

Simulación computacional del desempeño de un sistema fotovoltaico acoplado generadores termoeléctricos y reflectores difusos de refuerzo

Computer simulation of the performance of a photovoltaic system by coupling thermoelectric generators and boost reflectors

D. Fuentes-Hernández ^a, R. Pérez-Vite ^b, F. Legorreta-García ^a, M. Vargas-Ramírez, ^a, E.A. Chávez-Urbiola ^c

^a Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

^b Área Académica de Matemáticas y Física, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

^c CONACyT-UAEH, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

Resumen

En el presente trabajo se muestra un estudio preliminar de la generación de energía en paneles de silicio monocristalino en cinco condiciones de operación: ASTM-G-173-03, 1000 W/m² sin enfriamiento, 1000 W/m² + generadores termoeléctricos (TEG), acoplamiento de un panel + reflector difuso de refuerzo y acoplamiento de un panel + reflector difuso de refuerzo + TEG. El estudio se realizó comparando los resultados obtenidos mediante la simulación computacional de estos sistemas en MatLab Simulink, donde se analizaron cinco variables de interés, irradiancia, temperatura de operación, diferencia de potencial, intensidad de corriente eléctrica y potencia generada, determinando la viabilidad de la integración de reflectores difusos de refuerzo fabricados a partir de una película de base cerámica a sistemas solares fotovoltaicos.

Palabras Clave:

Generadores termoeléctricos, reflector difuso de refuerzo, simulación de sistemas solares fotovoltaicos, radiación solar, temperatura de operación.

Abstract

In the present work a preliminary study of energy generation in monocrystalline silicon panels is shown in five operating conditions: ASTM-G-173-03, 1000 W/m² without cooling, 1000 W/m² + thermoelectric generators (TEG), coupling of a panel + reinforcing boost reflector and coupling of a panel + reinforcing boost reflector + TEG. The study was carried out comparing the results obtained through the computational simulation of these systems in MatLab Simulink, where five variables of interest were analyzed, irradiance, operating temperature, potential difference, intensity of electric current and generated power, determining the viability of the integration of boost reflector made from a ceramic-based film to photovoltaic solar systems.

Keywords:

Thermoelectric generators, boost reflector, solar photovoltaic systems simulation, solar radiation, operation temperature.

1. Introducción

El avance científico y tecnológico en el último siglo ha permitido que ramas como la medicina, agricultura, energía, entre otros, tengan un desarrollo acelerado, lo que permitió mejorar la calidad de vida, esto provocó un enorme crecimiento en el número de habitantes en el planeta. En la Figura 1 podemos observar como a partir del año 1900, el crecimiento de habitantes es increíblemente rápido en comparación con el de años anteriores, por lo tanto también su demanda de energía, principalmente en forma de energía eléctrica, sin embargo, las tecnologías existentes no fueron lo suficientemente eficientes

para satisfacer la demanda y poder generar un crecimiento energético sustentable debido a estar basadas en el aprovechamiento del petróleo y sus derivados. Esto dio lugar a que en la década de 1970 el mundo cayera en una crisis energética, que provocó que la demanda de los combustibles fósiles fuese superior a la oferta, de acuerdo a la regla de oferta y demanda, el costo del crudo aumentó en los próximos años, este aumento fue tan drástico que de su valor nominal que rondaba los 20 dólares alcanzó a doblar su precio como se muestra en la Figura 2. (ECLAC, 1988.)

*Autor para la correspondencia: chavez.urbiola@gmail.com (Edgar A. Chávez-Urbiola)

Correo electrónico: demetrio.fuentes.hdez@gmail.com (Demetrio Fuentes-Hernández), soul.vite.rafael@hotmail.com (Rafael Pérez-Vite), felegorreta@hotmail.com (Felipe Legorreta-García), marissav@uaeh.edu.mx (Marissa Vargas-Ramírez)

Esto último, motivo la búsqueda de nuevas fuentes de energía sustentables que permitan alcanzar un desarrollo sostenible, entre estas formas de aprovechamiento energético que buscan cubrir la demanda cada vez más grande de energía de la población mundial, destaca la energía solar, las aplicaciones de este recurso son principalmente el calentamiento de agua y la generación de energía eléctrica mediante paneles fotovoltaicos.

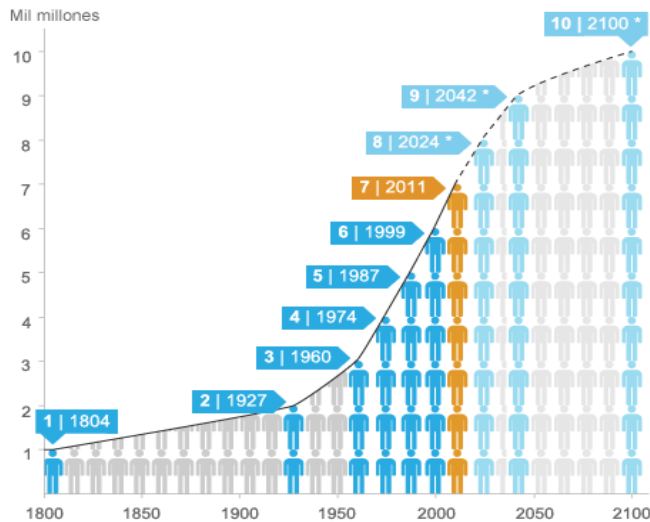


Figura 1: Crecimiento poblacional.
Fuente: Fondo de población de la ONU.

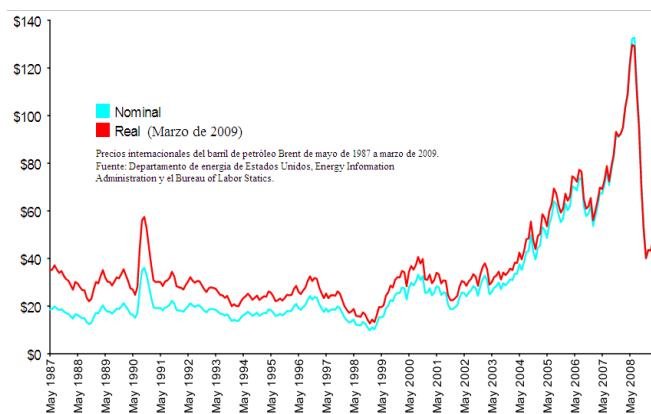


Figura 2: Precio del petróleo Brent
Fuente: Realizado por TomTheHand con datos del organismo público Energy Information Administration

Fue así que se retomaron las aportaciones realizadas en 1883, por el estadounidense Charles Fritts cuando haciendo uso del efecto fotovoltaico estudiado por los físicos Albert Einstein en 1904 y Alexandre-Edmon Becquerel en el año de 1939, fabricó la primera celda fotovoltaica con apenas el 1% de eficiencia. (Carta-González et al, 2009.) La baja eficiencia en la celda fotovoltaica y la creación de organismos como la OPEP (Organización de Países Exportadores de Petróleo) que regularon la extracción y venta de crudo a nivel mundial, hicieron que la prioridad en la investigación de fuentes de energía renovables fuera menor, así que el presupuesto de investigación para estas nuevas tecnologías se vio limitado. Sin embargo, las fuentes de energía renovables son de suma importancia ya que desde la década de los 80's se lucha contra el calentamiento global y la contaminación que produce la quema de combustibles fósiles, es por eso que ahora se estudia la optimización de estos sistemas

para poder dejar de depender de las formas clásicas de generación de energía y realizar una transición energética hacia fuentes más amigables con el medio ambiente. (ECLAC, 1988.) (Carta-González et al, 2009.) (Granda-Gutiérrez et al, 2013.)

1.1. Sistemas híbridos solares

En México tenemos un alto potencial para el uso de energías renovables a través de sistemas fotovoltaicos y solares térmicos, ya que nos encontramos en una ubicación geográfica muy conveniente para ello, en la Figura 3 se muestra un mapa de la república mexicana donde se detallan las zonas geográficas en las que el potencial solar fotovoltaico es alto en kWh/kWp, (kilowatts-hora sobre kilowatts-pico). (SENER, 2012.)

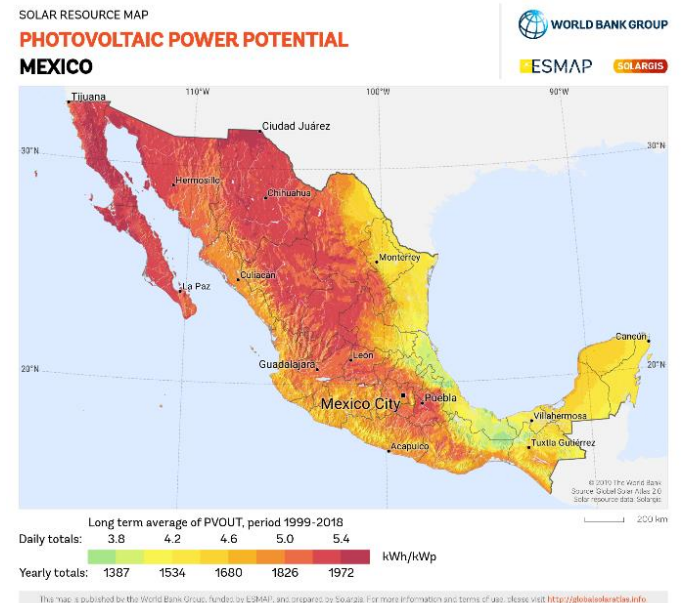


Figura 3: Potencial energético en sistemas fotovoltaicos en México.

Fuente: grupo ESMAP con datos del Banco Mundial.

Con el fin de aprovechar una fuente de energía más limpia y amigable con el medio ambiente pero, considerando las limitantes de los sistemas fotovoltaicos como su incapacidad de transformar energía durante la noche o la gran superficie necesaria para su instalación, se ha planteado el uso de otras fuentes y/o tecnologías que trabajen en conjunto, a estos sistemas se les conoce como sistemas híbridos solares, estos sistemas buscan incrementar el desempeño de los sistemas solares fotovoltaicos tradicionales, mediante una transformación en conjunto o auxiliar de la radiación solar u otra fuente energética disponible, sin la desventaja que representa el incremento sustancial de superficie de instalación. En otras palabras, un sistema híbrido solar busca aprovechar de mejor manera los recursos energéticos disponibles. Un ejemplo de estos sistemas es el formado por la interconexión de una celda o panel y generadores termoeléctricos, conocido como sistema híbrido PV/TE.

2. Efectos de la temperatura en los sistemas fotovoltaicos y su rendimiento.

Al exponer una celda fotovoltaica a la radiación solar esta convierte parte de la energía incidente en electricidad aprovechable, sin embargo, otra fracción de esta energía es convertida en calor. De acuerdo a la segunda ley de la

termodinámica representada en la ecuación 1, sabemos que la eficiencia de un sistema no puede alcanzar el 100%, traducido en que Q_f (energía obtenida) tienda a cero, llevando así que el coeficiente de energía obtenida sobre la energía suministrada tienda a cero, obteniendo así que la eficiencia (e) sea 1.

$$e = 1 - Q_f/Q_c \tag{1}$$

La termodinámica también dicta que todo objeto que aumenta su temperatura sufre de un “reacomodamiento” en sus átomos. En la Figura 4 podemos apreciar este comportamiento, a la izquierda podemos ver el paso de los electrones a través de la estructura a temperatura ambiente, mientras que a la derecha podemos observar que los átomos sufrieron un reacomodamiento, también se muestra que el recorrido de un electrón a través de un material es menor cuando el material se encuentra a temperatura ambiente que cuando este se encuentra sometido a una mayor temperatura.

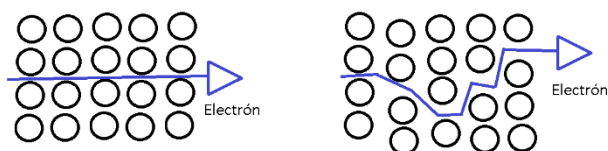


Figura 4: Cambio en la estructura de los átomos por efecto de la temperatura.

Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto, la corriente eléctrica producida en un sistema fotovoltaico está ligada a la radiación incidente sobre la celda y su temperatura de operación. (Granda-Gutiérrez et al, 2013.), estos son los parámetros que más afectan su rendimiento, y serán los considerados en este estudio.

3. Metodología experimental

A continuación se describe la metodología empleada para el análisis del desempeño de un panel fotovoltaico variando sus condiciones de operación. Se propone un sistema híbrido solar que está formado por tres elementos principales, un panel fotovoltaico (PV) de silicio monocristalino de 60 W cuyas características se muestran en Tabla 1, generadores termoelectricos TGM-127-1.24-2.5 especificados en la Tabla 2 y Tabla 3, dependiendo de la diferencia de temperatura entre sus placas y un reflector difuso de refuerzo.

Tabla 1: Características del panel fotovoltaico

Celdas	Silicio monocristalino
Potencia de operación	60 W
V_{oc}	21.5 V
V_{op}	17.2 V
I_{op}	3.48
I_{sc}	4.06 A
Coefficiente de temperatura	-0.45 %/°C
Número de celdas	24

Fuente: Elaboración propia con datos del fabricante Solartec.

Tabla 2 Características del generador termoelectrico con una diferencia de temperatura de 25 °C entre sus placas.

Material de construcción de los módulos termoelectricos	Telururo de bismuto
V	0.416 V
I	0.19 A
R	2.2 Ω

Fuente: Elaboración propia con datos de Kryotherm para el modelo TGM-127-1,4-2,5.

Tabla 3 Características del generador termoelectrico con una diferencia de temperatura de 35 °C entre sus placas.

Material de construcción de los módulos termoelectricos	Telururo de bismuto
V	0.67 V
I	0.31 A
R	2.26 Ω

Fuente: Elaboración propia con datos de Kryotherm para el modelo TGM-127-1,4-2,5.

Inicialmente se analizara el comportamiento del panel de silicio en condiciones ASTMG-173-03, ya que son las condiciones en las que son probados para su venta y distribución. Para ello se parte del comportamiento de una celda fotovoltaica de silicio monocristalino, la cual puede ser representada como un circuito eléctrico, el cual se muestra en la Figura 5.(Granda-Gutiérrez et al, 2013.)

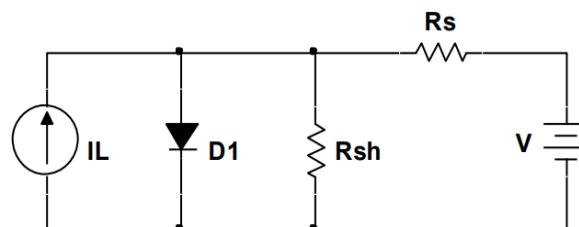


Figura 5: Representación eléctrica de una celda PV.

Fuente: (Granda-Gutiérrez et al, 2013)

El diagrama de este circuito puede ser traducido en la siguiente ecuación:

$$I = I_L - I_0 \left[\exp \left\{ \frac{q(V + I R_s)}{k a T_c} \right\} - 1 \right] - I_{SH} \tag{2}$$

Donde I es la corriente máxima generada por la celda, I_L es la corriente fotogenerada, I_0 la corriente de saturación inversa, I_{SH} la corriente que circula a través de las resistencia en paralelo correspondiente a las uniones existentes entre los elementos, R_s es la resistencia en serie, R_{sh} la resistencia en paralelo; también debemos de considerar las constantes q que representa la carga del electrón, k la constante de Boltzmann, T_c la temperatura de operación de la celda y A el factor de idealidad. (Carta-González et al, 2019.) (Granda-Gutiérrez et al, 2013.) (McEvoy, 2012.)

Un panel fotovoltaico es un arreglo en serie y paralelo de celdas fotovoltaicas con la intención de generar un voltaje y corriente adecuados para su uso comercial, tomando como referencia el modelo visto en la ecuación 2, se pueden agregar

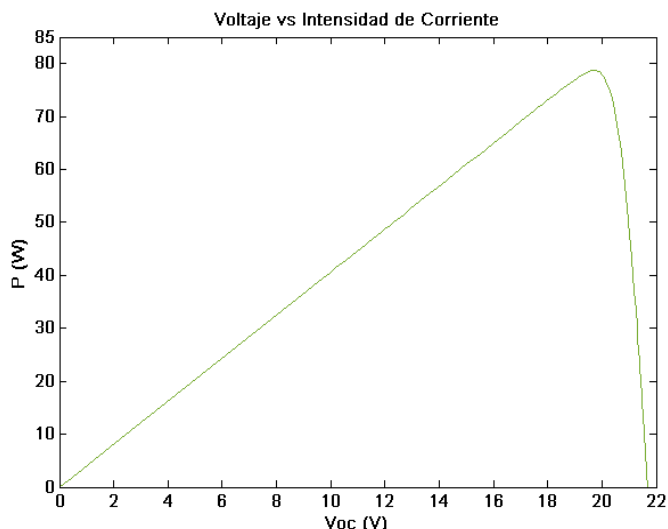


Figura 8: Curva voltaje contra potencia del panel en condiciones ASTMG-173-03
 Fuente: Elaboración propia.

En estas gráficas se puede observar que el valor de la diferencia de potencial en las terminales del panel, es de 21.68 V, mientras que el valor de la intensidad de corriente es de 4.07 A y la potencia máxima alcanzada es de 78.7 W.

Desempeño del panel en condiciones 1000 W/m² sin refrigeración:

Como se ha mencionado, la temperatura de operación del panel es un factor muy importante a considerar, debido a esto, se plantea una segunda simulación con las mismas condiciones de irradiancia, sin embargo, para esta segunda corrida, la temperatura no se mantiene constante, siendo calculada mediante la ecuación 8, lo que sería una aproximación más cercana a la realidad de operación. (Nasrin, 2017)

$$T = 2.4308(G)^{0.4352} \tag{8}$$

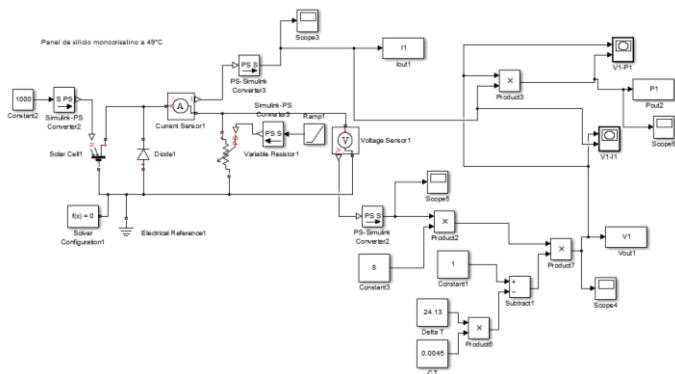


Figura 9: Diagrama de bloques correspondiente a condiciones 1000 W/m² sin refrigeración.
 Fuente: Elaboración propia.

Con el fin de apreciar los efectos de la temperatura en la conversión eléctrica del panel, y como la radiación incidente juega un papel crucial en ello, se calcula la temperatura de

operación a 1000 W/m², dando como resultado 49.13 °C, una vez obtenida esta temperatura de operación se ajustan los parámetros de simulación, los cuales se muestran en la Figura 9, los resultados se muestran a continuación.

En la Figura 10 se puede observar una clara disminución en la salida de voltaje del panel debido a la temperatura de operación, esto significa que no únicamente es el voltaje el afectado por el incremento de temperatura, sino que, por ende, la potencia de salida del panel también es afectada, como se observa en la Figura 11.

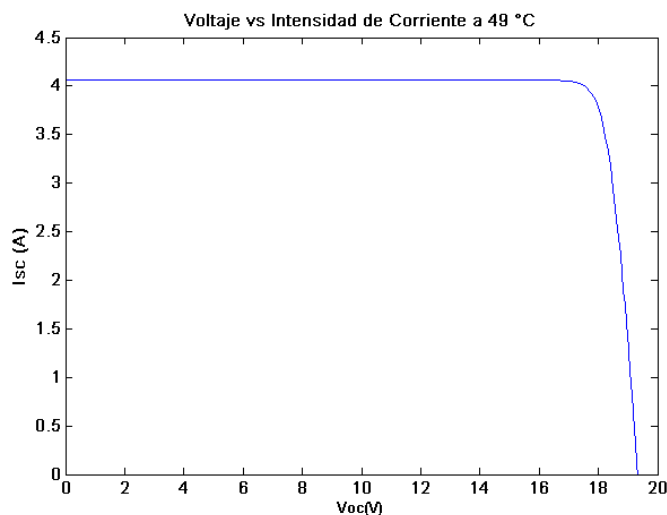


Figura 10: Curva voltaje contra corriente a 49 °C.
 Fuente: Elaboración propia.

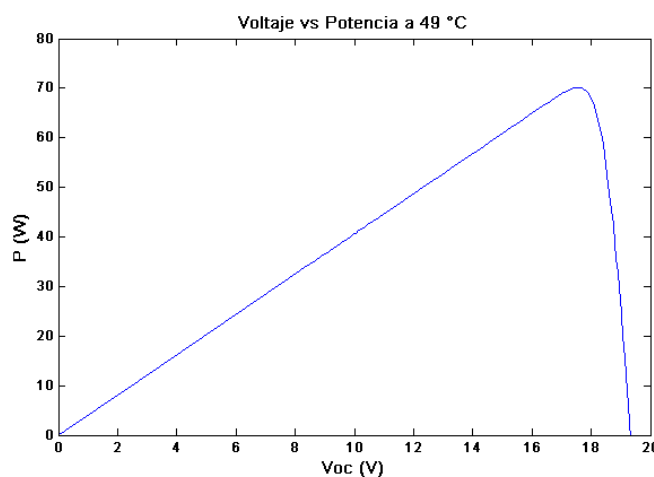


Figura 11: Curva voltaje contra potencia a 49 °C.
 Fuente: Elaboración propia.

El efecto debido a la temperatura sobre el voltaje y potencia de salida se puede observar con mucha más claridad en la Figura 12, donde se comparan las curvas de voltaje contra corriente para ambas temperaturas 25°C correspondiente a las condiciones de prueba ASTMG-173-03 y 49°C en donde la temperatura de operación no es controlada. En esta gráfica se puede observar que el valor en el voltaje de salida cae de 21.68 a 19.32 V.

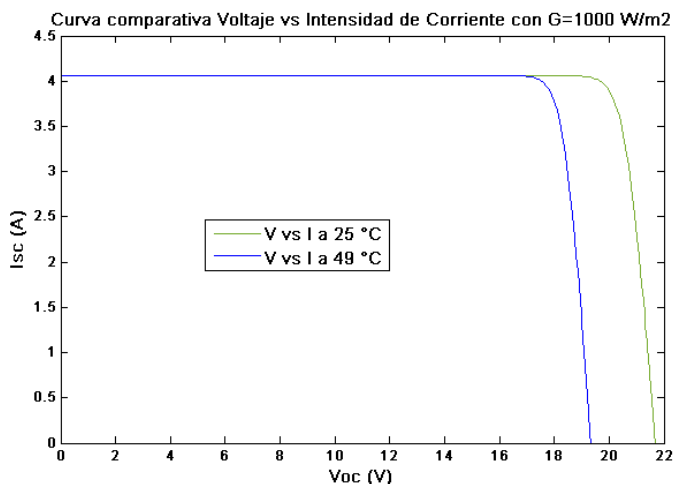


Figura 12: Curva voltaje contra corriente comparativa entre la temperatura de operación a 25 °C y 49 °C.
Fuente: Elaboración propia.

Así mismo, en la Figura 13 se observa la disminución en la generación de potencia debido al incremento de la temperatura de operación.

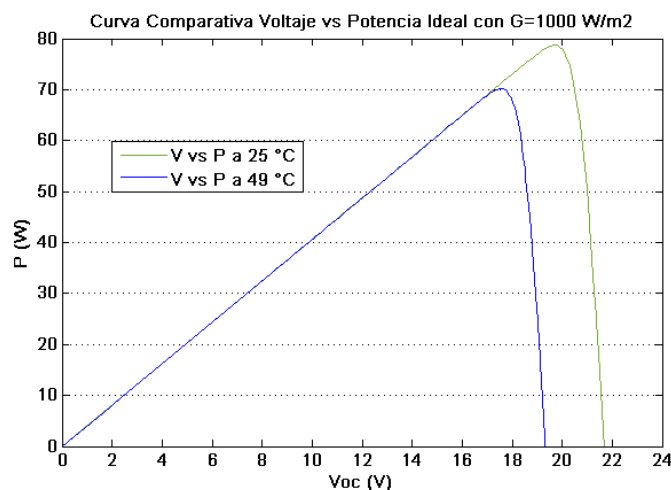


Figura 13: Curva voltaje contra corriente comparativa entre la temperatura de operación a 25 °C y 49 °C.
Fuente: Elaboración propia.

Comparando las curvas de la Figura 13, la potencia baja de 78.7 a 70.15 W debido al incremento en la temperatura de operación de las celdas que forman el panel.

Desempeño del arreglo Panel + Reflector Difuso:

Con el fin de estudiar el comportamiento del panel fotovoltaico en presencia de un incremento de irradiancia y la consideración de los efectos del incremento de temperatura inherente a ello, se acopla un reflector difuso de refuerzo experimental a base de un recubrimiento de base cerámica, capaz de incrementar la radiación incidente sobre el panel teóricamente en un 60%, este factor de reflectancia es intrínseco de cada material que funja como recubrimiento en el reflector difuso, por lo tanto, se añade un bloque más a la simulación (Ver Figura 14), que representa un factor equivalente sobre la radiación G, y los resultados se comparan con los obtenidos de las simulaciones del panel fotovoltaico en condiciones ASTM G-173-03 y 1000 W/m² sin enfriamiento. Utilizando la ecuación 8 se logra obtener la

temperatura de operación la cual se aproxima a 60.28 °C, este parámetro es añadido a la simulación obteniendo lo siguiente:

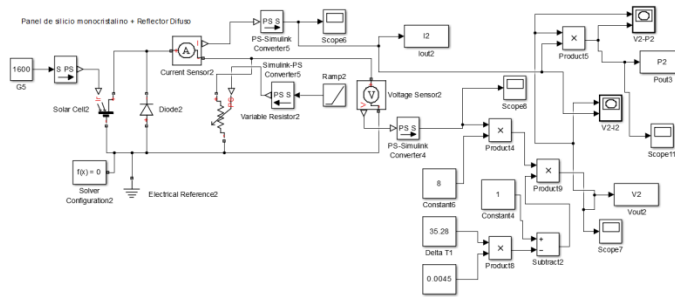


Figura 14: Diagrama de bloques correspondiente al arreglo Panel + Reflector Difuso.
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 15 se puede apreciar que, al incrementarse la radiación incidente sobre el panel, la temperatura se incrementa aproximadamente 11 °C presentándose una disminución en la generación de 19.23 a 18.36 V en la diferencia de potencial del panel. Sin embargo, el cambio realmente significativo se puede apreciar al observar la corriente generada en comparación con la simulación anterior, lo cual se ve reflejada en la potencia de salida entregada por el sistema (Figura 16).

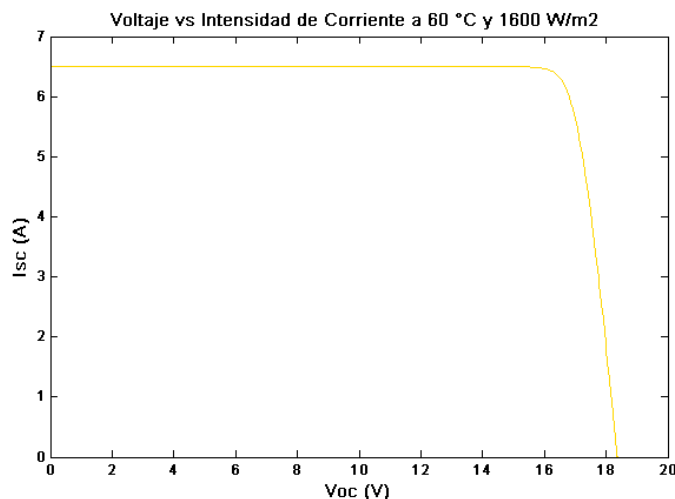


Figura 15: Curva voltaje contra corriente a 60 °C.
Fuente: Elaboración propia.

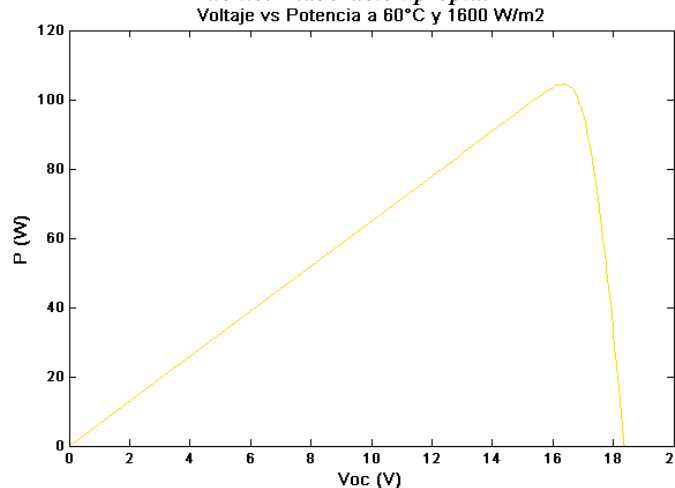


Figura 16: Curva voltaje contra potencia a 60 °C.
Fuente: Elaboración propia.

experimental al panel fotovoltaico (ver Figura 21), este incremento es mínimo, ya que va de 4.06 a 4.1 A. El incremento aportado por los generadores termoeléctricos, se ve afectado por la diferencia de temperatura existente entre las secciones fría y caliente de los mismos. Para esta simulación se logra apreciar que el voltaje al cual se alcanza la máxima potencia útil del panel apenas es poco mayor que en el caso 1000 W/m² sin enfriamiento por lo que no parece haber una diferencia notoria. Lo mismo sucede si es comparado con respecto al arreglo Panel + Reflector Difuso donde la diferencia entre ambos puntos de aproximadamente de 2V.

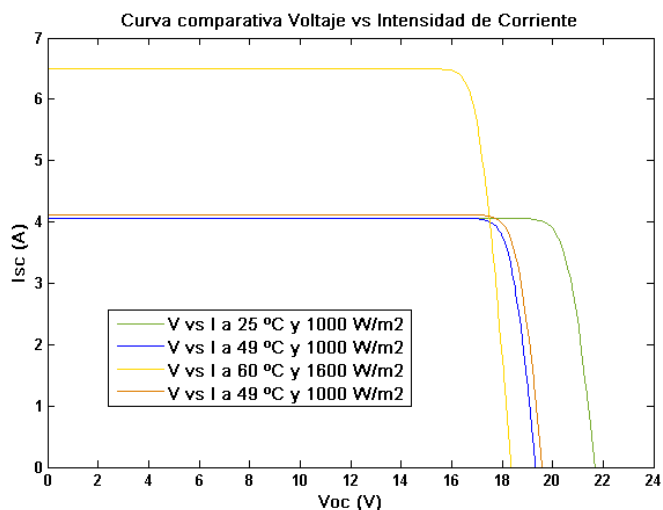


Figura 21: Curva voltaje contra corriente comparativa entre la temperatura de operación 25, 49 y 60 °C, las irradiancias de 1000 y 1600 W/m² y el acoplamiento Panel + TEG. Fuente: Elaboración propia.

Realizando una comparación de la potencia total de salida del arreglo Panel + TEG mostrada en la Figura 22 donde alcanza una potencia máxima de 72.06 W contra los 70.15 W que se presentan en condiciones a 1000 W/m² sin refrigeración.

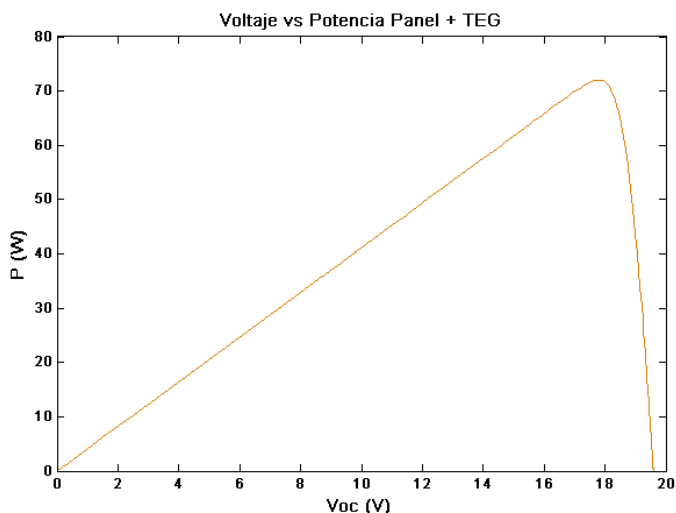


Figura 22: Curva voltaje vs potencia del arreglo panel + TEG. Fuente: Elaboración propia.

El incremento en la potencia al igual que la corriente palidecen si se les compara con los otorgados por el acoplamiento Panel + Reflector Difuso, donde si bien el voltaje proporcionado por este arreglo es menor, la corriente y su efecto sobre la potencia de

salida es notoriamente mayor, en la Figura 23, este efecto puede apreciar de forma más clara.

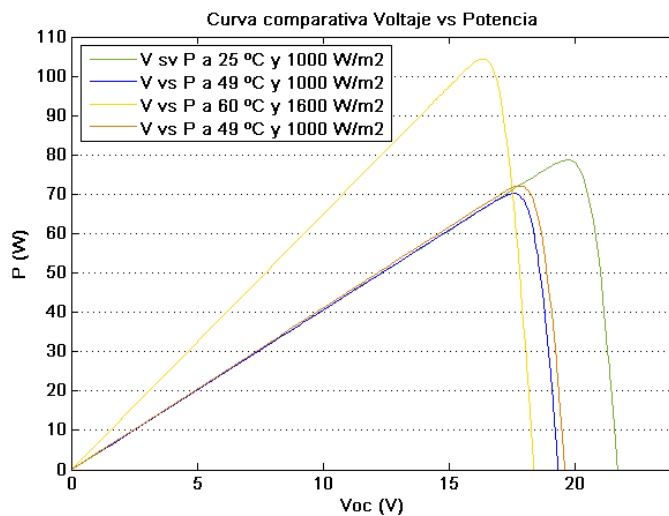


Figura 23: Curva voltaje contra potencia comparativa entre la temperatura de operación 25, 49 y 60 °C, las irradiancias 1000 y 1600 W/m² y el acoplamiento Panel + TEG. Fuente: Elaboración propia.

Desempeño del arreglo Panel + TEG + Reflector Difuso:

Dado que las simulaciones anteriores muestran un incremento en el rendimiento del panel fotovoltaico, se acoplan en un solo sistema tanto el reflector difuso de refuerzo como el arreglo TEG, esta vez con los datos de la Tabla 3 debido al incremento de irradiancia responsable del incremento de temperatura, con el objetivo de analizar el desempeño de este sistema híbrido como se muestra en la Figura 24.

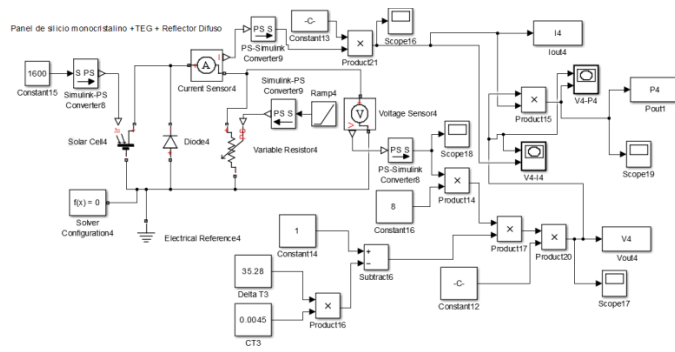


Figura 24: Diagrama de bloques correspondiente al arreglo Panel + TEG + Reflector Difuso. Fuente: Elaboración propia.

En los resultados otorgados por la simulación se puede apreciar un incremento en la transformación tanto de corriente como de voltaje a la salida del sistema (ver Figura 25), este comportamiento era esperado y a pesar del incremento en la temperatura, la caída en la generación de voltaje no es tan sustancial comparándola con la producción obtenida al acoplar únicamente el reflector difuso, esto se debe a la incorporación de los generadores termoeléctricos, los cuales al aprovechar el incremento de temperatura entre sus placas, el cual en este arreglo es mayor que el existente en el arreglo Panel + TEG debido que al incidir mayor cantidad de irradiancia gracias al reflector difuso, existe un incremento en la temperatura de

operación y por ende un mayor gradiente de temperatura entre las placas que al transformarlo en una diferencia de potencial adicional, el efecto de la temperatura en la producción eléctrica se ve mermado. Este comportamiento estable se puede apreciar en las Figuras 25 y 27.

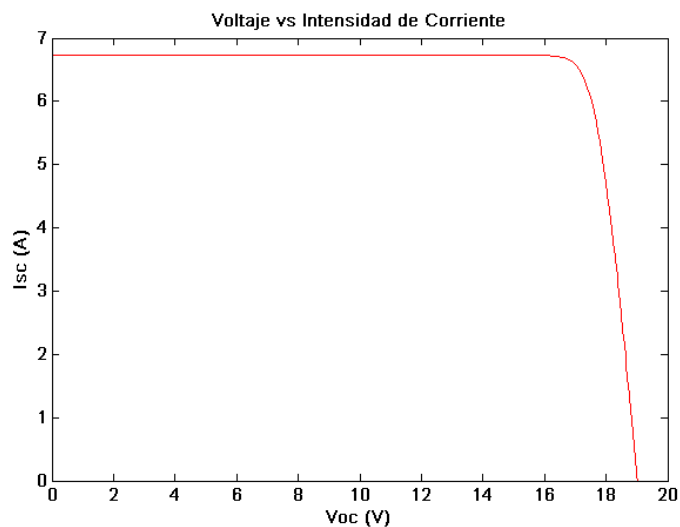


Figura 25: Curva voltaje contra corriente arreglo Panel + TEG + Reflector Difuso.
Fuente: Elaboración propia.

De igual manera que sucede con el voltaje y la corriente eléctrica, el incremento en la potencia es uniforme y se observa un muy claro incremento en la potencia de salida del sistema mostrado en la Figura 26, este sustancial incremento se debe a la mayor cantidad de irradiancia recibida sobre el panel y a la aportación del arreglo Panel + TEG que aprovecha el incremento de temperatura debido a la mayor incidencia de radiación.

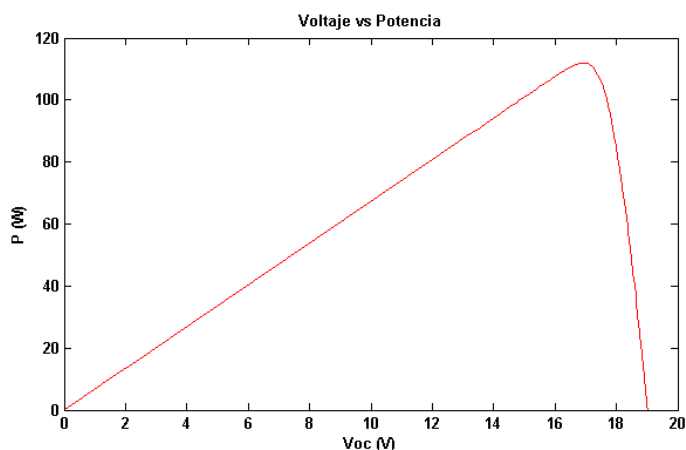


Figura 26: Curva voltaje contra potencia del arreglo Panel + TEG + Reflector Difuso.
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 27 se puede observar que existe un incremento en el voltaje y corriente de salida, no obstante, el incremento no luce significativo al considerarse un solo panel. Sin embargo, se aprecia que el voltaje al que se alcanza la máxima potencia es prácticamente el mismo que en las condiciones de operación 1000 W/m² sin refrigeración, lo que significa que alcanzar una mayor potencia de salida al mismo voltaje.

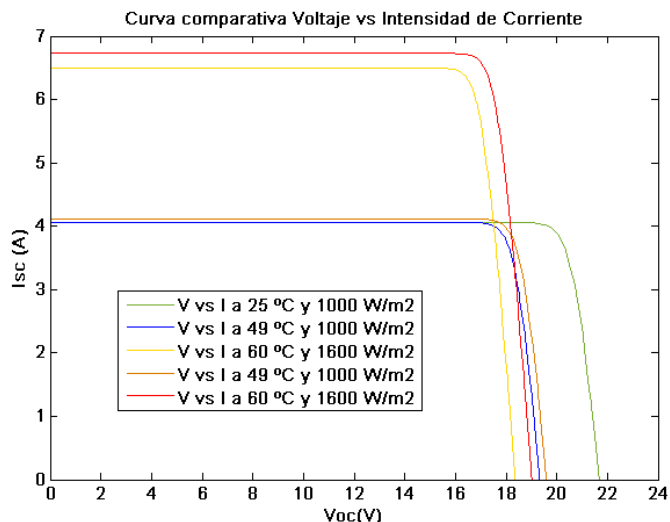


Figura 27: Curva voltaje contra corriente comparativa entre la temperatura de operación 25, 49 y 60 °C, las irradiancias 1000 y 1600 W/m², el acoplamiento Panel + TEG y el arreglo Panel + TEG + Reflector Difuso.
Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se unen las gráficas generadas a partir de las simulaciones previas y esta nueva propuesta, con el fin de comparar los datos de cada una de ellas en una sola gráfica, se observa en la Figura 28, que el ensamble Panel + TEG + Reflector Difuso es el arreglo con mayor rendimiento de los propuestos.

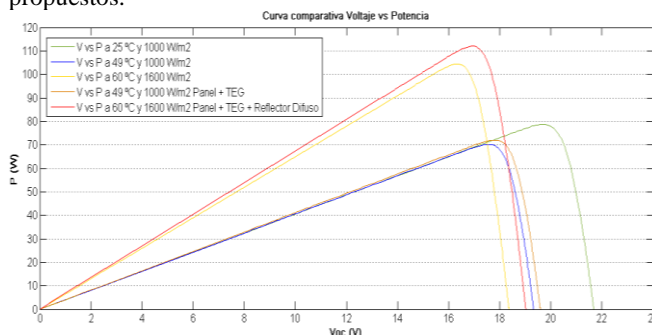


Figura 28: Curva voltaje contra potencia comparativa entre la temperatura de operación 25, 49 y 60 °C, las irradiancias 1000 y 1600 W/m², el acoplamiento Panel + TEG y el arreglo Panel + TEG + Reflector Difuso.
Fuente: Elaboración propia.

4. Resultados

En la Tabla 4 se muestran los resultados de todas las simulaciones realizadas y comparadas para este estudio. En esta se pueden comparar los valores de voltaje, corriente y potencia de salida de cada una de ellas.

Se puede observar que si se compara el desempeño en condiciones ASTM-G173-03 contra 1000 W/m² sin refrigeración (49°C), el valor en el voltaje de salida cae de 21.68 a 19.32 V, lo que representa una caída del 10.88%, de igual manera, la potencia baja de 78.7 a 70.15 W, lo que representa un 10.94% de potencia total producida debido al incremento en la temperatura de operación de las celdas que forman el panel, sin embargo, esta última condición es más próxima a su operación real, por lo que es la condición más relevante a considerar.

Si se compara el PV en condiciones 1000 W/m^2 sin refrigeración (49°C) contra el arreglo Panel + Reflector Difuso, se puede apreciar una disminución en la generación de 19.23 a 18.36 V , lo que significa una reducción del 4.52% . No obstante existe un incremento en la corriente de salida que va de 4.07 a 6.5 A , lo que representa un incremento del 59.7% , lo cual es concurrente con el incremento de irradiancia incidente. Así mismo, el cambio en la potencia generada va de 70.15 W con una irradiancia de 1000 W/m^2 a 104.4 W con una irradiancia de 1600 W/m^2 representando del 48.82% en la producción total.

Tabla 4: Comparativa del desempeño de un PV bajo diferentes condiciones de operación.

Arreglo/condición	Voltaje a circuito abierto (V)	Corriente a corto circuito (A)	Potencia (W)
ASTMG-173-03 (1000 W/m^2 - 25°C)	21.68	4.06	78.7
1000 W/m^2 sin refrigeración (49°C)	19.32	4.05	70.15
Panel + TEG (1000 W/m^2 - 49°C)	19.59	4.1	72.06
Panel + Reflector Difuso (1600 W/m^2 - 60°C)	18.36	6.5	104.4
Panel + TEG + Reflector Difuso (1600 W/m^2 - 60°C)	19.02	6.73	112

Fuente: Elaboración propia.

Si se compara el acoplamiento Panel + TEG contra el panel en condiciones de irradiancia igual a 1000 W/m^2 sin enfriamiento, el incremento en el voltaje va de 19.33 a 19.59 V , representando un incremento del 1.34% . Sin embargo, si bien, existe un incremento en la salida de corriente este es de solo del 1.13% , por lo cual, luce minimizado en comparación con el aporte realizado por un reflector difuso. Realizando una comparación de la potencia total de salida, se alcanza una potencia máxima de 72.06 W contra los 70.15 W que se presentan en condiciones a 1000 W/m^2 sin refrigeración, el incremento en la potencia total de salida representa un incremento de apenas el 2.72% .

Finalmente comparando el arreglo Panel + TEG + Reflector Difuso con el generado utilizando un panel en solitario a 1000 W/m^2 sin refrigeración, el incremento en potencia va de 70.15 a 112 W , lo que representa un incremento total de 59.65% y de 7.28% si se le compara con el ensamble Panel + Reflector Difuso, con respecto a la intensidad de corriente va de 4.07 a 6.73 A , incrementando así 65.35% , finalmente, dado el incremento de insolación sobre el sistema debido al efecto del relector difuso, el panel incrementa su temperatura, por lo que la conversión en voltaje se ve reducida de 19.23 a 19.02 , lo que representa una reducción del 1.09% , sin embargo, si se compara con el acoplamiento Panel + Reflector Difuso, donde el voltaje máximo de salida es de 18.36V , el acoplamiento extra de TEGs incrementaría el voltaje de salida del sistema en un 3.59% .

5. Discusión

Realizando un análisis de los datos de las simulaciones realizadas, se observa que el desempeño de un sistema fotovoltaico puede incrementarse con la interconexión de generadores termoeléctricos y sobre todo, con el acoplamiento de un reflector difuso de refuerzo. Para realizar una comparativa con los resultados presentados por otros autores, es necesario aclarar que estos resultados suelen presentarse en condiciones ASTMG-173-03 cuando a eficiencia de los paneles se refiere. En la Tabla 5 se pueden observar los resultados mencionados.

Tabla 5: Comparativa de los resultados de simulación de este estudio y los de otros autores.

Material del PV	Material del TEG	Eficiencia del PV (%)	ΔT ($^\circ\text{C}$)	Fuente
Silicio-c	-	16	0	NREL
Silicio-c	-	14.26	24*	Este estudio
Silicio-c	Bi_2Te_3	16.3	15	Park
Silicio-c	Bi_2Te_3	16.62	24	Este estudio
Silicio-c	$\text{Bi}_{0.4}\text{Sb}_{1.6}\text{Te}_3$	18.6	-	Zhang
Silicio-c + Reflector de base cerámica	-	23.8	0	Este estudio
Silicio-c + Reflector de base cerámica	-	21.22	35*	Este estudio
Silicio-c + TEG + Reflector de base cerámica	Bi_2Te_3	22.77	35*	Este estudio

*Funcionamiento en condiciones de operación simuladas.

Fuente: Elaboración propia con datos de Huen, 2017.

Como se logra apreciar, los resultados obtenidos en las simulaciones son similares a los datos reportados por otros autores, como es el caso del sistema Panel + TEG. Así mismo se logra apreciar que el acoplamiento de un reflector difuso incrementa significativamente la generación de energía.

6. Conclusiones

Tomando en cuenta todos los datos obtenidos de cada una de las simulaciones, se concluye que, con el objetivo de incrementar el rendimiento de sistemas fotovoltaicos, el acoplamiento en solitario de generadores termoeléctricos en un sistema híbrido PV/TE representa un incremento muy pequeño en la potencia de salida, no obstante, el acoplamiento de reflectores difusos experimentales a base de un recubrimiento de base cerámica, resulta una opción viable para incrementar el desempeño de los sistemas fotovoltaicos, dado su bajo costo en comparación con el de los generadores termoeléctricos y sobre todo, debido al sustancial incremento en la potencia de generación. También se concluye que la aplicación de reflectores difusos de refuerzo puede ser una alternativa a la concentración óptica típicamente empleada en los sistemas híbridos PV/TE, cabe mencionar que el utilizar en simultaneo tanto generadores termoeléctricos y un

reflector difuso, resulta en una opción válida en la búsqueda de mejorar el desempeño de sistemas fotovoltaicos.

Agradecimientos

Se agradece al CONACyT por el financiamiento mediante el proyecto 282260 “Incremento del desempeño de sistema solar híbrido utilizando reflectores de refuerzo difusos” perteneciente a la convocatoria de ciencia básica 2016. También agradeciendo a los familiares y colaboradores de cada uno de los autores por su apoyo en cada una de las etapas de esta investigación.

Referencias

- Carta-González, J.A., Calero-Pérez, R., Colmenar-Santos, A., Manuel-Alonso-Castro, G., (2009). Centrales de Energías Renovables: Generación Eléctrica con Energías Renovables. Pearson Education, S.A., Madrid, España.
- Chávez-Urbiola, E.A., (2011). Solar hybrid systems with thermoelectric generators, *Solar Energy-Elsevier*, 369-378, Países Bajos. DOI:10.1016/j.solener.2011.10.020
- Economic Commission for Latin America and the Caribbean (ECLAC), (1988). Cambios en la inserción de América Latina en el mercado mundial de energéticos. *United Nations* 4–72.
- Granda-Gutiérrez, E.E., Orta, O.A., Díaz-Guillén, J.C., Jiménez, M.A., Osorio, M., González, M.A., (2013). Modelado y simulación de celdas solares. *Congr. Int. Ing. Electrón. Mem. Electro 2013*, 17-22. ISSN 1405-2172.
- McEvoy, A., Markvart, T., Castañer, L. (2012). *Practical Handbook of Photovoltaics Fundamentals and Applications*. Academic Press-Elsevier, Oxford, UK.
- National Renewable Energy Laboratory (NREL), Best Research-Cell Efficiencies, 15013 Denver W Pkwy, Golden, CO 80401, Estados Unidos.
- Priscilla Huen, Walid A. Daoud, (2017), Advances in hybrid solar photovoltaic and thermoelectric generators, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1295-1302, Países Bajos.
- O'Mara, W.C., Herring, R.B., Hunt, L.P., (1990). *Handbook of semiconductor silicon technology*. Noyes Publications, New Jersey, USA. ISBN:0-8155-1237-6.
- Park, K.-T., Shin, S.-M., Tazebay, A.S., Um, H.-D., J.-Y., Jee, S.-Wlee, J.-H., (2013). Lossless hybridization between photovoltaic and thermoelectric devices, *Scientific Reports*, London, UK.
- Sánchez-Fraile, M., (2019). Desarrollo de una herramienta para el modelado del comportamiento eléctrico de células solares. Universidad de Alcalá, Alcalá, España.
- Secretaría de Energía (SENER), (2020). Programa Sectorial de Energía 2020-2024. Gobierno de México, México.
- Zhang, J., Xuan, Y., & Yang, L. (2014). Performance estimation of photovoltaic–thermoelectric hybrid systems. *Energy*, Países Bajos.