Sistema de seguimiento solar de un eje para aumentar la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos bajo distintas condiciones climáticas

Pelayo López, J. A.*, Sedano de la Rosa, C., Rojano Cobián, R.

Departamento de Ingenierías, Universidad de Guadalajara, Av. Independencia Nacional No. 151, Autlán de Navarro, Jalisco, México

Fecha de recepción: 10 de junio de 2020 - Fecha de aceptación: 2 de octubre de 2020

Resumen

El aumento en la instalación de paneles solares fotovoltaicos para aprovechar la energía solar se ha hecho evidente con el paso de los años. Uno de los problemas principales que se tienen al aprovechar esta energía solar utilizando paneles fotovoltaicos, es el elevado costo de estos en proporción a la cantidad de energía que producen. Ahora bien, el uso de sistemas de seguimiento solar busca que los rayos del sol sean perpendiculares al panel fotovoltaico, lo cual es una buena opción para mejorar la relación costo-beneficio a largo plazo de estos sistemas en particular. En el presente trabajo se realizó el diseño e implementación de un seguidor solar de un eje con un sistema de control sencillo y económico. Con el objetivo de mejorar la eficiencia de paneles solares fotovoltaicos, se comparó la eficiencia del sistema diseñado con la de un sistema fotovoltaico fijo. Los resultados demostraron que la máxima eficiencia alcanzada por ambos sistemas fotovoltaicos se obtuvo entre las 14:00 y 14:15 horas, alcanzando valores por encima del 95 % para la condición de día soleado. Finalmente, el porcentaje promedio de la eficiencia del sistema de seguimiento solar fue mayor que el sistema fijo en un 20 %, aproximadamente. Al extraer más energía del panel fotovoltaico con seguimiento solar durante un tiempo mayor, promueve que el sistema propuesto sea más rentable comparado con la energía que se logra con paneles solares fijos.

Palabras clave: sistema de seguimiento solar, sistema fijo, optimizar, eficiencia, panel fotovoltaico.

Single axis solar tracking system to increase the efficiency of photovoltaic systems under different weather conditions

Abstract

The increase in the installation of photovoltaic solar panels to take advantage of solar energy has become evident over the years. One of the main problems with taking advantage of this solar energy using photovoltaic panels is the high cost of these in proportion to the amount of energy they produce. Now, the use of solar tracking systems seeks that the sun's rays are perpendicular to the photovoltaic panel, which is a good option to improve the long-term cost-benefit ratio of these systems in particular. In the present work, the design and implementation of a single axis solar

*jorgep@cucsur.udg.mx

Nota: Este artículo de investigación es parte de Ingeniería–Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Vol. 24, No. 3, 2020, ISSN: 2448-8364

tracker with a simple and economical control system was carried out. In order to improve the efficiency of photovoltaic solar panels, the efficiency of the designed system was compared with that of a fixed photovoltaic system. The results showed that the maximum efficiency achieved by both photovoltaic systems was obtained between 14:00 and 14:15 h, reaching values above 95% for the sunny day condition. Finally, the average efficiency percentage of the solar tracking system was greater than the fixed system by approximately 20%. By extracting more energy from the photovoltaic panel with solar tracking for a longer time, it promotes that the proposed system is more profitable compared to that achieved with fixed solar panels.

Keywords: solar tracking system, fixed system, optimize, efficiency, photovoltaic panel.

1. Introducción

La demanda de energía eléctrica se ha incrementado en relación al progreso de la población, derivado de esto, se tiene un aumento en la fabricación de aparatos eléctricos y electrónicos, los cuales se han convertido en una necesidad fundamental para los seres humanos. Por consiguiente, la masiva explotación de fuentes no renovables para producir esta energía ha provocado consecuencias catastróficas, como el efecto invernadero, el calentamiento global y el deterioro de ecosistemas terrestres y marinos (Curtin y Magolis, 2009; Mousazadeh et al., 2009; Noa-Diéguez et al., 2015).

La energía solar como fuente de energía renovable se ha convertido en una alternativa eficiente y económica que ha contribuido a la disminución del empleo de energías no renovables, uno de los retos actuales. Por tal motivo, se ha observado un aumento en la necesidad de instalación de paneles solares fotovoltaicos para aprovechar este recurso natural (Escobar Mejía et al., 2010; Machado Toranzo et al., 2015; Noa-Diéguez et al., 2015).

El principal problema que presentan los paneles fotovoltaicos para el aprovechamiento de la energía solar, es el elevado costo de estos en proporción a la cantidad de energía que producen (Palomar-Carnicero et al., 2009). Estos costos han disminuido debido al creciente número de instalaciones de sistemas fotovoltaicos, pues cada año se hace más frecuente observar paneles fotovoltaicos en empresas, residencias, así como en edificios comerciales, lo que ha ocasionado que el mercado de paneles fotovoltaicos se vea fortalecido por la producción de estos paneles (Ecologistas en Acción, 2005; Marín-Jiménez y González-Cruz, 2020). Este problema también se reducirá al optimizar la captación de energía solar por los paneles fotovoltaicos (Noa-Diéguez et., 2015).

Para optimizar la cantidad de energía que se puede obtener de un panel fotovoltaico, es necesario que este reciba la máxima cantidad de radiación solar; es decir, que los rayos del sol incidan de forma perpendicular a él (Lin et al., 2019; Machado Toranzo et al., 2015; Sharma et al., 2017). Una alternativa para conseguir dicha optimización, es el uso de sistemas de seguimiento solar también llamados seguidores solares (Amelia et al., 2020, Gómez Morales, 2013; Sharaf Eldin et al., 2016).

Por otra parte, la orientación del plano de un panel solar captador, se determina a partir de las coordenadas del vector director perpendicular a él (Flores Rivera y Domínguez Ramírez, 2016). Este vector queda definido por el ángulo cenital que coincide con la inclinación del plano βc respecto a la horizontal y el ángulo azimutal αc, tal como se

muestra en la Figura 1. Se define al ángulo de incidencia como el ángulo que forma la radiación solar directa con el vector director del plano.

La irradiancia recibida sobre un plano inclinado, y por ende en un panel solar, depende del ángulo de incidencia i de los rayos solares sobre este.

Además, el ángulo de incidencia sobre un plano también depende de las coordenadas horarias del sol (δs, ωs), como lo expresa la Ecuación 1:

$$\cos(i) = sen(hs) * cos\beta c + sen(hs) * sen\beta c * \cos(\alpha s - \alpha c) \quad (1)$$

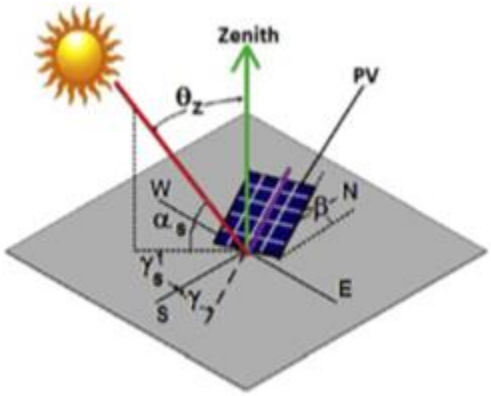


Figura 1. Definición del ángulo de incidencia sobre un plano inclinado y orientado (Amelia et al., 2020)

Se han propuesto y utilizado varios métodos para rastrear la posición del sol. Los sistemas de seguimiento solar pueden tener uno o dos ejes. Los de un eje también conocidos como sistemas de un grado de libertad pueden seguir solamente el azimut solar, pero no la altitud solar; mientras que los sistemas de dos ejes cumplen con ambas funciones (Amelia et al., 2020; Arreola Gómez et al., 2015; Machado Toranzo et al., 2015). En cuanto al algoritmo de seguimiento, los sistemas se pueden clasificar en: por punto luminoso o con programación astronómica, siendo estos últimos, los de mayor fiabilidad, pero los más complicados para la implementación del algoritmo (Escobar Mejía et al., 2010; Machado Toranzo et al., 2015; Sharma et al., 2017).

Se han propuesto algunas alternativas de sistemas fotovoltaicos más simples los cuales utilizan fotoresistencias (LDR), es decir, una resistencia dependiente de la luz del sol para detectar cambios de intensidad en la superficie de la misma (Aung, 2019). Los sistemas de seguimiento solar que actualmente presentan un mejor rendimiento y precisión dependen de sistemas de control sofisticados y circuitos electrónicos complejos. Además, sus costos de instalación y mantenimiento suelen ser muy elevados.

De acuerdo con lo anterior, el objetivo de este trabajo es diseñar e implementar un sistema de seguimiento solar de un eje con un sistema de control más sencillo y económico para mejorar la eficiencia de los paneles solares fotovoltaicos. Para ello, se realizó un análisis comparativo de la eficiencia del sistema

diseñado con respecto a la de un sistema fotovoltaico fijo.

2. Metodología

En esta sección se describe el desarrollo de los subsistemas que componen al sistema de seguimiento solar de un eje, así como el desarrollo experimental para evaluar la eficiencia energética de cada uno de los sistemas fotovoltaicos tratados en este trabajo.

2.1 Sistema de seguimiento solar de un eje

Para el desarrollo del presente trabajo se utilizó un sistema de seguimiento solar de un eje, y de acuerdo con el algoritmo de seguimiento, corresponde a un seguidor por punto luminoso. Este tipo de sistema está compuesto por cuatro partes básicas: soporte metálico del seguidor solar, el sistema de control de movimiento, la transmisión por cadena de rodillos y un panel solar fotovoltaico.

Soporte metálico

La estructura que soporta al sistema de seguimiento solar, es de material metálico con geometría tubular. Este soporte, ilustrado en la Figura 2, presenta gran similitud al utilizado para las antenas parabólicas.

Figura 2. Vistas frontal e isométrica del soporte del sistema de seguimiento solar

Sistema de control de movimiento

Este sistema es el encargado de obtener el ángulo azimutal, es decir, controla el movimiento de este a oeste en el transcurso del día y posiciona el sistema al amanecer del siguiente día con dirección de oeste a este. El movimiento del panel fotovoltaico es controlado por un par de celdas solares que actúan como sensores y alimentan al motor de corriente directa encargado de girar el panel fotovoltaico. Cada celda utiliza es de 6 Vcc, 110 mA y 0.6 W. Dichas celdas se colocaron con una configuración triangular una a noventa grados de la otra, las cuales se encuentran localizadas en la parte superior del panel solar fotovoltaico (ver Figura 3).

En la posición de reposo, cuando el panel fotovoltaico se encuentra perpendicular al sol, ambas celdas solares reciben la misma cantidad de luz solar; a medida que la posición del sol cambia con respecto a la superficie del panel el ángulo de incidencia de los rayos del sol hará que incida más luz en una celda que en la otra, esto causará una diferencia de potencial. Por lo tanto, la celda que está frente al sol tendrá un

potencial más alto que la otra. Este suceso dará como resultado una señal de energía detectable por un motor de corriente directa que accionará el movimiento del panel fotovoltaico en una dirección hasta obtener la posición de reposo.

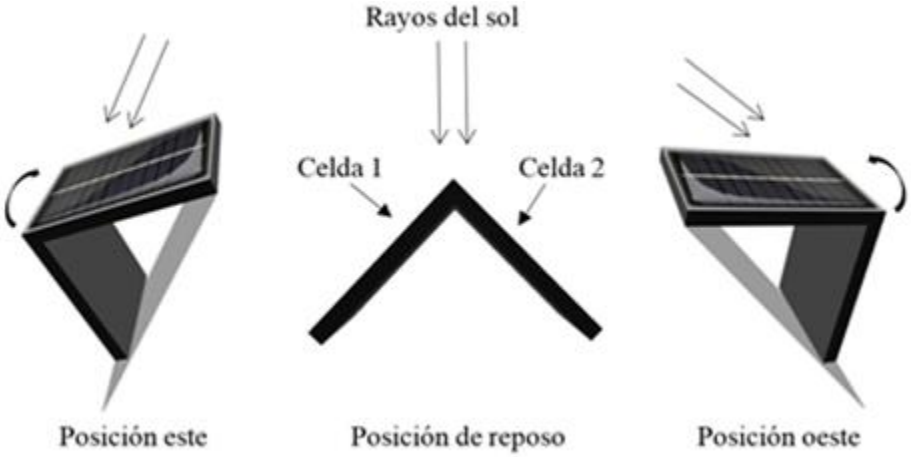


Figura 3. Celdas solares para controlar el movimiento azimutal

El proceso de seguimiento solar durante el día se describe a continuación. Al amanecer el sistema de seguimiento solar se encuentra en la posición oeste como se observa en la Figura 3, por lo tanto, al salir el sol, la celda 1 recibe cierta cantidad de luz solar, lo que hace que el motor se encienda continuamente girando el panel fotovoltaico en sentido inverso a las manecillas del reloj hasta que el sistema logre el estado de reposo de la posición este. A medida que el día transcurre, la celda 2 recibe más luz solar ocasionando que el motor gire en sentido de las manecillas del reloj hasta alcanzar nuevamente la posición de reposo, y este ciclo continúa hasta el final del día, o hasta que se alcanza el nivel mínimo de luz solar detectable, situándose nuevamente en la posición oeste.

Sistema de transmisión por cadena de rodillos

Este sistema está constituido por un conjunto de ruedas dentadas y cadenas (Figura 4) que hacen girar al panel fotovoltaico con la ayuda de un motor de corriente directa. El sistema de seguimiento solar utiliza este motor para lograr el movimiento azimutal. La conexión de las celdas solares al motor encargado de proporcionar este movimiento consiste en una conexión de polarización directa; es decir, la terminal positiva de la celda solar 1 se conecta con la terminal positiva del motor, y la terminal negativa de la celda solar 1 se conecta con la terminal negativa del motor, mientras que la celda 2, es conectada al motor con polarización inversa. El sentido del movimiento del motor es definido por la diferencia de potencial que emiten las celdas solares; sin embargo, cuando el sol irradia con la misma intensidad a las dos celdas solares, el motor permanece sin movimiento; es decir, en la posición de reposo.

Panel solar fotovoltaico

Para el desarrollo del presente estudio experimental se utilizaron dos paneles solares fotovoltaicos policristalinos nuevos de marca ERDM SOLAR, las características de los paneles están dadas en la Tabla 1.

.

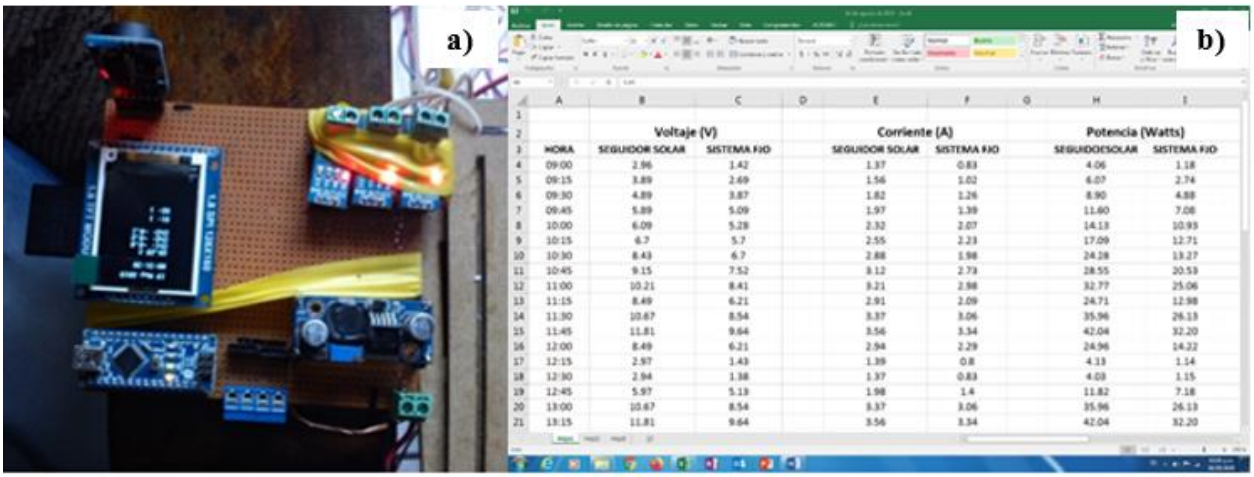
Figura 4. Sistema de transmisión por cadena de rodillos

Tabla 1. Características del panel solar fotovoltaico

Características	
Potencia máxima (Pmax)	65 W
Corriente a máxima potencia (Imp)	4.02 A
Voltaje a máxima potencia (Vmp)	17.83 V
Corriente en corto circuito (Isc)	4.25 A
Voltaje en circuito abierto (Voc)	22.19 V
Temperatura	25° C
Dimensiones	75 x 67 x 3.5 cm

2.2 Sistema de adquisición de datos

Se diseñó un sistema de adquisición de datos que obtiene la potencia producida por cada panel fotovoltaico en tiempo real (Figura 5a). El sistema consiste en conectar el sensor de corriente ACS712 30A a cada uno de los paneles fotovoltaicos; a su vez, este sensor fue conectado a un pin analógico de la tarjeta Arduino Nano 3.0 y que, mediante programación, el microcontrolador interprete el valor de voltaje recibido y arroje el dato de la corriente generada, cabe mencionar que la programación para Arduino utiliza un entorno de desarrollo basado en el lenguaje C++. Una vez adquirida la corriente de los dos paneles fotovoltaicos, se guardan los datos utilizando un módulo de almacenamiento de datos MicroSD, además de registrar la hora en la que se realizaron las mediciones; para ello, se utilizó el módulo de reloj Tiny Rtc Ds3231 que se compone principalmente de un reloj DS3231, una memoria EEPROM AT24C32 y una pila de litio CR2032. Este módulo, mediante programación proporciona la fecha y hora exacta. Estas mediciones se guardan en una tarjeta de memoria externa cuyos valores son visualizados a través de un módulo TFT 1.8" con SDCard; y a su vez, son almacenados en un archivo de Excel (ver Figura 5b).



		Voltaje (V)		Corriente (A)		Potencia (Watts)	
	HORA	SEGUIDOR SOLAR	SISTEMA FIJO	SEGUIDOR SOLAR	SISTEMA FIJO	SEGUIDOESOLAR	SISTEMA FIJO
4	09:00	2.96	1.42	1.37	0.83	4.06	1.18
5	09:15	3.89	2.69	1.56	1.02	6.07	2.74
6	09:30	4.89	3.87	1.82	1.26	8.90	4.88
7	09:45	5.89	5.09	1.97	1.39	11.60	7.08
8	10:00	6.09	5.28	2.32	2.07	14.13	10.93
9	10:15	6.7	5.7	2.55	2.23	17.09	12.71
10	10:30	8.43	6.7	2.88	1.98	24.28	13.27
11	10:45	9.15	7.52	3.12	2.73	28.55	20.53
12	11:00	10.21	8.41	3.21	2.98	32.77	25.06
13	11:15	8.49	6.21	2.91	2.09	24.71	12.98
14	11:30	10.67	8.54	3.37	3.06	35.96	26.13
15	11:45	11.81	9.64	3.56	3.34	42.04	32.20
16	12:00	8.49	6.21	2.94	2.29	24.96	14.22
17	12:15	2.97	1.43	1.39	0.8	4.13	1.14
18	12:30	2.94	1.38	1.37	0.83	4.03	1.15
19	12:45	5.97	5.13	1.98	1.4	11.82	7.18
20	13:00	10.67	8.54	3.37	3.06	35.96	26.13
21	13:15	11.81	9.64	3.56	3.34	42.04	32.20

Figura 5. a) Hardware utilizado en el sistema de adquisición de datos; b) Datos almacenados en archivo de Excel.

2.3 El sistema fotovoltaico fijo

El panel solar del sistema fotovoltaico fijo utilizado para realizar las pruebas de campo de esta investigación, se posicionó con un ángulo de elevación de 19.8º aproximadamente con orientación sur, es decir, el ángulo de elevación o ángulo de incidencia de los rayos solares se define como el ángulo que forma la radiación solar directa con el vector director del plano. Para calcular el ángulo de incidencia se obtuvo empleando las aplicaciones Solar Topo y SunEarthTools.com.

2.4 Desarrollo experimental

Para determinar y comparar la eficiencia entre los dos sistemas fotovoltaicos evaluados en este trabajo, ambos se posicionaron con un ángulo de elevación fijo con dirección Sur de 19.8º aproximadamente, y una localización entre las coordenadas 19º34’30” de latitud norte, y 104º07’00” de longitud oeste, correspondientes a la ciudad de Autlán de Navarro, Jalisco, México y expuestos a dos condiciones climáticas diferentes, como se observa en la Figura 6.

Figura 6. Posicionamiento de los dos sistemas fotovoltaicos evaluados

La primera condición climática analizada consistió en la exposición de ambos sistemas a un día parcialmente nublado y la segunda condición para un día soleado. Para tal efecto, se tomaron los promedios de tres días parcialmente nublados correspondientes al 8, 12 y 14 del mes de agosto del 2019. Para evaluar la condición de día soleado, se consideraron los días 5, 18 y 27 de agosto del 2019. Para medir las variables de voltaje y corriente generadas, se utilizó el sistema de adquisición de datos implementado; con estas variables, se calculó la potencia eléctrica para cada sistema fotovoltaico.

Para determinar la eficiencia energética se empleó la Ecuación 2, la cual está indicada en la norma ISO 50001 y describe el cálculo de la eficiencia energética sobre sistemas de gestión de la energía, (International Organization for Standardization [ISO], 2011).

$$Eficiencia\ energética = \left(\frac{Potencia\ generada}{Potencia\ máxima}\right) \times 100\ \% \qquad (2)$$

Donde:
La *Eficiencia energética* está dada en porcentaje, la *Potencia generada* por el panel fotovoltaico se mide en Watts (W) y la *Potencia máxima* del mismo, en Watts (W).

La experimentación se realizó entre las 09:00 horas y las 19:00 horas, ya que fuera de este periodo de tiempo, se obtienen valores no representativos para el mencionado estudio y además el sistema no ofrece la potencia necesaria para la activación del motor eléctrico del sistema de posicionamiento. El intervalo entre cada una de las mediciones fue de 15 minutos.

La información obtenida mediante el sistema de adquisición de datos (voltaje y corriente) se exportó a una hoja de cálculo Excel, en donde se realizaron los cálculos correspondientes y se graficaron las curvas del comportamiento de la eficiencia para ambos sistemas fotovoltaicos con sus respectivas barras de error que corresponden a la desviación estándar de los datos obtenidos.

3. Resultados y discusión

La información expuesta en este trabajo corresponde a la comparación de la eficiencia de un sistema de paneles fotovoltaicos con seguimiento solar, comparado con un sistema fotovoltaico fijo, en las condiciones y periodos anteriormente señalados.

3.1 Condición día parcialmente nublado

La eficiencia alcanzada por los dos sistemas fotovoltaicos durante tres días parcialmente nublados en la ciudad de Autlán de Navarro, Jalisco fue graficada y se muestra en la Figura 7. En esta se observa que el sistema fotovoltaico con seguimiento solar generó mayor potencia eléctrica en promedio que el sistema fotovoltaico fijo. Particularmente, a las 14:15 horas, el sistema de seguimiento solar alcanzó su máxima eficiencia promedio (91.92 %), mientras que a las 11:00 horas se obtuvo la mayor diferencia de eficiencia promedio en comparación con el sistema fijo (29.76 %), esto es debido a que el sistema de seguimiento solar mantiene un ángulo de incidencia perpendicular con los rayos solares promoviendo una mayor captación de energía.

Por otro lado, de las 9:00 a las 10:15 horas, de las 14:00 a las 14:45 horas y de las 17:45 a las 19:00 horas, se registró una eficiencia similar para ambos sistemas fotovoltaicos, debido a que, en esos tres lapsos de tiempo, captaron una cantidad semejante de energía solar. Para el periodo de 14:00 a 14:45 horas los dos sistemas fotovoltaicos se encuentran con una orientación similar con respecto a los rayos solares.

La eficiencia promedio generada por el sistema de seguimiento solar durante la condición de

día parcialmente nublado fue de 42.17 % ó 27.41 W, mientras que el sistema fijo consiguió 32.09 % ó 20.86 W; es decir, el sistema de seguimiento solar obtuvo una eficiencia promedio mayor de 10.07 % ó 6.55 W, en comparación con el sistema fijo. Cabe mencionar que las barras de error correspondientes a la desviación estándar de los datos tienen un tamaño considerable debido a las diferencias atmosféricas entre los días evaluados en esta condición.

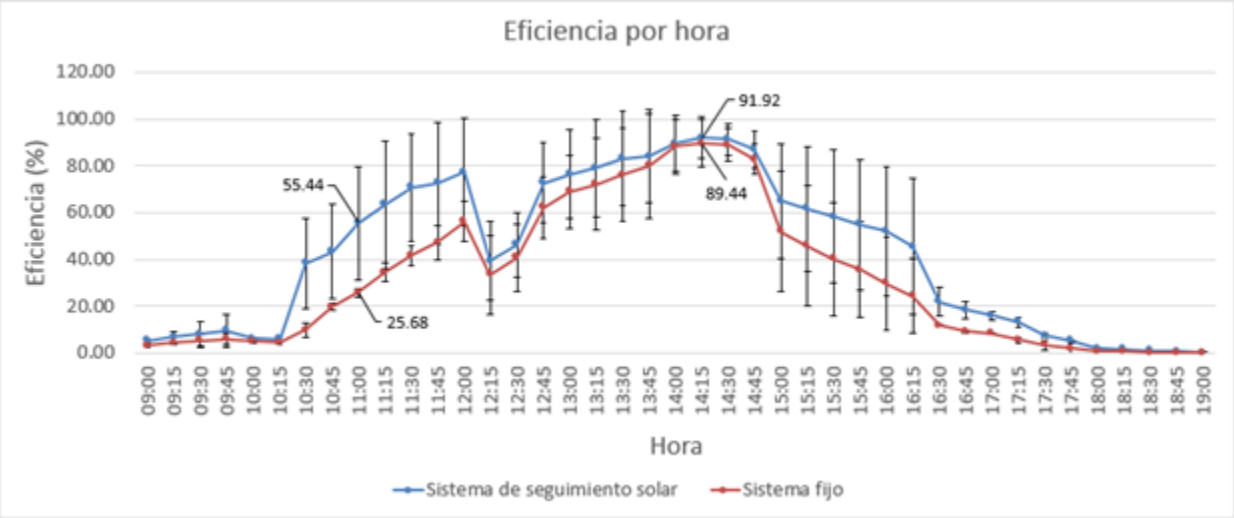


Figura 7. Gráfica del comportamiento de la eficiencia obtenida para la condición día parcialmente nublado

3.2 Condición día soleado

En este trabajo se experimentó con tres días soleados (5, 18 y 27 de agosto del 2019), debido a la nula nubosidad presentada. La eficiencia obtenida por ambos sistemas durante ese día, se muestra en la Figura 8. En la gráfica se aprecia que a las 14:00 horas el sistema de seguimiento solar consiguió su máxima eficiencia (96.54 %), mientras que a las 16:15 horas registró la mayor eficiencia en comparación con el sistema fijo (42.94 %). En la misma gráfica se observa una meseta que va desde las 11:45 hasta las 16:15 horas, esto indica que durante cuatro horas y media el sistema de seguimiento solar logra captar de manera sostenida la máxima energía que puede generar el panel fotovoltaico.

Por otro lado, la eficiencia promedio generada por el sistema de seguimiento solar durante la condición del día soleado fue de 62.99 % ó 40.94 W, mientras que el sistema fijo consiguió 42.80 % ó 27.82 W, es decir, el sistema de seguimiento solar obtuvo una eficiencia promedio mayor de 20.19 % ó 13.12 W, en comparación con el sistema fijo. Es importante destacar que las barras de error para este gráfico correspondientes a la desviación estándar de los datos fueron considerablemente pequeñas, lo que indica una baja variabilidad de las mediciones obtenidas para la condición de día soleado. Este dato demuestra que, en días soleados, ambos sistemas fotovoltaicos son más eficientes que en días parcialmente nublados. El comportamiento de ambas gráficas indica que, en todo momento, la eficiencia del sistema de seguimiento solar fue

mayor en comparación con el sistema fijo. Particularmente en dos momentos, el primero a las 11:00 horas con 42.69 % y el segundo momento a las 16:15 horas con 42.94 %. Esto se debió a que el sistema fijo recibe los rayos solares con ángulos de incidencia menores a 90°. Por otra parte, en las Tablas 2 y 3 se presentan los costos de adquisición de los materiales utilizados por ambos sistemas fotovoltaicos.

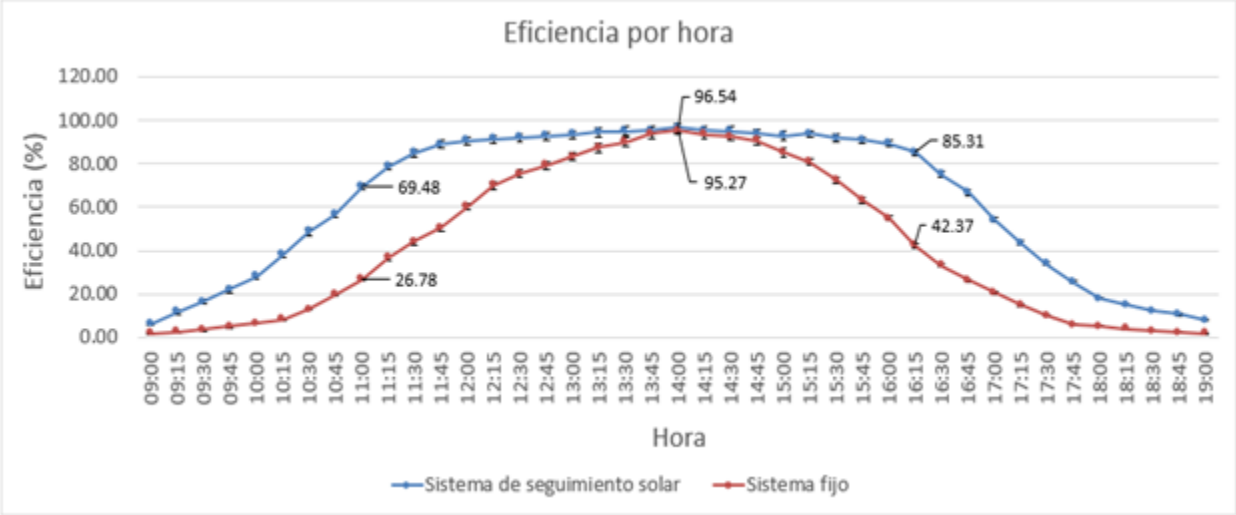


Figura 8: Gráfica del comportamiento de la eficiencia para la condición de día soleado

Tabla 2. Costos de adquisición de los materiales utilizados en el sistema fotovoltaico de seguimiento solar

Material	Precio unitario	Costo (MXN)
Panel solar 65 W	$1,650	$1,650
Conector solar Mc4 (2)	$19	$38
Celda solar fotovoltaica 6v, 3w (2)	$129	$258
Motor de DC 6V 200RPM	$172	$172
Masa de eje de bicicleta (2)	$150	$300
Juego de rueda dentada para bicicleta (2)	$120	$240
Cadena para bicicleta	$110	$110
Lámina de 1/8” para soporte del panel	$80	$80
Perfil tubular rectangular de 1x2” (50 cm)	$90	$90
Electrodos de soldadura 6013	$35	$35
Tornillería	$80	$80
Maquinado de piezas y mano de obra	$800	$800
Total	$3,435	$3,853

Tabla 3. Costos de adquisición de los materiales utilizados en el sistema fotovoltaico fijo

Material	Precio unitario	Costo (MXN)
Panel solar 65 W	$1,650	$1,650
Conector solar Mc4 (2)	$19	$38
Base de aluminio para el panel	$300	$300
Mano de obra	$200	$200
Total	$2,169	$2,188

De acuerdo con la tarifa de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) por energía consumida para agosto de 2020, es de $0.845 por cada kilowatt-hora de consumo básico. De este modo, para la condición de día soleado fue obtenido el costo que representa la energía generada para ambos sistemas evaluados.

Sistema fotovoltaico con seguidor solar: 0.041 KW por hora x $0.845 = $0.035.
Sistema fotovoltaico fijo: 0.028 KW por hora x $0.845 = $0.024.

De acuerdo con lo anterior, se observa que el sistema fotovoltaico con seguidor solar muestra una ganancia económica aproximadamente de un 46 % comparado con el sistema fotovoltaico fijo.

4. Conclusiones

La máxima eficiencia alcanzada por ambos sistemas fotovoltaicos se obtuvo a las 14:00 horas, alcanzando valores de 96.54 % en el sistema de seguimiento solar y 95.27 % en el sistema fijo. Por otra parte, la mayor diferencia en la eficiencia obtenida entre los dos sistemas se midió en dos momentos a las 11:00 y a las 16:15 horas.

El sistema de seguimiento solar implementado logró optimizar la eficiencia de los paneles solares fotovoltaicos, pues en el periodo experimental de ambas condiciones, el porcentaje promedio de la eficiencia del sistema de seguimiento solar fue mayor que el sistema fijo en un 20.19 %.

En cuanto al costo, se ha obtenido para los principales elementos mecánicos y de control del seguidor un costo de $3,853 pesos mexicanos, considerado accesible teniendo en cuenta que representa aproximadamente un 176 % del costo de un sistema fotovoltaico fijo. Sin embargo, el sistema fotovoltaico con seguidor solar muestra una ganancia económica aproximadamente de un 46 % comparado con el sistema fotovoltaico fijo.
Al extraer más energía del panel fotovoltaico con seguimiento solar durante un tiempo mayor, ocasiona que el sistema propuesto sea más rentable comparado con la que se logra con paneles solares fijos.

Agradecimientos

Los autores agradecen el financiamiento recibido a través del Departamento de Ingenierías del Centro Universitario de la Costa Sur de la Universidad de Guadalajara para desarrollar parte del presente proyecto.

Referencias

Amelia, A. R., Irwan, Y. M., Safwati, I., Leow, W. Z., Mat, M.H. and Abdul Rahim, M. S. (2020). Technologies of solar tracking systems: A review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 767*, 1-10. doi:10.1088/1757-899X/767/1/012052

Arreola Gómez, R., Quevedo Nolasco, A., Castro Popoca, M., Bravo Vinaja, Á. y Reyes Muñoz, D. (2015). Diseño, construcción y evaluación de un sistema de seguimiento solar para un panel fotovoltaico. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, *6*(8), 1715-1727. Recuperado de https://biblat.unam.mx/en/revista/revista-mexicana-de-ciencias-agricolas/articulo/diseno-construccion-y-evaluacion-de-un-sistema-de-seguimiento-solar-para-un-panel-fotovoltaico

Aung, E. E. (2019). Single Axis Solar Tracking System. *International Journal of Science and Engineering Applications, 8,* 283-286. doi: 10.7753/IJSEA0808.1006

Curtin, J. F. y Magolis, F. (2009). El uso eficiente de la energía. *eJournal USA*, *14*(4), 1-35. Recuperado de https://photos.state.gov/libraries/amgov/30145/publications-spanish/EJ-energy-0409sp.pdf

Ecologistas en Acción. (2005). *Propuesta para el desarrollo de la energía solar fotovoltaica*. Recuperado de https://www.ecologistasenaccion.org/wp-content/uploads/adjuntos-spip/pdf/propuesta_fotovoltaica.pdf

Escobar Mejía, A., Holguín Londoño, M. y Osorio R., J. C. (2010). Diseño e implementación de un seguidor solar para la optimización de un sistema fotovoltaico. *Scientia et Technica*, *16*(44), 245-250. Recuperado de https://www.redalyc.org/pdf/849/84917316046.pdf

Flores Rivera, N. R. y Domínguez Ramírez, M. Á. (2016). *Medición de la eficiencia energética de los paneles solares de silicio* (tesis de maestría). Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV), Chihuahua, Chihuahua, México.

International Organization for Standardization [ISO]. (2011). *ISO 50001 - Energy management*. Recuperado de https://www.iso.org/iso-50001-energy-management.html

Lin, Y. C., Panchangam, S. C., Liu, L. C. and Lin, A. Y. (2019). The design of a sunlight-focusing and solar tracking system: A potential application for the degradation of pharmaceuticals in water. *Chemosphere*, *214*(1), 452-461. doi: 10.1016/j.chemosphere.2018.09.114

Machado Toranzo, N., Lussón Cervantes, A., Leysdian Oro Carralero, L., Bonzon Henríquez, J. y Escalona Costa, O. (2015). Seguidor solar, optimizando el aprovechamiento de la energía solar. *Ingeniería Energética*, *36*(2), 190-199. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/317517636

Marín- Jiménez J. D. y González-Cruz, P. J. (2020). Lecciones aprendidas del diseño de parques solares fotovoltaicos: Un enfoque de las características técnicas. *Revista de I+D Tecnológico, 16*(1), 54-60. Recuperado de https://revistas.utp.ac.pa/index.php/id-tecnologico/article/view/2440

Mousazadeh, H., Keyhani, A., Javadi, A., Mobli, H., Abrinia, K. and Sharifi, A. (2009). A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output. *Renewable and*

Sustainable Energy Reviews, *13*(8), 1800-1818. Recuperado de https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.01.022

Noa-Diéguez, L. Y., Álvarez-Sánchez, V. y Pérez-Rodríguez, R. (2015). Diseño paramétrico asistido por computadora de un seguidor solar fotovoltaico a un eje polar. *Ciencias Holguín*, *21*(2), 1-12. Recuperado de http://www.ciencias.holguin.cu/index.php/cienciasholguin/article/view/871

Palomar-Carnicero, J. M., Casanova-Peláez, P., Díaz-Garrido, F. A., Cruz-Peragón, F. y López-García, R. (2009). Nuevo sistema de seguimiento solar de dos ejes basado en el mecanismo de biela – manivela. *Tecnología Energética*, *84*(8), 671-680. doi: http://dx.doi.org/10.6036/2524

Sharaf Eldin, S. A., Abd-Elhady, M. S. and Kandil, H. A. (2016). Feasibility of solar tracking systems for PV panels in hot and cold regions. *Renewable Energy*, *85*(1), 228-233. doi: 10.1016/j.renene.2015.06.051

Sharma, A., Vaidya, V. and Jamuna, K. (2017). Design of an automatic solar tracking controller: Solar tracking controller. *In 2017 International Conference on Power and Embedded Drive Control (ICPEDC)*, 505-510. doi: 10.1109/ICPEDC.2017.8081141