

CONTROL DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA INCREMENTAR SU EFICIENCIA ENERGÉTICA

PHOTOVOLTAIC SYSTEM CONTROL TO INCREASE ITS ENERGY EFFICIENCY

RECIBIDO: 30-03-12
ACEPTADO: 02-12-12

¹ Instituto Tecnológico de Mexicali, Mexicali B.C. México.

RESUMEN

La Energía Solar Fotovoltaica es una de las denominadas energías alternas. La energía del sol origina el 97% de las energías utilizadas en el mundo, desde los combustibles fósiles que se formaron por la exposición de materia orgánica a las radiaciones electromagnéticas, hasta las energías renovables como el viento (eólica), agua (hidráulica) y biomasa, entre otras. Actualmente, en el mundo estos tipos de generación de energía va en incremento; gobiernos e iniciativas privadas invierten en ellas, ya sea porque se requiere ahorrar energía o para reducir los índices de contaminación. En México se está empezando a utilizarlas y el gobierno ha apostado a la generación eléctrica por medio eólico en las regiones de Oaxaca, Jalisco, Baja California y en el norte del país con la generación por medio fotovoltaico y termo solar.

Palabras clave: Sistema Fotovoltaico (SFV), Energías Alternas, Electromagnéticas, control de sistemas, retroalimentación.

SUMMARY

Photovoltaic solar energy is a form of alternative energy. Solar energy generates 97% of the energy used in the world, from fossil combustibles that are created by exposed organic matter through electromagnetic radiations to renewable sources such as the wind (eolic), water (hydraulic) and biomass. Currently at a global scale this type of energy generation is on the increase. Both, the statutory and private sectors invest in this type of initiatives, either because it is required to save energy or because it reduces pollution. In Mexico, we are starting to use alternative energy solutions. The government has a wager on the generation of electricity by eolic means in Oaxaca, Jalisco, Baja California; and in the North of the country to the generation of electricity via photovoltaic and solar hermal ways.

Key words: PVS (Photovoltaic system), alternative energy, electromagnetics, control systems, feedback.

1. INTRODUCCIÓN

Los Sistemas Fotovoltaicos (SFV), empiezan a ser una opción para reducir los altos costos de energía eléctrica, en el noroeste del país en las regiones de Sonora, Sinaloa y Baja California donde las altas temperaturas en verano hacen imprescindibles el uso de sistemas de aire acondicionado; los cuales, elevan hasta en un 60% el consumo de energía eléctrica, siendo imprescindible diseñar sistemas híbridos de generación de energía. De ahí, tal como lo expone Sener (2009), y con visión de futuro, en los últimos años el gobierno mexicano ha apostado a la generación eléctrica por medio eólico en las regiones de Oaxaca, Jalisco, Baja California, y en el norte del país, con la generación por medio fotovoltaico y termo solar.

En la actualidad, la inversión primaria de estos sistemas es bastante elevada, aunque cuenta con un tiempo de recuperación relativamente rápido. Para que sea más eficiente en términos económicos, se necesita incrementar su eficiencia energética.

Por ello, el objetivo del presente trabajo es exponer el diseño de los principales sistemas de control de los sistemas fotovoltaicos que se vienen proponiendo para las redes eléctricas en las entidades federales donde el Estado mexicano las promueve y desarrolla. Estos sistemas de control se aplican donde la conexión a la carga sea activada solo cuando sea necesario, haciendo así que el excedente generado por el sistema fotovoltaico sea entregado a la red eléctrica nacional, regional o local. Con esto se logrará una retroalimentación de energía por parte de la compañía eléctrica al sistema de distribución final, reportándose éste en el recibo de cobro de los ciudadanos. Por igual, se hará un seguimiento por parte de la administración del sistema, el tiempo de recuperación económica de la inversión realizada, estimándose que se realice en un periodo corto, una vez implementado.

2. CONCEPTUALIZACIÓN DE LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Un Sistema Fotovoltaico (SFV) conectado a la red eléctrica, consiste básicamente en un generador fotovoltaico acoplado a un inversor que opera en paralelo con la red eléctrica convencional. El concepto de inyección a red tiene un amplio margen de aplicaciones, desde pequeños sistemas de pocos kilowatt pico (kWp) de potencia instalada, hasta centrales de varios Megawatt pico (MWp) (González, 2003).

El generador fotovoltaico capta la radiación solar y la transforma en energía eléctrica, que en lugar de ser almacenada en baterías, como en los sistemas aislados e híbridos, se puede utilizar directamente en el consumo o entregarla a la red eléctrica de distribución nacional, regional o local de un país. Estas dos funciones las realiza un inversor de corriente directa a corriente alterna, especialmente diseñado para esta aplicación. A continuación se describe bloque a bloque el sistema:

2.1. SOLAR CELL-ARRAY

Es el arreglo de las celdas solares, para lo cual se debe de tener en cuenta que las variables climáticas afectan directamente a la generación eléctrica de la celda; ya que esta, va en función de la incidencia solar que varía con la hora del día, la estación del año y con la temperatura ambiente. En la figura 2, se puede apreciar ver como varia la corriente a diferentes valores de incidencia y como varia también para varios valores de temperatura. Para el diseño del modelo de panel fotovoltaico en Matlab/Simulink se ha partido de la ecuación (Ec.1) que define el comportamiento de una célula solar (Jiménez y Biel, 2007).

$$I = IL - I_0 \left(e^{q(v+RsI)/nKT} - 1 \right) - \left(V + \frac{RsI}{Rsh} \right) \quad (\text{Ec.1})$$

Donde:

$q = 1.6021 \cdot 10^{-19} C$: Carga elemental.

$K = 1.38 \cdot 10^{-23} J/K$: Constante de Boltzman.

T = Temperatura en grados Kelvin.

n = Factor de idealidad del diodo.

I_L = Corriente foto generada.

I_0 = Corriente inversa de saturación del diodo.

V = Tensión del panel, I : Corriente del panel.

R_{sl} = Resistencia interna en serie, R_{sh} (Resistencia interna en paralelo).

El panel fotovoltaico surge por la necesidad de adecuar los niveles de tensión y corriente del generador fotovoltaico a los requisitos del sistema eléctrico al cual alimenta. Para ello, se disponen las celdas fotovoltaicas en serie o paralelo en función de las necesidades. Al variar la incidencia solar y la temperatura, el resultado de un cambio en la intensidad de radiación es una variación en la corriente de salida para cualquier valor de tensión.

La corriente varía con la radiación en forma directamente proporcional. La tensión se mantiene prácticamente constante. El principal efecto provocado por el aumento de la temperatura del módulo, es una reducción de la tensión en forma directamente proporcional. Existe un efecto

secundario dado por un pequeño incremento de la corriente para valores bajos de tensión (Figura 2). Es por ello, que para lugares con temperatura ambiente muy altas son aptos módulos que poseen mayor cantidad de celdas en serie, para que los mismos tengan la suficiente tensión de salida.

En la mayoría de las instalaciones, dependiendo de la potencia de la instalación, será necesario asociar varios paneles en serie o paralelo para obtener los niveles de tensión y corriente adecuados.

Para la asociación de módulos fotovoltaicos se llevan conexiones en serie, en paralelo y mixtas; tal como en el caso de la presente simulación con teórica. En él se observa el análisis de una rama de serie de celdas. Para poder analizar dicha rama se pusieron sensores de corriente y voltaje, así como, una carga que responde a una respuesta de rampa para poder simular la variación de la carga con respecto al voltaje y corriente. Los valores de irradiación y temperatura se mantuvieron constantes. Las gráficas que se obtuvieron se muestran en la figura 3.

La conexión que se llevo a cabo dentro de la rama fue la expuesta en la figura 4. El arreglo se denomina *Arreglo en Serie* y las conexiones fueron

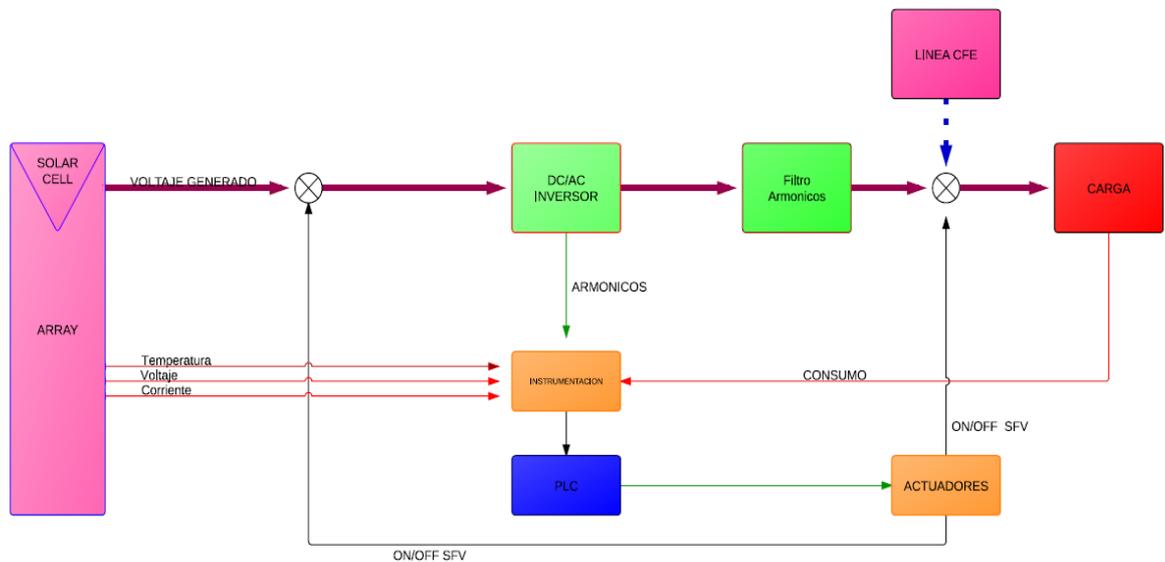


FIGURA 1. Diagrama a bloques propuesto del Sistema Fotovoltaico. Fuente: Elaboración propia.

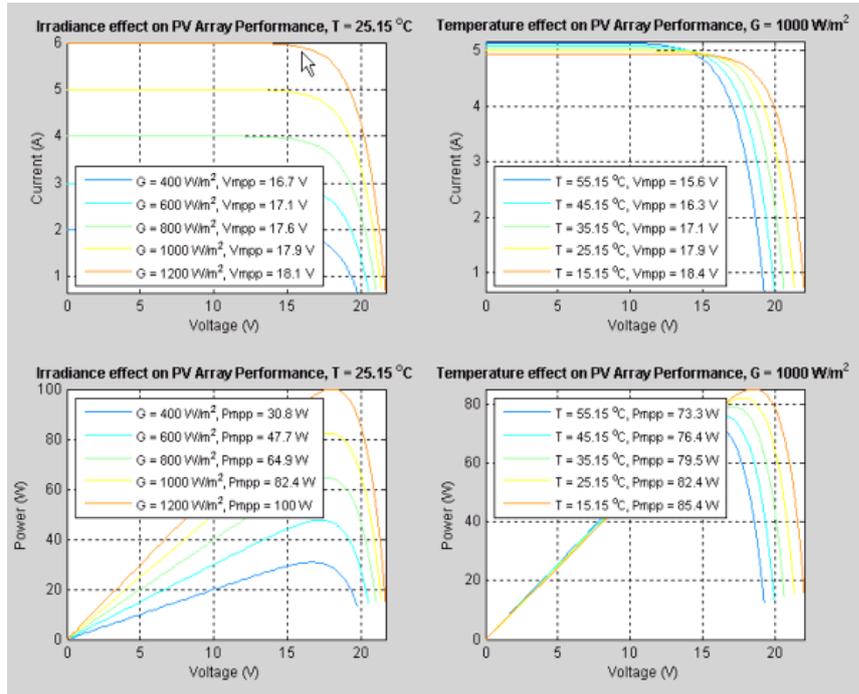


FIGURA 2. Variaciones de corriente y potencia para diferentes valores de temperatura e incidencia solar en un sistema de celdas o paneles fotovoltaicos. Fuente: Elaboración propia.

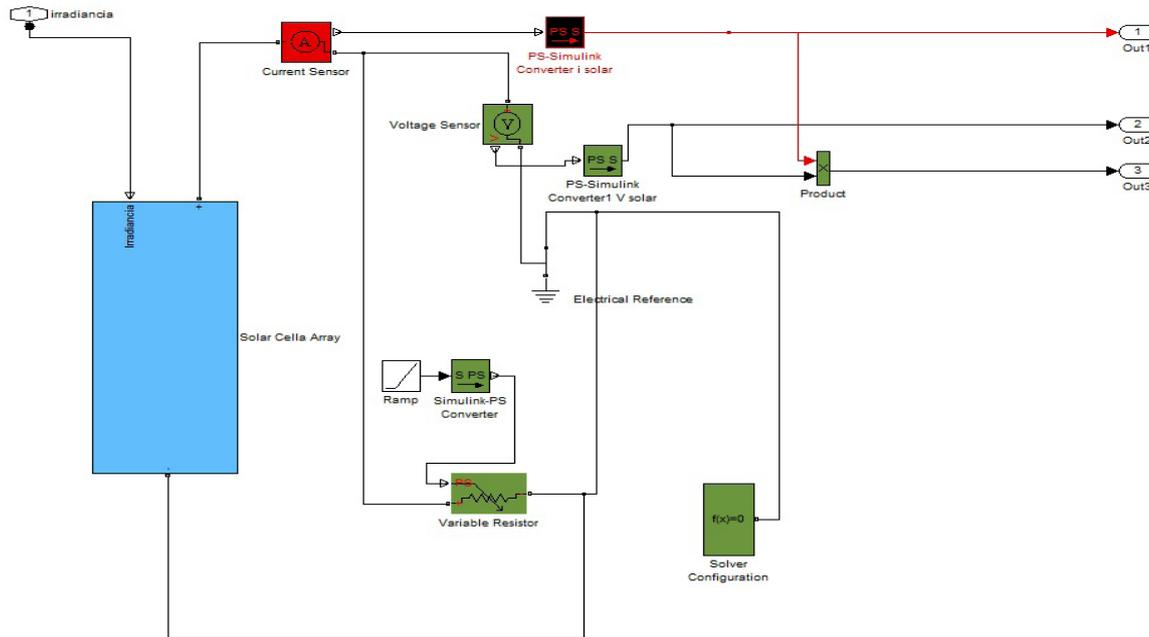


FIGURA 3. Diseño del monitoreo de las variables del Array del sistema fotovoltaico. Fuente: Elaboración propia.

de la siguiente manera: Se conecta un polo positivo de un módulo negativo, con el polo negativo del siguiente; con ello, se consigue aumentar la tensión y mantener el mismo valor de corriente generada. La tensión generada es igual a la suma de todas las tensiones por cada módulo; o lo que es lo mismo, el producto de la tensión de un módulo por el número de módulos (ya que se supone que tienen las mismas características). Se muestra un ejemplo en la figura 4, con 6 módulos fotovoltaicos de 12 volts con 2 amperes para suministrar 72 volts a 2 amperes.

Cuando se conecta una serie de módulos fotovoltaicos para obtener un voltaje, dicho arreglo se denomina *rama*. Para obtener el valor de corriente se le conecta el número de ramas que sea necesario, hasta alcanzar la necesidad de corriente (Figura 5).

Como se dijo anteriormente, el arreglo de las ramas se llevo a cabo en Paralelo en este caso se conectaron todos los polos positivos y, por separado, todos los polos negativos. Con ello, se

consigue aumentar la corriente generada y mantener un mismo valor de tensión. La corriente generada es igual a la suma de todas las corrientes generadas por cada módulo; o lo que es lo mismo, el producto de la corriente generada por un módulo por el número de módulos (se supone que tienen las mismas características). En la figura 5, se muestra un ejemplo, en este caso son arreglos de ramas en serie, conectadas en paralelo y diseñadas en Simulink con la librería Simpowersystem (Steven, 2009).

2.1.2. PUNTO DE SUMA

Circuito eléctrico que hace la función de cambiar entre el circuito fotovoltaico y la conexión a la red, esto dependerá del algoritmo del PLC.

2.1.3. DC/AC (INVERSOR)

Las celdas solares entregan corriente directa al sistema, este dispositivo la invierte a alterna, para que pueda ser inyectada a la red, en este caso el sistema propuesto para simulación propuesta en

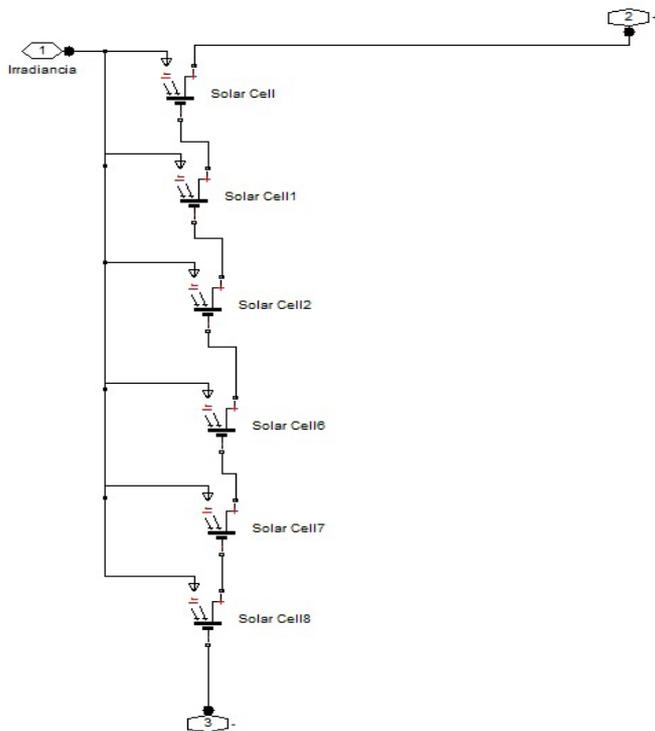


FIGURA 4. Array del sistema que en la simulación representa una rama del sistema foto voltaico.

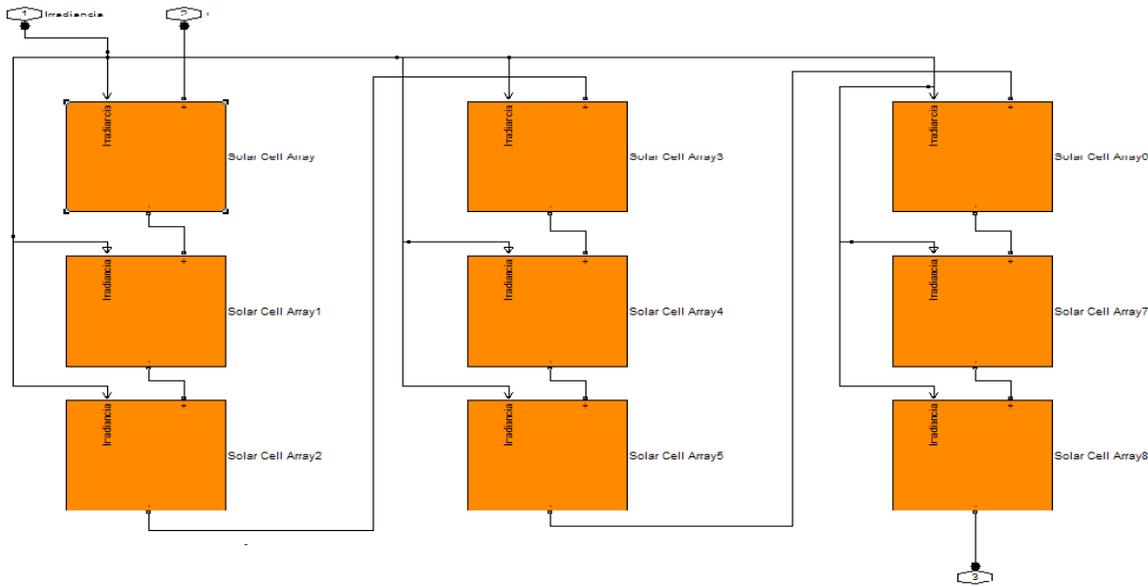


FIGURA 5. Celdas solares en simulink en serie. Fuente: Elaboración propia.

el presente trabajo, es un inversor dc/ac de puente universal para invertir una señal de 130 VAC (Figura 6).

La experiencia persigue dos objetivos importantes: Primero, está relacionado con la comprensión de los conceptos de extracción de potencia del generador fotovoltaico y su correcta entrega a la red eléctrica en términos de distorsión armónica baja y factor de potencia unitario; Segundo, en esta simulación, considera los aspectos de modelado y diseño de los controladores adecuados, para la realización de las tareas anteriormente mencionadas.

2.4. FILTROS ARMÓNICOS

Los dispositivos semiconductores que trabajan como interruptores, crean señales montadas en la onda sinusoidal que se denominan armónicos: Los filtros limpian esta señal para poder entregarla a la carga; un ejemplo de ello, se muestra en la figura 7, donde se simuló el sistema y nos entrega una señal sinusoidal con algunos armónicos.

De acuerdo con el teorema de Fourier, cualquier señal periódica y continua se puede descomponer en una suma infinita de ondas senoidales de frecuencias, múltiplos de la señal fundamental; estas frecuencias son conocidas

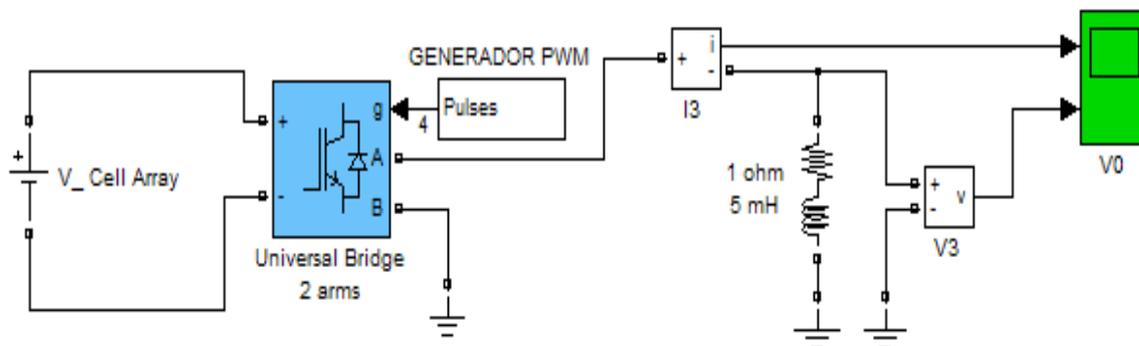


FIGURA 6. Inversor DC/AC diseñado en Simulink. Fuente: Elaboración propia.

como frecuencias armónicas y son producidas por todo tipo de cargas no lineales que están conectadas a la línea de alimentación eléctrica (Patel, 2005).

En la figura 7, se muestran los principales efectos de los armónicos en la línea eléctrica generados por el sistema fotovoltaico y el inversor. Los principales efectos de los armónicos en la carga son: uso ineficiente de la energía, fallas aleatorias de los equipos (sin causa aparente), envejecimiento prematuro de componentes, sobre calentamiento, disparo de alarmas, pérdida de la secuencia en equipos programables, etcétera, además del invaluable tiempo perdido al repetir las mediciones cuando las lecturas son inestables.

3. MONITOREO Y CONTROL

La supervisión de un sistema de control es muy importante para la toma de decisiones y para el control de la conexión de la carga, para ello se implementa un sistema controlado por PLC e instrumentado con sensores, para lograr tener un

sistema de control retroalimentado y elevar de esta manera la eficiencia del mismo. Para un SFV, conocer el comportamiento del ambiente es muy importante; ya que la generación eléctrica de las celdas va en función de la incidencia solar y de la temperatura (Figura 2).

La optimización del SFV, la obtendremos con el sistema de control. La incidencia de los rayos solares sobre el plano de los paneles fotovoltaicos, difiere de la perpendicularidad a lo largo del día y por lo tanto se ve reducida la eficiencia de los paneles solares. Es posible corregir esta situación utilizando un sistema de control como lo expuesto en la figura 8. Con ello, se pretende que con el sistema de control se tengan ganancias superiores al 20% según estudios hechos en simulaciones, como se muestra en la figura 9.

Con esto se garantiza que el Sistema Fotovoltaico esté un mayor tiempo conectado a la red, como se puede apreciar en color azul (Figura 9). El porcentaje de aprovechamiento va en función de la hora del día, mientras que en el color rojo, el porcentaje de aprovechamiento es más efectivo, debido a la retroalimentación del sistema de

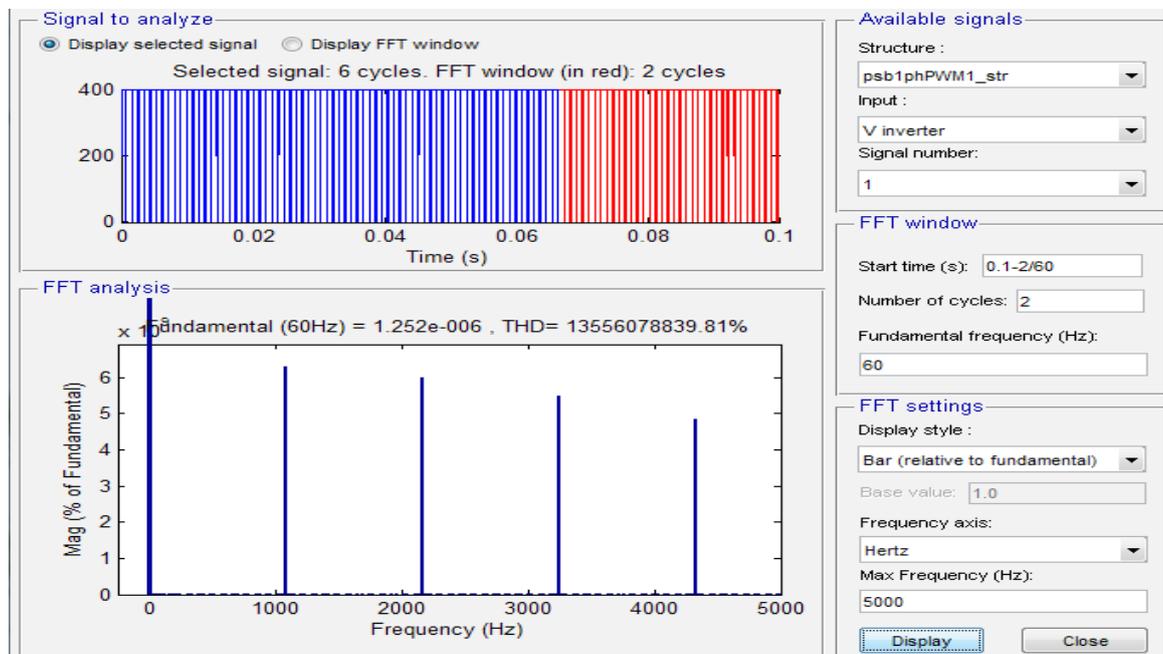


FIGURA 7.
Armónicos provocados por el inversor.
Fuente:
Elaboración propia.

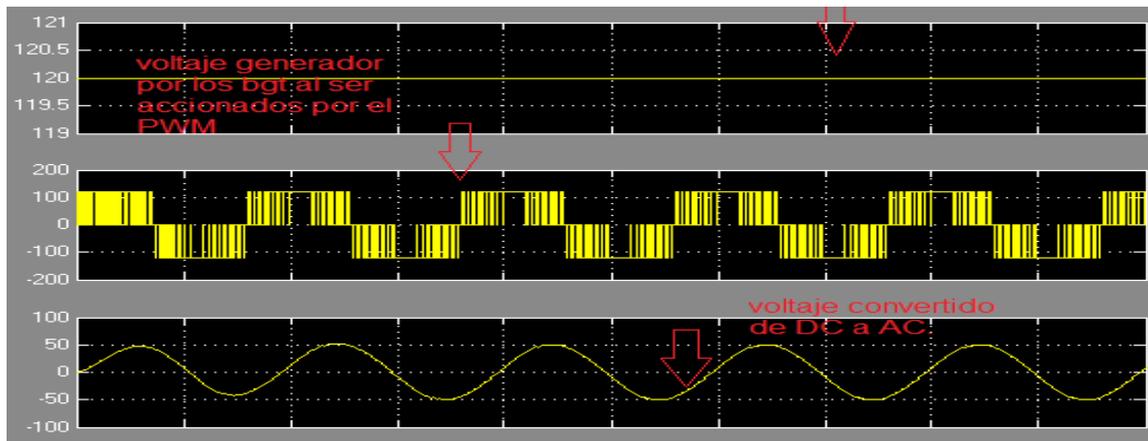


FIGURA 8. Muestra del voltaje generado por la celda (DC), el voltaje generado por el PWM y el disparo de los semiconductores a la frecuencia establecida por el control, así como el voltaje convertido a corriente alterna (CA) a la salida del sistema para entregarlo a la carga. Fuente: Elaboración propia.

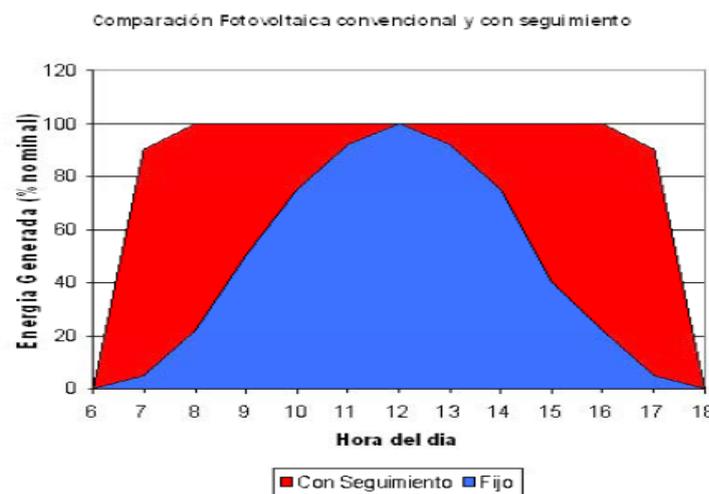


FIGURA 9. Gráfica que muestra el aprovechamiento del sistema fotovoltaico en los diferentes arreglos. Fuente: Elaboración propia.

control que nos da una interconexión más inteligente y se ve reflejado en el porcentaje de aprovechamiento y con esto incrementar su eficiencia (Sener, 2009).

4. CONCLUSIONES

Mediante la investigación, se demostró que los Sistemas Fotovoltaicos (SFV) controlados son viables en aplicaciones de baja potencia interconectados a la red eléctrica. Aplicarlos no solo será un ahorro a mediano plazo para la organización pública o privada que haga la inversión; sino que se

aportará ahorro de emisiones contaminantes al ambiente, y con ello, el rol protagónico que asume el Estado Mexicano ante el concierto de naciones del mundo, en contribuir con la disminución de los impactos negativos a la capa de ozono y el calentamiento global.

Como se sabe los SFV comunes no cuentan con un control para supervisar la conexión de la carga, esto lleva a que la energía que se entrega a la red sea considerablemente baja a comparación con el sistema propuesto. Según cálculos y simulaciones realizados en el presente trabajo, la eficiencia se elevaría en un 20% si se controlan y monitorean variables como temperatura de la

celda, corriente generada por la celda y el nivel de voltaje del SFV completo, lo que permitiría tomar rápidamente la decisión si nos conectamos o no a la red. Con esto el tiempo efectivo de interconexión será más eficiente.

Se ha descrito un conjunto de experiencias desarrolladas en el entorno Matlab/Simulink que proporcionan un apoyo a la enseñanza en el campo de la energía fotovoltaica; estas experiencias cubren los diversos aspectos de mayor importancia a la hora de analizar y diseñar sistemas fotovoltaicos conectados a red eléctrica.

En concreto, se estudian desde la característica no lineal variante en el tiempo (en función de la irradiación y la temperatura) de la agrupación fotovoltaica, hasta la extracción de la máxima potencia disponible en determinadas condiciones, mediante convertidores de potencia en corriente alterna (cuando las cargas son en AC o se conecta a red eléctrica). Las experiencias de investigación desarrolladas, permiten evaluar el rango de aplicación de los modelos utilizados para el diseño de los diversos controladores y permiten realizar el ajuste de los parámetros de los controladores, mediante técnicas clásicas de control. Finalmente,

se introduce la necesidad de los algoritmos de seguimiento de máxima potencia, realizándose la programación y experimentación de los mismos en diversas aplicaciones.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- GONZÁLEZ, R. 2003. *Sistemas Fotovoltaicos Interconectados a la red*. Boletín IIE, Cuernavaca Morelos, México. 182 p.
- JIMÉNEZ, J. y D. BIEL. 2007. *Estudio y simulación de sistemas de conversión fotovoltaica eléctrica. Mediante Matlab/Simulink*. Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), Departamento de Ingeniería Electrónica. Barcelona, España. 316 p.
- PATEL, M. 2005. *Wind and Solar Power Systems: Design, Analysis, and Operation*. Second Edition. New York. USA. 245 p.
- SENER, 2009. Programa Especial para el Aprovechamiento de Energías Renovables. Ciudad de México, México. 193 p.
- STEVEN T. 2009. *Circuit Analysis with MATLAB® Computing and Simulink® / SimPowerSystems® Modeling*. Fremont. California, USA. 142 p.