

SISTEMA DE GESTIÓN DE ENERGÍA DE UNA FUENTE DE ALIMENTACIÓN HÍBRIDA: PANELES FOTOVOLTAICOS-BATERÍAS-RED, PARA UNA APLICACIÓN RESIDENCIAL

Olivares Pérez Ximena¹, Mina Antonio Jesús Darío², Pérez Flores Alejandro Carlos³
Tecnológico Nacional de México / Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
Departamento de Ingeniería Electrónica
Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C.P. 62490. Cuernavaca, Morelos.
Teléfono: 7773627770

m23ce109@cenidet.tecnm.mx¹, jesus.ma@cenidet.tecnm.mx², acperez@cenidet.edu.mx³

RESUMEN

Este artículo presenta el diseño de un sistema de gestión de energía (EMS), para una fuente de alimentación híbrida de un edificio departamental en la localidad de Jojutla, Morelos, con consumo estimado de 20.54 kWh/día. El EMS está basado en una lógica de decisión de 8 modos de operación para decidir automáticamente, los flujos de energía entre los diferentes sub-sistemas, cuidando satisfacer criterios como: el balance entre la generación y la demanda, y los niveles de descarga de las baterías. El objetivo del EMS es reducir el consumo de la red eléctrica o lograr la autosuficiencia energética. El trabajo aborda el dimensionamiento del conjunto de paneles y de baterías, a partir de datos reales de irradiancia y de consumo del lugar; así como el diseño del EMS. El EMS fue probado en el entorno de simulación de MATLAB, en donde los resultados confirman la viabilidad y eficiencia del EMS propuesto.

Palabras Clave: sistema fotovoltaico, sistema de almacenamiento basado en batería, sistema de gestión de energía

ABSTRACT

This paper presents the design of an energy management system (EMS) for a hybrid power supply for a departmental building in the city of Jojutla, Morelos, with an estimated consumption of 20.54 kWh/day. The EMS is based on a decision logic of 8 operation modes to automatically decide the energy flows between the different sub-systems, taking care to satisfy criteria such as: the balance between generation and demand, and battery discharge levels. The objective of the EMS is to reduce the consumption of the electrical grid or to achieve energy self-sufficiency. The work addresses the sizing of the array of panels and batteries, based on real irradiance and site consumption data; as well as the design of the EMS. The EMS was tested in the MATLAB simulation environment, where the results confirm the feasibility and efficiency of the proposed EMS.

Keywords: photovoltaic system, battery energy storage system, energy management system

1. INTRODUCCIÓN

Debido a la creciente demanda energética se presenta un impacto perjudicial al ambiente, ya que al generar energía de manera convencional se hace uso de hidrocarburos, provocando así, daños en el ambiente. Es por ello que se comenzó con una búsqueda de nuevas alternativas más amigables con el ambiente,

dando paso al uso de energías renovables. Sin embargo, este tipo de fuentes renovables presentan una naturaleza estocástica provocando que la cantidad de energía que pueden generar se vea afectada [1], [2], [3].

Por otro lado, los sistemas de almacenamiento en baterías (BESS, por sus siglas en inglés, Battery energy storage system) para conformar sistemas híbridos son utilizados para garantizar un suministro de energía estable y confiable, mitigando la intermitencia y variabilidad inherente a las fuentes renovables [4]. Los sistemas híbridos cuentan con una configuración autónoma y una configuración interconectada a la red, en la cual se permite inyectar o absorber energía de la red.

En este contexto, la implementación de un sistema de gestión de energía (EMS, por sus siglas en inglés, Energy Management System) es crucial para la optimización de los sistemas híbridos ya que coordinan las fuentes de energía en tiempo real [5]. El EMS prioriza el uso de las energías renovables permitiendo tener una mayor independencia de la red, además ayuda a optimizar el flujo de energía del sistema, pues al ser capaz de adaptarse a los diferentes modos de operación variantes de las energías renovables logra mitigar las variaciones de energía y así satisfacer el consumo de demanda energética, a su vez al mantener la operación de la batería segura ayuda a alargar la vida útil de estas [6], [7], [8], [9].

El EMS es utilizado para maximizar la eficiencia de la energía en el sistema durante demandas pico [1], [8] y de esta manera obtener una relación costo-beneficio. En [2] es denominado sistema de gestión de energía de baterías (BEMS, por sus siglas en inglés, Battery Energy Management System) y se encarga de la regulación del voltaje del Bus y el control del estado de carga de la batería (SoC, por sus siglas en inglés, State Of Charge).

El presente trabajo propone un EMS de una fuente de alimentación híbrida como se muestra en la Fig.1, la cual está conformada por un Sistema Fotovoltaico (SFV), un BESS y la red eléctrica. En este sentido, el EMS se encargará de distribuir de manera automática, el flujo de energía entre las diferentes fuentes y las cargas.

Los perfiles de energía entregada por el arreglo de paneles, así como de demanda fueron obtenidos de un muestreo real, tanto de valores de irradiancia como de consumo en una casa típica, en la localidad de Jojutla, Morelos.

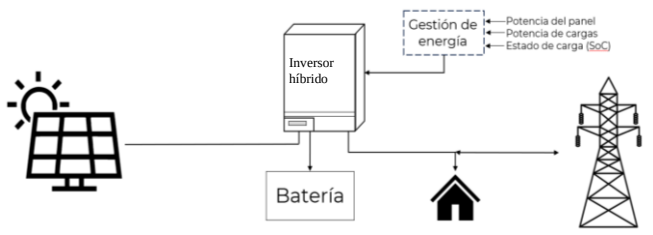


Figura 1. Esquema del sistema de alimentación híbrido con EMS.

El artículo se organiza de la siguiente manera: la sección 1 aborda la introducción, en la sección 2 se presenta el dimensionamiento de la fuente de alimentación híbrida, en donde se aborda el perfil de demanda propuesto, así como el dimensionamiento del conjunto de paneles y de baterías necesario para satisfacer al sistema, la sección 3 aborda el EMS propuesto en este sistema, en la sección 4 se encuentran los resultados de simulaciones y por último en la sección 5 se encuentran las conclusiones de este trabajo.

2. DIMENSIONAMIENTO DE LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN HÍBRIDA

2.1. Caso de estudio-Perfil de demanda

El perfil de demanda propuesto en este trabajo se basa en una aplicación residencial la cual se obtuvo a partir del muestreo de consumo de una casa en la localidad de Jojutla, Mor., durante el mes de septiembre del año 2024. En la Fig. 2 se puede observar la variabilidad de la demanda de energía, correspondiente al muestreo que se hizo para 4 días representativos (20 al 23 de septiembre de 2024). Para el cálculo del conjunto de paneles, se optó por seleccionar el día de mayor consumo (Día 2-21 de septiembre), con un valor de 6.84 kWh/día.

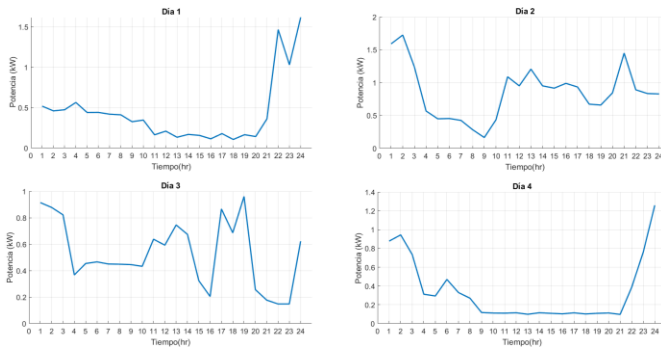


Figura 2. Perfil de demanda de 4 días de muestreo.

Para este trabajo se propone una aplicación residencial de un edificio con tres departamentos, por lo que el perfil de cargas

obtenido del muestreo fue multiplicado por tres para obtener el perfil total de un edificio, resultando así un consumo total de 20.54 kWh/día. En la Tabla 1 se muestra el perfil de cargas seleccionado.

Tabla 1. Perfil de cargas.

Fecha y hora	Consumo individual (kW)	Consumo conjunto de tres casas (kW)
09/21/2024 00:00:00	0.5301	1.5903
09/21/2024 01:00:00	0.5747	1.7241
09/21/2024 02:00:00	0.4127	1.2381
09/21/2024 03:00:00	0.1896	0.5688
09/21/2024 04:00:00	0.1499	0.4497
09/21/2024 05:00:00	0.1514	0.4542
09/21/2024 06:00:00	0.1418	0.4254
09/21/2024 07:00:00	0.0944	0.2832
09/21/2024 08:00:00	0.0549	0.1647
09/21/2024 09:00:00	0.1448	0.4344
09/21/2024 10:00:00	0.3629	1.0887
09/21/2024 11:00:00	0.317	0.951
09/21/2024 12:00:00	0.4018	1.2054
09/21/2024 13:00:00	0.3169	0.9507
09/21/2024 14:00:00	0.3053	0.9159
09/21/2024 15:00:00	0.3297	0.9891
09/21/2024 16:00:00	0.3112	0.9336
09/21/2024 17:00:00	0.2241	0.6723
09/21/2024 18:00:00	0.2197	0.6591
09/21/2024 19:00:00	0.2813	0.8439
09/21/2024 20:00:00	0.4829	1.4487
09/21/2024 21:00:00	0.297	0.891
09/21/2024 22:00:00	0.278	0.834
09/21/2024 23:00:00	0.2761	0.8283

2.2. Dimensionamiento del conjunto de paneles

Una vez definidos los valores de consumo se continuó con el cálculo del número de paneles necesario para satisfacer la demanda, para ello se utilizó la Ec. (1).

$$N_p = \frac{E_t}{HSP(0.9 * P_{max})} \quad (1)$$

En donde N_p es el número de paneles, E_t es la potencia de cargas con una estimación del 75%, HSP es el número de horas solares pico y P_{max} es la potencia máxima del panel seleccionado.

El dimensionamiento del arreglo se comenzó con el cálculo de las horas solares pico (HSP), a partir de información provista por la Nasapower [10], para la zona de Jojutla, en donde la menor

irradiancia es de $5.21 \text{ kW/m}^2/\text{día}$, se asumió un ángulo de inclinación de 40° , como se muestra en la Ec. (2).

$$HSP = \frac{5.21 \text{ kW/m}^2/\text{día}}{1 \text{ kW/m}^2/\text{día}} = 5.21 \text{ h/día} \quad (2)$$

Posteriormente si se dimensiona el consumo con un rendimiento del 75% (E_t) queda de la siguiente manera:

$$E_t = \frac{20.54 \text{ kWh/día}}{0.75} = 27.38 \text{ kWh/día} \quad (3)$$

Para conocer el número de paneles se debe determinar la cantidad de potencia que el panel puede suministrar (P_{max}). Existen diferentes paneles comerciales los cuales especifican la cantidad de potencia que pueden entregar; en este caso se seleccionó un panel que puede entregar una potencia máxima de 420 W (módulo JAM54S30-420/MR de la marca JA Solar®). En la Tabla 2 se muestran los parámetros eléctricos que este puede proporcionar en condiciones donde se presenta una irradiancia de 1000 W/m^2 y una temperatura de 25°C .

Tabla 2. Características eléctricas del modelo de panel JAM54S30-420/MR.

Módulo JAM54S30-420/MR	
Potencia máxima (P_{max})	420 W
Voltaje de circuito abierto (Voc)	37.58 V
Corriente de corto circuito (Isc)	14.10 A
Eficiencia del módulo	21.5%

Sustituyendo el valor de la potencia del panel seleccionado en Ecs. (1-3), se obtiene el número de paneles, lo cual, para este trabajo se conectaron 14 paneles en serie.

$$N_p = \frac{27.38 \text{ kWh/día}}{5.21 (0.9 * 420\text{W})} = 13.88 \rightarrow 14 \text{ paneles}$$

2.3. Dimensionamiento de baterías

Para el análisis del dimensionamiento del BESS se toma en cuenta la diferencia existente entre la potencia de cargas y la potencia que el conjunto de paneles puede entregar cuando este tiene más de la capacidad para satisfacer a la demanda de cargas de manera independiente, para posteriormente, en los momentos que el panel no sea capaz de satisfacer las cargas utilizar esa energía almacenada.

En la Fig. 3 se puede observar el área utilizada para la carga de las baterías resaltado en color verde y las áreas de descarga de baterías resaltado en color rojo, que es donde se plantea utilizar la energía almacenada.

Cabe mencionar que la obtención de la curva de potencia fotovoltaica, se obtuvo a partir de un modelo parametrizado, con la información proporcionada en la Tabla 2, el cual se implementó en Simulink-Matlab; con los datos de irradiancia en la zona de interés, en el día 21 de septiembre de 2024, tomados de Nasapower [10]. Este procedimiento es muy útil, porque a través del mismo, es posible obtener nuevas curvas de potencia, con el mismo modelo de panel, a partir de nuevos datos de irradiancia. En donde además se asume que el SFV opera en los puntos de máxima potencia.

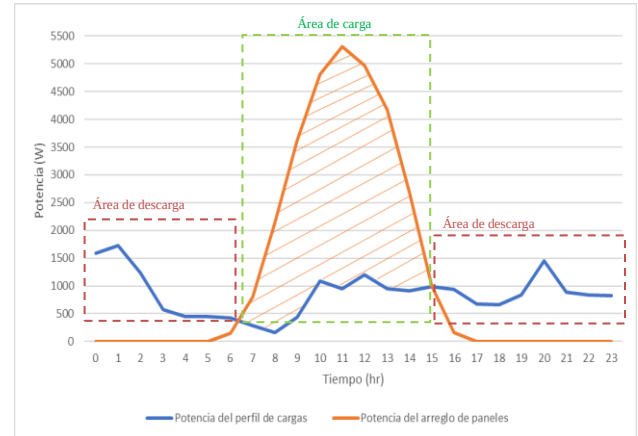


Figura 3. Consumo de cargas y potencia entregada por el arreglo de paneles.

La capacidad requerida de la batería, C , se obtiene en la Ec. (6), en donde la energía excedente es la diferencia de potencias, área sombreada en la Fig. 3.

$$C = \frac{E_e}{V_{Bat} * DoD} \quad (6)$$

Donde E_e es la energía excedente, DoD es la profundidad de descarga de la batería y V_{Bat} es el voltaje de la batería.

De acuerdo con [11] para determinar la tensión para el almacenamiento de energía se recomienda que para cargas mayores a los 5 kW se utilice una batería igual o mayor a 48V. Para el análisis de este sistema se asume el uso de un inversor híbrido modelo invt XD5-12KTR que enlace a todo el sistema, por lo que, para mantener una adecuada proporción con los valores de enlace del inversor híbrido se plantea el uso de 6 baterías en serie para obtener un voltaje total de 288V. Sustituyendo los valores de la Ec. (6) resulta en una batería con una capacidad de 69.94Ah.

$$C = \frac{14.101 \text{ kWh}}{288\text{V} * 0.7} = 69.94 \text{ Ah}$$

Teniendo estos valores definidos se buscó una batería que presentara las características especificadas, siendo así que se seleccionó una batería con los siguientes parámetros eléctricos.

Tabla 3. Parámetros de la batería.

Parámetros batería	
Voltaje nominal	48 V
Capacidad	69.95 Ah

3. SISTEMA DE GESTIÓN DE ENERGÍA

El EMS utilizado en este trabajo se basa en una lógica de decisión, la cual decide los diferentes modos de operación del sistema según las mediciones de las potencias del panel y la demanda de energía, así como el SOC de las baterías. Decide si se proporciona energía a la carga desde el panel fotovoltaico, las baterías o si es necesario tomar energía de la red. En la Fig. 4 se muestra el diagrama de flujo del funcionamiento del EMS.

De igual modo, el EMS cuenta con restricciones del SoC para prevenir sobrecargas y descargas profundas y de este modo aumentar la vida útil de las baterías. En este trabajo se propone los límites de SoC entre 0.3-1, que corresponden a 30%-100% de carga.

Los diferentes modos de operación del EMS son:

Modo 1: la potencia del arreglo de paneles es igual al de las cargas, entonces se suministra energía a la carga directamente con el panel.

Modo 2: la potencia del panel es mayor al de las cargas y las baterías se encuentran descargadas, entonces los paneles suministran energía a las cargas y cargan a las baterías.

Modo 3: la potencia del panel es mayor al de las cargas y las baterías se encuentran cargadas, entonces el excedente de energía de los paneles, se inyecta a la red.

Modo 4: la potencia del panel es igual a cero, las baterías están cargadas y su potencia es mayor al de las cargas, entonces se suministra energía a las cargas con las baterías.

Modo 5: la potencia del panel es igual a cero, las baterías están cargadas, pero la potencia de las cargas es mayor al de las baterías, las baterías se apoyan de la red para satisfacer a las cargas.

Modo 6: la potencia del panel es igual a cero y las baterías no están cargadas, entonces se suministra energía con la red.

Modo 7: la potencia del panel no es igual a cero y las baterías se encuentran cargadas, entonces se suministra energía a las cargas con las baterías y panel.

Modo 8: la potencia del panel no es igual a cero y las baterías se encuentran descargadas, entonces se suministra energía con la red y el panel.

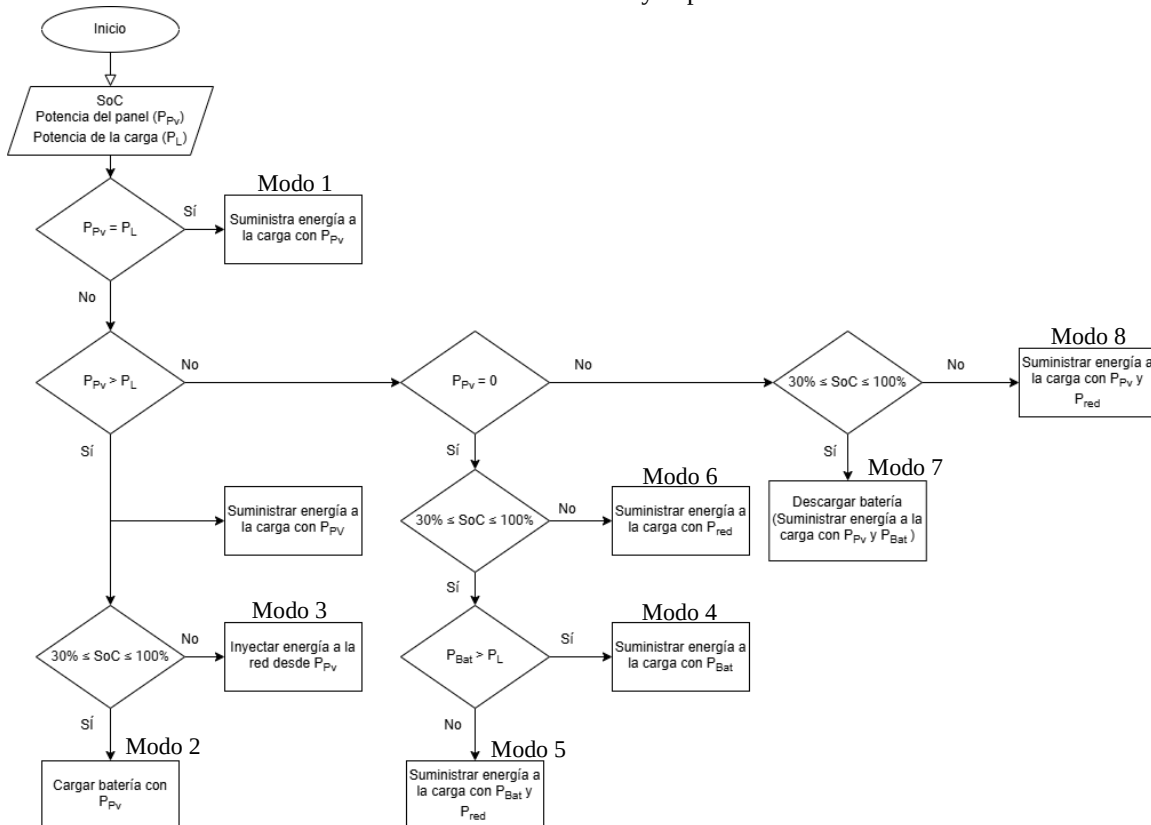


Figura 4. Diagrama de flujo del sistema de gestión de energía propuesto.

4. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Las pruebas del algoritmo EMS se realizaron en el entorno de simulación de MATLAB® en donde se programó el algoritmo EMS mostrado en la Fig. 4 y se utilizaron los perfiles de cargas y potencia del arreglo de paneles obtenidos. Se realizaron dos pruebas para comprobar su funcionamiento.

Prueba 1: El la Fig. 5 y la Fig. 6 se observan los resultados obtenidos de la primera simulación, en la cual se tomó como referencia el día de mayor consumo registrado en el perfil de cargas, y la generación de energía del panel obtenida de ese mismo día. Se cuenta con un estado de carga inicial del 40%. Durante las primeras siete horas, P_{pv} es cero y las baterías no se encuentran cargadas (Modo 6). Conforme avanzan las horas y comienzan a cargarse las baterías (Modo 2), cuando las baterías están totalmente cargadas y P_{pv} es mayor a P_L , P_G se vuelve negativa (inyección de energía – Modo 3). Existe un corto periodo de tiempo durante la hora 16 en el que la potencia del panel es igual a la potencia de cargas (Modo1) para posteriormente terminar suministrando energía a las cargas desde la batería (Modo 4), consiguiendo así una mayor independencia de la red.

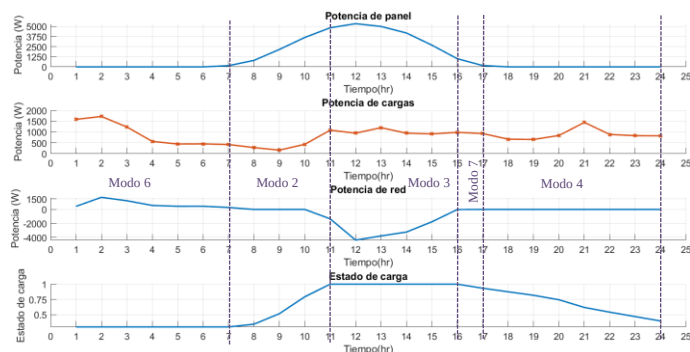


Figura 5. Resultados de la prueba 1 del EMS de un día, perfiles de potencia del panel, potencia de cargas, potencia de red y estado de carga.

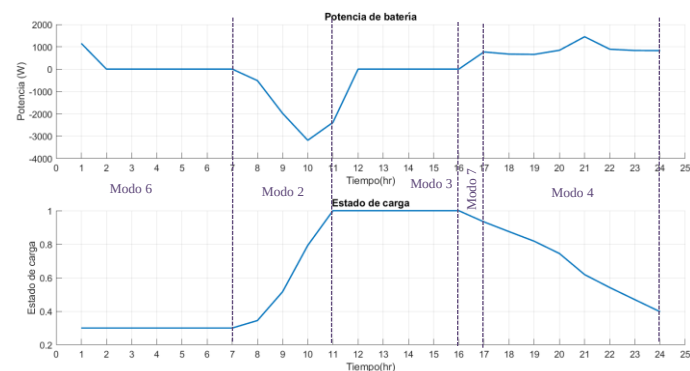


Figura 6. Resultados de la prueba 1 del EMS de un día, potencia de baterías y estado de carga.

Prueba2: El la Fig. 7 y la Fig. 8 se observan los resultados obtenidos de la segunda simulación, en la cual se utilizaron cuatro días del perfil de la potencia de panel y la potencia de cargas. En las primeras horas de simulación se tiene un P_{pv} de 0 y un SoC del 30% por lo que se suministra energía a P_L desde la red (Modo 6). Conforme se llega a las primeras doce horas de simulación se satisface a las cargas con la potencia del panel ya que se tiene un P_{pv} mayor a P_L y la energía sobrante comienza a cargar la batería (Modo 2). Una vez la batería está totalmente cargada y P_{pv} sigue siendo mayor a P_L , P_G se vuelve negativa (se inyecta energía a la red – Modo 3). Antes de llegar a las 72 horas de la simulación (cuarto día de simulación) se puede ver una mayor independencia de la red, entrando únicamente en los Modos 2,3,4 y 7.

Los cambios de signos en P_{Bat} y P_G pueden verse en las siguientes horas de simulación dependiendo la potencia que se tenga de P_{pv} y de P_L .

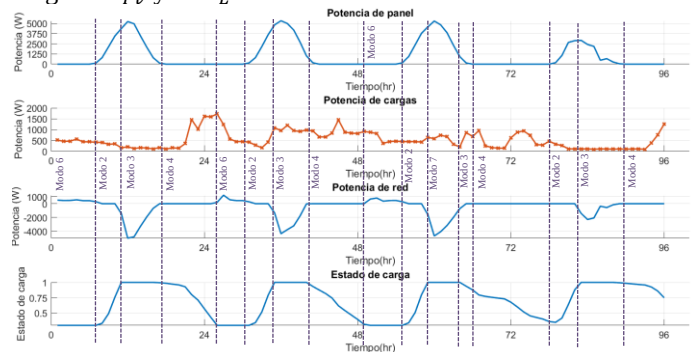


Figura 7. Resultados de la prueba 2 del EMS de cuatro días, perfiles de potencia del panel, potencia de cargas, potencia de red y estado de carga.

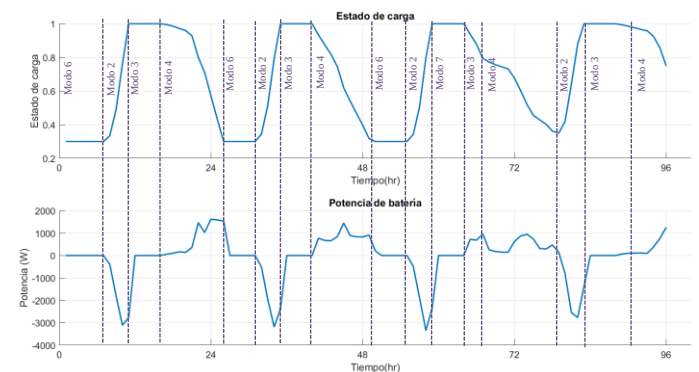


Figura 8. Resultados de la prueba 2 del EMS de cuatro días, potencia de baterías y estado de carga.

La energía requerida P_G durante la primera simulación fue de 5150.91 W la cual se contrasta con la energía inyectada que es de 14471.48 W, mientras que en la segunda simulación la P_G absorbida fue de 9435.68W la cual se contrasto con P_G inyectada de 54683.68W. Durante la primera simulación el sistema trabajo un 70% independiente de la red, en cuanto a la segunda

simulación el sistema trabajo en 80.20% independiente a la red, consiguiendo así, en ambos casos, una mayor independencia de la misma. A su vez en ambas simulaciones el SoC se mantuvo dentro de sus parámetros establecidos para prevenir descargas profundas de las baterías, así como de sobrecargas.

5. CONCLUSIONES

Las pruebas realizadas muestran los diferentes tipos de operación planteados en el EMS propuesto de acuerdo a los valores de los perfiles de potencia del arreglo de paneles, así como el de cargas. Esto permite concluir que la dependencia de la red puede variar por diferentes aspectos, siendo el estado de carga inicial uno de los más notorios percibidos en las gráficas obtenidas de los perfiles de potencia del sistema. Como se observó, al inicio de las simulaciones al contar con un estado de carga inicial del 30%-40% y al tener P_{pv} igual a cero se tenía una mayor dependencia de la red para poder suministrar a las cargas. Sin embargo, al momento en que se gestionaba la energía en el sistema se hacía más notoria la independencia a la red logrando a llegar a un 70-80% de operación independiente a la red.

A su vez P_L es un factor que afectaba a la carga y descarga de las baterías, en este trabajo al tomar el día de mayor demanda para el dimensionamiento del arreglo de paneles y de baterías no se tuvo mayor complicación para poder satisfacer la demanda de cargas con las baterías. El EMS trabajó de una manera efectiva, adaptándose a los diferentes escenarios presentados en este trabajo adecuando de manera automática los diferentes modos de operación para controlar quién sería el encargado para suministrar energía a las cargas, además de que, con las restricciones planteadas en SoC (30% mínimo y 100% máximo) se evitaron sobrecargas y descargas profundas en las baterías.

6. REFERENCIAS

- [1] H. M. M. Aflal, W. E. P. S. Ediriweera, and H. I. D. Pubudunee, "Energy Management System for Solar PV System to Reduce Peak Demand," in *EECon 2024 - Proceedings of the 2024 4th International Conference on Electrical Engineering*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2024, pp. 49–53. doi: 10.1109/EECon64470.2024.10841875.
- [2] K. N. C. Jayasena, D. K. J. S. Jayamaha, N. W. A. Lidula, and A. D. Rajapakse, *SoC Based Multi-Mode Battery Energy Management System for DC Microgrids*. IEEE, 2019.
- [3] S. Deshmukh, S. Limkar, R. Nagthane, V. N. Pande, and A. V. Tare, "Design of Grid-Connected Solar PV System Integrated with Battery Energy Storage System," in *2023 3rd Asian Conference on Innovation in Technology, ASIANCON 2023*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023. doi: 10.1109/ASIANCON58793.2023.10269854.
- [4] G. Priya, R. Rohan, and D. K. Tanti, "Energy Management Systems In Hybrid Renewable Energy Sources," in *2024 2nd International Conference on Advancements and Key Challenges in Green Energy and Computing, AKGEC 2024*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2024. doi: 10.1109/AKGEC62572.2024.10869209.
- [5] B. Çakan and İ. Pehlivan, "Energy and Power Management System Design for Hotel Loads on Ships Using Renewable Energy and Biofuel-Based Fuel Cell Systems," in *2025 7th Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM)*, IEEE, Jun. 2025, pp. 442–447. doi: 10.1109/GPECOM65896.2025.11061988.
- [6] A. O. Ali, A. M. Hamed, M. M. Abdelsalam, M. N. Sabry, and M. R. Elmarghany, "Energy management of photovoltaic-battery system connected with the grid," *J Energy Storage*, vol. 55, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.est.2022.105865.
- [7] A. Chakir et al., "Optimal energy management for a grid connected PV-battery system," in *Energy Reports*, Elsevier Ltd, Feb. 2020, pp. 218–231. doi: 10.1016/j.egy.2019.10.040.
- [8] M. Argyrou, C. Spanias, C. Marouchos, S. Kalogirou, and P. Christodoulide, *Energy management and modeling of a grid-connected BIPV system with battery energy storage*. IEEE, 2019.
- [9] M. Yekini Suberu, M. Wazir Mustafa, and N. Bashir, "Energy storage systems for renewable energy power sector integration and mitigation of intermittency," 2014, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.rser.2014.04.009.
- [10] "NASA POWER | Data Access Viewer (DAV)." Accessed: Jul. 17, 2025. [Online]. Available: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- [11] Pacific Power Association (PPA) and Sustainable Energy Industry Association of the Pacific Islands (SEIPI), "GRID CONNECTED PV SYSTEMS WITH BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEMS DESIGN GUIDELINES," 2020. Accessed: Jul. 01, 2025. [Online]. Available: <https://www.seiapi.com/wp-content/uploads/2022/02/Grid-Connected-PV-Systems-with-Battery-Energy-Storage-Systems-Design-Guideline-V1-July-2020.pdf>