

Comparativa entre la eficiencia de un sistema fotovoltaico con
seguimiento solar y la de un sistema fotovoltaico fijo

*Comparison between a photovoltaic solar tracker efficiency and a fixed
photovoltaic system*

Jorge Arturo Pelayo López

Centro Universitario de la Costa Sur de la Universidad de Guadalajara, México
jorgep@cusur.udg.mx

Alfredo Luna Soto

Centro Universitario de la Costa Sur de la Universidad de Guadalajara, México
Alfred@cucsur.udg.mx

Francisco Bernabe Ramos

Centro Universitario de la Costa Sur de la Universidad de Guadalajara, México
fbernabe@cucsur.udg.mx

Benjamín Guzmán Flores

Centro Universitario de la Costa Sur de la Universidad de Guadalajara, México
benjamin@cucsur.udg.mx

Resumen

Para la generación eficiente de energía eléctrica utilizando paneles fotovoltaicos, la óptima instalación de éstos, juega un papel importante, ya que mejora la eficiencia del mismo. Para encontrar la salida máxima de un panel fotovoltaico, se pueden implementar sistemas de control

de posicionamiento (seguidor solar) aplicando una técnica o un algoritmo de búsqueda del punto máximo de energía para mejorar la eficiencia del sistema. En el presente trabajo se aborda el diseño y la construcción de un sistema fotovoltaico con seguimiento solar de dos ejes. El objetivo es determinar la eficiencia de este sistema y compararla con un sistema fotovoltaico fijo o estático. El seguidor solar construido, cuenta con celdas independientes que actúan como sensores y alimentan a los motores encargados de girar el panel fotovoltaico tanto en el eje vertical como en el horizontal. Para la adquisición de la energía generada por cada uno de los dos sistemas de paneles solares, se utilizó la tarjeta Arduino Nano 3.0 y diversos módulos, utilizando el entorno de programación propio de Arduino. Después de haber realizado las pruebas de campo durante 30 días, se confrontaron los resultados de ambos sistemas. Los resultados muestran que la eficiencia del sistema fotovoltaico con seguimiento solar, es mayor que el sistema fotovoltaico fijo en un 25.8%, aproximadamente.

Palabras clave: Arduino, potencia, seguidor solar, sistema fijo, sistema fotovoltaico.

Abstract

The optimal installation of photovoltaic panels plays an important role for the efficient generation of electrical energy. To find the maximum energy point of a photovoltaic panel, the positioning control system (solar tracker) can be implemented by means of a technique or a search algorithm to improve the generation system efficiency. In the present work the design and construction of two shafted photovoltaic solar tracker system was addressed. The aim is to determine the efficiency of this system and compare with a fixed or static photovoltaic system. The solar tracker has independent cells that act as sensors and feed the DC motors responsible of turning the photovoltaic panel in both the vertical and the horizontal axis. For the acquisition of the power generated by each solar panel, an Arduino Nano 3.0 card and different modules were used, as well as the environment itself Arduino programming was also utilized. Field tests were conducted for 30 days, and the results of both systems were compared, and showed that the efficiency of photovoltaic solar tracker system was greater than the fixed photovoltaic system in a 25.8%, approximately.

Keywords: Arduino, power, solar tracker, fixed system, photovoltaic system.

Introducción

Los temas ambientales en la generación de la energía es uno de los más importantes de la actualidad, el uso de la quema de combustibles fósiles es uno de los principales medios de obtención de electricidad que representa más de 80% de la energía producida en el mundo (Dick Hedberg, 2010; Noa-Diéguez, Álvarez-Sánchez y Pérez-Rodríguez, 2015). De acuerdo a las estadísticas de la Agencia Internacional de Energía (IEA, por sus siglas en inglés), en el mundo se producen 21,431 TWh, y en México 259 TWh; es decir, 75% de la energía producida a nivel mundial proviene de combustibles fósiles tales como carbón, petróleo y gas natural, y en México esta proporción es mayor, aproximadamente un 77% (IEA, 2010). La alta explotación de tales fuentes no renovables ha producido consecuencias tales como el efecto invernadero, el calentamiento global y el deterioro de ecosistemas terrestres y marinos. Ante esta situación, crece el interés por el aprovechamiento de fuentes limpias para la generación de electricidad. Entre dichas fuentes limpias, la energía solar figura como una alternativa de alto potencial especialmente en regiones intertropicales. La radiación solar puede generar el doble de la energía producida con combustibles fósiles, a pesar de la baja eficiencia de los generadores, la cual es de un 10% aproximadamente (Mousazadeh, Keyhani, Javadi, Mobli, Abrinia, & Sharifi, 2009). Son por estas razones por lo cual se invierte más tiempo y trabajo en la investigación y desarrollo de más y mejores tecnologías de energías renovables como la energía del viento, del Sol, térmica y biocombustibles (Iglesias y Morales, 2013).

En las últimas décadas, el campo de las fuentes renovables de energía ha cobrado importancia para el desarrollo sustentable. La energía solar se presenta como una alternativa eficiente y económica, en comparación con otras formas tradicionales, para la generación de energía eléctrica. Lo anterior ha aumentado la necesidad de un mayor aprovechamiento de la energía solar (Machado Toranzo, Lussón Cervantes, Leysdian Oro Carralero, Bonzon Henríquez y Escalona Costa, 2015 y Noa-Diéguez *et al.*, 2015).

Según Neha, Gugri, Mishra, & Dubey (2013), la cantidad de energía solar recibida anualmente por la Tierra, representa diez mil veces el consumo del planeta en ese mismo período de tiempo. Por lo tanto, además de ser el Sol el actor principal de los procesos biológicos en la Tierra, es una poderosa e inagotable fuente de energía, la cual puede ser aprovechada mediante un adecuado sistema de captación y conversión a otro tipo de energía, por ejemplo energía eléctrica, térmica, entre otras (Arroyo Romero y Cortés Montes de Oca, 2015 y Noa-Diéguez *et al.*, 2015).

Los sistemas de generación de energía por medio de paneles fotovoltaicos, tienen el potencial para generar una porción significativa de la energía mundial. Estos paneles fotovoltaicos funcionan cuando la luz del Sol excita los electrones dentro de las células generando así energía eléctrica (Pimentel, Herz, Glickstein, Zimmerman, Allen, Becker, Evans, Hussain, Sarsfeld, Grosfeld, & Seidel, 2002). Para la generación eficiente de energía eléctrica utilizando paneles fotovoltaicos, el ángulo de incidencia de los rayos solares juega un papel importante, ya que una buena instalación del panel mejora la eficiencia del mismo. Para diferentes valores del ángulo de incidencia en un panel, la salida de este cambiará, el máximo valor de salida se obtiene cuando los rayos de Sol son perpendiculares al panel (Kahn, 2012 y Escobar Mejía, Holguín Londoño y Osorio, 2010), por lo tanto, para encontrar la salida máxima de un panel fotovoltaico se pueden implementar sistemas de control de posicionamiento (seguidor solar) aplicando una técnica o un algoritmo de búsqueda del punto máximo de energía para mejorar la eficiencia del sistema (Panait, & Tudorache, 2008; Escobar Mejía *et al.*, 2010; Grupta, 2011 y Enriquez, Andújar, & Bohórquez, 2013).

El seguidor solar es un aparato tecnológico, cuya función es aumentar la producción de energía utilizando paneles fotovoltaicos y otros dispositivos de concentración por medio de sistemas mecánicos, eléctricos y electrónicos que siguen la trayectoria del Sol como lo haría un girasol, capturando de esta manera la máxima radiación solar durante el mayor tiempo posible. Los sistemas fotovoltaicos con seguimiento se pueden dividir en sistemas de seguimiento de un eje, o sistemas de seguimiento de dos ejes. Los sistemas de un solo eje perpendicular al suelo pueden sólo seguir el azimut solar, pero no pueden seguir la altitud solar. Mientras que un sistema seguidor de dos ejes puede seguir tanto el azimut como la altitud del Sol y puede ser más eficiente que un sistema de un solo eje (Koussa, 2011 y Ahmet Senpınar, 2012).

El objetivo de este trabajo es diseñar y construir un sistema fotovoltaico con seguimiento solar de dos ejes. El sistema desarrollado será comparado con un sistema fotovoltaico fijo, con la finalidad de determinar la eficiencia de ambos sistemas.

Materiales y métodos

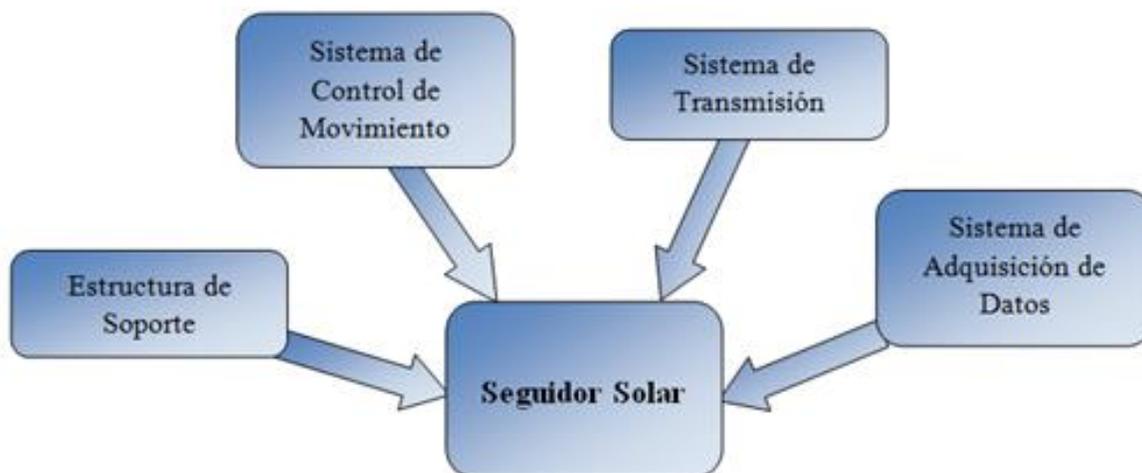
a) Sistema fotovoltaico con seguimiento solar

El sistema con seguimiento solar (también llamado seguidor solar) propuesto en este trabajo, es de dos ejes, y está conformado por cuatro partes básicas, de las cuales, una es estructura y tres son sistemas. Estas partes son:

1. Estructuras de soporte.
2. Sistema de control de movimiento.
3. Sistema de transmisión (etapa de potencia).
4. Sistema de adquisición de datos.

En la figura 1 se muestra el esquema a bloques de las partes básicas que conforman el seguidor solar descrito en este trabajo.

Figura 1. Estructura y sistemas del seguidor solar.



Fuente: elaboración propia.

Estructura de soporte

La estructura metálica que soporta al sistema fotovoltaico con seguimiento solar construido, es de material tubular de metal, ángulos de metal y Perfil Tubular Rectangular (PTR). La estructura brinda firmeza al seguidor solar, soporta al sistema de control de movimiento y al de transmisión, y ofrece puntos de unión y agarre de los mismos. Las figuras 2 (a), 2 (b), 2 (c), 2 (d) y 2 (e) muestran el diseño de la estructura de soporte realizado mediante el software SolidWorks.

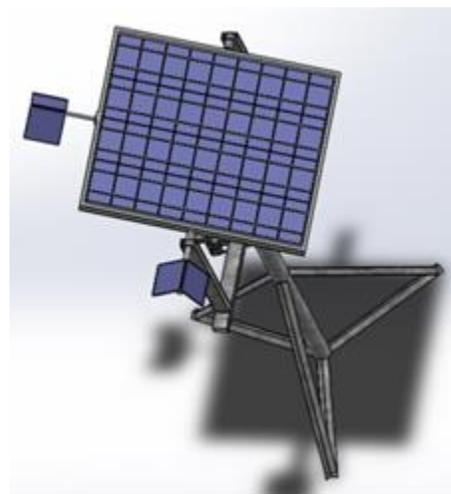
Figura 2. Estructura de soporte para el sistema fotovoltaico con seguimiento solar.



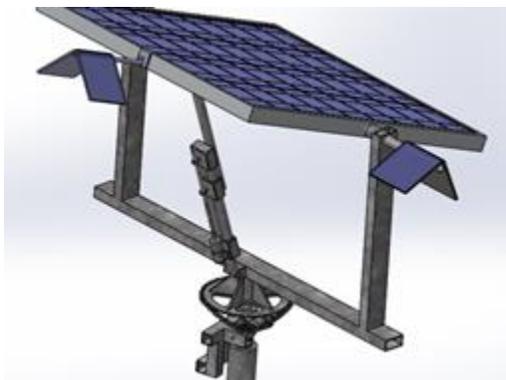
(a)



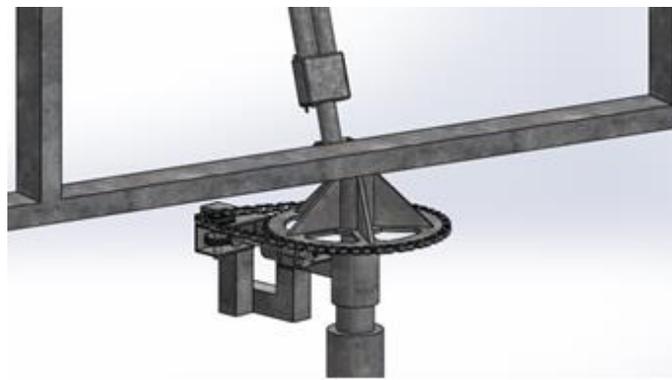
(b)



(c)



(d)



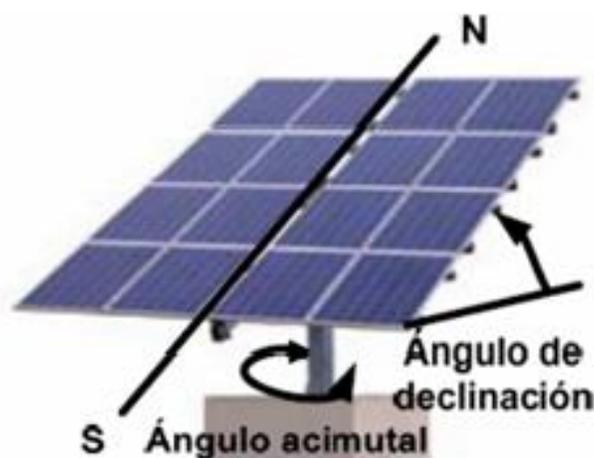
(e)

Fuente: elaboración propia.

Sistema de control de movimiento

Este sistema es el encargado de obtener el ángulo acimutal o de azimut correspondiente al movimiento del eje vertical y el ángulo de declinación o de elevación propio del movimiento del eje horizontal del panel fotovoltaico (Fig. 3).

Figura 3. Ángulo acimutal y de declinación del seguidor solar.



Fuente: Nuñez Flores, 2012.

A continuación, se explica el sistema que controla los movimientos del panel fotovoltaico:

El sistema utiliza un par de celdas solares independientes con especificaciones técnicas de 6 Vcc, 110 mA y 0.6 W cada una. Dichas celdas solares actúan como sensores para proporcionar el movimiento vertical (acimutal). Estas celdas están localizadas una a noventa grados de la otra y se encuentran colocadas en parte superior del panel solar (Fig. 4), dependiendo de cuál de las dos celdas solares recibe más luz, entonces será el movimiento acimutal que va a tener el panel fotovoltaico.

Otro par de celdas solares independientes (Fig. 4) también son utilizadas como sensores para proporcionar el movimiento horizontal, estas celdas tienen el mismo funcionamiento que los sensores que dan el movimiento acimutal.

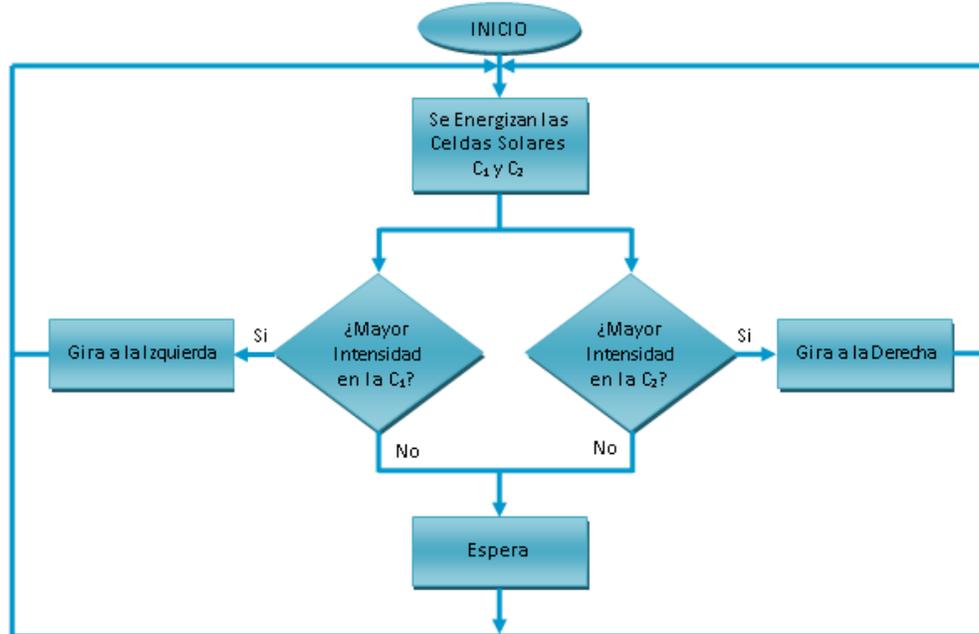
Figura 4. Sensores para el movimiento vertical y horizontal del seguidor solar.



Fuente: elaboración propia.

En la figura 5 se ilustra el diagrama de flujo para el control de movimiento del sistema fotovoltaico construido.

Figura 5. Diagrama de flujo para el control de movimiento del sistema con seguimiento solar.

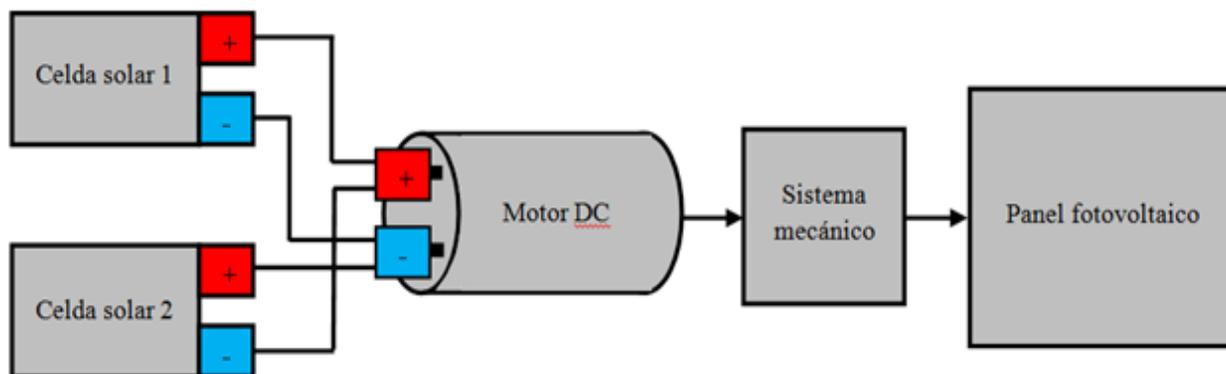


Fuente: elaboración propia.

Sistema de transmisión (etapa de potencia)

Este sistema está constituido por un conjunto de estrellas y cadenas como se mostró en las figuras 2 (d) y 2 (e), que son movidos por motores de corriente directa (DC). El seguidor solar utiliza dos motores para su funcionamiento, uno para el movimiento vertical y otro para el movimiento horizontal. El sentido del movimiento de los motores es definido por la diferencia de potencia que emiten las celdas solares. La conexión de las celdas solares a cada uno de los motores que proporcionan los movimientos vertical y horizontal, se muestra en la figura 6, y se explica de la siguiente manera: la celda solar 1 se encuentra conectada al motor con polarización directa (positivo de la celda solar con el positivo del motor y negativo de la celda solar con el negativo del motor), esto ocasiona que cuando el Sol irradia a esta celda solar, ella hace girar el motor en sentido de las manecillas del reloj. La celda solar 2 está conectada en polarización inversa (positivo de la celda solar con el negativo del motor y negativo de la celda solar con el positivo del motor), cuando el Sol irradia a esta segunda celda solar, entonces la celda hace girar el motor en sentido contrario a las manecillas del reloj. Ahora bien, cuando el Sol irradia con la misma intensidad a las dos celdas solares, entonces el motor permanece sin movimiento.

Figura 6. Sistema de transmisión para el movimiento vertical y horizontal del panel fotovoltaico.

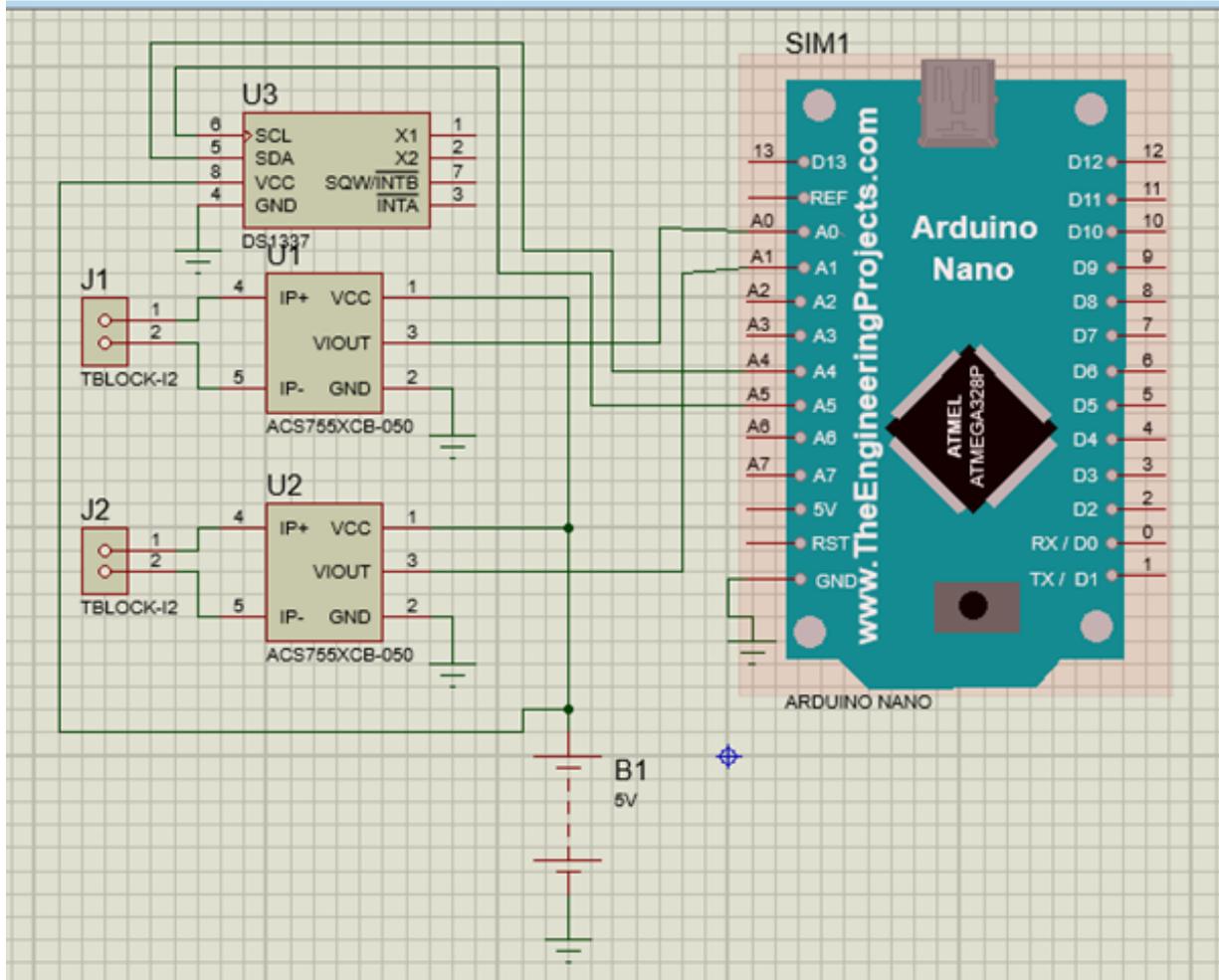


Fuente: elaboración propia.

Sistema de adquisición de datos

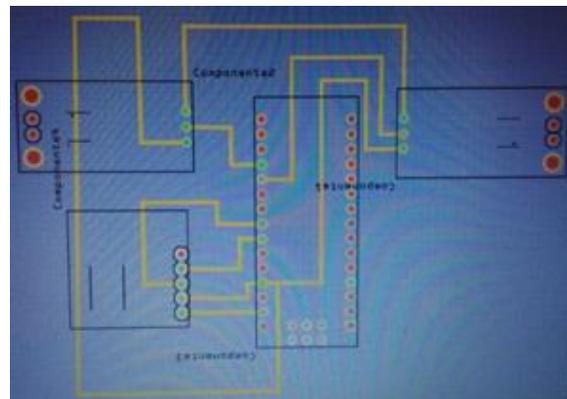
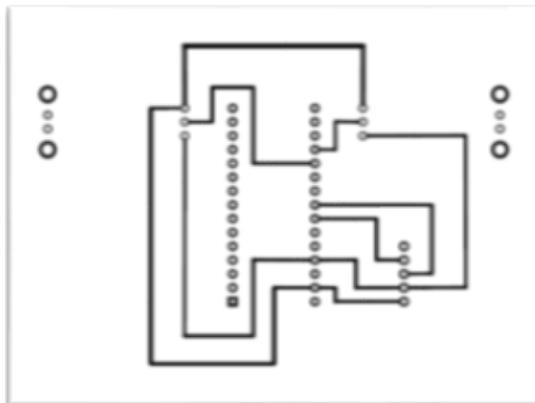
Para la adquisición tanto del amperaje como del voltaje que emiten cada uno de los dos paneles fotovoltaicos (con seguimiento solar y fijo) se utilizó una tarjeta Arduino Nano 3.0, un sensor de tiempo real DS3231, dos sensores de corriente ACS712 y varios conectores. Estos componentes electrónicos se encuentran interconectados a través de una tarjeta de circuito impreso (del inglés: Printed Circuit Board, PCB), a la que se denominó “tarjeta de adquisición de datos”. En la figura 7 se muestra el diagrama de conexiones de esta tarjeta. En las figuras 8 (a) y 8 (b), se expone la tarjeta de circuito impreso de la misma, y en la figura 9, se exhibe la tarjeta de adquisición de datos utilizada durante las pruebas de campo para obtener la corriente, el voltaje y, por ende, la potencia generada por ambos sistemas.

Figura 7. Diagrama de conexiones de esta tarjeta de adquisición de datos.



Fuente: elaboración propia.

Figura 8. Diseño PCB de la tarjeta de adquisición de datos.



(a)

(b)

Fuente: elaboración propia.

Figura 9. Tarjeta de adquisición de datos.



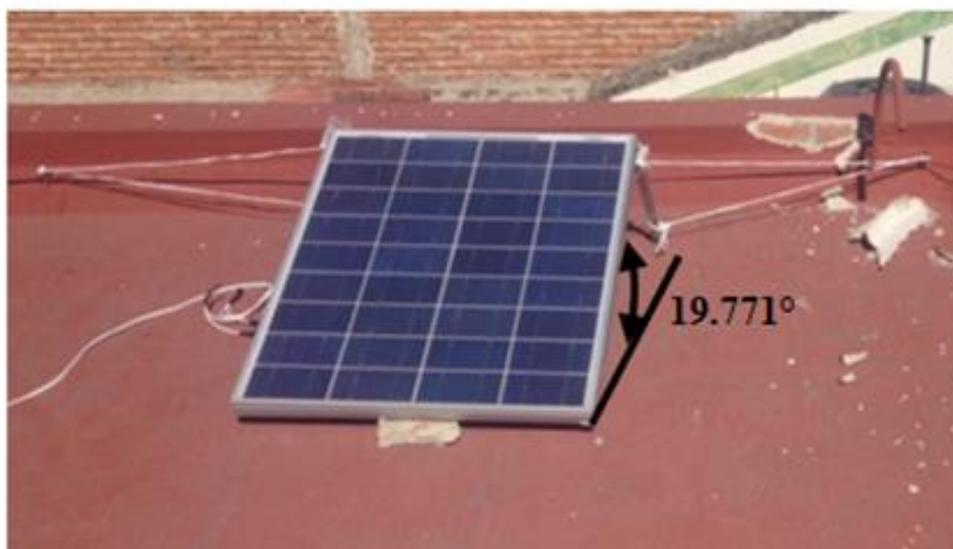
Fuente: elaboración propia.

b) Sistema fotovoltaico fijo

El sistema fotovoltaico fijo utilizado en este trabajo, consiste en un panel fotovoltaico de 65 W de potencia, posicionado con un ángulo de elevación fijo igual a 19.771° . En la figura 10 se observa este sistema, el cual fue instalado en la ciudad de Autlán de Navarro, Jalisco, para realizar las pruebas de campo de esta investigación. Cabe señalar que el ángulo de elevación de este panel, se

obtuvo con la ayuda de las aplicaciones “SunEarthTools.com” y “Solar Topo”, ambas aplicaciones se encuentran disponibles en la red sin costo alguno.

Figura 10. Sistema fotovoltaico fijo.



Fuente: elaboración propia.

Metodología

El trabajo de campo de esta investigación se llevó a cabo con la experimentación de los dos sistemas fotovoltaicos tratados en este trabajo y durante un periodo de 30 días, de los cuales, 15 días fueron del mes de febrero de 2017 y 15 días del mes de marzo del mismo año. Ambos sistemas utilizan paneles fotovoltaicos de 65 W. Para realizar las pruebas de campo y con ello, la adquisición de los datos correspondientes a las mediciones de energía eléctrica generada, tanto el sistema construido como el sistema fijo, se instalaron en el domicilio de Adán Uribe 111B, situado en la ciudad de Autlán de Navarro, Jalisco, con ubicación geográfica de 19.771° de latitud.

Para la medición de la potencia generada por cada uno de los sistemas de paneles fotovoltaicos, se implementó un sistema de adquisición de datos basado en la plataforma Arduino, el cual permitió percibir mediciones de voltaje y corriente, y calcular simultáneamente la potencia mediante la fórmula 1.

$$P = VI$$

(1)

Donde:

P = Potencia eléctrica (W).

V = Voltaje (V).

I = Corriente eléctrica (A).

La información obtenida mediante la tarjeta de adquisición de datos (voltaje y corriente) se exportó a una hoja de cálculo de Excel, en donde se realizaron las gráficas del comportamiento de la potencia eléctrica generada diariamente por ambos sistemas fotovoltaicos. Cabe mencionar que el horario en el que se realizó la experimentación diaria, fue de las 9:00 horas, a las 19:00 horas, ya que antes y después de ese horario, se adquirirían valores mínimos. El intervalo de tiempo entre cada una de las mediciones fue de 15 minutos.

Resultados

La información expuesta en este trabajo, corresponde a la energía generada por ambos sistemas de paneles fotovoltaicos, en los días más extremos de los meses antes mencionados, como lo son: el primer día de prueba (15 de febrero de 2017), un día parcialmente nublado (19 de febrero de 2017) y un día soleado (14 de marzo del mismo año). También se presenta la información recabada correspondiente a la energía generada durante los 30 días experimentados (del 15 de febrero de 2017, al 15 de marzo de 2017).

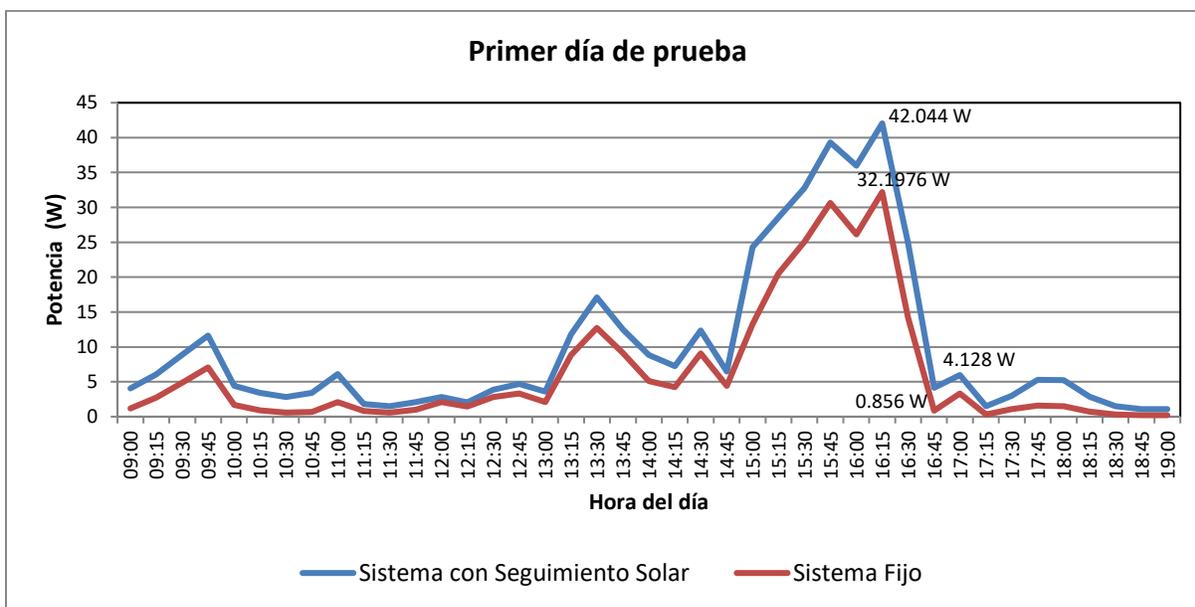
Primer día de prueba

Las diferencias en la potencia generada por los dos sistemas fotovoltaicos durante el 15 de febrero de 2017 (primer día de prueba) se muestran en la figura 11. En la gráfica se observa, que en todo momento el sistema fotovoltaico con seguimiento solar generó más potencia eléctrica que el sistema fotovoltaico fijo. También se observa, que a las 16:15 horas de este día, el sistema con seguimiento solar generó su máxima potencia (42.044 W), y es muy notorio la reducción de

potencia que se generó a las 16:45 horas, con tan solo 4.128 W, es decir, en media hora ocurrió un descenso de potencia de 37.912 W. Según los datos recabados (Anexo A), la potencia promedio generada por el sistema diseñado durante este día, fue de 10.227 W, mientras que el sistema fijo generó un promedio de 6.641 W, de lo cual, se deduce que, el porcentaje de la eficiencia del sistema con seguimiento solar para este día fue 54% mayor que el sistema fijo. Lo anterior comprueba, que durante este día, el sistema con seguimiento solar logró generar mayor energía que el sistema fijo.

Cabe señalar que las caídas bruscas de potencia que se observan en la figura 11, corresponden a periodos nublados.

Figura 11. Gráfica del comportamiento de la potencia generada el 15 de febrero de 2017.



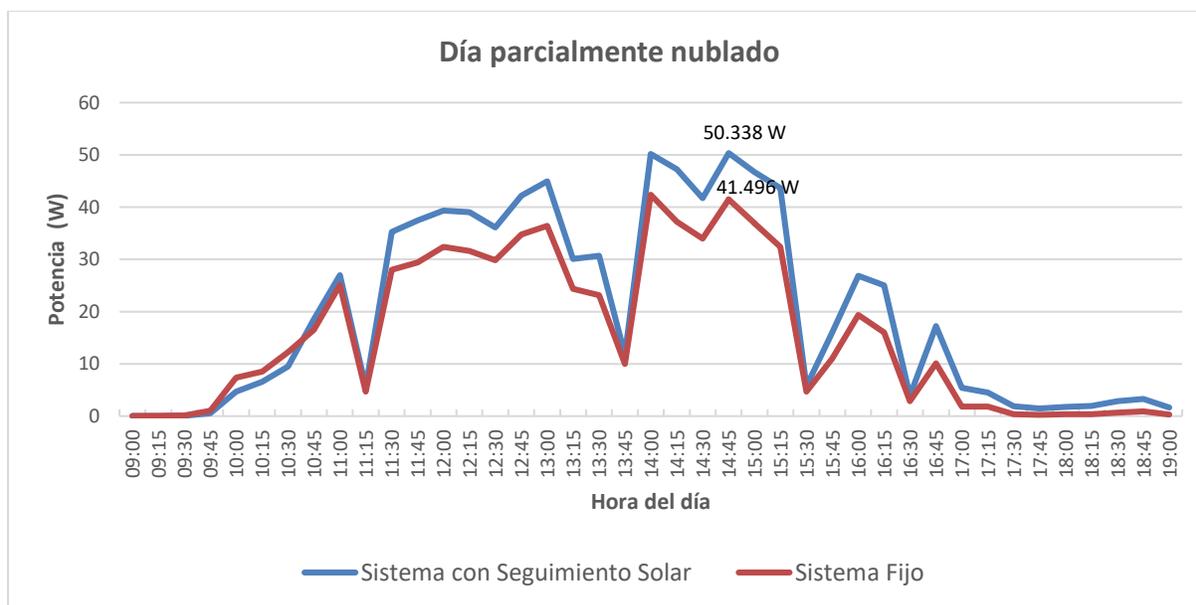
Fuente: elaboración propia.

Día parcialmente nublado

En la ciudad de Autlán de Navarro, Jalisco, el día 19 de febrero de 2017, fue considerado un día parcialmente nublado, por tener en distintos momentos nubosidades. La gráfica de la potencia generada por ambos sistemas fotovoltaicos durante un día parcialmente nublado, se muestra en la figura 12. En las primeras horas de la mañana, se observa, que el sistema fijo generó más potencia

que el sistema con seguimiento solar, y aproximadamente a las 10:45 horas, el sistema con seguimiento solar logró producir más energía que el sistema fijo. También se observa, que el valor máximo de potencia generada por el seguidor solar, es de 50.338 W (a las 14:45 horas). Durante el resto del día, se puede notar que el sistema con seguimiento solar es más eficiente, ya que logró mantener valores por arriba del sistema fijo. La potencia promedio generada por el sistema con seguimiento solar, durante este día, fue de 19.969 W (Anexo B), y por el sistema fijo fue de 15.873 W (Anexo B), de lo anterior se deduce que, el porcentaje de la eficiencia del sistema con seguimiento solar, para este día fue 25.80% mayor que el sistema fijo. Lo que comprueba que el sistema con seguimiento solar, logró obtener una mayor generación de energía, durante cielos parcialmente nublados.

Figura 12. Gráfica del comportamiento de la potencia generada el día 19 de febrero de 2017.



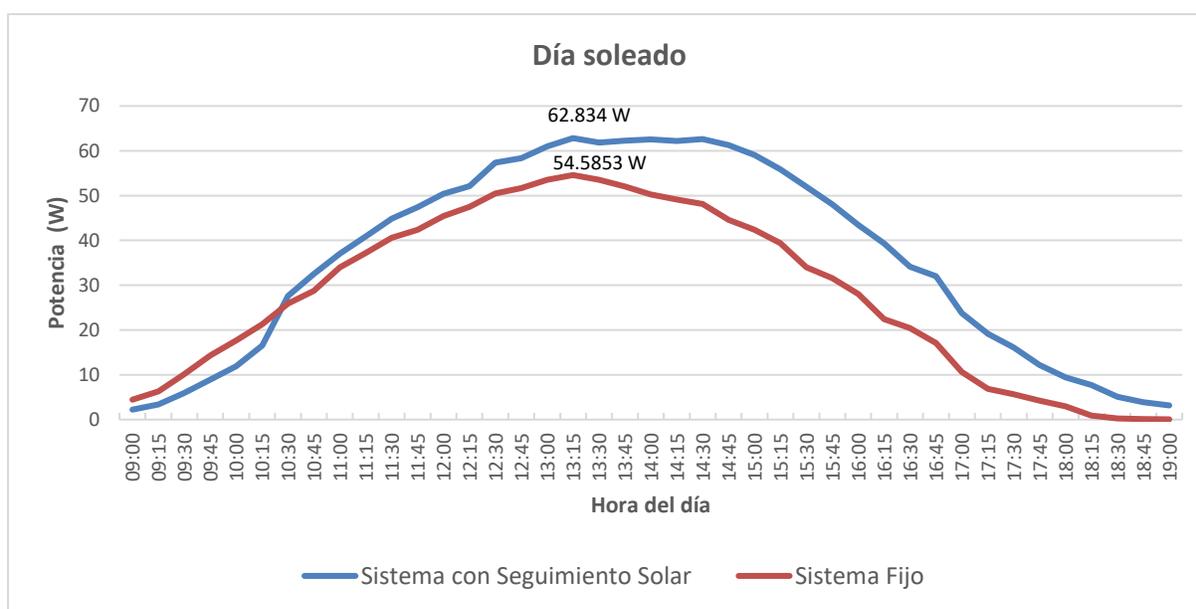
Fuente: elaboración propia.

Día soleado

En esta misma ciudad, el día 14 de marzo de 2017, fue considerado un día soleado por presentar casi nula nubosidad durante el día. La gráfica correspondiente a la potencia generada durante un día soleado, por los sistemas fotovoltaicos, se muestra en la figura 13. En las primeras horas del

día, después de haber salido el Sol, el comportamiento de la potencia producida por los paneles solares fue similar al del día parcialmente nublado, pues se observa que el sistema fijo, generó más potencia que el sistema con seguimiento solar, pero aproximadamente a las 10:30 horas, fue cuando el sistema con seguimiento solar logró captar más energía que el sistema fijo. Cabe señalar, que en este día, la generación de energía del sistema con seguimiento solar, fue mayor 15 minutos antes que en el día parcialmente nublado, debido a que en el mes de marzo, el Sol está más cerca de la Tierra. También se observa, que el valor máximo de potencia es equivalente a 62.834 W y que es generada por el sistema con seguimiento solar a las 13:15 horas. Además, la potencia máxima alcanzada por el sistema con seguimiento solar, se mantiene a partir de las 13:00 horas, hasta las 14:45 horas. Durante el resto del día, se puede notar, que el sistema con seguimiento solar es más eficiente, por generar valores de potencia mayores que el sistema fijo. La potencia promedio generada durante este día fue de 35.565 W para el sistema con seguimiento solar (Anexo C) y 28.061 W para el sistema fijo (Anexo C), lo que se deduce, que el porcentaje de la eficiencia del sistema con seguimiento solar para este día, fue 26.74% mayor que el sistema fijo.

Figura 13. Gráfica del comportamiento de la potencia generada el día 14 de marzo de 2017.

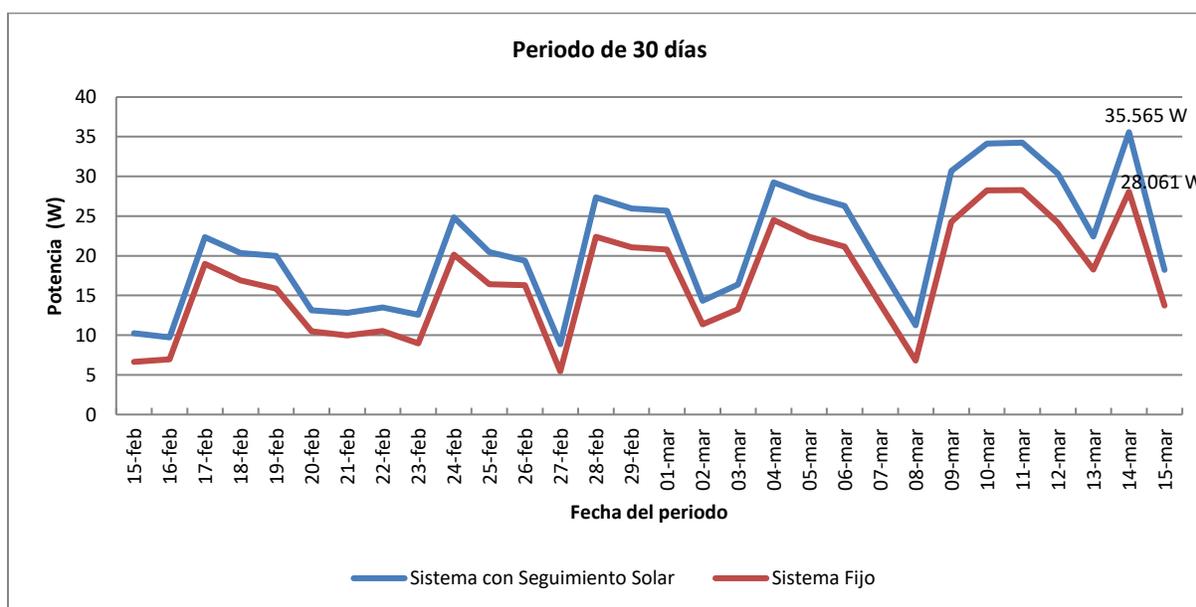


Fuente: elaboración propia.

Periodo de 30 días

La gráfica de la figura 14 representa el promedio de la potencia generada diariamente por ambos sistemas fotovoltaicos durante un periodo de 30 días, del 15 de febrero de 2017, al 15 de marzo de 2017. En dicha gráfica se observa, que el valor máximo de potencia generada durante este periodo es de 35.565 W, y que es la resultante de la potencia promedio generada por el sistema con seguimiento solar el día 14 de marzo de 2017 (Anexo D). Asimismo, se aprecia que el valor mínimo de potencia generada durante este periodo es de 8.861 W, y que es proveniente de la potencia promedio generada por el sistema con seguimiento solar el día 27 de febrero de 2017. Otro aspecto notorio en la gráfica es, que durante el periodo de experimentación, en la ciudad de Atlán de Navarro, Jalisco, hubo variaciones en cuanto a días soleados y días parcialmente nublados. Cabe mencionar que la potencia promedio generada por los sistemas fotovoltaicos durante este periodo, para el sistema con seguimiento solar fue de 21.215 W (Anexo D) y para el sistema fijo, 16.867 W (Anexo D), por lo cual se deriva, que el porcentaje de la eficiencia del sistema con seguimiento solar para este periodo fue 25.78% mayor que el sistema fijo, porcentaje que indica que la producción de corriente por parte del seguidor solar, fue un 25% mayor que la que generó el sistema fotovoltaico fijo.

Figura 14. Gráfica de la potencia promedio generada diariamente, del 15 de febrero de 2017, al 15 de marzo de 2017.



Fuente: elaboración propia.

Como resumen de los resultados de este trabajo, se obtiene que, el sistema fotovoltaico con seguimiento solar logró ser más eficiente en días soleados que en días parcialmente nublados.

Como producto del trabajo de campo realizado con ambos sistemas fotovoltaicos durante los 30 días experimentados, se obtuvo que, la eficiencia del sistema fotovoltaico con seguimiento solar, es mayor que el sistema fotovoltaico fijo en un 25.8% aproximadamente.

Discusión

Es evidente que en las primeras horas de cada día (a excepción del 15 de febrero de 2016, primer día de prueba), el sistema fijo logró generar mayor cantidad de energía eléctrica que el sistema con seguimiento solar. Esto último, es debido a que después de haber realizado mediciones durante los meses de febrero y marzo de 2017, con la puesta del Sol, el panel fotovoltaico termina orientado hacia el Oeste (poniente), y cuando al día siguiente sale el Sol, éste no irradia lo suficiente a las celdas solares utilizadas como sensores, por lo que las celdas no transmiten al motor la suficiente potencia para hacer girar y orientar al panel fotovoltaico hacia el Este (oriente), es decir, en donde el Sol inicia su recorrido. Cabe mencionar, que aún con este inconveniente, el sistema fotovoltaico con seguimiento solar, logró ser más eficiente que el sistema fotovoltaico fijo.

Conclusiones

El sistema fotovoltaico con seguimiento solar, no depende de baterías para proporcionar corriente a los motores que hacen girar al panel fotovoltaico, ya que el sistema diseñado cuenta con celdas solares independientes que actúan como sensores y alimentan a dichos motores. Por tal razón, el sistema construido es funcional para ciudades y en especial para zonas rurales.

El mantenimiento del sistema construido es mínimo, puesto que los dos motores que contiene y que pueden ser más susceptibles a la lluvia e intemperie, se encuentran protegidos por el panel

mismo. Este sistema no contempla componentes electrónicos, tan solo contempla dos motores y cables aislados que van a la tarjeta de adquisición de datos, la cual no se encuentra a la intemperie.

El seguidor solar aquí expuesto, posee una ventaja competitiva en contraste con la mayoría de los seguidores solares disponibles en el mercado, los cuales son programables para seguir una trayectoria con respecto del día, la hora y la estación del año, en comparación con el seguidor solar aquí presentado, el cual realiza puntos de comparación luminosa con respecto de la trayectoria del eje lineal al que obedece, llevando a cabo pequeños movimientos bidireccionales que posicionan el área efectiva de captación en el punto con mayor índice luminoso.

El costo-beneficio del sistema con seguimiento solar es aceptable, ya que el sistema de movimiento utilizado está constituido por celdas solares de bajo precio.

Finalmente, el sistema fotovoltaico con seguimiento solar, resultó ser más eficiente que el sistema fotovoltaico fijo.

Referencias

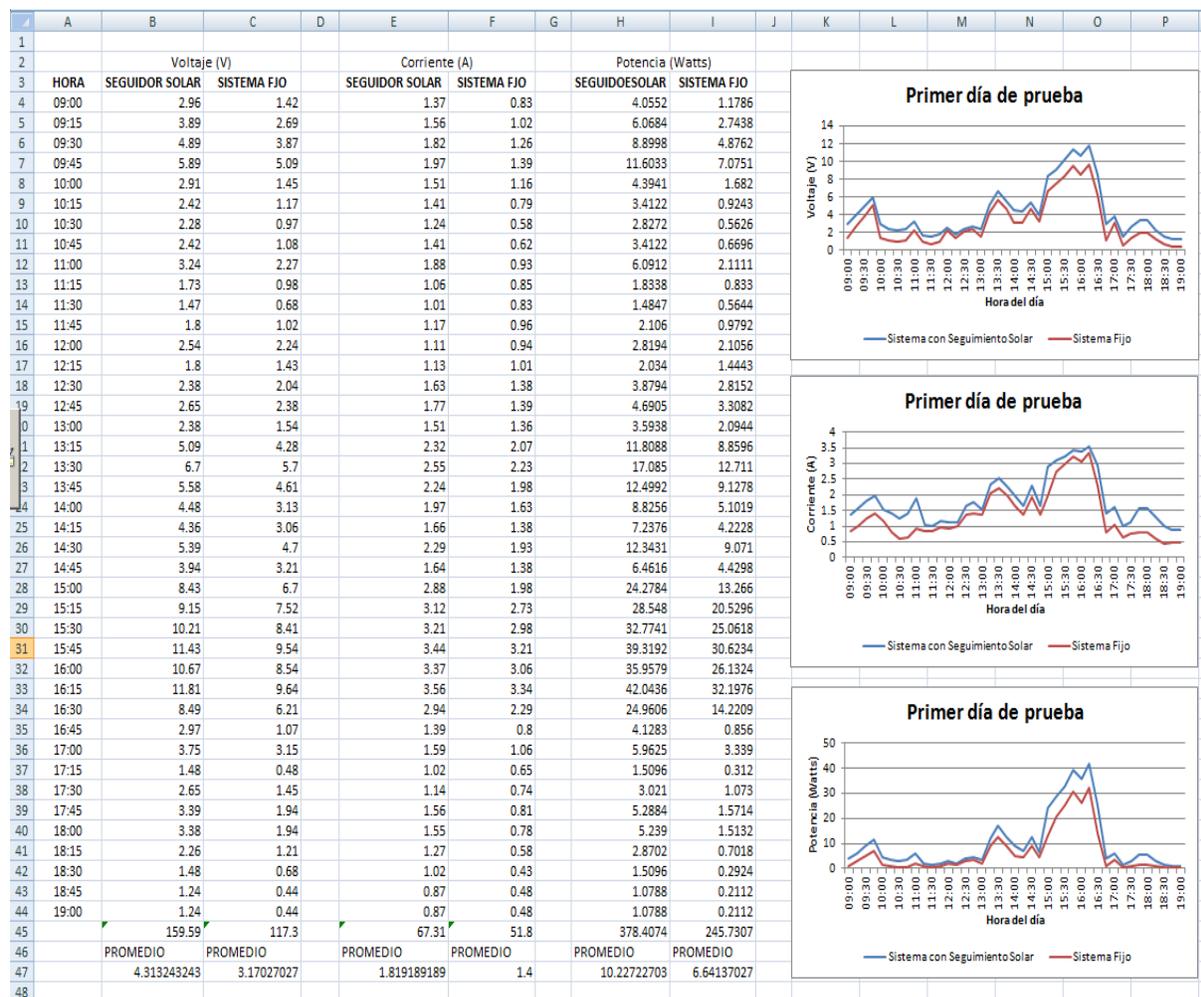
- Agencia Internacional de Energía [IEA]. (2010). *Key world energy statistics*. Recuperado de <http://es.scribd.com/doc/69552521/IEA-Key-World-Energy-Statistics>.
- Ahmet Sempinar, M. C. (2012). Evaluation of power output for fixed and two-axis tracking PV arrays. *Applied Energy* 92(1), 677-685.
- Arroyo Romero, G. y Cortés Montes de Oca, L. A. (2015). *Diseño y construcción de un mecanismo Automatizado para el seguimiento de la trayectoria solar* (tesis de pregrado). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.
- Dick Hedberg, S. K. (2010). The World Needs a New Energy Paradigm. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, (1), 1-10.
- Enriquez, J. M., Andújar, J. M., & Bohórquez, M. A. (2010). A reliable, fast and low cost maximum power point tracker for photovoltaic applications. *Solar Energy*, 84(1), 79-89.

- Escobar Mejia, 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*, (44), 245-250.
- Grupta, A. (2011). Increasing Efficiency of the Photovoltaic System of Mobile Robotic Platforms for Military Application and Exploration. *IEEE*, (1), 1-8.
- Iglesias, J. M. y Morales, J. (2013). Dimensionado de un sistema térmico solar mediante simulación y su validación energética. *Ingeniería Energética*, 34(1), 55-65.
- Kahn, N. A. (2012). Measuring The Light Intensity Of A Hybrid Powered CFL And LED Lighting Using 3D Electronic Vision In Rotation Of The Solar Panel. *IEEE*, (1), 111-115.
- Koussa, A. C. (2011). Measured and modelled improvement in solar energy yield from flat plate photovoltaic systems utilizing different tracking systems and under a range of environmental conditions. *Applied Energy*, (88), 1756-1771.
- 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*, XXXVI(2), 190-199.
- Mousazadeh, H., Keyhani, A., Javadi, A., Mobli, H., Abrinia, K., & Sharifi, A. (2009). A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (1), 1800-1818.
- Neha, H., Gugri, S., Mishra S., & Dubey, G. (2013). Advancements in solar based LED street light. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 2(5), 1880-1884.
- 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*, XXI(2), 1-12.
- Nuñez Flores, A. (2012). *Viabilidad de calentadores solares de agua con seguidor de trayectoria solar* (tesis de maestría). Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México.
- Panait, M. A., & Tudorache, T. (2008). *A simple neural networks solar tracker for optimizing conversion efficiency in off-grid solar generators*. Santander: ICREPQ.

Pimentel, D., Herz, M., Glickstein, M., Zimmerman, M., Allen, R., Becker, K., Evans, J., Hussain, B., Sarsfeld, R., Grosfeld, A., & Seidel, T. (2002). Renewable Energy: Current and Potential Issues. *BioScience*, 52(12), 1111-1120.

Anexos

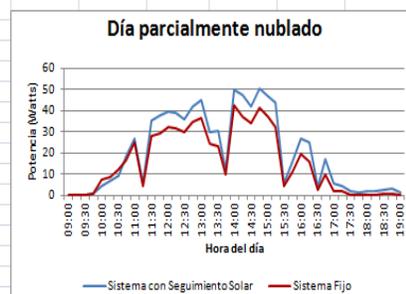
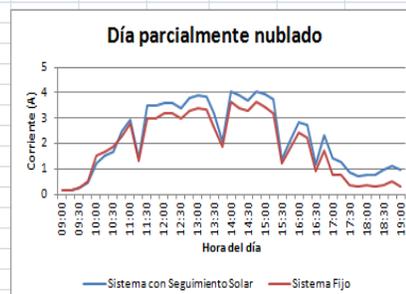
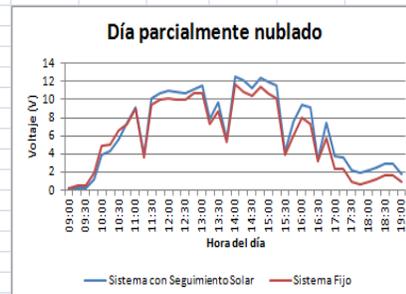
Anexo A. Captura de la generación de datos y gráficas de comportamiento del día 15 de febrero de 2017.



Fuente: elaboración propia.

Anexo B. Captura de la generación de datos y gráficas de comportamiento del día 19 de febrero de 2017.

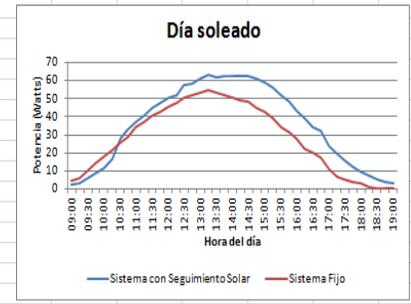
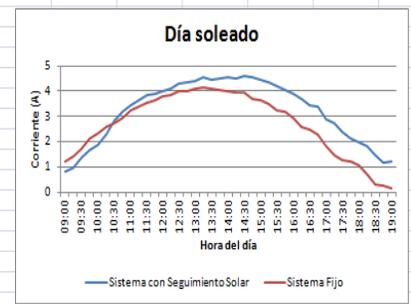
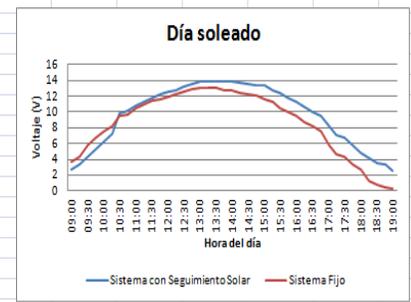
	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	O	P	Q
1																
2		Voltaje (V)			Corriente (A)			Potencia (Watts)								
3	HORA	SEGUIDOR SOLAR	SISTEMA FIJO		SEGUIDOR SOLAR	SISTEMA FIJO		SEGUIDOR SOLAR	SISTEMA FIJO							
4	09:00	0.18	0.24		0.13	0.15		0.0234	0.036							
5	09:15	0.23	0.48		0.13	0.15		0.0299	0.072							
6	09:30	0.26	0.48		0.23	0.23		0.0598	0.1104							
7	09:45	1.21	1.94		0.45	0.53		0.5445	1.0282							
8	10:00	3.88	4.85		1.21	1.52		4.6948	7.372							
9	10:15	4.36	5.09		1.51	1.67		6.5836	8.5003							
10	10:30	5.68	6.55		1.67	1.87		9.4856	12.2485							
11	10:45	7.47	7.27		2.48	2.27		18.5256	16.5029							
12	11:00	9.17	8.97		2.94	2.8		26.9598	25.116							
13	11:15	3.96	3.64		1.42	1.29		5.6232	4.6956							
14	11:30	10.13	9.46		3.48	2.96		35.2524	28.0016							
15	11:45	10.77	9.94		3.48	2.96		37.4796	29.4224							
16	12:00	10.98	10.18		3.58	3.18		39.3084	32.3724							
17	12:15	10.87	9.94		3.59	3.18		39.0233	31.6092							
18	12:30	10.74	9.94		3.36	3		36.0864	29.82							
19	12:45	11.19	10.67		3.77	3.26		42.1863	34.7842							
20	13:00	11.55	10.67		3.89	3.41		44.9295	36.3847							
21	13:15	7.88	7.27		3.82	3.35		30.1016	24.3545							
22	13:30	9.71	8.73		3.16	2.65		30.6836	23.1345							
23	13:45	5.68	5.33		2.06	1.87		11.7008	9.9671							
24	14:00	12.48	11.64		4.02	3.64		50.1696	42.3696							
25	14:15	12.08	10.91		3.91	3.41		47.2328	37.2031							
26	14:30	11.25	10.43		3.71	3.26		41.7375	34.0018							
27	14:45	12.46	11.4		4.04	3.64		50.3384	41.496							
28	15:00	11.92	10.67		3.92	3.46		46.7264	36.9182							
29	15:15	11.61	10.18		3.76	3.18		43.6536	32.3724							
30	15:30	4.13	3.88		1.39	1.21		5.7407	4.6948							
31	15:45	7.59	6.06		2.11	1.82		16.0149	11.0292							
32	16:00	9.49	8		2.83	2.42		26.8567	19.36							
33	16:15	9.17	7.27		2.73	2.2		25.0341	15.994							
34	16:30	3.39	3.15		1.15	0.91		3.8985	2.8665							
35	16:45	7.42	5.82		2.32	1.74		17.2144	10.1268							
36	17:00	3.84	2.42		1.41	0.76		5.4144	1.8392							
37	17:15	3.59	2.42		1.26	0.76		4.5234	1.8392							
38	17:30	2.28	0.97		0.84	0.38		1.9152	0.3686							
39	17:45	2	0.73		0.73	0.3		1.46	0.219							
40	18:00	2.28	0.97		0.78	0.38		1.7784	0.3686							
41	18:15	2.48	1.21		0.78	0.3		1.9344	0.363							
42	18:30	2.92	1.7		0.98	0.38		2.8616	0.646							
43	18:45	2.96	1.7		1.11	0.53		3.2856	0.901							
44	19:00	1.76	0.97		0.95	0.3		1.672	0.291							
45		273	244.14		91.09	77.28		818.7447	650.8005							
46		PROMEDIO	PROMEDIO		PROMEDIO	PROMEDIO		promedio	PROMEDIO							
47		6.5	5.812857143		2.168809524	1.84		19.96938293	15.87318293							
48																



Fuente: elaboración propia.

Anexo C. Captura de la generación de datos y gráficas de comportamiento del día 14 de marzo de 2017.

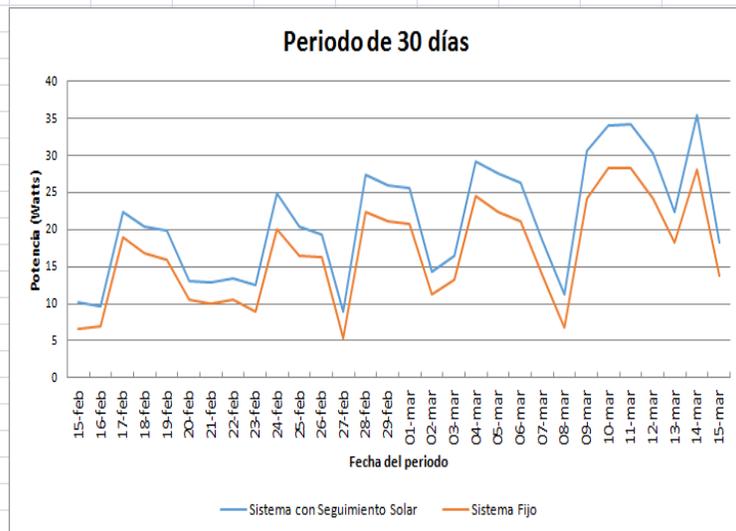
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1																
2		Voltaje (V)			Corriente (A)			Potencia (Watts)								
3	HORA	SEGUIDOR SOLAR	SISTEMA FIJO		SEGUIDOR SOLAR	SISTEMA FIJO		SEGUIDOR SOLAR	SISTEMA FIJO							
4	09:00	2.67	3.64		0.83	1.21		2.2161	4.4044							
5	09:15	3.39	4.36		0.99	1.44		3.3561	6.2784							
6	09:30	4.36	5.82		1.36	1.74		5.9296	10.1268							
7	09:45	5.33	6.76		1.67	2.12		8.9011	14.3312							
8	10:00	6.3	7.52		1.89	2.35		11.907	17.672							
9	10:15	7.27	8.24		2.27	2.58		16.5029	21.2592							
10	10:30	9.78	9.49		2.82	2.73		27.5796	25.9077							
11	10:45	10.12	9.7		3.21	2.96		32.4852	28.712							
12	11:00	10.84	10.43		3.42	3.26		37.0728	34.0018							
13	11:15	11.23	10.91		3.64	3.41		40.8772	37.2031							
14	11:30	11.74	11.4		3.82	3.56		44.8468	40.584							
15	11:45	12.18	11.64		3.89	3.64		47.3802	42.3696							
16	12:00	12.54	11.98		4.02	3.79		50.4108	45.4042							
17	12:15	12.77	12.31		4.08	3.86		52.1016	47.5166							
18	12:30	13.28	12.56		4.32	4.02		57.3696	50.4912							
19	12:45	13.48	12.85		4.33	4.02		58.3684	51.657							
20	13:00	13.79	13.09		4.42	4.09		60.9518	53.5381							
21	13:15	13.84	13.09		4.54	4.17		62.8336	54.5853							
22	13:30	13.84	13.09		4.47	4.09		61.8648	53.5381							
23	13:45	13.9	12.82		4.48	4.06		62.272	52.0492							
24	14:00	13.8	12.66		4.53	3.97		62.514	50.2602							
25	14:15	13.76	12.47		4.52	3.94		62.1952	49.1318							
26	14:30	13.59	12.21		4.61	3.94		62.6499	48.1074							
27	14:45	13.46	12.02		4.55	3.71		61.243	44.5942							
28	15:00	13.31	11.64		4.44	3.64		59.0964	42.3696							
29	15:15	12.82	11.29		4.36	3.49		55.8952	39.4021							
30	15:30	12.34	10.43		4.21	3.26		51.9514	34.0018							
31	15:45	11.84	9.94		4.06	3.18		48.0704	31.6092							
32	16:00	11.23	9.46		3.87	2.96		43.4601	28.0016							
33	16:15	10.68	8.69		3.68	2.58		39.3024	22.4202							
34	16:30	9.96	8.16		3.43	2.5		34.1628	20.4							
35	16:45	9.47	7.52		3.38	2.27		32.0086	17.0704							
36	17:00	8.26	5.82		2.88	1.82		23.7888	10.5924							
37	17:15	7.06	4.61		2.71	1.48		19.1326	6.8228							
38	17:30	6.81	4.36		2.36	1.29		16.0716	5.6244							
39	17:45	5.73	3.43		2.13	1.23		12.2049	4.2189							
40	18:00	4.79	2.73		1.97	1.08		9.4363	2.9484							
41	18:15	4.24	1.21		1.81	0.73		7.6744	0.8833							
42	18:30	3.48	0.84		1.45	0.3		5.046	0.252							
43	18:45	3.32	0.54		1.17	0.24		3.8844	0.1296							
44	19:00	2.57	0.31		1.23	0.16		3.1611	0.0496							
45		395.17	352.04		131.82	110.87		1458.1767	1150.5198							
46		PROMEDIO	PRO,EDIO		PROMEDIO	PROMEDIO		PROMEDIO	PROMEDIO							
47		9.638292683	8.586341463		3.215121951	2.704146341		35.56528537	28.06145854							
48																



Fuente: elaboración propia.

Anexo D. Captura de los promedios diarios de potencia generada en el periodo de 30 días.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1														
2														
3			Potencia (Watts) Promedio											
4		Fecha	SEGUIDOR SOLAR	SISTEMA FJO										
5		15-feb	10.227	6.641										
6		16-feb	9.723	6.952										
7		17-feb	22.334	18.967										
8		18-feb	20.353	16.896										
9		19-feb	19.969	15.873										
10		20-feb	13.115	10.489										
11		21-feb	12.803	9.945										
12		22-feb	13.49	10.523										
13		23-feb	12.57	8.948										
14		24-feb	24.83	20.14										
15		25-feb	20.474	16.412										
16		26-feb	19.397	16.304										
17		27-feb	8.861	5.434										
18		28-feb	27.373	22.383										
19		29-feb	25.939	21.06										
20		01-mar	25.686	20.776										
21		02-mar	14.331	11.351										
22		03-mar	16.396	13.243										
23		04-mar	29.233	24.52										
24		05-mar	27.573	22.383										
25		06-mar	26.279	21.133										
26		07-mar	18.587	13.907										
27		08-mar	11.265	6.79										
28		09-mar	30.674	24.256										
29		10-mar	34.141	28.25										
30		11-mar	34.256	28.27										
31		12-mar	30.338	24.134										
32		13-mar	22.439	18.26										
33		14-mar	35.565	28.061										
34		15-mar	18.232	13.716										
35		Promedio	Promedio											
36			21.2151	16.86723333										
37														



Fuente: elaboración propia.