

## Simulación de circuitos eléctricos mediante Design Center

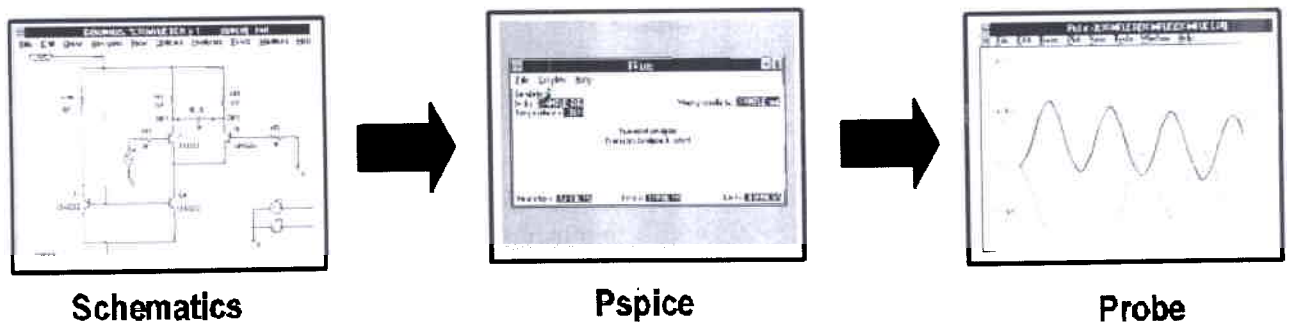
**Salvador Pérez Litrán, Carlos M. Pérez López, Jesús Rodríguez Vázquez, Patricio Salmerón Revuelta.**

Departamento de Física Aplicada e Ingeniería Eléctrica. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Huelva. Ctra. de Palos de la Fra. s/n 21819 Huelva. Tel: (959)350651; Fax: (959)350311

### 1.- INTRODUCCION

**E**N todos los sectores de nuestra sociedad el ordenador ha pasado a ser una herramienta habitual. La enseñanza no ha permanecido ajena a tal situación. Así, es ya común la utilización del ordenador como un complemento didáctico en las disciplinas técnicas. En concreto, en el área de ingeniería eléctrica, las asignaturas que tienen que ver con la teoría de circuitos se ven potenciadas por el uso de los programas de simulación. Este tipo de programas permiten acercarse de forma directa al funcionamiento de los circuitos eléctricos, [1-3]. entre los paquetes de software más populares para la simulación de redes eléctricas destaca el DESIGN CENTER. Se trata de un software de propósito general que permite definir, simular y analizar circuitos eléctricos, [4]. Su fácil manejo y abundante documentación lo convierten, desde el punto de vista didáctico, en una interesante ayuda. El paquete lo constituyen básicamente tres programas según se muestra en el esquema de la figura 1. Éstos son:

- Schematics. Editor gráfico para el dibujo del circuito objeto de estudio.
- Pspice. Programa que analiza y resuelve el circuito de trabajo.
- Probe. Postprocesador gráfico que permite la presentación en pantalla de los resultados de la simulación.



*Figura* Esquema de funcionamiento del Design Center

El Design Center permite dibujar con facilidad el circuito de trabajo; esto significa, que el alumno introduce como datos al programa el propio esquema eléctrico del circuito. El programa automáticamente plantea las ecuaciones, las resuelve y dispone los resultados para ser presentados de forma gráfica. La

introducción del esquema y la presentación de cualquiera de sus formas de onda en la pantalla del ordenador permiten la interpretación física de su comportamiento eléctrico.

En esta comunicación, se presentan distintas simulaciones, orientadas todas a cubrir tres unidades didácticas básicas en cualquier asignatura de análisis de circuitos: la respuesta transitoria, la respuesta en frecuencia y el circuito de potencia. Cada uno de los ejemplos aquí propuestos para los alumnos buscan ilustrar cada uno de los bloques temáticos anteriores.

Se incluyen seis simulaciones, dos por cada una de las unidades didácticas mencionadas anteriormente. Con ello se tratan las cuestiones más significativas sobre el régimen transitorio de los circuitos de primero y segundo orden, el circuito resonante, la respuesta en frecuencia de un filtro activo, la potencia eléctrica en un circuito trifásico y el análisis de Fourier de una intensidad no senoidal. La visualización de las formas de onda características de cada uno de los circuitos propuestos ayuda al alumno a entender las enseñanzas teóricas recibidas.

## 2.- SOBRE EL CONTENIDO DE LA ASIGNATURA DE «CIRCUITOS ELÉCTRICOS»

Las asignaturas relacionadas con los circuitos eléctricos dentro de las carreras técnicas han venido denominándose de distinta manera. Así, si nos referimos a esta materia en las escuelas superiores de ingeniería, los planes de estudio tradicionales la denominan «Electrotecnia»; mientras que en las escuelas de ingeniería técnica adoptan el nombre de «Teoría de circuitos». Los nuevos planes de estudio aumentan en mayor medida el abanico de denominaciones. A pesar de ello, una lectura pausada de sus descriptores nos muestra que, efectivamente, estamos ante los mismos contenidos.

Cualquier asignatura de circuitos eléctricos incluye, entre otras, las siguientes unidades temáticas:

**El circuito transitorio.** En esta unidad se recogen los contenidos que tienen que ver con los elementos de circuitos y sus distintas interconexiones con la finalidad de estudiar sus respuestas dinámicas.

**El circuito en el dominio de la frecuencia.** Esta unidad incluye todos aquellos tópicos relacionados con el comportamiento de los circuitos eléctricos frente a la frecuencia: análisis fasorial, reso-

nancia y respuesta frecuencial de circuitos selectivos.

**El circuito de potencia.** Bajo este nombre se aglutinan todos aquellos contenidos correspondientes al análisis de los circuitos trifásicos, incluidos aquellos que contengan cargas no lineales. Esto último permite efectuar un análisis armónico de las señales de interés.

La experiencia en la enseñanza de esta materia pone de manifiesto la dificultad que la misma despierta en los alumnos. Por ello resulta interesante cualquier herramienta que facilite la labor docente en este tipo de asignatura.

Sobre esta base gira el contenido de esta comunicación. Ciertamente, las unidades temáticas anteriores son una parte fundamental de la teoría de circuitos y, por tanto, su comprensión por parte del alumno. El Design Center se confirma como una de las herramientas de simulación de circuitos eléctricos más eficaces para el desarrollo de esta labor, [5]. De forma más concreta se señalan algunas de sus principales cualidades.

- La primera que se destaca, es el hecho de que el alumno conoce de forma inmediata los posibles errores de conexión eléctrica que haya cometido al introducir el esquema. Esto disciplina al usuario en el mantenimiento de las reglas eléctricas, referidas al conexionado, inclusión de las masas, asociaciones patológicas, etc.

- La segunda cualidad que incorpora es la posibilidad de visualizar todas aquellas formas de onda que se han manejado en el aula. Esto es especialmente interesante en el análisis del circuito transitorio. Así, mediante un análisis paramétrico, se pueden observar por ejemplo las respuestas de los casos sobreamortiguado, críticamente amortiguado y subamortiguado en un circuito de segundo orden.

- La tercera cualidad importante es la facilidad que este paquete de software supone para el estudio de temas de cierta laboriosidad matemática. Así, el estudio de un circuito doblemente sintonizado supone plantear un número elevado de ecuaciones que alejan del significado eléctrico del fenómeno. Esto puede ser salvado, en parte, gracias a la posibilidad de ver en pantalla la respuesta en frecuencia de la red cuando varía su coeficiente de acoplamiento.

- La cuarta cualidad a considerar es la posibilidad de representar tanto numérica como gráficamente el análisis de Fourier. De esta forma es posible conocer la distorsión armónica que las cargas no lineales introducen en la intensidad de la red.

- Por último, la quinta cualidad que aquí se destaca es el entorno que el Design Center ofrece para la modelización de dispositivos y sistemas eléctricos. En efecto, la posibilidad de editar subcircuitos, acerca al alumno a la técnica de modelización de dispositivos y/o circuitos de dos o más terminales; por ejemplo es posible encontrar un modelo de amplificador operacional mediante la utilización de una fuente controlada. De esta forma se consigue dar un sentido a las fuentes dependientes cuya comprensión resulta tan abstracta para el alumno.

Todos estas cualidades son aprovechadas para el desarrollo de los contenidos temáticos de la asignatura de teoría de circuitos.

### 3.- SIMULACION DE LA RESPUESTA DINAMICA

Una de las unidades didácticas importantes dentro de la teoría de circuitos es la dedicada al análisis del régimen transitorio. Es durante el estudio de esta unidad cuando el alumno se enfrenta al comportamiento dinámico de las redes.

El programa Pspice permite la obtención de la respuesta transitoria a partir de la declaración de control «TRAN», lo que puede indicarse en el programa Schematics desde la opción «Setup» del menú de «Analysis». El programa calcula las variables de salida como función del tiempo en un intervalo especificado. En primer lugar el programa realiza de forma automática el cálculo del punto de polarización. En este primer análisis se tienen en cuenta los valores iniciales de los nudos del circuito y los parámetros incrementales de los elementos no lineales. [6-8]

Los resultados de la simulación permiten al alumno comprender cómo evolucionan las distintas variables del circuito transitorio. Así, por ejemplo, en un circuito de primer orden puede observar cómo la constante de tiempo es la misma para todas las formas de onda y analizar la evolución de estas señales al modificar dicho parámetro. Otro concepto difícil de asimilar por el alumno es la aparición de impulsos en un circuito eléctrico, y cómo éstos hacen variar de forma brusca las condiciones iniciales de los elementos almacenadores de energía. La figura 2 presenta un circuito de primer orden con amplificador operacional (A.O.). A través del editor de librerías del Schematics se modelaron dos de los elementos que aparecen en el esquema. Por un lado, se creó un símbolo para el A.O., al que se asoció un subcircuito construido a partir de una fuente con-

trolada. De la misma manera se creó un símbolo para el conmutador, al que se asoció un subcircuito modelado a partir de dos «switches», esto es, dos interruptores ideales que incorpora la librería del programa, [4,6-8]. La figura 3 muestra los resultados de la simulación; allí aparecen las intensidades de la bobina L2 y de la bobina L1 a partir de  $t=0$ . En las corrientes de estos elementos, aparecen sendos cambios bruscos en el momento de cambio de posición del conmutador en  $t=1$ .

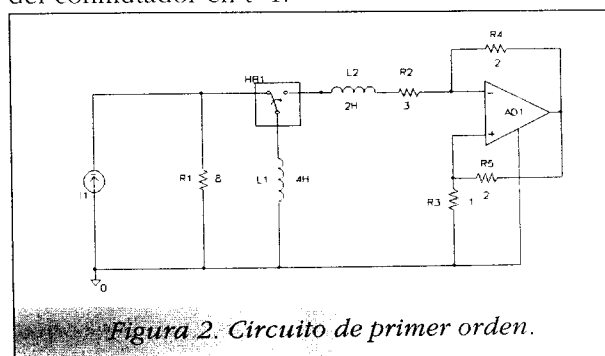


Figura 2. Circuito de primer orden.

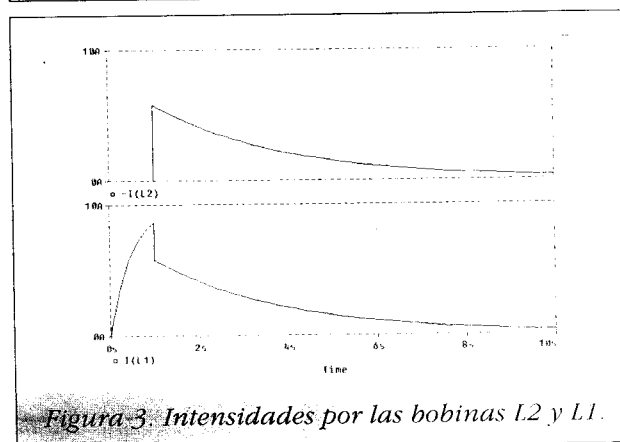


Figura 3. Intensidades por las bobinas L2 y L1.

Otra de las ventajas que incluye el Design Center para el aprendizaje de esta materia es la posibilidad de efectuar un análisis paramétrico del circuito. La declaración «PARAM» realiza las simulaciones secuenciales para varios valores de un parámetro del circuito. Así pueden verse cómo evolucionan las respuestas de la red. Se realizó una aplicación de este tipo de análisis para un circuito de segundo orden con el objetivo de presentar los distintos casos de amortiguamiento. En efecto, en la figura 4 se presenta un circuito RLC serie. Para este circuito se obtuvo la simulación de la intensidad para tres valores de la resistencia. El programa PROBE muestra simultáneamente las tres formas de onda obtenidas, correspondientes a los casos de sobreamortiguamiento, amortiguamiento crítico y subamortiguamiento (figura 5).

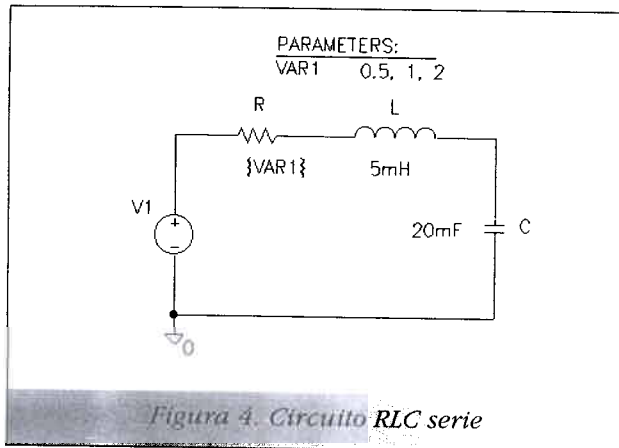


Figura 4. Circuito RLC serie

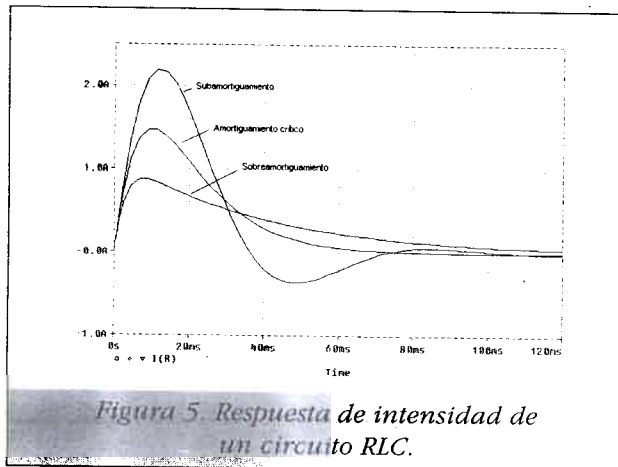


Figura 5. Respuesta de intensidad de un circuito RLC.

#### 4.- SIMULACION DE LA RESPUESTA EN FRECUENCIA

Otro de los bloques temáticos básicos en la asignatura de Teoría de Circuitos es el estudio de la red eléctrica en el dominio de la frecuencia. Se le presenta al alumno una nueva perspectiva en el análisis de los circuitos eléctricos.

Para realizar un análisis frecuencial, el PSPICE utiliza la declaración de control «AC», calculando la respuesta sobre un rango de frecuencias especificado.

La primera simulación que aquí se presenta consiste en un circuito doblemente sintonizado caracterizado por la presencia de dos bobinas acopladas magnéticamente (figura 6). El estudio teórico de este tipo de configuraciones es de una cierta laboriosidad matemática, lo que dificulta la comprensión por parte del alumno. Un análisis paramétrico de la respuesta para distintos valores del coeficiente de acoplamiento (K) ayuda a entender este fenómeno.

La figura 7 muestra la tensión en los extremos del condensador para tres valores de K. Aquí se observa cómo para la frecuencia de resonancia la tensión no alcanza su valor máximo, salvo para un valor menor o igual al crítico  $K_c=0.001$ . Para valores superiores a este, aparecen dos valores máximos para frecuencias diferentes a la de resonancia.

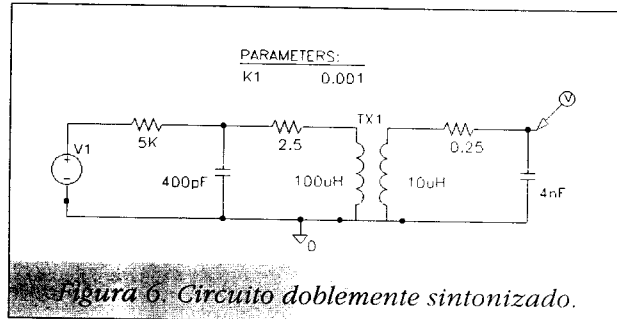


Figura 6. Circuito doblemente sintonizado.

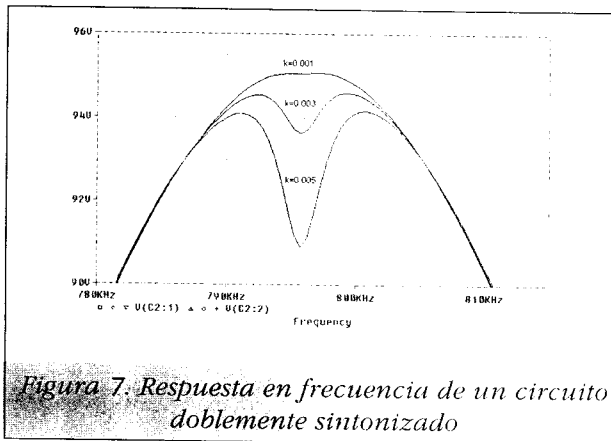


Figura 7. Respuesta en frecuencia de un circuito doblemente sintonizado

Otro estudio interesante dentro de este bloque temático es el de los circuitos selectivos. En la figura 8 se presenta un filtro paso-bajo Chebyshev de cuarto orden, constituido por dos etapas de segundo orden. Se trata de un filtro con una frecuencia de corte de 1kHz y un rizado en la banda de paso de 3dB. La figura 9 recoge la simulación realizada sobre el circuito, en ella se presentan las tensiones de salida de cada una de las etapas.

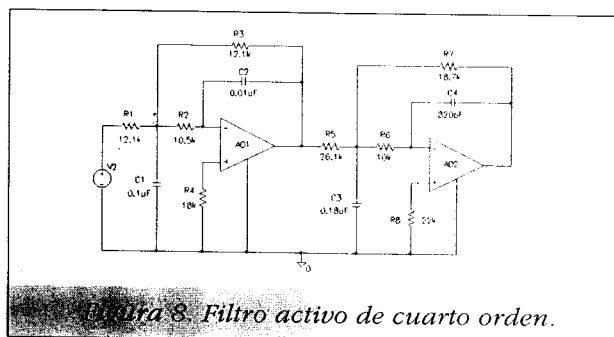


Figura 8. Filtro activo de cuarto orden.

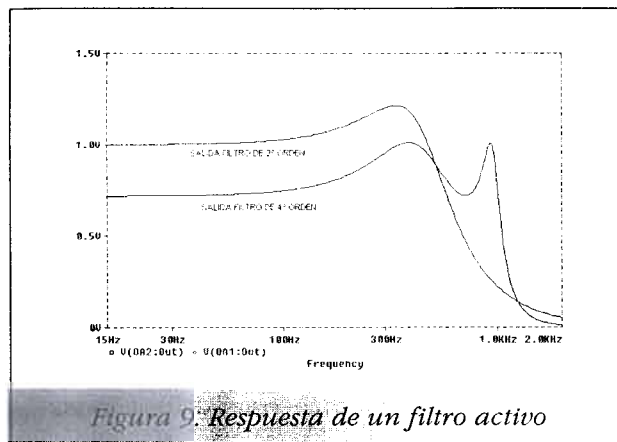


Figura 9. Respuesta de un filtro activo

## 5.- SIMULACIÓN DE CIRCUITOS DE POTENCIA.

Las facilidades anteriormente descritas para el Design Center han hecho que se extienda su uso hacia disciplinas distintas a las de su objetivo original, como eran los circuitos electrónicos integrados. Especialmente se utiliza de forma sistemática en la simulación de circuitos eléctricos y electrónicos de potencia. Asimismo, se comienza a utilizar en el estudio de las máquinas eléctricas y sistemas eléctricos de potencia, [9-12].

En este apartado incluimos la simulación de un circuito trifásico equilibrado senoidal compuesto por una fuente simétrica de secuencia directa y una carga equilibrada de carácter inductivo (figura 10). Después de la simulación con Design Center se pueden analizar las potencias instantáneas de cada una de las fases, así como la potencia instantánea total. La figura 11 muestra cómo la potencia instantánea del sistema es constante, a diferencia de la potencia instantánea de una cualquiera de las fases que viene dada por una onda bidireccional.

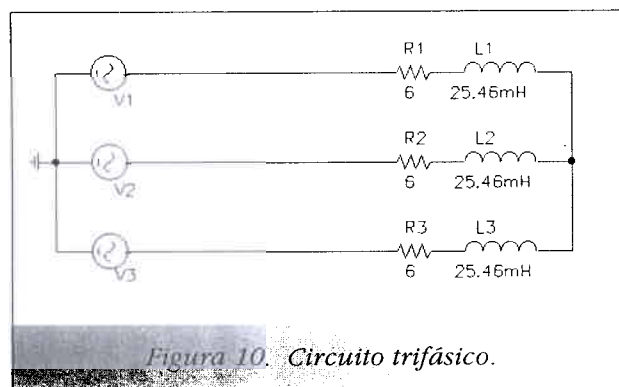


Figura 10. Circuito trifásico.

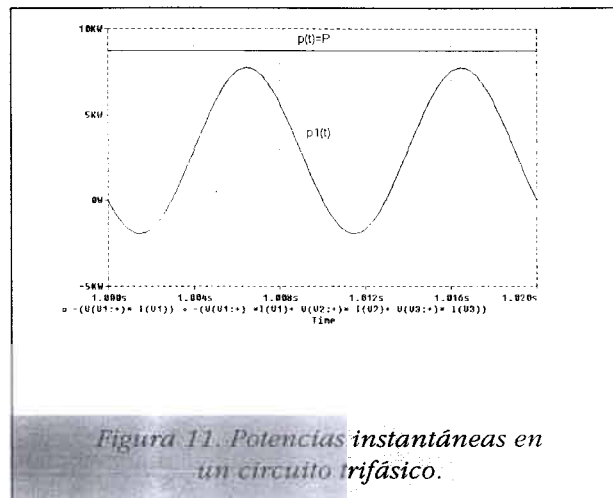


Figura 11. Potencias instantáneas en un circuito trifásico.

## 6.- ANÁLISIS ARMÓNICO

Especial relevancia tiene, en la actualidad, el análisis de los circuitos con cargas no lineales. El estudio de redes con este tipo de cargas añade, desde el punto de vista matemático, una complejidad que puede ser salvada gracias a la utilización de herramientas informáticas. En particular, el Design Center permite realizar el análisis de Fourier de un circuito mediante la declaración de control «FOUR», ejecutándose una descomposición de la señal deseada que determina las componentes de Fourier. Independientemente, el PROBE permite representar el espectro de frecuencia de cualquier señal del circuito.

La figura 12 es un ejemplo típico de carga no lineal. Se trata de un rectificador trifásico en puente con una impedancia inductiva en el lado dc. La intensidad de línea en la fase 1 tiene la forma indicada en la figura 13. Esta corriente es la suma de la que pasa por el diodo D1 hacia el lado dc, y la de retorno por el diodo D4 pero de signo contrario y retrasada 180º, [9].

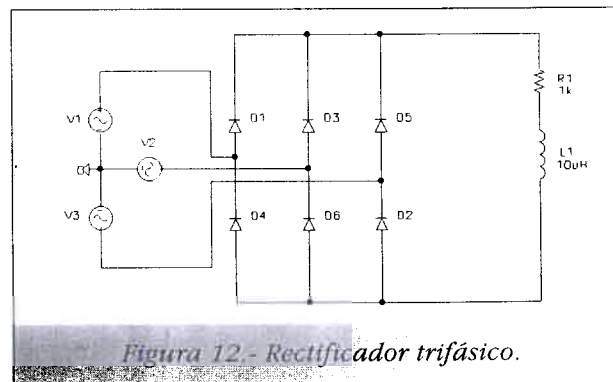


Figura 12.- Rectificador trifásico.



Esta intensidad presenta un alto nivel de contaminación armónica. El peso de cada uno de los armónicos puede verse a través del espectro de frecuencias de esta señal, representada en la figura 14.

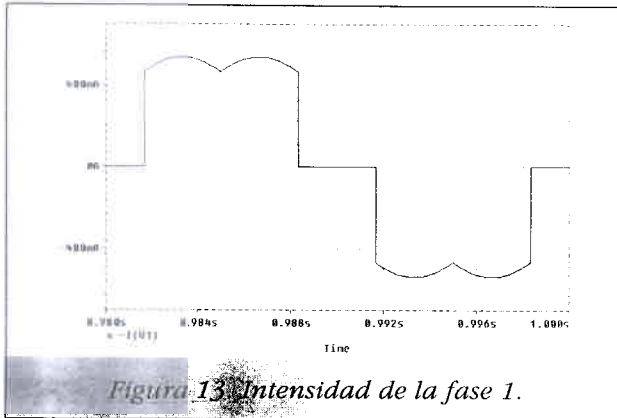


Figura 13.- Intensidad de la fase 1.

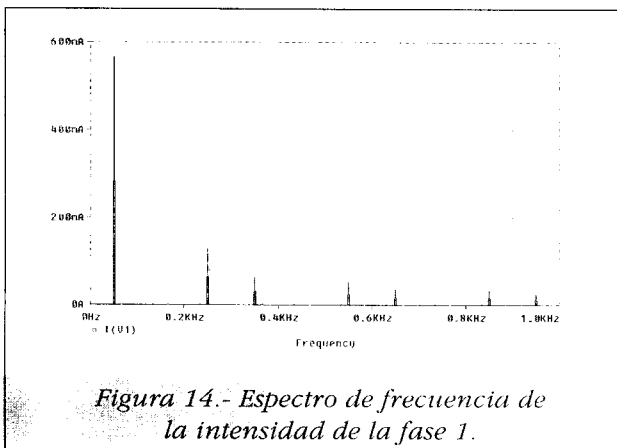


Figura 14.- Espectro de frecuencia de la intensidad de la fase 1.

## 7.- DISCUSION Y CONCLUSIONES

La utilización del ordenador en las enseñanzas técnicas cuenta con la favorable predisposición inicial del alumno. La posibilidad de proponer variaciones en los parámetros de un circuito eléctrico y observar el resultado producido, es un valor añadido a la fascinación que produce la pantalla del ordenador. Un paquete de simulación como el Design Center incluye entre sus cualidades la de exactitud, fácil manejo y versatilidad en la presentación de los resultados, lo que convierten al ordenador en un auténtico puesto de trabajo de clases prácticas. Todo esto facilita la predisposición favorable del estudiante. El trabajo se realiza con interés hasta encontrar el objetivo deseado, proponien-

do cambios y analizando el sentido físico de los resultados. El alumno es protagonista del proceso superando las dificultades con la propia experiencia adquirida y la búsqueda de las bases teóricas del problema que investiga.

Cada uno de los ejemplos propuestos con anterioridad buscan ilustrar de forma simple de qué manera puede ser útil la utilización de un simulador en la enseñanza de los circuitos eléctricos. Estos pueden ser adoptados directamente o bien propuestos a partir de enunciados concisos para el posterior desarrollo por parte del estudiante. Superada esta primera fase de aprendizaje del programa es posible adentrarse en la simulación de sistemas eléctricos y/o electrónicos de mayor complejidad en cursos posteriores. Los autores disponen de los archivos de las simulaciones aquí incluidas, quedando a disposición de todos aquellos que estén interesados.

## REFERENCIAS

- [1] D. E. Johnson, J. R. Johnson and J. L. Hilburn; «Electric Circuit Analysis»; Prentice Hall, 1989.
- [2] J. W. Nilsson; «Electric Circuit»; Addison-Wesley, 1993.
- [3] S. A. Boctor «Electric Circuit Analysis»; Prentice Hall, 1992.
- [4] Manual del Design Center: Circuit Analysis Reference Manual. Circuit Analysis User Guide. Versión 6.1. Microsim Corporation, 1994.
- [5] S. Pérez, P. Salmerón. «El uso del Pspice en la enseñanza de los circuitos eléctricos». III Jornadas Universitarias sobre Innovación Educativa en las Enseñanzas Técnicas. Vol. conclusiones, pp 301-306. Ferrol, 1995.
- [6] W. Banzahf; «Computer-Aided Circuit Analysis Using Spice»; Prentice Hall, 1989.
- [7] P. W. Tuinenga; «Spice: A Guide to Circuit Simulation and Analysis Using Pspice»; 1992.
- [8] M. H. Rashid; «Spice for Circuits and Electronics Using Pspice»; Prentice Hall, 1990.
- [9] M. H. Rashid; «Spice for Power Electronics and Electric Power»; Prentice Hall, 1993.
- [10] A. Sudriá, F. Suelves, X. Solá; «Aplicación del Programa Pspice a la Simulación de Sistemas Electromecánicos»; 3as Jornadas Hispano Lusas de Ingeniería Eléctrica. Vol II pp 465-470. Barcelona, 1993.
- [11] A. Sudriá, S. Bergas, J. Rull, X. Solá. «La Simulación con PSPICE como ayuda en la enseñanza de las Máquinas Eléctricas». 4as Jornadas Luso- Espanholas de Engenharia Electrotécnica, Vol. I, pp 360-364. Oporto, 1995.
- [12] P. Salmerón, J.C. Montaña. «Active filters simulations to correct the power factor using Pspice». MELECON'96. Vol. III, pp 1543-1546. Bari (Italia) 1996.