

PROTOTIPO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO CON SEGUIMIENTO SOLAR DE BAJO COSTO

José Sebastián Gutiérrez Calderón

Universidad Panamericana campus Aguascalientes

jsgutierrez@up.edu.mx

Pedro Manuel Rodrigo Cruz

Universidad Panamericana campus Aguascalientes

prodrigo@up.edu.mx

Resumen

Los sistemas fotovoltaicos transforman la luz solar en electricidad. Estos sistemas suelen utilizar una estructura fija con orientación óptima para el montaje de los módulos fotovoltaicos. Con este concepto, si se desea incrementar la producción de energía, es necesario aumentar el número de módulos fotovoltaicos, lo cual repercute en el costo del sistema. La presente investigación explora la posibilidad de incrementar la producción de energía sin añadir más módulos fotovoltaicos, mediante la utilización de un sistema de seguimiento solar móvil de bajo costo acoplado al sistema fotovoltaico. Para reducir los costos se tomaron dos decisiones en el diseño: primero, implementar un seguidor con un único eje norte-sur con inclinación óptima (en este caso, 21° para Aguascalientes), lo cual simplifica el diseño mecánico respecto al seguimiento a dos ejes; segundo, dividir el movimiento diario del actuador en 10 pasos, en lugar de realizar un movimiento continuo, lo cual simplifica el control electrónico. El prototipo cuenta con un sistema de monitorización para medir las ganancias en captación de irradiación solar respecto a un sistema de estructura fija. Se presentan como resultados las medidas de 4 días de operación completa, así como la tabla de costos de implementación del prototipo.

Palabra(s) Clave(s): Arduino, seguidor solar, sensor de corriente, sistema fotovoltaico autónomo.

1. Introducción

Los sistemas fotovoltaicos autónomos transforman directamente la luz solar en electricidad operando de manera aislada de la red eléctrica. [1] Estos sistemas fotovoltaicos pueden tener estructura fija o estructura con seguimiento solar. Estos últimos permiten rastrear el sol desde el amanecer hasta el atardecer obteniendo una mayor captación de energía solar. [2]

En México la generación de energía por medio de sistemas fotovoltaicos permite el aprovechamiento favorable de la irradiación solar por su localización y clima. De ahí la importancia de aprovechar al máximo la irradiación solar con mecanismos. [3] Actualmente el costo de la mayoría de los sistemas fotovoltaicos que cuentan con un sistema de seguimiento por kWp de potencia instalada es mayor que el costo de los sistemas fijos. Aunque algunos estudios actuales muestran un aumento entre el 30-50% de captación de irradiación utilizando sistemas de seguimiento en comparación con sistemas fotovoltaicos fijos. [4]

El trabajo presentado en este artículo se enfoca en implementar un sistema fotovoltaico autónomo con seguimiento solar de bajo costo. Actualmente los sistemas de seguimiento solar que emplean sistemas de monitoreo y control están basados en controladores lógicos programable (PLC), estos se utilizan para controlar y vigilar el movimiento mecánico del módulo fotovoltaico y para obtener y almacenar datos relacionados con la radiación solar. [5] [6]

Para lograrlo, en el prototipo con seguidor, se busca que el área del módulo fotovoltaico este en posición más perpendicular a la irradiación lumínica de la fuente de luz, lo cual se logra mediante un algoritmo programado en una tarjeta embebida con microcontrolador.

2. Desarrollo

En el prototipo se utilizaron simultáneamente una estructura fija y una estructura móvil para poder comparar las ganancias en captación de irradiación solar del sistema móvil con respecto al fijo.

En primer lugar se determinó la posición de los módulos fotovoltaicos, tanto del módulo fijo como el módulo con seguidor. El módulo fijo estaría con orientación

hacia el sur a 21 grados de inclinación, un posicionamiento óptimo para maximizar la captura de energía anual en Aguascalientes mediante sistema fijo. El módulo con seguidor estaría mirando hacia el sur de igual forma, pero con movimiento alrededor del eje norte-sur inclinado 21 grados. El giro se ajusta para que la normal a la superficie sea en todo momento lo más paralela posible a los rayos solares y la velocidad de giro es variable a lo largo del día.

Una vez determinada la orientación, se estableció la estructura del sistema. La estructura se diseñó buscando utilizar el menor material posible para abaratar el costo y se cuidó que cumpliera con la inclinación adecuada para el estado de Aguascalientes, es decir, 21 grados, para que los módulos recibieran los rayos del sol de forma lo más perpendicular posible durante un mayor lapso de tiempo y de esta forma lograr un mejor desempeño. Por los motivos mencionados anteriormente, la estructura se realizó con perfil redondo de acero, como se muestra en la figura 1.



Figura 1 Estructura del seguidor solar.

El seguimiento implementado podría considerarse de tipo azimutal. El azimut es el ángulo que forma un cuerpo celeste y el Norte, medido en sentido de rotación de las agujas de un reloj alrededor del horizonte del observador. Éste determina la dirección de un cuerpo celeste. Por ejemplo, un cuerpo celeste que se halla al Norte tiene un azimut de 0° , uno al Este 90° , uno al Sur 180° y al Oeste 270° . En el sistema implementado, al amanecer los módulos están en posición vertical orientados al Este, para recibir de la forma más perpendicular posible a los rayos solares; en el mediodía solar, los módulos están orientados al Sur con inclinación

de 21° , es decir, en este instante las posiciones del sistema fijo y del móvil son equivalentes; en el ocaso, los módulos están en posición vertical orientados al Oeste. El movimiento de giro está dividido en 10 pasos buscando minimizar el ángulo entre la normal a los módulos y los rayos solares en cada instante. La estructura del prototipo fue diseñada para soportar 4 módulos fotovoltaicos monocristalinos de 89W cada uno. En este prototipo únicamente se colocaron 3 módulos en la estructura. En la figura 2 se muestra la estructura con los módulos instalados. La parte baja de la estructura (1) se encuentra fija conectado a un sensor de corriente ACS712, los módulos superiores (2) y (3), son los módulos con movimiento. El módulo (2) se encuentra conectado a otro sensor de corriente ACS712. [7] El módulo (3) se conectó a un controlador de carga, una batería, a la tarjeta Arduino® con el módulo MicroSD y a un puente H, encargado junto con el actuador eléctrico 6110TP de realizar el movimiento seguidor.



Figura 2 Estructura de los módulos fotovoltaicos.

La implementación de estos elementos mecánicos y sistemas de control al módulo con seguidor, permitirá realizar los giros del módulo a lo largo del día, y de esta manera estudiar el incremento en la captación de energía a comparación de los módulos fijos.

Al momento de implementar los módulos fotovoltaicos se estableció un sistema de control óptimo, el cual, permitió obtener en todo momento datos de cada uno de los módulos fotovoltaicos, permitiendo medirla corriente generada instantáneamente. Se implementó el control mediante una tarjeta embebida conocida como Arduino®, plataforma de hardware de código abierto, basada en

una sencilla placa con entradas y salidas, analógicas y digitales, en un entorno de desarrollo basado en el lenguaje de programación Processing. [8]

El algoritmo que se desarrolló en la tarjeta embebida que permitió calcular la hora solar y determinar el movimiento y control de sistema mecánico, se describe en la figura 3.

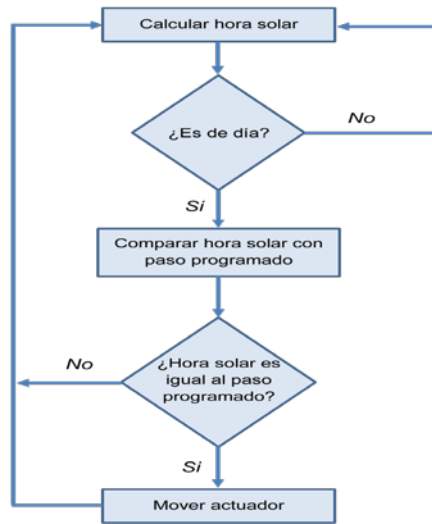


Figura 3 Diagrama de flujo del movimiento del actuador.

En dicho control del módulo fotovoltaico se añadieron a la tarjeta conectores compatibles con Arduino® para la creación de la base de datos manejable por el usuario, así como sensores especiales para medir la corriente (i) de cada módulo. Los datos obtenidos de los sensores y almacenados en la base de datos, permitieron crear históricos de las distintas variaciones a lo largo del tiempo de la corriente generada por el módulo fijo y por el módulo con seguidor.

Una vez conectados los sensores ACS712 en cada uno de los módulos fotovoltaicos, estos son conectados a la tarjeta mediante un puerto analógico para que el microcontrolador pueda interpretar el nivel de voltaje que estaba recibiendo y mediante operaciones programables en la tarjeta poder mostrar la corriente (i) de manera digital y lo más exacta posible. Una vez monitorizada la corriente (i) de cada uno de los dos módulos fotovoltaicos, para este prototipo se utilizó un módulo MicroSD de almacenamiento de datos, programado en la tarjeta mediante

el IDE de Arduino® permitiendo almacenar los datos y tener el control de la hora en la que se realizaron las mediciones. Estas mediciones se guardan en una tarjeta de memoria externa cuyos valores son almacenados en un archivo Excel. En la figura 4 se muestra el diagrama de conexión del sensor ACS712, módulo MicroSD y el módulo RTC con la tarjeta utilizada.

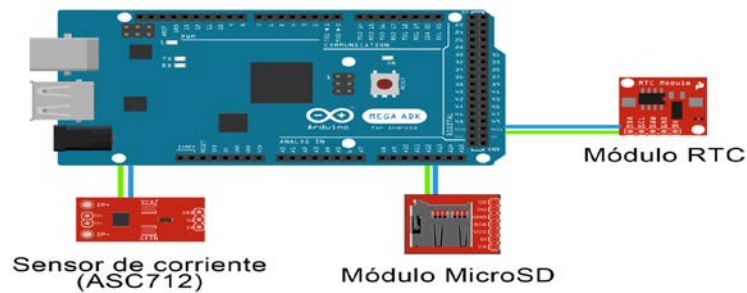


Figura 4 Diagrama de conexión del sensor ACS712, módulo MicroSD y RTC.

Con la tarjeta Arduino® al contar con comunicación I2C, permitió utilizar el módulo Tiny RTC fácilmente. Este módulo se compone entre otros elementos de un reloj DS1307, una memoria EEPROM 24C32AN y un soporte para pila de litio CR2032. [9] El módulo Tiny RTC nos proporcionó la fecha y hora exacta en tiempo real, transformada por el Arduino® para calcular la hora solar, ordenando al actuador eléctrico la inclinación del módulo fotovoltaico.

En la tabla 1, se muestra la posición en pulgadas del movimiento que realizó el actuador de acuerdo a la hora solar programada, comenzando a las 8:30 de la mañana terminando las 8:30 de la noche.

Tabla 1 Posición en pulgadas del movimiento del actuador.

| | | | | | | | |
|------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Tiempo (hr:min) | 8:30 | 9:30 | 10:30 | 11:30 | 12:30 | 13:30 | 14:30 |
| Posición (in) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 4 | 5 |
| Tiempo (hr:min) | 15:30 | 16:30 | 17:30 | 18:30 | 19:30 | 20:30 | |
| Posición (in) | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 4 | |

Para realizar el movimiento de la posición del módulo fotovoltaico, el puente H (L298) es el responsable de controlar el actuador eléctrico para subir o bajar el

módulo, según la indicación recibida por el Arduino®, regulando la inclinación del módulo. El actuador eléctrico cuenta con un sensor y una resistencia variable leída por la tarjeta de control, la cual, determina la altura a la que se encuentra en ese momento el actuador y cuánto debe moverse más adelante. En figura 5 se muestra el diagrama de conexión completo del prototipo.

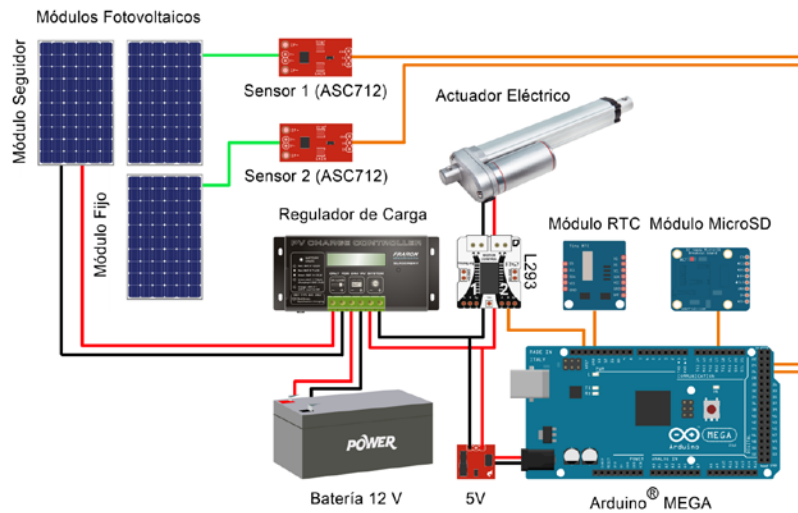


Figura 5 Diagrama de conexión del prototipo.

Para analizar las diferencias en captación de energía diaria del sistema móvil con respecto al fijo se utilizó el siguiente procedimiento:

La energía diaria en Wh/m^2 capturada por uno cualquiera de los dos sistemas puede expresarse con ecuación 1.

$$E_{\text{diaria}} = \sum_i G_i \cdot \Delta t \quad (1)$$

Siendo G_i la irradiancia incidente en el plano de los módulos (W/m^2) en cada instante de tiempo e Δt el intervalo de tiempo en el que se registran las medidas a lo largo del día. La irradiancia incidente en el plano de los módulos es aproximadamente proporcional a la corriente de cortocircuito [10] medida por el sensor de corriente, por lo que se tiene ecuación 2.

$$E_{\text{diaria}} = \sum_i K \cdot I_{SC,i} \cdot \Delta t \quad (2)$$

Siendo K la constante de proporcionalidad entre la corriente y la irradiancia (característica del módulo fotovoltaico testado) e $I_{SC,i}$ la corriente de cortocircuito medida por el sensor de corriente en cada instante.

El porcentaje de ganancia de energía diaria del sistema móvil con respecto al sistema fijo podrá expresarse entonces con ecuación 3.

$$Ganancia(\%) = \frac{E_{diaria}^{móvil} - E_{diaria}^{fijo}}{E_{diaria}^{fijo}} \times 100 = \frac{\sum_i K \cdot I_{SC,i}^{móvil} \cdot \Delta t - \sum_i K \cdot I_{SC,i}^{fijo} \cdot \Delta t}{\sum_i K \cdot I_{SC,i}^{fijo} \cdot \Delta t} \times 100 \quad (3)$$

Expresión que puede simplificarse en ecuación 4.

$$Ganancia(\%) = \frac{\sum_i (I_{SC,i}^{móvil} - I_{SC,i}^{fijo})}{\sum_i I_{SC,i}^{fijo}} \times 100 \quad (4)$$

3. Resultados

Los resultados obtenidos del prototipo se lograron de manera satisfactoria, debido a que todos los dispositivos mecánicos para mover los módulos fotovoltaicos funcionaron correctamente así como el sistema de monitoreo donde se pudo medir la corriente de ambos módulos solares.

El prototipo fue utilizado por 4 días completos, en estos días se hizo la comparación del módulo fijo y del módulo seguidor, analizando la corriente (i) a lo largo del día (con luz solar real). Las figuras 6, 7, 8 y 9, muestra las gráficas de las corrientes tomadas desde el día 7 de julio al 10 de julio del 2015. La línea roja en las gráficas correspondiente al módulo fotovoltaico con seguidor y línea verde correspondiente al módulo fijo.

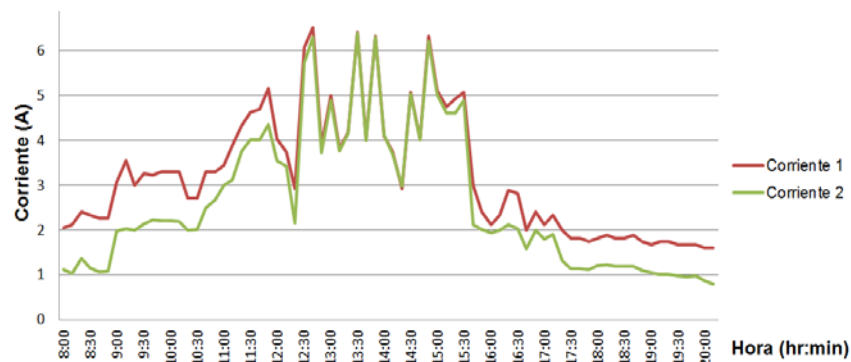


Figura 6 Gráfica de corrientes 7 de julio 2015.

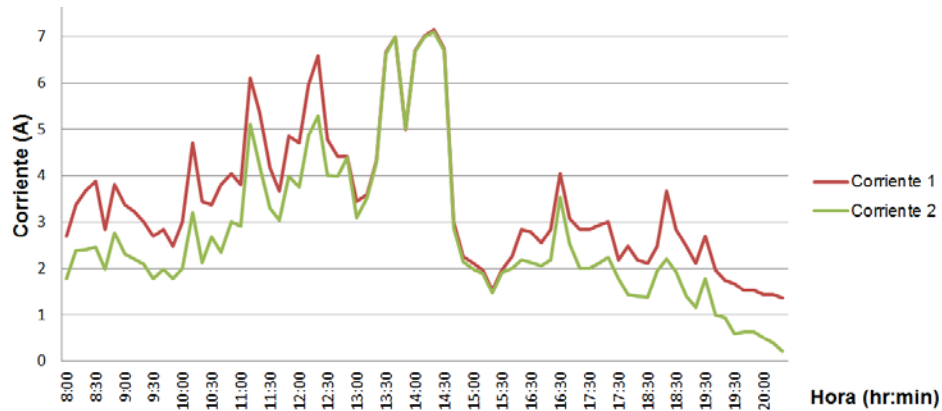


Figura 7 Gráfica de corrientes 8 de julio 2015.

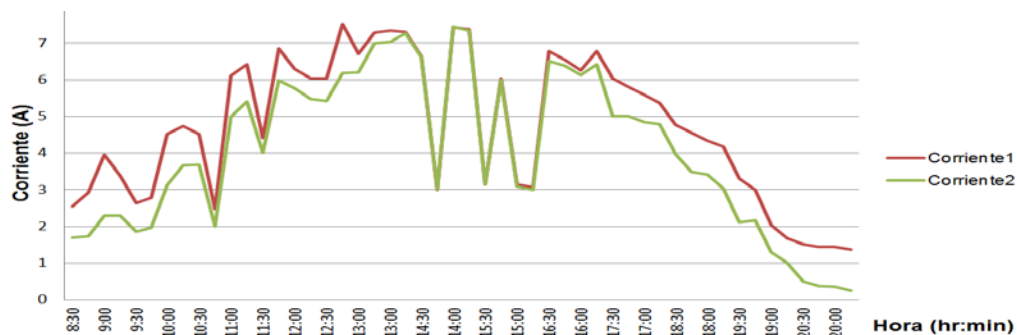


Figura 8 Gráfica de corrientes 9 de julio 2015.

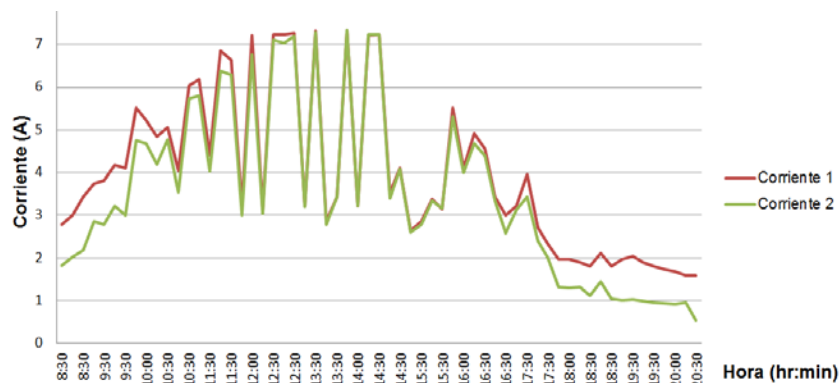


Figura 9 Gráfica de corrientes 10 de julio 2015.

En las figuras podemos observar la corriente del módulo fotovoltaico fijo y el módulo con seguidor, en donde en torno al mediodía solar, la corriente es muy parecida para los dos módulos debido a que su posición en este intervalo es prácticamente equivalente. Al comienzo y al final del día, la diferencia de corriente es considerable.

Mediante la ecuación 4 se han podido calcular las ganancias porcentuales de energía capturada por el sistema móvil respecto al fijo para los 4 días monitorizados. Dichas ganancias se muestran en la tabla 2.

Tabla 2 Sistema móvil respecto al sistema fijo para los 4 días monitorizados.

| Fecha | Ganancia de captura de energía (%) |
|-------------|------------------------------------|
| 7 Jul 2015 | 22.2 |
| 8 Jul 2015 | 26.1 |
| 9 Jul 2015 | 16.4 |
| 10 Jul 2015 | 12.7 |

Como puede verse, las ganancias en energía capturada oscilaron entre 12.7% y 26.1% para los 4 días analizados. La ganancia de energía es variable en función de las condiciones de radiación registradas cada día. Como las ganancias instantáneas son mayores en las primeras y últimas horas del día, cuanto mayor sea el aporte de energía registrado en estos intervalos de tiempo respecto a la energía total diaria, mayores serán las ganancias obtenidas por el sistema de seguimiento.

La tabla 3 presenta los costos totales asociados a la adquisición de los equipos principales del prototipo actual.

Tabla 3 Costos de adquisición de los equipos principales del prototipo actual.

| Material | Costo Unitario | Costo (MXN) |
|------------------------|----------------|----------------|
| Panel Solar (3) | \$2,000 | \$6,000 |
| Controlador | \$500 | \$500 |
| Batería 12 V | \$300 | \$300 |
| Actuador | \$1,860 | \$1,860 |
| Arduino | \$350 | \$350 |
| Reloj | \$60 | \$60 |
| Módulo MicroSD | \$150 | \$150 |
| Sensor ACS712 (2) | \$100 | \$200 |
| Puente H | \$100 | \$100 |
| Perfil Redondo A (3x6) | \$100 | \$300 |
| Soldadura (kg) | \$30 | \$30 |
| TOTAL | | \$9,950 |

Si únicamente se toma en cuenta el sistema de control y el sistema de automatización, así como la estructura, el costo asciende a \$3,950 pesos mexicanos, siendo éste un valor razonable y competitivo.

4. Discusión

Se ha calculado una ganancia media de energía del 20% con el sistema de seguimiento. Supongamos un sistema fijo de 10 módulos fotovoltaicos, en el cual, si se quisiera obtener un 20% más de energía, tendríamos que añadir 2 módulos fotovoltaicos más, unos \$4,000 pesos. Resulta rentable incorporar elementos que suman los \$3,950 pesos y obtener la misma energía con menor costo. Como ventaja adicional, obtenemos más energía con la misma superficie, la cual es útil si la superficie es limitada.

5. Conclusiones

Se pudo demostrar en este trabajo de investigación que la construcción de una estructura para sistemas fotovoltaicos autónomos con seguimiento solar, aumenta el porcentaje de captación de energía solar entre 12.7% y 26.1% para 4 días monitorizados. En cuanto al costo, se ha obtenido para los principales elementos mecánicos y de control del seguidor un costo de \$3,950 pesos mexicanos, accesible teniendo en cuenta los beneficios mencionados de incremento en la captación de energía solar.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] F. Famoso, R. Lanzafame, S. Maenza, P. F. Scandura, "Performance Comparison between Low Concentration Photovoltaic and Fixed Angle PV Systems". *Energy Procedia*. vol. 81. Dec 2015. Pp. 516–525.
- [2] H. Bentaher, H. Kaich, N. Ayadi, M. Ben Hmouda, A. Maalej, U. Lemmer, "A simple tracking system to monitor solar PV panels". *Energy Convers. Manag.* vol. 78. Feb. 2014. Pp. 872–875.
- [3] R. C. Temps, K. L. Coulson, "Solar radiation incident upon slopes of different orientations". *Sol. Energy*. Vol. 19. No. 2. 1977. Pp. 179–184.
- [4] R. Eke, A. Senturk. "Performance comparison of a double-axis sun tracking versus fixed PV system". *Sol. Energy*. Vol. 86. No. 9. Sep. 2012. Pp. 2665–2672

- [5] A. Al-Mohamad, "Efficiency improvements of photo-voltaic panels using a Sun-tracking system". *Appl. Energy*. Vol. 79. No. 3. Nov. 2004. Pp. 345–354.
- [6] R. G. Vieira, F. K. O. M. V. Guerra, M. R. B. G. Vale, M. M. Araújo, "Comparative performance analysis between static solar panels and single-axis tracking system on a hot climate region near to the equator". *Renew. Sustain. Energy Rev.* Vol. 64. 2016. Pp. 672–681.
- [7] M. R. Mojallizadeh, M. Badamchizadeh, S. Khanmohammadi, M. Sabahi, "Designing a new robust sliding mode controller for maximum power point tracking of photovoltaic cells". *Sol. Energy*. Vol. 132. Jul. 2016. Pp. 538–546.
- [8] A. D'Ausilio, "Arduino: A low-cost multipurpose lab equipment". *Behav. Res. Methods*. Vol. 44. No. 2. 2012. Pp. 305–313.
- [9] D.-R. Chen, K.-F. Chiang, "Cloud-based power estimation and power-aware scheduling for embedded systems". *Comput. Electr. Eng.* Vol. 47. Oct. 2015. Pp. 204–221.
- [10] W. E. Boyson, J. A. Kratochvill, D. L. King, "Photovoltaic array performance model". Sandia National Laboratories. No. SAND2004–3535. 2004.

7. Autores

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.

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