

REGULADOR DE CARGA SOLAR DE CICLO ÚTIL CONSTANTE PARA BATERÍAS DE ION-LITIO

Firman, Andrés D. – afirman@exa.unne.edu.ar

Cáceres, Manuel.

González Mayans, Alexis Raúl.

Masetto, Jonathan A.

Vera, Luis H.

Rivas, Juan Pablo.

Universidad Nacional del Nordeste, FaCENA. Grupo en Energías Renovables. Argentina.

Resumen. Este trabajo aborda el diseño, la implementación y análisis de resultados de un regulador de carga solar, para ser utilizado en sistemas fotovoltaicos autónomos basados en baterías de ion-litio. El mismo trabaja a ciclo útil de conmutación constante, prescindiendo de la necesidad de realimentación del estado de carga de la batería, minimizando de esta forma, tanto la complejidad del regulador como su costo. Se indican las pautas principales para llevar a cabo una simulación de sistemas fotovoltaicos autónomos para explicar su funcionamiento. Además de las pautas principales de diseño del regulador. Se compara experimentalmente sus prestaciones con otros tipos de reguladores comerciales, mediante verificación en idénticas condiciones de ensayo. En los resultados, se demuestra que el regulador de ciclo útil constante completa adecuadamente la carga de baterías de ion-litio y que además posee una eficiencia intermedia con respecto a aquellos más complejos de lazos realimentados como son; el regulador con seguimiento del punto de máxima potencia y de modulación por ancho de pulso. Se concluye que este tipo de reguladores es una opción costo eficiente altamente recomendable para su utilización en sistemas fotovoltaicos autónomos.

Palabras clave: Energía Solar, Fotovoltaica, Regulador de Carga.

1. INTRODUCCIÓN

El efecto de transformación de energía de solar a eléctrica, conocido como efecto fotovoltaico (FV), descubierto en el año 1839 (Green, 2002), fue primeramente utilizado en tecnología espacial en el satélite norteamericano *Vanguard I*, lanzado a principios de 1958 (Easton et al, 1959) y desde esa primera aplicación se requirió el diseño de un regulador de carga para sus baterías, que logre la administración de la energía de manera adecuada y segura.

Hoy en día, la tecnología FV ha establecido un gran salto evolutivo y su uso se ha masificado (Laws et al 2017). Potenciado por ser una fuente energética económicamente rentable y renovable. Ligado a su evolución, continua la necesidad de almacenar de manera óptima y eficiente la energía producida por módulos FV y adaptarla a la tecnología disponible en el presente.

Por su parte, los sistemas FV autónomos (SFA), requieren de un controlador o regulador de carga encargado de gestionar el flujo de energía desde el generador FV hacia las baterías, capaz de ejecutar una estrategia de carga adecuada para su protección y seguridad.

1.1 Batería de ion-litio

El litio encabeza a los metales alcalinos en la tabla periódica, es el más ligero de los metales, tiene el mayor potencial electroquímico y provee una mayor cantidad de energía por peso, teniendo una capacidad energética teórica de 3860 Ah/kg (Trano, 2021) (Wu et al, 2020) en comparación con otros tipos de materiales, por estas razones las baterías recargables con litio logran altas densidades de energía. En las baterías de ion-litio, el electrodo negativo está compuesto de litio y el electrodo positivo está formado comúnmente por el carbono, permitiendo la inserción de los iones de litio.

Por sus características, las baterías de ion-litio se hicieron de un espacio importante en el mercado actual (Manthiram, 2017). Hoy en día se las utilizan en dispositivos portátiles (celulares, *tablets*, *notebooks*, etc.), ya que poseen menor peso en comparación con otras (Carter et al, 1996). Además, presentan una auto-descarga sumamente contenida y no sufren del llamado “efecto memoria” (Bates et al, 2020). Estas razones hacen que el mercado de las baterías de litio presente un crecimiento sostenido a lo largo de los últimos años.

Cuando la celda se aproxima a una carga completa, su tensión en bornes se aproxima a los 4.2 V y a partir de ahí, comienzan las peligrosas reacciones de sobre-carga. El nivel de tensión nominal de este tipo de baterías es de 3.7 V teniendo como márgenes de seguridad el límite inferior de 3.0 V y el superior de 4.2 V. La Fig. 1 indica las curvas de voltaje y de corriente en el tiempo para la estrategia de carga de este tipo de baterías (Texas Instruments, 2005).

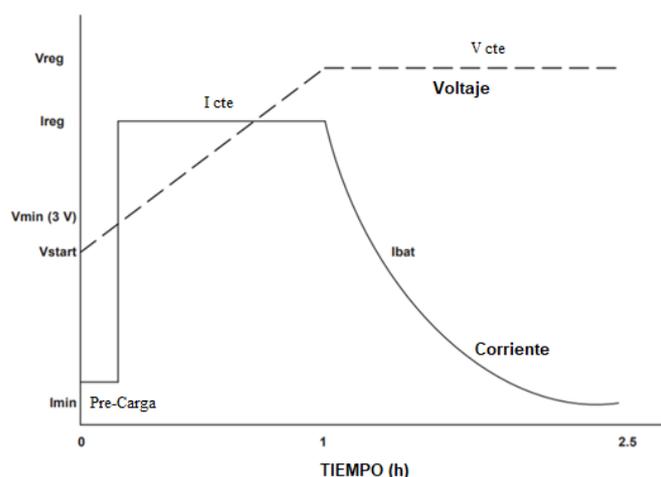


Figura 1 - Curvas voltaje y corriente para carga de baterías de ion-litio con respecto al tiempo.

Básicamente, el proceso de carga se divide en tres partes principales;

La “carga lenta” o la pre-carga, que se realiza a una corriente constante hasta el 10% de la corriente nominal. Este proceso solo se realiza si la celda de la batería se encuentra por debajo de los 2.5 V. Seguidamente la “carga rápida” que se realiza a corriente constante de valor nominal (I_{cte}), hasta que la celda se encuentre próxima a los 4.2 V en sus bornes. Finalizando por la carga a voltaje constante (V_{cte}) hasta que la corriente disminuya nuevamente por debajo del 10% de la corriente nominal en la denominada tensión de “flotación”.

También se puede realizar una estimación del estado de carga (*state of charge*, SoC) de la celda basado en la tensión presente en sus bornes (3.0 V – 0%, 4.2 V – 100%). En comparación con otros tipos de batería, las baterías de litio son seguras siempre que se respeten los límites de voltaje y corrientes evitando el sobrecalentamiento que lleva a fundirse internamente y entrar en cortocircuito, originando un peligroso aumento brusco de presión y de su temperatura interna.

1.2 Regulador de carga

Los inconvenientes de las baterías de ion-litio radican principalmente en la necesidad de circuitos de control que requieren de una elevada complejidad. Este estudio aborda el diseño, la implementación y análisis de resultados de un regulador de carga solar, para ser utilizado en SFA basados en baterías de ion-litio. El sistema propuesto se basa en un convertidor CC/CC que funciona con un ciclo útil constante ($c-\delta$) y aprovecha las características de transferencia del generador FV. Logrando regular la carga de baterías sin necesidad de determinar el valor de SoC de las mismas, minimizando tanto la complejidad del regulador como su costo.

De esta manera, se logra proteger la batería y alargar su vida útil, sin recurrir a dispositivos de mayor complejidad como el regulador basado en modulación por ancho de pulso, (*power width modulation*, PWM) o con seguimiento del punto de máxima potencia (*maximum power point tracker*, MPPT).

Los siguientes apartados presentan el diseño asistido por software, a través de modelado y simulación del sistema, la implementación de un prototipo y su caracterización experimental a efectos de establecer aspectos funcionales relevantes.

2. METODOLOGÍA

En primera instancia se desarrolló la modelización, simulación y verificación del funcionamiento de todos los componentes del sistema de regulación operando en conjunto mediante *Matlab/Simulink*, a efectos de verificar el principio de funcionamiento y establecer sus ventajas e inconvenientes.

Se consideró que la tensión de módulo FV, desde la zona del punto de máxima potencia (V_m) hasta su valor de circuito abierto (V_{ca}), es en toda su excursión mayor que la de la batería utilizada (tal y como ocurre en la mayoría de los casos prácticos). Por esta razón fue necesario incorporar una etapa de conversión CC/CC, de topología reductora (o *step-down*), con ciclo de trabajo constante. Siendo esta técnica de control la característica fundamental del proyecto, se buscó aprovechar la disminución propia de la corriente cuando la polarización sobre el generador FV, se dirige desde el entorno V_m hacia V_{ca} (de corriente nula), a medida que la batería alcanza su estado de carga máximo, de esta manera, se logra una autorregulación en el proceso.

2.1 Modelado y Simulación del sistema fotovoltaico autónomo y del regulador de carga

A través de la utilización de bloques de *Simulink*, incorporados en la librería *Power Electronics System*, se procedió a realizar el diseño y simulación del modelo del SFA con diferentes tipos de reguladores de carga para baterías de ion-litio; $c-\delta$, MPPT y PWM (Figura 2).

Para el regulador de tipo c- δ , se estableció como parámetro de definición del ciclo de trabajo (δ), la condición de que el generador FV se encuentre polarizado en el punto de circuito abierto V_{ca} cuando el acumulador alcanza un SoC igual al 100% (4.2 V). De esta manera, cuando la batería de ion-litio presente en bornes su tensión mínima (3.0 V), el módulo se encontrará polarizado a una tensión menor, por lo tanto cercana a su punto de máxima potencia. Tal aproximación dependerá de la característica I-V del generador FV en las condiciones dadas. Además cuando en la batería se presente el valor de tensión máxima, el convertidor CC/CC se encontrará polarizando al módulo FV en V_{ca} de corriente nula. De esta manera, aprovechando las características de transferencia del generador fotovoltaico, se consigue “autorregular” el nivel de flotación, dado que por el perfil de la característica I-V del generador FV, la corriente decrece a medida que se aproxima a V_{ca} , es decir, se consigue un patrón similar al indicado en la Fig. 1. Si bien la irradiancia y la temperatura afectan el valor de V_{ca} , en condiciones de operación expuesto al sol es de esperar que su valor disminuya, en este caso, el valor de tensión de flotación se verá afectado pero se mantendrá la seguridad en el proceso de carga. Mas aún, considerando que en esta región la corriente que el generador FV puede entregar tiende a cero. Por su parte, las cargas del sistema no son tenidas en cuenta en el análisis ya que estas van conectadas a la batería, la cual actúa, dentro de ciertos límites, como una fuente de tensión ideal para el regulador de carga.

El modelo de *Simulink* genérico para los tres reguladores de carga se indica en la Fig. 2.

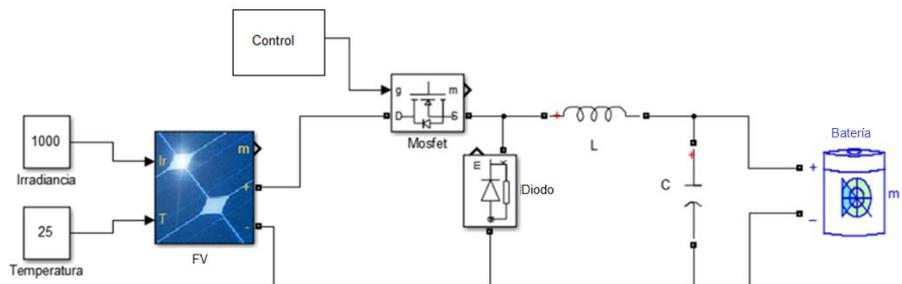


Figura 2 - Modelo general de *Simulink* para los SFA empleados.

La Fig. 2 presenta un modelo en bloques genérico que permite simular y comparar resultados de los tres métodos de regulación citados previamente. En este se ha incorporado un bloque correspondiente al generador fotovoltaico (FV) y otro que simula la batería de ion-litio (Batería). Un bloque de *Control* que genera el tren de pulsos para operar un transistor *Mosfet* y el conjunto de *Diodo*, inductancia L y capacidad C que conforman una topología reductora con filtro de salida de tipo LC. El diseño de estos componentes se realizó siguiendo los lineamientos presentados en el reporte de aplicaciones de la compañía *Texas Instruments* (Hauke, 2011).

El bloque de *Control* en el caso del c- δ es el encargado de generar la señal de ciclo útil constante, se destaca en esta topología que este control no requiere ninguna realimentación por parte de la carga para operar, lo que incrementa su simplicidad y confiabilidad.

Para el caso del regulador MPPT, la topología utilizada es la misma, se calcula con la misma metodología, pero en este caso la etapa de *Control* se reemplaza por un bloque que implementa la modulación adecuada para seguir el punto de máxima potencia. La técnica de seguimiento del punto de máxima potencia modelada en este sistema es la de perturbar y observar, que se logra sensando continuamente, la tensión, corriente y potencia instantánea que se está extrayendo del generador FV para realizar sucesivas modificaciones y ajustes. De esta manera se busca siempre suministrar la máxima cantidad de energía disponible en el generador FV a la batería consiguiendo elevados rendimientos de carga, con un significativo aumento en su complejidad.

Por último, el regulador PWM, donde el bloque de *Control* es un sistema que modifica el ancho de pulso dependiendo de la estrategia de carga de la batería, por lo que este sistema precisa un lazo de realimentación, con el que sensa el SoC de batería, y dependiendo de dicho de valor, varía su ciclo de trabajo. En este caso se elimina el filtrado de salida, lo que torna innecesario la inductancia L y la capacidad C . Sin estos elementos pasivos, en el momento que se encuentra conectado el *Mosfet*, el voltaje del módulo FV y de la batería es el mismo. Esto hace que el módulo FV no trabaje en el entorno de V_m , sino en el que impone la batería según su SoC, produciendo una pérdida de potencia.

2.1.1 Modelos matemáticos utilizados

Para el modelado del generador FV se recurrió al modelo equivalente de un diodo de cinco parámetros, ampliamente utilizado en investigaciones de este tipo (Adam et al, 2021) (Niccolai et al, 2018).

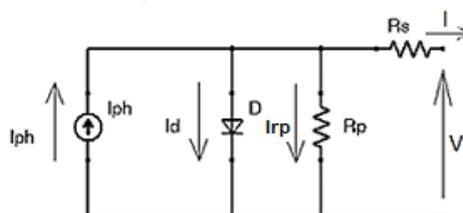


Figura 3 - Modelo equivalente eléctrico de un dispositivo FV de un diodo de cinco parámetros.

El modelo equivalente eléctrico de un diodo de cinco parámetros se encuentra representado en la Fig. 3. En la cual, I_{ph} es la corriente fotogenerada que representa la corriente que genera el dispositivo FV cuando incide la radiación solar sobre la misma, por lo tanto, esta es la fuente que proporciona la energía eléctrica de acuerdo con el efecto fotovoltaico (Tiwari y Dubey, 2009). El diodo D que representa a la juntura de la celda FV. La resistencia paralelo R_p , representa la parte de corriente fotogenerada que se deriva internamente, y que se interpreta como circuitos de conducción dentro de la celda produciendo una caída en la eficiencia. Por último, la resistencia serie R_s , representa todas las caídas de voltaje que se producen en la interconexión serie entre celdas, contactos, cableado, etc.

Establecido el modelo equivalente eléctrico, podemos deducir que la corriente de salida es $I = I_{ph} - I_d - I_{rp}$, entonces, reemplazando I_d por la ecuación del diodo (según el modelo de Shockley, 1949) y la I_{rp} por aplicación de la ley de ohm, queda la Ec. 1.

$$I = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{V+I.R_s}{m.N.V_t}} - 1 \right] - \frac{V + I.R_s}{R_p} \quad (1)$$

Donde: I_0 es la corriente de saturación inversa del diodo, m es el índice de idealidad del diodo, N es el número de celdas conectadas eléctricamente en serie, V_t es el potencial térmico ($V_t = k.T/q$ siendo k la constante de Boltzmann, T la temperatura absoluta de celda y q la carga del electrón), (Luque y Hegedus, 2011), (Firman et al, 2020).

El sistema de almacenamiento se basa en el modelo genérico de batería recargable presente en *Simulink* que utiliza lo publicado por Saw et al, (2014). Este estudio presenta un modelo eléctrico basado en un circuito equivalente que tiene en cuenta los procesos electroquímicos que se llevan a cabo en la celda, según la Ec. 2, la cual es específica para baterías de ion-litio durante el proceso de carga.

$$V_{bat} = E_0 - R i - \frac{KQ}{it + 0.1Q} i' - \frac{KQ}{Q - it} it + Ae^{-B.it} \quad (2)$$

donde V_{bat} es el voltaje de la batería (en bornes), E_0 es el voltaje de batería constante, R la resistencia interna, i es la corriente, K es constante de polarización [V/(Ah)], Q es la capacidad nominal de la batería, A es el voltaje exponencial, B es la capacidad exponencial [1/(Ah)], $it = \int idt$ es la corriente integrada en el tiempo [Ah], i' es la componente en baja frecuencia de la corriente. Estos parámetros son extraídos de la hoja de datos del fabricante y mediante ajuste sobre el gráfico de descarga (Shepherd, 1965) (Miyatakea, 2013).

2.2 Diseño del prototipo de regulador de carga de ciclo útil constante

Para la determinación del ciclo útil a emplear en el prototipo se consideró un generador constituido por un módulo FV de 36 células, con una V_{ca} de 21.0 V ($V_{entrada}$). Una batería compuesta de tres celdas de ion-litio conectadas en serie, logrando una tensión nominal en bornes de 11.1 V, con un voltaje máximo permitido en bornes de 12.6 (V_{salida}) con una capacidad total de 5200 mAh. La frecuencia de trabajo del ciclo δ se fija a $f = 20$ kHz.

Por lo tanto, a partir de las especificaciones del módulo fotovoltaico y de la batería empleada se tiene un ciclo de trabajo óptimo determinado para este caso de $\delta = V_{salida}/V_{entrada} = V_{maxbat}/V_{ca} = 0.6$.

Para el cálculo de los componentes se sigue las indicaciones presentadas por (Hauke, 2011). El cálculo de la inductancia L se realiza según la Ec. 3, donde ΔI_L es el valor de rizado de corriente en la inductancia que se recomienda calcular a $0.2 I_{salida}$, por tanto, para una corriente máxima de salida de 4.0 A resulta;

$$L = \frac{V_{salida}(1 - \delta)}{\Delta I_L f} = 270 \mu H \quad (3)$$

El cálculo de la capacidad C mínima necesaria, se lleva a cabo empleando la Ec. 4, y la Ec. 5 para determinar el valor de resistencia serie equivalente (ESR) máxima. Considerando una rizado de tensión del orden del 5% respecto a la de salida, se tiene;

$$C_{min} = \frac{\Delta I_L}{8 f \Delta V_{salida}} = 91 \mu F \approx 100 \mu F \quad (4)$$

$$ESR = \frac{\Delta V_{salida}}{\Delta I_L} = 69 m\Omega \quad (5)$$

El cálculo de la corriente directa por el diodo I_d y la potencia a soportar por el rectificador P_d , se realiza mediante la Ec. 6 y la Ec. 7 respectivamente, considerando $V_d = 0.3$ V.

$$I_d = I_{max}(1 - \delta) = 1.56 A \quad (6)$$

$$P_d = I_d V_d = 468 mW \quad (7)$$

El transistor de salida adoptado para esta etapa es el Mosfet IRF4905 de canal P, el cual supera ampliamente por un margen de seguridad de 2 los límites fijados experimentalmente ($2V_{ca} < 55 \text{ V}$, $I_{max} < 74 \text{ A}$).

El encargado de generar el tren de pulsos de ciclo útil constante es el generador multivariable LM555 de ciclo útil ajustable (Texas Instruments, 2000), configurado como multivibrador astable, fijando un ciclo útil δ de 0.6 a una frecuencia de 20 kHz. Para lo cual se precisa un capacitor de oscilación de $C_o = 1 \text{ nF}$ y un divisor resistivo ajustable conformado por una resistencia de 10 k Ω y una variable de 50 k Ω de manera de regular al valor deseado (Fig. 4 a). Este circuito integrado es alimentado con tensión regulada por un diodo Zener de 10 V, ya que por su reducido consumo, del orden de los 3 mA, se torna impráctico otro tipo de regulador.

Para lograr una adecuada polarización del transistor Mosfet que conmuta a voltajes mayores que los de disparo, se utilizó un circuito integrado IR2110 (Fig. 4 b), (International Rectifier, 2019). Salida protegida por un Zener de 10 V.

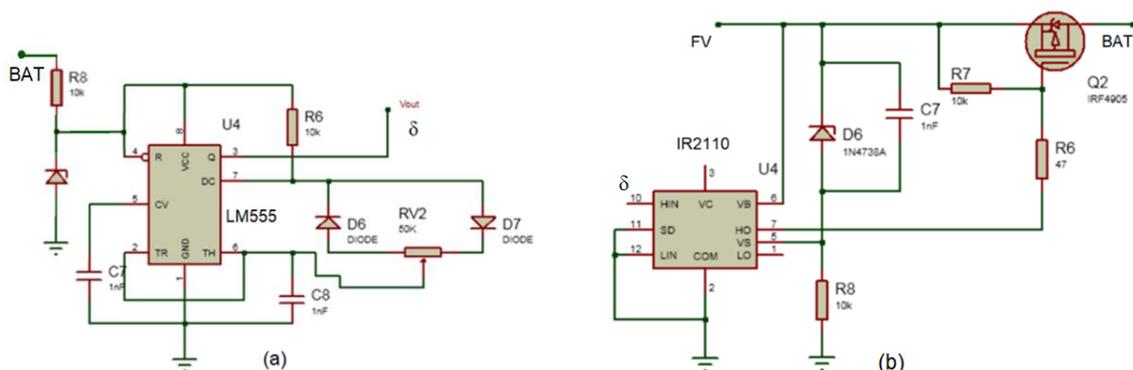


Figura 4 - (a) Etapa generadora del tren de pulsos constante y (b) Etapa de polarización del Mosfet.

2.3 Caracterización experimental

Posterior al diseño y simulación del regulador de carga c- δ , se ensayó el prototipo físico construido especialmente, para obtener datos experimentales reales y contrastarlos con resultados obtenidos empleando reguladores comerciales MPPT y PWM.

Para ello se empleó un simulador de módulos FV de manera de asegurar las mismas condiciones de generación en los tres ensayos, de manera de validar la comparación en el laboratorio. Este simulador se configura para entregar una V_{ca} de 21.0 V y una corriente de cortocircuito I_{cc} de 1.0 A.

Además se aseguran idénticas condiciones iniciales de tensión de batería para los tres ensayos (3.00 V). Las celdas de ion-litio utilizadas (LP18650C) son de tensión nominal 3,7 V y capacidad de carga de 5200 mAh. La batería se configura colocando tres celdas en serie. Por lo que la tensión nominal del sistema será de 11,1 V, excursionando entre los 9.0 V a tensión mínima para un SoC del 0% y los 12,6 V a tensión máxima permitida para un SoC del 100%.

Durante los ensayos se monitorearon los valores de tensión y corriente en la batería.

3. RESULTADOS DE LA SIMULACION

Las Fig. 5 a y b, presentan los resultados de simulación del SFA para el regulador c- δ . En las figuras se indican resaltado por puntos azules las polarizaciones sobre la curva I-V y sobre un diagrama potencia-tensión (P-V) del módulo FV. Se observa que estos puntos, se encuentran principalmente agrupados entre la zona del punto de máxima potencia (P_m) y la tensión de circuito abierto (V_{ca}). También es factible visualizar que hacia el final de la carga, la corriente se autorregula disminuyendo automáticamente, valiéndose de la forma típica del perfil de la curva I-V. Es decir, los valores de tensión en donde se polariza el módulo FV van desde un valor inferior a V_m (cuando la batería se encuentra descargada) hasta la V_{ca} (cuando la batería se encuentra completamente cargada) pasando por la región de máxima potencia de las curvas, lo que representa una importante ventaja en seguridad y simplificación para la topología desarrollada.

Por lo tanto, se logra una regulación de la carga sin necesidad de una realimentación del SoC de la batería. Protegiéndola y alargando su vida útil. De esta manera, puede utilizarse un convertidor CC/CC como el planteado para cumplir con las características de regulación de carga requeridas por la tecnología de acumulación sin tener que emplear algún método con etapas de control más complejas como las de MPPT o de PWM.

Para el caso específico del regulador c- δ se muestran las curvas simuladas de corriente y tensión con respecto al tiempo de carga (Fig. 6 a y b). Las mismas indican el perfil típico de carga de una batería de ion-litio, presentando una disminución de la corriente hacia el final del proceso y llevando al acumulador a tensión de "flotación".

Si la temperatura del generador FV fuera mayor a la estándar, como sucede en la mayoría de los casos prácticos a sol real, la tensión de circuito abierto V_{ca} disminuye, en este caso, no se conseguiría el SoC del 100% pero se mantiene la seguridad del sistema, constituyendo esta, la principal desventaja del sistema analizado.

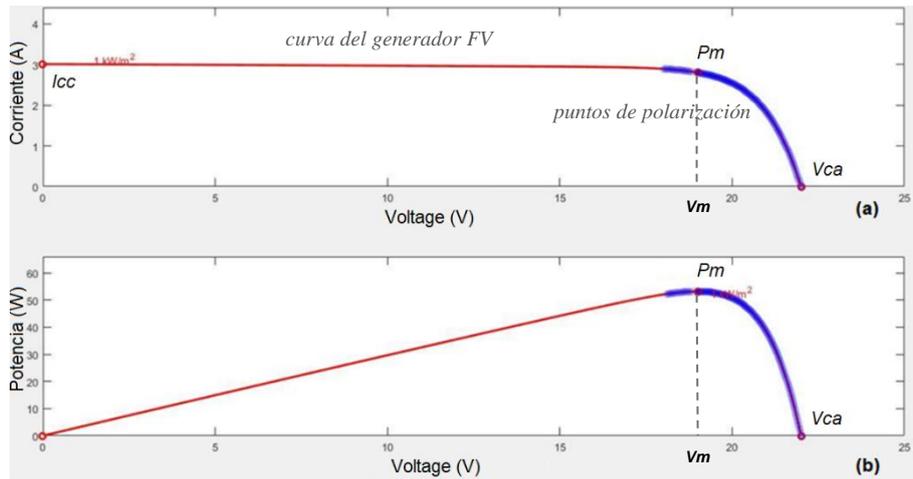


Figura 5 - (a) Curva I-V y (b) curva P-V del módulo FV simulado (rojo) y puntos de polarización, del proceso de carga de la batería (azul).

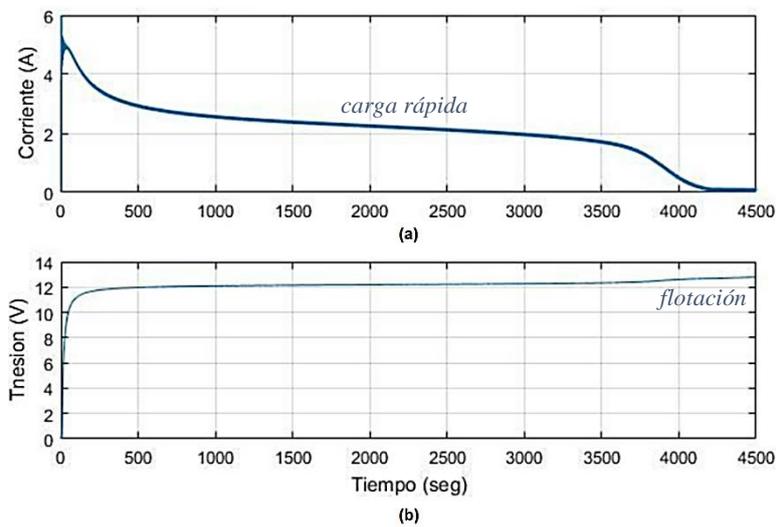


Figura 6 - (a) Curva I-t y (b) curva V-t del proceso de carga de la batería de ion-litio.

En la Fig. 7, se aprecia la comparativa entre los tres tipos de reguladores simulados con respecto al perfil del SoC en cada caso. Como era de esperar los resultados del regulador MPPT son los que logran completar la carga en el menor tiempo, aprovechando más eficazmente la energía disponible, sin embargo, el regulador c- δ logra realizar la carga completa en aproximadamente en 67 minutos (unos 4000 segundos), que a la vez es inferior al tiempo logrado por el sistema de carga por estrategia PWM, donde para el mismo tiempo no sobrepasa el 70% del SoC. La característica de recta lineal de los reguladores se explica en base a que las condiciones FV se mantuvieron fijas en toda la simulación de manera de facilitar la comparación.

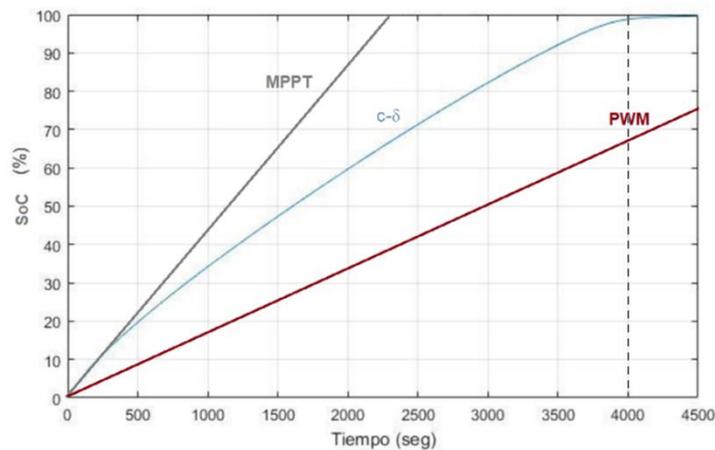


Figura 7 - Perfiles del SoC con respecto al tiempo simulados para los tres tipos de reguladores utilizados.

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

El resultado más interesante de mostrar es la evolución de la corriente de carga, que se resume presentando las curvas de corriente con respecto al tiempo con líneas continuas y las tensiones en líneas de puntos de la Fig. 8. En la misma, se muestra la comparativa experimental de los tres ensayos. En la figura puede apreciarse como en los casos en que existe adaptación de impedancias (c- δ y MPPT) la corriente en la batería supera a la I_{cc} del módulo FV, a diferencia del PWM que es de conmutación directa. Nuevamente en los tres casos, se presenta el mismo comportamiento en cuanto a los resultados simulados, siendo el más eficiente de los tres el regulador MPPT, seguido del c- δ y por último el PWM en lograr la carga completa de la batería. En cuanto al c- δ , se aprecia que la polarización empieza en un punto inferior a P_m , este valor es el que resulta simplemente de la relación de ciclo útil fijado cuando las baterías están totalmente descargadas. Luego la corriente aumenta gradualmente, hasta alcanzar el punto de P_m (punto más elevado de la curva de corriente) logrando aprovechar tal condición, junto con la adaptación de impedancias. Finalmente lo supera y disminuye estableciendo el proceso de carga lenta, consiguiendo la autorregulación, característica destacada de esta topología.

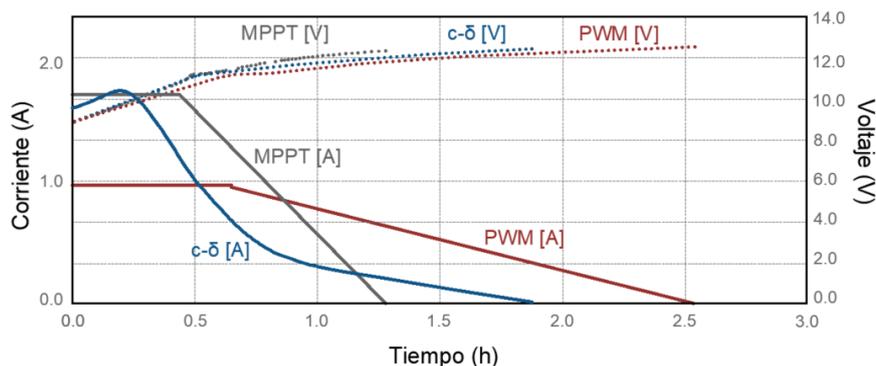


Figura 8 - Perfiles de carga experimentales de corriente (líneas continuas) y voltaje (líneas de puntos) en el tiempo para los tres tipos de reguladores utilizados.

Las curvas de carga del MPPT y PWM muestran en una primera etapa la carga rápida a corriente constante, aumentando la tensión en bornes de la batería a medida que se carga. Luego, cuando se alcanza la tensión denominada de la fase de absorción, el regulador mantiene la tensión en bornes por lo que produce la reducción gradual de la corriente hasta alcanzar un SoC del 100% de acuerdo la estrategia de carga que poseen los mismos.

De las gráficas resulta, un tiempo total carga de alrededor de 1.25 hs para el regulador MPPT, de 1.8 hs para el c- δ y poco más de 2.5 hs en completar la carga para el PWM. En otras palabras, el c- δ completa la carga aproximadamente un 30% más lento con respecto al MPPT y a su vez un 30% más rápido que el PWM.

5. CONCLUSIONES

Se desarrolló un regulador de carga de uso solar para baterías de ion-litio, con una etapa de conversión CC/CC que funciona con modulación de ciclo útil constante. Este regulador presenta bajo costo y sencilla implementación para realizar la adaptación de impedancias entre la batería y el generador FV. Además, aprovecha las características de autorregulación que provee el perfil típico de la curva I-V del generador FV consiguiendo optimizar su desarrollo.

En el trabajo se indican las pautas principales de modelado de un SFA incluyendo el generador FV y la batería de ion-litio, como así también se indican los aspectos esenciales de diseño de la topología CC/CC reductora de ciclo útil constante, estableciendo sus ventajas y desventajas.

El regulador c- δ , fue comparado tanto de forma teórica como experimental para su validación. Se emplearon en la comprobación dos reguladores comerciales uno con sistema MPPT, y otro con PWM. En ambos casos se obtuvo, que el regulador MPPT realizó la carga de la batería de forma más rápida y eficaz en el menor tiempo, el regulador PWM en el mayor tiempo y c- δ desarrollado en un tiempo intermedio.

Del análisis de estos resultados se concluye que el prototipo de regulador de carga c- δ es alrededor un 30% más lento en completar el proceso de carga de la batería de ion-litio, con respecto al regulador MPPT, mientras que a su vez, aproximadamente un 30% más rápido que el regulador PWM.

Se concluye que manteniendo constante el ciclo de trabajo del regulador, es posible realizar la carga de la batería de manera eficiente y sencilla respetando las etapas de carga rápida y regulación, sin necesidad de un lazo de realimentación. Salvando la desventaja enunciada, que debe ser tenida en cuenta en el diseño, en cuanto a la variación de la V_{ca} con respecto a los cambios climáticos.

De esta forma el prototipo desarrollado es una opción costo eficiente recomendable para su utilización en sistemas fotovoltaicos autónomos, en especial en aquellos en que los requerimientos energéticos no ameriten una mayor complejidad o rendimiento del sistema.

REFERENCIAS

- Adam, S. M., Wang, K., Ma, J., & Man, K. L. (2021). Soft Modeling of the Photovoltaic Modules Based on MATLAB/Simulink. In *2021 25th International Conference Electronics* (pp. 1-6). IEEE.
- Bates, J. B., Dudney, N. J., Neudecker, B., Ueda, A., & Evans, C. D. (2000). Thin-film lithium and lithium-ion batteries. *Solid state ionics*, 135(1-4), 33-45.
- Carter, B., Matsumoto, J., Prater, A., & Smith, D. (1996, August). Lithium ion battery performance and charge control. In *IECEC 96. Proceedings of the 31st Intersociety Energy Conversion Engineering Conference* (Vol. 1, pp. 363-368). IEEE.
- Easton, R. L., & Votaw, M. J. (1959). Vanguard I IGY satellite (1958 beta). *Review of Scientific Instruments*, 30(2), 70-75.
- Firman, A. Cáceres, M. Vera, González Mayans, A. de la Casa, J. (2020). Caracterización y extracción de parámetros eléctricos en módulos de lámina delgada. VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar – Fortaleza.
- Green, M. A. (2002). Photovoltaic principles. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 14(1-2), 11-17.
- Hauke, B. (2011). Basic Calculation of a Buck Converter's Power Stage. Texas Instruments. Low Power DC/DC Applications. Application Report.
- International Rectifier (2019). High and low side driver IR2110(S)PbF/IR2113(S)PbF. Data sheet.
- Laws, N. D., Epps, B. P., Peterson, S. O., Laser, M. S., & Wanjiru, G. K. (2017). On the utility death spiral and the impact of utility rate structures on the adoption of residential solar photovoltaics and energy storage. *Applied energy*, 185, 627-641.
- Luque, A. and Hegedus, S. (2011). *Handbook of photovoltaic science and engineering*. Wiley.com.
- Manthiram, A. (2017). An outlook on lithium ion battery technology. *ACS central science*, 3(10), 1063-1069.
- Miyatake, S., Susuki, Y., Hikiyara, T., Itoh, S., & Tanaka, K. (2013). Discharge characteristics of multicell lithium-ion battery with nonuniform cells. *Journal of Power Sources*, 241, 736-743.
- Niccolai, A., Dolara, A., & Grimaccia, F. (2018). Analysis of Photovoltaic Five-Parameter Model. In *2018 International Conference on Smart Systems and Technologies (SST)* (pp. 205-210). IEEE.
- Shepherd, C. M. (1965). Design of primary and secondary cells: II. An equation describing battery discharge. *Journal of the Electrochemical Society*, 112(7), 657.
- Shockley, W. (1949). The Theory of p-n Junctions in Semiconductors and p-n Junction Transistors. *Bell System Technical Journal*, 28(3), 435-489.
- Texas Instruments (2000). LM555 Timer. Data sheet.
- Texas Instruments. (2005) Li-Ion Battery Charger Solution Using an MSP430™ MCU. Application Report
- Tiwari, G. N., & Dubey, S. (2009). *Fundamentals of photovoltaic modules and their applications*. Royal Society of Chemistry.
- Trano, S. (2021). *Safer Lithium-Metal Batteries through Lithium Protection and Thermal-Electrochemical Modelling* (Doctoral dissertation, Politecnico di Torino).
- Wu, Y., Xie, L., Ming, H., Guo, Y., Hwang, J. Y., Wang, W., & Ming, J. (2020). An empirical model for the design of batteries with high energy density. *ACS Energy Letters*, 5(3), 807-816.

CONSTANT DUTY CYCLE SOLAR CHARGE REGULATOR FOR LITHIUM-ION BATTERIES

Abstract. *This article presents the design, implementation, and analysis of the results of a constant duty cycle solar charge regulator to be used in autonomous photovoltaic systems based on lithium-ion batteries. The regulator works with a constant duty cycle, dispensing with feedback from the battery state of charge, reducing complexity and cost. A simulation of autonomous photovoltaic systems is performed to help to explain how the regulator works. In addition, the main design aspects are presented to be compared experimentally with commercial regulators under identical test conditions. In conclusion, the constant duty cycle solar charge regulator suitably achieves the lithium-ion battery full charge and also, it presents an intermediate efficiency with the regulators more complex with a feedback loop. Like, are the maximum power point tracker regulator and the pulse width modulator regulator. In conclusion, the constant duty cycle solar charge regulator is a cost-effective solution, and it is appropriate to be used in autonomous photovoltaic systems.*

Key words: *Solar Energy, Photovoltaic, Charge Regulator.*