



Dimensionado de sistema fotovoltaico autónomo para recargar vehículos eléctricos

Sizing of an isolated solar powered electric vehicle charging system

Yamir Sánchez-Torres^I, Antonio Sarmiento-Sera^I, Pedro Rodríguez-Ramos^{II, *}, Yunesky Masip-Macía^{III}

I. Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables, CETER. La Habana, Cuba

II. Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Centro de Estudios en Ingeniería de Mantenimiento, CEIM. La Habana, Cuba

III. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Escuela de Ingeniería Mecánica. Quilpue, Chile

* Autor de correspondencia: parr@ceim.cujae.edu.cu

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



Recibido: 12 de octubre de 2020

Aceptado: 2 de diciembre de 2020

Resumen

Actualmente se incentiva el uso del vehículo eléctrico en el mundo. No obstante, es difícil predecir hasta dónde llegará su adopción debido a que su proliferación depende de la capacidad de la red eléctrica para la recarga. El objetivo de esta investigación fue dimensionar y evaluar el proceso de recarga de una flota de 14 vehículos eléctricos de manera sustentable, mediante energía solar, implementando un sistema fotovoltaico autónomo aislado, con el fin de tributar a un transporte sostenible. Con la metodología energética Modelo de Comportamiento Mensual, utilizada para el dimensionado, se estableció la potencia eléctrica necesaria de 40,0 kW. El sistema fotovoltaico debe generar 140,0 kWh

al día de energía en una región con radiación promedio diaria de 5,0 kWh/m² al día para cumplir con la demanda de la flota. El escenario considerado consiste en que la flota puede ser recargada solo los fines de semana. Para la evaluación energética del comportamiento del sistema se usa el software Modelo de Optimización de sistemas Híbridos Eléctricos Renovables. Como resultado se determinó que el sistema es capaz de suministrar solo el 70 % del total de la energía demandada.

Palabras claves: vehículo eléctrico; sistema fotovoltaico; evaluación energética; HOMER.

Abstract

Nowadays the use of electric vehicles is being diffused worldwide. However, it is difficult to predict to what extent electric vehicles could be spread because its distribution depends on the grid energy availability for the recharge. This work tries about the design and energetic evaluation of an isolated photovoltaic solar system for recharging a fleet of 14 electric vehicles in order to contribute to sustainable transportation. From the energy methodology used for the photovoltaic system sizing, denominated "Monthly behavior method", a 40,0 kW of generated electric power is necessary. The photovoltaic system has to generate 140,0 kWh/day of

energy in a place with 5,0 kWh/m² a day of solar radiance in order to supply the energy needs of the vehicles. In the considered scenario, the EV fleet can only be recharging on weekends. The energetic evaluation of the system behavior has been performed by means of the Hybrid Optimization Model for Electric Renewable software. The results revealed that the system is capable to provide just the 70,0% of the needed energy.

Key words: electric vehicle; photovoltaic system; energetic assessment; HOMER.

Cómo citar este artículo:

Sánchez Torres Y, Sarmiento Sera A, Rodríguez Ramos, et al. Dimensionado de sistema fotovoltaico autónomo para recargar vehículos eléctricos. Ingeniería Mecánica. 2021;24(1):e618. ISSN 1815-5944.

Introducción

La agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible presenta una visión ambiciosa e integra sus dimensiones a escala económica, social y ambiental. Dentro de sus 17 objetivos, se reconocen metas que requieren la implementación de fuentes de energías no contaminantes. La energía es crucial para todos los grandes desafíos y oportunidades a los que hace frente el mundo actualmente; ya sea para los empleos, la seguridad, el transporte o la producción de alimentos [1].

Alcanzar una adecuada integración ambiental de la movilidad en las ciudades es un factor decisivo para lograr una mayor sostenibilidad urbana [2, 3]. En ese sentido el uso de vehículos con combustibles alternativos como el vehículo eléctrico (VE), forma parte de las estrategias de movilidad que algunos países están poniendo en práctica [4-6]. Por su parte en Cuba el sector del transporte automotor consume anualmente 992 mil toneladas de combustible, de ello el 74 % de Diésel y el 26 % gasolina [7]. Siendo, además, uno de los sectores que más contribuye al deterioro de la calidad del aire en las ciudades, con concentraciones de material articulado, Partículas materiales 10 (PM10), SO₂ y NO₂ de 100 µg/m³, 80 µg/m³ y 17 µg/m³ respectivamente [8]. Es por ello que la electrificación de este sector es una alternativa estratégica que contribuye con la seguridad e independencia energética del país al reducir su dependencia del petróleo. Con la introducción paulatina de vehículos eléctricos, se estima que aumente la eficiencia energética y la disponibilidad técnica de los medios de transporte, mejorando la calidad del transporte público de pasajeros y productivo. Se busca, además, una disminución considerable en las emisiones de gases de efecto invernadero, la integración de las Fuentes Renovables de Energía (FRE) y una operación más eficiente del Sistema Electro-energético Nacional (SEN).

Sin embargo, el uso del VE y su potencial desarrollo supone la necesidad del diseño e implementación de una adecuada infraestructura de recarga. La misma presenta especial complejidad en el caso de las flotas, debido a la cantidad de consumidores, las demandas y las necesidades de carga en tiempo y cantidad, la ocupación de los puntos de recarga, las llegadas y salidas de los vehículos, la potencia eléctrica contratada en la instalación, así como la necesidad de un gestor de carga entre otras [9, 10].

Por otra parte, para que el vehículo eléctrico sea en realidad una opción limpia de transportación es necesario que la electricidad para su recarga no haya sido generada a partir de combustibles fósiles, ni fuentes no renovables. Es por ello, que se plantea que, para que el transporte eléctrico sea realmente sustentable, debe ser recargado a partir de fuentes renovables de energía [2, 3].

En la literatura se encuentran varios ejemplos de soluciones sobre la recarga de flotas de VE, así en [11] se ofrece una solución mediante el concepto de aparcamiento y de carga basado en la aceptación mediante el confort, en [12] se propone un estacionamiento inteligente que consiste en un controlador que usa paneles como fuente de energía, para limitar los impactos de los VE en la red de suministro eléctrico y reducir el costo de carga. En [13] los autores consideran un escenario en el que n-vehículos eléctricos deben ser cargados a lo largo de t-unidades de tiempo de forma que se satisfagan restricciones de tipo caducidad. En [14], se propone el algoritmo ODC (*Optimal Decentralized Charging*) o carga descentralizada óptima para resolver el problema de la recarga. En [15] los autores consideran el caso en el que las baterías pueden tomar energía de la red, o bien proporcionar energía a la red cuando están estacionados, lo que se conoce como Vehículo a la red o V2G (*Vehicle to Grid*), donde se propone un algoritmo basado en la metaheurística de Optimización por aglomeración de partículas o PSO (*Particle Swarm Optimization*). En [16] se propone un modelo para una red de carreteras a gran escala en la cual se disponen un conjunto de estaciones de recarga en algunas de las entradas y salidas de dicha red. En [17] se propone un marco de trabajo en el que varios agentes coordinan y controlan las recargas de una serie de vehículos eléctricos y finalmente en [18] se evalúa la capacidad que tiene la energía fotovoltaica para la recarga de flotas de vehículos eléctricos, teniendo en cuenta su naturaleza intermitente. También se han realizado estudios referentes a la alineación y orientación de los paneles fotovoltaicos para generar la mayor cantidad de energía. [19]

Sin embargo, todos los trabajos anteriores tienen en común que los sistemas dan la posibilidad de inyectar corriente a la red o recibirla en caso necesario. Esto se debe principalmente a que las energías renovables son variables en el tiempo. En particular la energía fotovoltaica, la cual depende de las variaciones en la irradiación total en el plano horizontal, así como la temperatura, humedad, velocidad del viento, entre otras. Estas variaciones pueden provocar variaciones en la tensión del punto de conexión con la red y variaciones en la frecuencia del sistema, estos aspectos dependen de factores como: la capacidad de la central fotovoltaica, las características del punto de conexión y/o del sistema de estudio y las características de la zona donde se instalan. Con respecto a estos temas se han llevado a cabo varios estudios a nivel mundial [18-20].

En este sentido, la presente investigación tiene como objetivo principal, dimensionar y evaluar el proceso de recarga de una flota de 14 vehículos eléctricos de manera sustentable, mediante energía solar, implementando un sistema fotovoltaico autónomo aislado, por lo que el sistema debe autoabastecerse y no recibir ni entregar corriente del sistema electro-energético.

Métodos y Materiales

Para dar respuesta a este objetivo se emplea la metodología denominada Modelo de Comportamiento Mensual. Se establece una potencia eléctrica mínima necesaria de 40,0 kW para el sistema fotovoltaico (SFV) que debe generar 140,0 kWh al día de energía para cumplir con la demanda energética de la flota, en una región con radiación diaria promedio de 5,0 kWh/m² al día.

Para el desarrollo del dimensionado del SFV autónomo fueron definidas cuatro tareas específicas:

1. Evaluación de la cantidad de energía semanal demandada por la flota.
2. Determinación del potencial solar presente en el lugar de emplazamiento.
3. Dimensionado del SFV capaz de suministrar la energía semanal demandada por la flota.

4. Simulación del comportamiento del SFV mediante el software HOMER.

1. Evaluación de la cantidad de energía semanal demandada por la flota.

El escenario considerado consiste en que la flota puede ser recargada solo los fines de semana.

El vehículo que compone la flota es el panel modelo Nissan e-NV200, con capacidad para 7 personas, además del chofer, cuenta con una batería de 40,0 kWh de capacidad, sus características se pueden apreciar en la tabla 1:

Tabla 1. Datos técnicos del Nissan e-NV200. Fuente: [21]

Datos técnicos del Nissan e-NV200	
Largo-ancho-altura	4,40-2,01-1,86
Potencia motor / régimen	80 kW / 3000 rpm
Torque máximo / régimen	254 N-m / de 0 a 3000 rpm
Año fabricación	2016
Tipo de batería	iones de litio
Capacidad de la Batería	40 kWh
Autonomía	280 km
Recarga rápida	40 – 60 min
Velocidad máxima	120 km/h
Consumo	0,13 kWh/km

2. Determinación del potencial solar

En este acápite se procede a realizar un estudio general del recurso solar presente en el lugar, para así evaluar el potencial energético del cual apoyarse para la generación eléctrica. El sitio se ubica a 23,0° de latitud Norte y 82,4° de longitud Oeste. Los datos de irradiación solar incidente en el lugar se encuentran disponibles en la web de la NASA: <https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/RETScreen>

3. Dimensionado del SFV

Para el dimensionado del SFV se utiliza el método denominado Modelo de Comportamiento Mensual, en el cual se parte de conocer la energía disponible (Radiación o Irradiación solar en el sitio de aplicación) y la demanda de energía (electricidad necesaria en la aplicación) en los 12 meses del año. Los paneles fotovoltaicos considerados en el presente trabajo son de 300,0 Wp, de silicio policristalino, con una eficiencia de 15,0 % y un voltaje y corriente de potencia máxima de 31,6 V y 9,6 A respectivamente. Las dimensiones de los mismos son de 1956 x 992 mm.

Por su parte el inversor empleado, de 5,0 kW de potencia, trabaja con un rango de voltaje de 180 a 280 V y entrega una corriente de 23,0 A a 230 V.

Para calcular la energía eléctrica entregada por un panel fotovoltaico (E_{e_u}), aplicando el método enunciado anteriormente se tiene en cuenta la radiación solar recibida en el mes de menor radiación solar y se aplica la expresión 1.

$$E_{e_u} = \varepsilon_m \cdot I \cdot A \quad (1)$$

Donde:

E_{e_u} : Energía entregada por un módulo, kWh

ε_m : Eficiencia del módulo FV

I: Irradiación solar, kWh/m² día

A: Área del módulo, m²

4. Simulación del comportamiento del SFV mediante el software HOMER

La simulación es una herramienta eficaz para analizar sistemas cuya complejidad no permite establecer un modelo matemático simple de los mismos. El software HOMER es ampliamente utilizado por la comunidad científica internacional para la simulación de sistemas híbridos de energía renovable debido a su sencilla plataforma, por lo tanto este simulador se ha convertido en una herramienta estándar, siendo un lenguaje común para los desarrolladores de energía fotovoltaica [22, 23, 24].

Resultados y Discusión

1. Evaluación de la cantidad de energía semanal demandada por la flota

Estos vehículos componen una flota de trabajo en la cual los mismos recorren un promedio de 50,0 kilómetros diarios, en labores de mantenimiento de redes hidráulicas, por lo que aproximadamente suman un total de 250,0 kilómetros a la semana. Teniendo en cuenta que su autonomía es de entre 280,0 y 300,0 kilómetros, los mismos pueden trabajar de lunes a viernes sin necesidad de recargar sus baterías, pudiendo recargar los fines de semana.

Actualmente la flota es recargada utilizando la red eléctrica y se desea independizar la recarga utilizando para ello un SFV autónomo. La recarga debe tener lugar los fines de semana, pues durante la semana los vehículos están trabajando por el día. Es por ello que el SFV tiene que abastecer las baterías de los 14 vehículos entre el sábado y el domingo.

Cada vehículo, recorriendo entre 250,0 y 280,0 kilómetros semanales debería consumir entre 32,0 y 36,0 kWh a la semana, pero los mismos cuentan con un sistema de frenado regenerativo que en recorridos urbanos devuelve hasta un 25,0 % de energía a las baterías. Es por ello que el viernes, al terminar la jornada, los mismos cuentan con una energía en las baterías de entre 12,0 y 14,0 kWh. Así el sistema debe recargar los vehículos hasta el 80,0 % de la carga máxima de sus baterías, correspondiente a 32,0 kWh. Así, considerando una carga remanente de 12,0 kWh en cada uno, la energía necesaria es de 20,0 kWh por vehículo, o sea 280,0 kWh a entregar en un fin de semana, por lo que se distribuye en 140,0 kWh el sábado y 140,0 kWh el domingo.

2. Determinación del potencial solar presente en el lugar de emplazamiento

La radiación o irradiación solar promedio presente en la zona para cada mes, en kWh/m² al día, se muestra en la figura 1, con un valor promedio anual de 5,0 kWh/m² al día. [19]

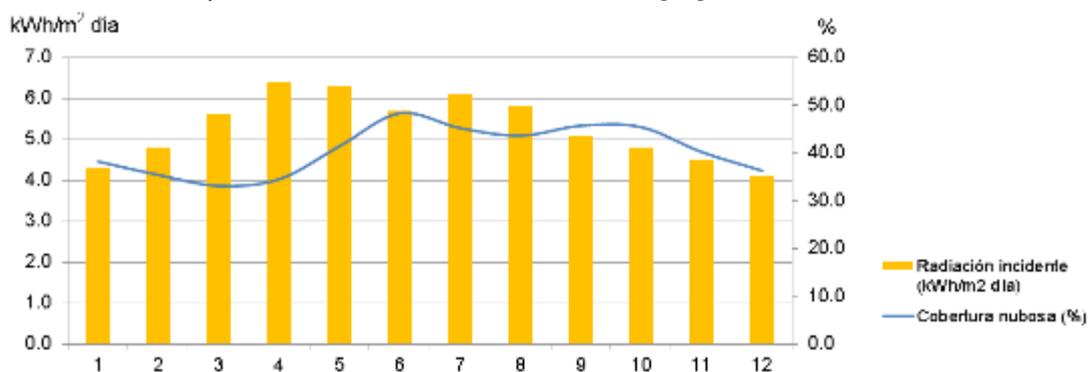


Fig. 1. Radiación solar y cobertura nubosa presente en la zona. Fuente: autores

3. Dimensionado del SFV capaz de suministrar la energía semanal demandada por la flota

Aplicando el método Modelo de Comportamiento Mensual y la expresión 1, se tiene que la energía entregada por un panel (E_{eu}) es de 1,2 kWh/día por módulo.

Luego, la cantidad total necesaria de módulos (N_m) se obtiene con la condición de que la suma de la energía entregada por todos los paneles resulta la energía demandada (E_{ET}), correspondiente a 280,0 kWh en dos días, equivalente a 140,0 kWh/día. Por lo tanto, si se necesita entregar 140,0 kWh/día para la recarga, se necesita un arreglo de 114 paneles fotovoltaicos, los cuales ocupan un área de 221,2 m². Estos 114 módulos entregan una potencia pico de 34,2 kWp.

No obstante, se deben tener en cuenta las pérdidas por temperatura, pérdidas debido a suciedad, pérdidas óhmicas del cableado y el rendimiento del inversor, que van a reflejarse en la eficiencia energética del sistema [19]. La eficiencia del panel ya se tuvo en cuenta anteriormente. Considerando todas las pérdidas se acuerda una potencia necesaria de 40,0 kWp, por lo que el sistema estará compuesto por 133 paneles fotovoltaicos. Los módulos deben estar orientados hacia el sur en el plano horizontal (azimut = 0,0°) y deben tener la inclinación de 15,0° teniendo en cuenta la posición del emplazamiento [19].

Luego de realizado el dimensionado del sistema, compuesto por un arreglo de 133 paneles fotovoltaicos de 300,0 Wp, para una potencia total de 40,0 kWp, se procede a realizar la simulación del mismo.

4. Simulación del comportamiento del SFV mediante el software HOMER.

En primer lugar, se diseña el sistema autónomo, tal como se muestra en la fig. 2.

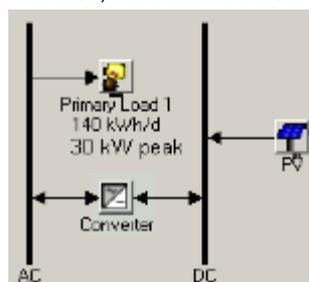


Fig. 2. Diseño del sistema de recarga fotovoltaico. Fuente: autores

Posteriormente el software estima la radiación solar si se le dan los datos de latitud y longitud del lugar del emplazamiento o también da la posibilidad de introducirlos manualmente. Para la simulación se toman los valores de radiación representados en la fig. 2. El arreglo fotovoltaico está compuesto por 133 paneles de 300,0 Wp, para una potencia total de 40,0 kWp.

También son definidos los horarios de demanda eléctrica y su duración. En este caso se desea recargar la flota durante 5,0 horas, de la hora 11 a la 16, dos días consecutivos, con una potencia máxima de 30,0 kW, figura 3. De esta manera la energía diaria generada es de 150,0 kWh, sobrepasando en 10,0 kWh la demanda diaria necesaria de la flota, esto se decide para asumir las pérdidas del sistema de recarga.

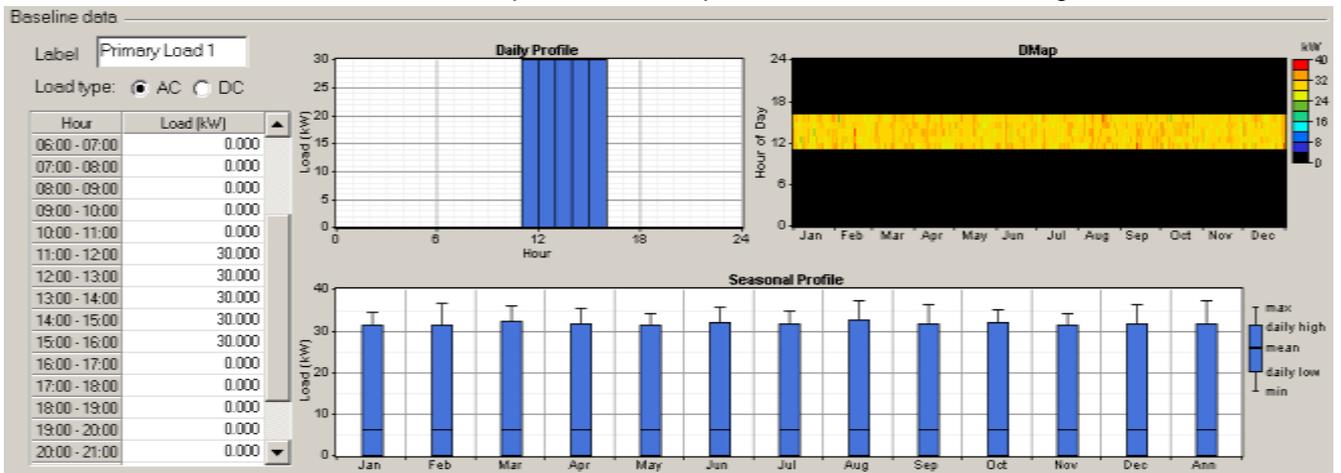


Fig. 3. Demanda eléctrica de la flota. Fuente: autores

Luego, se simula el sistema fotovoltaico de acuerdo a las condiciones de diseño expuestas anteriormente. La figura 4 representa la potencia fotovoltaica generada promedio mensual.

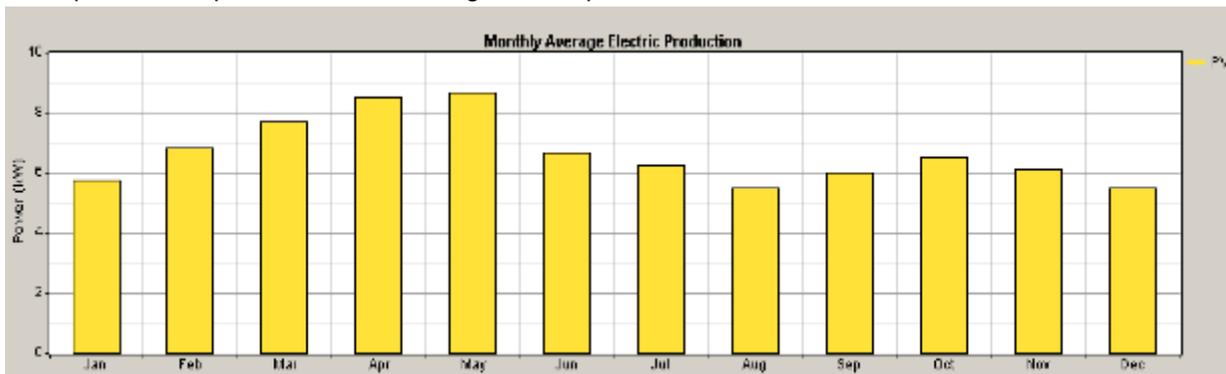


Fig. 4. Potencia fotovoltaica generada promedio mensual. Fuente: autores

La energía obtenida de los módulos fotovoltaicos es de 160,0 kWh/día como promedio. No obstante, a pesar de ser 20,0 kWh mayor que los 140,0 kWh necesarios al día, hay días nublados en el año en los cuales no se llega a ese valor. Esto se evidencia en la figura 5, en la cual, en amarillo se representa la energía diaria generada por los módulos fotovoltaicos durante todo el año y en azul, la demanda de la flota. Puede apreciarse que los paneles nunca producen los 40,0 kW de potencia de diseño, el valor mayor alcanzado es de 38,0 kW en noviembre, señalado mediante el círculo verde. Existen en cambio varios días en el año en los que la potencia de los paneles no llega ni a los 30,0 kW de potencia máxima de recarga establecida. Finalmente resulta que a pesar de que el SFV entrega un exceso de energía anual, correspondiente a 23,6 MWh, no se cumple con la recarga y se tiene un déficit de 5,5 MWh al año.

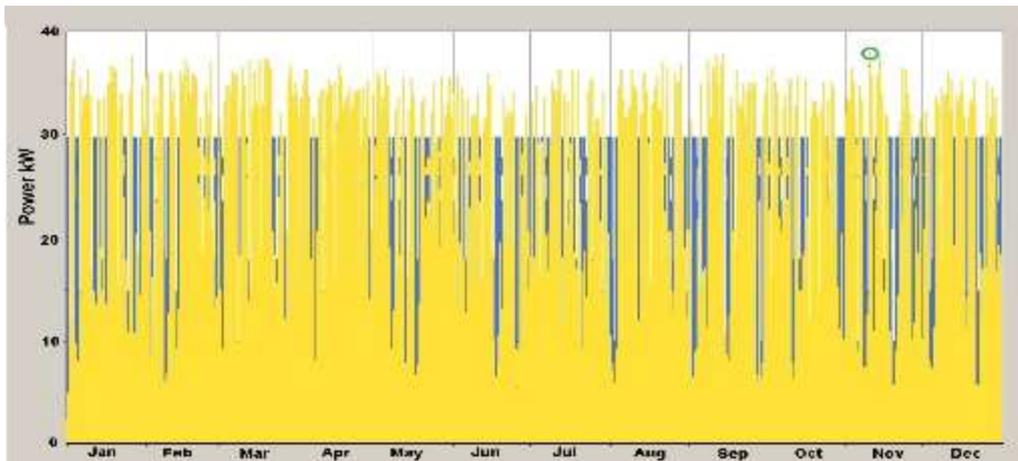


Fig. 5. Comportamiento diario de la potencia entregada por el SFV de 40 kW. Fuente: autores

Lo anterior se puede apreciar con más precisión en la figura 6. En ella, al igual que en la anterior, en amarillo se representa la energía generada por los módulos fotovoltaicos en los días sábado 12 y domingo 13 de septiembre, correspondientes a un fin de semana. En la misma también se representa, en azul, la demanda de la flota. Puede observarse que a pesar de que el sábado 12 se cuenta con una potencia de 36,0 kW y se abastece la demanda, el domingo 13 no se cumple con la misma.

Opción 1, aumentando el número de paneles a instalar

Esta opción no resulta aconsejable, pues haría falta instalar un SFV de más del triple de la potencia de diseño inicial, correspondiente a 40,0 kWp y 133 paneles. Pues con 120,0 kWp y 400 paneles fotovoltaicos, a pesar de que existe un exceso de energía generada en el año de 119,6 MWh, aún no se llega a cubrir el 100,0 % de la demanda, existiendo un déficit de 1,3 MWh al año, áreas de color azul en la figura 7.

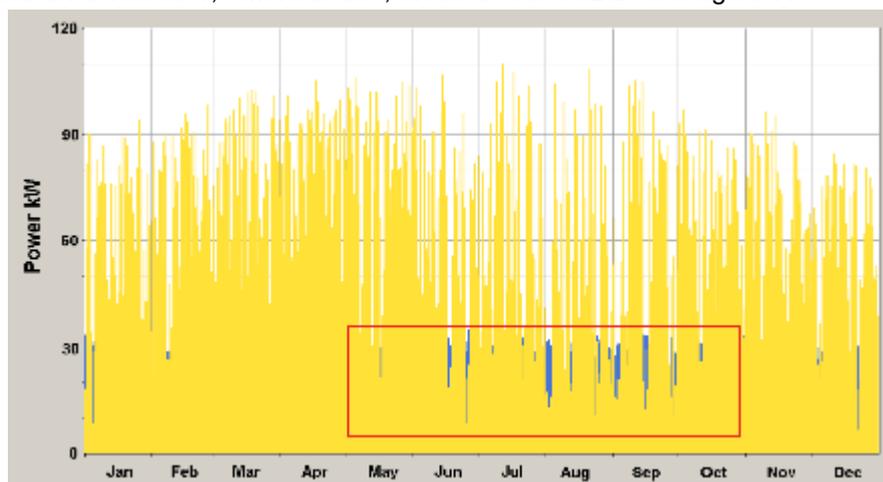


Fig. 7. Comportamiento diario de la potencia entregada por el SFV de 120 kW. Fuente: autores

Opción 2, colocación de baterías para acumular energía

Para esta opción se probó adicionarle al sistema propuesto, de 133 paneles fotovoltaicos y 40,0 kWp, diez (10) baterías Surrrette S4KS25P de 1900,0 Ah y 4,0 V de capacidad y voltaje nominal respectivamente. Con una corriente máxima de descarga de 67,5 A. El esquema de la instalación queda representado en la figura 8.

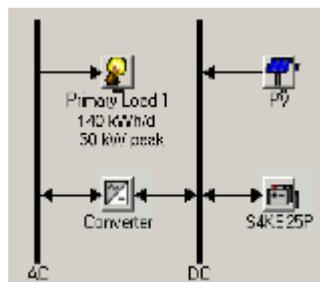


Fig. 8. Diseño del sistema de recarga fotovoltaico con baterías. Fuente: autores

En la figura 9 se muestra el comportamiento anual del sistema. Se comprobó que las 10 baterías suministran el déficit de 5,5 MWh al año de energía del SFV y su descarga nunca sobrepasó el 45,0 %, figura 9.

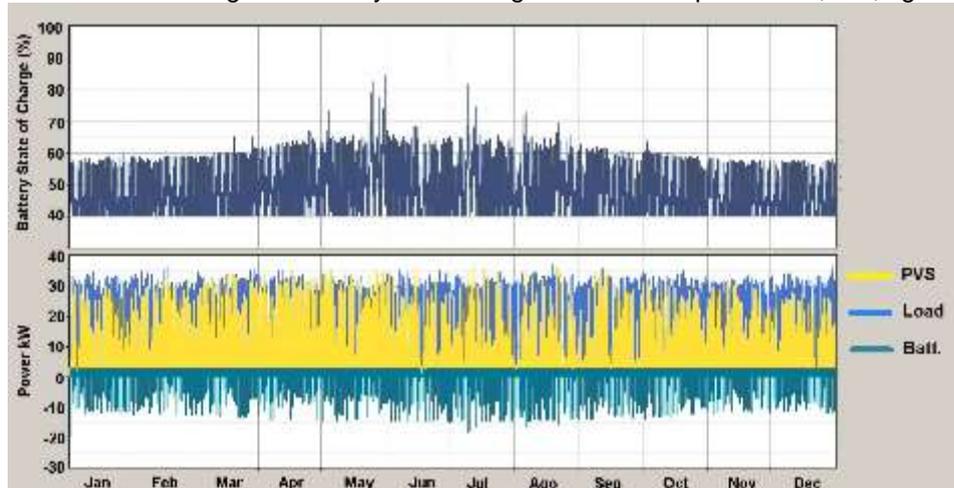


Fig. 9. Comportamiento diario de la potencia entregada por el SFV de 40 kW con baterías. Fuente: autores

Opción 3, acoplar al sistema un generador eléctrico

Instalar un generador eléctrico que emplee gasolina o diésel no es permisible si se desea contar con un sistema de recarga sostenible. La opción de emplear un generador eléctrico solo sería viable si el mismo se acopla a un motor de combustión interna (MCI) que trabaje con un combustible renovable. Un ejemplo pudiera ser que el MCI trabaje con biogás, obtenido a partir de biodigestores y este es un sistema complejo y costoso. [25, 26].

De esta forma, con la configuración de 133 paneles fotovoltaicos, dimensionados a partir de tener en cuenta el mes de menor recurso solar, efectivamente se comprueba que el SFV no es capaz de cumplir con la demanda. Por esta razón, se presentarían 3 situaciones teóricamente factibles durante la simulación anual del SFV autónomo. De las mismas, la primera no fue factible. La segunda cumplió con la demanda pero al implementarla se incurriría en gastos adicionales, al necesitar 10 baterías, su cableado, interruptores, controladores de carga y demás. La tercera, cumpliría con los objetivos del trabajo solo si el MCI emplea combustibles obtenidos a partir de fuentes renovables de energía.

Conclusiones

El empleo del método Modelo de Comportamiento Mensual permitió el dimensionamiento y evaluación de un SFV autónomo para la recarga de una flota de 14 vehículos eléctricos que consumen 140 kWh/día y evidenció la necesidad de contar con un arreglo de 133 paneles fotovoltaicos con una potencia de 40 kWp. A partir de las simulaciones con el software HOMER se demostró que el SFV no pudo abastecer el 30,1 % de la demanda energética impuesta por la flota, ascendente a 5,5 MWh/año de energía. La alternativa más ventajosa para satisfacer la demanda es aprovechar los horarios entre semana para recargar los vehículos. La metodología basada en el Modelo de Comportamiento Mensual presentó una baja certidumbre en la estimación de la demanda real de la flota, por lo que, en concordancia con la bibliografía consultada, se evidencia la importancia del empleo de los softwares de simulación para el dimensionamiento de sistemas que empleen fuentes renovables de energía, debido a la variabilidad de las mismas en el tiempo.

Referencias

- Vazquez L, Majanne Y, Castro M, et al. Energy System Planning towards Renewable Power System: Energy Matrix Change in Cuba by 2030. IFAC-PapersOnLine. 2018;51(28):522-7. DOI 10.1016/j.ifacol.2018.11.756.
- Soria Lara J, Valenzuela Montes L. Dimensiones relevantes para la evaluación ambiental proactiva de la movilidad urbana. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM. 2015;(87):5-24. DOI 10.14350/ig.34416.
- Kougias I, Nikitas A, Thiel C, et al. Clean energy and transport pathways for islands: A stakeholder analysis using Q method. Transportation Research Part D. Transport and Environment. 2020;78:102180. DOI 10.1016/j.trd.2019.11.009.
- Sovacool B, Kester J. Cars and kids: Childhood perceptions of electric vehicles and sustainable transport in Denmark and the Netherlands. Technological Forecasting & Social Change. 2019;(144):182-92. DOI 10.1016/j.techfore.2019.04.006.
- Helen Broadbent G, Metternicht G, Drozdowski D. An Analysis of Consumer Incentives in Support of Electric Vehicle Uptake: An Australian Case Study. World Electric Vehicle Journal. 2019;10(11):1-15. DOI 10.3390/wevj10010011.
- Habich Sobiegalla S, Kostka G, Anzinger N. Citizens' electric vehicle purchase intentions in China: An analysis of microlevel and macro-level factors. Transport Policy. 2019;(79):223-233. DOI 10.1016/j.tranpol.2019.05.008.
- Bolufé Torres J, Carrillo Vitale E. Contaminación atmosférica por material particulado en avenidas de La Habana con alto flujo vehicular. Transporte, Desarrollo y Medio Ambiente. 2018;38(74):10-18.
- Cuesta O, Bolufé Torres J, Gonzalez Y, et al. Contaminación atmosférica por fuentes móviles en la calle Reina, La Habana. Revista Cubana de Meteorología. 2017;23(1):78-88.
- Guo C, Yang J, Yang L. Planning of Electric Vehicle Charging Infrastructure for Urban Areas with Tight Land Supply. Energies. 2018;11(9):23-34. DOI 10.3390/en11092314.
- Zhang Q, Li H, Zhu L, et al. Factors influencing the economics of public charging infrastructures for EV: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018;(94):500-9. DOI 10.1016/j.rser.2018.06.022.
- Tan Ma, Mohamed A, Mohammed, O. Optimal charging of plug-in electric vehicles for a car park infrastructure," In Industry Applications Society Annual Meeting (IAS). Ottawa, Canada: IEEE; 2012 DOI 10.1109/IAS.2012.6374035.
- Chakrabarti A, Proeglhoefer R, Bustos Turu G, et al. Optimisation and analysis of system integration between electric vehicles and UK decentralised energy schemes. Energy. 2019.176(1) p. 805-15. DOI 10.1016/j.energy.2019.03.184.
- Hutson C, Venayagamoorthy G, Corzine K. Intelligent scheduling of hybrid and electric vehicle storage capacity in a parking lot for profit maximization in grid power transactions. In: Energy 2030 Conference, 2008. ENERGY 2008. Ottawa, Canada: IEEE; 2008. DOI 10.1109/ENERGY.2008.4781051.
- Gan L, Topcu U, Low S. Optimal decentralized protocol for electric vehicle charging. In: IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference. Orlando, USA: IEEE; 2011. DOI 10.1109/CDC.2011.6161220.
- Paffumi E, De Gennaro M, Martini G. Innovative technologies for smart cities: towards customer driven infrastructure design for large scale deployment of electric vehicles and Vehicle-to-Grid applications. Transportation Research Procedia. 2016;(14):4505-14. DOI 10.1016/j.trpro.2016.05.373.
- Cheng A, Tarroja B, Shaffer B, et al. Comparing the emissions benefits of centralized vs. decentralized electric vehicle smart charging approaches: A case study of the year 2030 California electric grid. Journal of Power Sources. 2018;(401):175-85. DOI 10.1016/j.jpowsour.2018.08.092.
- Timpner, J, Wolf L. A back-end system for an autonomous parking and charging system for electric vehicles. Electric Vehicle Conference (IEVC). Ottawa, Canada: IEEE International; 2012. DOI 10.1109/IEVC.2012.6183267.
- Hoarua Q, Perez Y. Interactions between electric mobility and photovoltaic generation: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018;(94):510-22. DOI 10.1016/j.rser.2018.06.039.
- Castillo O, Sarmiento A. Influencia combinada del espaciamiento y la inclinación de módulos en generación fotovoltaica. Revista Cubana de Ingeniería. 2017;VIII(2):29-34.

20. Zhen Z, Wang Z, Wang F, et al. Research on a cloud image forecasting approach for solar power forecasting. *Energy Procedia*. 2017;(142):362-68. DOI 10.1016/j.egypro.2017.12.057.
21. Dimatulac T, Maoh H, Khan S, et al. Modeling the demand for electric mobility in the Canadian rental vehicle market. *Transportation Research Part D*. 2018;(65):138-50. DOI 10.1016/j.trd.2018.08.002.
22. Nighoskar A. Cost Analysis of Hybrid System Using HOMER: A Review. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*. 2017;6(3):2116-21. DOI 10.15662/IJAREEIE.2017.0603158.
23. Hegde V, Nagaraja H. Cost Benefit Analysis of Hybrid (Wind/Solar) Power Generation System Using HOMER for Devabag, Karwar. *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 2019;10(5):29-35.
24. Ramdhane I, Ndiaye D, Menou M, et al. Optimization of electrical production of a hybrid system (solar, diesel and storage) pilot using HOMER in Biret, Southern Coast of Mauritania. *International Journal of Physical Sciences*. 2017;12(18):211-23. DOI 10.5897/IJPS2017.4632.
25. Nadaleti WC, Przybyla G. SI engine assessment using biogas, natural gas and syngas with different content of hydrogen for application in Brazilian rice industries: Efficiency and pollutant emissions. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2018;43(21):10141-54. DOI 10.1016/j.ijhydene.2018.04.073.
26. Dobsław D, Engesser KH, Störk H, et al. Low-cost process for emission abatement of biogas internal combustion engines. *Journal of Cleaner Production*. 2019;227:1079-92. DOI 10.1016/j.jclepro.2019.04.258.
- 27.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses

Contribución de los autores

Yamir Sánchez Torres. <https://orcid.org/0000-0003-4321-276X>

Participó en el diseño de la investigación, elaboró el estado del arte y la recolección y el procesamiento de los datos recogidos para el estudio, la determinación de resultados, trabajó en la redacción del borrador, la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.

Antonio Sarmiento Sera. <https://orcid.org/0000-0001-7463-3335>

Participó en el diseño de la investigación. Revisión del estado del arte. Trabajó en la redacción del borrador, la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.

Pedro A. Rodríguez Ramos. <https://orcid.org/0000-0003-2862-0984>

Revisión del estado del arte. Realizó contribuciones en el análisis e interpretación de los datos y en el análisis de los resultados. Trabajó en la redacción del borrador, la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.

Yunesky Masip Macía. <https://orcid.org/0000-0003-4455-1819>

Trabajó en la redacción del borrador, la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.