

# Comparación de eficiencias de conversión de energía en celdas fotovoltaicas de silicio monocristalino, policristalino y amorfo para mediciones meteorológicas de la ciudad Santiago de Cali.

Ángela Aguirre L., Diego Hernández B., Leiny Ordoñez A., Lisbeth Martínez O.

Universidad Santiago de Cali

Calle 5 No.62-00, Bloque 4, Piso 3, Oficina 4303, Barrio Pampalinda, Cali, Valle del Cauca

Teléfono: (2) 5183000, ext. 320. Correo electrónico: lisbethortega7@gmail.com

## Resumen:

Este trabajo tiene como objetivo investigar el grado de eficiencia de conversión fotovoltaica que tienen los paneles solares de silicio monocristalino, policristalino y amorfo, utilizando mediciones dinámicas meteorológicas realizadas en la ciudad Santiago de Cali. La metodología propuesta consiste en comparar modelos de desempeño de conversión fotovoltaica de diferentes autores a través de una simulación numérica, para determinar la relación que existe entre la temperatura de la celda y la eficiencia de conversión fotovoltaica. Se demostró que existe una relación inversamente proporcional entre la temperatura de la celda y la eficiencia de conversión fotovoltaica, indicando que, a mayor temperatura de la celda, la eficiencia de conversión de energía es menor.

**Palabras claves:** energía solar, mediciones meteorológicas, conversión fotovoltaica, modelos de desempeño, eficiencia de conversión fotovoltaica, temperatura de la celda.

## Abstract:

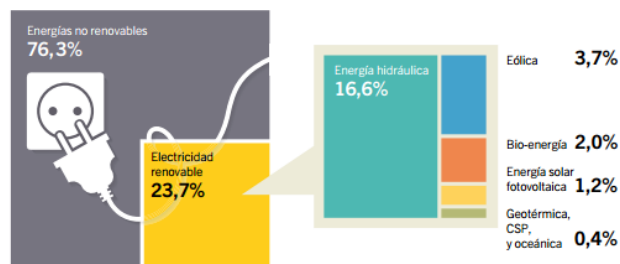
The goal of this research is obtain the efficiency degree of photovoltaic conversion within monocrystalline, polycrystalline and amorphous silicon solar panels, by using meteorological dynamic measurements taken in the city Santiago de Cali. The proposed methodology is to compare models of photovoltaic conversion performance from different authors through a numerical simulation, in order to obtain the relationship between the temperature of the cell and the efficiency of photovoltaic conversion. It was demonstrated that there is an inverse relationship between the temperature of the cell and the efficiency of photovoltaic conversion, indicating that the higher temperature of the cell is, the lower energy conversion efficiency is.

**Keywords:** solar energy, meteorological measurements, photovoltaic conversion, performance models, efficiency of photovoltaic conversion, temperature of the cell.

## 1. INTRODUCCIÓN

La participación de las energías no renovables en la producción de electricidad a nivel mundial

corresponde al 76,3% comparado con las energías renovables que aportan un 23,7%, del cual la energía solar fotovoltaica solo genera 1,2% [8].



**Figura 1.** Participación estimada de energía renovable en la producción de electricidad a nivel mundial, finales de 2015

Fuente: REN21, 2016

En un informe realizado por el Sistema de Información Eléctrico Colombiano, se reflejó que en enero del 2015, el país tenía como principal fuente de abastecimiento a la energía hidráulica con una capacidad de 10919,8 MW (Megavatios), correspondiente al 70,41% del total de la matriz energética, por su parte, la sumatoria de las energías renovables lograron una capacidad de 90,7 MW, con una participación del 0,59% dentro de la matriz [10].

La dependencia de Colombia por las hidroeléctricas se ha convertido en un problema debido a los

constantes cambios que tiene el recurso hídrico con respecto a Fenómenos del Niño y la Niña; además, la infraestructura que requiere una hidroeléctrica ha llevado al desalojo de comunidades enteras y a la pérdida de sus patrones culturales; no obstante, la red energética que el país posee no es suficiente para abastecer todo el territorio, lo cual se pudo observar a principios del presente año donde se vivió una crisis energética en la que Colombia tuvo que recurrir a Ecuador para abastecerse de este servicio.

En Colombia es importante que se realicen estudios reales y cuantitativos que faciliten la inclusión de la energía solar fotovoltaica como energía renovable emergente y complementaria para así diversificar la matriz energética nacional.

Las investigaciones de las mediciones meteorológicas ó solarimétricas es un nuevo tema de interés tanto a nivel internacional como nacional. En el año 2014, investigadores de la Pontificia Universidad Católica de Río de Janeiro realizaron un estudio a 11 ciudades de Brasil que representaban las mejores radiaciones solares con respecto al resto de ciudades de ese país, con el fin de evaluar la generación de energía solar fotovoltaica por medio de la comparación entre los datos horarios y mensuales de las condiciones solarimétricas [5].

En Colombia están comenzando las investigaciones relacionadas con este tipo de mediciones meteorológicas. Prueba de ello es el trabajo realizado y publicado este año por investigadores de la Universidad del Cauca, donde se planteó un modelo matemático para simular e implementar un sistema fotovoltaico autónomo teniendo en cuenta los modelos de desempeño y condiciones solarimétricas [7]; parámetros que fueron usados también para el desarrollo de la presente investigación.

La intención de esta investigación es dar a conocer a las partes interesadas (Gobierno Nacional, Inversionistas nacionales y extranjeros, Comunidad Científica, Empresas públicas y privadas, Comunidad en general), las ventajas energéticas que se obtienen a la hora de simular un sistema de conversión de energía solar fotovoltaica que utiliza las tecnologías de silicio monocristalino, policristalino y amorfo, teniendo en cuenta las mediciones horarias de las condiciones solarimétricas entregadas por estaciones meteorológicas pertenecientes a la Red

Meteorológica Automatizada del Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia (CENICAÑA), ubicadas en la periferia de la ciudad de Santiago de Cali, y a su vez demostrar cuál es el tipo de relación que existe entre la temperatura de la celda fotovoltaica respecto a la eficiencia de conversión del panel fotovoltaico.

## **2. TEMPERATURA DE LA CELDA FOTOVOLTAICA Y EFICIENCIA DE CONVERSIÓN DE ENERGÍA**

### **2.1. Tecnologías de paneles fotovoltaicos**

**2.1.1. Tecnología de Silicio Monocristalino:** El silicio monocristalino (mono-Si) cuenta con una estructura cristalina uniforme que indica una alta pureza en silicio. Estos paneles tienen las mayores tasas de eficiencia de conversión fotovoltaica, obteniendo como ventaja el mayor rendimiento frente a otras tecnologías gracias a su habilidad de convertir la mayor cantidad de energía solar a eléctrica, su eficiencia al momento de conversión de luz solar en electricidad es de  $25,6 \% \pm 0,5 \%$  [2].

**2.1.2. Tecnología de Silicio Policristalino:** El silicio es el principal componente de fabricación de los paneles policristalinos, gracias a dicho material se alcanzan eficiencias hasta de  $20,8\% \pm 0,5\%$ , [2] porcentaje que se ha duplicado desde 1990 [9]. Aunque no es el tipo de panel que mayor energía convierte, es el más vendido gracias a sus precios favorables en el mercado.

**2.1.3. Tecnología de Silicio Amorfo:** Los paneles de silicio amorfo son paneles basados en silicio, pero a diferencia de los paneles de silicio monocristalino y policristalino este material no sigue una estructura cristalina, es decir que en el caso del silicio amorfo las partículas se agrupan al azar [3]. La tecnología de silicio amorfo o de película delgada tiene una eficiencia de  $10,5\% \pm 0,3\%$  según las tablas de eficiencia de la célula solar [2].

### **2.2. Modelos matemáticos de la temperatura de celda fotovoltaica**

La simulación numérica implementada usó los siguientes modelos de conversión fotovoltaica para calcular la temperatura de la celda fotovoltaica:

**2.2.1. Modelo de Duffie & Beckman:** representado por la ecuación (1), determina la temperatura de la celda fotovoltaica, en condiciones de operación nominal NOCT (radiación solar de 800 W/m<sup>2</sup>, velocidad del viento de 1 m/s y temperatura ambiente de 20 °C, en ausencia de carga externa ( $\eta_c = 0$ )) [1].

$$T_c = [T_a + (T_{NOCT} - T_{a,NOCT}) * (\frac{G_T}{G_{T,NOCT}}) (1 - \frac{\eta_c}{0.9})] \quad (1)$$

Donde,  $T_a$ : temperatura ambiente;  $T_{NOCT}$ : temperatura del módulo fotovoltaico en las condiciones NOCT;  $T_{a,NOCT}$ : temperatura ambiente en las condiciones NOCT (20 °C);  $G_T$ : radiación solar incidente del lugar donde el panel se encuentra instalado;  $G_{T,NOCT}$ : radiación solar incidente en las condiciones NOCT (800 W/m<sup>2</sup>);  $V$ : velocidad del viento del lugar donde el panel se encuentra instalado;  $\eta_c$ : eficiencia del módulo fotovoltaico.

**2.2.2. Modelo de Gilbert Masters:** utiliza la ecuación (2) para determinar la temperatura de la celda fotovoltaica [6].

$$T_c = T_a + (\frac{T_{NOCT} - T_{a,NOCT}}{G_{T,NOCT}}) * G_T \quad (2)$$

Donde,  $T_a$ : temperatura ambiente;  $T_{NOCT}$ : temperatura del módulo fotovoltaico en las condiciones NOCT;  $T_{a,NOCT}$ : temperatura ambiente en las condiciones NOCT (20 °C);  $G_{T,NOCT}$ : radiación solar incidente en las condiciones NOCT (800 W/m<sup>2</sup>);  $G_T$ : radiación solar incidente del lugar donde el panel se encuentra instalado.

**2.2.3. Modelo de David King, William Boyson, Jay Kratochvill:** utiliza la ecuación (3) para determinar la temperatura de la celda fotovoltaica; en este modelo los autores entregan los valores de  $a$ ,  $b$  y  $\Delta T$  para diferentes tipos de montaje y módulos fotovoltaicos [4].

$$T_c = [G_T * \{e^{a+b \cdot V}\} + T_a] + \frac{G_T}{G_{ref}} * \Delta T \quad (3)$$

Donde,  $G_T$ : radiación solar incidente del lugar donde el panel se encuentra instalado.  $a$ : coeficiente determinado empíricamente que establece el límite superior para el módulo de temperatura a bajas velocidades de viento y alta radiación solar;  $b$ : coeficiente determinado empíricamente que establece la velocidad a la que la temperatura del

módulo aumenta;  $V$ : velocidad del viento del lugar donde el panel se encuentra instalado;  $T_a$ : temperatura ambiente;  $G_{ref}$ : radiación solar de referencia del módulo fotovoltaico (1000 W/m<sup>2</sup>);  $\Delta T$ : diferencia entre la temperatura de la celda y la superficie posterior del módulo fotovoltaico, para un nivel de radiación de 1000 W/m<sup>2</sup>.

**2.3. Eficiencia en el punto de máxima potencia**  
Se hará uso de la ecuación (4) para encontrar la eficiencia en el punto de máxima potencia [1].

$$\eta_{mp} = \eta_{mp,ref} + \mu\eta,mp(T_c - T_{ref}) \quad (4)$$

Donde,  $\eta_{mp}$ : eficiencia de conversión de energía;  $\eta_{mp,ref}$ : eficiencia de conversión del panel solar fotovoltaico;  $\mu\eta,mp$ : coeficiente de temperatura;  $T_c$ : temperatura de la celda entregada por los modelos de desempeño;  $T_{ref}$ : temperatura de referencia entregada por el fabricante de paneles solares.

Los valores de referencia de la eficiencia de energía para cada tipo de tecnología usada en esta investigación, se presentan en la siguiente tabla [2]:

**Tabla 1.** Eficiencias de la célula solar

TIPO DE TECNOLOGIA	EFICIENCIA DE REFERENCIA
Silicio Monocristalino	25,6% ± 0,5%
Silicio Policristalino	20,8% ± 0,5%
Silicio Amorfo	10,5% ± 0,3%

Fuente: Green, Emery, Hishikawa, & Warta, 2015

## 2.4. Metodología

Usando las mediciones de radiación solar, temperatura ambiente y velocidad del viento de la estación meteorológica PTAR- Cali (Planta de tratamiento de aguas residuales), se organizó y depuró la base de datos en Microsoft Excel, teniendo como criterio de inclusión los datos horarios que presentaron mayor radiación solar, comprendidos entre las 8:00 h y las 17:00 h de cada día estudiado, por un periodo de tiempo correspondiente a un año (enero 2015 - enero 2016).

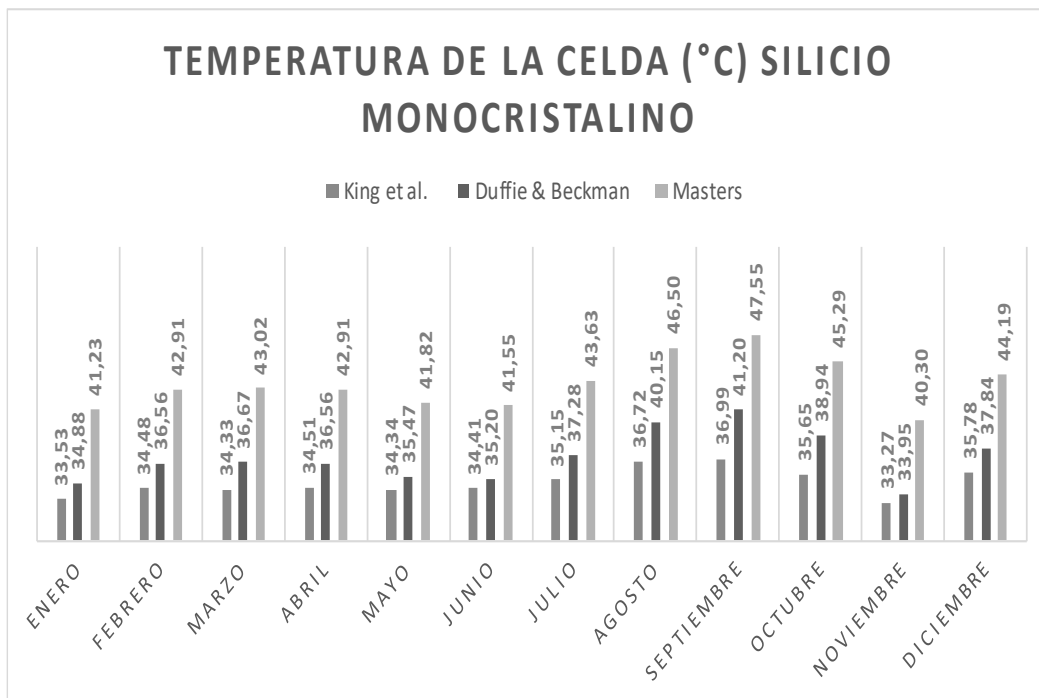
Se realizó la simulación numérica a partir de los modelos matemáticos ya mencionados para observar y analizar el tipo de relación que existe

entre  $T_c$  y  $\eta_{mp}$ . Estos modelos utilizaron i) condiciones solarimétricas que influyeron directamente en el cálculo de  $T_c$  y  $\eta_{mp}$  y ii) datos proporcionados por los fabricantes de paneles fotovoltaicos.

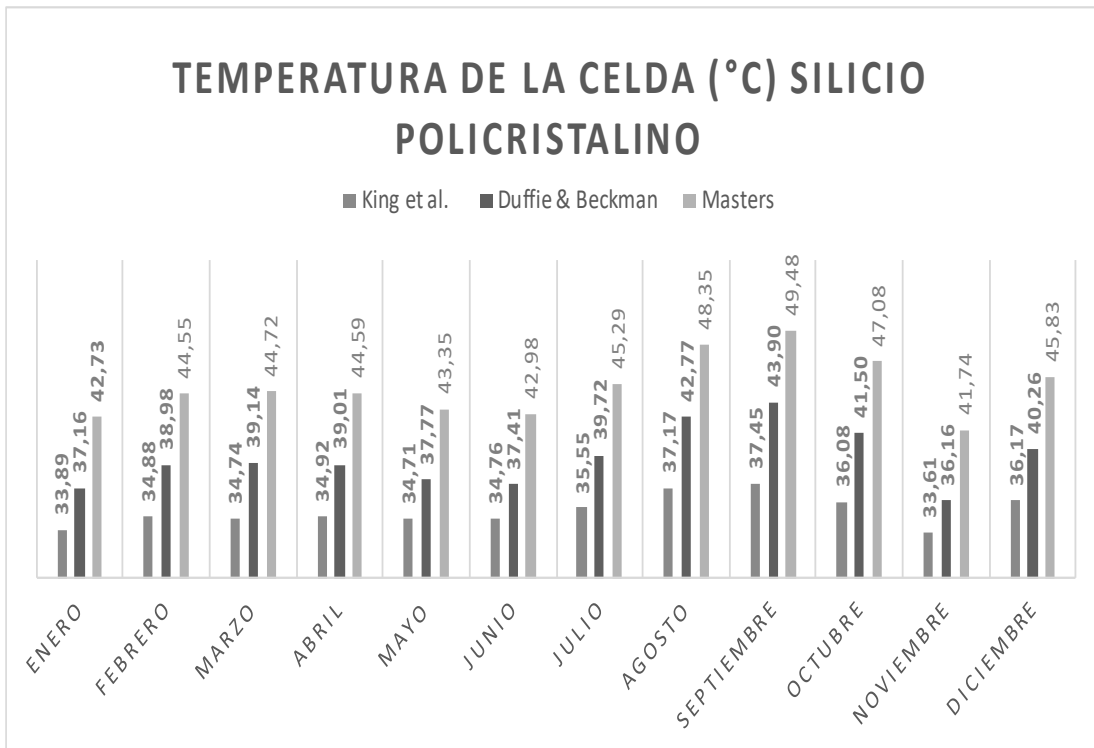
A continuación se muestran los gráficos correspondientes a los resultados obtenidos de la temperatura de la celda fotovoltaica ( $^{\circ}\text{C}$ ) para cada uno de los tres modelos de desempeño estudiados y para las tres tecnologías elegidas en la presente investigación:

### 3. Resultados

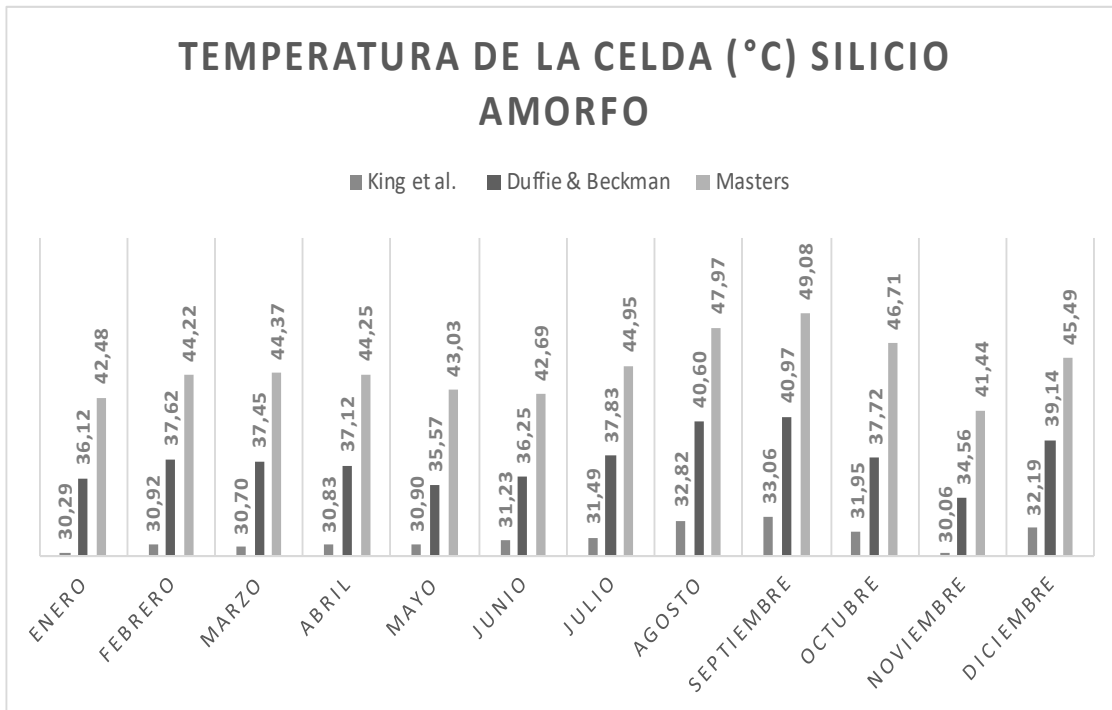
Se obtuvieron resultados que mostraron el comportamiento dinámico de un panel fotovoltaico que usa las tres tecnologías más utilizadas en el mercado de la energía solar.



**Gráfico 1.** Temperatura de la celda ( $^{\circ}\text{C}$ ) Silicio Monocristalino



**Gráfico 2.** Temperatura de la celda (°C) Silicio Policristalino

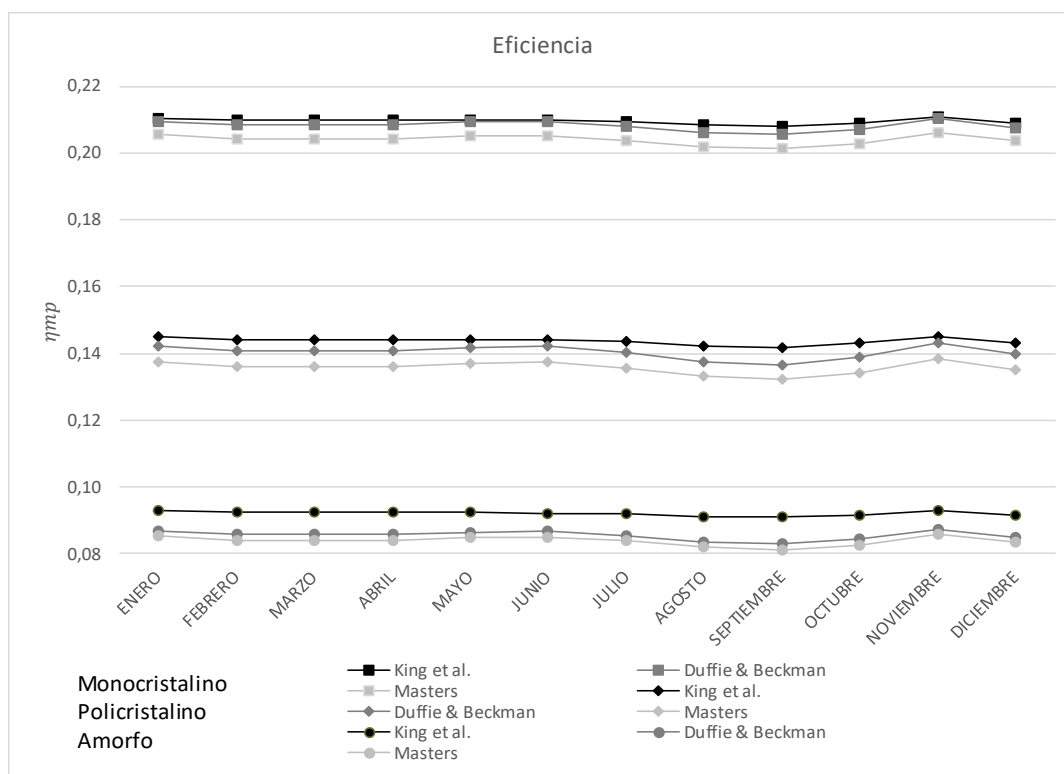


**Gráfico 3.** Temperatura de la celda (°C) Silicio Amorfo

**Tabla 2.** Temperatura de la celda (°C) Silicio Monocristalino, Policristalino, Amorfo

TEMPERATURA DE LA CELDA									
Mes	MONOCRISTALINO			POLICRISTALINO			AMORFO		
	King et al.	D&B	Masters	King et al.	D&B	Masters	King et al.	D&B	Masters
Enero	33,53	34,88	41,23	33,89	37,16	42,73	30,29	36,12	42,48
Febrero	34,48	36,56	42,91	34,88	38,98	44,55	30,92	37,62	44,22
Marzo	34,33	36,67	43,02	34,74	39,14	44,72	30,70	37,45	44,37
Abril	34,51	36,56	42,91	34,92	39,01	44,59	30,83	37,12	44,25
Mayo	34,34	35,47	41,82	34,71	37,77	43,35	30,90	35,57	43,03
Junio	34,41	35,20	41,55	34,76	37,41	42,98	31,23	36,25	42,69
Julio	35,15	37,28	43,63	35,55	39,72	45,29	37,83	37,83	37,83
Agosto	36,72	40,15	46,50	37,17	42,77	48,35	32,82	40,60	47,97
Septiembre	36,99	41,20	47,55	37,45	43,90	49,48	33,06	40,97	49,08
Octubre	35,65	38,94	45,29	36,08	41,50	47,08	31,95	37,72	46,71
Noviembre	33,27	33,95	40,30	33,61	36,16	41,74	30,06	34,56	41,44
Diciembre	35,78	37,84	44,19	36,17	40,26	45,83	32,19	39,14	45,49

De igual manera, se presentan los resultados de la eficiencia de conversión de energía para los tres modelos de desempeño y las tecnologías en mención:



**Gráfico 4.** Eficiencia de conversión para las tecnologías de Silicio Monocristalino, Policristalino, Amorfo.

**Tabla 3.** Eficiencia de conversión para las tecnologías Silicio Monocristalino, Policristalino, Amorfo

EFICIENCIA DE CONVERSIÓN									
MONOCRISTALINO				POLICRISTALINO			AMORFO		
Mes	King et al.	D&B	Masters	King et al.	D&B	Masters	King et al.	D&B	Masters
Enero	0,2105	0,2096	0,2055	0,1448	0,1422	0,1377	0,0928	0,0869	0,0853
Febrero	0,2099	0,2085	0,2044	0,1440	0,1407	0,1363	0,0924	0,0858	0,0842
Marzo	0,2100	0,2084	0,2043	0,1442	0,1406	0,1361	0,0925	0,0857	0,0841
Abril	0,2098	0,2085	0,2044	0,1440	0,1407	0,1362	0,0924	0,0858	0,0842
Mayo	0,2100	0,2092	0,2051	0,1442	0,1417	0,1372	0,0924	0,0866	0,0850
Junio	0,2099	0,2094	0,2053	0,1441	0,1420	0,1375	0,0922	0,0868	0,0852
Julio	0,2094	0,2081	0,2039	0,1435	0,1401	0,1357	0,0920	0,0854	0,0838
Agosto	0,2084	0,2062	0,2021	0,1422	0,1377	0,1332	0,0912	0,0835	0,0819
Septiembre	0,2082	0,2055	0,2014	0,1420	0,1368	0,1323	0,0911	0,0829	0,0812
Octubre	0,2091	0,2070	0,2029	0,1431	0,1387	0,1342	0,0917	0,0843	0,0827
Noviembre	0,2106	0,2102	0,2061	0,1451	0,1430	0,1385	0,0929	0,0875	0,0859
Diciembre	0,2090	0,2077	0,2036	0,1430	0,1397	0,1352	0,0916	0,0851	0,0834

**Tabla 4.** Comparación de la eficiencia de conversión respecto al modelo de King et al. para las tecnologías Silicio Monocristalino, Policristalino, Amorfo. (%)

Comparación de la eficiencia de conversión respecto al modelo de King et al. (%)						
Mes	Monocristalino		Policristalino		Amorfo	
	King et al. - D&B	King et al. - Masters	King et al. - D&B	King et al. - Masters	King et al. - D&B	King et al. - Masters
Enero	0,41	2,37	1,81	4,91	6,31	8,05
Febrero	0,64	2,60	2,29	5,41	7,07	8,82
Marzo	0,72	2,68	2,46	5,57	7,31	9,06
Abril	0,63	2,59	2,29	5,41	7,14	8,89
Mayo	0,35	2,31	1,71	4,83	6,30	8,05
Junio	0,24	2,20	1,48	4,59	5,86	7,62
Julio	0,66	2,62	2,34	5,47	7,21	8,96
Agosto	1,07	3,04	3,17	6,33	8,40	10,18
Septiembre	1,31	3,28	3,66	6,82	9,01	10,78
Octubre	1,02	2,98	3,05	6,19	8,10	9,86
Noviembre	0,21	2,16	1,41	4,51	5,76	7,50
Diciembre	0,64	2,61	2,30	5,44	7,14	8,90
<b>Promedio</b>	<b>0,66</b>	<b>2,62</b>	<b>2,33</b>	<b>5,46</b>	<b>7,13</b>	<b>8,89</b>

#### 4. Discusión

De las gráficas obtenidas se puede inferir que para los tres modelos de desempeño con las mediciones de las condiciones solarimétricas de la ciudad Santiago de Cali y cada una de las tecnologías, se observa un comportamiento similar en la temperatura de la celda ( $T_c$ ), dado que el modelo de desempeño de King et al. presenta siempre una  $T_c$  menor respecto a los otros dos modelos, seguido por el modelo de Duffie & Beckman y finaliza el modelo de Masters donde se calcula una  $T_c$  mayor.

Así mismo se observa, que la temperatura de la celda para los tres modelos es mayor en el mes de septiembre y menor en el mes de noviembre.

Por su parte, la gráfica de la eficiencia de conversión de energía presenta resultados inversamente proporcionales a los de la temperatura de la celda (mayor eficiencia en noviembre y menor en septiembre), evidenciándose de esta manera la estrecha relación que existe entre estas dos variables. Es de anotar que la tecnología de silicio monocristalino presenta mayor eficiencia de conversión, seguida por la tecnología de silicio policristalino, y en tercer lugar está la tecnología de silicio amorfo.

La comparación se realizó con base en los resultados obtenidos con el modelo de King et al., ya que éste además de ser un modelo validado experimentalmente por sus autores al igual que el

modelo de Duffie & Beckman, fue el modelo de desempeño que presentó mayor eficiencia de conversión fotovoltaica, tal como se muestra en la tabla 4.

De la comparación realizada entre King et al. – Duffie & Beckman y King et al. – Masters, se obtuvo un promedio anual de 0,66% y 2,62% para la tecnología de silicio monocristalino, 2,33% y 5,46% para silicio policristalino y 7,13% y 8,89% para la tecnología de silicio amorfo respectivamente.

## Conclusiones

Como resultado de la investigación realizada, es posible concluir que existe una relación inversamente proporcional entre la temperatura de la celda calculada por los tres modelos de desempeño y la eficiencia de conversión, es decir que a mayor temperatura de la celda, la eficiencia de conversión de energía es menor.

Por otro lado, al comparar la gráfica de los tres tipos de tecnologías de paneles, se evidencia que para las condiciones solarimétricas de la ciudad Santiago de Cali, el panel de silicio monocristalino es el que mayor eficiencia de conversión de energía presenta, seguido del panel de silicio policristalino y finalmente, el panel de silicio amorfo, como se observó en los promedios obtenidos.

De los tres modelos de desempeño estudiados, King et. al, es el modelo que presenta menor temperatura de la celda y mayor eficiencia de conversión fotovoltaica, seguido por el modelo de Duffie & Beckman, y en último lugar el modelo de Masters.

## 5. Agradecimientos

A la Universidad Santiago de Cali y su Dirección General de Investigaciones (DGI) por la financiación del proyecto de investigación. De igual manera al Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia (CENICAÑA) por el suministro de mediciones meteorológicas de la ciudad Santiago de Cali.

## 6. Referencias

- [1] Duffie, J., & Beckman, W. (2006). *Solar Engineering of Thermal Processes* (4 ed.). New York: Jhon Wiley & Sons Inc.
- [2] Green, M., Emery, K., Hishikawa, Y., Warta, W., & Dunlop, E. (2015). Tablas de eficiencia de la célula solar. *Progress in Photovoltaics*, 805-812. Retrieved Febrero 2016, from <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pip.2637/full>.
- [3] Jimenez, D. (2010). Estudio y caracterización de paneles fotovoltaicos construidos con celdas solares de silicio monocristalino, policristalino y amorfo (Tesis de posgrado). México D.F: Escuela Superior de Física y Matemáticas. Obtenido de <http://tesis.bnct.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/10157/183.pdf?sequence=1>
- [4] King, D., Boyson, W., & Kratochvill, J. (2004). *Photovoltaic Array Performance Model*. New Mexico: Sandia National Laboratories.
- [5] Martínez, L., De Faro, O., & Frota, M. (2014). Use of monthly average solar radiation data for assessing the efficiency of a photovoltaic array. *International Journal of Metrology, Quality and Engineering*, 5 (2). DOI: <http://dx.doi.org/10.1051/ijmqe/2014008>
- [6] Masters, G. (2004). *Renewable and Efficient Electric Power Systems*. New Jersey: John Wiley & Sons Inc.
- [7] Obando, E., & Vargas, R. (2016). Desempeño de un sistema fotovoltaico autónomo frente a condiciones medioambientales de una región en particular. *Revista académica colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, XL(154), 27-33.
- [8] REN21, R. d. (2016). *Reporte de la situación mundial de las energías renovables 2016*. España.
- [9] Riba, C. (2012). *Recursos energéticos y crisis. El fin de 200 años irrepetibles*. Barcelona: Octaedro.
- [10] Sistema de Información Eléctrico Colombiano (2015). *Informe mensual de variables de generación y el Mercado eléctrico colombiano*. Bogotá. Obtenido de [http://www.siel.gov.co/portals/0/generacion/2015/Seguimiento\\_Variables\\_Enero\\_2015.pdf](http://www.siel.gov.co/portals/0/generacion/2015/Seguimiento_Variables_Enero_2015.pdf)