debido a la reducción de costos y aumento en su eficiencia, razones que la hacen una opción viable para producción de energía con el valor agregado de su bajo nivel de emisiones; su vida útil oscila entre unos veinte a veinticinco años, ha sido incluida como una energía viable para suministro de energía en las zonas interconectadas de países como Colombia, que debido a su posición geográfica presenta gran potencial para este tipo de energía renovable [3].

Las celdas solares son dispositivos que convierten los fotones en energía eléctrica de corriente continua, son fabricadas con películas finas a base de silicio, generando voltajes en rangos pequeños entre 0,5 y 0,8 voltios; sus eficiencias varían con la tecnología de fabricación, siendo las más comunes las de silicio policristalino y monocristalino, con eficiencias entre un 13 % y 17 % respectivamente. De la conexión serie paralelo de celdas se obtienen los módulos solares que son fabricados mediante pruebas de desempeño o condiciones estándar de prueba (STC, por sus siglas en inglés), los ensayos se realizan con una irradiación de 1000 W/m², una temperatura ambiente

de 25°C y una masa de aire de 1.5; sin embargo, estas condiciones no se cumplen en tanto que las condiciones de operación reales dependen del lugar geográfico donde se instalan y su eficiencia se puede ver afectada por las condiciones atmosféricas y climáticas [4].

Este artículo evalúa el rendimiento energético de dos tecnologías de módulos fotovoltaicos comercialmente más usadas en el mercado colombiano, siendo estas la de silicio monocristalino y policristalino; las variables evaluadas son la temperatura y humedad; las pruebas se realizaron durante cerca de tres meses, a diferentes horas del día en la Universidad de Cundinamarca, Fusagasugá.

2. Antecedentes

El rendimiento de las celdas fotovoltaicas depende en gran proporción de las condiciones climáticas a las que se ven sometidas, debido principalmente a que estas en su fabricación son ensayadas bajo ambientes de laboratorio que se conocen como STC; no obstante, difieren de las condiciones en el sitio de instalación ya que muchas deficiencias en el rendimiento se debe principalmente a variaciones de condiciones ambientales como irradiación, temperatura y humedad [5], por lo tanto, el conocimiento y la comprensión del rendimiento del módulo fotovoltaico en las condiciones de operación de sitio de instalación es de gran importancia para la correcta selección del producto y la predicción de su rendimiento energético.

Se han realizado diferentes estudios para determinar de qué manera afectan las condiciones atmosféricas los módulos fotovoltaicos; así, en el caso de [6], los autores presentan un trabajo de análisis comparativo entre módulos solares, los resultados presentados concluyen que el más eficiente es el de película delgada respecto a los monocristalinos y policristalinos. Otros trabajos [7] incluyen comparación de más de tres tecnologías de celdas solares y estudian el funcionamiento de sistemas fotovoltaicos bajo diferentes condiciones climáticas, se comparan módulos fotovoltaicos policristalino, monocristalino, silicio amorfo y CIS (cobre, indio, selenio); este análisis realizado en Malasia concluye que, para esta latitud, las celdas CIS tuvieron un mejor desempeño. Por su parte, en [8] los autores evaluaron el desempeño de módulos policristalino y silicio amorfo en condiciones al aire libre, evidenciando que este último tiene mejor eficiencia y potencia en los meses de verano. En otras investigaciones presentadas [9] se comparan las tecnologías monocristalinas, policristalina y silicio amorfo, concluyen que las dos primeras muestran mejor eficiencia con alta irradiancia, mientras que las celdas del silicio amorfo presentan mayor razón de desempeño con baja irradiancia debido a su mejor capacidad de absorción de luz solar.

La temperatura es un parámetro importante en el rendimiento de una celda fotovoltaica, ha sido publicado por diferentes investigadores [10]–[12]. Se destaca el descenso de los voltajes de circuito abierto, lo que tiene como consecuencia una disminución del rendimiento; otros autores como [13] estudiaron el efecto de la temperatura ambiente, el desempeño de módulos fotovoltaicos en regiones tropicales, concluyendo que existe una relación de proporcionalidad entre la temperatura ambiente y la potencia de salida de un módulo fotovoltaico. Otros importantes factores que afectan el funcionamiento de los módulos fotovoltaicos como temperatura ambiente y acumulación de polvo son analizados en [14], [15], en estos trabajos se destaca la importancia del mantenimiento en zonas desérticas donde la acumulación de polvo y partículas pueden afectar el desempeño de

los módulos solares. El viento es otro factor considerado en investigaciones como la presentada en [16], en este trabajo se estudian modelos de temperatura con balances energéticos, teniendo en cuenta la temperatura ambiente, la irradiación y la velocidad del viento.

Muchos de los estudios realizados para verificar el comportamiento de los módulos solares se realizan teniendo en cuenta parámetros como irradiación y temperatura; en [17] se comparan las tecnologías policristalina y monocristalina, los resultados indican una relación directa entre la corriente generada por los módulos y la irradiación, además de una independencia de la temperatura, sin embargo, existe un decremento del voltaje por incremento de la temperatura. Otros estudios como el realizado en [18] muestran un mejor desempeño de los módulos monocristalinos sobre policristalinos para una latitud como la de Turquía.

El trabajo titulado “Estudio comparativo del rendimiento de tres diferentes tecnologías fotovoltaicas”, realizado por [19], es un proyecto que básicamente usa simulación mediante el *software Pvsyst*, realiza un análisis comparativo de diferentes tecnologías fotovoltaicas (PV), módulos de tipo policristalino, monocristalino y película delgada que fueron los elegidos para el desarrollo de las pruebas de modelamiento y simulación; los datos meteorológicos usados parten la base de datos de la Nasa, los resultados demuestran que para el lugar geográfico de instalación la tecnología de mejores prestaciones fue la policristalina.

Existen otros trabajos previos realizados en Colombia donde se comparan las tecnologías más comunes encontradas en el mercado, se subraya la tesis propuesta por [20], donde se realiza un estudio comparativo entre las tecnologías monocristalina y policristalina; no se presentan, sin embargo, resultados concluyentes sobre cuál de las dos tuvo mejor rendimiento energético salvo el comportamiento similar para condiciones de circuito abierto. Por otra parte, en [21] se realiza un estudio de eficiencia de módulos fotovoltaicos en la ciudad de Bogotá D.C., teniendo en cuenta variaciones climáticas como temperatura, humedad e irradiancia; se muestra un mejor desempeño de los módulos monocristalinos, no obstante, se encuentra que su rendimiento está por debajo del especificado por el fabricante.

Los trabajos anteriores relacionados con el rendimiento de los módulos solares de tecnologías comerciales como policristalina y monocristalina han servido de referencia para este estudio y potencian la importancia de conocer el funcionamiento de los módulos fotovoltaicos en condiciones al aire libre; sin embargo, muchas de las investigaciones previas solo comparan funcionamiento de los módulos solares bajo condiciones de circuito abierto y corto circuito, que son pruebas habituales de laboratorio. Es necesario realizar análisis de las prestaciones de las celdas solares en condiciones reales, esto es, bajo condiciones climáticas del emplazamiento o sitio de instalación y bajo variaciones de carga que pueden afectar la tensión de salida.

Por lo anteriormente expuesto, es de gran importancia determinar la eficiencia de los diferentes tipos de módulos solares en condiciones reales de instalación, puesto que la eficiencia que dan los fabricantes es establecida en condiciones controladas de laboratorio y está demostrado que esta se ve afectada por variables ambientales tales como temperatura, irradiación y humedad.

3. Materiales y métodos

3.1. Diseño experimental

Para este trabajo de investigación se han dispuesto dos módulos solares de potencia similar (20 W), cuyas especificaciones se pueden observar en la Tabla I, uno de tecnología monocristalina y otro policristalina.

Tabla I. Cuadro comparativo de módulos fotovoltaicos.

Características	Policristalino	Monocristalino
Potencia pico (W)	20	20
Corriente a la máxima potencia (A)	1.111	1.16
Voltaje a la máxima potencia (V)	18	17.2
Voltaje de circuito abierto (V)	22.50	21.50
Corriente de corto circuito (A)	1.202	1.25
Peso (Kg)	1.9	2.2
Dimensiones (mm)	440*350*25	510*290*25
Voltaje del sistema (VDC)	750	1000 V

Fuente: elaboración propia

La eficiencia de cada módulo fotovoltaico se calcula mediante la ecuación (1).

$$\eta = \frac{P_{max}}{G * A} * 100 \% \quad (1)$$

Donde P_{max} es la potencia máxima del módulo, G la Radiación estándar de $1000W/m^2$ y A el Área del módulo en metros cuadrados.

$$\eta = 100 \% * \left(\frac{20w}{0,510m * 0,290m * \frac{1000W}{m^2}} \right) = 13,52 \% \quad (2)$$

Eficiencia del módulo Policristalino.

$$\eta = 100 \% * \left(\frac{20w}{0,440m * 0,350m * \frac{1000W}{m^2}} \right) = 12,98 \% \quad (3)$$

Comparando las áreas de los módulos, se observa una mayor eficiencia del módulo monocristalino para prácticamente la misma área de captación de irradiación. En la Figura 1 se observa una fotografía del sitio de instalación realizada en la tercera planta del auditorio Emilio Sierra de la Universidad de Cundinamarca, sede Fusagasugá; para una captación óptima se tuvo en cuenta tanto la latitud del lugar ($4^{\circ}20'14.1''$ norte $74^{\circ}22'17.8''$ oeste) como la orientación hacia al sur, y se optó por una inclinación de 15° según lo recomendado por la UPME, teniendo en cuenta la latitud de 4° del lugar $+10^{\circ}$ de inclinación para tener en cuenta factores como limpieza.

Para este estudio se han usado dos sistemas fotovoltaicos autónomos de baja potencia, cada uno con tecnología diferente, uno monocristalino y otro policristalino; cada sistema cuenta con módulo fotovoltaico regulador de carga, batería, y cargas variables en corriente directa. Para el dimensionado y autonomía se tuvieron en cuenta las bases de datos de radiación del IDEAM [22], el sistema

se dimensionó con el método del mes de peor radiación, que para el caso de Fusagasugá es el mes de noviembre o diciembre, para ambos meses se tiene un promedio más bajo de radiación [23].



Figura 1. Panorámica del sistema en funcionamiento.

En la Figura 2 se muestra un esquema completo donde se aprecian tanto los módulos fotovoltaicos como los reguladores de carga; el sistema de almacenamiento son baterías tipo Netion de 12V/ 12AH, esta es una batería seca de libre de mantenimiento, de ciclo profundo, de alto rendimiento y resistencia eléctrica contra descargas excesivas. Los reguladores de carga son de tipo PWM con un rango de corriente de 10 A/ 12 V.

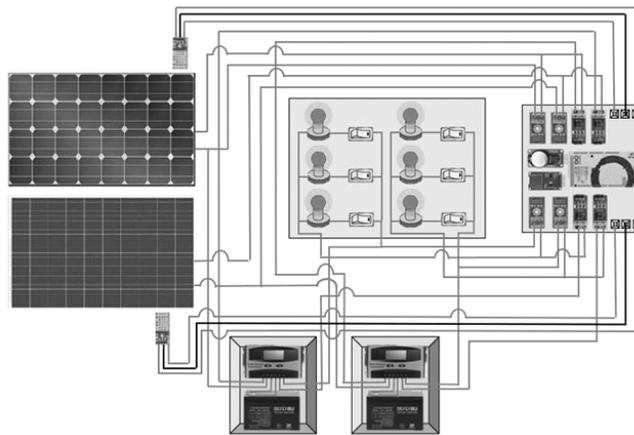


Figura 2. Esquema general del sistema implementado.

El cuadro de cargas de prueba usado son lámparas led dc variable por medio de conmutación, cada uno con una variación entre 6 W mínimo y 20 W para cada módulo que se relacionan en la Tabla II.

Tabla II. Cuadro de cargas de prueba.

Carga/tipo	Potencia unitaria	Cantidad	Horas	Consumo
Led	6 W	1	3	18 Wh
Led	7 W	2	4	56 Wh
Total				74 Wh día

Fuente: elaboración propia

Estableciendo un día de autonomía, teniendo en cuenta las pérdidas del sistema y usando como criterio de diseño un sobredimensionamiento de 25 % y una irradiancia de 4,6 kWh/m² día, como criterio de diseño para un sistema autónomo se ha elegido el mes de peor radiación, la tabla de radiación para el emplazamiento es obtenido de la herramienta SWERA [24].

Donde F_s es el factor de seguridad de un 25 %, consumo Wh y radiación 4.6 kW/ m² día.

$$P = \frac{F_s * Consumo}{Radiacion} \quad (4)$$

De la ecuación anterior, y teniendo en cuenta que la potencia del generador P debe ser de 20 W, se despeja el consumo obteniendo 73,6 Wh. día) (74 Wh. día). El factor de seguridad de un 25 % es para compensar las pérdidas en baterías y otros componentes. Se establece la capacidad de la batería mínima con la ecuación (5).

$$Cbateria = \frac{Consumo * diasdeautonomia}{PD * V} \quad (5)$$

Donde PD es la profundidad de descarga de la batería y V es el voltaje del generador

$$Cbateria = \frac{74 * 1}{0,8 * 12} = 7,7A/h \quad (6)$$

La batería obtenida para cada sistema es de 7.7 A/h, por lo que se ha seleccionado un valor comercial de 10 A/h cada una, cubriendo de esta forma la autonomía considerada de un día.

3.2. Sistema de adquisición de datos

Con el propósito de medir las variables de temperatura y humedad en cada uno de los módulos, al igual que los voltajes y corrientes suministrados a la carga (Figura 3) para estimar la potencia, se implementó un sistema de adquisición de datos [25] que permite guardar las variables medidas en un archivo *datalogger* con extensión CSV. En el sistema de adquisición de datos se empleó la tarjeta Arduino Mega 2560 R3, la cual cuenta con suficientes entradas analógicas y pines digitales, cuatro módulos sensores de voltaje con un rango de detección entre 0.02445V a 25V, cuatro sensores de corriente ACS712 de rango de medición disponible hasta 20 A y dos sensores de temperatura y humedad DHT11, estos sensores miden las corrientes y voltajes tanto del módulo como en la carga, y en el caso del sensor DHT11 proporcionó el dato de temperatura sobre cada módulo fotovoltaico.

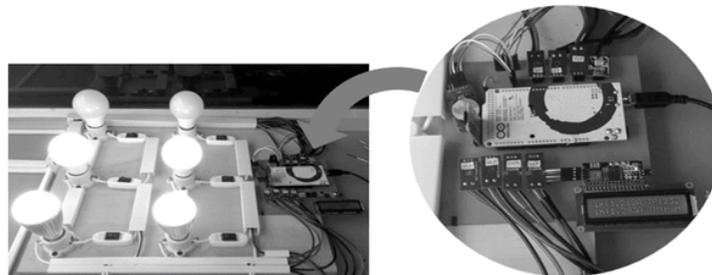
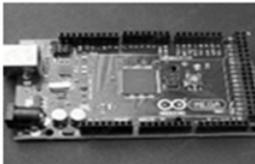
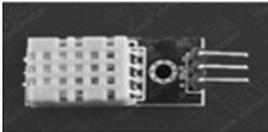
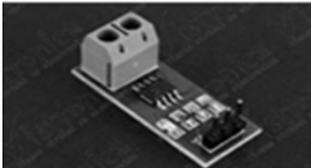


Figura 3. Vista del sistema en funcionamiento.

Con el fin de obtener mayor claridad en la medición de las variables, se utilizó un módulo reloj de la precisión RTC DS3231 para conocer la fecha y la hora exacta de la toma de los datos, así como también un módulo lector de micro SD para el almacenamiento de los registros en una base de datos que permitiera su posterior análisis; por otra parte, las mediciones de los niveles radiación y temperatura ambiente se hicieron de forma manual, los datos fueron adquiridos durante los meses de marzo, abril y mayo de 2018, con un promedio de ocho horas y en condiciones climáticas diferentes: días nublados y otros claros. Se ha incluido un solarímetro para medir la irradiación del lugar. En la Tabla III se resumen los instrumentos utilizados.

Tabla III. Dispositivos de medida usados en la etapa de instrumentación.

Equipo	Especificaciones	Vista
Arduino	Placa Arduino mega 2560 R3.	
Sensor de temperatura y humedad	Sensor DHT11 de temperatura: 100K 1 % termistor. Sensor de humedad: HR202 resistencia a la humedad. Voltaje de operación: 3V~5.5V.	
Sensor de voltaje	Rango de entrada de voltaje: 0V ~25V. Rango de detección de voltaje: 0.02445V ~25V. Resolución analógica de tensión: 0.00489V.	
Sensor de corriente	Voltaje de alimentación: 5V. Máximo voltaje inverso: 0.1V. Corriente de salida: 3mA (Fuente) 10mA (inversa). Voltaje de salida: 0V~5V. Rangos disponibles (Capacidad de corriente): 20 ^a	
Solarímetro	SM206. Medidor de radiación. 0.1-399.9 W/m ² , 1-3999 W/m ² .	

Fuente: elaboración propia

4. Resultados y Discusión

Dentro de este estudio se ha tenido en cuenta el rendimiento energético de dos módulos, uno monocristalino y otro policristalino, bajo diferentes condiciones de carga y con condiciones climáticas al aire libre; los dos sistemas son de igual potencia pico (20 W). Para este análisis se han tenido en consideración los datos proporcionados por el IDEAM [26] sobre temperatura promedio en la ciudad de Fusagasugá (Figura 4). Se obtuvieron temperaturas medias entre los 15,2° mínimo y 21,8° máximo.

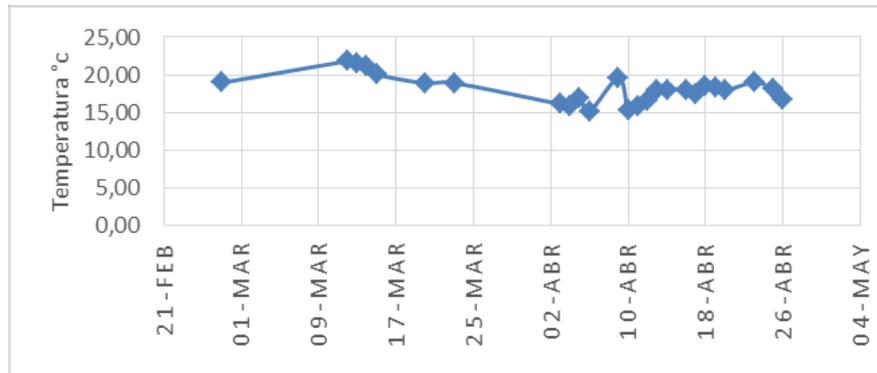


Figura 4. Temperatura promedio de Fusagasugá.

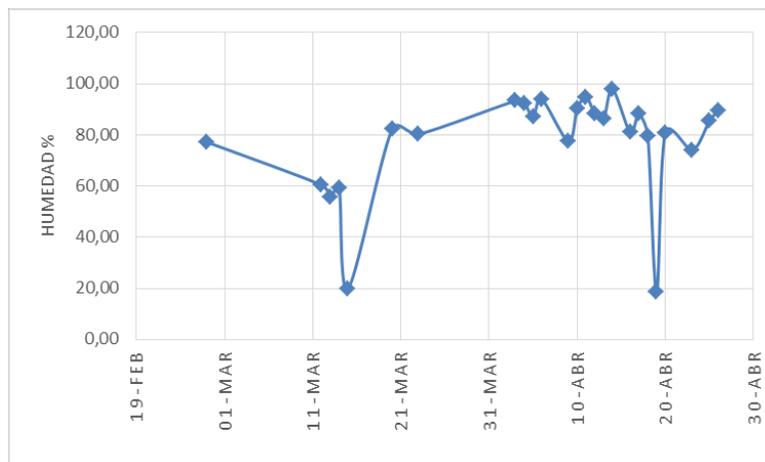


Figura 5. Humedad relativa promedio de Fusagasugá.

En cuanto a la temperatura del aire, esta se mantuvo en un promedio de 18,11°C, teniendo un máximo de temperatura de 21,8 °C y 19,61 °C los días 12 marzo y 9 de abril y una reducción durante el mes de abril con temperaturas mínimas de hasta 15,2 °C los días 6 y 10 de abril.

En cuanto a datos de humedad relativa, se pueden observar en la Figura 5; los datos para el municipio de Fusagasugá durante el tiempo de toma de datos tienen un promedio del 77 %, en la gráfica se pueden evidenciar dos días de baja humedad que son los días 15 de marzo y 19 de abril, con un valor de 19,98 % y 18,48 % respectivamente, y el de mayor humedad el día 14 de abril con 97,80 %.

La variación de la temperatura de cada módulo y la temperatura ambiente se diferencian en forma notoria debido a la producción de calor generada por el proceso fotovoltaico (Figura 6); como se expone en [9], la mayoría de radiación que impacta sobre una celda solar no es convertida a electricidad, sino que se convierte en calor, aumentando de esta manera la temperatura propia del módulo, tal y como ha sido expuesto por otros autores en [27].

Algunos estudios preliminares muestran la relación inversa entre la humedad relativa y la eficiencia de los módulos fotovoltaicos [28], el aumento de los niveles de humedad disminuye la corriente y el voltaje de salida de los módulos y, en consecuencia, la potencia de salida, lo anterior se debe a que entre mayor sea la cantidad de humedad en el aire, mayor será la cantidad de vapor de agua presente; las partículas del vapor de agua producen absorción, reflexión (difusa y no difusa), refracción y colisión de las partículas de radiación solar, esto puede resultar en la reducción de la radiación solar [29].

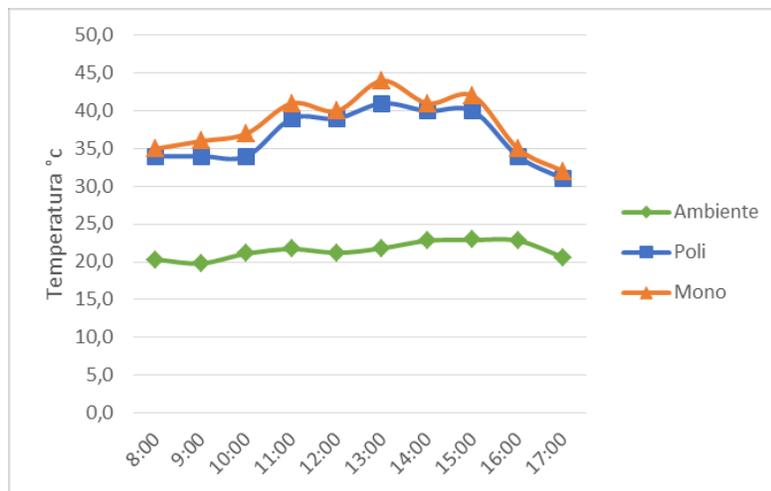


Figura 6. Comparativo de temperatura alcanzada por cada módulo vs temperatura ambiente (5 de abril).

En la Figura 7 se observa cómo la potencia de los módulos fotovoltaicos disminuye cuando los niveles de humedad aumentan, el caso del día 15 de marzo donde la humedad fue de 19,9 %, la potencia del módulo monocristalino fue de 10,4 W y del policristalino de 13,1 W, en tanto que el día 14 de abril, cuando la humedad estaba en 97,8 %, la potencia de los módulos disminuyó en 4,87 W y 3,13 W en el módulo policristalino y monocristalino respectivamente.

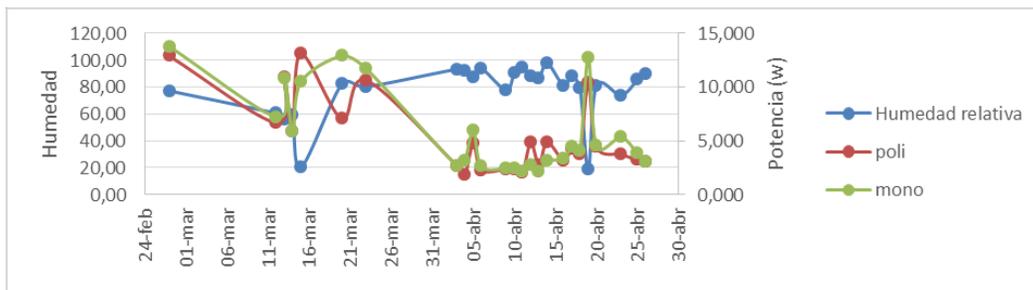


Figura 7. Humedad relativa vs potencia entregada por cada módulo.

En la Figura 8 se observa la potencia generada por los dos sistemas con respecto a la temperatura ambiente, sin embargo, es claro que todas las celdas solares tienen un coeficiente de pérdidas por temperatura, los resultados muestran un desempeño similar para el mes observado.

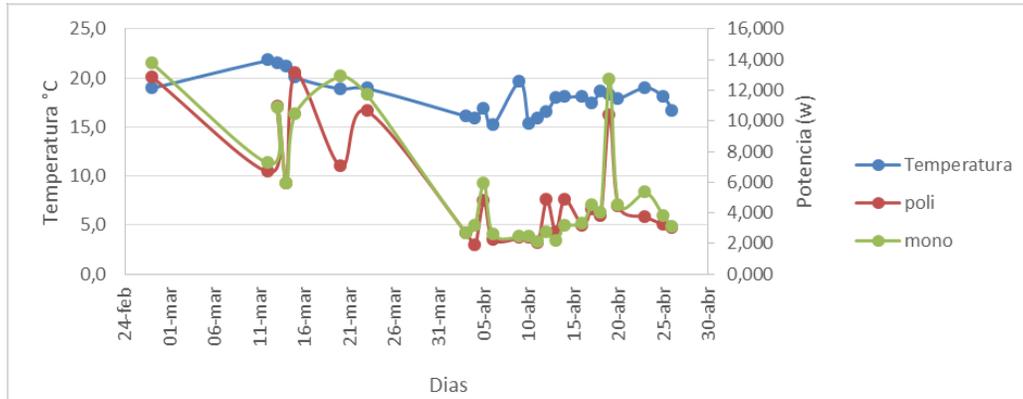


Figura 8. Temperatura ambiente vs potencia entregada por cada módulo.

En la Figura 9 se ha seleccionado el día 25 de abril para observar la variación de temperatura del módulo es solares y la temperatura ambiente, la temperatura de los módulos es fue obtenida desde las 8 am hasta las 16 pm, con una frecuencia de tres segundos, es decir, veinte muestras por minuto. Se observan temperaturas cercanas a los 40°, ambos módulos son en horas cercanas a medio día.

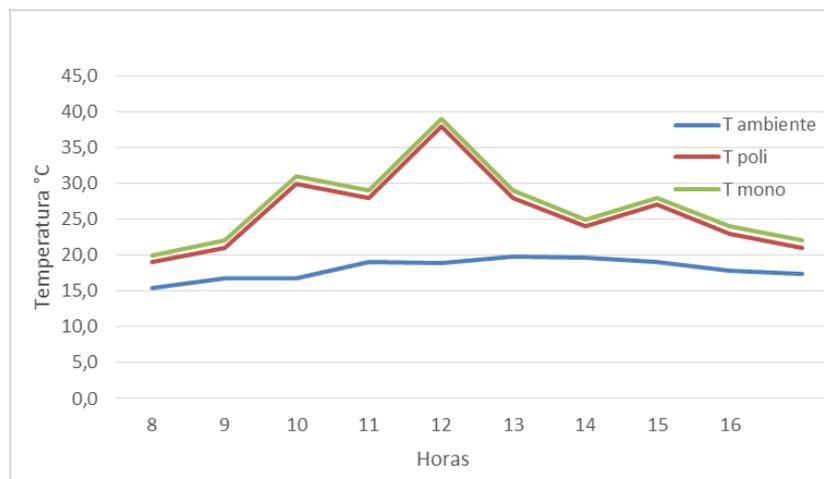


Figura 9. Comparativa temperatura de los módulos y temperatura ambiente.

La irradiancia es otro parámetro que se tuvo en cuenta para evaluar el desempeño de ambos módulos, en la Figura 10 se presenta una curva comparativa de la potencia entregada versus irradiancia para el día 26 de abril, con una carga nominal de 7 W se observa un mejor desempeño de la tecnología monocristalina, salvo en el intervalo entre la 1 y 2 pm donde presentó prácticamente los mismos resultados de potencia para un caso de irradiancia muy baja.

Para verificar el funcionamiento de los módulos fotovoltaicos con carga se obtuvo la Figura 11, en este caso la prueba se hizo con una carga led de 7 W, en los resultados se subrayan mejores prestaciones del módulo monocristalino en el intervalo de tiempo analizado. Esta mayor de potencia



Figura 10. Curva de potencia suministrada para una carga de 7 W.

de salida también se traduce en mayor eficiencia, ya que ambos paneles solares tienen la misma área y potencia teórica al ser la eficiencia igual, $n = P_{sal} / P_{ent}$, para una misma potencia de entrada el factor de conversión a potencia útil P_{sal} hace que la eficiencia sea mayor.

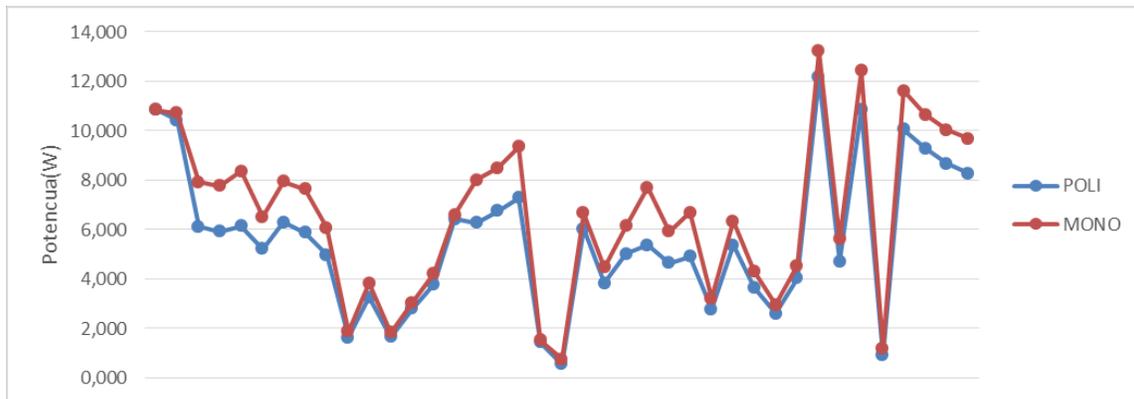


Figura 11. Curva característica de potencia con carga de 7 W (mes de abril).

Para comparar variaciones de carga y salida de potencia de los dos sistemas se realizaron variaciones de carga, se obtuvo una gráfica como la presentada en la Figura 12 para un día soleado como fue el 9 de abril, donde se observa un mejor desempeño del módulo monocristalino, esto se diferencia de forma notoria al aumentar la potencia demandada por la carga (14 W), la diferencia es de 1,9 W.

5. Conclusiones y Recomendaciones

En este trabajo se ha estudiado en forma comparativa el desempeño de dos módulos fotovoltaicos, uno monocristalino y otro policristalino, bajo las condiciones climáticas de Fusagasugá. La comparación ha sido realizada implementando dos sistemas fotovoltaicos autónomos de similares características de carga.

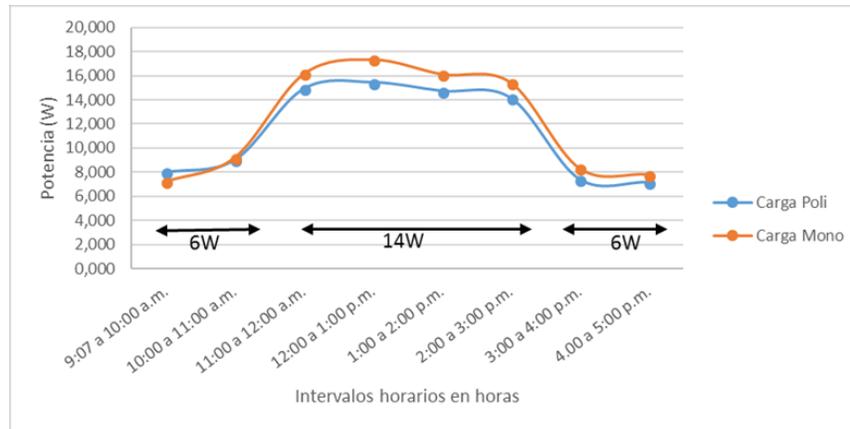


Figura 12. Curva característica de potencia con carga de 7 W (mes de abril).

En cuanto a la temperatura de los módulos, esta estuvo casi siempre por encima de la temperatura ambiente debido al calor producido durante el proceso fotovoltaico; sin embargo, la temperatura decae en las horas de la tarde, de igual manera que la salida de potencia de los módulos, aunque no se observaron pérdidas importantes por temperatura.

Se demostró que la humedad relativa tiene una influencia en el desempeño de los módulos fotovoltaicos, esto debido a factores de reflexión y refracción que afectan los niveles de radiación, trae como consecuencia una disminución de la potencia que entrega cada módulo fotovoltaico. Los resultados evidencian una correlación inversa entre los valores de humedad relativa y corriente suministrada por cada módulo fotovoltaico, los incrementos en los valores de humedad relativa causan una disminución en la corriente y, por ende, en la potencia de salida.

Se evidencia un mejor desempeño del módulo monocristalino ante variaciones de carga con una diferencia cercana las 2 W respecto al módulo policristalino, esta diferencia se hizo más notoria cuando la carga fue de 14 W nominales y menos notoria para cargas de 6 W.

Al presentar el módulo monocristalino mayor potencia de salida para una misma potencia de entrada que el panel policristalino, la eficiencia que relaciona la potencia de salida sobre la potencia de entrada también es mayor.

Se observa un rendimiento energético con características similares en las dos tecnologías ante variaciones de irradiancia y temperatura, esta tendencia se marca de forma notoria al aumentar la carga conectada a los dos sistemas. Los resultados de este estudio pueden ayudar a predecir las características de salida del sistema fotovoltaico autónomo, principalmente cuando cambian las condiciones atmosféricas, como la temperatura, humedad y la irradiancia, las cuales permitirán a los ingenieros mejorar sus diseños en términos técnicos, operativos y financieros.

Los resultados presentados en este trabajo corresponden a una comparación preliminar de las tecnologías monocristalina y policristalina en módulos fotovoltaicos comerciales, por consiguiente, se recomienda para trabajos similares realizar pruebas durante periodos más prolongados de tiempo en latitudes similares a la del municipio de Fusagasugá, con mediciones más exactas y teniendo en

cuenta variaciones importantes de radiación solar que permitan resultados concluyentes respecto a este parámetro.

Referencias

- [1] International Energy Agency, “Energy Access Outlook 2017. From Poverty to Prosperity” Paris, 2017. ↑50
- [2] International Energy Agency, “IEA sees great potential for solar, providing up to a quarter of world electricity by 2050”, 2010. ↑50
- [3] Ministerio de Minas y Energía, “Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia”, 2015. ↑50
- [4] M. Fuentes, G. A. J. Nofuentes, D. Talavera and M. Castro, “Application and validation of algebraic Methods to predict the behavior of crystalline silicon PV modules in Mediterranean climates”, *Solar Energy*, vol. 81, no. 11, pp. 1396-1408, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.12.008> ↑51
- [5] P. Villar, *Energía solar fotovoltaica*. Madrid: Ediciones Roble S.L, 2010. ↑51
- [6] J. Perko, M. Znidarec and D. Topic, “Comparative Analysis of Electricity Production from Different Technologies of PV Modules”, in *10TH International Conference on Sustainable Energy and Environmental Protection*, Bled, 2017. <https://doi.org/10.18690/978-961-286-061-5.33> ↑51
- [7] N. Amin, C. W. Lung and K. Sopian, “A practical field study of various solar cells on their performance in Malaysia”, *Renewable Energy*, vol. 34, no. 8, pp. 1939-1946, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.12.005> ↑51
- [8] K. Akhmad, A. Kitamura, F. Yamamoto, H. Okamoto, H. Takakura and Y. Hamakawa, “Outdoor performance of amorphous silicon and polycrystal- line silicon PV modules”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 46, no. 3, pp. 209-218, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(97\)00003-2](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(97)00003-2) ↑51
- [9] M. Anser Bashir, M. A. Hafiz, S. I Khalil, A. Muzaffar and A. Maryam Siddiqui, “Comparison of performance measurements of photovoltaic modules during winter months in Taxila, Pakistan”, *International Journal of Photoenergy*, vol. 2014, 2014. ↑51, 58
- [10] P. Singh, S. N. Singh, Lal and M. Husain, “Temperature dependence of I-V characteristics and performance parameters of silicon solar cell”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 92, no. 2, pp. 1611-1616, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2008.07.010> ↑51
- [11] S. Rehman and I. El-Amin, “Performance evaluation of an off grid photovoltaic system in Saudi Arabia”, *Energy*, vol. 46, pp. 451-458, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.08.004> ↑51
- [12] C. Wen, C. Fu, J. Tang, D. S. Liu and Z. Xing, “The influence of environment temperatures on single crystalline and polycrystalline silicon solar cell performance”, *Physics, Mechanics and Astronomy*, vol. 55, no. 2, pp. 235-241, 2012. <https://doi.org/10.1007/s11433-011-4619-z> ↑51
- [13] Y. K. Sanusi, G. R. Fajinmi and E. B. Babatunde, “Effects of ambient temperature on the performance of a photovoltaic solar system in a tropical area”, *The Pacific Journal of Science and Technology*, vol. 12, no. 2, pp. 176-180, 2011. ↑51
- [14] M. Mani y R. Pillai, “Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: research status, challenges and recommendations”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 9, pp. 3124-3131, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.065> ↑51
- [15] H. Jiang, L. Lu and K. Sun, “Experimental investigation of the impact of airborne dust deposition on the performance of solar photovoltaic (PV) module”, *Atmospheric Environment*, vol. 45, no 25, pp. 4299-4304, 2011. ↑51
- [16] M. M, N. G, C. Muselli M y P. P, «Calculation of the polycrystalline PV module temperature using a simple method of energy balance, » *Renewable Energy*, vol. 31, pp. 553-567, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.03.010> ↑52
- [17] D. M. K. Mustapha I., M. B. U. and M. Abbagana, “Performance evaluation of polycrystalline solar photovoltaic module in weather conditions of Maidiuguri, Nigeria”, *Arid Zone Journal of Engineering, Technology and Environment*, vol. 9, pp. 69-81, 2013. ↑52
- [18] A. Taşcıoğlu and O. V. A. Taşkın, “A Power Case Study for Monocrystalline and Polycrystalline Solar Panels in Bursa City, Turkey”, *International Journal of Photoenergy 2016*, 2016. ↑52

- [19] C. Kalu, I. A. Ezenugu and A. Mfonobong Umoren, “Comparative Study of Performance of Three Different Photovoltaic Technologies”, *Mathematical and Software Engineering*, vol. 2, no. 1, pp. 19-29, 2016. ↑52
- [20] J. Barbosa Urbano, *Estudio comparativo entre variables fotovoltaicas de dos sistemas de paneles solares (monocristalino y policristalino) en Bogotá*, Tesis de maestría, Universidad Sergio Arboleda, Bogotá, 2013. ↑52
- [21] B. R. Martínez, *Estimación de la eficiencia de un sistema de energía eléctrica basado en paneles solares considerado variables ambientales en la ciudad de Bogotá*, Tesis de maestría, Universidad Santo Tomás, Bogotá, 2017. ↑52
- [22] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Atlas Interactivo. [En línea]. Disponible en: <https://atlas.ideam.gov.co/visorA-tlasRadiacion.html> ↑53
- [23] NASA Power, “Prediction of Worldwide Energy Resources”, [En línea]. Disponible en: <https://power.larc.nasa.gov/> ↑54
- [24] Powered by Open EI, “Solar and Wind Energy Resource Assessment” 2018. [En línea]. Disponible en: <https://openei.org/apps/SWERA/> ↑55
- [25] B. Soumiaa, M. K. Nallapanenib and T. Alia, “Data acquisition system: On the solar photovoltaic module and weather parameters monitoring”, *Procedia Computer Science*, vol. 132, pp. 873-979, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.05.099> ↑55
- [26] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. [En línea]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/> ↑57
- [27] S. Benlebna, N. M. Kumar and A. Tahri, “Data acquisition system: On the solar photovoltaic module and wheatear parameters monitoring”, in *International Conference on Computational Intelligence and Data Science (ICCIDS)*, Gurgaon, 2018. ↑58
- [28] H. A. Kazem, M. T. Chaichan, H. S. Al-Saidi, H. S. Al-Rubkhi and A.-R. Jamila, “Effect of Humidity on the PV Performance in Oman”, *Asian Transactions on Engineering*, vol. 2, 2014. ↑58
- [29] J. Amajama y D. E. Oku, “Effect of Relative humidity on Photovoltaic panels’ Output and Solar Illuminance/Intensity”, *Journal of Scientific and Engineering Research*, vol. 3, no. 4, pp. 126-130, 2016. ↑58

Luisa Fernanda Sanabria Pérez

Nació en Ciudad de Bogotá D.C. Es ingeniera electrónica de la Universidad de Cundinamarca, sede Fusagasugá. Semillerista del semillero SIAMEL del grupo de investigación GIGATT del programa de Ingeniería electrónica. Correo electrónico: lfsanabria@ucundinamarca.edu.co

Luz Angela Cruz Pardo

Nació en Ciudad de Fusagasugá. Es ingeniera electrónica de la Universidad de Cundinamarca, sede Fusagasugá. Perteneció al semillero SIAMEL del grupo de investigación GIGATT del programa de Ingeniería electrónica. Correo electrónico: langelacruz@ucundinamarca.edu.co

Yimy Edison García Vera

Nació en Ciudad de Manizales. Es ingeniero electricista de la Universidad Nacional sede Manizales. Magíster en Energías Renovables de la Universidad San Pablo CEU de Madrid España, y candidato a doctor en energías renovables eficiencia energética de la Universidad de Zaragoza (España). Actualmente es profesor asociado del programa de Ingeniería Electrónica de la Universidad de San buenaventura, sede Bogotá. Correo electrónico: yegarcia@usbog.edu.co

Carlos Humberto Montufar Benavides

Nació en Ciudad de Bogotá D.C. Es ingeniero electrónico de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas de Bogotá D.C. Magíster en Docencia Universitaria de la Universidad de La Salle. Actualmente se desempeña como profesor del programa de Ingeniería electrónica y es investigador del grupo GIGATT. Correo electrónico: cmontufar@ucundinamarca.edu.co