

Recibido 30 de septiembre de 2022. Aceptado 05 de diciembre de 2022. Publicado 23 de diciembre de 2022.

ISSN: 2448-7775

Impacto de intermitencia solar en producción energética por Fotovoltaicos como pronosticador en Sistemas Cero Energía

IVÁN A. HERNÁNDEZ ROBLES*, XIOMARA GONZÁLEZ RAMÍREZ, J. MARTÍNEZ PATIÑO, H. J. ESTRADA GARCÍA.

Universidad de Guanajuato, Salamanca, Guanajuato, México.

*Autor de correspondencia: ia.hernandez@ugto.mx¹

RESUMEN Con el objetivo de realizar investigación necesaria para el progreso y generación del conocimiento, asociado en el diseño y dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos híbridos que implementaran métodos inteligentes para la búsqueda de cero energías de la red para consumo de energía eléctrica en edificaciones, se realiza este trabajo abordando el análisis, la estadística y agrupación del histórico de datos obtenidos de la energía suministrada por un sistema fotovoltaico en dos años. Este trabajo determina el impacto de intermitencia solar por el paso de las nubes en un sistema fotovoltaico, así como propone un modelo gaussiano para la característica de potencia suministrada por un sistema fotovoltaico para su dimensionamiento óptimo, así como es posible tomarlo como la base para algún algoritmo de aprendizaje de una red neuronal para compensar la demanda de energía y buscar características de nula energía de la red para edificaciones. El modelo propuesto contribuye además en determinar la afectación por el paso de las nubes sobre un sistema fotovoltaico, obteniendo una baja del 7% del potencial energético. El desarrollo de este trabajo contribuye al conocimiento y desarrollo de nuevas metodologías en la búsqueda de la sustentabilidad energética bajo la característica de cero consumo de la red eléctrica para las edificaciones.

PALABRAS CLAVE— Irradiancia solar, edificación cero energía, minería de datos, modelo gaussiano, sistema fotovoltaico.

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años la implementación de sistemas fotovoltaicos interconectados a la red se ha incrementado aquí en México tanto en la industria, en el comercio así como aplicaciones civiles (residenciales, instituciones académicas), esto ha apoyado a realizar ahorro energético a la única compañía suministradora que tiene el país, así como indirectamente estas implementaciones han reducido la dependencia de carbono en combustibles, sin embargo, estos esfuerzos siguen siendo mínimos comparados con los esfuerzos que se han realizado en otros países sobre todo en Europa donde las políticas energéticas van encaminadas a buscar la descarbonización de todo edificio ya sea de aplicaciones industriales o civiles, sin importar la aplicación o la utilización de su demanda de energía del edificio. Para esto aplican el concepto de Edificaciones Cero Energía (*Zero Energy Buildings*) que se refiere a que toda la necesidad o demanda energética de la edificación puede satisfacerse con tecnologías renovables y elementos pasivos como la orientación del edificio, alto aislamiento, iluminación y ventilación natural para lograr un balance de energía cero.

El país tiene un gran potencial energético por radiación solar, por lo que los Sistemas Fotovoltaicos (SFV) para generar energía pueden desempeñar un papel muy importante para lograr un balance energético cero en las edificaciones, por lo que este estudio se enfocará en analizar y modelar el potencial energético de SFV con la finalidad de que sea la base

para implementar algoritmos para la búsqueda de la sustentabilidad energética bajo la característica de cero consumo de la red eléctrica para las edificaciones.

Con este objetivo se revisó [1] que presenta un estudio y análisis exhaustivo de las aplicaciones de SFV en casos de Edificación Cero Energía (ECE) a través del Programa de calefacción y refrigeración solar en Edificaciones y Comunidades de la Agencia Internacional de Energía, que incluyen métodos de instalación fotovoltaica, tipo de celda fotovoltaica y generación de electricidad, en este análisis se determinó que la tecnología renovable más utilizada para conseguir ECE era SFV (29 de 30 casos analizados). Otro caso de estudio revisado fue [2] donde se evalúa el potencial de ahorro energético aprovechando energía solar con SFV y optimizando arquitectura del edificio como mejores ventilaciones, alturas entre pisos. En [3] se propuso un análisis de diferentes estrategias de dimensionamiento de los flujos de energía entre el edificio y la red eléctrica para reducir los flujos de energía bidireccionales con la red eléctrica, con la finalidad de buscar ECEs. [4] es una referencia que nos permitió tener idea de un modelo que pudo utilizarse como herramienta para cuantificar ahorros energéticos mediante medidas efectivas de conservación de energía, con esto nos confirmó que buscar ECEs es necesario para sistemas de almacenamiento efectivos. Se revisó un estudio en [5] de ECEs con confort térmico en época de verano cuando se consume mayor energía por el clima caluroso en Japón el cual nos permitió confirmar que es posible conseguir ECEs en épocas de mucha demanda energética. En [6] se tiene una

referencia que permitió confirmar los parámetros medidos y el análisis meteorológico y estadístico que se hace para evaluar la viabilidad técnica económica de sistemas híbridos con características de sustentables. En [7] se utilizó base a datos meteorológicos reales (irradiación y temperatura) para evaluar el desempeño de algoritmos de seguimiento, estos algoritmos pueden ser referencias para un posible gestor energético propuesto en este trabajo. Se revisó también [8] donde se utiliza tecnología del internet de las cosas para tener un sistema de monitoreo y registro de datos para tener una micro-red de SFV dinámica, interactiva conectada a una red energética de 220 V, este estudio fue de importancia para generar nuevas ideas para incluir más parámetros de monitoreo, análisis estadísticos y clasificación de las eficiencias de los inversores basadas en el flujo de energía, así como escenarios de módulos solares adicionales para el análisis económico.

II. EDIFICACIÓN CERO ENERGÍA

A. CARACTERÍSTICAS DE EDIFICACIONES CERO ENERGÍA

En términos generales una ECE es un edificio con consumo neto de energía es cero, es decir, la cantidad total de energía utilizada por el edificio es igual a la cantidad de energía renovable que se produce en el sitio, además de contener otros elementos pasivos (orientación del edificio, altura o espacio entre pisos, iluminación y ventilación natural óptimo) que ayudaran al objetivo de reducir el consumo para la refrigeración o calefacción del edificio, y en términos generales estas características que se buscan tener son para lograr un balance de energía cero.

En este trabajo se visualiza a un ECE con las características especificadas en la Fig.1. Una característica para resaltar es el contar con un Sistema de Control y Gestión Energética (SCGE), que es el que se encargará de controlar el suministro de energía proveniente de sus fuentes de energía renovables para los diferentes escenarios, por ejemplo, un escenario pesimista sería cuando el edificio tiene alta demanda de energía con poca irradiación solar (día lluvioso o nublado) en el caso de utilización de generación por fotovoltaico.

Bajo este escenario el SCGE tendrá que gestionar de donde obtener la energía para cubrir con la demanda, si el SFV no puede proveer al 100% la demanda, el sistema de control del SCGE tendrá que abrir el suministro del sistema de almacenamiento o abrir alguna otra fuente de energía renovable que el ECE pudiera contar. Para que el sistema de control pueda tomar acciones es necesario dotarlo de algún algoritmo de toma de decisiones.



Fig. 1. Esquema de las características de un ECE.

B. PROPUESTA DE PROCESO PARA CONSEGUIR EDIFICACIONES CERO ENERGÍA

Es evidente que los elementos de ventilación, iluminación natural, y orientación óptima del edificio dependen del diseño arquitectónico y civil, no está dentro del área de estudio de este trabajo por lo que se descartan su análisis, entonces para conseguir tener ECEs esta propuesta propone dos módulos:

1. Un sistema de monitoreo que proporcione seguimiento a la medición de parámetros como: energía consumida, energía generada (o suministrada), energía almacenada, medición de temperatura y radiación solar.
2. El SCGE, donde se realiza el pronóstico de la generación en base al clima (radiación solar y temperatura), y su elemento de gestión y actuador (toma de decisiones).

Ambos módulos nos permitirán llevar a tener la condición del consumo igual o menor al suministro de energía limpia y con ello tener propiamente al ECE, ver el cuadro de proceso de Fig.2 para mejor visualización del concepto modular propuesto para obtener ECEs, y la Fig.3 muestra el diagrama conceptual propuesto del proceso que propone este trabajo para conseguir el ECE.

El sistema de monitoreo obtiene la medición y datos de generación por SFV por Termosolar que sirve para crear vapor, con ello pasa a una turbina y crea energía eléctrica que se lleva al sistema de almacenamiento, se mide la demanda, la temperatura e irradiación solar, esto último para determinar si está nublado, si es de noche, si está pasando nube encima del SFV, del sistema Termosolar.

Con estos seis elementos medidos en el bloque de monitoreo, se puede tener el control y gestión energética mediante el SCGE propuesto que consiste en predecir la generación eléctrica en base a la temperatura e irradiación medida, la predicción nos permitirá tener una referencia de comparación entre el consumo y lo que se generará para que el sistema pueda tomar las acciones pertinentes para cubrir o mantener la generación eléctrica de mayor o igual al consumo, si esta condición se cumple, el SCGE seguirá utilizando el SFV como fuente principal de suministro, de lo contrario, el SCGE abrirá el suministro del almacenamiento y compensará la energía eléctrica faltante utilizando el módulo de almacenamiento por el tiempo que se estime pertinente. Para ello el pronosticador es un apoyo de comparación doble para que el sistema entienda si es de noche, si es solo una perturbación por el paso de una nube, o si es un día nublado o con lluvia, esto dará más control y fiabilidad a la gestión energética y por supuesto a la condición de Generación Eléctrica limpia mayor o igual al consumo energético.

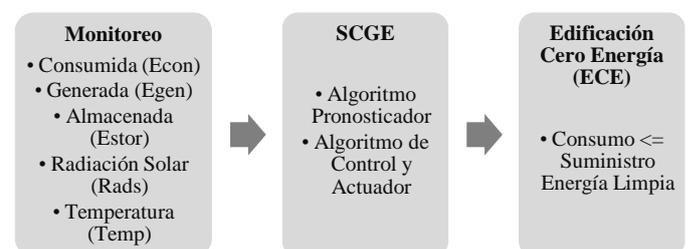


Fig. 2. Esquema con las etapas o elementos propuestos para la búsqueda de ECEs.

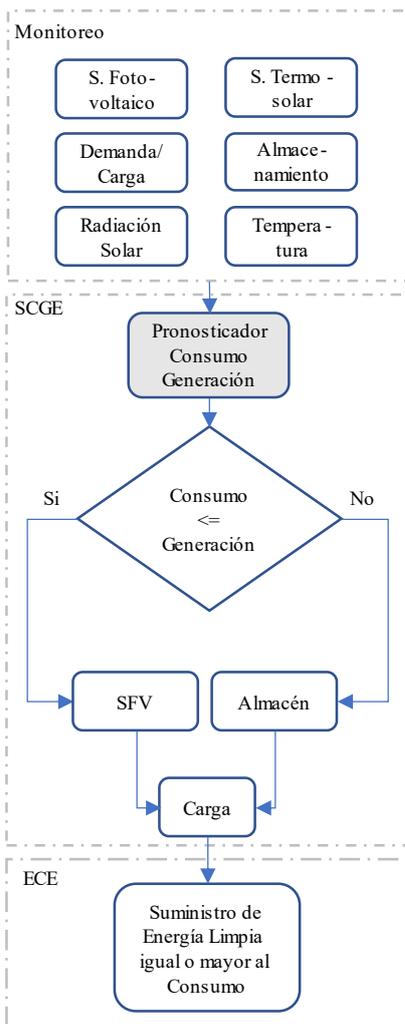


Fig. 3. Esquema conceptual del diagrama de bloques para conseguir ECE.

III. ANÁLISIS DE DATOS PARA EL PRONOSTICADOR

El pronosticador propuesto es el componente principal de este trabajo el cual nos permite determinar cuál es el impacto que tiene la intermitencia solar en la generación de energía por SFV, para ello se recurrió a la base de datos de las mediciones obtenidas por 18 meses.

A. MANEJO DE DATOS Y ESTADÍSTICA

Las mediciones utilizadas en este trabajo fueron tomadas de manera continua, con intervalo de tiempo de medición de cada 5 mins (300 seg) durante 18 meses, en el tratamiento de los datos (potencia, energía, temperatura, irradiación solar) un primer paso fue depurar los datos atípicos donde a pesar de que hubo irradiación solar, el valor de generación fotovoltaica fue de cero en el caso de fallos de los inversores o alguna anomalía en el sistema, un segundo paso fue agrupar los datos por mes para tener una mejor visualización de los valores máximos, mínimos obtenidos, así como que la depuración de los datos haya sido efectiva.

La Fig. 4 muestra la dispersión de datos para el mes de agosto de 2022 que tiene más afectación de la energía por la temporada de lluvia y salidas del sistema. También se analizó

la variabilidad de los valores si tomamos en cuenta el máximo, el promedio, la mediana.

La Fig.5 muestra como fue la variación de los valores de la energía durante del mes de agosto 2022. La pregunta obligada fue ¿Qué valores tomar para desarrollar un modelo que representa de manera más verídica el comportamiento de la generación de energía, potencia, temperatura, etc.? ¿Cuáles valores utilizar, media, el promedio o los máximos?

El análisis estadístico y de manejo de datos nos permitieron responder estas preguntas, de todos los datos fue evidente que el valor máximo corresponde a tener disponible toda la capacidad del SFV en las mejores condiciones, temperatura e irradiación solar máxima (óptima) sin perturbaciones de días de lluvia o con nubosidad, por lo que el modelo debe buscar ajustarse a la capacidad total de generación eléctrica debido a su capacidad o infraestructura instalada.

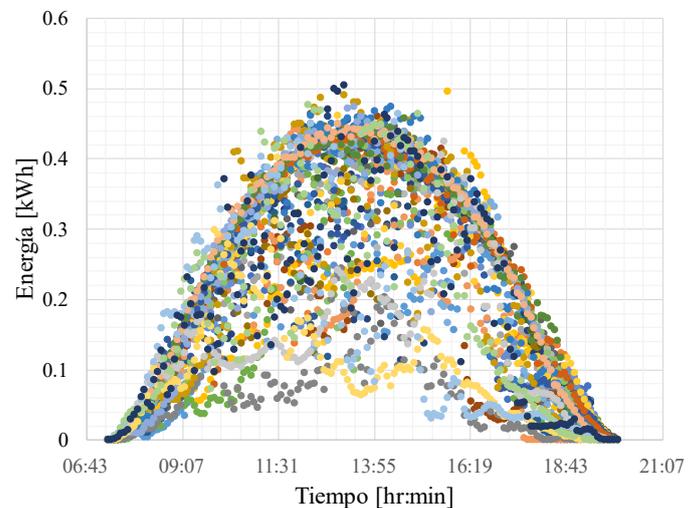


Fig. 4. Dispersión de los datos del mes de agosto 2022 con mayor número de perturbaciones por nubosidad.

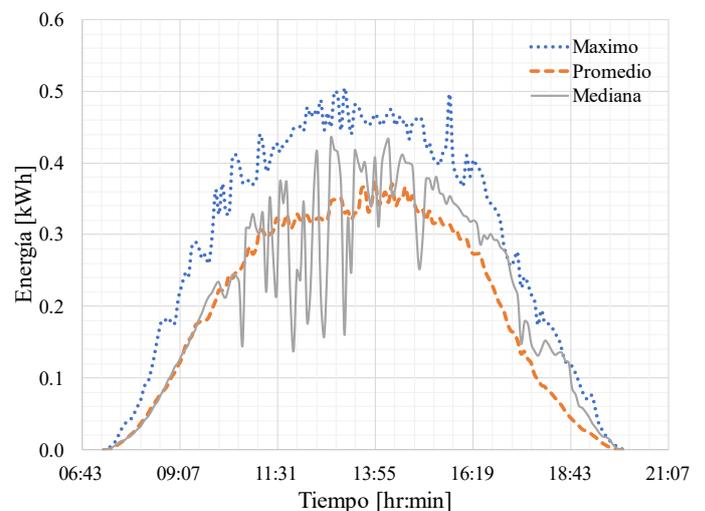


Fig. 5. Valores máximos, promedio y mediana de un lote de datos de un mes.

B. COMPARATIVA DÍAS CON LLUVIA, NUBOSIDAD Y SOLEADO

Las mediciones obtenidas brindaron información relevante para entender cómo afecta un día muy nublado (lluvioso), por el paso de las nubes, con respecto a un día muy soleado, la Fig.6 muestra como es la característica de potencia proporcionada por un SFV, es posible apreciar una curva normalizada con duración de poco más de 12 horas, la curva presenta altibajos los cuales son debidos al paso de las nubes que obstruyen la irradiación solar sobre algunos o todos los paneles del SFV.

Por ejemplo, el 08 de agosto de 2022 fue un día muy nublado y con lluvias, se puede observar los picos descendentes y ausencia de generación entre las 15:45 h a 16:0 h, por otro lado, el 24 de agosto fue un día poco nublado pero con algo de paso de nubes (viento) que afectaron a la generación, y el 08 de noviembre es un ejemplo de día soleado, con un poco menor de niveles de irradiación solar comparados con el 24 de agosto, esto debido a que en noviembre el clima cambió con respecto a agosto, las horas sol son menores y la temperatura descende. Toda esta información es de gran valía para el módulo pronosticador, donde servirán como datos de entrada al algoritmo de redes neuronales para su aprendizaje, y por ende determinar un pronóstico.

IV. MODELO E IMPACTO DE LA INTERMITENCIA SOLAR PARA EL PRONOSTICADOR

A. MODELO DE LA CARACTERIZACIÓN DE POTENCIA Y ENERGÍA GENERADA POR EL SFV

De los datos de potencia y energía es evidente que se caracteriza por ser una curva normalizada con presencia de altibajos o ruido que son debido a la intermitencia solar por el paso de las nubes, para determinar esta intermitencia se propone determinar un modelo que caracterice a la capacidad o potencia máxima de generación eléctrica, este modelo propuesto es a través de una función gaussiana dada por:

$$P(t) = A_p e^{-\left(\frac{t-0.36t_f}{\sigma}\right)^2} + A_p e^{-\left(\frac{t-0.64t_f}{\sigma}\right)^2} \quad (1)$$

Donde P es la potencia del SFV, A_p es la amplitud de la potencia que se puede generar, t tiempo, t_f es la duración de las horas sol, en Guanajuato se ha cuantificado 12.75 horas, y σ es la desviación estándar de las muestras de irradiación solar. La amplitud pico A_p de la potencia se calcula en base a la capacidad del panel C_p y al número de paneles N_p , entonces está dada por:

$$A_p = N_p C_p \quad (2)$$

Y la desviación estándar está dada por:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

Donde N es el número de muestras x_i , \bar{x} es la media aritmética, la Tabla I contiene los valores de los parámetros para este estudio realizado.

La Fig. 7 muestra la comparación entre los valores máximos de potencia obtenidos y la curva del modelo gaussiano propuesto, para con ello determinar el impacto que tiene el paso de las nubes o el día nublado con la potencia y energía producida. Para obtener la energía generada bastaría con hacer la integral de la Ec. (1), sin embargo, la integral analítica de una gaussiana no es posible, por lo que la energía es posible determinarse a través de métodos numéricos de integración, en este estudio la técnica de integración numérica utilizada es “regla del trapecio”. El área bajo la curva del modelo propuesto, Fig.7, es la energía generada, la integración numérica de la curva del modelo propuesto proporciona un resultado de 41 kWh durante un día y de manera idealizada, es decir, sin perturbaciones de nubosidad.

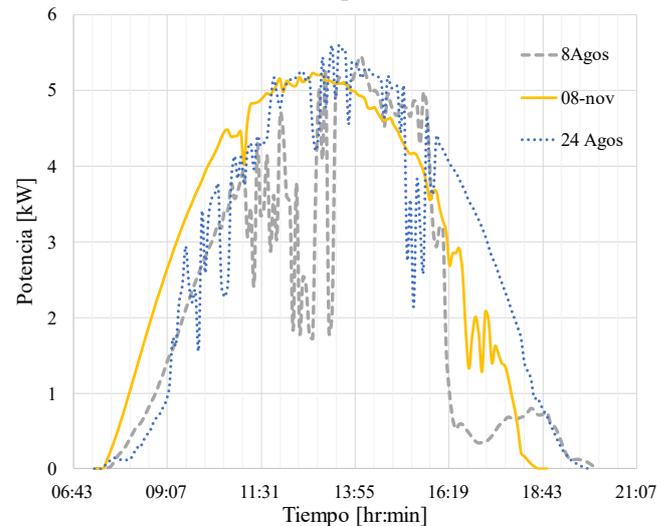


Fig. 6. Comparativa entre un día lluvioso, nublado y soleado.

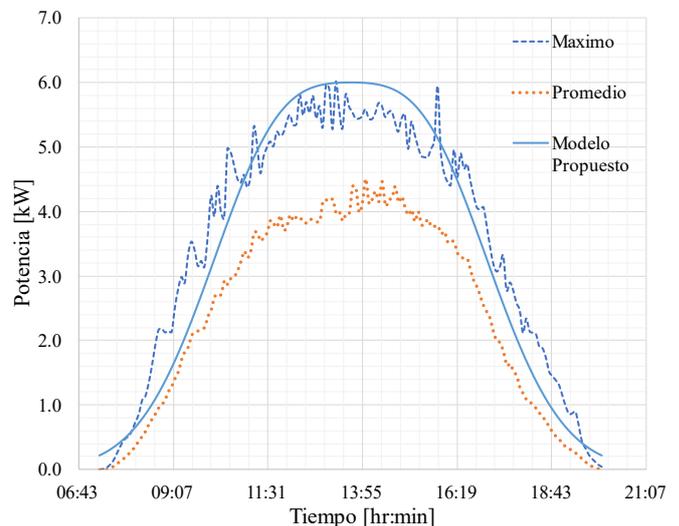


Fig. 7. Comparativa de curvas de la potencia generada con valores máximos, promedio y con el modelo propuesto.

TABLA I. PARÁMETROS DEL SFV CONSIDERADO.

PARÁMETRO	VALOR
Numero de paneles, N_p	21
Capacidad por panel, C_p [watts]	290
Pico de potencia, A_p [kW]	6.09
Numero de muestras por día, N	154
Media aritmética, \bar{x}	6.375
Desviación estándar, σ	2.6
Duración de horas sol, t_f	12.75

B. OBTENCIÓN DE LA PERTURBACIÓN POR NUBOSIDAD

El modelo propuesto nos permite estimar la energía que puede producir, en este caso el SFV con las características y dimensiones mostradas en la [Tabla I](#), genera 41 kWh de energía por día, de la base de datos obtenida fue posible obtener la energía total mensual producida, haciendo la comparativa con la curva idealizada fue posible determinar el impacto de la intermitencia solar por nubosidad en el SFV, ver [Tabla II](#), los resultados obtenidos arrojan que el impacto de la intermitencia solar solo por el paso de las nubes encima del SFV puede considerarse de 7.1 % promedio en los meses fuera de la época de lluvias. Durante la temporada de lluvias (junio, julio, agosto, septiembre) la nubosidad tiene un impacto del 24.6% en el rendimiento del SFV.

V. CONCLUSIONES

Existe un creciente interés para desarrollar sistemas inteligentes para gestionar la energía eléctrica y obtener edificaciones de cero consumo de la red, persiguiendo este objetivo, este trabajo inicia haciendo un tratamiento y análisis de datos adquiridos durante 18 meses, para determinar el impacto que tiene la intermitencia solar por el paso de las nubes en la generación eléctrica por SFV, los resultados de este análisis y tratamiento de datos es el primer paso para desarrollar un pronosticador con redes neuronales y tener una estimación de la generación fotovoltaica y con ello alimentar a un sistema de control y gestor energético para la toma de decisiones para que se pueda conseguir tener edificaciones de cero energía.

Los resultados obtenidos de este estudio nos proporcionan que es posible considerar 7% de impacto en el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos por el paso de las nubes, 24 % de caída en su rendimiento cuando es temporada de lluvias, es evidente que estos porcentajes obtenidos aquí pueden variar de acuerdo con las regiones del país, sin embargo, para la región Bajío pueden ser considerados para mejorar el dimensionamiento de los SFV a implementarse.

TABLA II. IMPACTO DE LA INTERMITENCIA SOLAR.

Mes	Energía [kWh]	% efectividad	% Impacto Nubes
Enero	1,144.5	92.2 %	7.8 %
Febrero	1,080.7	93.4 %	6.6 %
Marzo	1,192.4	93.1 %	6.9 %
Abril	1,142.1	92.2 %	7.8 %
Mayo	1,207.1	94.3 %	5.7 %
Junio	949.2	76.6 %	23.4 %
Julio	993.4	77.6 %	22.4 %
Agosto	969.60	75.7 %	24.3 %
Septiembre	889.17	71.7 %	28.3 %
Octubre	1,099.4	85.6 %	14.4 %
Noviembre	1,132.3	91.4 %	8.6 %
Diciembre	1,154.2	93.2 %	6.8 %

El análisis realizado también permitió definir que los valores máximos de potencia y energía obtenidos deben ser considerados como referencia cuando se requiera hacer la búsqueda de modelos de predicción, ya que estos valores máximos obtenidos están directamente ligados a las capacidades del SFV con las condiciones ideales de clima e irradiación solar.

El desarrollo de este trabajo contribuye al conocimiento y desarrollo tecnológico de pronosticadores en la generación eléctrica aprovechando la energía solar y que son fuentes de suministro energético para edificaciones que buscan la sustentabilidad energética.

REFERENCIAS

- [1] Jin-Hee Kim, Ha-Ryeon Kim, and Jun-Tae Kim, Analysis of Photovoltaic Applications in Zero Energy Building Cases of IEA SHC/EBC Task 40/Annex 52, MDPI Sustainability Journal, No.7, pp. 8782-8800, July 2015.
- [2] AbdulRahman S Almushaikah, and Radwan A Almasri, Evaluating the potential energy savings of residential buildings and utilizing solar energy in the middle region of Saudi Arabia – Case study, Energy Exploration & Exploitation, Vol.39, No. 5, pp. 1457 – 1490, 2021.
- [3] Giacomo Cillari, Alessandro Franco and Fabio Fantozzi, Sizing strategies of photovoltaic systems in nZEB schemes to maximize the self-consumption share, ELSEVIER Energy Reports, Vol. 7, pp. 6769 - 6785 2021.
- [4] Alessandro Piccinini, Magdalena Hajdukiewicz, and Marcus M. Keane, A novel reduced order model technology framework to support the estimation of the energy savings in building retrofits, ELSEVIER Energy & Buildings IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 244, pp. 1 - 13, 2021
- [5] Kanta Amada, Jungmin Kim, Manae Inaba, Mizuho Akimoto, Seiichi Kashihara, and Shin-ichi Tanabe, Feasibility of staying at home in a net-zero energy house during summer power outages, ELSEVIER Energy & Buildings, Vol. 273, pp. 1 -13, 2022.
- [6] Chih-Ta Tsai , Teketay Mulu Beza , Emiyamrew Minaye Molla, and Cheng-Chien Kuo, Analysis and Sizing of Mini-Grid Hybrid Renewable Energy System for Islands, IEEE Access, Vol.8, pp. 70013 -70029, 2020.
- [7] Asegid Belay Kebede, Getachew Biru Worku, Comprehensive review and performance evaluation of maximum power point tracking algorithms for photovoltaic system, ELSEVIER Global Energy Interconnection, Vol3, No.4, pp. 398 – 412, 2020.
- [8] Waluyo, Andre Widura, Febrian Hadiatna, And Rangga Maulana Implementation and Evaluation of a 3.3 kWp IoT-Based Photovoltaic Microgrid-Interactive Configuration, IEEE Access, Vol.9, pp. 106947 - 106963, 2021.

BIOGRAFÍAS



IVÁN A. HERNÁNDEZ ROBLES (M¹⁰) recibió grado de Licenciatura en Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Guanajuato (México) en 2002, Maestría y Doctorado en Ingeniería Eléctrica por el CINVESTAV Campus Guadalajara (México) en 2005 y 2013 respectivamente. Ha trabajado en el campo de la Ingeniería Eléctrica en proyectos de Construcción Eléctrica e Ingeniero de Diseño en EATON-Cooper Power, Guadalajara, México, durante dos años con cátedras CONACYT,

trabajando en diseño y optimización de generadores lineales y motores eléctricos. Actualmente es profesor en la Universidad de Guanajuato en el Departamento de Ingeniería Eléctrica. Sus líneas de investigación son el análisis numérico aplicado al diseño de máquinas eléctricas y las energías renovables.



XIOMARA GONZÁLEZ RAMÍREZ recibió el grado de Licenciatura en Ingeniería Eléctrica de la Universidad del Valle (Cali, Colombia) en 2008; Maestría en Ciencias y Doctorado en Sistemas Eléctricos de Potencia del CINVESTAV Campus Guadalajara (México) en 2010 y 2015 respectivamente. Es profesora en la Universidad de Guanajuato, Campus Irapuato-Salamanca en el Departamento de Ingeniería Eléctrica. Es especialista en generación distribuida y optimización de flujos de

energía eléctrica. Sus principales líneas de investigación son la operación y optimización de Sistemas Eléctricos de Potencia, y la Generación Distribuida por Energías Renovables.



JESÚS MARTÍNEZ PATIÑO Doctorado en Energías Renovables y Eficiencia Energética (2008). Egresado del Master en Ecoeficiencia, Ahorro Energético y Ecología Industrial (2003-2004) en la Universidad de Zaragoza (España). Egresado de la carrera de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería Mecánica, Eléctrica y Electrónica de la Universidad de Guanajuato (F.I.M.E.E.) (1997-2002).



HECTOR JAVIER ESTRADA GARCÍA recibió el grado de Licenciatura en Ingeniería de Comunicaciones y Electrónica de la Facultad de Ingeniería Mecánica, Eléctrica y Electrónica, Universidad de Guanajuato (México) en 2001; Maestría en Ingeniería Eléctrica Opción Instrumentación y Sistemas Digitales por la Universidad de Guanajuato en 2003; Doctor en Ciencias, orientación: Instrumentación y Control, Enero 2008, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), México,

en cotutela con la Ecole Centrale de Nantes y la Université de Nantes, Francia. Actualmente es profesor en la Universidad de Guanajuato en el Departamento de Ingeniería Eléctrica. Sus líneas de investigación son instrumentación y control, electrónica de potencia.

