2. Metodología de trabajo: Simulación

2.1 INTRODUCCIÓN A LA SIMULACIÓN

La rapidez de ejecución de instrucciones, la capacidad de almacenamiento de información, la precisión de los cálculos y la posibilidad de representación gráfica de los computadores, ha permitido el desarrollo de un conjunto de herramientas conocidas como Diseño Asistido por Computador, **CAD** (acrónimo del término inglés *Computer-Aided Design*), cuyo uso, hoy día, se ha hecho imprescindible en todos los campos de la ingeniería.

Hasta mediados de la década de 1980, los sistemas CAD se construían sobre computadores de propósito específico; en la actualidad, tanto el avance tecnológico, que ha posibilitado la comercialización de computadores de mayores prestaciones con una sensible disminución en sus precios, como el constante desarrollo de potentes herramientas informáticas orientadas al diseño de circuitos electrónicos (capturadores de esquemas, generadores de listas de conexiones, simuladores, diseño de placas de circuito impreso, etc.), han sido factores clave en la amplia difusión del CAD en el campo de la electrónica.

La aplicación y utilización del computador en la ingeniería ha dado lugar a una rama del CAD conocida como Ingeniería Asistida por Computador, **CAE** (*Computer-Aided Engineering*) y que se puede encontrar en campos tan dispares como la aeronáutica, la mecánica, la química, etc. Las aplicaciones de ingeniería eléctrica, por supuesto, también se han visto involucradas en un profundo cambio en los procesos de diseño y fabricación debido a la utilización de los computadores, dando lugar a la Ingeniería Eléctrica Asistida por Computador, **CAEE** (*Computer-Aided Electrical Engineering*).

En el proceso de fabricación, son particularmente importantes los programas de simulación de circuitos analógicos y digitales, que permitirán una mayor sencillez y reducción de tiempos en el diseño y garantizarán un funcionamiento correcto sin la necesidad, o con una disminución notable, de la fase de construcción y verificación de los prototipos que darán lugar al producto final con las especificaciones deseadas. En algunos casos, como en el diseño de circuitos

integrados, donde por su estructura y dimensiones físicas no se pueden realizar medidas, es especialmente necesario el uso de este tipo de *software*.

Los programas de simulación, tradicionalmente, se han dividido en dos bloques: analógicos y digitales. En un simulador digital, el estudio del sistema se aborda utilizando los estados lógicos 0 y 1 y, cuando es necesario, la alta impedancia, pero se prescinde de los valores reales de tensiones y corrientes del circuito. Por el contrario, un simulador analógico ha de reproducir lo más fielmente posible las tensiones y corrientes del circuito real, para lo que deberá resolver las ecuaciones eléctricas del mismo (empleando para su cálculo métodos numéricos). Un aspecto fundamental para que un simulador analógico obtenga resultados aceptables es que utilice, a la hora de representar a los dispositivos, modelos matemáticos que describan lo más exactamente posible su comportamiento.

En la actualidad, debido a la mayor complejidad de los sistemas electrónicos, en los que se mezclan con frecuencia partes digitales con otras analógicas, la simulación mediante dos programas separados sería inviable, por lo que se han diseñado los conocidos como simuladores mixtos.

Aunque el empleo de los simuladores se plantea para resolver una problemática específica dentro del ámbito CAD, su uso docente es particularmente útil al facilitar el estudio de todo tipo de circuitos, la influencia de determinados parámetros, etc. Además, su utilización, prepara al estudiante en el conocimiento de una herramienta fundamental del entorno profesional industrial. No se debe pensar que el uso de un programa de este tipo puede suplir el estudio teórico, ya que el rendimiento al utilizar un simulador de circuitos es proporcional a los conocimientos previos que se posean; para sacar el máximo provecho será pues necesaria una sólida formación electrónica, siendo recomendable, y a veces necesario, partir de un análisis "sobre el papel", que nos aproxime el comportamiento del circuito, para partir de las condiciones iniciales adecuadas, fijar con buen criterio los márgenes de los análisis a realizar, etc., y conseguir así realizar una simulación más rápida y eficaz.

En la mayoría de las situaciones reales, el simulador no puede suplir al montaje y verificación del correcto funcionamiento del sistema en el laboratorio ya que, a veces, aparecen ciertos fenómenos que no pueden ser tenidos en cuenta durante la simulación (interferencias electromagnéticas, disipación de calor, etc.). La simulación debe ser considerada, por tanto, no como el objetivo final del diseñador, sino como una herramienta más de las que este dispone, que le permite obtener una mejora del sistema diseñado y

una apreciable reducción del tiempo empleado desde que se inicia un proyecto hasta que se obtiene el producto final.

2.2 UTILIZACIÓN DE SUBCIRCUITOS

Como ya se ha indicado, la mayor o menor discrepancia entre los resultados numéricos obtenidos con un programa de simulación y los valores reales, dependerá fundamentalmente de la correcta elección de los modelos matemáticos que se hayan utilizado para representar a los componentes que forman parte del circuito.

Habrá que tener en cuenta que la elección de modelos más complejos permitirá obtener resultados de mayor precisión, pero esta mejora será a costa de aumentar de manera considerable el tiempo de cálculo requerido por el computador, algo que en algunas situaciones puede que no esté justificado.

El programa de simulación MicroCap (al igual que el resto de programas de simulación electrónica) cuenta con una gran cantidad de modelos (agrupados en ficheros con extensión *.lib* conocidos como librerías) para casi todos los dispositivos electrónicos que existen en el mercado, pero la versión de evaluación está limitada a unos pocos de ellos solamente.

En caso de que sea necesaria la utilización de algún componente cuyo modelo no esté disponible en la versión de evaluación, o si lo que se busca es comprobar cómo afecta la variación de determinado parámetro del componente sobre el funcionamiento del circuito, se podrá crear una librería e incluir en ella los modelos de los nuevos dispositivos que se desea estudiar.

En el CD-ROM que acompaña al texto se ha incluido el fichero *mc7_uned.lib* (dentro del directorio *\CIR*) en el que se recogen los modelos (líneas **.MODEL** del archivo) de los componentes que son necesarios para la realización de estas prácticas y que no están incorporados en la versión siete de evaluación del programa de simulación MicroCap.

Aunque estos componentes si se encuentran ya disponibles en la última versión de evaluación del programa MicroCap (la número ocho actualmente), se va a describir cómo se debe proceder para su utilización, ya que podría darse el caso de que algún alumno no disponga, o no pueda instalar la última actualización. Es muy conveniente, de cualquier modo, que practique el proceso que se detalla a continuación, ya que puede serle de utilidad para la

inclusión de modelos y subcircuitos en las simulaciones que se le puedan presentar en otras situaciones.

En primer lugar, deberá copiar el archivo *mc7_uned.lib* al subdirectorio *\LIBRARY* (situado en el dentro del directorio del disco duro donde haya realizado la instalación del programa) y editar el fichero de texto *nom.lib* (que encontrará en dicho subdirectorio *\LIBRARY*) añadiendo una línea **.LIB** con el nombre de la librería que se desea utilizar. La impresión del archivo *nom.lib*, una vez modificado, se recoge en la Tabla 2.1 y en él aparecen todas las librerías que serán utilizadas (de manera secuencial) por el programa para la búsqueda de los componentes que se incluyan en el circuito a simular.

TABLA 2.1. Archivo *nom.lib* modificado.

```
.lib "mc_uned.lib"
.lib "small.lbr"
.lib "digio.lib"
.lib "anlgdemo.lib"
.lib "digdemo.lib"
.lib "smps_cb.lib"
.lib "tube.lib"
.lib "japan.lbr"
```

La utilización de modelos (línea **.MODEL** de la librería) para la representación del comportamiento de componentes discretos es adecuada en la mayoría de los casos (diodos rectificadores, diodos Zener, transistores bipolares, unipolares, etc.), pero existen dispositivos de mayor complejidad que no se pueden modelar haciendo uso del comando **.MODEL**. Para resolver esta situación se puede sustituir al componente en cuestión por un conjunto de dispositivos más sencillos, al que se denominará subcircuito, que irán agrupados en un solo bloque y del que sólo hace falta conocer cuántos terminales externos tiene y la función que realiza cada uno de ellos.

Esta situación se presenta, por ejemplo, en alguna de las simulaciones que se proponen en este texto, en las que es necesario el empleo del comparador integrado LM311, que no está disponible en la versión siete de evaluación del programa MicroCap, pero cuyo subcircuito es facilitado por el fabricante del dispositivo.

En la librería *mc7_uned.lib* que se ha descrito anteriormente (y que debe estar ya copiada en el subdirectorio *\LIBRARY* del disco duro donde tenga instalado el programa) viene incluido el subcircuito de este comparador (desde la línea **.SUBCKT** hasta la **.ENDS**), aunque en este caso no es suficiente con incluir la librería para que el

componente se pueda emplear, ya que además, es necesario indicar al programa dónde irán situadas las entradas y salidas del mismo.

Si se analiza la línea **.SUBCKT**, donde comienza la definición del componente, se puede observar que, en primer lugar, aparece LM311_TI que es el nombre que se quiere dar al subcircuito (para poder referirse a él posteriormente) y, a continuación, una lista ordenada de seis números, que se corresponden con las seis entradas del comparador LM311, tal como puede verse en la Tabla 2.2.

TABLA 2.2. Descripción del subcircuito correspondiente para el LM311.

```
* LM311 VOLTAGE COMPARATOR "MACROMODEL" SUBCIRCUIT
* CREATED USING PARTS VERSION 4.03 ON 03/07/90 AT 08:15
* REV (N/A)
* CONNECTIONS:   NON-INVERTING INPUT
*                | INVERTING INPUT
*                | | POSITIVE POWER SUPPLY
*                | | | NEGATIVE POWER SUPPLY
*                | | | | OPEN COLLECTOR OUTPUT
*                | | | | | OUTPUT GROUND
*                | | | | | |
.SUBCKT LM311_TI 1 2 3 4 5 6
*
F1    9  3 V1 1
IEE   3  7 DC 100.0E-6
VI1  21  1 DC .45
VI2  22  2 DC .45
Q1    9 21  7 QIN
Q2    8 22  7 QIN
Q3    9  8  4 QMO
Q4    8  8  4 QMI
.MODEL QIN PNP(IS=800.0E-18 BF=500)
.MODEL QMI NPN(IS=800.0E-18 BF=1002)
.MODEL QMO NPN(IS=800.0E-18 BF=1000 CJC=1E-15
               TR=102.5E-9)
E1   10  6  9  4  1
V1   10 11 DC 0
Q5    5 11  6 QOC
.MODEL QOC NPN(IS=800.0E-18 BF=103.5E3 CJC=1E-15
               TF=11.60E-12 TR=48.19E-9)
DP    4  3 DX
RP    3  4 6.667E3
.MODEL DX  D(IS=800.0E-18)
*
.ENDS
```

Sólo resta activar el componente en el menú *"Analog Library – Comparator"*, ya que se encuentra inicialmente deshabilitado. Para ello se abrirá la ventana del editor de componentes (utilizando la opción del menú *"Windows – Component Editor"*) y se elegirá LM311_TI en el menú que aparece a la derecha (Figura 2.1), seguidamente será necesario modificar los campos *Name*, *Shape* y

Definition para que tengan los valores *LM311_TI* (recuerde que era el nombre que aparecía en la línea **.SUBCKT** de la librería), *Comp6* (comparador de seis entradas) y *Subckt* (tipo de modelo que se está utilizando), respectivamente. Hecho esto sólo resta pulsar en cada una de las patillas del esquema y asignarle el número (del 1 al 6) que le corresponda según se utilizó en la línea **.SUBCKT** del archivo *mc7_uned.lib*.

Al cerrar la ventana del editor de componentes ya se tendrá disponible el nuevo dispositivo que se ha añadido.

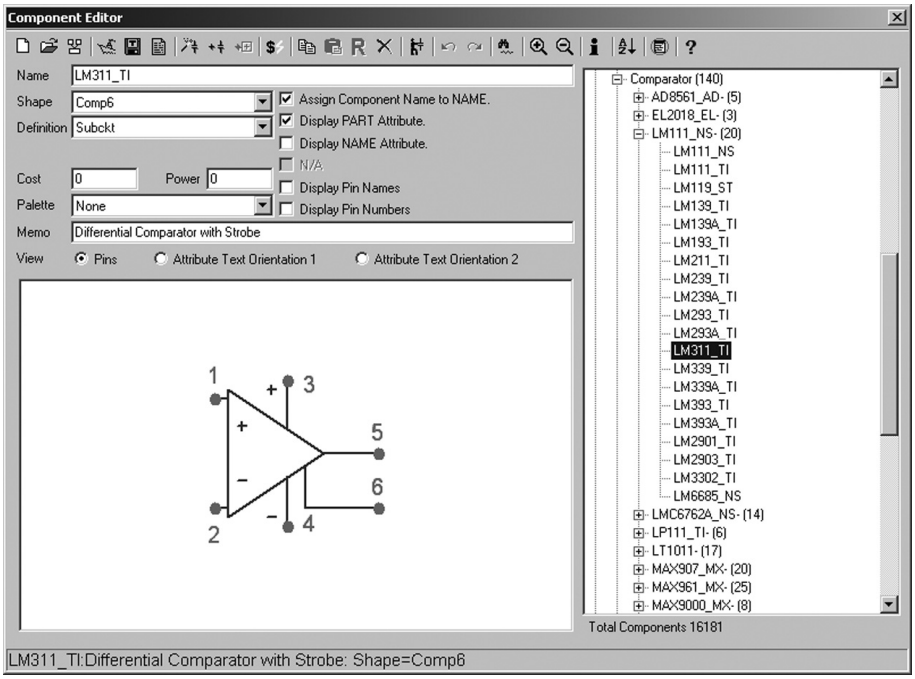

FIGURA 2.1. Editor de componentes.

2.3 SIMULADORES

La necesidad, por parte de un grupo de usuarios elevado y muy heterogéneo, de simular circuitos cada vez más complejos, ha hecho que las empresas de *software* saquen al mercado programas con características más o menos comunes que compiten entre sí por conseguir una mayor cuota de mercado.

No se pretende en esta sección enumerar todos los programas de simulación que están, o han estado en alguna ocasión, disponibles para el usuario, cosa que sería imposible, pero sí dar a conocer al lector los que han tenido mayor difusión, tanto en el entorno educativo como en el profesional, para que posteriormente elija el que más se adapte a sus necesidades o gustos.

Todos los simuladores que se van a comentar a continuación están, actualmente, basados en **SPICE**, un programa de simulación cuya primera versión fue desarrollada en la universidad de Berkeley (http://www.berkeley.edu/) en 1972. En 1975 se publicó la segunda versión de dicho programa, conocido como SPICE2 y, cuyo núcleo, permanece hoy día intacto. Posteriormente, en 1985 se publicó la versión 3 en la que se había convertido el código fuente de las versiones anteriores (FORTRAN) a C. El programa SPICE es de dominio público y ello ha llevado a que muchas empresas, desde 1970, lo hayan utilizado como punto de partida para sus programas de simulación.

- **MicroCap**: Ha sido desarrollado por la empresa SPECTRUM SOFTWARE (http://www.spectrum-soft.com/) desde 1982. En la actualidad está disponible la versión 8 del programa, aunque la de mayor difusión en el mercado sigue siendo todavía la número 7, que apareció a finales de 2001. El programa lleva integrado, junto con el simulador mixto analógico/digital, un capturador de esquemas que hace más sencilla la entrada de datos por parte del usuario, así como un postprocesador gráfico para visualizar y analizar los resultados obtenidos tras la simulación.

- **PSpice**: MICROSIM añadió a SPICE un posprocesador gráfico muy potente llamado PROBE y los comercializó juntos con el nombre de PSpice. Hasta la versión 6, el programa corría bajo el sistema operativo MS-DOS y la entrada de datos se realizaba mediante un archivo de texto, a partir de la versión 7 sufrió un gran cambio ya que al ejecutarse sobre MS-Windows permitía una entrada de datos en modo gráfico a través de un capturador de esquemas. Posteriormente el programa pasó a ser propiedad de la empresa OrCAD (http://www.orcad.com/), quien lo comercializó hasta la versión 9.2, incluyendo la parte de análisis dentro de su entorno de trabajo (conocido como *Capture*) y añadiéndole otras funcionalidades como la posibilidad de incluir código VHDL en el diseño o la creación de PCB's. En la actualidad este *software* ha pasado a ser comercializado por CADENCE (aunque sigue manteniendo la denominación OrCAD), quien lo ha separado en varios programas independientes, comercializando para la simulación

mixta analógica/digital el programa PSpice A/D, que en la actualidad se encuentra en la versión 10.0 y en el que ya no se incluye soporte para el lenguaje VHDL.

- **MultiSIM**: Actualmente se encuentra ya en la versión 7 para MS-Windows, pero apareció en 1984 con el nombre de EWB bajo entorno MS-DOS. Desarrollado por Electronics Workbench (http://www.electronicsworkbench.com/) su objetivo ha sido siempre la utilización como herramienta educativa, integrando en el mismo entorno la parte de captura de esquemas, análisis y visualización de resultados (con lo que el programa denomina *"instrumentos virtuales"*). Este programa (en su denominación anterior de EWB) ha sido el único *software* de simulación de elevadas prestaciones traducido al castellano (en su versión 5).

2.4 HERRAMIENTAS Y USO BÁSICO

Como se ha comentado anteriormente, existen diversos programas de simulación, cada uno con sus puntos fuertes y carencias pero, en líneas generales, con todos se pueden realizar sobre los circuitos electrónicos una serie de análisis básicos que se van a describir en este apartado.

Dependiendo de sus necesidades específicas, cada usuario puede encontrar más atractivo o conveniente el uso de uno u otro programa; como se ha indicado, todos ellos son igualmente válidos para la realización de las prácticas que se proponen en este texto aunque, por elegir uno concreto, a partir de ahora se hará referencia siempre al programa de simulación MicroCap.

2.4.1 Capturador de esquemáticos

Se podría utilizar un simple fichero de texto con un formato adecuado (según las especificaciones utilizadas por el programa SPICE) para la descripción de los elementos del circuito y de los análisis que se quieren realizar sobre él, pero con el fin de facilitar la entrada de datos y disminuir la posibilidad de errores, todos los programas cuentan hoy en día con un entorno gráfico en el que disponer los componentes y realizar el conexionado entre ellos de una manera muy intuitiva. A este módulo se le denomina *"Capturador de esquemáticos"* (Figura 2.2) y es el primero que hay que utilizar cuando se comienza la realización de un nuevo diseño.

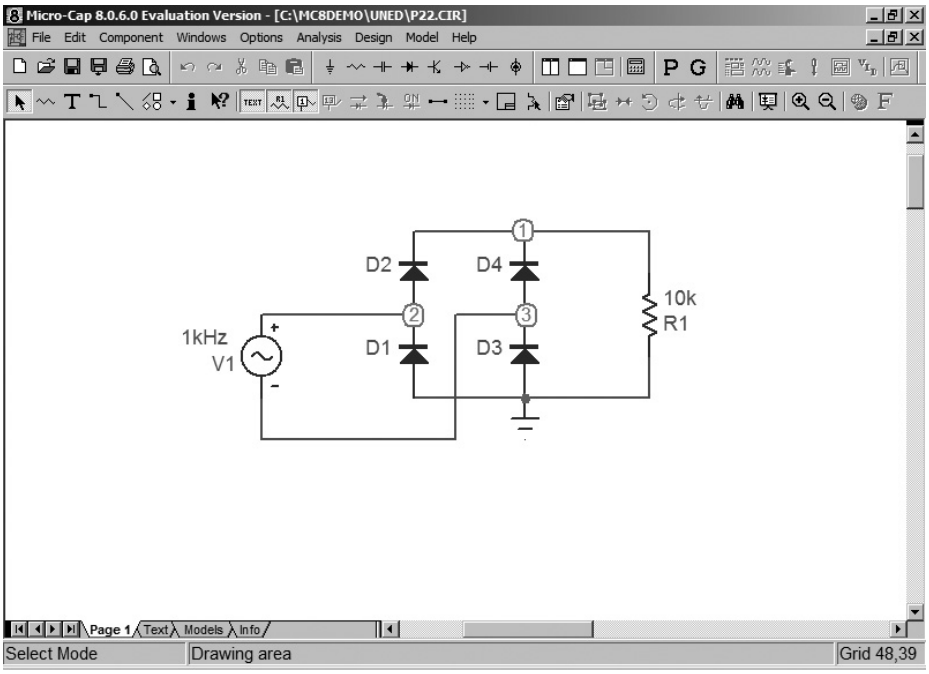

FIGURA 2.2. Capturador de esquemáticos.

2.4.2 Generador de señales

A la hora de representar las señales de entrada al circuito es necesario disponer de generadores de estímulos adecuados, tanto para señales de tensión como para corriente: constantes, senoidales, exponenciales, cuadradas, etc. En MicroCap se pueden, además, utilizar señales definidas por puntos, que son leídos de un fichero de texto, generado manualmente u obtenido en una simulación previa.

En la Figura 2.3 puede verse el símbolo que se utiliza en el programa de simulación MicroCap para representar una fuente de tensión senoidal, la forma de onda generada entre los terminales de salida y el cuadro de configuración de dicha fuente en el que, entre otros, se podrá elegir el valor para: la frecuencia (campo **F**), la amplitud (**A**), el valor medio (**DC**) y la resistencia interna del generador (**RS**).

En la Figura 2.4 se muestra un ejemplo de utilización de un generador de señales digitales para la simulación de un contador de cuatro dígitos en binario natural.

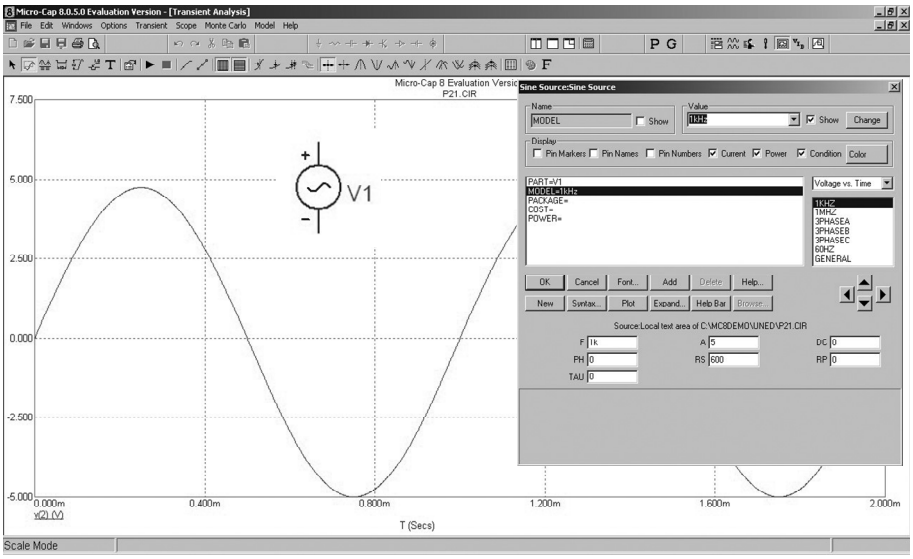

FIGURA 2.3. Generador de señales senoidal y cuadro de configuración.

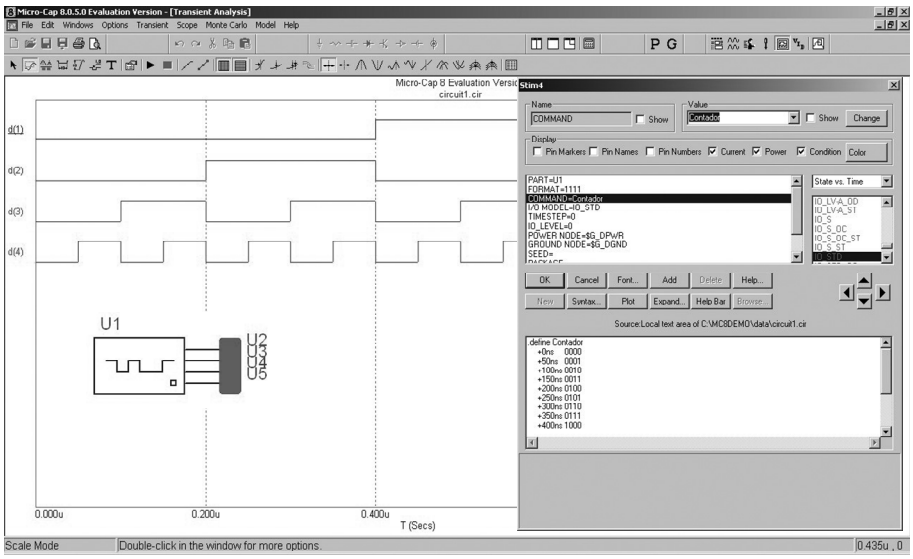

FIGURA 2.4. Generador de señales digitales y cuadro de configuración.

2.4.3 Modelado de componentes

Las versiones comerciales de los programas de simulación cuentan con modelos para casi todos los dispositivos electrónicos existentes en el mercado: diodos, transistores, amplificadores operacionales, etc. No obstante, si es necesario, se pueden crear modelos nuevos a partir de las hojas de características de un dispositivo facilitadas por los fabricantes. Para esta tarea MicroCap dispone de un módulo denominado *"Modeler"* pero, lamentablemente, no está disponible en la versión de evaluación.

Otra limitación, de las versiones de demostración, es el que el número de componentes disponibles para el usuario es reducido aunque, como ya se ha indicado en el apartado 2.2, si se conocen los parámetros del modelo o del subcircuito a utilizar, sí es posible su inclusión en la versión de demostración del programa.

2.4.4 Tipos de análisis

El objetivo de los programas de simulación es realizar diferentes tipos de análisis sobre el circuito (que normalmente se introduce haciendo uso del capturador de esquemáticos, como ya se ha indicado).

Dependiendo del programa concreto que se utilice se podrán realizar más o menos tipos de análisis y también variará el grado de control que el usuario tiene sobre los resultados obtenidos. En la Figura 2.5 se muestra el menú de análisis disponibles en la versión de demostración del programa de simulación MicroCap.

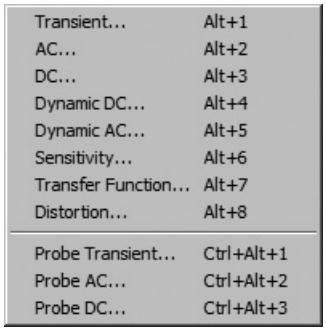

FIGURA 2.5. Tipos de análisis disponibles en MicroCap.

De ellos, los que generalmente más se van a utilizar (y que están disponibles en todos los simuladores comentados) son:

- **Análisis Transitorio**: En él se estudia la evolución de todas las tensiones y corrientes del circuito a lo largo del tiempo, utilizando como condiciones iniciales para la resolución de las ecuaciones diferenciales los valores que el usuario haya elegido. En la Figura 2.6 se muestra el cuadro de diálogo que muestra el programa MicroCap cuando se elige la realización de este análisis. Como puede apreciarse, las opciones más importantes son: el tiempo final de simulación y las gráficas que se desea representar (tenga en cuenta que en otros programas de simulación la elección de las curvas que se van a visualizar se hace en un menú independiente).

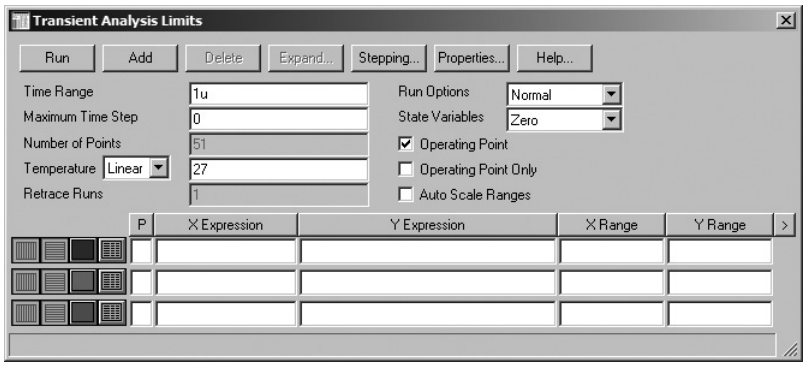

FIGURA 2.6. Opciones del análisis transitorio en MicroCap.

- **Análisis en continua**: Se emplea para estudiar la evaluación de las tensiones y corrientes del circuito cuando varía la tensión (o la corriente) generada por una fuente o más fuentes independientes (normalmente se permite la variación de, al menos, dos fuentes; lo que se conoce como *"análisis anidado"*). El usuario puede elegir la forma en que desea que varíe el valor de la fuente: lineal, octavas, por puntos, etc. En la Figura 2.7 se muestra el cuadro de diálogo que aparece en el programa MicroCap para la realización de este análisis, en él se observa que el usuario puede elegir hasta dos fuentes independientes y el rango de variación de dichas fuentes. Al igual que se ha comentado en el análisis transitorio, en otros programas de simulación las curvas y escalas que se desea utilizar en la representación gráfica se deben elegir posteriormente.

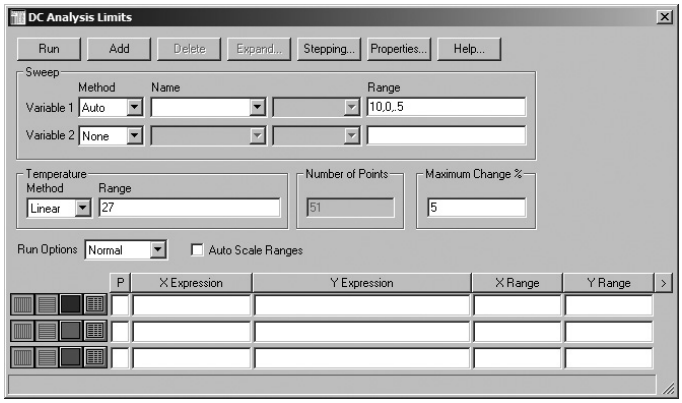

FIGURA 2.7. Opciones del análisis en continua en MicroCap.

- **Análisis en alterna**: Conocido también como análisis en frecuencia, permite al usuario estudiar la evolución de las tensiones y corrientes del circuito cuando varía la frecuencia de la señal generada por una fuente independiente, lo que permite obtener la respuesta en frecuencia del circuito analizado. En la Figura 2.8 se ha representado el cuadro de diálogo que muestra el programa MicroCap, donde se aprecian las opciones que el usuario puede modificar antes de comenzar la realización del mismo. Al igual que se ha comentado en los análisis anteriores, en el programa MicroCap se deben elegir las curvas deseadas antes de comenzar el análisis, mientras que en otros programas de simulación la elección de las mismas se realiza una vez finalizado el análisis.

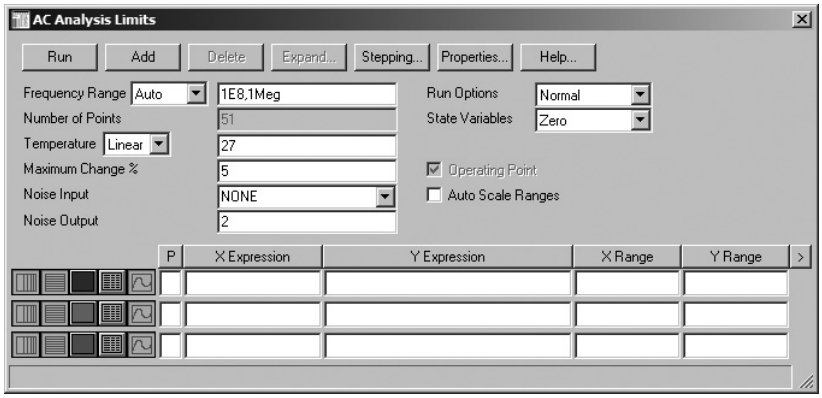

FIGURA 2.8. Opciones del análisis en alterna en MicroCap.

2.4.5 Postprocesador gráfico

Una vez se ha seleccionado el tipo de análisis y las señales que se desea estudiar se entra (generalmente de manera automática) en un módulo gráfico (Figura 2.9) en el que el usuario, además de observar cual es el aspecto de las variables analizadas, puede realizar con ellas una gran cantidad de operaciones: ampliación de alguna zona determinada, búsqueda automática de máximos y mínimos, utilización de cursores, cálculo de diferencias, establecimiento de anotaciones, etc.

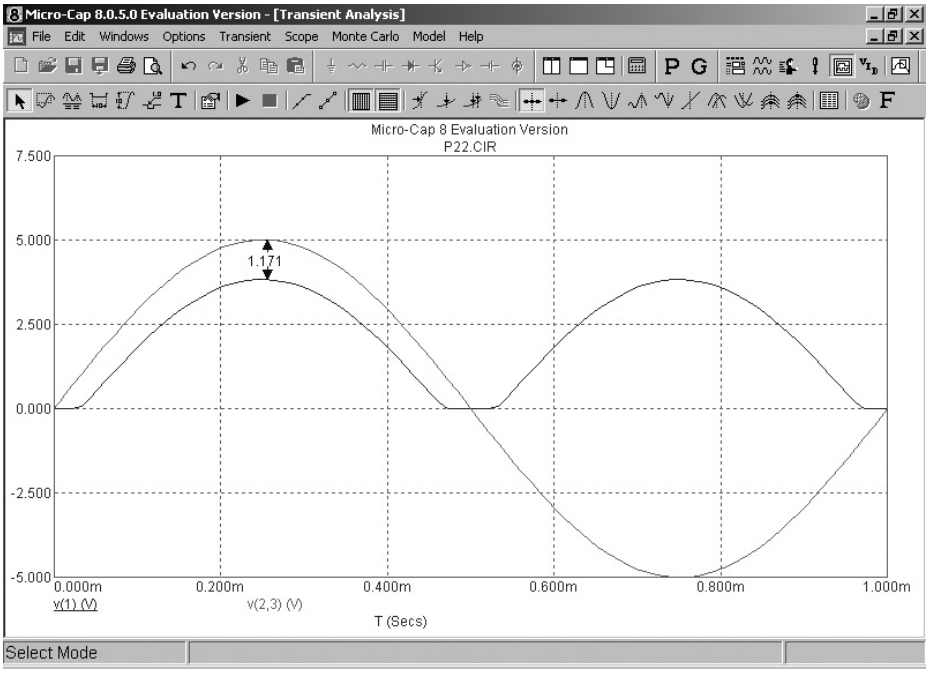

FIGURA 2.9. Postprocesador gráfico de MicroCap.

En general, el proceso de análisis finaliza cuando el usuario ha analizado la información gráfica y/o numérica obtenida aunque, a veces, puede ser necesario modificar algún parámetro del circuito y volver a repetir el análisis hasta conseguir que el diseño que se está realizando cumpla las especificaciones.