

Optimización de un prototipo de sistema fotovoltaico autónomo para iluminación de anuncios espectaculares

Pedro Manuel Rodrigo Cruz

Universidad Panamericana campus Aguascalientes, Josemaría Escrivá de Balaguer 101, C.P. 20290,

Teléfono: 4499106200

prodrigo@up.edu.mx

José Sebastián Gutiérrez Calderón

Universidad Panamericana campus Aguascalientes, Josemaría Escrivá de Balaguer 101, C.P. 20290,

Teléfono: 4499106200

jsgutierrez@up.edu.mx

Arturo de la Torre Infante

Universidad Panamericana campus Aguascalientes, Josemaría Escrivá de Balaguer 101, C.P. 20290,

Teléfono: 4499106200

adelatorre@voltaik.com.mx

Resumen

Los sistemas fotovoltaicos autónomos utilizan módulos fotovoltaicos, baterías y reguladores de carga con objeto de suministrar electricidad fuera de la red eléctrica a equipos de consumo, los cuales pueden operar en horarios donde no existe suficiente irradiación solar, por ejemplo durante la noche. En el presente artículo se resume la optimización realizada a un prototipo de sistema fotovoltaico autónomo para iluminación de anuncios espectaculares. El prototipo se concibió para iluminar de manera autónoma un anuncio espectacular en Aguascalientes durante 4 horas cada día al ponerse el sol. El análisis energético del prototipo actual ha permitido detectar un desempeño insuficiente para las características de irradiación solar media en los meses de Julio y

Diciembre en Aguascalientes (meses más desfavorables de irradiación en esta ubicación para la inclinación del arreglo fotovoltaico del prototipo). Como resultado se ha propuesto un cambio en el diseño del arreglo fotovoltaico y se han realizado las predicciones del desempeño energético del nuevo diseño. Adicionalmente, se ha diseñado un sistema automático de encendido/apagado a partir de un sensor de iluminación y un controlador Arduino. Como resultado de la optimización, se obtiene un prototipo de mejores prestaciones y con un costo similar al prototipo actual.

Palabra(s) Clave(s): arduino, optimización, sistema fotovoltaico autónomo.

1. Introducción

Los sistemas fotovoltaicos transforman directamente la luz solar en electricidad. Los sistemas fotovoltaicos autónomos operan de manera aislada de la red eléctrica [1, 2]. La utilización de baterías permite asegurar el suministro eléctrico en horas donde no existe suficiente irradiancia solar. Los elementos principales de un sistema fotovoltaico autónomo son los módulos fotovoltaicos, las baterías, los reguladores de carga y los inversores (en el caso de que el consumo de los equipos sea en corriente alterna) [3].

México posee unas condiciones de irradiación solar muy favorables para el desarrollo de los sistemas fotovoltaicos autónomos [4]. Tradicionalmente, los sistemas fotovoltaicos autónomos se han utilizado en México para la electrificación de zonas rurales alejadas de la red eléctrica, siendo sus principales aplicaciones la electrificación de pequeñas viviendas y el bombeo y potabilización de agua. En la actualidad se abren paso otro tipo de aplicaciones en señalización, mobiliario urbano, telecomunicaciones, refrigeración, apoyo solar a vehículos, pequeños dispositivos portátiles, etc [5].

La aplicación analizada en el presente artículo es un prototipo de sistema fotovoltaico autónomo para iluminación de anuncios espectaculares en Aguascalientes. Este prototipo se justifica debido a dos razones: en primer lugar, los anuncios espectaculares pueden ubicarse en lugares de difícil acceso y sin conexión fácil a la red eléctrica; en

segundo lugar, el trámite ante CFE para lograr la interconexión a red del espectacular puede dilatarse en el tiempo y demorar la puesta en marcha del sistema.

El sistema fotovoltaico autónomo para anuncios espectaculares alimenta 4 lámparas de 50 W cada una en corriente alterna convencional (120 V, 60 Hz). Está concebido para proporcionar iluminación durante 4 horas diarias al ponerse el sol.

En este artículo se resume el análisis realizado al prototipo actual, se proponen dos acciones de mejora del prototipo y se predice el desempeño y costo del prototipo optimizado. Las dos acciones de mejora son las siguientes:

- 1) Diseño de un nuevo arreglo fotovoltaico para mejorar el desempeño energético del prototipo.
- 2) Diseño de un sistema automático de encendido/apagado basado en sensor de iluminación y controlador Arduino.

La primera acción de mejora se propone tras el análisis energético del prototipo actual, donde se detecta que el prototipo tiene un desempeño insuficiente en los meses de Julio y Diciembre (meses más desfavorables en cuanto a irradiación solar en Aguascalientes para el ángulo de inclinación del arreglo fotovoltaico). La segunda acción de mejora se propone porque el regulador de carga del prototipo actual solamente permite una programación horaria del encendido/apagado de la iluminación. Esto implica que, debido a los cambios en la hora de puesta de sol a lo largo del año y debido al cambio de uso horario invierno/verano, sería necesario reprogramar periódicamente el cronómetro, lo cual significa un inconveniente sobre todo si el espectacular se ubica en un lugar alejado o de difícil acceso.

El prototipo mejorado presenta un exceso en captación de energía del 0.74% en el mes más desfavorable (Julio) frente al déficit del 9.23% que tenía el prototipo antiguo. El costo del prototipo mejorado es prácticamente igual al del prototipo antiguo (891 USD frente a 890 USD).

Los cálculos energéticos realizados en el presente estudio están basados en las recomendaciones de la Agencia Internacional de la Energía (IEA), Photovoltaic Power Systems Program (PVPS), Task 3 (Use of Photovoltaic Power Systems in stand-alone and island applications) [6], así como en las recomendaciones del instituto estadounidense SANDIA [7].

2. Descripción del prototipo actual

El prototipo actual de sistema fotovoltaico autónomo para iluminación de anuncios espectaculares en Aguascalientes consta de un arreglo fotovoltaico, una batería, un regulador de carga y un inversor, que alimentan 4 lámparas AC de 50W cada una. La configuración del sistema se muestra en la Fig. 1.

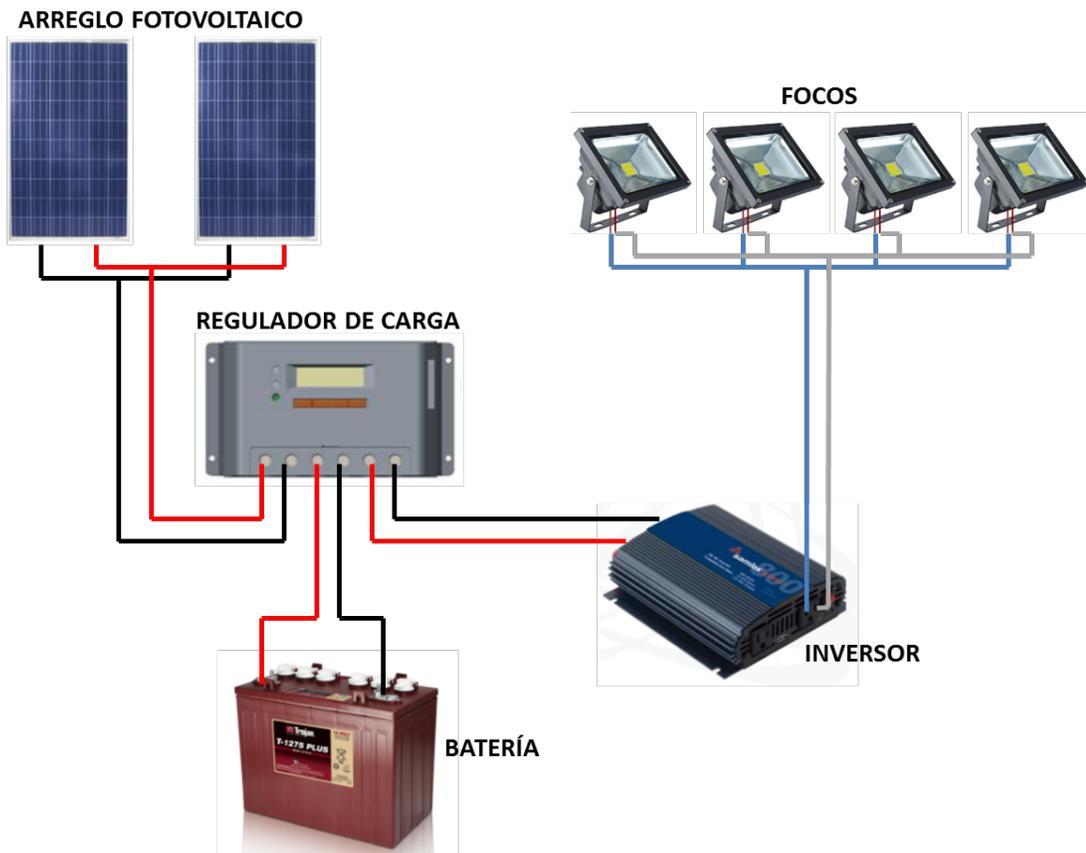


Fig. 1. Configuración del prototipo actual.

A continuación se describen brevemente las características tecnológicas de los elementos del sistema:

a) Arreglo fotovoltaico.

Compuesto por 2 módulos fotovoltaicos de 250 W nominales por módulo, de tecnología de silicio policristalino, interconectados en paralelo. Los módulos tienen una eficiencia estándar del 15.4% y sus principales características eléctricas son: 30.1 V y 37.4 V de voltaje en máxima potencia y en circuito abierto respectivamente; 8.31 A y 8.83 A de corriente en máxima potencia y en cortocircuito respectivamente (datos en condiciones estándar de 1,000 W/m² de irradiancia y 25°C de temperatura de celda). El arreglo fotovoltaico se encuentra instalado con orientación Sur y ángulo de inclinación respecto al plano horizontal de 23° (este ángulo coincide con el óptimo para Aguascalientes según NASA). La tecnología de módulos de silicio policristalino domina actualmente el mercado fotovoltaico mundial por mostrar un buen balance entre eficiencia, resistencia-durabilidad y costo [8].

b) Batería.

Se utiliza una batería de plomo-ácido con electrolito líquido aireada de 166 Ah (en régimen de descarga de 100 horas) y 12 V. Presenta una eficiencia de carga del 90% y una eficiencia de descarga del 85%. Incorpora electrodos de aleación de plomo-antimonio, muy adecuados para aplicaciones fotovoltaicas que requieren un ciclado profundo, permitiendo hasta un 80% de profundidad de descarga en cada ciclo. La tecnología de plomo-ácido domina actualmente el mercado de los sistemas fotovoltaicos autónomos por su menor costo respecto a otras tecnologías (como el Ni-Cd o el ion-Li), a pesar de sus inconvenientes (baja energía específica, sensibilidad al uso, a la temperatura y a la regulación, vida útil moderada, etc.) [9].

b) Regulador de carga.

Se trata de un regulador de carga de 12 V y 30 A con regulación *Pulse Width Modulator* (PWM). El mecanismo de regulación es en serie, de manera que el regulador hace operar el arreglo fotovoltaico alternativamente al voltaje de la batería (durante el ciclo de trabajo o *duty cycle*) y al voltaje de circuito abierto. De esta manera, controla en cada momento el régimen de carga de la batería.

c) Inversor.

Se utiliza un inversor de 800 W para transformar la corriente directa de 12 V en corriente alterna de 120V y 60 Hz. Es un inversor de onda sinusoidal modificada, más barato que los de onda sinusoidal pura y adecuado para una aplicación de iluminación.

3. Análisis energético del prototipo actual

El análisis energético del prototipo actual se ha dividido en tres subsecciones: en primer lugar se realiza el análisis de consumos del sistema; en segundo lugar, el análisis de la irradiación solar disponible en Aguascalientes; en tercer lugar, el análisis de la captación de energía del arreglo fotovoltaico.

A) Análisis de consumos.

Las lámparas tienen un consumo de potencia de 200W. El fabricante reporta una eficiencia del inversor del 90% al 50% de carga. Como el inversor es de 800W, esto significa que en la aplicación, el inversor opera al 25% de carga. Los inversores pierden eficiencia al ser operados con regímenes de carga bajos. Por esta razón, y al no disponer de información más detallada sobre la eficiencia del inversor, se ha considerado en el estudio energético una eficiencia del inversor del 85% como valor prudente. El requerimiento de potencia se puede calcular entonces como:

$$\text{Requerimiento de potencia} = \frac{\text{Consumo de potencia}}{\text{Eficiencia inversor}} \quad (1)$$

Se obtiene así un requerimiento de potencia de 235.3 W.

Para calcular el requerimiento de energía diario ha de tenerse en cuenta el número de horas de operación (4 hr) y la eficiencia de descarga de la batería reportada por el fabricante (85%). El requerimiento de energía diario puede calcularse mediante:

$$\text{Requerimiento energía diario} = \frac{\text{Requerimiento de potencia} \times \text{N}^\circ \text{ de horas}}{\text{Eficiencia descarga batería}} \quad (2)$$

Con lo que se obtiene un requerimiento de energía diario de 1,107 Wh.

B) Análisis de la irradiación solar disponible en Aguascalientes.

Con objeto de analizar la irradiación solar disponible en Aguascalientes (21.9°N, 102.3°W) es necesario recurrir a fuentes de datos de radiación solar. Lo ideal sería disponer de medidas de irradiancia global horizontal tomadas por un piranómetro durante un periodo de 10 años en la ciudad para elaborar los valores medios. Sin embargo, en la ciudad sólo existe una estación meteorológica automatizada perteneciente a la red de estaciones de Conagua [10], y dicha estación incorporó medida de la irradiancia solar muy recientemente, desde enero de 2014. Por lo tanto, no existen datos medidos de irradiancia solar en un intervalo de tiempo amplio en la ciudad de Aguascalientes.

Esto implica que es necesario recurrir a otras fuentes menos precisas. En este estudio se han utilizado bases de datos disponibles públicamente que recopilan información procedente del procesamiento de imágenes de satélite. Las dos bases de datos principales para México son la *Surface Meteorology and Solar Energy* de NASA [11] y la desarrollada por el laboratorio estadounidense *National Renewable Energy Laboratory*, NREL [12]. La Fig. 2 muestra los valores de

irradiación global horizontal diaria media mensual para la ciudad de Aguascalientes obtenidos de ambas bases de datos.

Como puede verse, existe cierta discrepancia en los datos debido a que ambos institutos han utilizado imágenes de satélite diferentes y modelos diferentes para procesar las imágenes. En el presente estudio se ha elegido utilizar los datos de NREL debido a la siguiente razón: la información de NASA es una base de datos mundial con resolución de 1° de latitud x 1° de longitud; sin embargo, la información de NREL sólo existe para algunos países y su resolución es mayor, en cuadrados de 40 x 40 km de superficie. Debido a esto, parece más adecuado utilizar los datos de NREL para una ubicación concreta, si estos datos están disponibles.

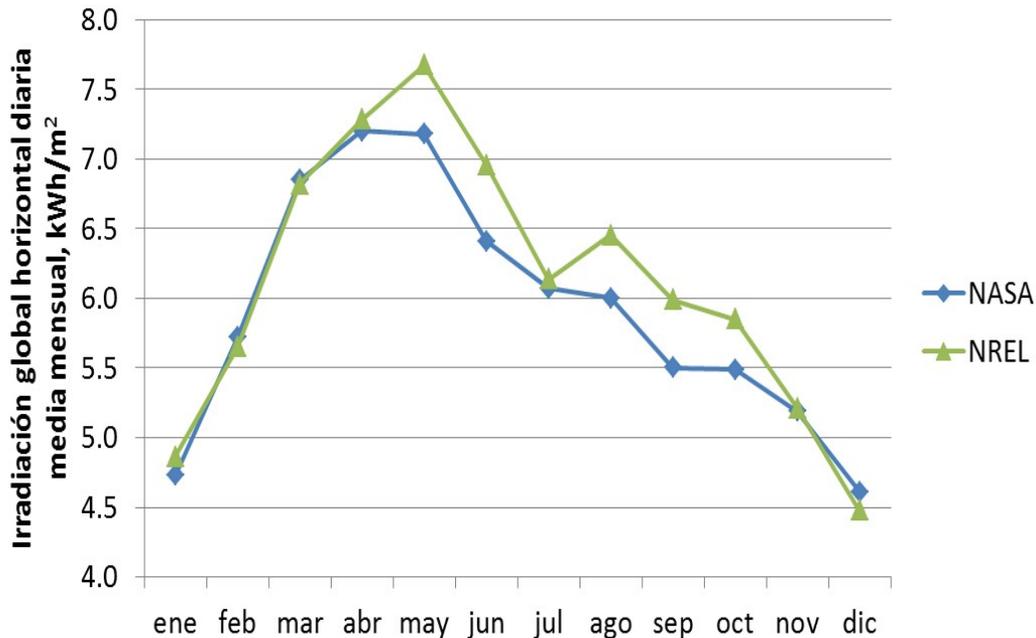


Fig. 2. Valores de irradiación global horizontal diaria media mensual para la ciudad de Aguascalientes según dos bases de datos con información elaborada a partir de imágenes de satélite (NASA y NREL).

Una vez que se dispone de los datos medios de irradiación horizontal diaria, es necesario utilizar un modelo de radiación para obtener los valores de irradiación sobre el plano del arreglo del prototipo (orientación Sur e inclinación de 23°). Estos valores indicarán la irradiación realmente disponible por el arreglo para ser transformada en electricidad.

En el presente análisis se ha utilizado un modelo desarrollado por la Universidad Panamericana. El procedimiento consiste en analizar 12 días del año (se tomaron los días 15 de cada mes). Para cada uno de estos días se calculan las componentes directa, difusa y de albedo de la irradiancia solar sobre el plano del arreglo en intervalos de 5 minutos. La irradiancia global en cada instante se calcula como la suma de esas tres componentes. Finalmente, se integran los valores de irradiancia global a lo largo de cada día analizado. El valor obtenido se considera representativo de la irradiación global sobre el plano del arreglo diaria media mensual, es decir, la irradiación realmente disponible para el arreglo fotovoltaico con orientación Sur e inclinación de 23°.

Las variables que se calculan en cada instante del día representativo de cada mes son las siguientes: declinación y excentricidad de la órbita terrestre, hora solar de salida y puesta de sol, ángulos de posición del sol (acimut y ángulo de elevación) e irradiancia extraterrestre horizontal [13]; irradiancia global horizontal a partir del valor de irradiación diario [14]; índice de claridad [15]; fracción de difusa e irradiancia difusa horizontal [16]; irradiancia directa horizontal restando las componentes global y difusa; ángulo de incidencia de los rayos del sol con respecto a la normal al plano del arreglo e irradiancia directa sobre el plano del arreglo [13]; irradiancia difusa y de albedo sobre el plano del arreglo [13] e irradiancia global sobre el plano del arreglo como suma de las componentes directa, difusa y albedo.

La aplicación de este procedimiento ha permitido estimar los valores medios de irradiación global diaria sobre el plano del arreglo para los 12 meses del año en Aguascalientes. La Fig. 3 presenta estos valores y los compara con los valores

de irradiación horizontal obtenidos de la bases de datos de NREL. Los 12 valores obtenidos pueden considerarse representativos de la irradiación diaria media disponible por el arreglo fotovoltaico del prototipo en cada mes del año.

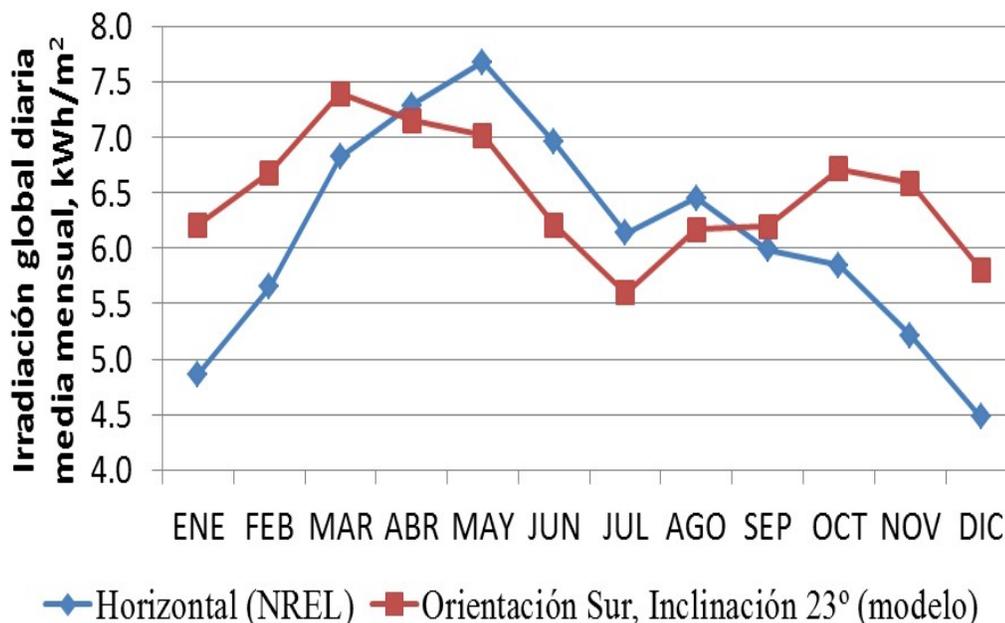


Fig. 3. Comparativa entre los valores de irradiación global diaria media mensual en la ciudad de Aguascalientes sobre plano horizontal (tomados de la base de datos de NREL) y sobre el plano del arreglo fotovoltaico del prototipo con orientación Sur e inclinación de 23° (obtenidos con el modelo de radiación desarrollado por la Universidad Panamericana).

C) Análisis de la captación de energía del arreglo fotovoltaico.

El regulador PWM hace operar al arreglo fotovoltaico alternativamente al voltaje de la batería y al voltaje de circuito abierto. Por lo tanto, la máxima potencia eléctrica que puede extraer del arreglo es la que se corresponde con un ciclo de trabajo del 100% (100% del tiempo operando al voltaje de la batería). Cuando el arreglo opera al voltaje de la batería, genera una corriente ligeramente superior a la corriente en el punto de máxima potencia, tal y como se observa en la Fig. 4. La figura muestra el punto de operación del arreglo fotovoltaico sobre la curva

voltaje-corriente, así como la potencia eléctrica extraída por el regulador (producto del voltaje de la batería por la corriente suministrada por el arreglo), cuando el arreglo opera en condiciones estándar (1,000 W/m² de irradiancia y 25°C de temperatura de celda).

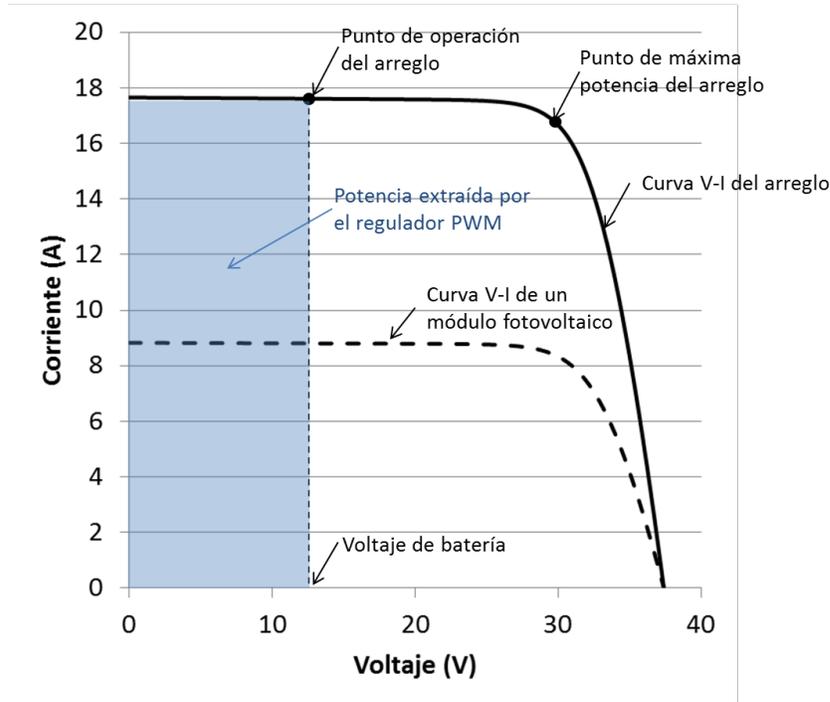


Fig. 4. Punto de operación del arreglo fotovoltaico durante el ciclo de trabajo del PWM sobre la curva voltaje-corriente del arreglo en condiciones estándar de operación (1,000 W/m² de irradiancia y 25°C de temperatura de celda). El área sombreada se corresponde con la potencia extraída por el regulador.

La corriente suministrada por el arreglo fotovoltaico es aproximadamente proporcional a la irradiancia incidente. Esto implica que la máxima energía que puede acumular la batería a lo largo de un día, E_d , se puede expresar como:

$$E_d (Wh) = PR \cdot H_d \left(\frac{kWh}{m^2} \right) \cdot V_{bat} (V) \cdot I_{mpp,STC} (A) \cdot N_p \quad (3)$$

Siendo H_d la irradiación global diaria sobre el plano del arreglo, V_{bat} el voltaje de la batería, $I_{mpp,STC}$ la corriente en el punto de máxima potencia de un módulo

fotovoltaico en condiciones estándar y N_p el número de módulos fotovoltaicos interconectados en paralelo. El coeficiente PR (*Performance Ratio*) tiene en cuenta una serie de pérdidas que tienen lugar en el sistema, entre las cuales la principal viene reflejada por la eficiencia de carga de la batería. De ahí que en el presente estudio se utilice un valor de $PR=0.90$, equivalente a la eficiencia de carga de la batería reportada por el fabricante.

Utilizando esta expresión se puede comparar la energía disponible para carga de batería diaria media mensual con el requerimiento de energía diario del sistema calculado en el apartado A). Dicha comparativa se muestra en la Tabla 1.

Mes	Energía disponible para carga diaria media mensual (Wh)	Energía de descarga diaria (Wh)	Porcentaje de exceso de energía (%)
Ene	1,115	1,107	0.67
Feb	1,200	1,107	8.34
Mar	1,327	1,107	19.81
Abr	1,283	1,107	15.89
May	1,260	1,107	13.77
Jun	1,114	1,107	0.65
Jul	1,005	1,107	-9.23
Ago	1,107	1,107	0.02
Sep	1,112	1,107	0.46
Oct	1,205	1,107	8.80
Nov	1,183	1,107	6.82
Dic	1,042	1,107	-5.85

Tabla 1. Comparativa entre la energía disponible para carga de la batería diaria media mensual y la energía de descarga diaria del sistema para el prototipo actual.

Analizando estos datos, puede verse que el prototipo actual no cumple con los requisitos mínimos de desempeño energético durante los meses de Julio y Diciembre. En estos meses, la energía diaria media disponible para cargar la batería (obtenida a partir de los valores de irradiación global diaria media mensual en el plano del arreglo fotovoltaico) no es suficiente para realizar la recarga completa de la batería durante las horas de sol. Esto implica que la media de horas en que el espectacular estará iluminado durante estos meses será inferior a 4 hr, que es el objetivo que se esperaba para el prototipo diseñado.

4. Diseño del nuevo arreglo fotovoltaico

Analizando la Fig. 4, puede observarse que el arreglo fotovoltaico actual está operando lejos del punto de máxima potencia porque los módulos tienen un voltaje de circuito abierto (37.4 V) muy superior al voltaje de la batería (12 V). Esto implica que no se está aprovechando todo el potencial para generar electricidad del arreglo.

Por esta razón se ha diseñado un nuevo arreglo fotovoltaico que se acopla mejor a los 12 V de la batería. El nuevo arreglo está compuesto por 5 módulos fotovoltaicos de 70 W nominales por módulo, de tecnología de silicio policristalino, interconectados en paralelo. Con estos 5 módulos se instalará una potencia pico total de 350 W, menor que los 500 W del prototipo actual. Es decir, se utilizará una menor superficie de captación y se construirá un arreglo de menor costo. A pesar de ello, el mejor acople de los módulos al voltaje de la batería permitirá aprovechar mejor su capacidad y obtener un mejor desempeño energético, como se mostrará en la sección 6.

Los nuevos módulos fotovoltaicos tienen un 15.4 % de eficiencia estándar. Sus principales características eléctricas son: 18.3 V y 22.3 V de voltaje en máxima potencia y en circuito abierto respectivamente; 3.83 A y 4.17 A de corriente en máxima potencia y en cortocircuito respectivamente (datos en condiciones estándar de 1,000 W/m² de irradiancia y 25°C de temperatura de celda).

La Fig. 5 muestra el punto de operación del nuevo arreglo fotovoltaico sobre la curva voltaje-corriente así como la potencia eléctrica extraída por el regulador (producto del voltaje de la batería por la corriente suministrada por el arreglo). En esta figura, el arreglo opera en condiciones estándar ($1,000 \text{ W/m}^2$ de irradiancia y 25°C de temperatura de celda).

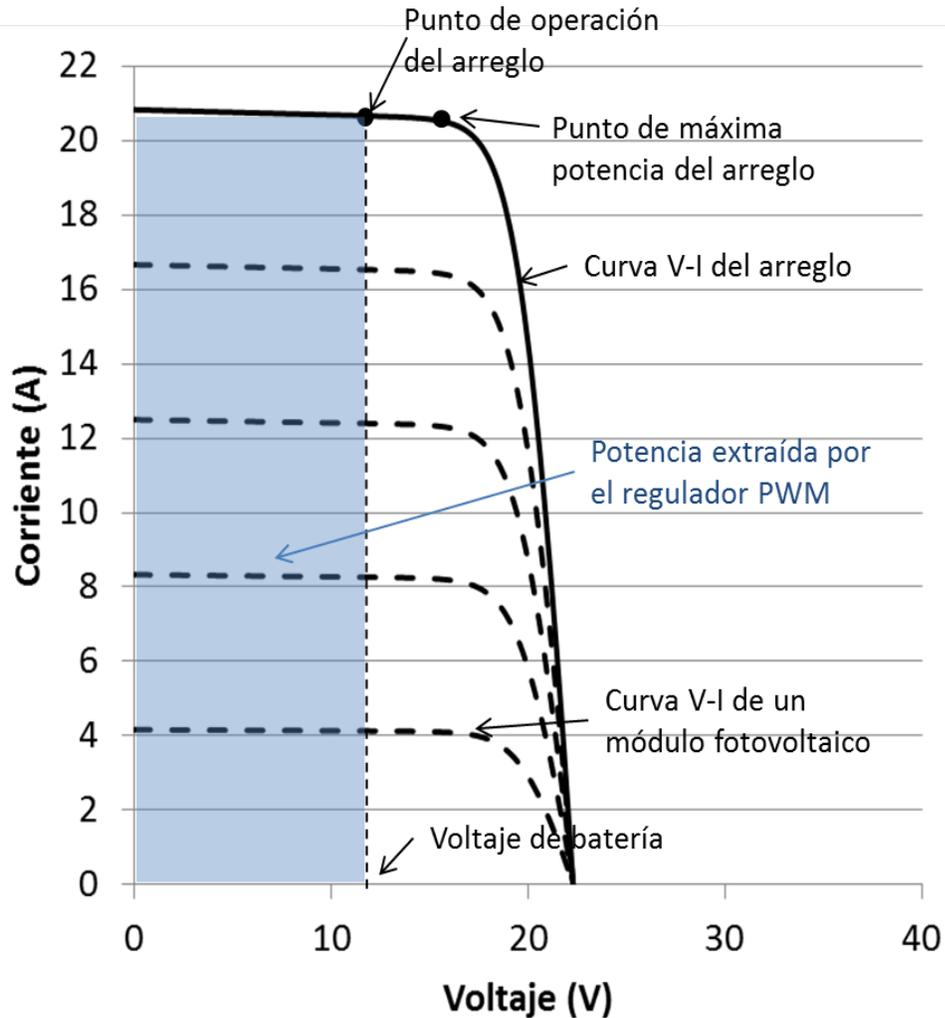


Fig. 5. Punto de operación del nuevo arreglo fotovoltaico durante el ciclo de trabajo del PWM sobre la curva voltaje-corriente del arreglo en condiciones estándar de operación ($1,000 \text{ W/m}^2$ de irradiancia y 25°C de temperatura de celda). El área sombreada se corresponde con la potencia extraída por el regulador.

Como puede verse al comparar esta figura con la Fig. 4, el arreglo fotovoltaico opera más cerca del punto de máxima potencia con la nueva configuración. Esto implica que se va a aprovechar mejor la capacidad de los módulos para generar electricidad. Además, al instalar cinco módulos en paralelo, la corriente que se extrae del arreglo es mayor que con la configuración antigua. Esto implica una mayor generación real de potencia, a pesar de que se instala una potencia pico total inferior a la del antiguo arreglo.

5. Diseño del sistema automático de encendido/apagado

El sistema automático de encendido/apagado tiene por objetivo detectar el momento del día en que la luz solar desaparece al caer la tarde. En ese momento enciende la iluminación del espectacular durante 4 horas. El sistema utiliza un minimódulo fotovoltaico como sensor de iluminación, un controlador ARDUINO® UNO, un relevador y una caja hermética para alojar los componentes.

El minimódulo fotovoltaico se encuentra cortocircuitado a través de una resistencia de bajo valor óhmico. De los extremos de la resistencia salen dos terminales que envían al controlador una señal de voltaje. Con estos elementos, el voltaje enviado al controlador es aproximadamente proporcional a la irradiancia global que incide sobre el minimódulo.

El ARDUINO® UNO es un microcontrolador basado en el ATmega328. Se programó utilizando el lenguaje de programación *Processing*, propio del controlador. La programación incorporó 3 funciones principales:

- Monitorizar el voltaje recibido del minimódulo fotovoltaico, para detectar el umbral de iluminación exterior al que se considera que deben encenderse los focos.
- Encender la iluminación del espectacular en este momento durante 4 hr.
- Ahorrar recursos del Arduino mientras no se necesiten (función "sleep").

El relevador se encarga de encender y apagar las luminarias, recibiendo del controlador una señal de “alta” para desactivar la iluminación, y una señal de “baja” para activarla.

Todos los componentes van alojados en una caja hermética diseñada para protegerlos de la intemperie.

La Fig. 6 muestra el diagrama de conexiones del controlador con la alimentación de 12 V procedente de la batería a través del regulador de carga, con el minimódulo fotovoltaico, con el relevador y con la salida hacia el inversor.

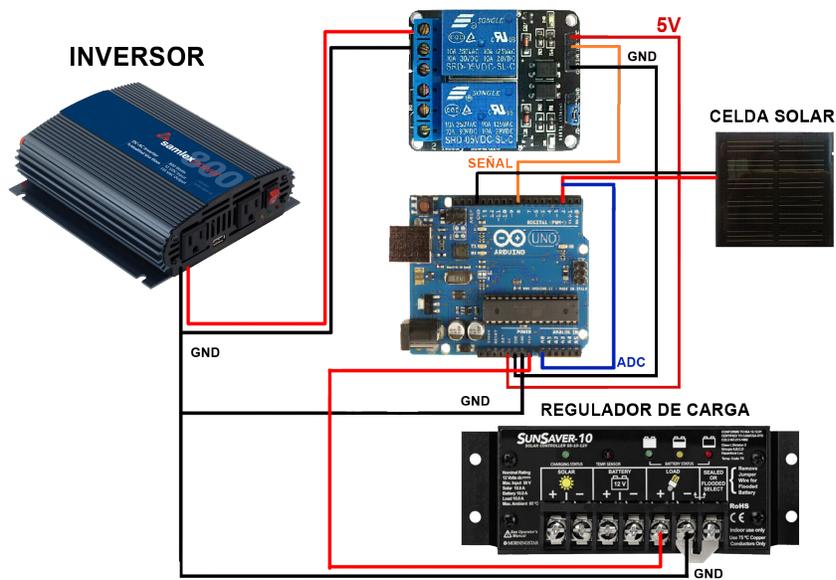


Fig. 6. Diagrama de conexiones del controlador Arduino.

El controlador permite ajustar el valor umbral de la señal de voltaje recibida desde el minimódulo fotovoltaico al cual deben encenderse los focos. Este valor umbral depende de las características de iluminación artificial, reflexión de objetos, etc., existentes en el lugar donde se instala el anuncio espectacular. Las pruebas realizadas *in situ*, permitieron observar que el minimódulo llegaba a enviar un voltaje de hasta 4 V en condiciones de máxima irradiancia solar, y que dicho voltaje caía hasta 1 V por la

noche. Se ajustó el valor umbral a 1.4 V, momento en que arranca la iluminación y se activa el cronómetro. Dicho cronómetro se ajustó para reinicializarse cuando se alcanzan los 3.5 V con la irradiación solar del día siguiente.

6. Análisis energético y económico del prototipo optimizado

La Fig. 7 muestra la configuración final del prototipo optimizado.

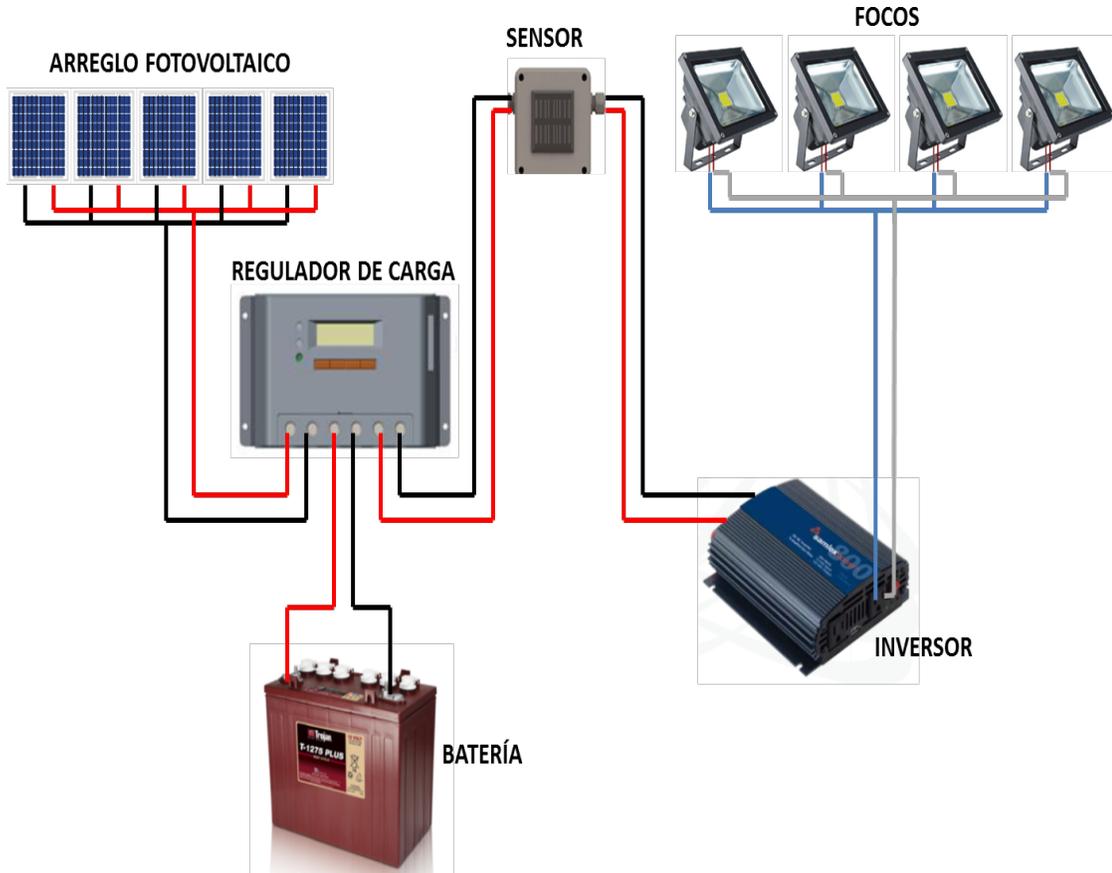


Fig. 7. Configuración del prototipo optimizado.

Realizando un análisis energético con el mismo procedimiento descrito en la sección 3, se han obtenido los valores indicados en la tabla 2. En esta tabla puede verse que la energía de descarga diaria se ha incrementado ligeramente debido al consumo del controlador Arduino, que se ha estimado en una potencia media durante las 24 hr del día de 1.5 W. Los valores de la tabla indican que el desempeño energético del prototipo optimizado es adecuado incluso para los meses de menor irradiación solar, existiendo

durante todo el año un exceso de energía para la carga diaria de la batería considerando valores medios.

Mes	Energía disponible para carga diaria media mensual (Wh)	Energía de descarga diaria (Wh)	Porcentaje de exceso de energía (%)
Ene	1,284	1,150	11.72
Feb	1,382	1,150	20.23
Mar	1,529	1,150	32.96
Abr	1,478	1,150	28.61
May	1,451	1,150	26.26
Jun	1,284	1,150	11.70
Jul	1,158	1,150	0.74
Ago	1,276	1,150	11.00
Sep	1,282	1,150	11.49
Oct	1,388	1,150	20.74
Nov	1,363	1,150	18.54
Dic	1,201	1,150	4.48

Tabla 2. Comparativa entre la energía disponible para carga de la batería diaria media mensual y la energía de descarga diaria del sistema para el prototipo optimizado.

Las tablas 3 y 4 presentan los costos asociados a la adquisición de los equipos principales del prototipo actual y del prototipo optimizado respectivamente.

Componente	Precio unitario (USD)	Cantidad	Precio total (USD)
Módulo fotovoltaico 250W	255	2	510
Regulador 12V 30A	70	1	70
Inversor 800 W	90	1	90
Batería 12V	220	1	220
TOTAL			890

Tabla 3. Costos de adquisición de los equipos principales del prototipo actual (impuestos incluidos).

Componente	Precio unitario (USD)	Cantidad	Precio total (USD)
Módulo fotovoltaico 250W	95	5	475
Regulador 12V 30A	70	1	70
Inversor 800 W	90	1	90
Batería 12V	220	1	220
Controlador solar	36	1	36
TOTAL			891

Tabla 4. Costos de adquisición de los equipos principales del prototipo optimizado (impuestos incluidos).

Como puede verse, el prototipo optimizado tiene un costo similar al del actual debido a que el costo del controlador solar se compensa con la reducción de costo del nuevo arreglo fotovoltaico que, como se comentó, es un arreglo de menor superficie y menor potencia pico.

7. Conclusiones

La principal conclusión de este estudio es que es posible mejorar la capacidad de generación de energía de un arreglo fotovoltaico controlado por un regulador PWM mediante un buen acople entre el voltaje del arreglo y el voltaje de la batería. De esta forma se logra que el arreglo fotovoltaico opere lo más cerca posible del punto de máxima potencia de su curva característica voltaje-corriente.

El arreglo fotovoltaico optimizado cumple los requisitos de captación de energía solar para satisfacer las necesidades del prototipo, según el estudio realizado basándose en valores diarios medios mensuales. Al ser un arreglo de menor potencia pico y menor superficie que el original, su costo se reduce. La reducción del costo del arreglo ha permitido añadir un controlador solar de encendido/apagado al prototipo sin incrementar el costo global del sistema.

8. Referencias

- [1] G. Loois, B. Van Hemert, Stand-alone photovoltaic applications: Lessons Learned. 2013. Ecofys. New York. 70 pp.
- [2] M. Hankins, Stand-alone solar electric systems: the Earthscan expert handbook for planning, design and installation. 2010. Earthscan. New York. 249 pp.
- [3] M. Egido, E. Lorenzo, "The sizing of stand alone PV-system: A review and a proposed new method". Solar Energy Materials and Solar Cells. Vol. 26. No. 1-2. 1992. 51-69 pp.
- [4] V. Estrada-Cajigal, R. Almanza, Irradiaciones global, directa y difusa, en superficies horizontales e inclinadas, así como irradiación directa normal, para la República Mexicana. 2005. UNAM, SID/646. México. 64 pp.
- [5] Programa de fomento de sistemas fotovoltaicos en México (ProSolar). SENER/GIZ. México. 2012.
- [6] International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Program (IEA-PVPS) task 3. En línea en <http://www.iea-pvps.org/index.php?id=9>. Acceso Mayo de 2015.
- [7] R. N. Chapman, Sizing handbook for stand-alone photovoltaic / storage systems. 1987. Sandia National Laboratories, SAND 87-1087. Albuquerque, New Mexico. 52 pp.

- [8] Global market outlook for photovoltaics 2014-2018. European Photovoltaic Industry Association (EPIA). 2014.
- [9] Lead-acid battery guide for stand-alone photovoltaic systems. International Energy Agency (IEA), IEA-PVPS 3-06. 1999.
- [10] Red de estaciones meteorológicas automáticas de Conagua. En línea en <http://smn.cna.gob.mx/emas/>. Acceso Mayo de 2015.
- [11] Surface Meteorology and Solar Energy (NASA). En línea en <https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>. Acceso Mayo de 2015.
- [12] Solar and Wind Energy Resource Assessment (NREL). En línea en <http://maps.nrel.gov/swera>. Acceso Mayo de 2015.
- [13] M. Iqbal, An introduction to solar radiation. 1983. Academic Press. Toronto. 408 pp.
- [14] A. Whillier, "The determination of hourly values of total solar radiation from daily summations". *Archiv für Meteorologie Geophysik und Bioklimatologie. Serie B.* Vol. 7. No. 2. 1956. 197-204 pp.
- [15] S. A. Klein, W.A. Beckman, J. A. Duffie, "TRNSYS—A transient simulation program". *ASHRAE Transactions.* Vol. 82. 1976. 623-633 pp.
- [16] The estimation of monthly mean values of daily total short-wave radiation on vertical and inclined surfaces from sunshine records for latitudes 40°N–40°S. *Proceedings of U. N. Conference on New Sources of Energy.* Roma. 1961.

9. Autores

Dr. Pedro Manuel Rodrigo Cruz obtuvo su doctorado en Ingeniería con especialidad en sistemas fotovoltaicos de concentración por la Universidad de Jaén, España.

Dr. José Sebastián Gutiérrez Calderón obtuvo su doctorado en Ingeniería con especialidad en cables eléctricos aislados de alta tensión por la Escuela Superior de Ingenieros de la Universidad de Navarra, San Sebastián, España.

Arturo de la Torre Infante es alumno de 4º semestre de Ingeniería Industrial por la Universidad Panamericana de Aguascalientes, México.