

Estudio y simulación de sistemas de conversión fotovoltaica-eléctrica mediante Matlab/Simulink

J. F. Jiménez-Ortiz, D. Biel

UPC- Departamento de Ingeniería Electrónica. Vilanova i la Geltrú, España. (biel@eel.upc.edu)

Resumen— El presente artículo describe una herramienta de simulación desarrollada en entorno Matlab/Simulink que permite la realización de experiencias descriptivas del funcionamiento de los sistemas fotovoltaicos. Dicha herramienta se formula con el objetivo de dar soporte y apoyar el aprendizaje de los fundamentos de los sistemas de conversión fotovoltaica-eléctrica. Las experiencias de simulación se han desarrollado para mostrar desde el comportamiento de las células fotovoltaicas hasta complejos sistemas conectados a la red eléctrica.

I. INTRODUCCIÓN

Las energías renovables son en la actualidad un tema de enorme profusión tecnológica, social y cultural. Las enseñanzas de ciclo superior se adaptan a tales cambios y, por ello, en las titulaciones de ingeniería han surgido materias y asignaturas de exposición teórica y práctica que estudian el tratamiento, el análisis y el diseño de sistemas basados en energías renovables.

Los sistemas fotovoltaicos están formados por un conjunto de dispositivos mecánicos, eléctricos y electrónicos cuya funcionalidad principal es captar la energía solar disponible y transformarla en energía eléctrica útil. La enseñanza de este tipo de sistemas constituye una temática multidisciplinar al incorporar conceptos de física, electrónica, informática y teoría de control. Es esta característica la que provoca que sea un campo de difícil comprensión para los estudiantes noveles que se introducen en este ámbito. Las herramientas de simulación pueden ayudar a un mejor y más profundo aprendizaje cuando las enseñanzas teóricas se acompañan de resultados visuales y, por ello, fácilmente entendedores. Este artículo presenta un conjunto de experiencias desarrolladas en Matlab/Simulink que cubren aquellos aspectos de comprensión más difícil de los sistemas fotovoltaicos. Los siguientes apartados de la presente comunicación describen y detallan las diversas experiencias propuestas para la ayuda al ensayo y aprendizaje de los sistemas de conversión fotovoltaica-eléctrica.

II. EXPERIENCIA PRIMERA: CÉLULA Y AGRUPACIÓN FOTOVOLTAICA. PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE UN PANEL FOTOVOLTAICO

Una agrupación fotovoltaica está compuesta por células y paneles solares (dependiendo de su tamaño). La primera experiencia propuesta pretende iniciar al estudiante en la caracterización de agrupaciones fotovoltaicas incidiendo principalmente en su característica no lineal y variante en el tiempo (al

hacerlo la irradiancia y temperatura). Debe indicarse que éste es un punto crucial en el aprendizaje de los sistemas fotovoltaicos debido a las dificultades que conlleva la comprensión del concepto de fuente de potencia (en lugar de las tradicionales fuentes de tensión o corriente) para los no habituados en este tipo de fuentes de energía.

Para el diseño del modelo de panel fotovoltaico en Matlab/Simulink se ha partido de la ecuación que define el comportamiento de una célula solar:

$$I = I_L - I_o \cdot \left(e^{\frac{q(V+R_s I)}{nKT}} - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (1)$$

La corriente fotogenerada I_L depende de las variaciones de irradiancia y temperatura [1]. Se han definido los siguientes parámetros y variables: $q=1.6021 \cdot 10^{-19}$ C: Carga elemental, $K=1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K: Constante de Boltzman, T : Temperatura en grados Kelvin, n : Factor de idealidad del diodo, I_L : Corriente fotogenerada, I_o : Corriente inversa de saturación del diodo, V : Tensión del panel, I : Corriente del panel, R_s : Resistencia interna en serie, R_{sh} : Resistencia interna en paralelo.

El panel fotovoltaico surge por la necesidad de adecuar los niveles de tensión y corriente del generador fotovoltaico a los requisitos del sistema eléctrico al cual alimenta. Para ello se disponen las celdas fotovoltaicas en serie o paralelo en función de las necesidades. La ecuación (2) permite caracterizar el comportamiento de una agrupación fotovoltaica [1]:

$$I = N_p \left(I_L - I_o \cdot \left(e^{\frac{q \left(\frac{V}{N_s} + \frac{R_s I}{N_p} \right)}{nKT}} - 1 \right) - \frac{\frac{V}{N_s} + \frac{R_s I}{N_p}}{R_{sh}} \right) \quad (2)$$

donde N_s es el número de celdas en serie y N_p es el número de celdas en paralelo.

El modelo Matlab/Simulink de la figura 1 contempla la programación de la ecuación (2) y permite obtener las curvas características corriente-tensión (I-V) y potencia-tensión (P-V) que se presentan en la figura 2.

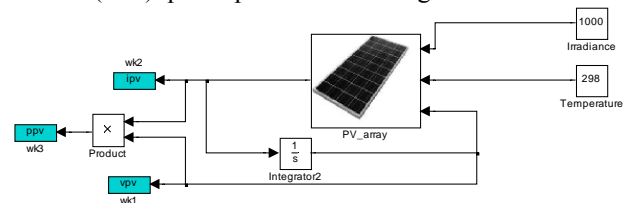


Fig. 1. Modelo de célula y panel fotovoltaico en Matlab/Simulink

Los parámetros que determinan el funcionamiento de una célula se reflejan en la figura 2; pudiéndose observar la corriente de cortocircuito I_{sc} , la tensión de circuito abierto V_{oc} y las coordenadas del punto de máxima potencia de la agrupación fotovoltaica (MPP).

El fichero propuesto permite programar, de una forma sencilla, diferentes configuraciones de celdas en serie o paralelo, observando los cambios de los parámetros más importantes de corriente y tensión; así como variaciones de los niveles de irradiancia, temperatura, factor de idealidad y de resistencia serie y paralelo. Como conclusión, el estudiante puede observar y comprender con relativa facilidad la dependencia de la potencia máxima extraíble de una agrupación fotovoltaica respecto a la irradiancia y temperatura y razonar la necesidad de un sistema conversor de potencia capaz de acondicionar la energía fotovoltaica para su posterior tratamiento.

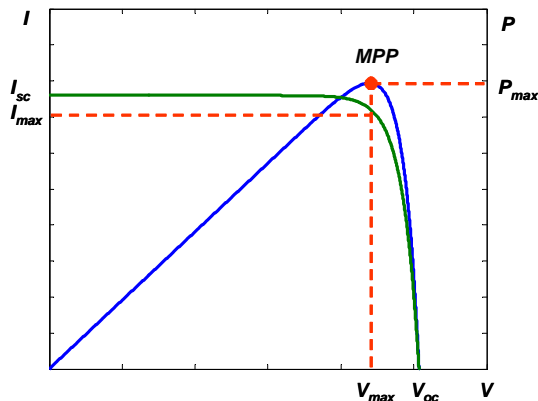


Fig. 2. Curvas características de una célula fotovoltaica. En verde, la curva I-V; en azul, la curva P-V

III. EXPERIENCIA SEGUNDA: CONVERSIÓN FOTOVOLTAICA-ELÉCTRICA DC-DC

En la segunda experiencia propuesta se diseña y simula el funcionamiento de un sistema que permite realizar la carga de una batería en corriente continua DC.

La estructura bajo estudio responde al esquema de la figura 3, donde aparecen sus principales componentes, a saber: el panel fotovoltaico, el convertidor reductor DC/DC Buck y el conjunto de baterías.

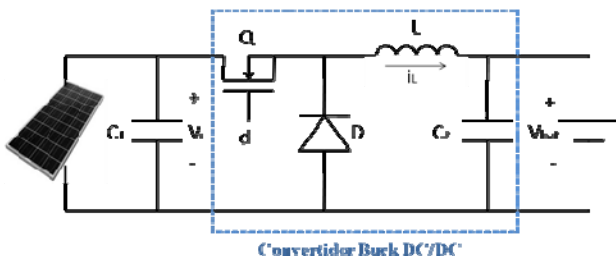


Fig. 3. Esquema inicial de un sistema fotovoltaico autónomo

Para la implementación en Matlab/Simulink, se ha utilizado el módulo fotovoltaico previamente diseñado en la experiencia anterior y se han programado las ecuaciones de estado del convertidor reductor Buck (ver

figura 4 que utiliza la definición de variables del esquema circuital de la figura 3). Obsérvese que la batería se ha considerado como fuente de tensión ideal.

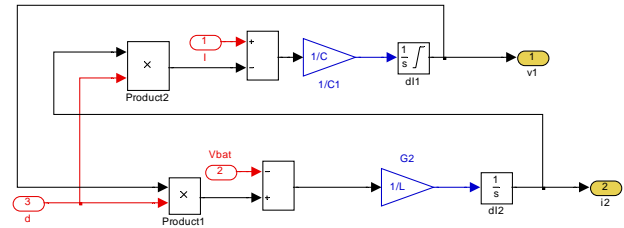


Fig. 4. Diseño interno del bloque perteneciente al convertidor Buck realizado en Matlab/Simulink

El estudio se estructura en dos partes: en la primera, el sistema trabaja en lazo abierto para estudiar el comportamiento del convertidor y ajustar de forma manual el ciclo de trabajo con el objetivo de encontrar el punto de máxima potencia (MPP) de la agrupación fotovoltaica en unas condiciones de irradiancia y temperatura fijas; en la segunda parte se añade un controlador para regular la tensión en bornes del panel. Para ello, se diseña un controlador tipo Proporcional Integral utilizando el modelo promediado del convertidor de potencia y bajo el supuesto de pequeña señal. Un conjunto de simulaciones (como las presentadas en la figura 5) permiten evaluar el rango de aplicación del modelo lineal en tiempo continuo respecto al modelo real del conjunto fotovoltaico y determinar la sensibilidad del MPP frente a variaciones de irradiancia y temperatura, lo cual permite introducir el concepto de los algoritmos seguidores de punto de máxima potencia.

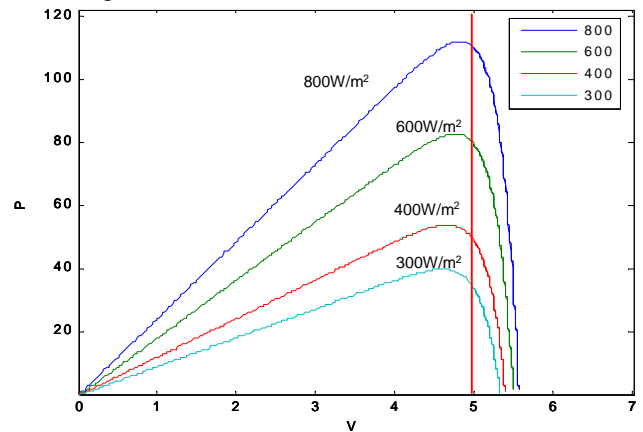


Fig. 5. Potencia asociada al panel fotovoltaico para diferentes irradiancias (W/m^2). La intersección con $V_c=5V$ ofrece la potencia obtenida.

IV. EXPERIENCIA TERCERA: CONVERSIÓN FOTOVOLTAICA-ELÉCTRICA DC-AC

Una vez estudiado el sistema de conversión fotovoltaica-eléctrica en corriente continua los estudiantes ya están en disposición de ser introducidos a los sistemas fotovoltaicos conectados a red eléctrica.

La configuración utilizada en las simulaciones corresponde a un inversor central (cuyo esquema circuital se muestra en la figura 6), que se implementa a partir de sus ecuaciones de estado.

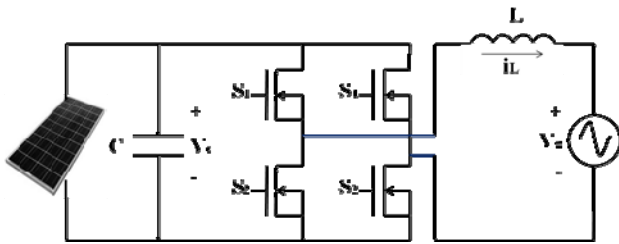


Fig. 6. Esquema circuital del sistema fotovoltaico conectado a red eléctrica

La experiencia persigue dos objetivos importantes. El primero está relacionado con la comprensión de los conceptos de extracción de potencia del generador fotovoltaico y su correcta entrega a la red eléctrica en términos de distorsión armónica baja y factor de potencia unitario. El segundo aspecto, a tratar en esta experiencia, considera los aspectos de modelado y diseño de los controladores adecuados para la realización de las tareas anteriormente mencionadas. Centrando la discusión en este segundo objetivo se presenta el esquema clásico de doble lazo (un lazo externo de regulación de tensión del panel fotovoltaico y uno interno para el seguimiento de la corriente) y se obtiene el modelo en tiempo discreto del conjunto fotovoltaico tal y como se presenta en [2]. Los estudiantes pueden a partir de una breve descripción teórica realizar su propio modelo simplificado en tiempo discreto y comparar las respuestas obtenidas respecto al modelo completo. Como resultado, son capaces de utilizar herramientas ya conocidas, como la técnica del lugar geométrico de las raíces para diseñar los controladores (ver figura 7), y evaluar el rango de validez del modelo y, por tanto, del diseño realizado (ver figura 8). Las figuras 9 y 10 presentan algunos resultados significativos del funcionamiento de todo el sistema de conversión fotovoltaica-eléctrica.

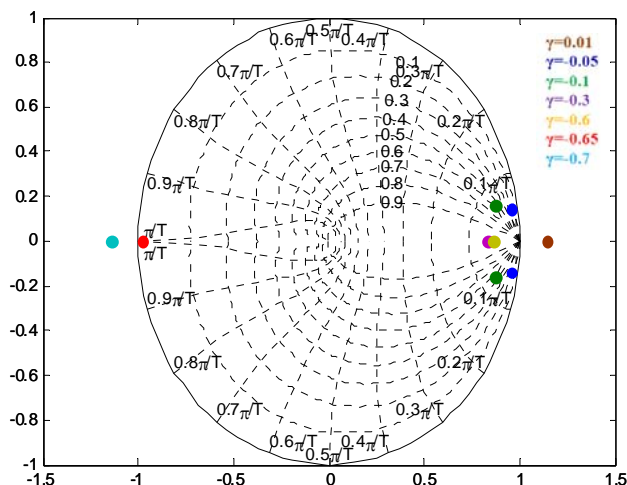


Fig. 7. Situación de los polos del sistema para los siguientes valores de γ : 0.01, -0.05, -0.1, -0.3, -0.6, -0.65 y -0.7. El

controlador del lazo externo se ha definido como

$$G_c = \gamma \frac{(z - \alpha)}{(z - 1)} \text{ con } \alpha = 0.875$$

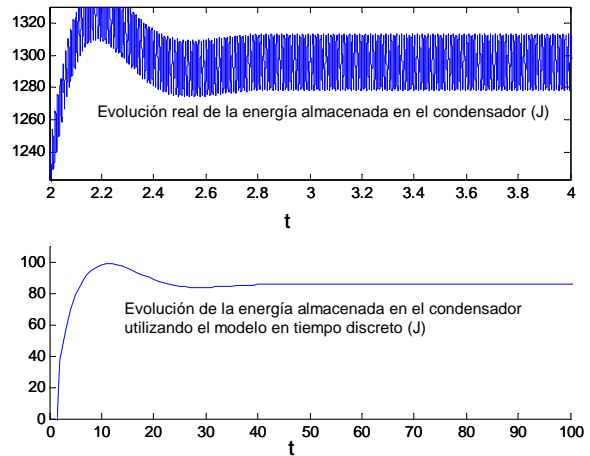


Fig. 8. Respuesta del modelo real perturbado y respuesta del modelo en tiempo discreto perturbado para $\gamma = -0.1$. Puede comprobarse la correspondencia entre la respuesta obtenida y la posición de las raíces mostrada en la figura 7.

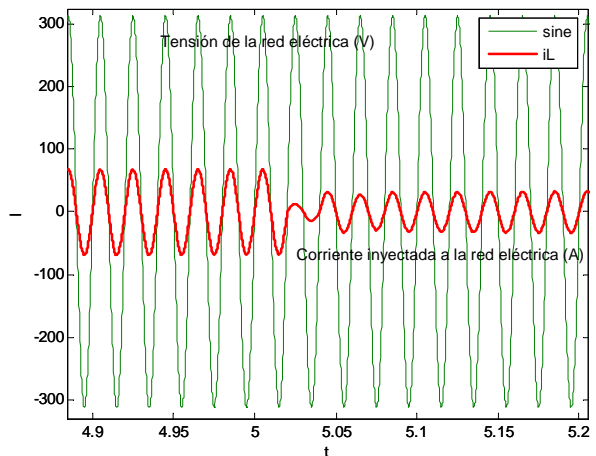


Fig. 9. Detalle de la corriente inyectada a la red ante un descenso de irradiancia

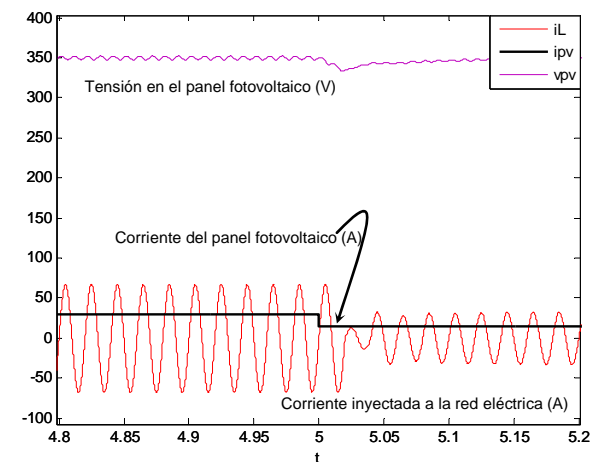


Fig. 10. Detalle de la tensión-corriente del panel y la corriente inyectada a la red ante un descenso de irradiancia

V. EXPERIENCIA CUARTA: ALGORITMOS DE SEGUIMIENTO DE PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA (MPPT)

La siguiente experiencia muestra los beneficiosos efectos de los algoritmos de seguimiento de máxima potencia (*MPPT*). Una vez llegado a este punto, los estudiantes son conocedores de que una regulación a un valor fijo de corriente o tensión de la agrupación fotovoltaica no garantiza la extracción de la máxima potencia (y por lo tanto del máximo rendimiento) para cualquier condición de irradiancia y temperatura. El diseño de los *MPPT* propuestos se realiza sobre la plataforma diseñada en la experiencia anterior. De este modo, el algoritmo de *MPPT* aparece como un nuevo bloque a incorporar en la plataforma previamente diseñada que proporciona la consigna (en tensión en este caso) a seguir por el controlador del inversor. Se proponen la implementación, y posterior comparación, de los algoritmos *MPPT* de Tensión en Circuito Abierto (V_{oc}) Fraccional, Perturbación y Observación (P&O) y Conductancia Incremental [3].

Los diseños permiten estudiar el comportamiento de los *MPPT* P&O y Conductancia Incremental modificando el periodo de muestreo y el incremento de tensión de referencia y evaluar su influencia sobre el seguimiento del punto de máxima potencia. Así, puede comprobarse que cuanto más pequeño es el periodo de muestreo más rápido se realiza el seguimiento del *MPP* (figura 11). Además, un muestreo bajo permite al algoritmo encontrar el *MPP* con más precisión. En contrapartida, el sistema tiende a oscilar en torno al punto de trabajo, provocando perturbaciones en la tensión regulada del panel.

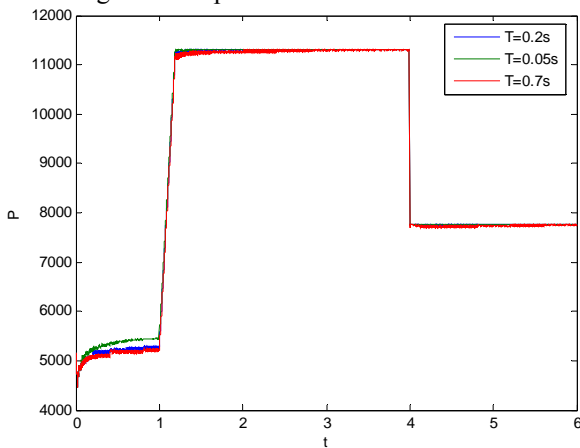


Fig. 11. Comparativa de la potencia extraída del sistema fotovoltaico para diferentes valores del periodo de muestreo

En el caso de que la variable incremental tenga un valor pequeño el seguimiento del *MPP* se realiza más lentamente, debido a que la muestra tiene menos amplitud de tensión y dispone de más dificultades en alcanzar la tensión óptima (figura 12). Sin embargo, la precisión del algoritmo es mayor. Con un valor de incremento pequeño la respuesta del sistema oscila menos en torno al *MPP* y tiende a ser más estable.

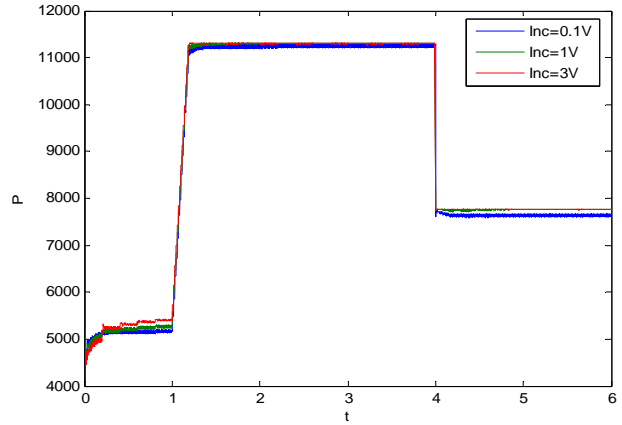


Fig. 12. Comparativa de la potencia extraída del sistema fotovoltaico para diferentes valores de incremento de tensión de referencia

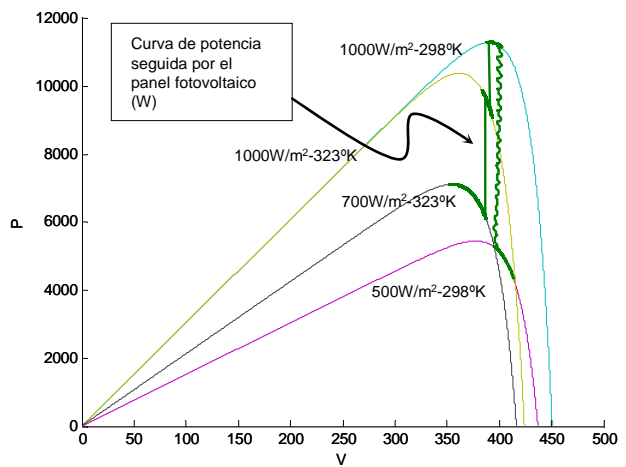


Fig. 13. Recorrido efectuado por el algoritmo Conductancia Incremental para la búsqueda del MPP cuando es sometido a cambios simultáneos de temperatura e irradiancia

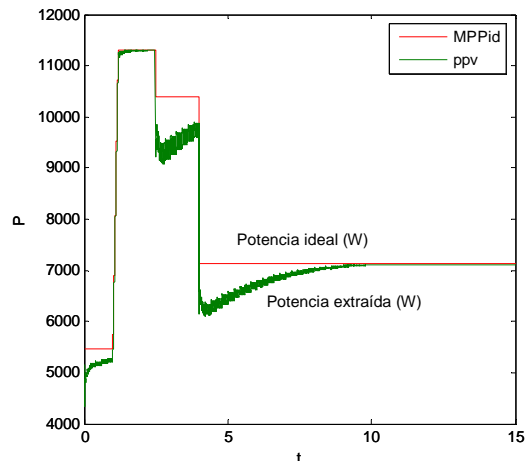


Fig. 14. Comparativa entre la potencia extraída del sistema y la potencia ideal

Por último, se simulan los modelos de los diferentes algoritmos de *MPPT* bajo diferentes condiciones de irradiancia y temperatura. Se pueden adquirir las evoluciones gráficas del seguimiento del *MPP*, la tensión del panel y su referencia, la potencia extraída y

el rendimiento (ver figuras 13 y 14). Como conclusión, a partir de los resultados alcanzados se comprueba que las respuestas del algoritmo P&O y de Conductancia Incremental son similares, difiriendo ligeramente en casos muy concretos de irradiancia y temperatura, y que el algoritmo de Voc Fraccional, aunque presenta una eficiencia menor que la del resto, puede ser interesante en aplicaciones donde no se requiere una gran inversión tecnológica y económica.

VI. EXPERIENCIA QUINTA: SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO A RED ELÉCTRICA CON CARGAS EN DC Y AC

En la última experiencia propuesta los estudiantes ensayan diversas situaciones de trabajo en un sistema fotovoltaico conectado a red eléctrica con cargas en alterna y en continua, siendo éste un compendio de todos los modelos estudiados anteriormente. La figura 19 presenta el modelo desarrollado en el entorno Matlab/Simulink. Como puede comprobarse el sistema puede trabajar con o sin conexión a red, lo cual requiere de un diseño completo de controladores para cada una de las posibles circunstancias. A su vez, tanto la irradiancia y la temperatura como el consumo de cargas pueden variarse con el objetivo de emular situaciones diversas.

La visualización de la corriente entregada por la agrupación fotovoltaica y las corrientes de red y en las cargas permite comprender el funcionamiento del sistema en cada caso. Por ejemplo la figura 15 muestra el efecto de un cambio de irradiancia. Como puede verse en la figura, inicialmente el nivel de corriente fotogenerada por el panel fotovoltaico (en rojo) es insuficiente para abastecer el consumo de energético de las cargas. Nótese como la corriente entregada a la red (en azul cyan) mantiene un desfase de 180° respecto a la corriente consumida por la carga (en verde), lo cual permite deducir que la red eléctrica está proporcionando el flujo de corriente que las cargas requieren (en verde, carga en alterna, y en azul, carga en continua). Obsérvese como a partir de $t=1.5s$, la corriente fotogenerada por el panel aumenta debido al crecimiento del nivel de irradiancia. A causa de ello, el sistema fotovoltaico es capaz de proporcionar la potencia suficiente a las cargas. Puede apreciarse como el desfase entre corrientes desaparece. En este caso, la potencia sobrante puede ser inyectada a la red eléctrica. Cabe destacar que el consumo de la carga en continua (azul) se mantiene inalterable, a pesar de los cambios de irradiancia, gracias a la acción reguladora del sistema de control.

La figura 16 presenta los resultados cuando no existe irradiancia. En este caso, la potencia consumida por las cargas conectadas al sistema fotovoltaico es absorbida directamente de la energía proporcionada por la red eléctrica. Para finalizar, la figura 17 muestra el resultado cuando se produce una desconexión de la red eléctrica. Así, para $t=1.622s$ el sistema es desconectado de la red eléctrica. Como puede apreciarse, las corrientes en las

cargas se mantienen prácticamente inalterables y el punto de trabajo de la agrupación fotovoltaica abandona el punto de máxima potencia para situarse en el punto de potencia requerida por las cargas (ver figura 18).

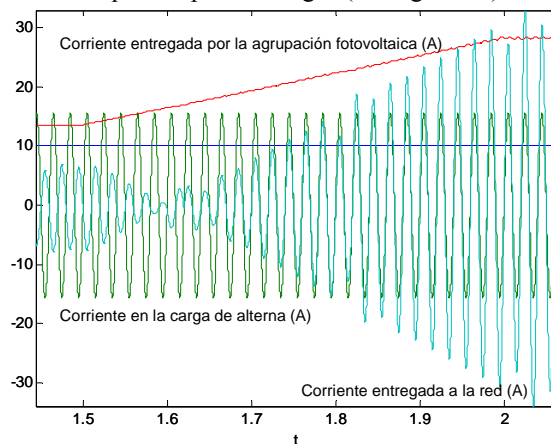


Fig. 15. Detalle de la evolución de las corrientes ante un aumento de la irradiancia

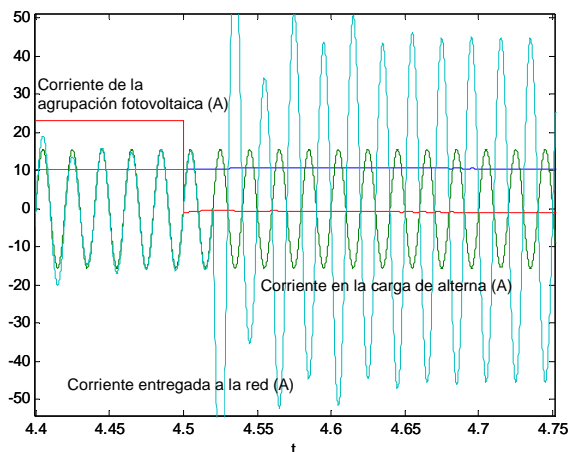


Fig. 16. Detalle de la evolución de las corrientes ante un cambio a irradiancia nula

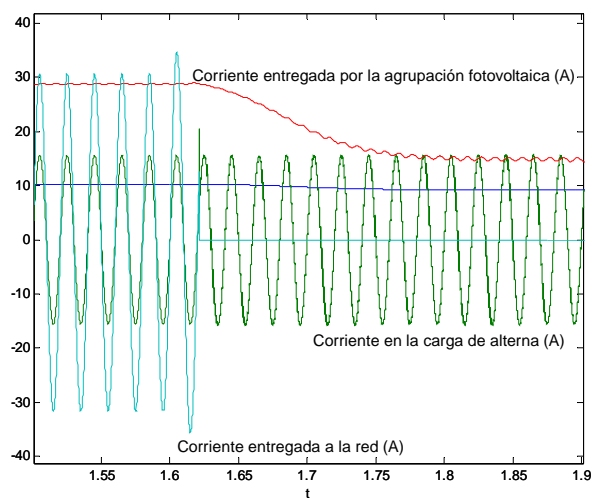


Fig. 17. Detalle de la evolución de las corrientes al desconectar la red eléctrica.

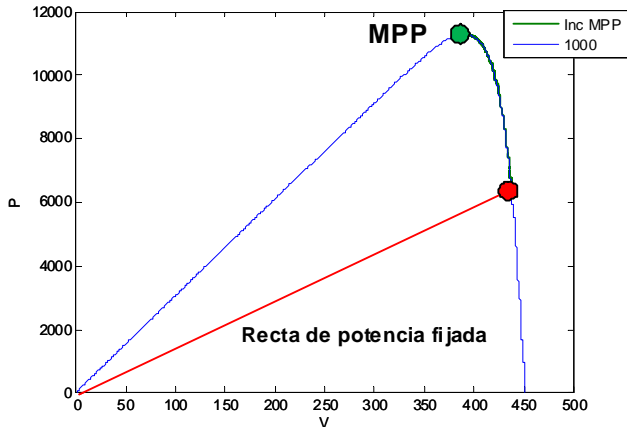


Fig. 18. Trayectoria de la potencia del panel desde el MPP al punto de trabajo al desconectar la red eléctrica.

VII. CONCLUSIONES

En la presente comunicación se ha descrito un conjunto de experiencias desarrolladas en el entorno Matlab/Simulink que proporcionan un apoyo a la enseñanza en el campo de la energía fotovoltaica. Estas experiencias cubren los diversos aspectos de mayor importancia a la hora de analizar y diseñar sistemas fotovoltaicos aislados o conectados a red eléctrica. En concreto, se estudian desde la característica no lineal variante en el tiempo (en función de la irradiancia y la temperatura) de la agrupación fotovoltaica, hasta la extracción de la máxima potencia disponible en determinadas condiciones mediante convertidores de potencia en corriente continua (cuando se alimenta a cargas de DC o baterías) o en corriente alterna (cuando las cargas son en AC o se conecta a red eléctrica). Las experiencias desarrolladas permiten evaluar el rango de

aplicación de los modelos utilizados para el diseño de los diversos controladores y permiten realizar el ajuste de los parámetros de los controladores mediante técnicas clásicas de control. Se introduce, también, la necesidad de los algoritmos de seguimiento de máxima potencia (MPPT), realizándose la programación y experimentación de los mismos en diversas aplicaciones.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido cofinanciado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología (España) a través de los proyectos DPI2006-15627-C03-01 y DPI2007-62582 por fondos de la Unión Europea (FEDER)

REFERENCIAS

- [1] F. M. González-Longatt, "Model of Photovoltaic Module in Matlab", *Segundo Congreso Iberoamericano de Estudiantes de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación*, II Cibelec, 2005.
- [2] C. Meza, J. J. Negroni, D. Biel, F. Guinjoan, "Energy-Balance Modeling and Discrete Control for Single-Phase Grid-Connected PV Central Inverters", *IEEE Transactions on industrial Electronics*, vol.55, no.7, Julio 2008.
- [3] T. Eram, P. L. Chapman, "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques", *Grainger Center for Electric Machinery and Electromechanics at the University of Illinois at Urbana-Champaign*.
- [4] R. Ramos, D. Biel. "Material Didáctico basado en Virtual Test Bed para Sistemas Electrónicos de Potencia para Energías Renovables". Seminario anual de automática y electrónica industrial (SAAEI). Pag. 1073-1078. Septiembre 2006.

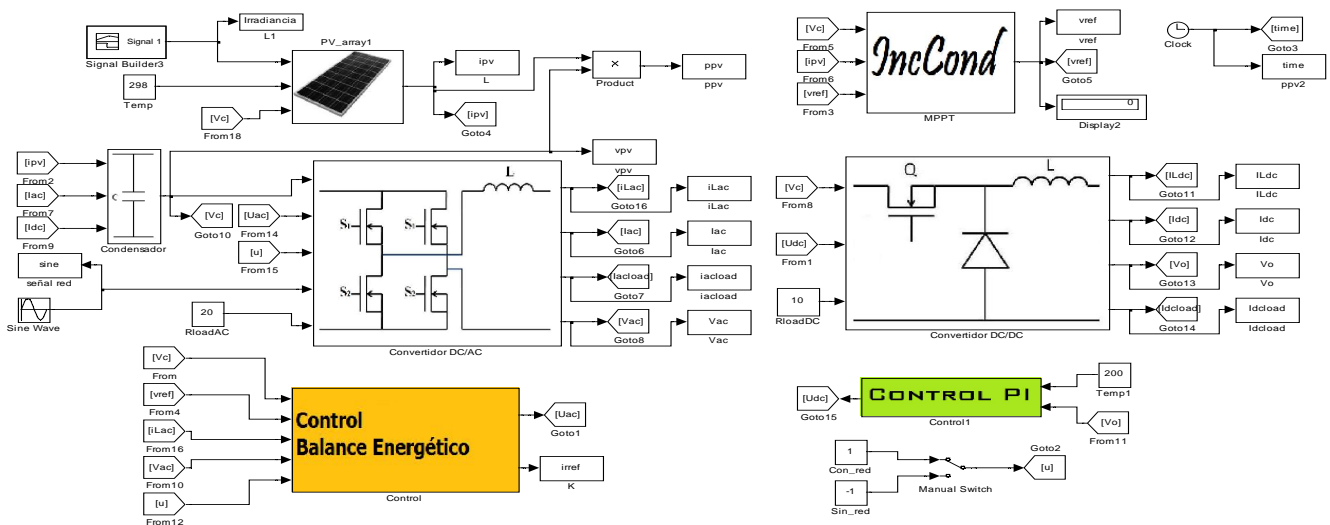


Fig. 19. Modelo del sistema fotovoltaico conectado a red eléctrica con cargas en DC y AC implementado en Matlab/Simulink