

## Simulación de un sistema de almacenamiento híbrido batería – supercondensadores aplicados en un sistema fotovoltaico

Simulation of a hybrid battery-supercapacitors storage system applied in a photovoltaic system

Simulação de um sistema de armazenamento híbrido bateria-supercapacitores aplicado em um sistema fotovoltaico

**Carlos Andrés Loor Vélez**

cloor0957@utm.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-1022-4473>

Instituto de Posgrado, Maestría en Electricidad Mención Sistemas Eléctricos de Potencia en la Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador

**Mauro Enrique Loor Cevallos**

mauro.loor@utm.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-1241-6401>

Docente del Departamento de Eléctrica de la Facultad de Ciencias Matemáticas, Físicas y Químicas de la Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador

### RESUMEN

Debido a las limitaciones que presentan las baterías y los supercondensadores es necesario la hibridación de batería y supercondensadores y aprovechar las ventajas que presentan de forma independiente, las baterías tienen una alta relación de almacenamiento de energía y por otro lado los supercondensadores pueden proporcionar altos niveles de potencia. En esta investigación se desarrolló una simulación en el software Matlab/Simulink un sistema fotovoltaico de 8 paneles solares en serie, con un sistema de almacenamiento híbrido que contaba con 18 supercondensadores en serie con un voltaje de 300V y una capacitancia de 995F y 1 batería con un voltaje nominal de 240V, evaluando, el voltaje de funcionamiento de la matriz fotovoltaica se obtuvo con el algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT). Se demostró que la hibridación presentó mejoras en el sistema de almacenamiento, el supercondensador actúa como amortiguador logrando extender la vida útil de la batería.

**Palabras claves:** Energía fotovoltaica, Supercondensadores, Sistema híbrido de almacenamiento de energía, Eficiencia energética.

### ABSTRACT

Due to the limitations presented by batteries and supercapacitors, it is necessary to hybridize batteries and supercapacitors and take of the advantages that they present independently, batteries have a high energy storage ratio and, on the other hand, supercapacitors can provide high levels of energy. power. In this investigation, a simulation was demonstrated in the Matlab/Simulink software of a photovoltaic system of 8 solar panels in series, with a hybrid storage system that had 18 supercapacitors in series with a voltage of 300V and a capacitance of 995F and 1 battery with a nominal voltage of 240V, evaluating, the operating voltage of the photovoltaic array was obtained with the maximum power point tracking (MPPT) algorithm. It is highlighted that the hybridization presented improvements in the storage system, the supercapacitor acts as a buffer, managing to extend the useful life of the battery.

**Keywords:** Photovoltaic energy, Supercapacitors, Hybrid energy storage system, Energy efficiency.

### RESUMO

Devido às limitações apresentadas por baterias e supercapacitores, é necessário hibridizar baterias e supercapacitores e aproveitar as vantagens que apresentam de forma independente, as baterias possuem uma alta taxa de armazenamento de energia e, por outro lado, os supercapacitores podem fornecer altos níveis de energia. potência. Nesta pesquisa, foi desenvolvida uma simulação no software Matlab/Simulink de um sistema fotovoltaico com 8 painéis solares em série, com um sistema de armazenamento híbrido que possuía 18 supercapacitores em série com tensão de 300V e capacitância de 995F e 1 bateria com uma tensão nominal de 240V, avaliando a tensão de operação da matriz fotovoltaica foi obtida com o algoritmo de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT). Foi demonstrado que a hibridização apresentou melhorias no sistema de armazenamento, o supercapacitor atua como um buffer, conseguindo prolongar a vida útil da bateria.

**Palavras-chave:** Energia fotovoltaica, Supercapacitores, Sistema híbrido de armazenamento de energia, Eficiência energética.

## INTRODUCCIÓN

Las fuentes de energía no renovable ocupan la mayor parte de la demanda energética del mundo. Los combustibles fósiles como el petróleo, carbón y gas natural han dominado el mercado de energía (Mikati et al., 2012). En consecuencia, su uso desmedido y, siendo este un recurso finito los combustibles fósiles están disminuyendo, pero su demanda sigue aumentando cada vez más (Joshi et al., 2009a). Bajo este contexto es necesario explorar de manera urgente nuevas fuentes de energía renovables, las cuales tienen numerosas ventajas, entre ellas su fácil obtención y que no causan contaminación (Hepbasli, 2008). Entre las nuevas fuentes exploradas, la energía solar ha sido objeto de estudio durante las últimas décadas debido a las ventajas que presenta por ser abundante, pura y libre (Zhang et al., 2022). Pero los sistemas de energía fotovoltaica también presentan desafíos importantes al sistema de suministro, una de las características es que la fuente presenta variabilidad incontrolable, no es posible garantizar las condiciones ambientales con antelación (Joshi et al., 2009b)(Saitoh et al., 2003). La solución a esta problemática es almacenar energía durante épocas de excesiva generación de potencia y utilizarla cuando la generación de potencia sea insuficiente (Zhang et al., 2022).

El almacenamiento de energía comúnmente aplicado en los sistemas fotovoltaicos autónomos son las baterías de plomo ácido o las baterías de ion litio (Cabrane et al., 2016). Las baterías poseen alta densidad de energía, pero su tasa de carga/descarga es limitada debido a su baja densidad de potencia, debido a estas limitaciones sufren degradación en su capacidad y se reduce considerablemente la vida útil si se utilizan en condiciones de alta densidad de potencia (Amin et al., 2014). Una alternativa a los elementos de almacenamiento de energía comunes como las baterías de plomo-ácido o de Ion-Litio, están los supercondensadores o condensadores de doble capa, los cuáles poseen una alta densidad de potencia, presenta cortos tiempos de carga y descarga, además de tener una vida útil 10 veces mayor a la que poseen las baterías de ion-litio (Cabrane et al., 2014). Sin embargo, ofrecen una relación mucho más baja de almacenamiento de energía que una batería, y su densidad de energía es baja (Cabrane et al., 2014)(Song et al., 2018).

La hibridación de batería de iones de litio con supercondensadores ofrece las ventajas de ambos dispositivos, mitigando los efectos negativos que presentan individualmente estos dispositivos de almacenamiento de los cambios rápidos o los altos niveles de carga y/o descarga de las aplicaciones de alta densidad de potencia (Rekioua et al., 2014). Se ha demostrado que esta combinación presenta menores costos, aumento general en la duración y eficiencia general del sistema (Zhao et al., 2015). El objetivo de este estudio es disminuir las desventajas que presentan la batería de ion litio y los

supercondensadores de manera independiente mediante la hibridación aplicados a un sistema fotovoltaico.

## METODOLOGÍA

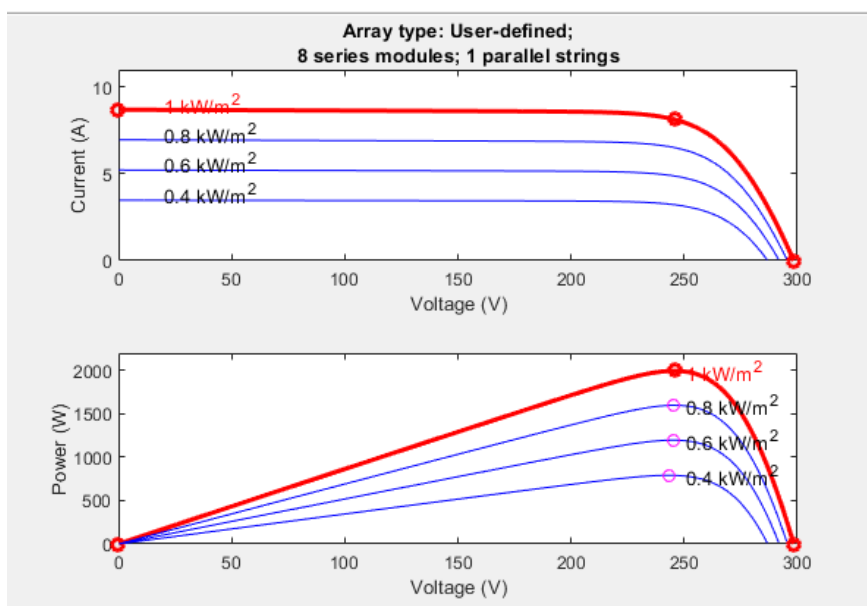
Se realizó una simulación de un sistema fotovoltaico con un sistema híbrido de almacenamiento de energía con baterías de ion-litio y supercondensadores.

La simulación fue realizada con el software Matlab/Simulink.

### Condiciones para la simulación en Matlab/Simulink.

La simulación contó con 8 paneles en serie de 250W, con un voltaje de circuito abierto de 37,3 V y la corriente de cortocircuito es de 8.66 A. El voltaje y la corriente en el punto máximo de potencia es 30,7V y 8,15 A respectivamente. Para identificar el punto de operación de máxima potencia se implementa el algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) (Chen et al., 2006).

La potencia de operación máxima para esta simulación se obtuvo para el sistema fotovoltaico de 8 paneles con un total de 2000 W de potencia, en la Figura 1 se muestran las características de corriente contra voltaje (característica IV) y potencia de corriente contra voltaje (PPV).



*Figura 1. Características IV y PPV de la matriz fotovoltaica a diferentes niveles de radiación solar.*

El sistema de almacenamiento está conectado a un BUS de corriente continua, el voltaje del BUS de CC mantendrá un voltaje de 400V. Con una corriente continua de alrededor de 1000W.

Los parámetros del supercondensador y la batería de ion litio utilizadas en la simulación se presentan en la Tabla 1 y Tabla 2 respectivamente.

*Tabla 1. Parámetros del supercondensador.*

Parámetro	Valor
Voltaje	300 V
Capacitancia	995 F
Nº de supercapacitores en serie	18
Nº de supercapacitores en paralelo	1

*Tabla 2. Parámetros de la batería.*

Parámetro	Valor
Voltaje nominal del banco	240 V
Estado inicial de carga	50 %
Capacidad Nominal	48 Ah
Tiempo de respuesta de las baterías	0.0001 s

### **Configuración de la matriz fotovoltaica.**

El sistema fotovoltaico produce una energía variable, influenciada por las condiciones de temperatura de la celda y por el cambio de la irradiancia solar. El sistema fotovoltaico está conectado a un BUS de corriente continua a través de un convertidor elevador. Este convertidor elevador se controla mediante el algoritmo MPPT permitiendo identificar el punto de operación de máxima potencia aplicándole conductancia incremental. Esta conductancia incremental recibe dos entradas, una es el voltaje fotovoltaico y otro es la corriente fotovoltaica. Se configura la matriz fotovoltaica para operar al voltaje de funcionamiento obtenido con el algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT).

### **Configuración del sistema de almacenamiento de energía de baterías híbridas/supercondensadores**

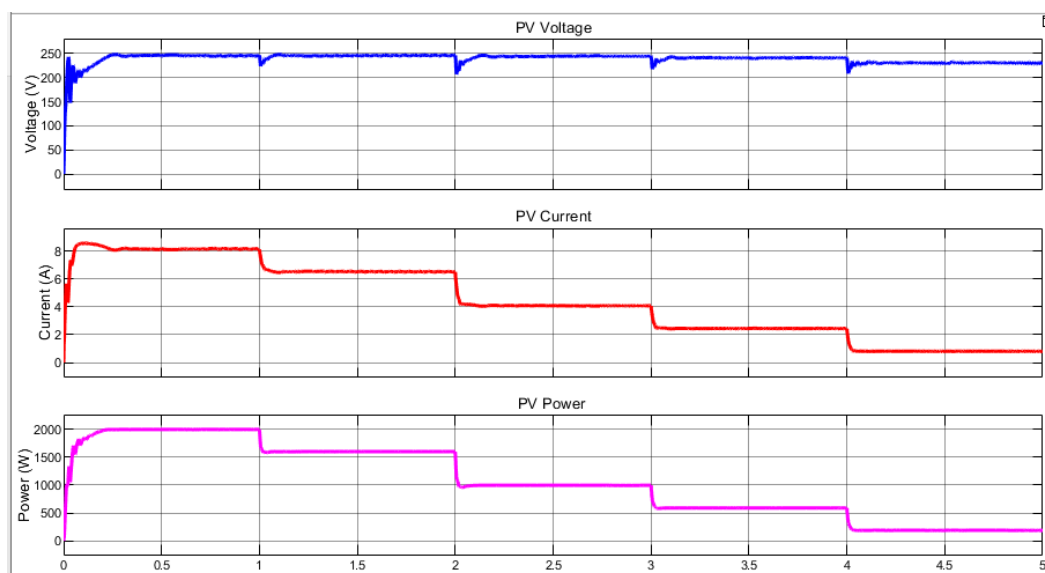
Hay varios tipos de sistema de almacenamiento de energía híbrido batería-supercondensador (BS-HESS), la configuración más común aplicada es la híbrida paralela pasiva básica por las ventajas que presenta (Song et al., 2018). Las ventajas son simplicidad, alta confiabilidad, bajo costo por no tener

circuitos de control, como consecuencia el flujo de potencia del sistema de almacenamiento de energía híbrido batería supercondensador es incontrolable (Chong et al., 2017). La configuración aplicada para la simulación en este estudio es la semi activa. La configuración semi activa mejora el rendimiento de la configuración pasiva básica, agregando un convertidor bidireccional DC-DC, eliminando las desventajas presentadas por la configuración pasiva básica, controlando el reparto de energía entre la batería y los supercondensadores y el voltaje del BUS de corriente continua.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al realizar la simulación cuando solo existe el sistema de almacenamiento con batería de ion litio, en la Figura 2a se aprecia una perturbación al arrancar. Se estabiliza en pocos milisegundos con un voltaje de 250 V, el cual a través del tiempo sufre pequeñas caídas causadas por los cambios de irradiancia debido a la naturaleza de la fuente.

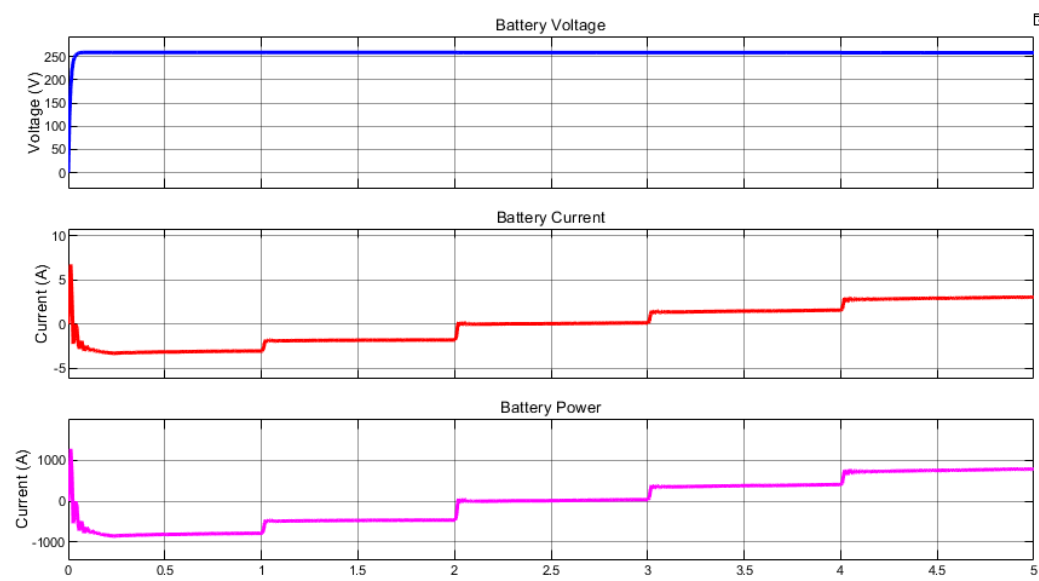
En la Figura 2b, se aprecia cambios en la corriente superando inicialmente los 8 amperios reduciéndose gradualmente; en la Figura 2c se aprecia un fenómeno similar con la curva de potencia con un valor de 2000W. Esto causado por la disminución de la irradiancia a la matriz fotovoltaica.



**Figura 2.** Perfil de carga para la matriz fotovoltaica. a) Respuesta de voltaje b) Respuesta de corriente c) Respuesta de potencia, simuladas para baterías de ion litio.

Si analizamos las curvas de la batería, podemos observar que la curva de la batería es constante en el tiempo, siempre se mantiene en 250 V.

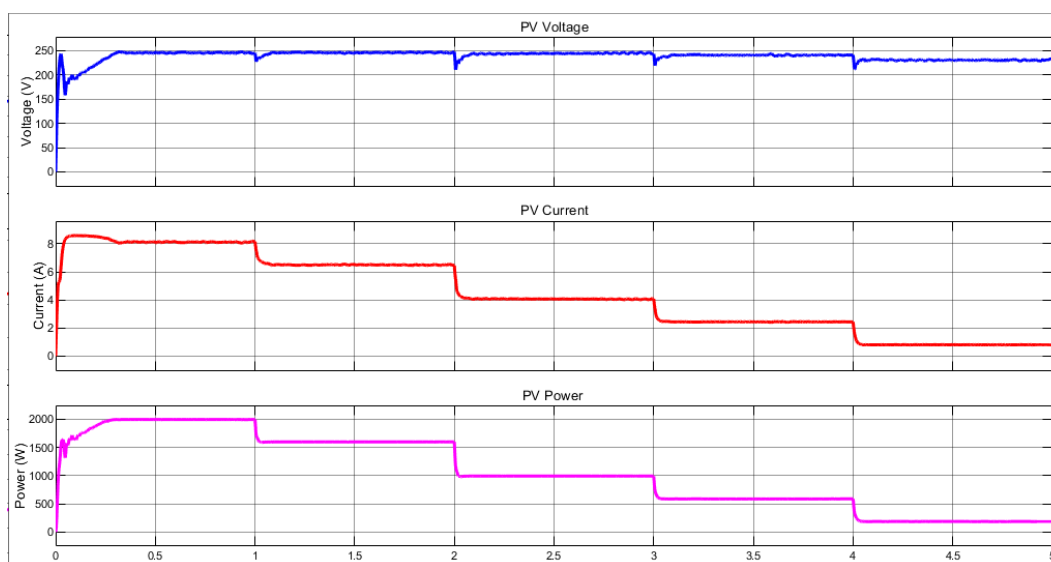
El voltaje en las baterías se mantiene constante en el tiempo con un valor de 250 V. La Figura 3b nos representa la corriente de la batería obtenida por la simulación, durante el periodo de encendido de la potencia de carga se muestra un amperaje negativo indicando que se encuentra en el modo de carga y que toda la demanda del sistema es suministrada por el sistema fotovoltaico, con la corriente aumentando gradualmente en el tiempo, al mismo tiempo que la irradiación baja, como resultado la batería empieza a descargarse, supliendo la demanda del sistema. Este fenómeno se repite con la potencia de la batería que puede ser observado en la Figura 3c.



**Figura 3.** Respuesta de la batería para el perfil de carga. a) Respuesta de Voltaje. b) Respuesta de Corriente. c) Respuesta de Potencia.

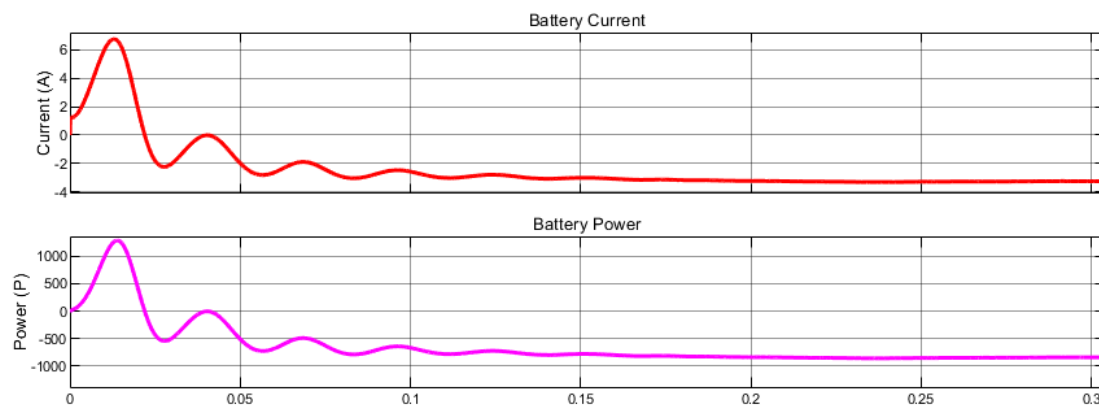
Cuando se corre la simulación conectando el SC a la matriz fotovoltaica (Figura 4), presenta similitudes a las curvas del sistema fotovoltaico sin SC, sin embargo, existen diferencias en la perturbación generada durante el arranque del sistema.

Se muestran las curvas del sistema fotovoltaico, que son muy parecidas a las curvas de cuando no se había conectado los supercondensadores, pero hay una diferencia en la perturbación de arranque del sistema.



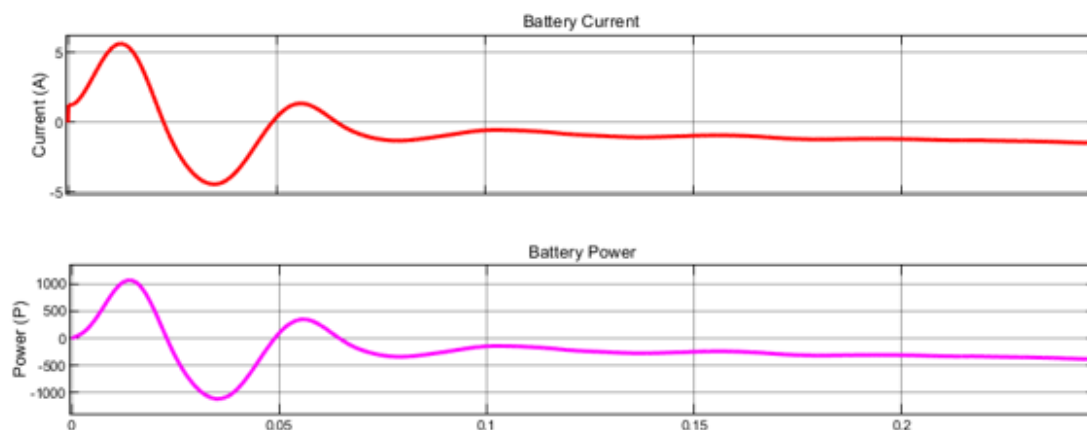
**Figura 4.** Perfil de carga para la matriz fotovoltaica. a) Respuesta de voltaje b) Respuesta de corriente c) Respuesta de potencia, simuladas para el sistema de almacenamiento híbrido BS-HESS.

### Comparación entre el almacenamiento de energía híbrido y el sistema de batería sola



**Figura 5.** Resultados de la simulación. a) Corriente y b) Potencia del sistema para el sistema híbrido de almacenamiento de energía.

Se muestran la curva de corriente y potencia, en la Figura 5 cuando no existe un supercondensador en el sistema fotovoltaico y en la Figura 6 cuando tenemos el sistema híbrido de batería con supercondensador, notamos una gran diferencia en las curvas de corriente y potencia desde el inicio, se reduce el pico de arranque del sistema, la hibridación logra estabilizar la onda de corriente y potencia en la batería. El supercondensador actúa como amortiguador durante el pulso de carga, protegiéndola de cambios rápidos en la corriente.



**Figura 6.** Resultados de la simulación. a) Corriente y b) Potencia del sistema para el sistema de almacenamiento de energía sin supercondensador.

## CONCLUSIONES

La hibridación de supercondensadores y baterías se demostró en este estudio, mejorando el rendimiento de ambos dispositivos cuando son usados de manera independiente. Se logra reducir las desventajas que presentaban, brindando un sistema de almacenamiento de energía con alta potencia y densidad de energía. Debido a que el supercondensador actúa como amortiguador en la corriente se extiende la vida útil de la batería, pudiendo reducir los costos a largo plazo. Los supercondensadores siguen siendo una tecnología costosa de adquirir y es necesario evaluar si es factible su aplicación a un sistema fotovoltaico aislado o en un sistema a mayor escala.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amin, Bambang, R. T., Rohman, A. S., Dronkers, C. J., Ortega, R., & Sasongko, A. (2014). Energy Management of Fuel Cell/Battery/Supercapacitor Hybrid Power Sources Using Model Predictive Control. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 10(4), 1992-2002. <https://doi.org/10.1109/TII.2014.2333873>
- Cabrane, Z., Ouassaid, M., & Maaroufi, M. (2014). Management and control of storage photovoltaic energy using battery-supercapacitor combination. *2014 Second World Conference on Complex Systems (WCCS)*, 380-385. <https://doi.org/10.1109/ICoCS.2014.7060896>
- Cabrane, Z., Ouassaid, M., & Maaroufi, M. (2016). Analysis and evaluation of battery-supercapacitor hybrid energy storage system for photovoltaic installation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(45), 20897-20907. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.06.141>



- Chen, Y., Smedley, K., & Brouwer, J. (2006). A Cost-effective Three-phase Grid-connected Inverter with Maximum Power Point Tracking. *Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting*, 2, 995-1000. <https://doi.org/10.1109/IAS.2006.256646>
- Chong, L. W., Wong, Y. W., Rajkumar, R. K., & Isa, D. (2017). Modelling and Simulation of Standalone PV Systems with Battery-supercapacitor Hybrid Energy Storage System for a Rural Household. *Energy Procedia*, 107, 232-236. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.12.135>
- Hepbasli, A. (2008). A key review on exergetic analysis and assessment of renewable energy resources for a sustainable future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(3), 593-661. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.10.001>
- Joshi, A. S., Dincer, I., & Reddy, B. V. (2009a). Performance analysis of photovoltaic systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(8), 1884-1897. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.01.009>
- Joshi, A. S., Dincer, I., & Reddy, B. V. (2009b). Performance analysis of photovoltaic systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(8), 1884-1897. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.01.009>
- Mikati, M., Santos, M., & Armenta, C. (2012). Modelado y Simulación de un Sistema Conjunto de Energía Solar y Eólica para Analizar su Dependencia de la Red Eléctrica. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 9(3), 267-281. <https://doi.org/10.1016/j.riai.2012.05.010>
- Rekioua, D., Bensmail, S., & Bettar, N. (2014). Development of hybrid photovoltaic-fuel cell system for stand-alone application. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(3), 1604-1611. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.03.040>
- Saitoh, H., Hamada, Y., Kubota, H., Nakamura, M., Ochifuji, K., Yokoyama, S., & Nagano, K. (2003). Field experiments and analyses on a hybrid solar collector. *Applied Thermal Engineering*, 23(16), 2089-2105. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(03\)00166-2](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(03)00166-2)
- Song, Z., Li, J., Hou, J., Hofmann, H., Ouyang, M., & Du, J. (2018). The battery-supercapacitor hybrid energy storage system in electric vehicle applications: A case study. *Energy*, 154, 433-441. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.148>
- Zhang, X., Huang, Y., & Chen, Z. (2022). A hybrid system integrating photovoltaic module and thermoelectric devices for power and cooling cogeneration. *Solar Energy*, 239, 350-358. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.05.011>
- Zhao, C., Yin, H., Yang, Z., & Ma, C. (2015). Equivalent Series Resistance-Based Energy Loss Analysis of a Battery Semiactive Hybrid Energy Storage System. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 30(3), 1081-1091. <https://doi.org/10.1109/TEC.2015.2418818>