

INTRODUCCIÓN A LA SIMULACIÓN CON PSCAD/EMTDC

Manuel Burgos Payán
Ángel Gaspar González Rodríguez
Manuel Casal Gómez-Camínero
Pedro Cruz Romero
José María Maza Ortega
Carlos Izquierdo Mitchell
Departamento de Ingeniería Eléctrica
Escuela Superior de Ingenieros
Universidad de Sevilla

RESUMEN

Se describe un trabajo de innovación educativa basado en la utilización de un paquete gráfico de simulación de transitorios electromagnéticos. La propuesta fundamental consiste en la utilización de PSCAD/EMTDC como complemento de las clases prácticas de laboratorio y como refuerzo de las de teoría. Al elegir el paquete informático se han considerado dos aspectos básicos: un bajo umbral de aprendizaje, y que resultara lo más autoexplicativo y amigable posible. De esta forma se consigue que los profesores no tengan que reservar mucho tiempo de clase para enseñarlo, ni que los alumnos tengan que dedicar tiempo extra para su aprendizaje.

Descriptores: Máquinas Eléctricas, Accionamientos, Transitorios Electromagnéticos, Simulación.

ABSTRACT

An educational innovation based on the use of an electromagnetic transient program with graphical interface is described. The main purpose is the introduction of PSCAD/EMTDC as a complement of the practical laboratory classes and as a reinforcement of the theoretical ones. The choice of the computer package has been realized taking into account two basic characteristics: it must have a low learning threshold and must be as friendly and self-explanatory as possible. This way, there is no need for the teachers to reserve a lot of class time to teach it, nor the students have to expend extra time to learn it.

Key words: Electrical Machines, Drives, Electromagnetic Transients, Simulation.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años se viene observando un crecimiento importante de la utilización de los ordenadores como recurso didáctico, especialmente en el área de la Ingeniería Eléctrica. La enseñanza de los accionamientos eléctricos no es una excepción, sino que por el contrario y, debido a sus peculiaridades, es un campo que podría citarse como una buena muestra de ello.

Un accionamiento eléctrico es un sistema multidisciplinar en el que convergen los conocimientos teóricos y prácticos de varias áreas (máquinas eléctricas, mecánica, electrónica de

potencia, adquisición y tratamiento de señales, control, etc.) en el diseño de un equipo de alta tecnología. La comprensión de las interacciones entre los diferentes subsistemas que integran el accionamiento y el efecto de los diferentes parámetros, generalmente presentan dificultades a los estudiantes. Todo ello se ve agravado por la no linealidad que pueden llegar a exhibir alguno de los subsistemas del accionamiento, como el convertidor electrónico de potencia o la propia máquina eléctrica. A estas dificultades hay que añadir las derivadas de las presiones temporales sobre los programas de las asignaturas y la necesidad de cubrir una gran cantidad de material en las mismas, que hacen que se deje muy poco tiempo a los alumnos para que puedan integrar el caudal de conocimiento que reciben en las clases.

Las clases prácticas de laboratorio, como es bien conocido, constituyen un importante recurso didáctico en la enseñanza de multitud de materias, de entre las que cabe destacar las relacionadas con la ingeniería, en general. Cuando los grupos son numerosos, las prácticas de laboratorio constituyen casi el único escenario docente real que permite un trato personalizado con los alumnos (en un ambiente menos formal que las clases magistrales), y constituyen una excelente ocasión para conseguir que participen y se involucren activamente en su propio proceso de aprendizaje. Además, lo hacen de la forma mejor y más perdurable posible: aprenden haciendo, y con retroacción inmediata, tanto para el profesor como para los alumnos.

El laboratorio es, además, el escenario natural en el que los alumnos pueden conseguir un cierto grado de familiaridad con los equipos, dispositivos y técnicas descritas en las clases magistrales. No obstante, los ensayos de laboratorio suponen un consumo de tiempo importante. Además, la infraestructura y los equipos de laboratorio necesarios para la realización de los diferentes ensayos pueden llegar a ser realmente caros, especialmente en el ámbito de las máquinas y los convertidores electrónicos de potencia involucrados en los accionamientos.

La simulación mediante ordenador abre otra vía complementaria a la obtención de "experiencia" con las máquinas y los accionamientos eléctricos. Programas para el análisis de transitorios electromagnéticos como EMTP o EMTDC se han venido utilizando desde hace tiempo, pero casi exclusivamente en ámbito de los especialistas, dado que el dominio de cualquiera de ellos requiere una importante dedicación en cuanto a tiempo y esfuerzo. Estos programas, orientados a la ejecución en tanda, son muy rígidos en cuanto al formato de los datos de entrada, que debe realizarse mediante los correspondientes ficheros alfanuméricos de datos. La salida no es mucho más amigable, ya que se produce mediante otro fichero que requiere cierta pericia por parte del usuario para su correcta interpretación.

La reciente aparición de programas para PC con entorno gráfico de simulación como PSCAD/EMTDC (Manitoba HVDC Research Centre, 1999), desarrollado en el Manitoba HVDC Research Centre, ofrecen una gran flexibilidad y accesibilidad, sin merma alguna en cuanto a capacidad de simulación de transitorios. Este programa, básicamente ofrece al usuario una completa "paleta" de (modelos de) componentes representados por iconos, que son los bloques básicos con los que construir los circuitos.

Los circuitos se "construyen" arrastrando los iconos correspondientes a los modelos de los componentes desde la "paleta" hasta la ventana de simulación y conectando estos "dispositivos" mediante "hilos" de conexión. Como puede verse, el

proceso de construcción de un circuito en la ventana de simulación es bastante parecido a la representación del esquema del circuito en estudio.

Una vez construido (representado) el circuito, se procede a su simulación mediante el módulo correspondiente. Es posible seleccionar los gráficos de las magnitudes a representar durante la simulación, e ir viéndolas evolucionar durante el proceso de simulación. Esta es una característica muy importante del programa, ya que permite al usuario observar la evolución temporal de estos gráficos (obtenidos por simulación), que es algo muy parecido a lo que podría ver en la pantalla de un osciloscopio en un ensayo de laboratorio real.

La ventana de simulación permite la utilización de pulsadores, diales, botones deslizantes, aparatos de medida, etc., que permiten al usuario del programa un control interactivo de la simulación. Por ejemplo, durante la simulación puede cambiarse la referencia de velocidad de un accionamiento de la misma forma que lo haría el operador del equipo real.

La interface gráfica no es un refinamiento superfluo en absoluto, sino que hace que la aplicación resulte más amigable y, sobre todo, no requiere un alto grado de experiencia por parte de los usuarios, ni distrae a los estudiantes con los detalles de la simulación.

Las primeras versiones del simulador PSCAD/EMTDC sólo podía instalarse en estaciones de trabajo bajo Unix, lo que limitaba enormemente su aprendizaje por parte de la mayoría de los potenciales usuarios. Finalmente, en 1999, se lanzó la primera versión para PC. +El propósito inicial para el que fue desarrollado este simulador hace que los modelos de líneas de alta tensión (tanto aéreas como subterráneas) y de componentes de electrónica de potencia (tanto los dispositivos como su lógica de control) hayan sido objeto de especial estudio. También son minuciosamente tratados los modelos de los equipos de excitación de alternadores y de regulación de turbinas hidráulicas.

Además de los componentes anteriormente indicados, existen también modelos para máquinas síncronas, de inducción y transformadores, fuentes de tensión e intensidad independientes, fuentes de armónicos, compensadores estáticos de reactiva, analizadores de Fourier, medidores de valores instantáneos y eficaces, interruptores, cortocircuitos y un largo etcétera.

Todo ello hace de PSCAD/EMTDC uno de los principales programas de simulación de transitorios eléctricos (a pesar de que no esté libre de errores de programación y modelado, y de que la interface gráfica de diálogo para la introducción de esquemas bien pudiera ser algo más cómoda).

Entroncando con la cada vez más abundante actividad entorno a la utilización de ordenadores en el campo de la docencia de la Ingeniería Eléctrica (Burgos, 1991, Burgos, Casal e Izquierdo, 1993, Burgos, González y Vallejo, 1994, Gole y otros, 1996, Burgos y otros, 1997, Casal y otros, 1998 y Vallejo, González y Burgos, 1998), en este trabajo se propone la introducción de los que podrían denominarse "Laboratorios Complementarios de Simulación Gráfica", basados en PSCAD/EMTDC, en los currícula de Máquinas y Accionamientos Eléctricos, aunque la flexibilidad y potencia del programa hace que sea fácilmente aplicable a la mayor parte de las asignaturas relacionadas con la Ingeniería

Eléctrica. Es importante subrayar que los ejemplos de simulación deben diseñarse de forma que sean un complemento de las clases y no como sustituto ni de las presentaciones analíticas convencionales ni mucho menos, de las clases prácticas de laboratorio.

OBJETIVO Y METODOLOGÍA

El objetivo del presente Proyecto de Innovación es introducir al alumno en el campo de la simulación por ordenador de accionamientos eléctricos. En concreto se pretende mejorar el proceso enseñanza-aprendizaje de los alumnos mediante la creación de una serie de módulos de simulación de accionamientos que sirvan de complemento a las enseñanzas tanto de tipo teóricas como prácticas.

Una vez identificadas las dificultades y establecidos los requisitos básicos de la actividad a desarrollar, se ofreció como trabajo voluntario a un grupo de alumnos de Ingeniería Industrial, especialidad Eléctrica. Su tarea es doble:

- Puesta a punto y comprobación del correcto funcionamiento del programa en el Centro de Cálculo de la Escuela.
- Realización de una serie de ejemplos propuestos a fin de establecer las posibles dificultades y poder hacer una previsión de tiempo más ajustada.

Posteriormente, en la segunda fase de la actividad, son a los restantes alumnos de las asignaturas de Cálculo y Construcción de Máquinas Eléctricas (5º curso de Ingeniero Industrial, especialidad Eléctrica) y Máquinas y Accionamientos Eléctricos (2º curso de Ingeniero en Automática y Electrónica Industrial) los que realizan los trabajos de simulación.

Se pretende que esta experiencia sirva como un primer paso que permita su aplicación, en lo que sería una tercera fase de la actividad, a otras asignaturas como Tracción Eléctrica (6º curso de Ingeniero Industrial, especialidad Eléctrica), Centrales Eléctricas (6º curso de Ingeniero Industrial, especialidad Eléctrica) y Máquinas Eléctricas (4º curso de Ingeniero Industrial, especialidad Eléctrica).

UN EJEMPLO DE SIMULACIÓN

Para ilustrar el uso del programa se describe brevemente un simple ejemplo de simulación: un rectificador de doble onda alimentando una carga pasiva de tipo R-L. Este ejemplo se ha desarrollado utilizando una versión gratuita (limitada a 15 nodos) que puede descargarse accediendo a la página principal de Manitoba HVDC Research Centre (<http://www.hvdc.ca>).

Pulsando sobre el icono de PSCAD se inicia su ejecución con la aparición de dos ventanas: *Project tree* y *Message tree*. La primera hace referencia a las librerías y casos (esquemas) que el ordenador tiene en memoria.

Al principio aparecerá únicamente la librería *Master Library*. Si se hace doble clic sobre la línea “**master [psl] Master Library**” (psl y psc son respectivamente las extensiones asignadas a las librerías y a los casos o esquemas) aparecerá otra ventana (*paleta*) de nombre *master: Main* con quince grupos de componentes, en los que se encuentran todos los modelos agrupados en fuentes, líneas, componentes de flujo de señal, etc. Sin embargo, la mayoría de las veces, el usuario no necesitará entrar en estas sublibrerías, dado que a la derecha de la ventana se encuentran los modelos de los elementos más utilizados. La Fig. 1 muestra la ventana *master:*

Main abierta sobre las ventanas *Project tree* y *Message tree*.

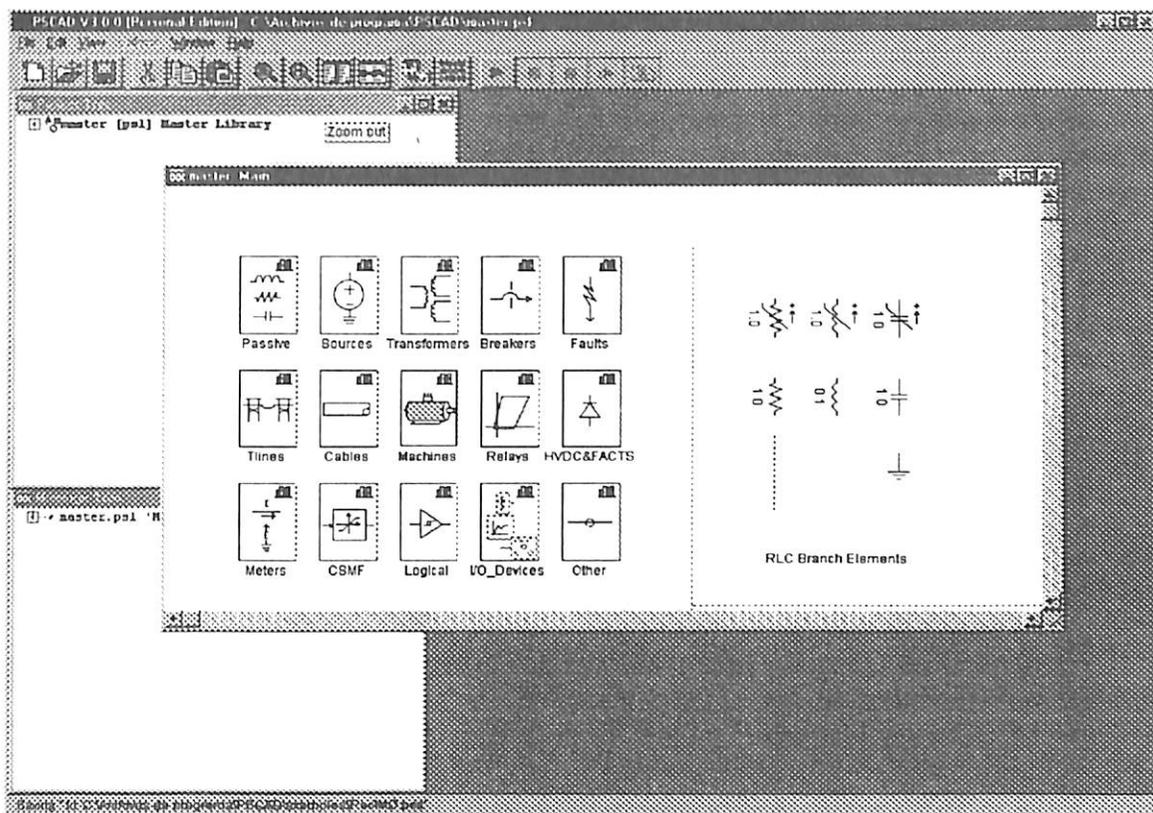


Fig. 1. Pantalla principal mostrando la ventana *master: Main*

Creación de un nuevo caso

Para comenzar a crear el caso, se vuelve a la ventana de *Project Tree*, y del menú superior, se escoge **E**ile → **C**reate **N**ew **P**roject → **C**ase. Entonces aparece una línea más en el árbol de proyectos con el nombre por defecto de *noname*. Se le puede cambiar el nombre accediendo a **E**ile → **S**ave **P**roject **A**s y a continuación el nombre deseado, p.ej. RectOC (rectificador de Onda Completa). Haciendo clic con el botón derecho del ratón, se puede acceder a un menú de propiedades *Properties* en el que se puede definir, entre otras cosas, la duración de la simulación, el paso de integración o el periodo con que se almacenan y se presentan las magnitudes a visualizar.

Trazado del Esquema

La Fig. 2 muestra el esquema del circuito rectificador monofásico con carga pasiva cuyo funcionamiento desea simularse.

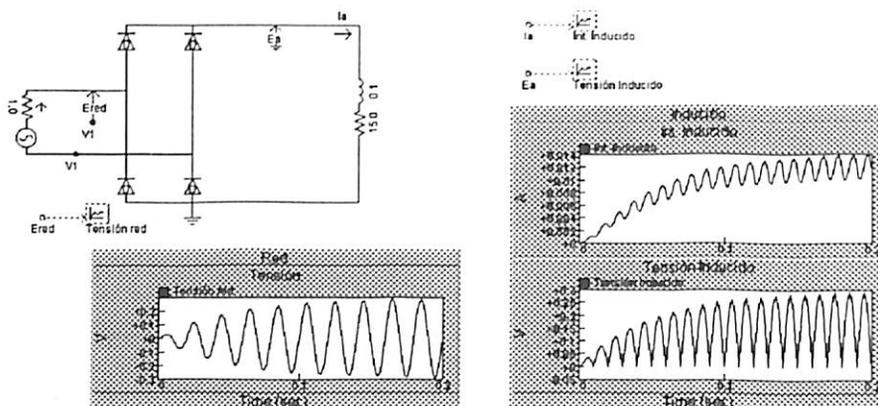


Fig. 2. Rectificador monofásico con carga pasiva.

Las tres magnitudes que interesa seguir durante la simulación son las siguientes:

- Tensión en la red
- Tensión en la salida rectificada
- Intensidad en el circuito rectificado

Para realizar este seguimiento hay que añadir tres gráficas e incluir los aparatos de medida que permitan acceder a las magnitudes a visualizar.

Copiado y parametrización de la fuente de tensión

Haciendo doble clic sobre la línea en que aparece RectOC [psc] se abre una ventana de nombre *RectOC: Main* sobre la que el usuario puede comenzar a trazar el esquema. Se puede comenzar por añadir una fuente de tensión alterna de 220 V.

Para ello, se busca el icono correspondiente en la paleta (ventana *Master: Main*). Ahora el usuario dispone de dos opciones (dado que una fuente de tensión es un elemento muy común): buscar en dicha paleta, o bien, hacer doble clic sobre el icono de las fuentes (*Sources*) para seleccionarlo de esa librería (la ventana *Master: Main* se reemplazará por *Master: Main. Sources*). En este último caso, si se quiere volver a la paleta (o *canvas*) de partida habrá que hacer doble clic de nuevo sobre la línea *master ...* de la ventana de *Project Tree*. En cualquier caso, una vez que se ha localizado la fuente de tensión, se copia para llevarla a la ventana de trazado (que lleva por nombre *RectOC: Main*). [Se copia con Ctrl+C, y se pega con Ctrl+V].

Una vez copiado el elemento hay que parametrizarlo (asignarle valores). Haciendo doble clic sobre el componente, se accede a una de las pantallas de edición de parámetros. Para cada elemento existe una o varias de estas pantallas (algunas se mostrarán deshabilitadas y otras no es necesario rellenarlas). La primera de ellas es la llamada *Configuration*, que puede rellenarse como se indica en la Fig. 3.

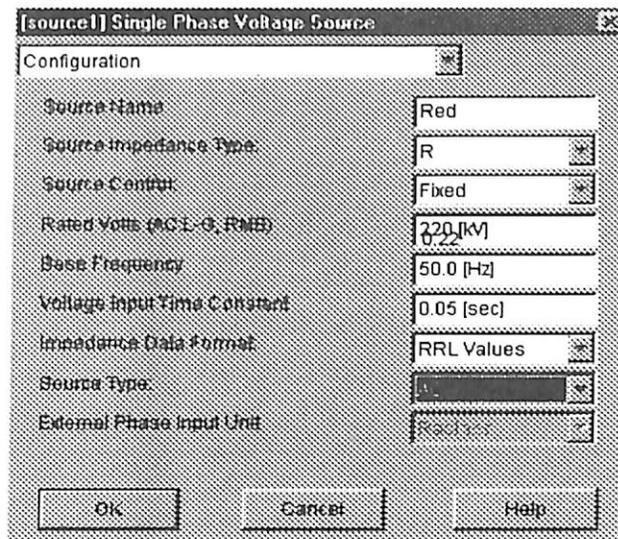


Fig. 3. Ventana de parametrización de una fuente de C.A.

A continuación, se seleccionan los valores iniciales de la fuente de tensión de alterna, para lo que se escoge *Ac Source Initial Values* del menú que se despliega haciendo clic sobre *Configuration*. Se introducirá de nuevo 0.22 [kV] y 50 [Hz]. El ángulo inicial se deja en 0°.

Copiado y parametrización de la carga pasiva

La carga estará compuesta por una resistencia y una inductancia en serie. Para estos elementos, antes que seleccionarlos de la paleta (*canvas*), es más rápido obtenerlos directamente haciendo clic con el botón derecho sobre la ventana de trazado de esquemas. Se selecciona **Add**→ **Resistor** del menú desplegable mostrado en la Fig. 4, con lo que aparecerá una resistencia en posición horizontal.

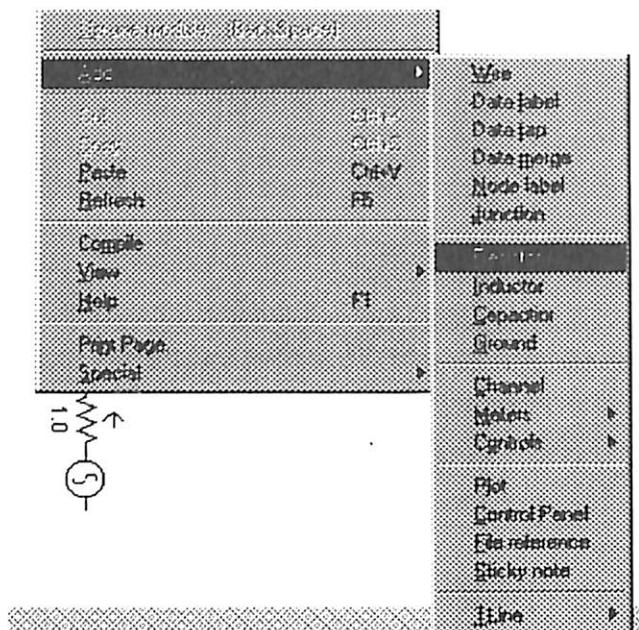


Fig. 4. Menú desplegable **Add**→ **Resistor**.

Para rotarla, se selecciona haciendo clic sobre la resistencia, con lo que aparece en un tono más grisáceo, y se hace clic derecho. Otra opción es hacer clic derecho teniendo el cursor sobre la resistencia pero sin seleccionarla previamente (sin hacer clic con el botón izquierdo; esto es, sin que el componente esté en tono gris). En este caso aparecerá un menú más completo con opciones avanzadas.

Para arrastrarla hasta el lugar deseado se hace clic sobre el componente, y sin soltar el botón, se desplaza con el ratón hasta el lugar escogido.

Para dar valores a la resistencia, se hace doble clic sobre la misma y se introduce el valor deseado (15 Ω en este ejemplo). A continuación se repite el proceso para la bobina (**Add**→ **Inductor**) a la que se le asignará un valor de 0.03 H, y se sitúa junto a la resistencia.

Puente rectificador y cableado

Los diodos que componen el puente rectificador se buscan de igual manera que la fuente de tensión, e igualmente, se puede encontrar en una sublibrería (HVDC&FACTS), o bien en la paleta principal.

Una vez copiado de la paleta y pegado en la ventana de trazado, se pueden editar sus parámetros. De nuevo, se tiene acceso a un menú más completo pulsando el botón derecho del ratón sobre el componente, pero sin seleccionar el componente previamente. Otra forma sería haciendo doble-clic sobre el componente, con lo que aparece un menú como el que se muestra en la Fig. 5.

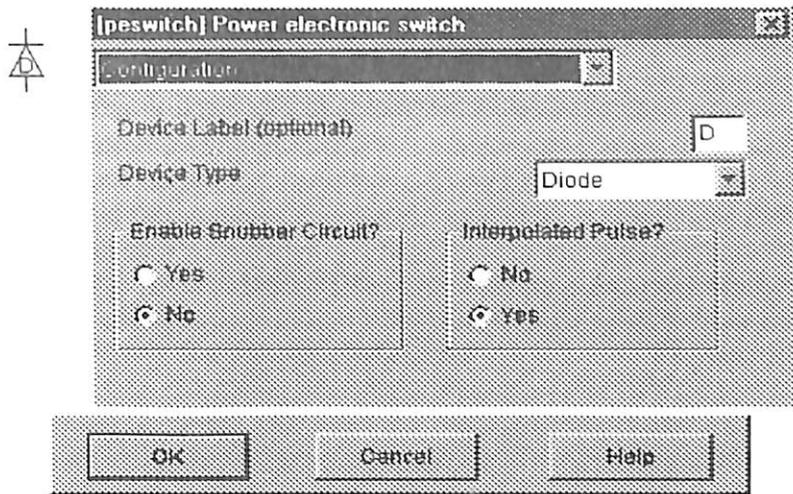


Fig. 5. Parametrización de los diodos.

En la primera pantalla, de configuración, aparece el tipo de dispositivo, que en este caso es un diodo. Pulsando sobre ese cuadro, se puede escoger también tiristores, GTO, IGBT o transistores. Para ellos se pregunta si habilitar un circuito amortiguador (*snubber*, R en serie con C y todo en paralelo con el dispositivo) para controlar la constante de tiempo ($\tau = RC$) del cambio de tensión en el dispositivo y si permitir pulsos interpolados, para el caso de que la frecuencia de operación del dispositivo sea mayor que la frecuencia de paso del integrador numérico. En este caso se deshabilitará el circuito amortiguador (*snubber*) y se permitirán pulsos interpolados, aunque en este caso, el paso de integración es mucho más pequeño que el periodo de actuación de los diodos.

Una segunda pantalla, *Main Data*, se refiere a resistencias directa y de bloqueo, caída de tensión en conducción y tensión de ruptura, así como al tiempo de extinción. En principio, y salvo que se esté probando un diodo concreto, se dejarán los valores por defecto. Una tercera pantalla se refiere a la posibilidad de acceder a diversos valores utilizados por el dispositivo, como la intensidad o la caída de tensión.

Una vez copiado y configurado el diodo, se copia tres veces para formar el puente rectificador de doble onda. Este puente hay que conectarlo a la fuente y a la carga mediante conductores (cables). Los conductores se obtienen del menú flotante que aparece al pulsar con el botón derecho sobre cualquier parte en blanco de la pantalla, al igual que se hizo con las resistencias e inductancias. Se selecciona, de este modo, **Add** → **Wire** y aparecerá un cable. El usuario puede a continuación, moverlo (para lo cual deberá hacer clic sobre una parte interior del cable y con el botón pulsado, mover el ratón), dimensionarlo (haciendo clic sobre un extremo del cable y moviendo el ratón) o rotarlo (haciendo clic sobre un extremo y arrastrándolo hasta más allá de la línea de 45° - 225° , o bien haciendo clic con el botón derecho y seleccionando **Rotate**). Finalmente se añade una tierra en la parte inferior del circuito con **Add** → **Ground**.

Elementos para visualización de valores

A continuación se detallan los pasos a seguir para añadir una gráfica que muestre un determinado valor, por ejemplo, la intensidad en el circuito rectificado.

Para incluir un muestreador de intensidad (en adelante amperímetro), hay que incluirlo en serie en el circuito, por lo que hay que abrirlo. En la Fig. 6 se muestra el circuito trazado hasta este punto, en el que ya se ha acortado el conductor superior para insertar el amperímetro. Para ello se accede al menú flotante de la ventana de trazado (clic derecho sobre cualquier zona en blanco) y se selecciona **Add**→ **Meter**→ **Ammeter** y se lleva añade en serie con la carga. Haciendo doble clic se puede cambiar el nombre, por ejemplo, por *Icarga*.

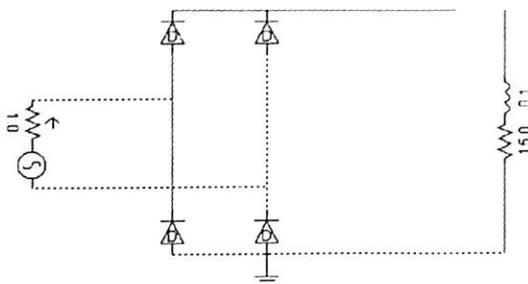


Fig. 6. Conexión de un amperímetro.

Para llevarlo a una gráfica, es preciso indicarle al simulador de PSCAD que recoja y guarde los valores que el amperímetro es capaz de muestrear en cada paso de integración. Para esto, hay que añadir un canal de salida (*Output channel*) unido a la señal de datos correspondiente a la magnitud a visualizar:

- *Data label*: es un nodo accesible del menú flotante mediante **Add**→ **Data Label** y que permite asociar un determinado dato, p.ej. la intensidad *Icarga*, a otro componente que reciba ese dato como entrada, p.ej. un canal de salida. Haciendo doble clic sobre el nodo se puede cambiar el nombre por defecto (*SignalName*) por el de la señal a monitorizar (en este caso, *Icarga*).
- *Output channel*: canal de salida que indique al simulador que se va a monitorizar una determinada señal. Se obtiene del menú flotante con **Add**→ **Channel**. Haciendo doble clic se accede a la ventana de edición de parámetros que se muestra en la Fig. 7.

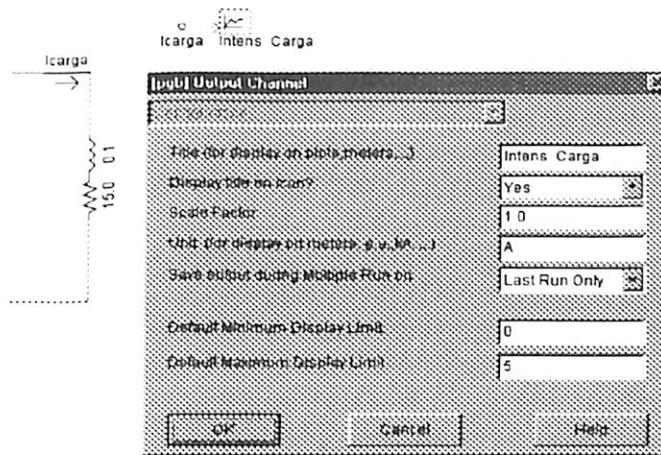


Fig. 7. Menú Flotante Add→Channel

- Es muy importante indicar al simulador de qué forma se van a monitorizar los datos. Para esto, se sitúa el ratón sobre el componente y SIN seleccionarlo, se hace clic con el botón derecho. A continuación, del menú desplegable de la Fig. 8, se escoge **Input/Output Reference** → **Add as Curve**. Puede decirse que se guarda en memoria el nombre de la señal que se pretende mostrar como curva o como medidor (sobrescribiendo si hubiera introducido anteriormente el nombre de otra señal anterior).

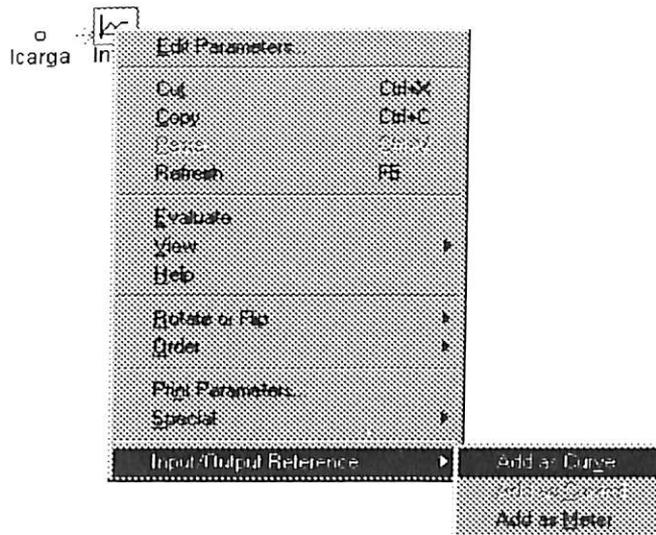


Fig. 8. Menú desplegable para añadir una curva.

- Se puede unir el nodo de señal con el canal de salida con un conductor o bien unir ambos componentes.
- Plot: finalmente se añade la ventana de visualización de la evolución de la intensidad a la que se accede con **Add** → **Plot**. Haciendo doble clic sobre el título (la parte superior con **Untitled** como título por defecto) se cambian las propiedades generales de esa ventana. Se cambiará el título por, p.ej. **Carga** dado que en esta ventana se visualizará tanto intensidad como tensión en la carga. La simulación se reducirá a 0.2 segundos por lo que el tiempo máximo se baja de 0.5 s a 0.2 s. En realidad este es el intervalo que se visualiza. Para definir el intervalo de simulación se vio que había que acceder al menú de propiedades **Properties** del caso creado, para lo que había que hacer clic derecho sobre la línea **RectOC** del **Project Tree**.

El siguiente paso es añadir tantos gráficos como variables se van a visualizar en esta ventana de visualización. Para esto, se hace clic derecho (sin pulsar anteriormente el izquierdo) sobre la barra de título o la barra de pie de la ventana de visualización **Plot** y se escoge **Add** → **Graph**. Ya se puede añadir también una gráfica para la tensión, con lo que repetimos el proceso. Para mover o cambiar el tamaño de la ventana **Plot**, se selecciona la ventana pulsando con el botón izquierdo sobre la barra de título o la de pie.

Haciendo doble clic en el interior de la gráfica se puede cambiar el nombre por defecto (*no name*) a, p.ej. *Evolución de intensidad* y *Evolución tensión*.

Para indicarle a la gráfica qué señal tiene que representar, se pulsa el botón derecho sobre la gráfica en cuestión y se selecciona **Paste Curve** **Ctrl+V**. Si da algún mensaje de error (o aparece otra señal distinta), aceptar el mensaje de error (borrar esa señal) y repetir los pasos que se dieron en el punto *Output Channel* relativos a la selección **Input/Output Reference** → **Add as Curve**. La Fig. 9 muestra el resultado.

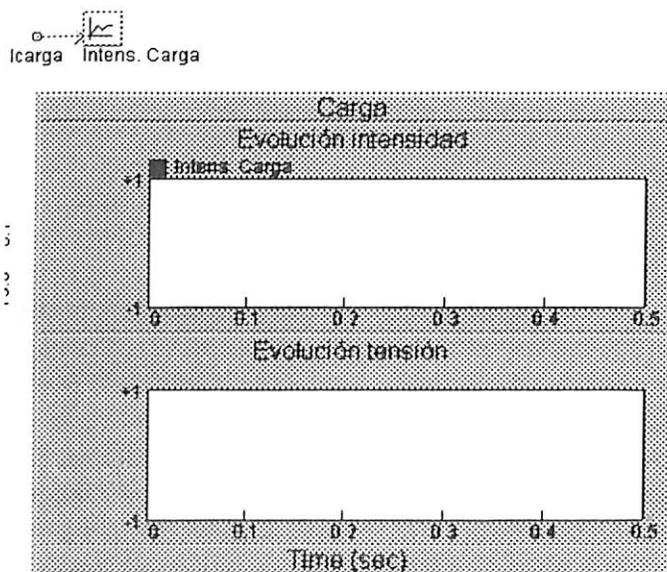


Fig. 9. Pantalla de visualización gráfica de resultados.

A continuación se incluirá un muestreador de tensión (en adelante voltímetro), que mida la caída en la carga. Al estar un extremo de la carga a tierra, basta con que se mida la diferencia de potencial entre el otro extremo y tierra, para la cual PSCAD ya incorpora un componente. Se accede a él del menú flotante con **Add** → **Meters** → **Voltmeter to Ground** y se sitúa apuntando a algún punto con el potencial del extremo superior de la carga. Haciendo doble clic se le asigna un nombre, p.ej. *Vcarga*.

Simulación del circuito

Para ejecutar el circuito basta con pulsar el botón (verde) de simulación de la barra de menú. El programa compilará y ensamblará los módulos necesarios y procederá a la simulación. En el caso de que existan gráficas, también mostrará los valores de las magnitudes a representar. Se pueden reescalar los ejes verticales y horizontales pulsando con el botón derecho sobre la gráfica correspondiente y escogiendo **Graph Properties** o bien **Auto range X** o **Auto range Y**. La Fig. 10 muestra la pantalla con los resultados.

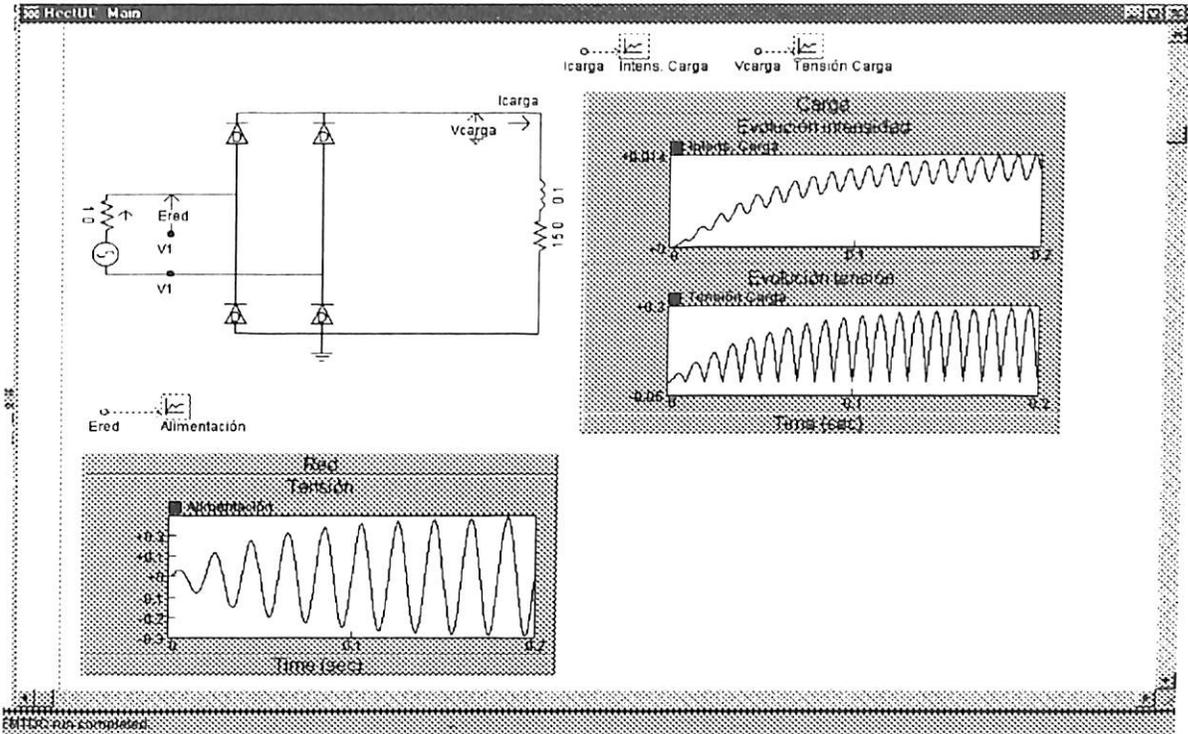


Fig. 10. Pantalla de simulación.

En la figura puede apreciarse una de las características de PSCAD, que es la necesidad de partir de valores iniciales nulos para las fuentes de tensión y hay que esperar a la estabilización del sistema a la tensión de alimentación deseada.

CONCLUSIONES

Se ha propuesto la utilización de programas para PC de simulación de transitorios electromagnéticos con interfaces gráficas como PSCAD/EMTDC, como complemento educacional en la enseñanza de accionamientos eléctricos. Este tipo de programas hace posible simular la “conexión” entre modelos de circuitos y sistemas de forma similar a como se conectan los componentes y equipos en el laboratorio.

Tanto los aspectos teóricos como los relacionados con los costes asociados a la infraestructura necesaria para la realización de prácticas, hace que la simulación por ordenador pueda resultar un complemento (nunca un sustituto) de gran ayuda en la enseñanza en este campo de la Ingeniería Eléctrica. Por un lado, la simulación puede servir de ayuda a la hora de identificar y caracterizar la interacción entre los subsistemas, gracias a la rapidez con la que pueden simularse casos diferentes. Por otro, ayuda a visualizar aspectos del funcionamiento difíciles (a veces imposibles) de observar en equipos industriales, o que requieren la utilización de equipo muy costoso, todo ello gracias a las capacidades gráficas que suelen presentar este tipo de programas.

Otro factor a tener en cuenta es la actitud tan positiva que suelen presentar los alumnos hacia la utilización de ordenadores en sus trabajos. Esto convierte al ordenador en un recurso didáctico que desempeña también un papel de motivación muy importante a la hora de que una innovación como la que se propone tenga una respuesta favorable por parte del alumnado.

BIBLIOGRAFÍA

- M. BURGOS PAYÁN, *Mejora de una Práctica de Laboratorio Utilizando un Ordenador*, I CONGRESO INTERNACIONAL SOBRE CALIDAD DE LA ENSEÑANZA UNIVERSITARIA, Puerto de Santa María, del 6 al 8 de marzo de 1991, p. 26-35.
- M. BURGOS PAYÁN, M. CASAL GÓMEZ-CAMINERO, C. IZQUIERDO MITCHELL, *Mejora de una Práctica sobre Máquinas de Inducción Utilizando un Ordenador*, REVISTA DE ENSEÑANZA UNIVERSITARIA (I.S.S.N.: 1131-5245 ICE de la Universidad de Sevilla), No. 5, Junio 1993, p. 57-67.
- M. BURGOS PAYÁN, Á.G. GONZÁLEZ RODRÍGUEZ, M.A. VALLEJO SAURA, *Generadores de Inducción en las Prácticas de Laboratorio*, REVISTA DE ENSEÑANZA UNIVERSITARIA (I.S.S.N.: 1131-5245 ICE de la Universidad de Sevilla), No. 7-8, Junio-Diciembre 1994, p. 87-101, España.
- M. BURGOS, M. CASAL, P. CRUZ, Á.G. GONZÁLEZ, C. IZQUIERDO, M.A. VALLEJO, *Resolución de Problemas de Máquinas Eléctricas con Matlab*. REVISTA DE ENSEÑANZA UNIVERSITARIA (I.S.S.N.: 1131-5245 ICE de la Universidad de Sevilla), Número extraordinario 1997, p. 47-56.
- M. CASAL GÓMEZ-CAMINERO, M. BURGOS PAYÁN, P. CRUZ ROMERO, A.G. GONZÁLEZ RODRÍGUEZ, C. IZQUIERDO MITCHELL, *Monitorización y Control del Arranque de una Máquina de Corriente Continua*. REVISTA DE ENSEÑANZA UNIVERSITARIA (I.S.S.N.: 1131-5245 ICE de la Universidad de Sevilla), Número extraordinario 1998, p. 113-124

M.A. VALLEJO SAURA, Á.G. GONZÁLEZ RODRÍGUEZ, M. BURGOS PAYÁN, *Cuaderno Informático para Prácticas de Ingeniería Eléctrica*, REVISTA DE ENSEÑANZA UNIVERSITARIA (I.S.S.N.: 1131-5245 ICE de la Universidad de Sevilla) No. 12, 1998, p. 37-52.

A.M. GOLE, O.B. NAYAK, T.S. SIDHU, M.S. SACHDEV, *A Graphical Electromagnetic Simulation Laboratory for Power Systems Engineering Programs*, IEEE TRANS. ON POWER SYSTEMS, Vol 11, No. 2, May 1996, p. 599-606.

MANITOBA HVDC RESEARCH CENTRE, *PSCAD/EMTDC Version 3 Getting Started Manual*, Winipeg, 1999.

<http://www.hvdc.ca>, Página principal de Manitoba HVDC Research Centre.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento al Instituto de Ciencias de la Educación (I.C.E.) de la Universidad de Sevilla por la financiación de este trabajo mediante la concesión de una ayuda, en el marco de la Convocatoria de Ayudas a la Docencia Universitaria para el curso 1999/00.