

# Banco de Ensayos para la Caracterización del Rendimiento energético y del Rendimiento del MPPT en Convertidores Fotovoltaicos

F. Casellas, G. Velasco y R. Piqué

Escola Universitària d'Enginyeria Tècnica Industrial de  
Barcelona (EUETIB)  
Departament d'Enginyeria Electrònica  
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

F. Guinjoan

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Telecomunicació  
de Barcelona (ETSETB)  
Departament d'Enginyeria Electrònica  
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

**Resumen**— En este trabajo se presenta una propuesta de ensayo para caracterizar el comportamiento del algoritmo de seguimiento de punto de máxima potencia (MPPT: *Maximum Power Point Tracking*) programado en los convertidores fotovoltaicos (PV: *Photo-Voltaic*). Este ensayo también permite estimar el rendimiento energético de dichos convertidores. Para los ensayos propuestos se utiliza un simulador de generador fotovoltaico (SAS: *Solar Array Simulator*) junto con un equipo para la medida y registro de potencia instantánea. Los convertidores ensayados (DUT: *Device Under Test*) para verificar el banco de pruebas utilizado son: un inversor con inyección a red y un convertidor DC/DC para carga de baterías. Para la evaluación del sistema se han realizado dos tipos de ensayos, uno denominado estático, para evaluar las fluctuaciones del algoritmo MPPT alrededor del punto de máxima potencia (MPP: *Maximum Power Point*) del generador PV y otro ensayo, denominado dinámico, para evaluar el comportamiento del MPPT cuando se produce un cambio en el valor de los parámetros que determinan el MPP del generador PV. Finalmente se presentan los resultados obtenidos tras los ensayos realizados y se valora el comportamiento de los DUT.

**Palabras Clave** - Rendimiento del MPPT; rendimiento energético de convertidores PV.

## I. INTRODUCCIÓN

Dentro del sistema de generación PV el MPPT es el subsistema encargado de adaptar a la electrónica de conversión las características eléctricas fluctuantes que presenta el generador PV y, de esta forma, extraer en cada instante de tiempo la máxima potencia disponible en el generador PV, valor que está definido por las condiciones ambientales [1].

Este proceso de adaptación de la electrónica del convertidor PV a las magnitudes eléctricas que definen la potencia instantánea extraída del generador PV se realiza mediante la algorítmica de control implementada en el MPPT. Estos algoritmos suelen basar su funcionamiento en métodos que realizan una perturbación sobre una magnitud eléctrica del generador PV (normalmente la tensión) y observando si la potencia instantánea suministrada por el generador PV ha aumentado o disminuido su valor [1]. De esta forma el sistema trata de operar en el MPP dentro de la curva I-V del generador PV. La Fig. 1 muestra la curva potencia-tensión de un generador y los puntos de trabajo impuestos al sistema por un algoritmo de MPPT hasta alcanzar el MPP del generador PV.

En este sentido es fácilmente comprensible que, dado un MPP en un determinado generador PV conectado a diferentes convertidores con distintas implementaciones de los algoritmos para realizar el MPPT, se puedan obtener distintos valores del rendimiento en el proceso de extracción de la máxima potencia disponible en el generador PV, con las mismas condiciones ambientales.

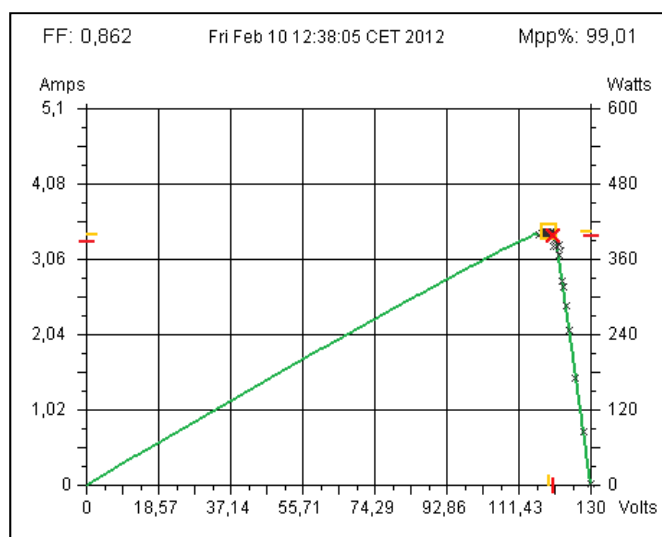


Figura 1. Curva potencia-tensión del panel PV, la marca señala el MPP

Con el objetivo de poder evaluar de forma objetiva la bondad en el desempeño de su función de los algoritmos de MPPT de un convertidor PV, se trata de generar de forma controlada una característica I-V de un generador PV y aplicarla a la entrada del convertidor a ensayar. De esta forma se podrá evaluar el rendimiento alcanzado por el MPPT en unas determinadas condiciones de funcionamiento mediante la relación entre la potencia absorbida desde el generador PV y la potencia máxima de la curva I-V generada.

Los ensayos propuestos se realizarán utilizando un emulador de generador PV (SAS) y un equipo para la medida y adquisición de las variables eléctricas, registrando cada segundo los valores de la tensión, la corriente y la potencia absorbida por los convertidores PV donde está implementado el algoritmo MPPT a evaluar.

## II. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA PARA EL ENSAYO

El objeto de los ensayos propuestos es determinar los rendimientos estáticos y dinámicos en el MPPT [2-3], para lo que se han de identificar los distintos elementos que intervienen en el test como es el emulador de panel fotovoltaico, el sistema para monitorización de las variables que intervienen en el MPP y el convertidor donde está implementado el MPPT.

Estos ensayos han de poder reproducir el comportamiento de un generador PV en distintas condiciones de funcionamiento y registrar los puntos de operación impuestos por el MPPT del convertidor ensayado.

El banco de ensayos propuesto, representado en la Fig. 2, es un sistema controlado mediante un ordenador personal con conexión a intranet. El acceso al SAS permite configurar los parámetros que definen la curva potencia-tensión del generador PV a emular, utilizándose como parámetros la corriente de cortocircuito  $I_{SC}$ , la tensión en circuito abierto  $V_{OC}$ , y la potencia en el MPP (determinada por los valores de  $I_{MPP}$  y  $V_{MPP}$ ) del generador PV a simular.

El equipo de monitorización y registro permite medir de forma síncrona las variables que definen la potencia de entrada al convertidor objeto de ensayo ( $I_{IN}$  y  $V_{IN}$ ) simultáneamente con las magnitudes que definen de la potencia de salida ( $I_{OUT}$  y  $V_{OUT}$ ) entregada a la carga.

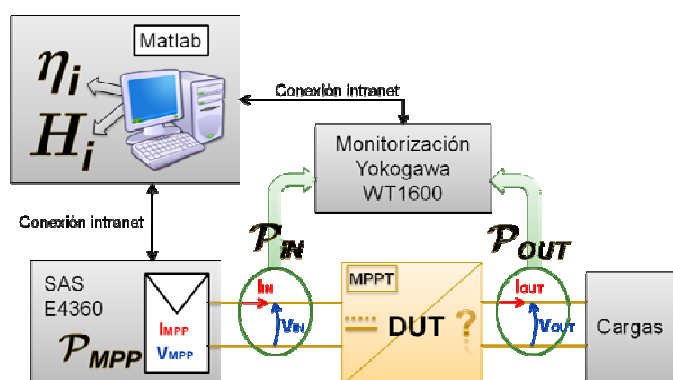


Figura 2. Sistema propuesto para los ensayos de rendimientos

### A. Dispositivo bajo test, DUT

Se ha realizado el ensayo sobre dos tipos de convertidores PV con MPPT, un inversor PV para inyección de energía a la red eléctrica y un convertidor DC/DC para la carga de baterías en instalaciones autónomas. Los dos equipos poseen implementados algoritmos MPPT en su etapa de conexión al generador PV.

El inversor con conexión a red es el modelo SB700 de SMA configurado a una potencia máxima limitada a 460 W [4], mientras que el convertidor DC/DC para la carga de baterías corresponde a un prototipo no comercializado.

### B. Simulador de generador PV (SAS)

El generador PV se implementa sobre un equipo SAS que funciona como emulador del generador. Este equipo permite configurar unas condiciones de funcionamiento programadas de forma que se puedan reproducir en los diferentes ensayos de

los DUT. Estos parámetros son modificables dinámicamente mediante una conexión por intranet entre el SAS y un ordenador personal. El SAS utilizado es el E4360 de Agilent con un módulo de potencia E4362 de 600 W de potencia máxima [5].

### C. Equipo de monitorización y registro

El equipo de monitorizado y registro utilizado es un medidor de potencia de Yokogawa, modelo WT1600 [6], utilizado como medidor de potencia y que permite adquirir de forma síncrona las variables tensión y corriente suministradas por el SAS y que son impuestas por el MPPT implementado en el convertidor de potencia ensayado.

En el medidor de potencia adquiere los valores instantáneos de tensión y corriente a una frecuencia de muestreo fija de 200 ksamples/s. Un módulo con DSP calcula, durante un tiempo de integración que puede ser definido por el usuario, los valores RMS (Root Mean Square) de estas magnitudes y de la potencia activa almacenándolos posteriormente en la memoria del medidor. La Fig. 3 muestra el esquema de la etapa de entrada de un canal del equipo medidor.

El registro en fichero de los datos monitorizados de tensión, corriente y potencia calculados, se puede realizar con una cadencia programable, habiéndose elegido para esta aplicación un periodo de un segundo.

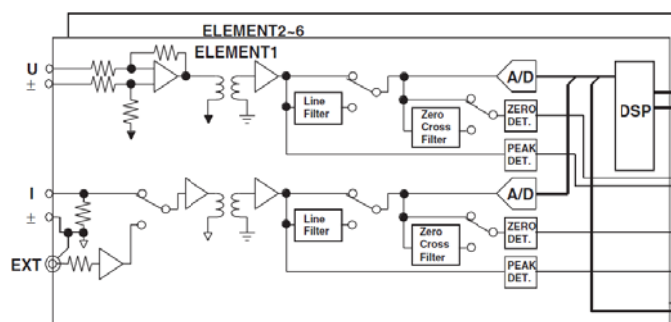


Figura 3. Etapa de entrada de un canal del medidor de potencia [7].

Con el equipo medidor de potencia se ha monitorizado la entrada del convertidor ensayado ( $I_{IN}$  y  $V_{IN}$ ) determinando la potencia extraída del SAS ( $P_{IN}$ ), pudiéndose así calcular en con el ordenador el rendimiento del MPPT. Mediante otro canal del equipo de monitorización también se registran las magnitudes de la salida del convertidor ( $I_{OUT}$  y  $V_{OUT}$ ) determinando la potencia suministrada a la carga ( $P_{OUT}$ ), permitiendo el cálculo del rendimiento energético en el proceso de conversión.

Respecto a los errores del instrumento, en la Tabla I se presentan los errores en la medida de potencia con una lectura de 400 W. Correspondiendo con los valores máximos de los errores que pueden aparecer en este documento.

Tabla I: Errores máximos en el equipo de medida

Medida	Fondo de escala	Error especificado	Error máximo
DC	750 W	$\pm(10^{-3} \cdot L + 2 \cdot 10^{-3} \cdot FE)$	$\pm 1,9$ W
DC	1200 W	$\pm(10^{-3} \cdot L + 2 \cdot 10^{-3} \cdot FE)$	$\pm 2,8$ W
AC	3000 W	$\pm(10^{-3} \cdot L + 50 \cdot 10^{-6} \cdot FE)$	$\pm 0,55$ W

### III. DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS REALIZADOS

Mediante los ensayos propuestos se obtendrán tres potencias que permiten realizar los cálculos posteriores.

- 1) Potencia correspondiente al valor programado en el SAS para el MPP (denominada como  $P_{MPP}$ ).
- 2) Potencia que absorbe el DUT del generador PV debido a los puntos de operación fijados por su MPPT (denominado como  $P_{IN}$ ). Esta potencia es medida por el equipo de monitorización.
- 3) Potencia entregada por el DUT a la carga y denominada como  $P_{OUT}$ . Esta potencia también es medida por el equipo de monitorización.

La relación entre las dos primeras potencias define el rendimiento del MPPT conseguido por el seguidor del DUT.

$$\eta_{MPPT} = \frac{P_{IN}(n)}{P_{MPP}(n)} \cdot 100 \quad (1)$$

La relación entre las dos últimas potencias define el rendimiento energético conseguido por el DUT.

$$\eta_E = \frac{P_{IN}(n)}{P_{OUT}(n)} \cdot 100 \quad (2)$$

#### A. Ensayos para obtener el rendimiento estático del DUT

Se corresponden con los ensayos estacionarios en los valores próximos al MPP del panel PV, mientras el MPPT realiza su función sin perturbaciones externas, manteniendo invariantes los parámetros programados en el SAS.

Estos valores de los rendimientos del MPPT y de potencia son calculados por el ordenador personal como una relación de potencias promediadas durante 2 min, a partir de los datos obtenidos desde el equipo de monitorizado y los parámetros de configuración en el SAS.

#### B. Ensayos para obtener el rendimiento dinámico del MPPT

Se corresponden con los ensayos donde los parámetros definidos en el SAS modifican el MPP que presenta el generador PV según una secuencia preestablecida. Primero de tipo ascendente desde reposo hasta 400 W en saltos de 100 W y después con una secuencia similar pero descendente. La duración del ensayo para cada potencia programada en el SAS es de 10 min en cada posición del MPP.

En este ensayo el MPPT realiza su función, mientras los valores MPP varían escalonadamente en saltos de 100 W y el DUT determina sus características del MPPT para realizar el seguimiento.

Con los datos obtenidos desde el elemento de monitorizado y los parámetros de configuración en el SAS, el ordenador personal calcula los valores de energía como la suma de los valores de las potencias adquiridas durante el intervalo del ensayo de 70 min. El rendimiento se determina como una relación de los sumatorios de las potencias adquiridas.

$$H_{MPPT} = \frac{\sum_{n=1}^Q P_{IN}(n) \cdot T_S}{\sum_{n=1}^Q P_{MPP}(n) \cdot T_S} \cdot 100 \quad (3)$$

### IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En esta sección se muestran los resultados ofrecidos por el sistema de caracterización implementado al ensayar los dos tipos de convertidores utilizados.

Estos resultados están clasificados en dos grupos, según correspondan a ensayos estacionarios o a ensayos dinámicos, y en dos subgrupos en función si se evalúa el rendimiento energético o del MPPT.

#### A. Ensayos estacionarios

Los ensayos, descritos en el apartado III-A, se han realizado al inversor PV con conexión a red, obteniéndose el rendimiento energético ( $\eta_E$ ), mostrado en la Fig. 4, y el rendimiento de su MPPT ( $\eta_{MPPT}$ ), mostrado en la Fig. 5.

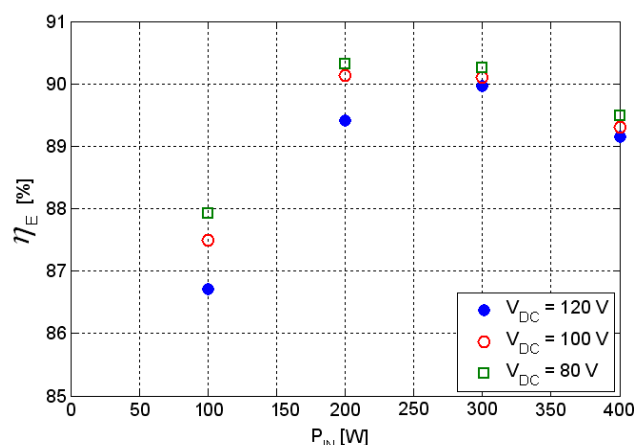


Figura 4. Rendimiento energético del inversor fotovoltaico

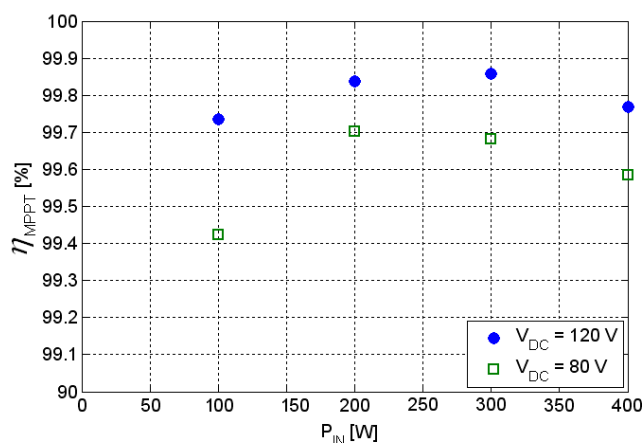


Figura 5. Rendimiento del MPPT del inversor fotovoltaico

Los datos anteriores muestran que el inversor fotovoltaico analizado presenta un excelente rendimiento de su MPPT, que es prácticamente superior al 99,5 % en la mayoría de las condiciones de funcionamiento ensayadas. En cuanto al

rendimiento energético obtenido, los valores presentados son característicos de los inversores fotovoltaicos de conexión a red con transformador de aislamiento para baja frecuencia [8].

### B. Ensayos dinámicos

Los ensayos, descritos en el apartado III-B, se han realizado al inversor PV con conexión a red y al convertidor para la carga de baterías en sistemas aislados. Al igual que en los ensayos anteriores se han obtenido datos referentes al rendimiento energético ( $\eta_E$ ) y al rendimiento del MPPT ( $\eta_{MPPT}$ ) de ambos equipos.

#### 1) Inversor con conexión a red

La Fig. 6 muestra la evolución temporal de la máxima potencia programada en el SAS ( $P_{MPP}$ ) y la potencia extraída por el inversor ( $P_{IN}$ ) durante el ensayo. En esta figura se aprecia el tiempo que requiere el inversor para empezar a inyectar energía a la red desde el momento de su conexión (que se puede estimar en 80 s). La Fig. 7 muestra la evolución temporal del rendimiento del MPPT ( $\eta_{MPPT}$ ) durante este mismo ensayo.

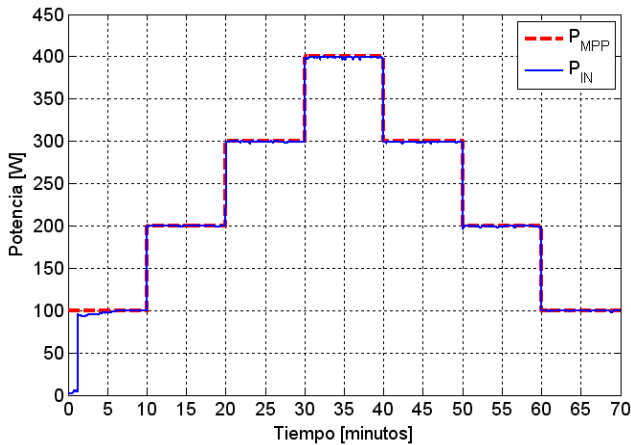


Figura 6. Potencia extraída del SAS por el inversor fotovoltaico

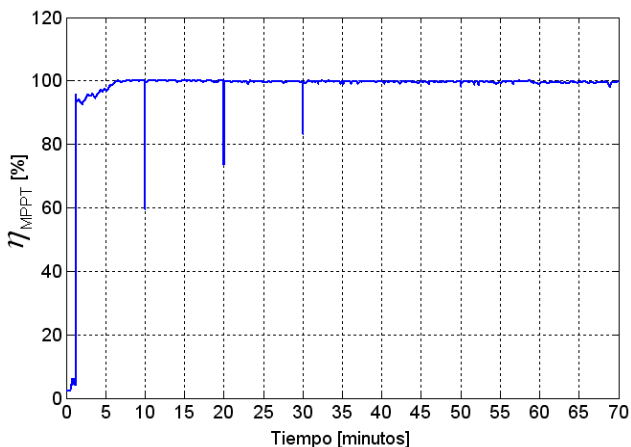


Figura 7. Evolución del rendimiento del MPPT del inversor fotovoltaico

A partir de los resultados anteriores se puede determinar el rendimiento dinámico del MPPT del inversor fotovoltaico durante el ensayo realizado:

$$H_{MPPT} = \frac{\sum_{n=1}^{4200} P_{IN}(n)}{\sum_{n=1}^{4200} P_{MPP}(n)} \cdot 100 = 98,9 \% \quad (4)$$

Si se desprecia el transitorio de conexión del inversor (los primeros 80 s), el nuevo rendimiento dinámico del MPPT del inversor fotovoltaico se puede estimar en:

$$H_{MPPT} = \frac{\sum_{n=80}^{4200} P_{IN}(n)}{\sum_{n=80}^{4200} P_{MPP}(n)} \cdot 100 = 99,6 \% \quad (5)$$

La evolución del rendimiento energético del inversor fotovoltaico durante el ensayo se muestra en la Fig. 8.

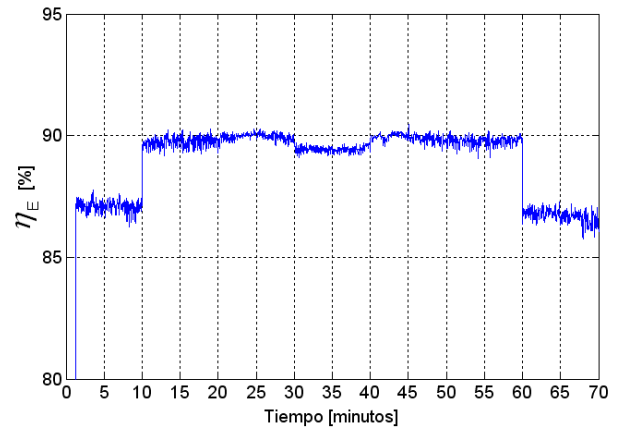


Figura 8. Evolución del rendimiento energético del inversor fotovoltaico

#### 2) Convertidor para carga de baterías

La Fig. 9 muestra la evolución temporal de la máxima potencia programada en el SAS ( $P_{MPP}$ ) y la potencia extraída por el regulador de carga ( $P_{IN}$ ) durante este ensayo. En esta figura se aprecia que desde el momento de la conexión del convertidor se empieza a inyectar energía a las baterías. La Fig. 10 muestra la evolución temporal del rendimiento del MPPT ( $\eta_{MPPT}$ ) durante este mismo ensayo.

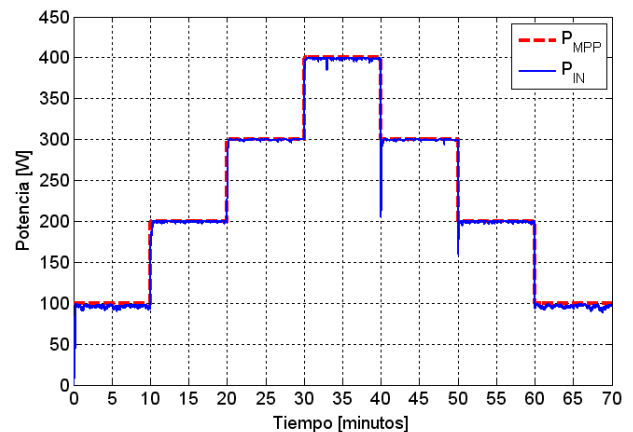


Figura 9. Potencia extraída del SAS por el cargador de baterías

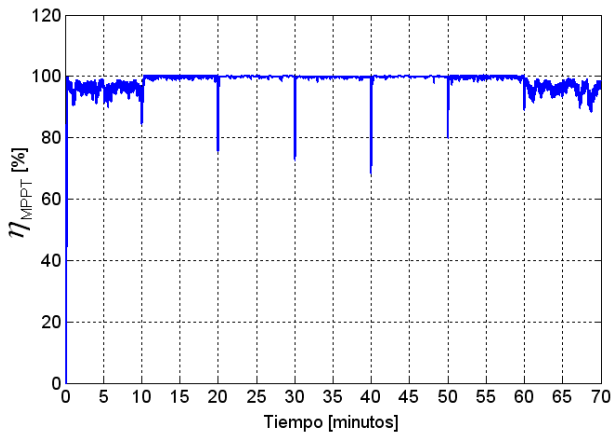


Figura 10. Evolución del rendimiento del MPPT del cargador de baterías

A partir de los resultados anteriores se puede determinar el rendimiento dinámico del MPPT del convertidor cargador de baterías:

$$H_{MPPT} = \frac{\sum_{n=1}^{4200} P_{IN}(n)}{\sum_{n=1}^{4200} P_{MPP}(n)} \cdot 100 = 99,1 \% \quad (6)$$

Finalmente, la evolución del rendimiento energético del convertidor cargador de baterías durante el ensayo realizado se muestra en la Fig. 11.

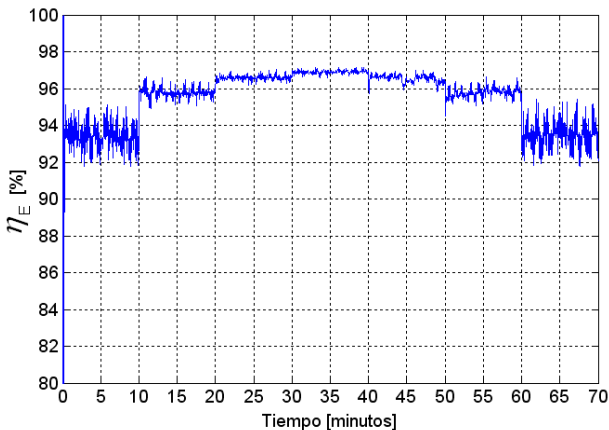


Figura 11. Evolución del rendimiento energético del cargador de baterías

## V. CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado un banco de pruebas para evaluar el rendimiento de los algoritmos MPPT implementados en los convertidores utilizados en aplicaciones fotovoltaicas. El banco de pruebas presentado también permite determinar el rendimiento energético de estos convertidores.

Para verificar la correcta funcionalidad del banco de pruebas descrito se han ensayado dos convertidores utilizados de forma habitual en las aplicaciones fotovoltaicas: un inversor PV para la inyección de energía a red y un convertidor DC/DC utilizado para la carga de baterías en sistemas fotovoltaicos autónomos.

También se ha descrito un protocolo de ensayos a realizar con el fin de poder evaluar los dos valores con los que habitualmente se caracteriza el rendimiento de los algoritmos de MPPT que habitualmente incorporan estos convertidores, denominados rendimiento estático y rendimiento dinámico.

Finalmente, también se presentan los resultados obtenidos tras someter a estos ensayos a los dos tipos de convertidores PV descritos anteriormente.

Un primer análisis de estos resultados pone de manifiesto diferencias significativas en el comportamiento de los algoritmos MPPT implementados en ambos dispositivos:

- En el inversor de conexión a red el algoritmo MPPT no se activa hasta los 80 s de haberlo conectado al generador PV, sin embargo, el algoritmo MPPT del convertidor para carga de baterías se activa de forma instantánea.

Esta diferencia de comportamiento se debe, básicamente, a dos factores. Por un lado el inversor se alimenta del generador PV mientras que el convertidor cargador se alimenta de las baterías. Esto implica que el arranque y auto-chequeo del inversor se ha de realizar una vez se conecta el generador PV, procesos que se realizan en el cargador al conectar la batería, estando preparado para operar en el mismo momento que se conecta el generador.

Por otro lado, el inversor de inyección a red se ha de sincronizar con la red eléctrica que tiene conectada como carga antes de activar su MPPT y empezar a inyectar energía. Este periodo de sincronización no existe en un convertidor cargador de baterías.

- A pesar de que el valor del rendimiento dinámico del MPPT es similar en los dos convertidores ensayados, el algoritmo implementado en el inversor con conexión a red es más lento que el utilizado por el cargador de baterías. Ante incrementos súbitos del MPP el inversor tarda más tiempo en comenzar la búsqueda del nuevo MPP que el equipo cargador de baterías.
- En cuanto al rendimiento energético, los resultados obtenidos muestran que el valor obtenido para el inversor oscila entre el 87% y el 90%, mientras que el convertidor cargador de baterías presenta un rendimiento comprendido entre un 94% y un 97%. Esta gran diferencia es directamente imputable al transformador de baja frecuencia que utiliza a modo de aislamiento en inversor de conexión a red, transformador que no utiliza el convertidor de carga de baterías.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha desarrollado en las instalaciones que el grupo de investigación EdePAE dispone en la EUETIB y ha sido parcialmente financiado por el Ministerio español de Ciencia e Innovación a través del proyecto con referencia: DPI-2009-14713-C03-03.

## REFERENCIAS

- [1] de Brito, M.A.G.; Sampaio, L.P.; Junior, L.G.; Canesin, C.A.; , "Evaluation of MPPT techniques for photovoltaic applications," Industrial Electronics (ISIE), 2011 IEEE International Symposium on , vol., no., pp.1039-1044, 27-30 June 2011.



- [2] Valentini, M.; Raducu, A.; Sera, D.; Teodorescu, R.; , "PV inverter test setup for European efficiency, static and dynamic MPPT efficiency evaluation," Optimization of Electrical and Electronic Equipment, 2008. OPTIM 2008. 11th International Conference on , vol., no., pp.433-438, 22-24 May 2008
- [3] H. Matsukawa, K. Koshiishi, H. Koizumi, K. Kurokawa, M. Hamada, L. Bo "Dynamic evaluation of maximum power point tracking operation with PV array simulation," Sol Energy Mater Sol Cells, 75 (2003), pp. 537-546
- [4] Manual técnico Sunny Boy 700, [En línea]. Disponible: <http://www.sma-iberica.com>
- [5] "E4360A Modular Solar Array Simulator Mainframe," [En línea]. Disponible: <http://www.home.agilent.com>
- [6] Bulletin 7601-00E, "Digital Power Meter WT1600," [En línea]. Disponible: [http://c418683.r83.cf2.rackcdn.com/uploaded/bu7601\\_00e\\_044.pdf](http://c418683.r83.cf2.rackcdn.com/uploaded/bu7601_00e_044.pdf)
- [7] "WT1600 Digital Power Meter User's Manual," [En línea]. Disponible: <http://support.us.yokogawa.com>
- [8] Kjaer, S.B.; Pedersen, J.K.; Blaabjerg, F.; , "A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules," Industry Applications, IEEE Transactions on , vol.41, no.5, pp. 1292- 1306, Sept.-Oct. 2005