

Capítulo 13

Material Didáctico Basado en *Virtual Test Bed* para Sistemas Electrónicos de Potencia para Energías Renovables

Domingo Biel, *Member, IEEE* y Rafael Ramos, *Member, IEEE*

Title— Educational material based on Virtual Test Bed for teaching Power Electronics in Renewable Energy Systems.

Abstract— This work is devoted to present some educational material developed by teachers of Catalanian Technical University in renewable energy systems field and their nowadays technical application. The lesson plans and laboratory program of a Power Electronics in Renewable Energy Systems course, which is offered in the Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Vilanova i la Geltrú. The course laboratory experiences are based on freeware Virtual Test Bed.

Keywords— Solar energy, photovoltaic cells, solar power generation, computer aided software engineering

Resumen— En este trabajo se presenta la experiencia didáctica desarrollada por profesores de la Universidad Politécnica de Cataluña con relación a las energías renovables y su actual aplicación tecnológica. En este sentido se indica el programa de teoría y prácticas de la asignatura “Sistemas Electrónicos de Potencia para Energías Renovables” que se oferta actualmente como asignatura optativa en la Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Vilanova i la Geltrú. Las prácticas de la asignatura se basan en el uso del programa de libre acceso Virtual Test Bed.

Palabras clave— Energía solar, células fotovoltaicas, generación de energía solar, programas de ayuda a la ingeniería

I. INTRODUCCIÓN

EN las últimas décadas existe una creciente preocupación mundial respecto a los temas relacionados con la generación, almacenamiento, transporte y consumo de la energía. A grandes rasgos puede afirmarse que esta inquietud se debe fundamentalmente a dos aspectos diferentes. El

Este trabajo fue presentado originalmente en el CONGRESO SAAEI 2006. D. Biel is with the UPC- EPSEVG, Vilanova i la Geltrú 08800, Spain (e-mail: biel@eel.upc.edu).

R. Ramos is with the UPC-EPSEVG, Vilanova i la Geltrú 08800, Spain (corresponding author: 34-938967779; fax: 34-938967700; e-mail: lara@eel.upc.edu).

primero está asociado con la paulatina disminución de las reservas existentes de combustibles fósiles frente a una demanda creciente de energía, mientras que la segunda está relacionada con los efectos contaminantes sobre el medio ambiente del tratamiento de dichas fuentes primarias. Como principal alternativa al tratamiento de fuentes primarias constituidas por combustibles fósiles surgen con fuerza las energías renovables, sostenibles y ecológicas. Las ventajas de las energías renovables son sobradamente conocidas y entre estas pueden resaltarse:

- Su capacidad de preservación de las fuentes primarias al ser sostenibles.
- La seguridad del suministro energético debido a la diversidad de fuentes de energía renovable.
- Su poco o nulo impacto ambiental, contribuyendo de este modo a la protección del medio ambiente.
- Una clara tendencia a la baja en costos de los equipos procesadores de energías renovables.
- El uso de una tecnología de tipo modular y distribuida que permite ampliar y desarrollar la infraestructura de forma gradual y conforme a los requerimientos del consumo.

A tenor de esto y con el objetivo de cubrir las necesidades docentes en esta materia y, al mismo tiempo, completar el currículum del estudiante se ha propuesto e impartido la asignatura “Sistemas Electrónicos de Potencia para Energías Renovables (SEPE)”, que se oferta actualmente en la Universidad Politécnica de Cataluña, como asignatura optativa en las titulaciones de Ingeniería Técnica de Telecomunicación, especialidad Sistemas Electrónicos e Ingeniería Técnica Industrial, especialidad Electrónica Industrial.

En el apartado II se resumen los objetivos principales de la asignatura y se presenta el programa de teoría, mientras que en el apartado III se presenta el desarrollo de las prácticas basadas en el software de simulación Virtual Test Bed (VTB). Finalmente, en el último apartado, se resumen las conclusiones del presente trabajo.

II. PROGRAMA DE TEORÍA

La asignatura pretende introducir al estudiante en el procesado de energías alternativas para su almacenaje o distribución en la red eléctrica. Dentro de este amplio concepto la materia se centra en la descripción, análisis y diseño de los sistemas conversores de potencia, sin perder de vista los aspectos económicos y medioambientales. Dentro de esta descripción genérica pueden detallarse los siguientes puntos:

- Se presentan, en el primer tema, diversos sistemas de energía renovable como son los eólicos, fotovoltaicos, hidráulicos o biomasa, aunque la asignatura se centra, posteriormente, en la conversión fotovoltaica-eléctrica (tema 2) y la eólica-eléctrica (tema 3).
- Se describen los principios de funcionamiento, así como los componentes, de los sistemas de conversión. Se presentan las problemáticas asociadas a cada uno de dichos sistemas y se muestran las herramientas para su análisis.
- Se detallan los convertidores y máquinas de potencia requeridos para la realización de la conversión de energía.
- Se diseñan los controladores que garantizan un correcto funcionamiento en el almacenaje o la entrega de la energía a la red eléctrica.
- Se realizan ejemplos y ejercicios de dimensionado y presupuestado de los sistemas de conversión energética a nivel instalador.

Para alcanzar estos objetivos la asignatura se organiza en los siguientes temas:

- Tema 1.* Introducción a los Sistemas de energía renovable.
- Tema 2.* Sistemas electrónicos de potencia aplicados a la energía fotovoltaica.
- Tema 3.* Sistemas electrónicos de potencia aplicados a la energía eólica.
- Tema 4.* Almacenamiento y distribución de energía eléctrica.

III. PROGRAMA DE PRÁCTICAS

A. Entorno de Simulación

Las prácticas de la asignatura SEPE están basadas en simulaciones realizadas con el programa Virtual Test Bed (VTB), <http://vtb.engr.sc.edu/>. Este programa de libre acceso es un entorno de simulación desarrollado por la Universidad de Carolina del Sur que permite comprobar las prestaciones de funcionamiento de un sistema dinámico de gran escala que incorpore elementos de diferentes disciplinas: electromecánicos (máquinas, motores, etc.), electrónicos (convertidores de potencia entre otros), eléctricos, químicos, térmicos, etc., todos ellos orientados a aplicaciones de potencia [1]. Estas características hacen a VTB una herramienta adecuada para evaluar prototipos de sistemas de potencia de gran escala como paso previo a su implementación práctica. El software VTB incluye tres componentes básicos:

1) *Schematic Editor*: Esta aplicación realiza la función de interface de usuario y permite construir el modelo del sistema

que se pretende simular. Los componentes individuales necesarios para diseñar el sistema están ubicados en la librería de componentes. Para crear el sistema basta seleccionar los componentes adecuados, ensamblarlos entre sí en la plantilla de dibujo y ajustar el valor de los parámetros. El Schematic Editor también permite realizar la simulación de funcionamiento del sistema diseñado.

2) *Visualization Extension Engine (VXE)*: esta herramienta permite visualizar de forma gráfica los datos obtenidos mediante simulación, haciendo más fácil la interpretación de los mismos.

3) *Vector Icon Editor (VIE)*: esta aplicación permite crear iconos para utilizarlos junto con los modelos en el Schematic Editor.

A continuación se describen los pasos a seguir para crear, ejecutar y simular un sistema con el programa VTB. Se utilizará, a modo de ejemplo, un sencillo panel solar de cual se pretende medir los parámetros característicos de tensión en circuito abierto, corriente de cortocircuito y punto de máxima potencia.

En primer lugar se construye el modelo del sistema a simular utilizando la herramienta Schematic Editor a partir de los modelos que podemos encontrar en la librería de componentes ajustando adecuadamente el valor de los parámetros del modelo. En la figura 1 se muestra el esquema definitivo del sistema a simular formado por un panel solar, una fuente de temperatura, un condensador y una fuente de irradiancia solar. El circuito diseñado permitirá medir las características estáticas de la célula solar a temperatura constante, como es la tensión a circuito abierto V_{oc} , la corriente de cortocircuito I_{sc} , y el punto de máxima potencia para las condiciones de irradiancia fijadas. En efecto, inicialmente el condensador de carga de la célula solar está descargado por lo que equivale a un cortocircuito. La corriente que circula en $t=0$ es la corriente de cortocircuito de la célula. A medida que transcurre el tiempo el condensador se va cargando con lo que la tensión aumenta y la corriente disminuye. El proceso de carga finaliza cuando el condensador adquiere la tensión de circuito abierto de la célula. El siguiente paso previo a la simulación es ajustar, si es necesario, los parámetros de los modelos que se utilizan en el sistema diseñado. Para este ejemplo se ajusta a una el número

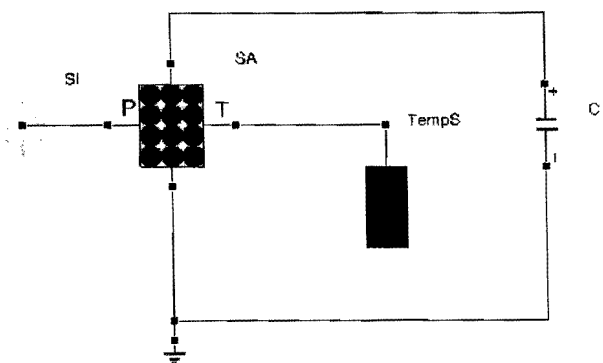


Fig. 1. Esquemático del modelo del panel solar

de células en serie y en paralelo que contiene el panel solar. Asimismo, se fija la hora del día (12:30h) a la que se realiza la prueba determinando con ello la posición del sol en el cielo y, por tanto, la cantidad de irradiancia que incide en el panel. Finalmente se ajusta la temperatura del panel a 300 Kelvins.

Una vez ajustados los parámetros de los componentes se debe seleccionar los resultados de la simulación se van a visualizar. Cada componente del circuito tiene asociado una serie de variables que se pueden visualizar si están seleccionadas, de las cuales se escogen las más representativas para la prueba a realizar, en este caso, la corriente y tensión en el condensador.

El siguiente paso es realizar la simulación ajustando previamente los valores de los parámetros correspondientes al paso de simulación y el tiempo de simulación.

Finalmente, se realiza la visualización de los resultados con el programa VXE. Si, por ejemplo, se selecciona la corriente y tensión del condensador se obtiene el resultado mostrado en la figura 2. Sobre estas gráficas es posible determinar el valor de la tensión de circuito abierto Voc, así como la corriente de cortocircuito Isc.

Las herramientas disponibles en el programa VXE permiten representar figuras interesantes como la potencia de salida en función de la tensión de salida. La potencia de salida de la célula solar viene dada por el producto de la tensión de salida

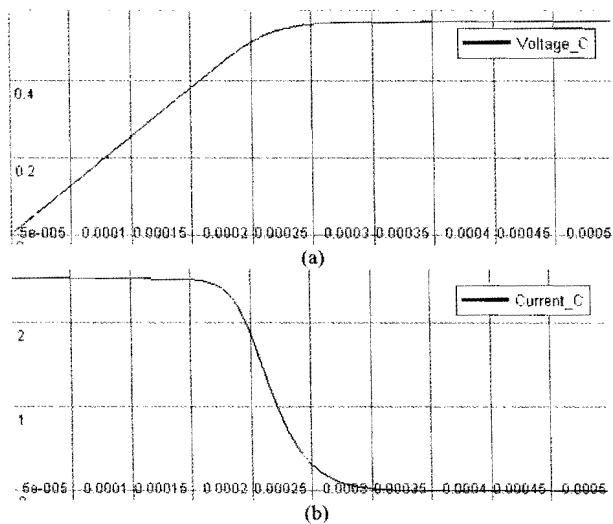


Fig. 2. Resultado de la simulación del circuito de la figura 1. (a) Tensión y (b) corriente en el condensador

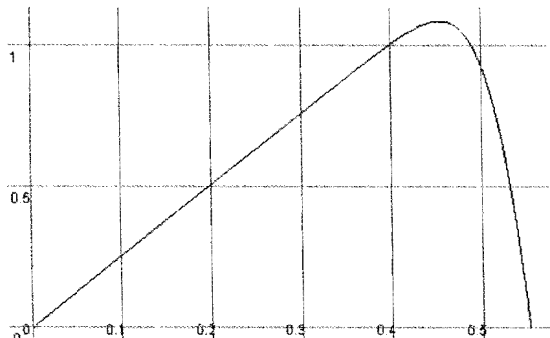


Fig. 3. Potencia de salida de la célula solar en función de la tensión de salida

por la corriente de salida: $P_{out}=I_{out} \cdot V_{out}$. En la figura 3 se muestra el resultado de simulación de la potencia de salida de la célula solar en función de la tensión de salida.

B. Programa de prácticas

El programa de prácticas desarrollado para la asignatura “Sistemas Electrónicos de Potencia para Energías Renovables” comprende una serie de ejercicios relacionados con los sistemas electrónicos de potencia aplicados a la energía fotovoltaica y enfocados a cubrir los siguientes objetivos:

- Introducción al funcionamiento del programa de simulación de sistemas dinámicos Virtual Test Bed (VTB).
- Determinación de los parámetros de una célula y un panel solar.
- Estudio del punto de trabajo de una agrupación de paneles solares.
- Conocer los elementos de un sistema fotovoltaico y su comportamiento en lazo abierto.
- Conocer y probar dos algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT): Perturbación y Observación, y Conductancia Incremental.
- Conocer los elementos de un sistema fotovoltaico para conexión a red.
- Conocer y probar una estrategia de control para la transferencia eficiente de energía a la red eléctrica.
- Conocer aplicaciones prácticas de los sistemas fotovoltaicos de potencia.
- Conocer y probar una estrategia de control para la carga de sistemas de almacenamiento de energía.

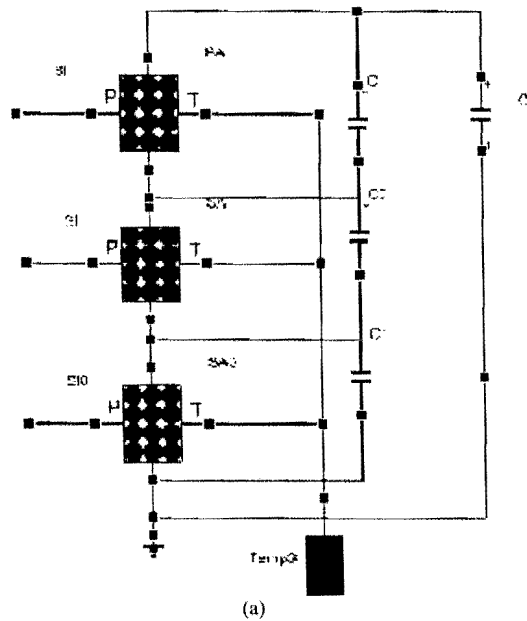
Para cumplir estos objetivos docentes se ha desarrollado cuatro experiencias prácticas [2] a desarrollar por el estudiante y que constituyen la base del programa de prácticas de esta asignatura:

1) PRACTICA 1: Introducción al manejo del programa de simulación Virtual Test Bed (VTB).

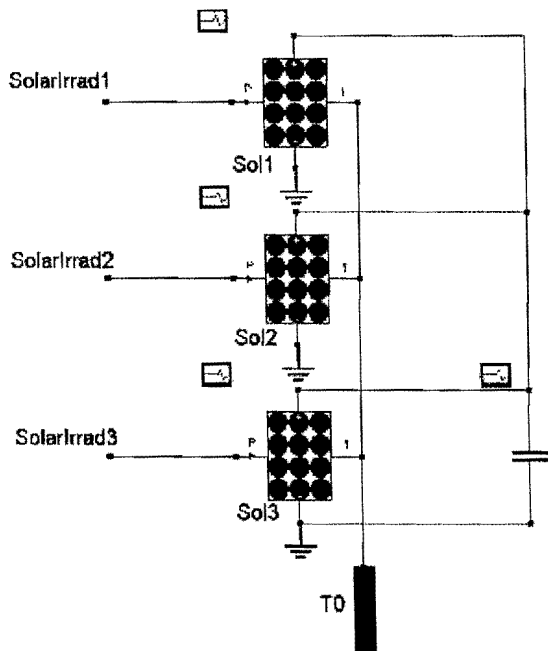
En esta práctica se introduce al estudiante en el entorno de simulación y se realizan experiencias de caracterización de unacelda fotovoltaica (curva de potencia) para diferentes irradiancias y temperaturas. A su vez se introducen la conexión serie y paralelo de celdas fotovoltaicas (figura 4) y se detallan los problemas existentes en cuanto a la variación de la distribución de potencia al variar la irradiancia entre las celdas (efectos de sombreado) y la necesidad de la utilización de algoritmos del seguimiento de punto de máxima potencia.

2) PRACTICA 2: Control de sistemas de potencia fotovoltaicos autónomos.

En esta práctica se simula la conexión de paneles fotovoltaicos a cargas aisladas y a baterías. Para ello se presenta inicialmente el comportamiento en lazo abierto de un sistema formado por el generador fotovoltaico y un convertidor reductor Buck DC-DC cargado con una batería y una carga, tal y como se muestra en la figura 5.



(a)



(b)

Fig. 4. Agrupación de paneles en (a) serie y (b) paralelo

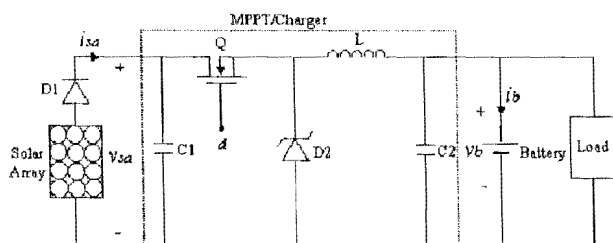


Fig. 5. Esquema de un sistema de potencia fotovoltaico aislado

Posteriormente, el estudiante ha de diseñar y simular dos algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia: el algoritmo MPPT de Perturbación y Observación (figura 6) y el algoritmo de Conductancia Incremental [3]. Finalmente, el estudiante debe proponer y programar en el entorno de simulación su propio algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia.

3) *PRACTICA 3: Control de sistemas fotovoltaicos conectados a red.*

En esta práctica se presentan y analizan los problemas de control propios de la conexión de sistemas fotovoltaicos a la red eléctrica. Para poder realizar la conexión del generador fotovoltaico a la red eléctrica se propone un sistema de procesado de potencia compuesto por un convertidor elevador Boost en serie con un inversor reductor Buck (figura 7). El convertidor Boost realiza una doble función: eleva la tensión de salida del array fotovoltaico para obtener de esta manera un nivel de tensión suficientemente alto para poder realizar la conexión a la red eléctrica y realiza el seguimiento del punto de máxima potencia del array fotovoltaico.

Por otra parte, el convertidor Buck se utiliza como convertidor DC-AC o inversor y se encarga de inyectar corriente en la red eléctrica en fase con la tensión de red. La amplitud de la corriente inyectada dependerá de la potencia que se extrae del panel. Para poder llevar a cabo esta aplicación, en primer lugar se desarrolla el modelo de ecuaciones de estado de los inversores y se diseñan los lazos de tensión y corriente. Los estudiantes, por su parte, diseñan sus propios controladores para implementar los lazos de realimentación planteados y realizan simulaciones para validarlos (figura 8). Para completar el diseño, los estudiantes deben incorporar un conmutador colocado entre la salida del convertidor Boost y la entrada del inversor reductor. La función de este conmutador es la de mantener al inversor reductor desconectado de la salida del convertidor Boost mientras la tensión de dicha salida sea menor a 450V, asegurando de esta manera el correcto funcionamiento del conjunto.

4) *PRACTICA 4: Aplicación de sistemas fotovoltaicos conectados a red.*

En esta última práctica el estudiante debe realizar sus propios controladores en aplicaciones de cargadores de batería (en modos de funcionamiento de corriente y/o tensión) y sistemas conjuntos formados por cargas aisladas y conexión a red eléctrica. El estudiante deberá diseñar y simular un sistema de carga de batería que incorpora un convertidor Buck cuya función es la carga de la batería a tensión constante o corriente constante dependiendo del nivel de tensión de la batería (figura 9).

La aplicación desarrollada se conecta al generador fotovoltaico diseñado en la práctica 3 y se comprueba el correcto funcionamiento del conjunto (figura 10).

Como complemento a las prácticas que el estudiante realiza de forma obligatoria se proponen extensiones de aplicación del entorno de simulación Virtual Test Bed (VTB) a otros campos de gestión energética, como el eólico, en forma de trabajos optativos.

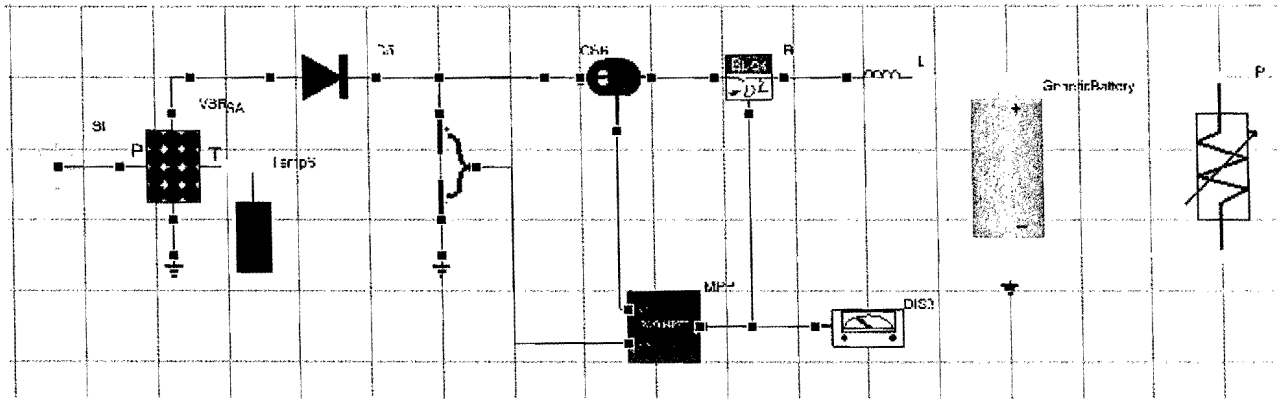


Fig. 6. Sistema fotovoltaico en lazo cerrado con algoritmo de Perturbación y Observación (P&O)

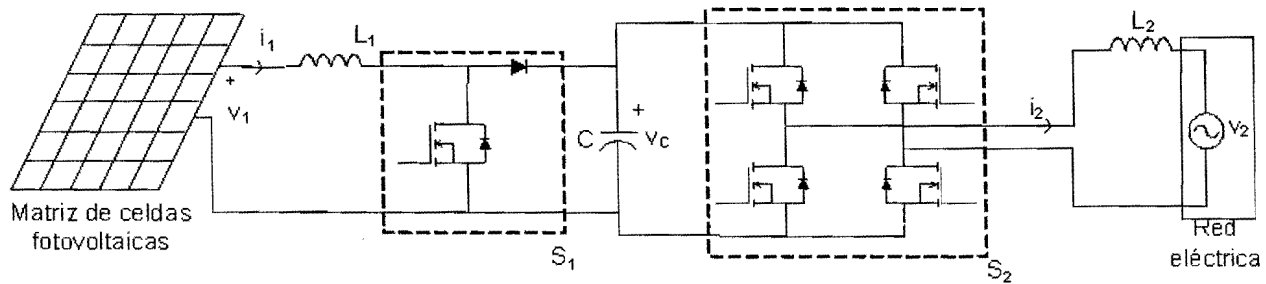


Fig. 7. Esquema eléctrico del sistema de procesamiento de potencia para conexión a red

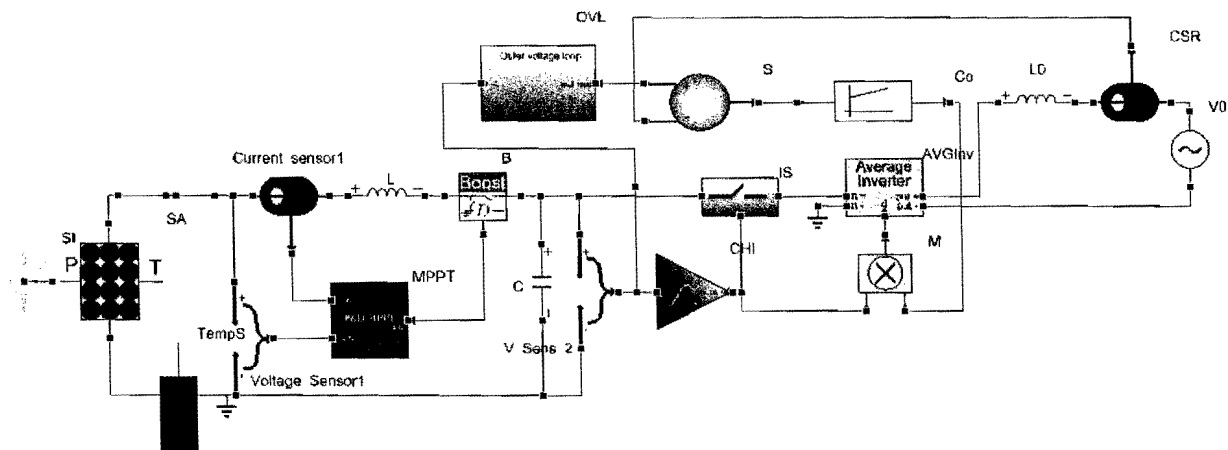


Fig. 8. Modelo VTB de la conexión a red de un sistema fotovoltaico con algoritmo de punto de seguimiento de máxima potencia

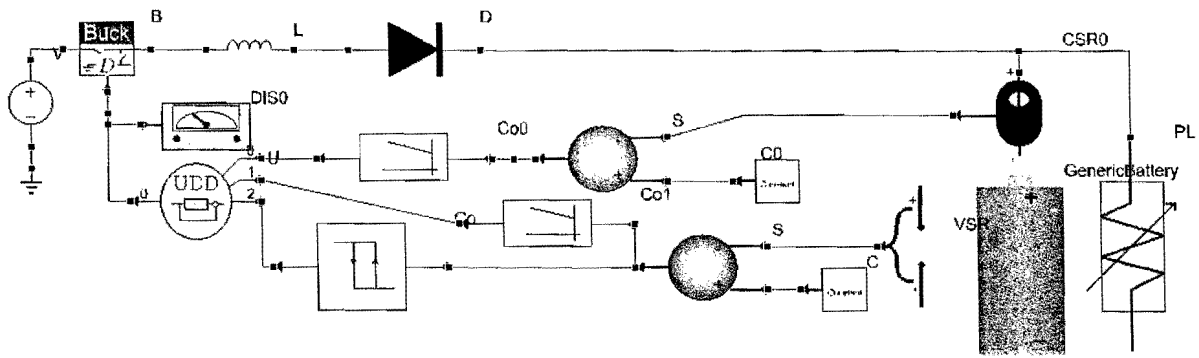


Fig. 9. Modelo VTB del sistema cargador de baterías a tensión/corriente constante

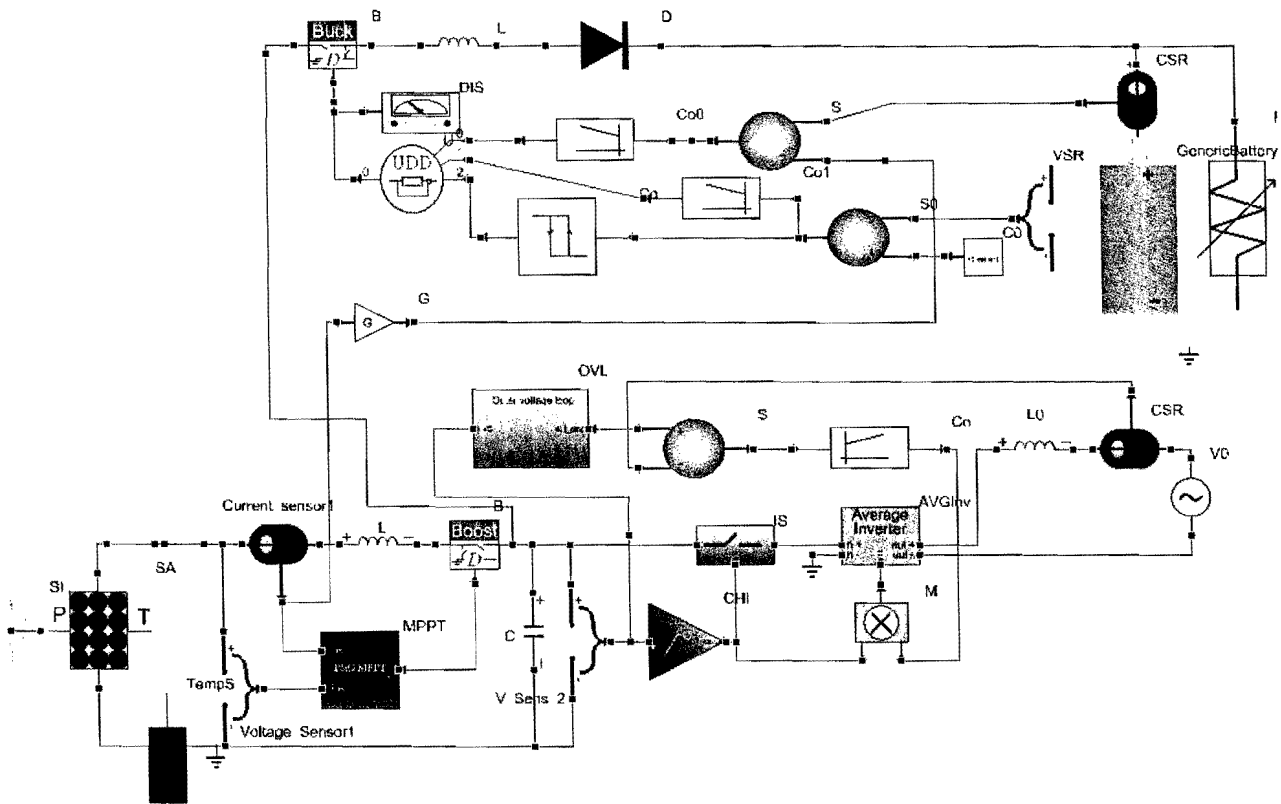


Fig. 10. Modelo VTB del generador fotovoltaico con cargador de batería

IV. CONCLUSIONES

En esta comunicación se ha presentado el programa de teoría y de prácticas de la asignatura Sistemas Electrónicos de Potencia para Energías Renovables

El desarrollo de las prácticas está basado en el entorno de simulación Virtual Test Bed (VTB). Dicha plataforma de simulación de libre acceso fue desarrollada en la Universidad de Carolina del Sur para crear prototipos de sistemas dinámicos de gran escala e interdisciplinarios [1]. La sencillez de utilización, la cantidad de elementos y sistemas prediseñados y la facilidad de los ajustes de parámetros de

dichos elementos y del entorno permiten la realización de simulaciones demostrativas de forma rápida y ágil.

Las diferentes prácticas propuestas permiten comprobar mediante simulación el comportamiento de diferentes estructuras de paneles solares como son las agrupaciones serie y paralelo y la influencia sobre estas estructuras de las variaciones de temperatura e irradiancia.

El modelo de células fotovoltaicas, construido con base en ecuaciones de diferentes disciplinas (fotovoltaica, electro-térmico, calentamiento directo, proceso de enfriamiento), permite obtener resultados cercanos a datos reales [4].

El estudiante tiene la oportunidad de realizar el análisis, diseño y simulación de sistemas que permiten obtener potencia de salida DC, convenientemente regulada para realizar la carga de una batería y/o alimentar una carga DC y extraer al mismo tiempo la máxima potencia disponible en cualquier condición de temperatura y carga, así como experimentar con sistemas fotovoltaicos que entregan energía directamente a la red que despiertan un especial interés debido a la reducción de costos que se obtiene de la supresión del subsistema de almacenamiento de energía propios de sistemas autónomos [5].

El material presentado permite cubrir las necesidades docentes en materia de energías renovables, con especial incidencia en la energía fotovoltaica, y al mismo tiempo completar el currículum del estudiante en un campo del conocimiento tecnológico de gran proyección de futuro.

REFERENCIAS

- [1] T. Lovett, A. Monti, E. Santi, R. Dougal, "A multilanguage environment for interactive simulation and development of controls for power electronics", Power Electronics Specialists Conference (PESC2001), Vol. 3, pp. 1725-1729, 2001.
- [2] Rafael Ramos, Domingo Biel, "Manual de Prácticas de Sistemas Electrónicos de Potencia para Energías Renovables" EPS de Vilanova i la Geltrú (UPC), Febrero 2006.
- [3] Chihchiang Hua and Chihming Shen, "Study of Maximum Power Tracking Techniques and Control of DC/DC Converters for Photovoltaic Power System," Power Electronics Specialists Conference, (PESC98) vol. 1, pp. 86-93, May 1998.
- [4] S.Liu and R.A. Dougal, "Dynamic Multi-physics Model for Solar Array", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 17, No. 2, pp. 285-294, June 2002.
- [5] Carlos Meza, Domingo Biel, Juan Martínez y Francesc Guinjoan, "Control de un inversor Boost-Buck para sistemas fotovoltaicos conectados a red," Seminario Anual de Automática y Electrónica Industrial (SAAEI), Septiembre 2005.



Domingo Biel (S'97-M'99) recibe el título de Ingeniero Técnico, Ingeniero Superior y Doctor Ingeniero de Telecomunicación por la Universidad Politécnica de Cataluña, en 1990, 1994 y 1999, respectivamente.

Su tesis está basada en la aplicación del control en modo deslizante a la generación de señal en convertidores conmutados DC-DC. Desde 1994 es profesor titular del Departamento de Ingeniería Electrónica de la Universidad Politécnica de Cataluña, donde imparte docencia en temas relacionados con la electrónica de potencia, las energías renovables y la teoría de control. Su ámbito de investigación está relacionado con el control no lineal, el control en modo deslizante, las energías renovables y la electrónica de potencia.



Rafael Ramos (S'97-M'06) recibe el título de Ingeniero Técnico, Ingeniero Superior y Doctor Ingeniero de Telecomunicación por la Universidad Politécnica de Cataluña, en 1990, 1996 y 2006, respectivamente.

Desde 1990, ejerce de profesor del Departamento de Ingeniería Electrónica de la Universidad Politécnica de Cataluña, donde imparte docencia en temas relacionados con microcontroladores, dispositivos programables y energías renovables. Su ámbito de investigación está relacionado con el control en modo deslizante, control no lineal, procesado de señal e implementación digital de procesado y control en tiempo real.

