

ANÁLISIS TEÓRICO Y EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO DE SUPERCONDENSADORES, BATERÍAS DE IONES DE LITIO Y METAL HIDRURO EN UN SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO AISLADO

BEHAVIORAL ANALYSIS OF SUPERCAPACITORS, LITHIUM ION BATTERY, AND NICKEL METAL HYDRIDE BATTERY IN AN ISOLATED PHOTOVOLTAIC SOLAR SYSTEM

JOHANN ALEXANDER HERNÁNDEZ MORA
ELVIS EDUARDO GAONA GARCÍA
LAURA MILENA CRUZ MORENO

Resumen

Este artículo presenta una investigación experimental sobre el comportamiento de diferentes dispositivos de almacenamiento como baterías Li-ion, Ni-MH y supercondensadores cuando se cargan mediante un sistema fotovoltaico solar. Los sistemas fotovoltaicos funcionan como fuente de corriente variable, dependiendo de la radiación solar. Estos dispositivos de almacenamiento presentan una carga de perfil diferente en comparación con una carga constante y controlada generada por un cargador tradicional. Para este trabajo se realizaron varios ciclos de carga y descarga de baterías y supercondensadores bajo las mismas condiciones ambientales para observar las diferentes características de cada tecnología y algunos efectos nocivos sobre el funcionamiento de los dispositivos de almacenamiento como el efecto de memoria y las descargas parciales implicadas en el correcto funcionamiento del sistema solar fotovoltaico.

Palabras clave: Baterías, Efecto Memoria, Sistemas fotovoltaicos, Supercondensadores.

Abstract

This paper presents an experimental research about the behaviour of several storage devices such as Li-ion, Ni-MH batteries and supercapacitors when it charging by a solar photovoltaic system. Photovoltaic systems work as a variable current source, depending on the solar radiation. Those storage devices show a different load profile in comparison with a controlled and continual load generated by a traditional charger.

In this paper, several charging and discharging cycles were made under the same environmental conditions in order to determine the characteristics functionalities of each technology and some harmful effect in storage devices such as memory effect and partial discharge involved in the proper functioning of the photovoltaic system.

Key words: Batteries, Memory effect, Photovoltaic Systems, Supercapacitors.

Introducción

En las últimas décadas, los sistemas fotovoltaicos solares han estado en auge debido a los costos de reducción de los paneles solares y al desarrollo de dispositivos complementarios a esta tecnología, como reguladores e inversores, que cada vez tienen mejores características técnicas. Pero la razón por la que los sistemas fotovoltaicos solares no se han implementado masivamente es el costo de los dispositivos de almacenamiento que suelen ser la parte más cara del sistema y aún más caro cuando se trata de adquirir un acumulador que es amigable con el medio ambiente.

El acumulador más utilizado en sistemas solares fotovoltaicos son las baterías de plomo ácido y níquel cadmio. Estos tienen una alta densidad de energía y eficiencia, pero su reutilización no es sostenible, ya que al fundirlas para darles un segundo uso producen gases altamente tóxicos que afectan sustancialmente a la salud humana. Según Michael y Henderson en su artículo "Reciclaje de baterías": "El reciclaje de la batería debe ser un proceso cuidadoso, debido al deterioro de la batería que contiene materiales tóxicos, corrosión de electrolitos y plásticos de residuos mezclados que obstaculizan la reutilización de estos elementos". Otros tipos de baterías, como las baterías de hidruro metálico Níquel, presentan procesos de reciclaje más respetuosos con el medioambiente, en los que los hidruros metálicos, el níquel y el acero se separan para su uso posterior con fines científicos, o incluso se utilizan para fabricar baterías nuevas. Sin embargo, todas las baterías no pueden ser reutilizadas completamente como baterías de iones de litio. Aunque es posible extraer el litio, un segundo uso para este elemento es todavía indefinido. Es por ello que es necesario hacer referencia al "Manual de producción más

limpia y buenas prácticas ambientales" del Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial del Gobierno de Colombia [2]. Este manual describe el procedimiento necesario para la implementación de buenas Prácticas ambientales en el reciclaje de baterías.

Hay varios tipos de baterías disponibles en el mercado. Entre estas las mencionadas anteriormente baterías de níquel-hidruro metálico (Ni-MH), de iones de litio (Li-ion) y subsiguientes, como los polímeros de níquel-hierro y litio, entre otros. Estas baterías tienen características ventajosas para su implementación en sistemas fotovoltaicos solares porque son más ligeras, tienen menor autodescarga y tienen una alta densidad de energía. Sin embargo, la tecnología de almacenamiento de la batería se basa en un proceso electroquímico, que se refleja en una vida útil de la batería reducida, requiriendo un mantenimiento constante, y reflejando los efectos nocivos al realizar la carga y la descarga de manera inapropiada. Dichas desventajas serían insignificantes cuando se hace referencia a una tecnología como los supercondensadores y las bobinas superconductoras, las cuales tienen ciclos de vida mayores y cuentan con grandes densidades de potencia.

La tecnología de los supercondensadores se ha desarrollado hace más de 50 años, las velocidades de carga y descarga están en el rango de segundos, no requieren mantenimiento, son capaces de soportar altas corrientes y tienen una alta densidad de potencia. Sin embargo, hoy en día la tecnología sigue siendo costosa en comparación con las baterías, pero sus ventajas a nivel medioambiental son significativas. Otro factor importante en estos dispositivos es su tamaño: pueden ser cinco o más veces el tamaño de una batería con la misma capacidad. Esta es la razón por la que esta tecnología no ha sido popularizada. Por otro lado, las bobinas superconductoras son capaces de

inyectar o absorber grandes cantidades de energía en períodos de tiempo muy cortos, siendo utilizadas para resolver problemas de calidad de la red. Tanto los Supercondensadores como las bobinas Superconductoras tienen un alto potencial renovable, pero su implementación generalizada no ha sido posible debido a sus altos costos de producción y su limitada distribución en el mercado.

Las diferentes características de los dispositivos de almacenamiento plantean la cuestión de qué sistema de almacenamiento es más apropiado para un sistema solar fotovoltaico aislado. Isaac Gil Mera, en su obra "Diseño de un sistema de almacenamiento híbrido basado en baterías y supercondensadores para uso en microgrid eléctrico" [3] muestra cómo las baterías y los ultracapacitores pueden complementarse y ayudarse mutuamente en diferentes aplicaciones debido a sus características contrastantes de densidad de energía y densidad de potencia. Si se evaluara sólo por su efecto ambiental, la respuesta a la pregunta planteada anteriormente se centraría en los ultracondensadores y las bobinas superconductoras, pero sus características también deben ser evaluadas como aspectos esenciales del funcionamiento y la durabilidad a largo plazo en el sistema solar fotovoltaico. Por lo tanto, este trabajo prueba baterías de Li-ion, NiMH y un supercondensador, que fueron cargadas por paneles solares de la misma capacidad, en las mismas condiciones ambientales, su regulación de carga se hizo a través del regulador MPPT, tomando datos de tiempo de tensión de los acumuladores a través una tarjeta de adquisición de datos y Labview. Las baterías cuando se utiliza un cargador convencional se cargan a una corriente constante para evitar daños internos y muchos de estos cargadores a menudo se desconectan una vez que detectan que la batería alcanzó la carga completa. Sin embargo, cuando se

carga con un generador fotovoltaico cuya corriente es proporcional a la radiación recibida, se observa un comportamiento totalmente diferente, incluso en presencia de reguladores que ayudan a la batería a no exceder sus límites.

En las curvas generadas en Matlab de este experimento se observa claramente el efecto de memoria en las baterías de níquel, donde la batería alcanzó un valor constante de tensión de aproximadamente el 76% de su valor nominal de voltaje, no logró alcanzar el 100%, sin poder descargarse completamente. Este efecto se atribuye a frecuentes recargas incompletas en las que los cristales se acumulan en el interior, impidiendo que la batería se cargue completamente. Por su parte, las baterías de Li-ion presentaron pequeñas descargas con duración de unos minutos en diferentes momentos de carga, pero este efecto no afectó su comportamiento posterior. El proceso de carga del supercapacitor genera una curva de voltaje-tiempo similar a la de un condensador tradicional cargado con una fuente convencional, pero además presenta picos de tensión del supercapacitor en instantes donde la radiación tomó valores considerablemente elevados.

Sistemas Solares Fotovoltaicos

Un sistema solar fotovoltaico aislado es un sistema que no está conectado a la red eléctrica, por lo que debe estar diseñado para suministrar toda la energía del sistema y debe ser capaz de almacenar energía durante períodos en que el recurso solar no es abundante. Este sistema generalmente consta principalmente de un generador o panel fotovoltaico, un regulador, una batería y una carga, como se muestra en la Figura 1. Algunos tienen un inversor para convertir la corriente continua en equipos de alimentación de corriente alterna que trabajan bajo este tipo de corriente. En este experimento se implementaron tres sistemas

solares fotovoltaicos aislados: con baterías Li-ion, NiMH y supercondensadores respectivamente. Los generadores fotovoltaicos utilizados en este análisis fueron paneles policristalinos de 5W cada uno, conectados a los reguladores MPPT ajustados valor de voltaje nominal de cada batería y supercapacitor como se muestra en la Figura 2, donde se observa la conexión del sistema en su conjunto. Las pérdidas en los sistemas solares fotovoltaicos son muy altas, debido principalmente al hecho de que los generadores fotovoltaicos tienen eficiencias limitadas y no convierten el 100% de la radiación en energía eléctrica útil, además de las pérdidas generadas por el cableado y los elementos electrónicos de potencia como reguladores e Inversores.

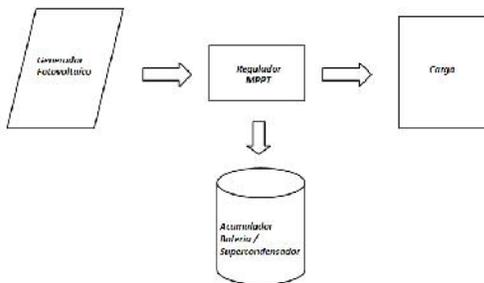


Figura 1. Diagrama de una instalación solar fotovoltaica aislada

Fuente: Autores



Figura 2. Conexión del sistema solar fotovoltaico para la adquisición de datos

Fuente: Autores

Acumuladores o Baterías

El sistema de almacenamiento de un sistema solar fotovoltaico aislado debe estar diseñado para almacenar más energía y así asegurar que el sistema tenga un par o más de días de autonomía y tener un regulador que se ajuste a los valores de tensión, evitando altas corrientes que la batería no puede soportar, evitando así daños adicionales. Los sistemas de acumulación utilizados en este trabajo fueron la batería de níquel metal hidruro, la batería de iones de litio y un supercondensador, cada uno con aproximadamente la misma capacidad de almacenamiento de energía que se muestra en la Tabla 1.

Se dispusieron de tres baterías, en cada una de las configuraciones en serie, con el propósito de incrementar la tensión sin afectar su capacidad. Existen varios métodos para determinar el estado de carga (SOC) de una batería, entre ellos el método de tensión, el método de densidad de electrolitos y la impedancia espectroscópica, pero algunos de estos métodos no pueden llevarse a cabo si la batería está conectada en un sistema fotovoltaico. En su investigación sobre sistemas fotovoltaicos solares Miguel Alonso Abella afirma: "En los sistemas fotovoltaicos es difícil determinar el estado de carga de la batería mediante la medición de la tensión en sus terminales, ya que esto se ve afectado por si la batería se está cargando o la tensión se eleva respecto a la tensión de circuito abierto (VOC) y cuando se descarga, la tensión disminuye "[4] De acuerdo con esto, se esperaría medir la tensión en la batería sabiendo el estado de su carga. El tiempo de descarga de las baterías se puede calcular con la siguiente ecuación, donde corresponde al tiempo de descarga en horas. Amperios / hora, y es la corriente de descarga en Amperios.

$$t = C/I \quad (1)$$

Por su parte los supercapacitores aunque son dispositivos más robustos tienen muchas ventajas

no sólo en términos de ser amigables con el medio ambiente sino también en términos de funcionalidad. De acuerdo con Menendez Díaz, en su libro "El carbón en la vida cotidiana", "la principal virtud de los ultracondensadores es la potencia que se puede desarrollar, acumulando también cantidades considerables de energía, lo que, sumado a su rápida carga y descarga, y una gran ciclabilidad. Es un dispositivo óptimo para su uso en diferentes sistemas de almacenamiento "[5]. La carga y descarga de un supercondensador puede compararse con un condensador tradicional. La tensión de descarga del supercapacitor se puede calcular a partir de la ecuación:

$$V(t) = \frac{Q}{C} * e^{-\frac{t}{RC}} \quad (2)$$

Tabla 1. Características de los acumuladores

Acumuladores	Distancia	Precio (U\$)
NiMH	Vn: 3.6V Capacidad: 600mAh Energía: 2,1 Wh	6
Li -Ión	Vn: 3.6V Capacidad: 690mAh Energía: 2,5 Wh	12
Supercondensador	Vn: 6V Capacitancia: 58F Energía: 2,1 Wh	123

En este trabajo la descarga se realizó a través de cargas constantes de 22, 27 y 49 ohmios, lo que permite descargas rápidas, en la tabla debajo de la batería esperada veces descarga y Supercapacitor se observa en la tabla 2.

Tabla 2. Tiempos de descarga de las baterías y supercapacitores en horas

Acumuladores /cargas	Primera carga (22Ω)	Segunda carga (27Ω)	Tercera carga (49Ω)

Batería de Niquel metal hidruro	1.36	1.65	2.9
Batería de iones de litio	1.56	1.86	3.38
Supercond.	1.77	2.17	3.94

Los datos de tiempo de tensión del acumulador se extrajeron a través de una tarjeta de datos USB-6000 National Instruments y DAQ Assistant vía Labview como se ve en la Figura No.3, que exporta datos del voltaje de la batería y supercapacitor a Excel. Debido a los rangos de funcionamiento de la placa USB-6000 National Instruments fue necesario hacer un divisor resistivo para reducir el voltaje nominal del supercapacitor a un valor que se ajusta a la gama de la tarjeta, en este caso 10V. Los datos de radiancia se tomaron consecutivamente a través del medidor de energía solar ES-2000.

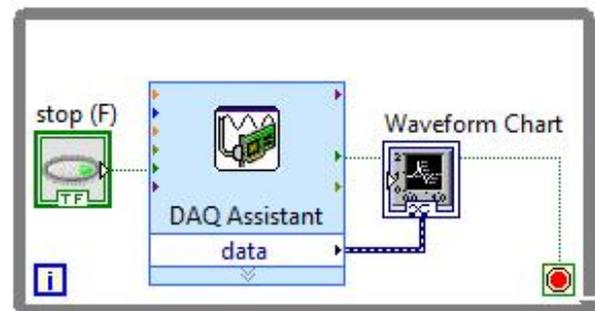


Figura 3. Esquema de Labview para la conexión con el Asistente DAQ
Fuente: Autores

Resultados

Las figuras 4 a 23 proporcionan gráficos de radiación solar, y tensiones de carga y descarga de cada uno de los acumuladores. La línea roja representa al supercondensador y los azul y verde Ni-MH y Li-ion respectivamente. En los gráficos de radiación la línea azul corresponde a la primera

carga y las líneas verde y roja describen la segunda y la tercera carga respectivamente, si existe.

En las figuras 9 y 11, respectivamente, se puede apreciar el proceso de descarga parcial en la batería de níquel, por lo que la batería se descarga durante unos segundos, recuperando su valor de tensión antes de la descarga. Este efecto alcanza una reducción del 19% de su tensión nominal. La reacción de la batería de níquel en las figuras 17 y 19, respectivamente, se conoce como efecto de memoria, que se caracteriza por la pérdida temporal de la capacidad de descarga de la batería. En este caso particular, la tensión alcanzó un valor nominal del 76% recuperando su capacidad después de 4 ciclos, como se muestra en las figuras 21 y 23 respectivamente. La Figura 19 muestra la aparición de dos efectos simultáneos: el efecto de memoria y el efecto de descarga parcial, que aparece durante 6 minutos, y desaparece al día siguiente en la batería de Níquel Metal Hidruro. Por otro lado, la batería de litio, incluso cuando tiene el mismo número de ciclos que la batería de hidruro de níquel, no presenta efecto de memoria como se esperaba. Sin embargo, el día 10, como se muestra en la Figura 23, la batería de iones de litio presenta una descarga parcial, recuperándose unos minutos más tarde.

El factor de escala de tiempo en la curva Voltaje-Tiempo es de 1: 2 segundos, para apreciar que las cargas del supercondensador varían en el intervalo de 25 minutos a 90 minutos, dependiendo de la corriente generada por el panel. Cabe señalar que no todos los días se obtuvo más de una carga debido a las condiciones climáticas y a la radiación que a menudo era tan baja que proporcionaba una carga muy larga en el supercapacitor. En la figura 15 se puede observar un pico de voltaje en la primera carga del supercondensador y picos de voltaje repetidos en la segunda carga supercondensador. El supercondensador no presentó efecto de memoria o descarga parcial

durante la carga adicionalmente los picos de tensión debido a la alta radiación no generaron efectos sobre su Comportamiento posterior.

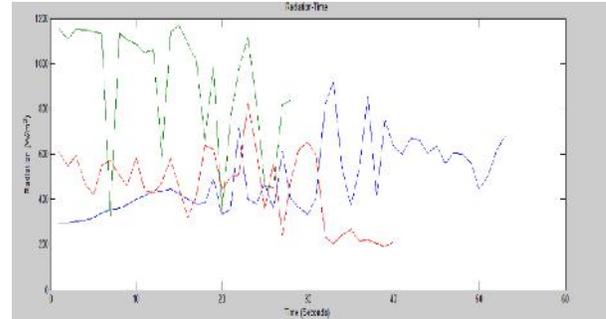


Figura 4. Curva Radiación-Tiempo día 1.
Fuente: Autores

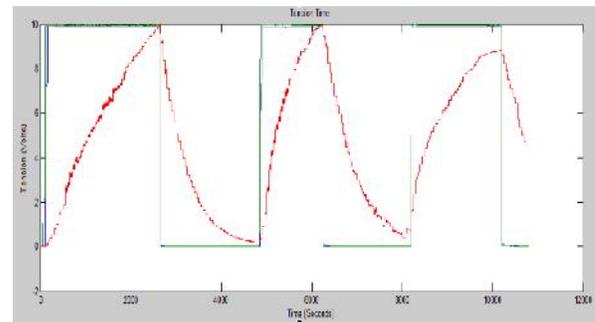


Figura 5. Curva tensión tiempo día 1.
Fuente: Autores

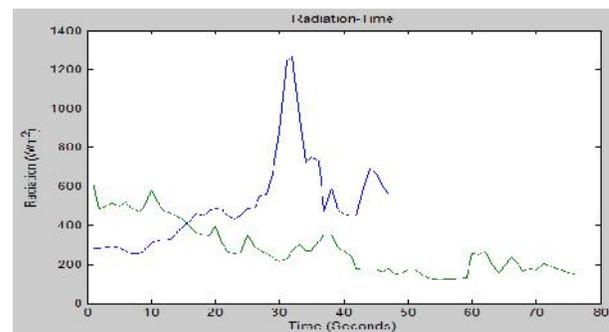


Figura 6. Curva Radiación-Tiempo día 2.
Fuente: Autores

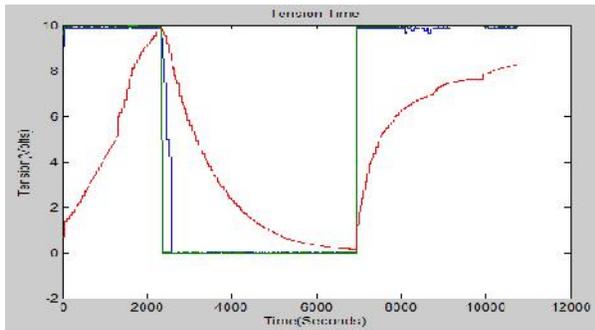


Figura 7. Curva tensión tiempo día 2.
Fuente: Autores

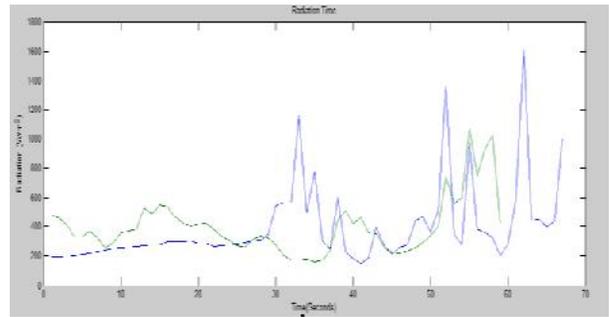


Figura 10. Curva Radiación-Tiempo día 4.
Fuente: Autores

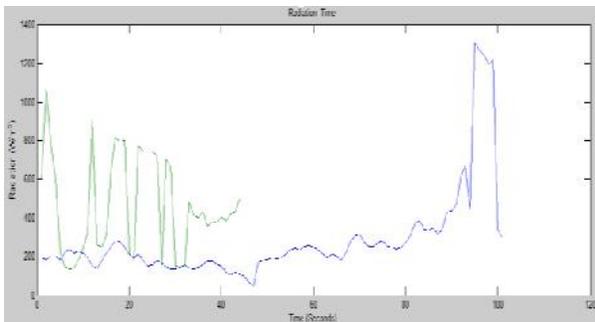


Figura 8. Curva Radiación-Tiempo día 3.
Fuente: Autores

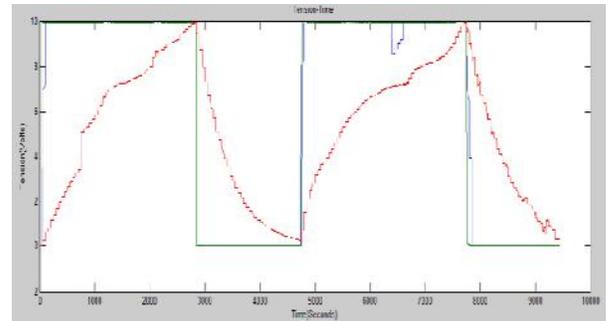


Figura 11. Curva tensión tiempo día 4.
Fuente: Autores

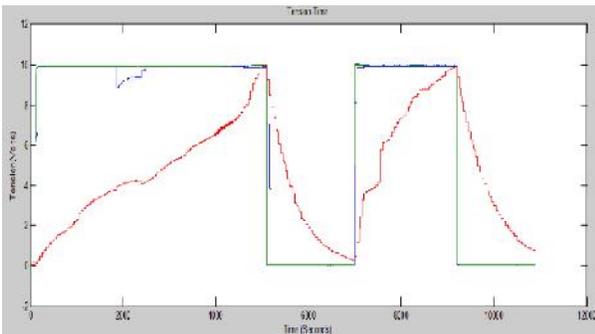


Figura 9. Curva tensión tiempo día 3.
Fuente: Autores

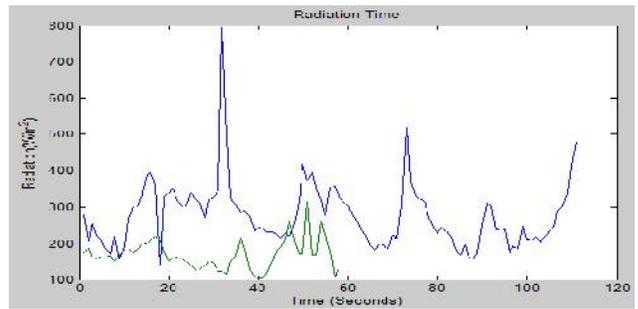


Figura 12. Curva Radiación-Tiempo día 5.
Fuente: Autores

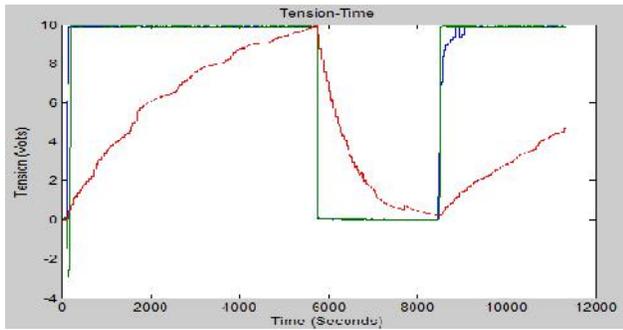


Figura 13. Curva tensión tiempo día 5.
Fuente: Autores

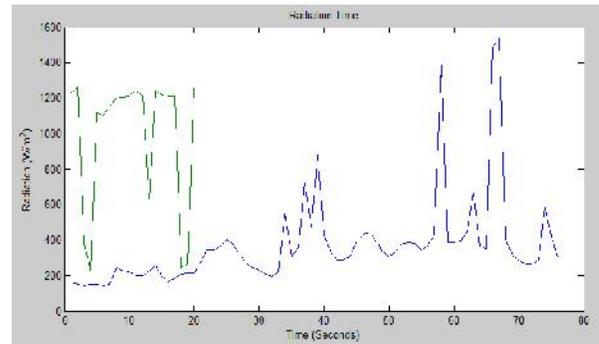


Figura 16. Curva Radiación-Tiempo día 7.
Fuente: Autores

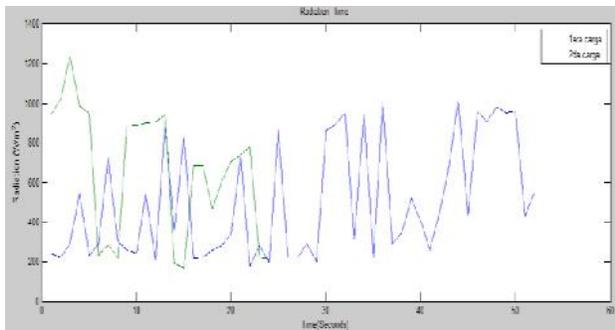


Figura 14. Curva Radiación-Tiempo día 6.
Fuente: Autores

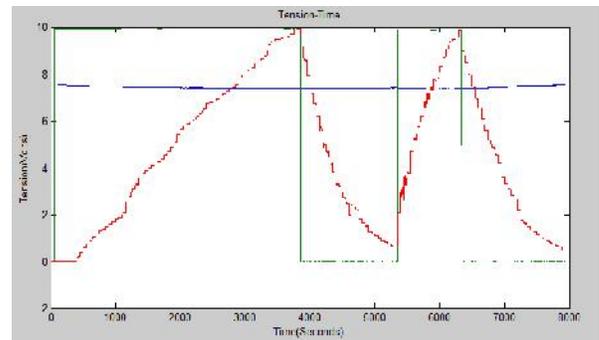


Figura 17. Curva tensión tiempo día 7.
Fuente: Autores

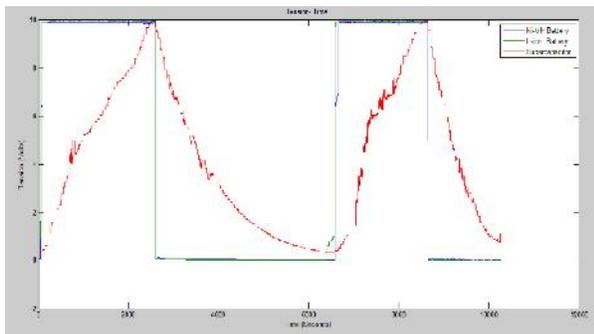


Figura 15. Curva tensión tiempo día 6.
Fuente: Autores

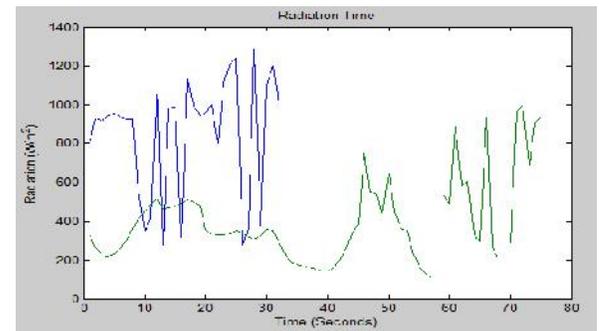


Figura 18. Curva Radiación-Tiempo día 8.
Fuente: Autores

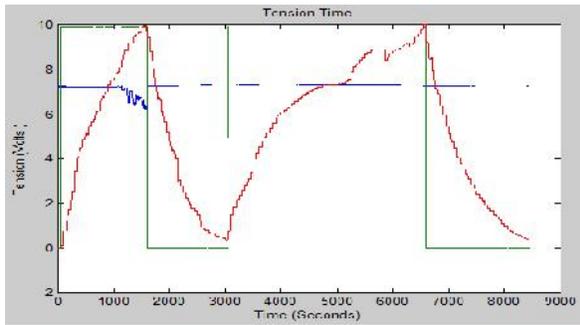


Figura 19. Curva tensión tiempo día 8.
Fuente: Autores

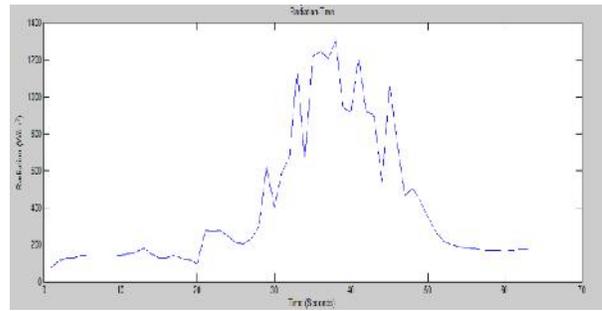


Figura 22. Curva Radiación-Tiempo día 10.
Fuente: Autores

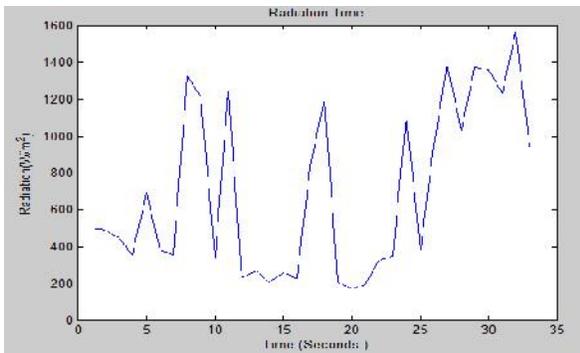


Figura 20. Curva Radiación-Tiempo día 9.
Fuente: Autores

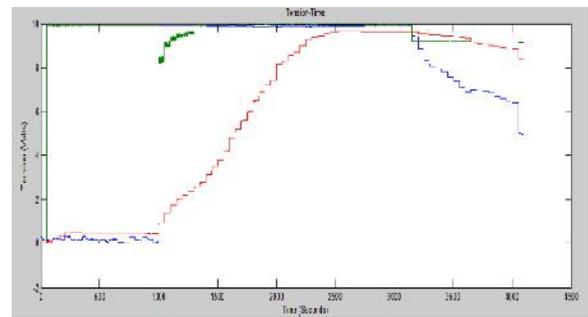


Figura 23. Curva tensión tiempo día 10.
Fuente: Autores

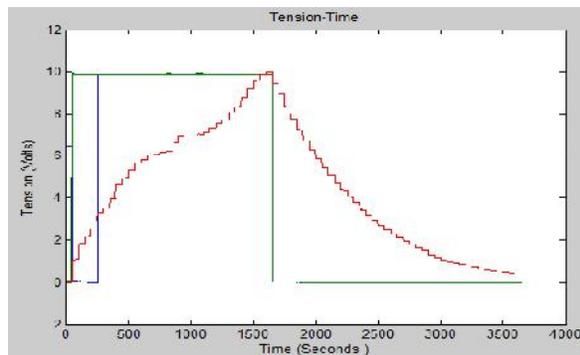


Figura 21. Curva tensión tiempo día 9.
Fuente: Autores

Análisis de resultados y conclusiones

Aunque los autores atribuyen el efecto de memoria sólo a las baterías de Ni-Cd, este efecto también está presente en las baterías de Ni-MH en un porcentaje relativamente pequeño, si bien es un efecto temporal, reduce la duración de la batería, sin embargo es reversible a través de la aplicación de ciclos completos de carga-descarga como lo menciona Viera Pérez en su trabajo "batería rápida (Ni-Cd y Ni-MH), la capacidad media y grande, la síntesis y la comparación de nuevos métodos "[6], en el que argumenta que " la pérdida temporal de capacidad puede recuperarse completamente después de aplicar dos ciclos completos de descarga y carga consecutivamente " A pesar de que el control de carga en sistemas fotovoltaicos es realizado por reguladores, que miden el voltaje y protegen la batería, en este análisis, el valor de la tensión de la batería no corresponde al estado de

carga de la batería generando cargas parciales, produciendo efectos de memoria como lo señalan Martínez García y Gualda Gil en su libro "Componentes electrónicos topologías y equipos de potencia" [7], "el efecto memoria es el resultado de sucesivos ciclos de cargas parciales, en los que grupales agrupados Material activo que ofrece menos contacto superficial con el electrolito ", lo que hace que la batería no alcance la carga completa Otro factor relevante en la implementación de sistemas fotovoltaicos solares es la calibración correcta del regulador de tensión, ya que un regulador desajustado o dañado puede afectar las mediciones y la duración de la batería causando sobrecarga, descarga excesiva e incluso el efecto de memoria antes mencionado.

Siendo la radiación un factor variable, que se presenta en sistemas solares fotovoltaicos, los dispositivos de almacenamiento típicamente no tienen cargas completas, o pueden presentar una serie de mezclas entre cargas rápidas y lentas durante diferentes períodos de tiempo en el mismo ciclo. Este factor afecta notoriamente a las baterías, generando efectos perjudiciales para ellos y reduciendo su vida, en contraste, el supercondensador no parece estar afectado por cambios abruptos. Los supercondensadores, al recibir más corriente, reducen los tiempos de carga y son uno de los dispositivos de almacenamiento más costosos del mercado, su comportamiento frente a ciclos de carga y descarga incompletos, los hacen ideales para la utilización en sistemas solares fotovoltaicos.

La carga y descarga, que pueden afectar notablemente a las baterías, puede ser soportado fácilmente por el supercondensador sin producir problemas de funcionamiento de este. Además, los ultracondensadores serían adecuados para instalaciones fotovoltaicas donde el consumo aumenta con el tiempo, ya que tienen una alta densidad de potencia, lo que permite que las altas

corrientes se disipen rápidamente. Eventualmente, cuando se usan supercondensadores, la funcionalidad de los reguladores es limitada, ya que se requerirían circuitos reguladores menos complejos para evitar descargas profundas y, por lo tanto, hacerlos menos costosos. Los supercondensadores son conocidos por sus cargas y descargas rápidas en comparación con las baterías, sin embargo como se puede ver en la Tabla 2, los tiempos de carga en el condensador son más largos que la carga en la batería, esto es debido a la alta capacitancia del supercondensador que aumenta la constante de tiempo , siendo para la batería, la descarga dependiente directamente de la corriente, en este caso en particular y para bajas potencias los tiempos de carga y descarga de las baterías comparado con supercondensadores no son notoriamente más reducidos.

Referencias

- [1] F. Mc Michael & C. Henderson, "Recycling Batteries", 2002, IEEE, Vol.35, p.36, August 2002.
- [2] Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial del gobierno de Colombia, "Manual de producción más limpia y buenas prácticas ambientales: Fabricación y Reciclaje de Baterías". 2006, Available: http://www.metropol.gov.co/ProduccionLimpia/Documents/CI%C3%BAster%20Transporte/Manual_PL_Fabricacion_Reciclaje_Baterias.pdf.
- [3] I.Gil, "Diseño de un sistema de Almacenamiento Híbrido basado en baterías y Supercondensadores para su uso en microred eléctrica" Universidad de Sevilla, Sevilla España,2012.Available:<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4740/fichero/3.+Sistema+de+almacenamiento+hibrido.pdf> [2007].
- [4] M. Abella, "Sistemas solares fotovoltaicos", Centro de investigaciones Energéticas,

Medioambientales y tecnológicas, Available:
http://api.eoi.es/api_v1_dev.php/fedora/asset/eoi:45337/componente45335.pdf.

[5] J. Menéndez, “El carbón en la vida cotidiana: De la pintura rupestre al ascensor espacial”, ISBN 9781479386086, p.108, 2012.

[6] J.Viera,”Carga rápida de Baterías de Ni-Cd y Ni-MH, de media y gran capacidad, síntesis y comparación de nuevos métodos” Universidad de Oviedo, España, 2003. Available:
<http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/11142/UOV0036TJCVP.pdf> [April 2003].

[7] S. Martínez & J. Gualda, “Electrónica de potencia componentes, topologías y equipos”, Thompson ediciones, Madrid España, 2006.

INFORMACIÓN DE LOS AUTORES

Johann Alexander Hernández Mora: Ingeniero electricista, Universidad Nacional de Colombia. Magíster en Ingeniería eléctrica, Universidad Nacional de Colombia, Doctor en Ingeniería Eléctrica, Universidad Nacional de Colombia
Docente TC, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia.
jahernandezm@udistrital.edu.co,
johann.hernandez@gmail.com

Elvis Eduardo Gaona García: Ingeniero Electrónico, Especialista en Telecomunicaciones Móviles, Magíster en Ciencias de la información y las comunicaciones, Doctor(c) en Ingeniería-Universidad Distrital Francisco José de Caldas-Colombia. Docente Asociado Facultad de Ingeniería, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. egaona@udistrital.edu.co, elvisgaona@gmail.com.

Laura Milena Cruz Moreno: Ingeniera Eléctrica, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia.
lmcruzm@correo.udistrital.edu.co,
laura.lda@hotmail.com