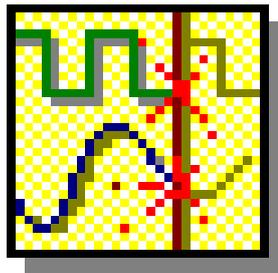


Medidas Eléctricas

Introducción a la simulación de circuitos eléctricos por computadora con PSpice®



Su aplicación a las medidas eléctricas

Ing. Jorge L. Dampé

Ing. Ricardo Dias

Sr. Guillermo Grassano

Año 1998

Cátedra de Medidas Eléctricas

ÍNDICE

<i>Contenido</i>	<i>Página</i>
Prólogo	3
1. Presentación del programa	4
2. Comienzo de una sesión de trabajo	5
3. Tipos de análisis	11
3.1. Análisis estándar	11
3.2. Análisis Simple “multi-run”	12
3.3. Análisis estadístico	12
4. Análisis en continua	13
4.1. Estudio del punto de polarización	13
4.2. Barrido en continua (DC sweep analysis)	14
5. Uso del Probe	16
6. Análisis paramétrico	17
7. Análisis de la respuesta en frecuencia (AC Sweep analysis)	19
8. Análisis transitorio	22
9. Ejercicios propuestos	25
ANEXO - Breve resumen de los comandos más usuales	29

Prólogo

El objetivo de estas notas es brindarle al alumno los conceptos básicos para la simulación de circuitos eléctricos mediante el uso del programa **PSPice** y sus accesorios.

Entendemos que la materia Medidas Eléctricas constituye una buena oportunidad para comenzar a familiarizarse con el uso de programas que constituyen una poderosa herramienta en el análisis de circuitos, cuya potencialidad será más evidente a medida que se avance en el estudio de la carrera, ya que quien la cursa cuenta con la base mínima indispensable de conocimiento de circuitos eléctricos como para aprovechar las bondades de un simulador. Se ha optado por el PSPice por ser el programa que hoy en día puede considerarse estándar del mundo electrónico, sin desconocer la existencia de muchos otros igualmente valiosos, aunque quizá no tan difundidos.

Las versiones de PSPice que se presentarán son las de evaluación de las 6.3 y 8.0, aptas para ser usadas con Windows® 3.1x o 95 la primera de ellas y exclusivamente con Windows® 95 la segunda. Por tratarse de versiones de evaluación, cuya reproducción en este caso es libre, presentan limitaciones respecto de la completa, que se irán indicando a medida que sea necesario. En lo que sigue se hará hincapié en los conceptos básicos para familiarizar al lector con el uso del programa y con la simulación de circuitos sencillos, lo que constituye un entrenamiento imprescindible para poder aprovechar en el futuro toda su capacidad. La gran versatilidad y poderío de este programa hacen que estas notas deban ser consideradas sólo como una introducción limitada a un mundo que el lector irá descubriendo en toda su magnitud con el uso que de él haga, a medida que sus conocimientos vayan progresando. Si bien las pantallas que se presentan en el cuerpo del trabajo son las de la versión 6.3, su extensión a las de la versión 8.0 es inmediata.

En todo el análisis se supondrá que el lector tiene un grado de familiaridad mínimo con el uso de computadoras personales y programas en el ambiente de Windows, por lo que la discusión se hará paso a paso. Quien esté más habituado a usar estas herramientas encontrará algunos comentarios innecesarios, pero si se los omitiera se sacrificaría la claridad necesaria para quien no esté en esas condiciones. Como en el uso de cualquier programa, nada puede reemplazar al entrenamiento que el usuario adquiera, lo que constituye una experiencia intransferible, por lo que se recomienda especialmente que en todos los casos se vaya más allá de lo expresado como guía, con el fin de ir descubriendo todas las potencialidades y posibles usos de esta herramienta informática.

Creemos que el momento es ideal para hacer una reflexión sobre las ventajas y limitaciones de cualquier simulador: como su nombre lo indica, se trata de herramientas para efectuar en forma sistemática cálculos de circuitos eléctricos y electrónicos, de acuerdo con ciertos modelos que en muchos casos el usuario puede modificar o crear, y de ninguna manera pueden reemplazar sus conocimientos de los problemas o temas tratados. Es su sentido crítico el que le permitirá juzgar sobre la racionalidad o viabilidad de un dado resultado. Debe tenerse presente que, como su nombre lo dice, un programa de simulación no hace otra cosa que representar, con modelos determinados, a los componentes reales de un dado circuito o sistema, y por lo tanto sus soluciones no pueden ir más allá de lo que dichos modelos permitan.

Las limitaciones antes apuntadas, de ninguna manera tienen por objetivo desconocer la enorme potencialidad de estos métodos, sino solamente advertir al lector, para evitar que caiga en el error tan común en los principiantes de creer que la solución obtenida del programa es “la verdad”, olvidando las suposiciones o simplificaciones sobre las que eventualmente se basa.

1. Presentación del programa

En un programa de computadora cualquiera, el operador debe ser capaz de entrar los datos correspondientes a la tarea que desea encargarle a la máquina, y luego de interpretar la forma en que se le presentan los resultados.

En un simulador de circuitos eléctricos, la entrada de datos consta de la topografía del circuito a analizar, con los valores de sus componentes, y la salida serán los valores correspondientes a su punto de funcionamiento en la condición de análisis que se haya especificado. En el caso particular del Spice, ello se logra con el concurso de una serie de programas auxiliares, que forman un paquete, y que interactúan entre sí como se aprecia en la figura siguiente, tomada de la información que Microsim, compañía autora del programa, provee con su versión de evaluación.

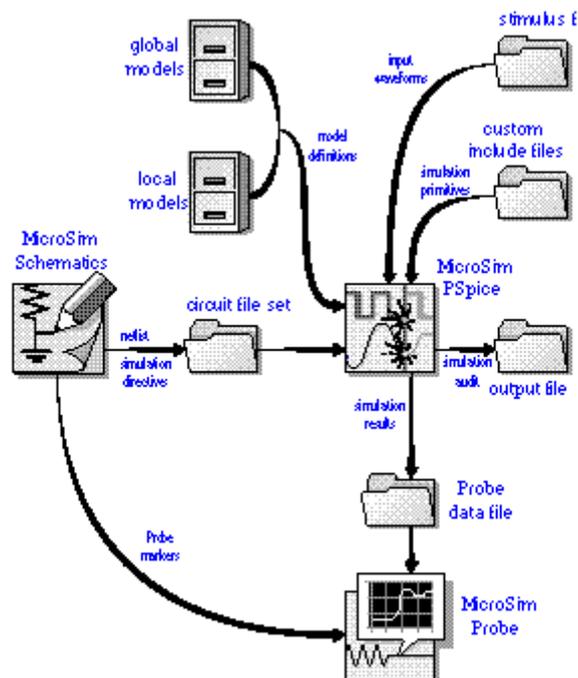


fig. 1

En ella se aprecia la interrelación entre los distintos subprogramas. Para el usuario principiante, tres de ellos revisten importancia capital:

Schematics: con este nombre se designa al programa que permite construir el circuito que será simulado. Para la confección del mismo se utilizan los símbolos normales de circuitos y de componentes, que el programa posee almacenados. Pueden tomarse también cualquiera de los distintos componentes o partes que existen en las bibliotecas (libraries) incorporadas de origen o creadas por el usuario. Sin duda, como en cualquier programa de simulación, será necesario respetar la sintaxis propia del mismo, cosa que en esta versión para Windows se ve notablemente simplificada.

PSpice: es el programa básico, y con él se identifica a todo el conjunto. Su nombre es un acrónimo de *Personal Simulation program with integrated circuit emphasis*, y es el que se encarga de realizar el análisis del circuito que ha sido dibujado, con ayuda del Schematics. El PSpice permite que el usuario indique las condiciones en las que desea que se haga la simulación, dentro de un conjunto que el mismo programa le posibilita, y que analizaremos con detalle más adelante.

Vale la pena recalcar que el mismo nombre del programa indica hacia dónde está orientado, lo que de ninguna manera quita importancia a las aplicaciones sencillas que propondremos aquí.

Probe: constituye la salida gráfica del simulador. Permite la visualización de los resultados de un análisis cualquiera, por ejemplo, la representación de una respuesta transitoria en función del tiempo o de cualquier otra variable. Permite ajustar las escalas de los gráficos, seleccionar cuáles variables se representarán, y hacer análisis de las mismas, como la realización de mediciones mediante cursores, o análisis en el dominio de las frecuencias, mediante la Transformada Rápida de Fourier (FFT), que resultan de invaluable ayuda en aplicaciones más avanzadas.

El paquete se completa con los siguientes otros programas, cuyo uso por parte del principiante no será tan intensivo:

Stimulus Editor: que permite manejarse con las diversas excitaciones que pueden aplicarse a un dado circuito. A este subprograma, como a varios de los que se citarán más adelante se accede en forma automática, cuando ello es necesario, a partir del Schematics.

Parts: es una ayuda semiautomática para encontrar, o definir, los parámetros de los modelos con los que el simulador caracterizará a ciertos componentes, como por ejemplo transistores. La obtención del máximo provecho de éste requiere de conocimientos que exceden los alcances de nuestra materia, y su necesidad comenzará a hacerse patente a medida que el alumno progrese en su carrera.

PSpice optimizer: se utiliza para optimizar las condiciones de simulación del programa básico PSpice.

Microsim PCBoards: empleado para establecer la disposición de circuitos impresos, con la indicación de sus componentes, disposición, estructura y gráficos necesarios para solicitar su fabricación. Una de sus características sobresalientes es la capacidad de establecer el circuito impreso que corresponderá a uno creado con el Schematics. Si bien forma parte de la versión de evaluación de que se dispone, su empleo escapa totalmente a los fines de esta publicación.

Specetra: complementa al anterior.

2. Comienzo de una sesión de trabajo

El conjunto de programas trabaja en ambiente Windows. Con el método convencional se abre el grupo de programas, y en él aparecerán los distintos elementos con sus correspondientes iconos (en lo anterior grupo de programas y elementos de programa deben entenderse en el sentido empleado en la terminología de Windows).



fig. 2

Una posible disposición es la que se aprecia en la figura 2, en la que se reconocen los programas mencionados más arriba, una ayuda sobre el uso de Microsim PCBoards y un archivo Read me que contiene información de último momento sobre las novedades de esta versión de PSpice. Este último refiere a los manuales propios del programa, que no están disponibles en la versión que llega al alumno.

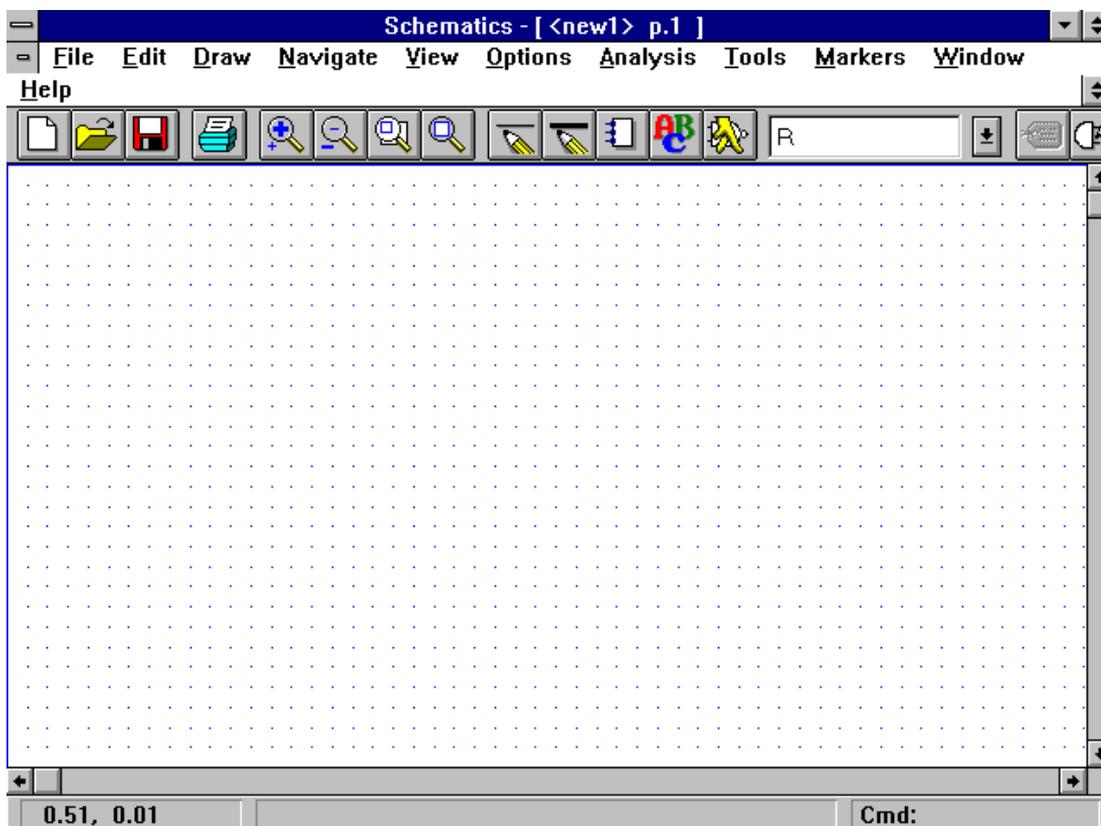


fig. 3

Cuando se desea comenzar el trabajo lo primero que debe hacerse es abrir el Schematics, haciendo doble clic en el correspondiente icono, con lo que aparecerá su pantalla de inicio, la que lucirá como muestra la fig. 3. En ella se aprecian los distintos comandos que, para el lector acostumbrado a manejar programas de Windows resultarán familiares y, para quien no lo está, intuitivos y fáciles de recordar. Antes de entrar en detalles acerca de cómo representaremos un dado circuito, recordamos que la opción de Ayuda (Help), que aparece en la barra de herramientas, cuando se la activa, haciendo clic sobre ella, despliega el menú de ayuda, con diferentes opciones de consulta, que permiten dar una recorrida por el programa y buscar ayuda sobre tópicos específicos.

Lo primero que notará el usuario es que al mover el mouse por la pantalla, los números del extremo inferior izquierdo, que son las coordenadas del punto al que está apuntando aquél en un dado momento, cambian (el origen de coordenadas es el ángulo superior izquierdo del área de dibujo).

Llegados a este punto estamos en condiciones de dibujar el circuito que deseamos analizar, que en nuestro caso será el que reproducimos en la fig. 4

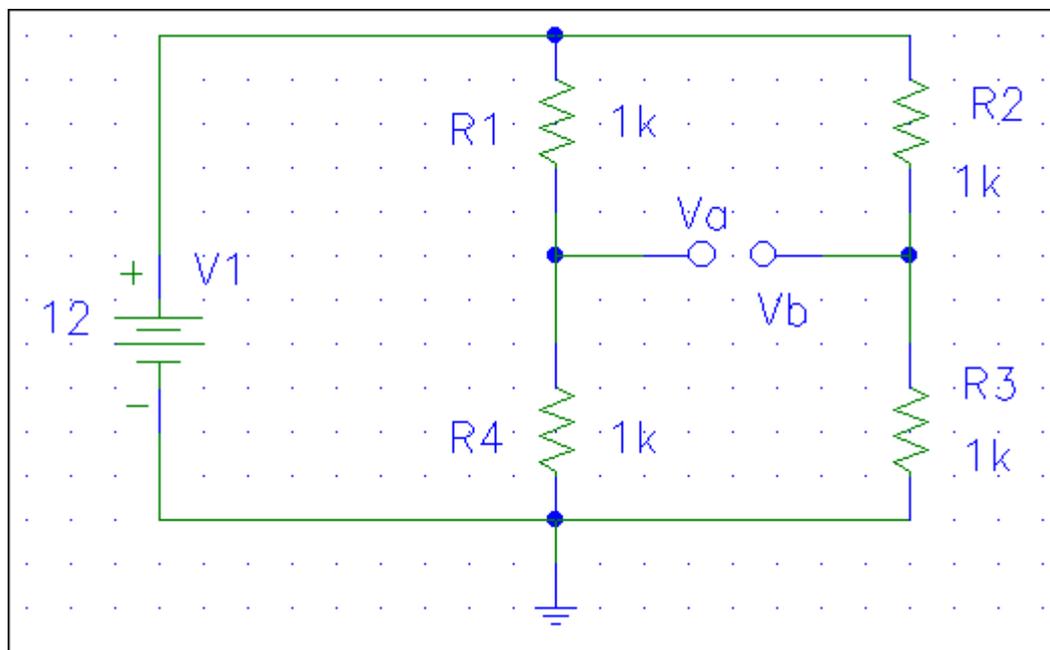


fig. 4

Como se aprecia, es un circuito muy simple, formado por cuatro resistores y una fuente, en el que se han marcado dos puntos con sus símbolos de tensión, V_a y V_b . Nuestro cometido será dibujarlo con el Schematics, y los pasos a seguir los siguientes:

a) Seleccionar **Get New Part** del menú **Draw** y aparecerá un cuadro de dialogo llamado Part Browser Basic, como se indica en la figura siguiente:

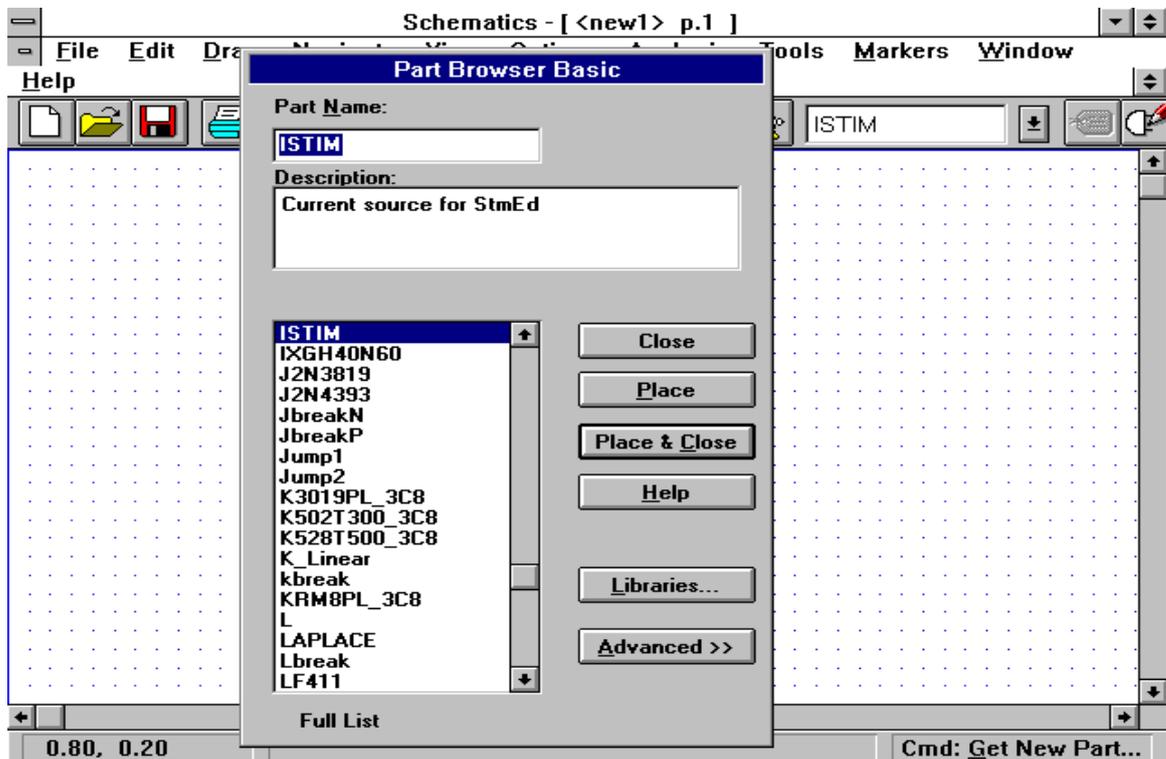


fig. 5

En una primera etapa, y hasta que nos familiaricemos con el programa, lo recomendable es hacer clic en el botón “libraries”, con lo que se desplegará el siguiente cuadro de diálogo, en el que aparecerá el conjunto de bibliotecas de que se dispone. Será necesario seleccionar qué componente se desea colocar, supongamos que sea una resistencia. Intuitivamente se la buscará en la biblioteca “analog”, por ser un elemento analógico. Si seleccionamos “analog” se desplegará en la pantalla correspondiente el menú con los elementos de que se dispone, entre los que se cuentan las resistencias. Es útil en esta etapa presionar el botón “advanced”, con lo que aparecerá una pantalla más detallada, en la que constan las características del elemento seleccionado y su apariencia. Si estamos conformes basta con seleccionar “place and close” para que el elemento aparezca en la punta de la flecha del ratón para que se lo coloque en la parte del circuito que se desee. Cuando se halla en la posición justa, haciendo clic con el botón izquierdo quedará fijo en el punto, y listo para ser colocado un elemento similar en la posición que se desee, sucesivas repeticiones permitirán dibujar tantos elementos similares en la posición elegida. Si se pretende rotar el elemento, se deberán presionar simultáneamente “Control” y “R” (o “Ctrl” y “R” para teclados en inglés). Cuando se quiera concluir, pulsando el botón derecho del ratón, desaparecerá la selección. Notar que en la barra de herramientas se guardan las selecciones efectuadas en el caso de

Nos falta seleccionar ahora sus valores: haciendo doble clic en la resistencia aparecerá un cuadro de diálogo como el siguiente:

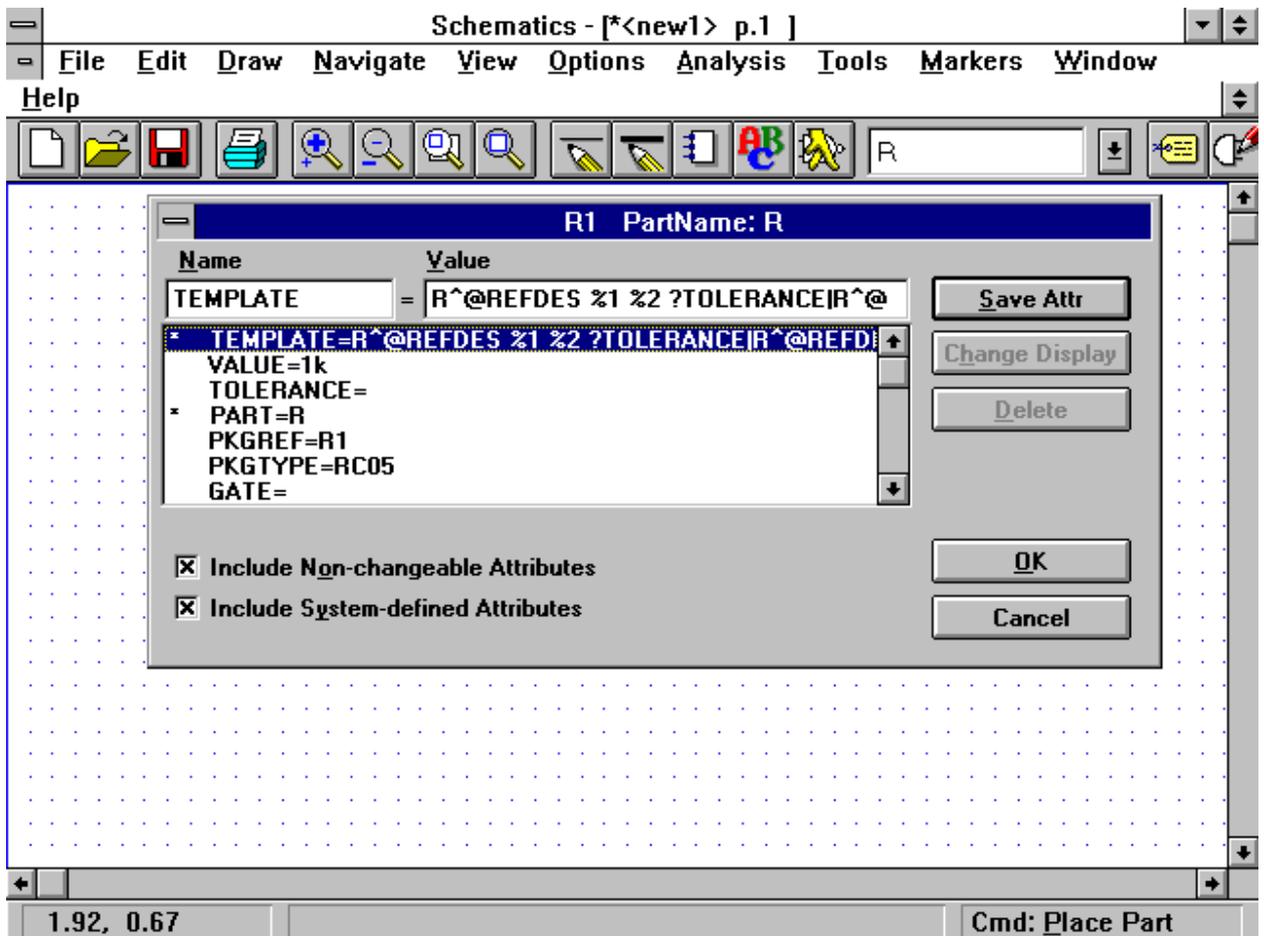


fig. 6

En el que aparecen los valores y parámetros que caracterizan a un resistor. Se reconocen inmediatamente algunos elementales, como el valor, la tolerancia y los que se refieren a su designación en el circuito que se está construyendo. Los restantes, más avanzados, los dejamos por ahora sin estudiar. Para seleccionar alguno de ellos se debe hacer clic sobre el mismo, con lo que pasará al par de ventanas superiores, en las que se podrá escribir el valor que resulte apropiado. Una vez hecho esto, se deberá hacer clic en el botón **Save attr**, para que la elección tenga efecto. Esta mecánica se repetirá para cada uno de los atributos hasta lograr la caracterización deseada del componente. Es bueno remarcar que si lo que se desea es solamente seleccionar el valor que debe poseer el resistor, basta con hacer doble clic sobre la indicación del mismo en el esquemático, para que se abra un cuadro de diálogo en el que la única opción manejable es la selección del valor. El usuario a medida que se vaya familiarizando con el uso del programa encontrará la mecánica que le resulte más cómoda. Es bueno destacar que este mecanismo se repetirá para cada componente que se desee colocar en el esquemático, hasta completarlo. Si bien no nos interesarán en este ejemplo, vale la pena que probemos a esta altura de la discusión lo que sucede cuando se selecciona, con el método anterior, un capacitor o un inductor. Se verá que aparece una pantalla similar a la presentada en la fig. 6, con el agregado de un atributo “IC” (abreviatura de “Initial Conditions”), en el que el operador puede establecer las condiciones iniciales para el análisis que se efectuará (tensión en el capacitor o corriente por el inductor).

La repetición de los pasos antes indicados permitirá que coloquemos los componentes de nuestro circuito. Para el caso de la fuente de alimentación el procedimiento es enteramente análogo.

b) Una vez hecho ello, nos falta conectarlos entre sí. Con tal propósito seleccionaremos en la barra de herramientas del Schematics el lápiz ubicado a la izquierda,  cuya función, como se puede apreciar cuando se le apunta con el ratón, es “Draws a new wire” o sea, “dibuja un nuevo conductor”. Cuando se lo selecciona haciendo clic sobre él, la punta del ratón se transforma en un lápiz, con el que se dibuja seleccionando el punto de arranque, haciendo coincidir su mina con el punto deseado y haciendo clic, y que se corre manteniendo apretado el botón izquierdo del ratón., Cuando se ha terminado la tarea se lo desactiva haciendo clic con el botón derecho.

c) Si es necesario corregir algún error, por ejemplo borrar un componente mal colocado, se lo señalará con el ratón, haciendo clic sobre el mismo, con lo que quedará resaltado, y manteniendo el botón izquierdo apretado se lo traslada al punto que se desee. Si una vez señalado se aprieta la tecla “Supr.” (o “Delete” en un teclado en inglés), el elemento seleccionado se borrará.

d) Concluidos los pasos anteriores el circuito se mostrará completo. Sólo nos falta indicar en qué puntos nos interesará analizar su comportamiento. Si bien no es imprescindible, pues como veremos las corrientes y tensiones en distintas partes estarán disponibles, es conveniente marcar aquéllas de interés. Para nuestro caso elegiremos los dos extremos en los que se colocaría un detector de cero en el puente. Para ello buscamos en el Schematics el comando **Markers** que al ser seleccionado despliega un conjunto de alternativas, una que puede ser conveniente para este ejemplo es **Mark Voltage Differential**, con lo que nos pedirá que coloquemos un extremo a uno de los puntos entre los que se quiere ver la diferencia de potencial y el restante al otro.

e) Por último, será necesario colocar una referencia sin la cual el programa no operará. Con el método indicado en a), se inspecciona en las distintas bibliotecas hasta que en la identificada como “port.slb.” se encontrará el elemento indicado **GND_EARTH**, que no es más que lo que necesitábamos. Si bien se lo puede colocar en cualquier parte, no debemos olvidar que él establece la referencia respecto de la cual se calcularán las tensiones y otros parámetros, por lo que es conveniente que su posición sea la correcta. Nosotros elegiremos como referencia uno de los extremos de la fuente. Si se desea mejorar la apariencia, pueden correrse los carteles indicadores de valor y nombre de cada elemento, para lo cual se debe hacer clic sobre ellos y arrastrarlos al punto deseado manteniendo el botón izquierdo del ratón apretado. Una vez hechas todas estas operaciones, nuestro circuito estará listo para ser analizado, y se verá como en la figura 7.

Antes de proceder a su análisis, es necesario guardarlo, para lo cual abriremos el cuadro **File**, en el que seleccionaremos **Save As**, y aparecerá un cuadro de diálogo en el que se nos dirá que elijamos un nombre para nuestro circuito. Elegiremos “puente”, con la extensión “sch” que aconseja el programa, con lo que quedará guardado como “puente.sch”.

Estamos ya en condiciones de efectuar el análisis del mismo, para lo que previamente deberemos introducirnos en los distintos tipos de análisis que permite nuestro simulador.

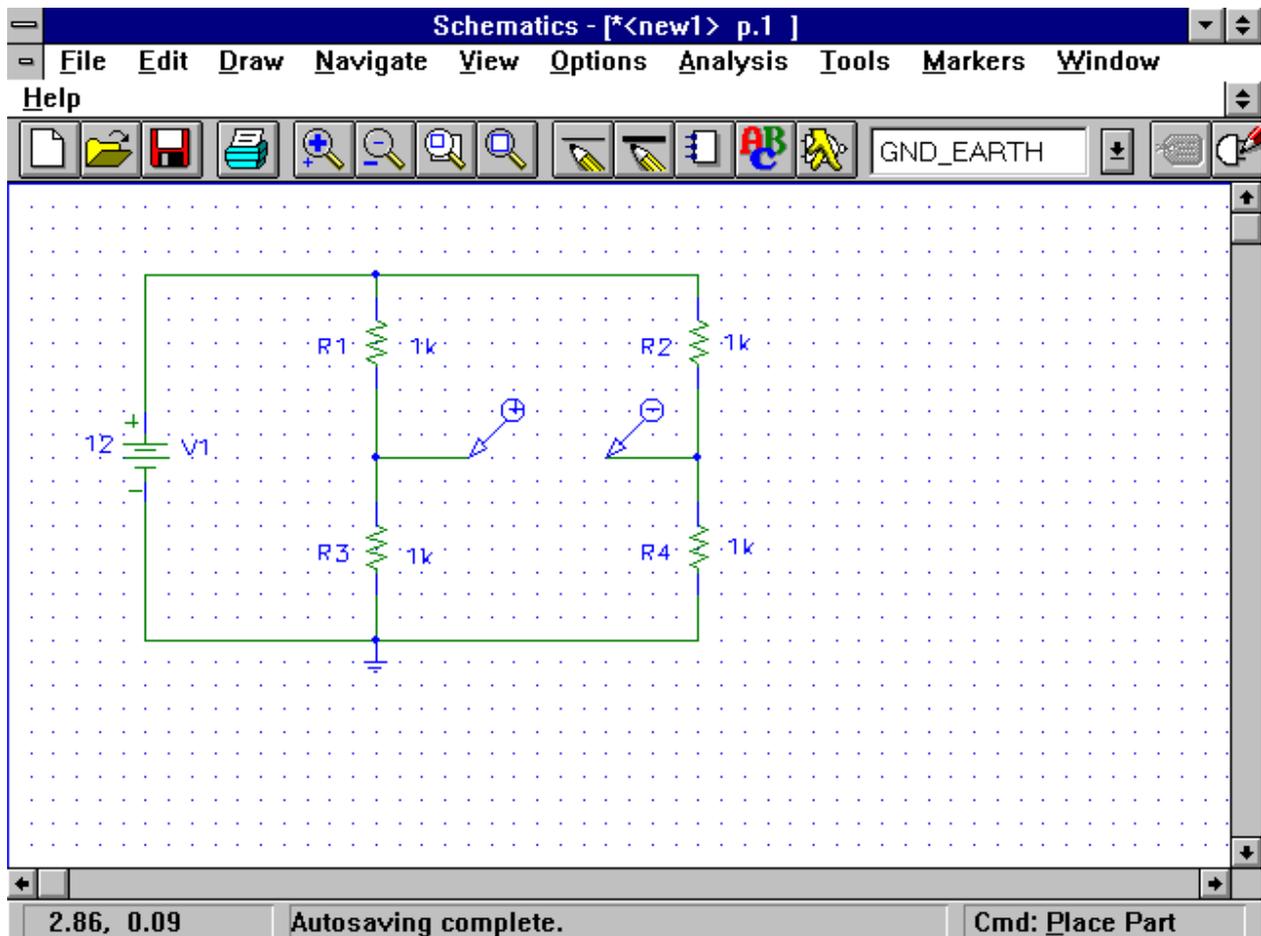


fig. 7

3. Tipos de análisis

A modo de comentario se mencionarán ahora los distintos tipos de análisis circuitales que pueden hacerse con este programa, los que sin duda darán una idea de gran parte de su potencialidad. El estudio detallado que se realizará más adelante, se ceñirá sólo a algunos de ellos, que corresponden a los de mayor interés para el alcance de este curso.

Los análisis circuitales que es capaz de efectuar el PSpice son los siguientes:

- Estándar
- Simple “multi-run”
- Estadístico

3.1. Análisis estándar

Puede ser de los siguientes tipos:

DC sweep: Determina las respuestas de estado estacionario del circuito dado (tensiones, corrientes o señales digitales), para distintos valores de una fuente de alimentación, temperatura o parámetro de un modelo.

Bias point detail: Permite obtener datos sobre puntos de polarización adicionales, ya que los propios del circuito básico son determinados automáticamente por el PSpice.

DC sensitivity: Calcula la sensibilidad de un nodo, o de la tensión de un dado componente, a la variación del punto de polarización.

Small-signal DC transfer: Da como resultados la ganancia de pequeña señal en continua y las resistencias de entrada y salida, en función del punto de polarización.

Frequency response (AC sweep): Halla la respuesta del circuito a distintas excitaciones de pequeña señal, linealizándolo alrededor del punto de polarización. Para ello se varía, dentro de un cierto rango, la frecuencia de la fuente. Como resultado se obtienen las correspondientes tensiones y corrientes, en magnitud y fase, lo que eventualmente puede ser utilizado para la construcción de diagramas de Bode.

Noise analysis: Este análisis puede realizarse en conjunto con el análisis de respuesta en frecuencia. La contribución de cada fuente de ruido en el circuito es propagada al nodo de salida para cada frecuencia especificada en el análisis AC.

Transient response: Con éste se analiza el comportamiento transitorio del circuito, teniendo en cuenta las correspondientes fuentes de tensión, corriente y, eventualmente, digitales.

Fourier components: Este análisis, que puede efectuarse conjuntamente con el transitorio, permite calcular las componentes de Fourier de los resultados con él obtenidos.

3.2. Análisis Simple “multi-run”

Permite determinar los distintos comportamientos de un dado circuito ante cambios de temperatura, de algún parámetro global o de un cierto componente, arrojando los correspondientes resultados de los análisis en continua (*DC sweep*), en alterna (*AC sweep*), o transitorio. Se distinguen dos clases:

Parametric: Repite los análisis estándar requeridos para diferentes valores (dentro de un rango especificado), de parámetros globales, parámetros modelo, componentes o temperatura de operación.

Temperature: Repite los análisis estándar requeridos para diferentes valores (tomados de una lista) de la temperatura de operación.

3.3. Análisis estadístico

Permite, dando ciertas tolerancias a distintos dispositivos de un circuito, obtener resultados de múltiples corridas para los análisis en continua (*DC sweep*), en alterna (*AC sweep*), o transitorio. Se distinguen dos clases:

Monte carlo: Calcula la respuesta del circuito a cambios de valor de componentes, por variación aleatoria de parámetros modelo, para una tolerancia especificada.

Sensitivity/worst case: Calcula la respuesta del circuito a cambios de valor de componentes, por variación de parámetros modelo (para una tolerancia especificada), en un dado instante, y dispo-

sitivo por dispositivo, terminando con un único análisis donde, a todos los parámetros modelo y a todos los dispositivos, se les asigna los valores más desfavorables.

4. Análisis en continua

En el punto 2 dibujamos un circuito elemental, al que ahora intentaremos analizar utilizando algunos de los elementos indicados en el apartado precedente.

Dada la índole de nuestro circuito, formado por una fuente y sólo resistencias, muchos de los tipos de análisis antes esbozados, en particular el transitorio, no serán de interés. Sí en cambio los que se refieren al comportamiento en continua y a la sensibilidad. Detallaremos los pasos a seguir para hacerlo.

4.1. Estudio del punto de polarización

Por tal se entienden a las condiciones de trabajo en régimen permanente de continua (el vocablo alude al comúnmente empleado en la terminología electrónica).

Si aún no hemos salido de Schematics, lo primero que se deberá hacer es elegir el tipo de análisis que deseamos efectuar, para lo que elegiremos de la barra de herramientas la opción **Analysis**, y en ella **Setup**, con lo que se abrirá la siguiente ventana de diálogo.

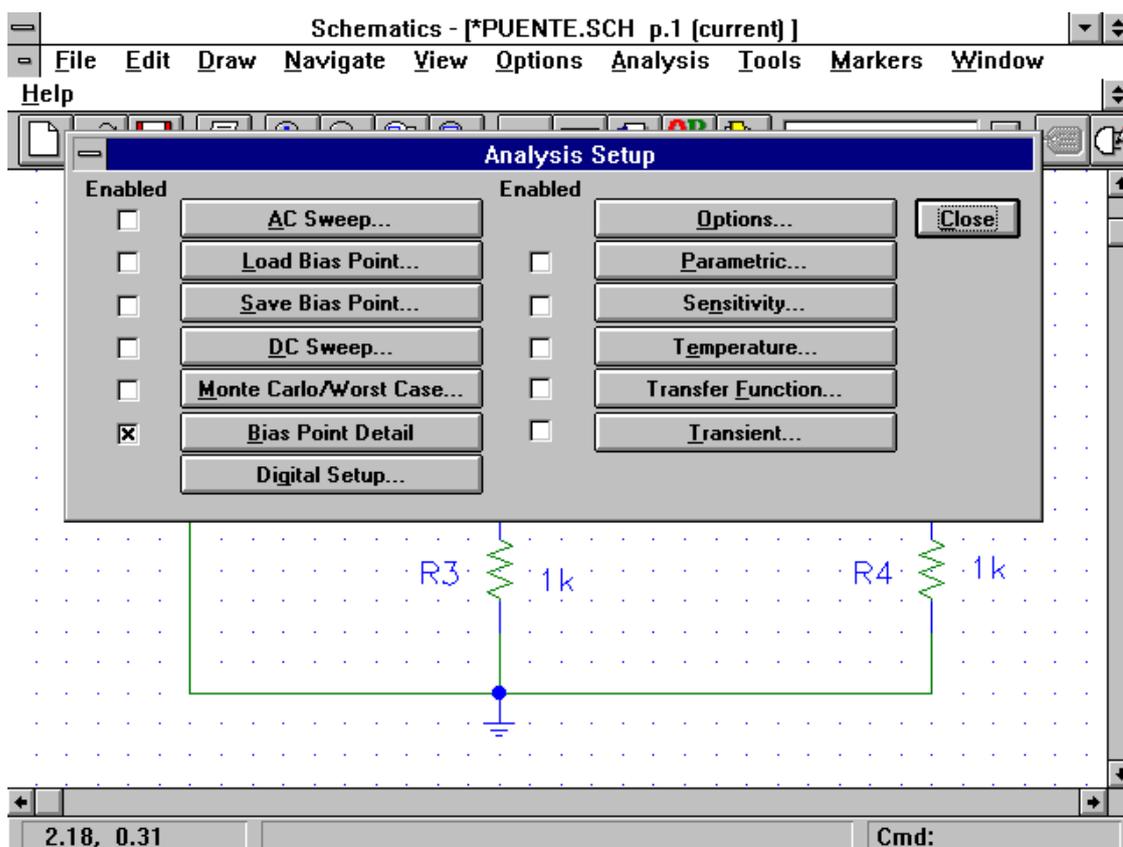


fig. 8

Haciendo clic en el casillero “enabled”, correspondiente al tipo de análisis que se desee, se habilitará dicha opción. Se observa en la anterior la situación a la que hemos llegado en el trabajo, habilitando sólo la opción **Bias Point Detail**. Cuando se completa la selección de alternativas deseadas, se deberá hacer clic en **Close**, y se estará listo para el análisis propiamente dicho. Para

ello, habilitando la ventana **Analysis**, se elegirá en ella **Simulate**, con lo que se llamará al programa Spice, que correrá, quedando habilitada su pantalla. Para tener acceso a los datos calculados se deberá elegir **Examine output** del menú **File**. En ellos se verá la asignación de nombres a cada uno de los nodos del circuito y a las fuentes. En el caso sencillo en estudio se verán claramente las cuatro resistencias que componen el puente y su fuente de alimentación. A continuación aparecen los resultados del cálculo, que incluyen tensiones en los nodos, corriente entregada por la fuente, con la convención del programa, que todas las corrientes van de (+) a (-) en cualquier dispositivo, y potencia total entregada por la misma. Por último, la salida indica el fin del trabajo y el tiempo que llevó la simulación “total job time”.

4.2. Barrido en continua (DC sweep analysis)

Para acceder a este tipo de análisis volvemos al Schematics, cerrando el programa Spice, con lo que nos encontraremos con nuestro circuito original. Con la misma metodología indicada en 4.1 llegamos al menú de los posibles tipos de análisis, en el que seleccionaremos **DC Sweep...** haciendo clic en el casillero “enabled”. Si hacemos clic en el botón correspondiente aparecerá la siguiente pantalla:

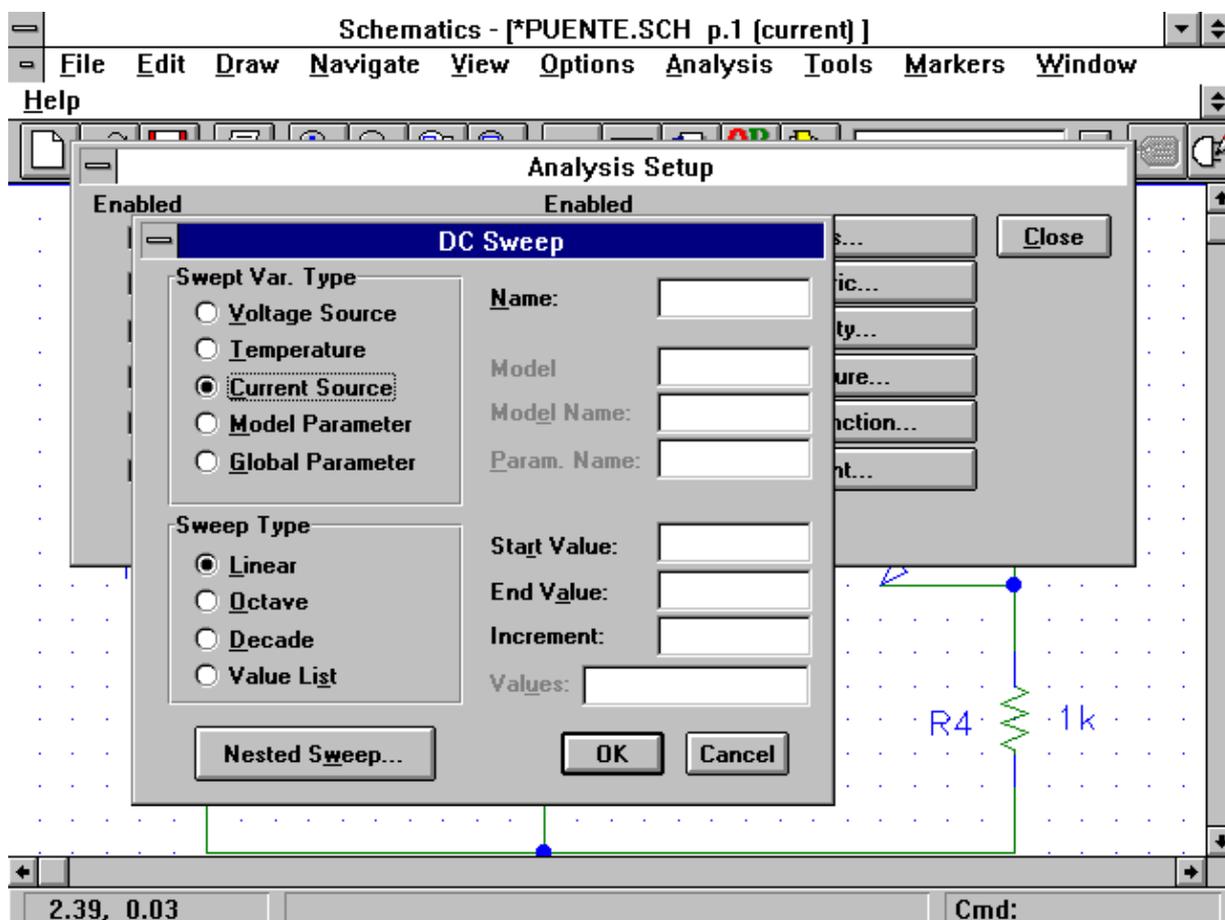


fig. 9

en la que deberemos seleccionar la modalidad que nos interese. En nuestro caso elegiremos como elemento variable la fuente de tensión, para lo que deberemos hacer clic en “Voltage Source”, tipo de análisis lineal, y luego deberemos indicar a qué fuente haremos variar, y entre qué límites, para lo que será necesario escribir los datos en los casilleros correspondientes. En nuestro caso hemos elegido variar la fuente V1, y analizaremos el efecto en la salida cuando su valor

cambia desde 0 hasta 15 V, en incrementos de 1 V. Esto se puede apreciar en los valores que aparecen en la fig. 10. Se observa que en el grupo “Sweep Type” se ha seleccionado “Linear” (prestar atención a las demás modalidades disponibles).

Una vez completado el cuadro de diálogo, se elige **OK** y a continuación **Close**, y se está listo para hacer el análisis. Procediendo como en el punto 4.1, podremos leer en el Spice los resultados de la simulación, aunque resultará más cómodo apreciar en un gráfico el efecto de los cambios en distintas partes del circuito, para lo que deberemos recurrir al programa Probe, que es la salida gráfica del simulador. Para habilitarlo, volveremos al menú **Analysis** y en él seleccionaremos **Probe Setup**. Se abrirá un cuadro de diálogo, en el que entre la varias opciones elegiremos “Automatically Run Probe After Simulation”, que hará que el programa Probe arranque en forma automática apenas concluida la simulación. Haciendo clic en **OK** estaremos en condiciones de efectuar la corrida, para lo que seleccionaremos **Simulate** del menú **Analysis**. Notaremos que luego de efectuados los cálculos el Probe arrancará en forma automática.

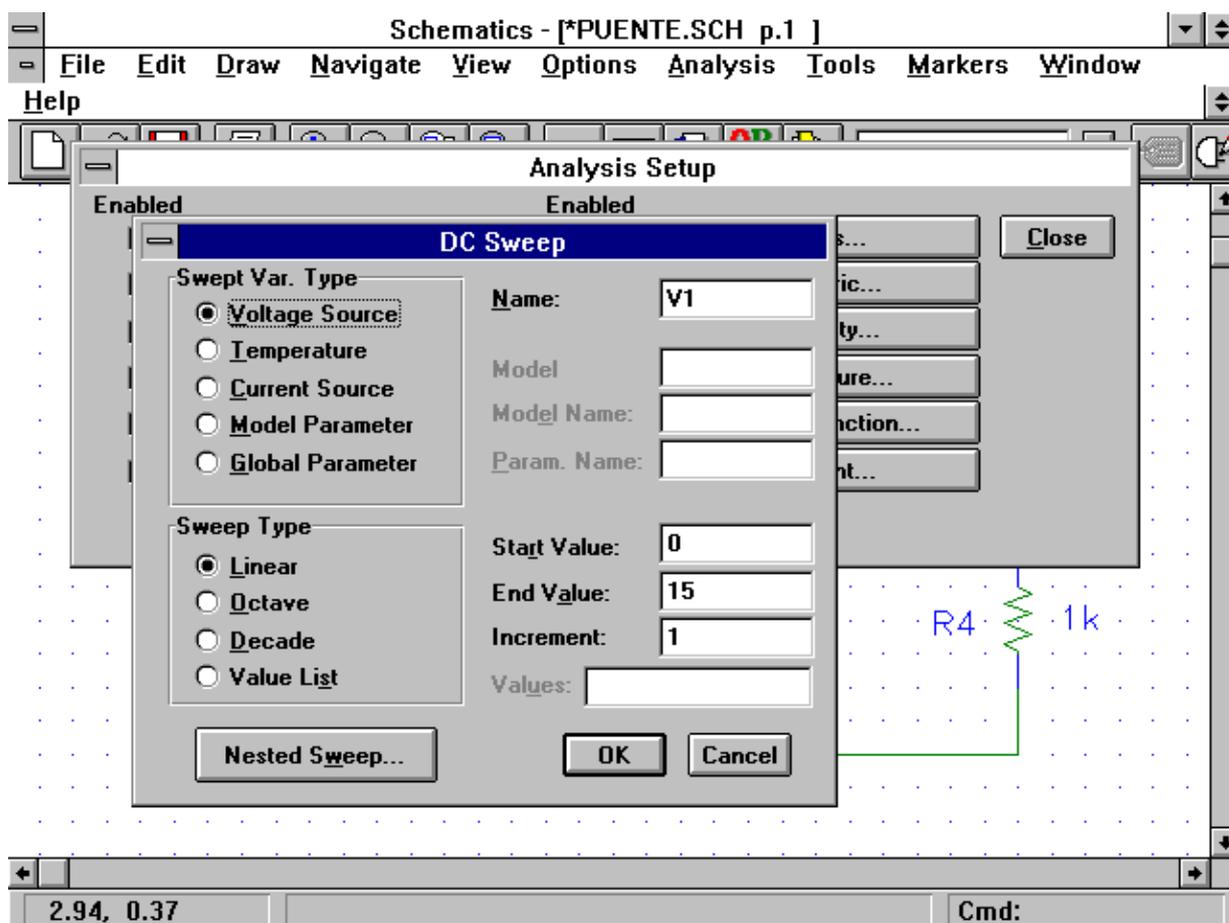


fig. 10

5. Uso del Probe

En el paso anterior habilitamos por primera vez el Probe. La pantalla original que aparece luego de la corrida es la de la fig. 11. En ella se reconocen los comandos básicos de los programas de Windows, con algunos que merecen un comentario especial, como el señalado **Trace**. Si se hace clic en él se despliegan una serie de alternativas, como la **Add** (agregar), que si se la habilita nos permite hacer aparecer otras curvas en la misma gráfica, elegidas de entre el menú de posibles que nos indica el programa, pruebe por ejemplo a graficar la corriente que entrega la fuente I[V1]. Se pueden seguir agregando trazas hasta ubicar a todas las disponibles. Salvo en el caso de los monitores a color, un número muy grande de curvas suele complicar la interpretación. En estos casos resulta mucho más cómodo dividir el gráfico, lo que se logra con el empleo de la facilidad **Add Plot**, que se encuentra en el menú **Plot**. Repitiendo los pasos más arriba citados para lograr el gráfico que nos satisfaga, se puede dar a cada uno de los nuevos la apariencia deseada. Es posible también realizar operaciones de suma y resta de señales.

En cuanto a los demás comandos, sugerimos al lector que investigue en ellos, para lograr tener un manejo más o menos completo de los mismos. Remarcamos en particular el comando **Performance analysis**, que permite hacer comparaciones entre las salidas que se obtienen en el caso de múltiples corridas con cambios en alguno de los parámetros. Otro comando muy útil, y extensamente usado es el que se refiere a los cursores, que se encuentran en el menú **Tools**, al habilitárselos, se pondrán efectuar mediciones tanto en vertical como en horizontal. También en estos casos es conveniente practicar hasta adquirir sensibilidad en su manejo.

En el caso que hemos analizado, la respuesta era previsible: sea cual fuere la señal de alimentación al puente, si éste está equilibrado la salida al detector será nula. La utilidad del análisis se hace patente en casos no tan triviales. Una buena ejercitación será observar cómo varía la señal de corriente en bornes del detector ante cambios en alguno de los elementos, lo que haremos en el siguiente paso.

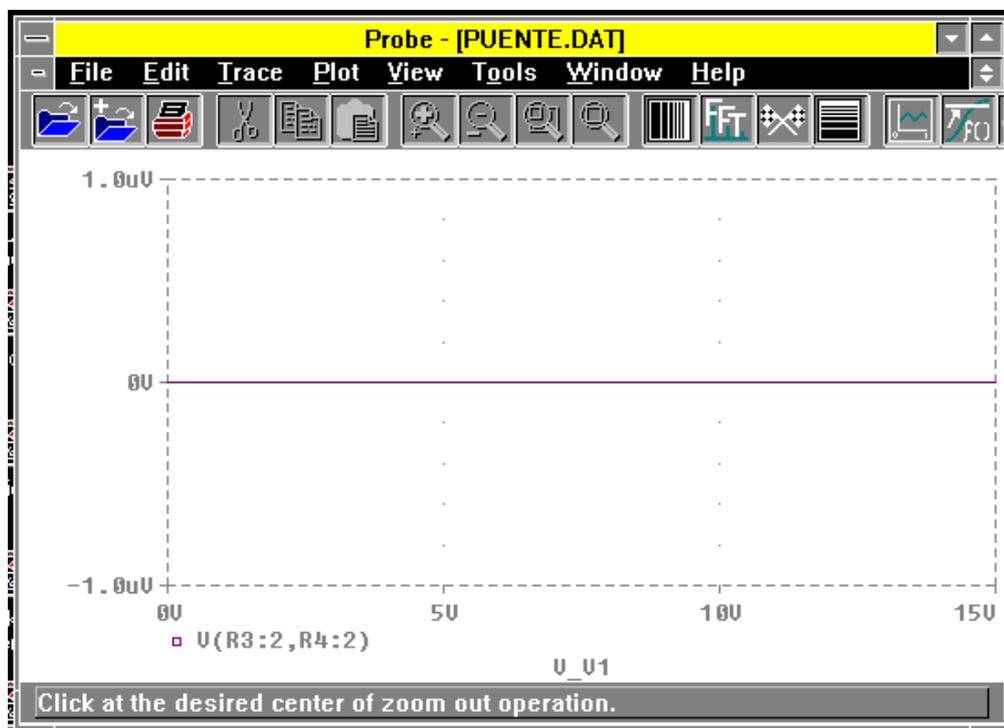


fig. 11

6. Análisis paramétrico

Supongamos que es nuestro interés encontrar el error de insensibilidad del puente que hemos venido analizando. Una manera directa de hacerlo es comprobar cómo varía la tensión en bornes del detector, puntos + y - cuando se varía el resistor R3. Este análisis nos dará el resultado para un detector de impedancia mucho mayor que la de salida del puente, lo que no quita generalidad.

Lo primero que haremos es abrir el Schematics, y en él llamar a nuestro circuito, que se había guardado como “Puente.sch”, en la forma usual. Una vez en él seleccionamos el resistor R3, y haciendo doble clic sobre su valor (1k) escribimos “{Rvar}” en el cuadro de diálogo que se ha abierto (prestar especial atención a las llaves), a continuación cerrar el cuadro de diálogo haciendo clic en **OK**.

A continuación se debe buscar el modo de análisis paramétrico, al que se accede como a cualquier otro componente, en la lista que se abre cuando se pide **Get New Part** del menú **Draw**. Seleccionamos el elemento “Param” en la misma forma en que habíamos procedido para los componentes de circuito, y lo colocamos en cualquier lugar de la pantalla. Haciendo doble clic en él se abrirá un cuadro de diálogo que nos permitirá determinar los valores de la R3 para los que se efectuará el análisis, y que se muestra en la fig. 12.

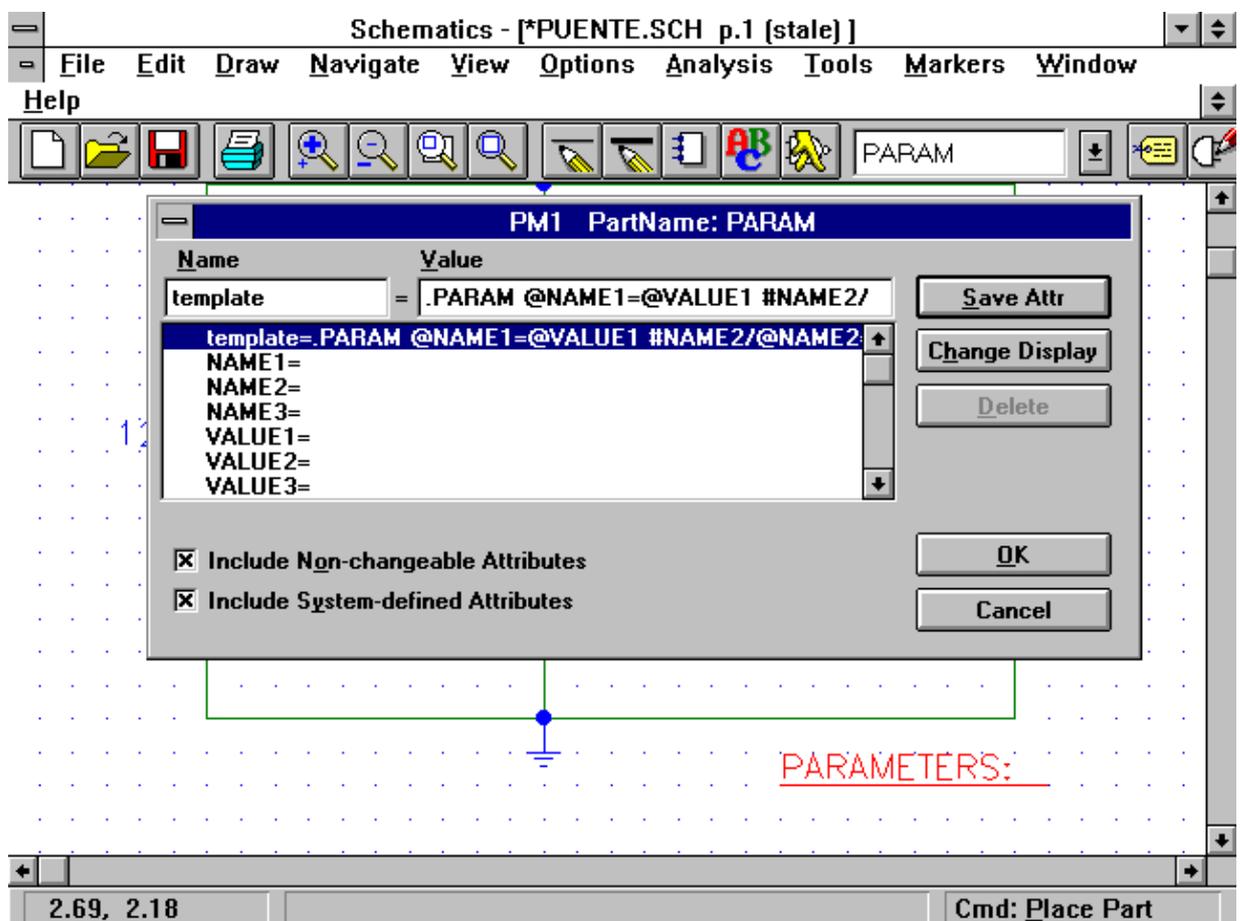


fig. 12

En el cuadro de diálogo aparecen distintas alternativas (se aprecia que se puede hacer el análisis paramétrico para más de un componente). Nosotros seleccionaremos el primero de ellos, “Name 1” y escribiremos “Rvar”, luego de lo cual lo salvaremos haciendo clic en **Save Attr.**. Fijaremos a continuación su valor, para lo cual seleccionaremos “Value 1= ” y en él escribiremos nuestro valor original, 1K. Concluído ésto haremos de nuevo clic en **Save Attr.**, y por fin en **OK**, con lo

que la ventana de diálogo se cerrará. Debajo de “PARAMETERS” aparecerán, en la ventana del Schematics, los valores elegidos.

El paso siguiente es ajustar el análisis paramétrico, para lo cual vamos al menú **Analysis**, y en él seleccionamos **Setup**, con lo que aparece el cuadro de diálogo que ya hemos empleado en otras oportunidades. Lo primero que haremos con él es deshabilitar los tipos de análisis que hasta ahora habíamos efectuado y seleccionar “Parametric”, haciendo clic en el casillero correspondiente de habilitación y sobre él, para que se abra la ventana que nos permitirá ajustar los detalles de análisis. En la fig. 13 se aprecia el cuadro de diálogo que resulta, en el que se ven los valores elegidos para la simulación: se eligió un parámetro (Global Parameter), cuyo nombre es Rvar tal cual habíamos determinado, se pidió un barrido lineal y se dieron los puntos de arranque y de terminación de la simulación. El usuario los elige en función de las características de funcionamiento que le interesen. En nuestro caso, como queremos ver el comportamiento en las vecindades del cero para calcular la sensibilidad, tomamos una excursión de $3\ \Omega$ por encima y por debajo del valor de equilibrio, con incrementos de $0.5\ \Omega$.

Para que el análisis se efectúe es necesario habilitar alguna de las otras modalidades previamente analizadas, como **DC Sweep**.

El resultado de la simulación se aprecia en la fig. 14, que corresponde a la salida del Probe con las curvas resultantes.

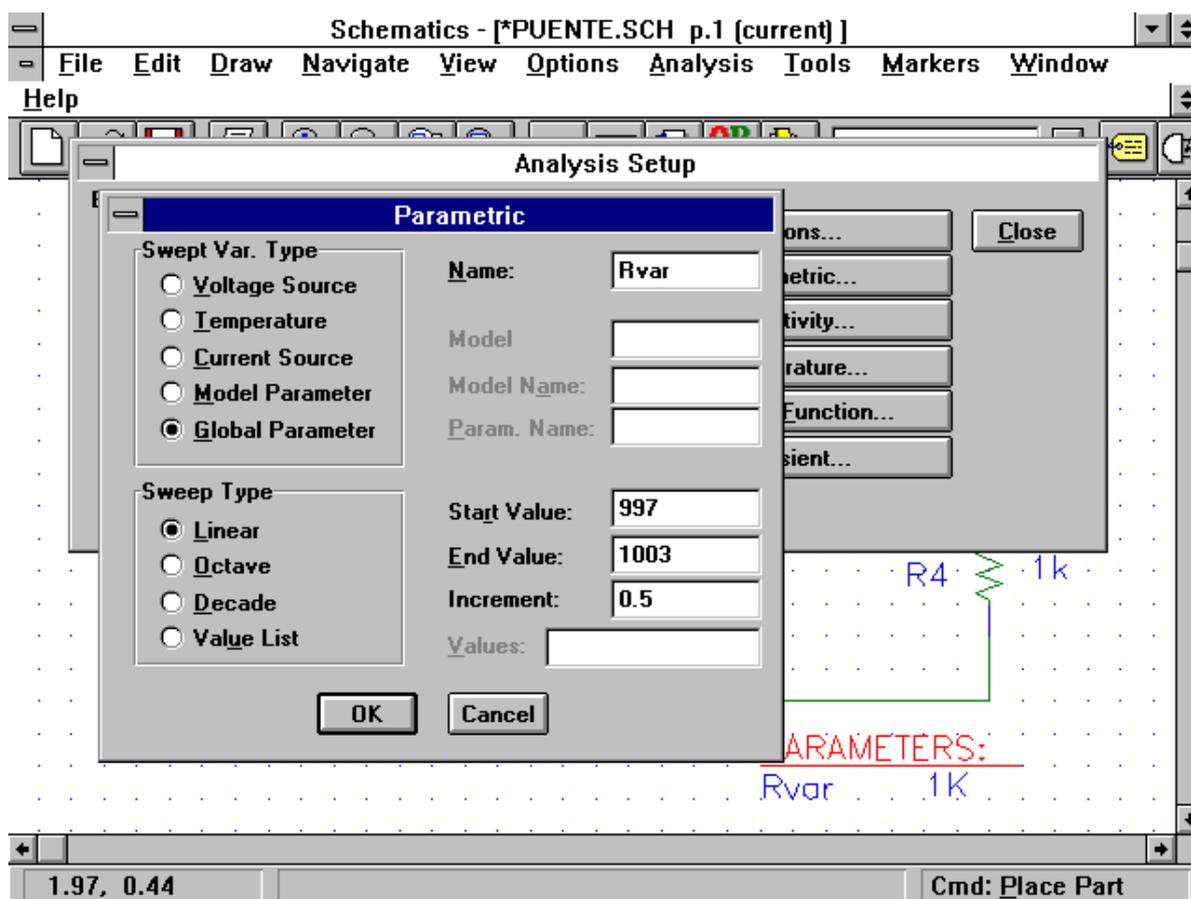


fig. 13

Su uso es inmediato. Se puede determinar para cada valor de la tensión de alimentación entre los elegidos para la simulación, cuál es la tensión de salida en bornes del detector, cuando la resistencia R3 varía dentro de los límites previamente establecidos. Llegados a este punto se podría

utilizar alguna de las facilidades extras del Probe, cosa que, sin embargo, haremos en las corridas de análisis transitorio.

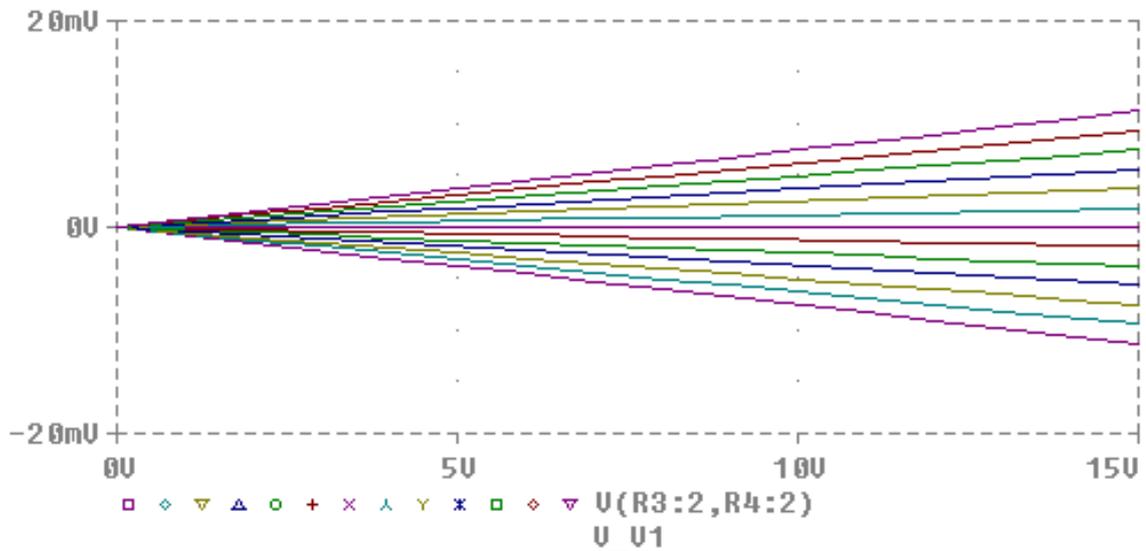


fig. 14

7. Análisis de la respuesta en frecuencia (AC Sweep analysis)

Para este análisis se empleará el circuito de la figura siguiente, el que puede crearse fácilmente, en el “**Schematics**”, con los conocimientos hasta aquí adquiridos. Se recomienda emplear para ello, como fuente de tensión, la que corresponde a la denominación VAC, como resistores, R, y como capacitores, C, asignándoles los valores mostrados (se reconocerá en forma inmediata que es un divisor de tensión no compensado).

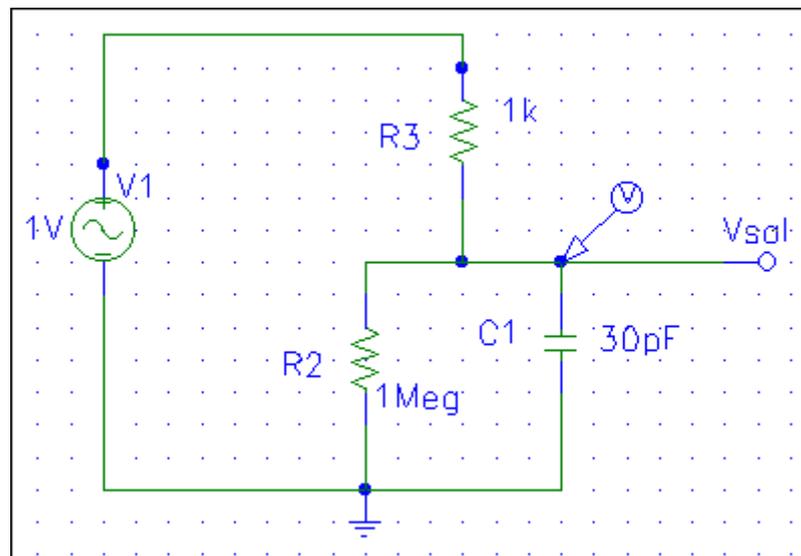


fig. 15

Luego, y a los fines de efectuar el análisis de respuesta en frecuencia (**AC Sweep Analysis**), proceder como se indica a continuación:

- a) Abrir el submenú **Setup** dentro del menú **Analysis**.

- b) Habilitar el análisis de alterna haciendo clic en el casillero correspondiente a **AC Sweep...** de la columna **Enabled** respectiva. (Debe corroborarse que sea el único casillero con “x”).
- c) Seleccionar **AC Sweep** haciendo clic sobre la barra correspondiente.
- d) Seleccionar el tipo de barrido (**AC Sweep Type**) y los valores de los parámetros (**Sweep Parameters**), según lo deseado. En la figura siguiente se muestra la opción que se propone como ejemplo:

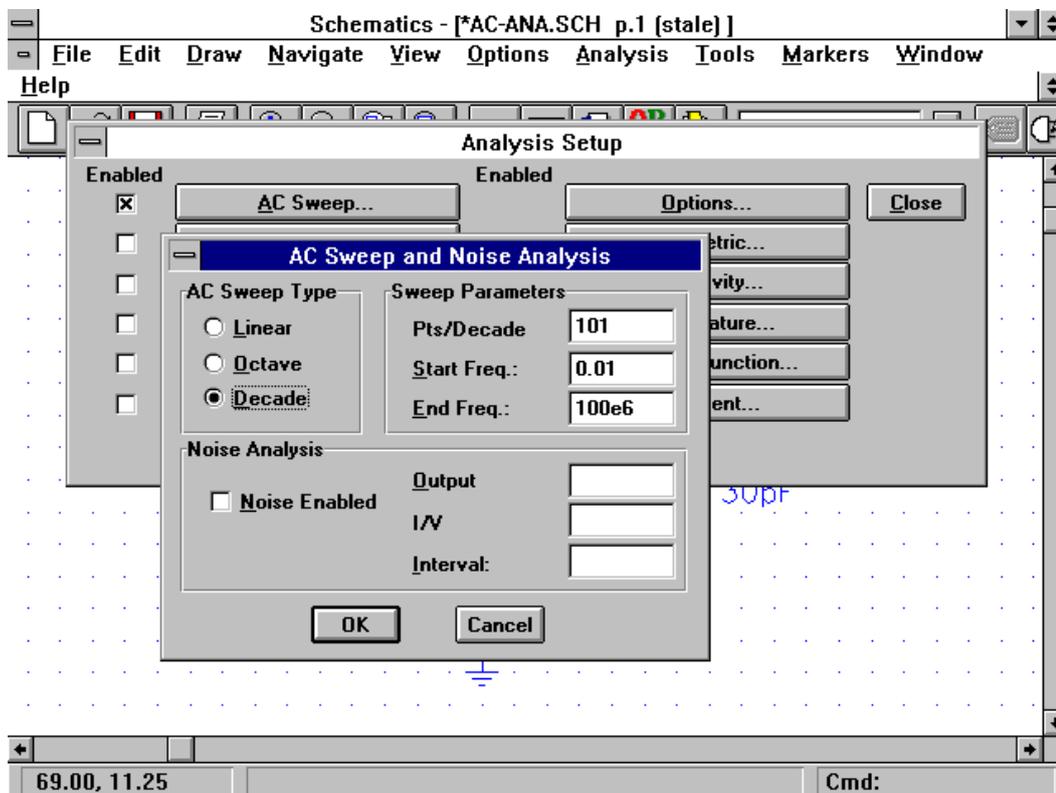


fig.16

- e) Aceptar las opciones mediante **OK** y cerrar la ventana **Analysis Setup**.

El paso siguiente sería la simulación del funcionamiento del circuito, lo que se consigue seleccionando **Simulate** del menú **Analysis** (o simplemente presionando F11). El resultado que se obtendrá (como salida del Probe) será el siguiente:

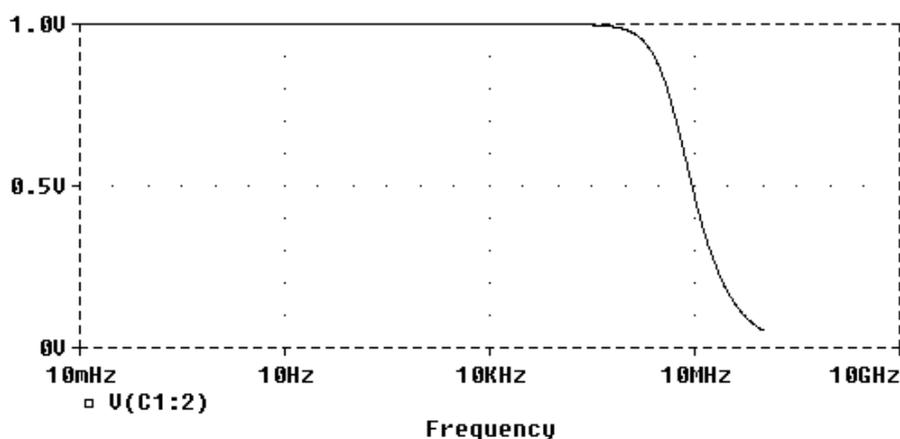


fig. 17

Como ejercicio podría comprobarse el resultado que se obtiene si se repite la simulación haciendo algún cambio, según se desee, en las opciones indicadas en d), tomando, por ejemplo, un tipo de barrido lineal o variando la frecuencia inicial del mismo.

Otra forma de análisis de la respuesta que admite el PSpice es la que corresponde a los diagramas de Bode. Para su construcción basta proceder de la siguiente forma:

- a) Volver al circuito recientemente analizado en el **Schematics**.
- b) Seleccionar **Mark Advanced** del menú **Markers**.
- c) Colocar marcas **vdb** y **vphase** en V_{sol} (como se muestra en la figura siguiente). Tal cual como puede leerse en la correspondiente descripción, darán como resultado, respectivamente, la magnitud y la fase de la tensión del nodo marcado.

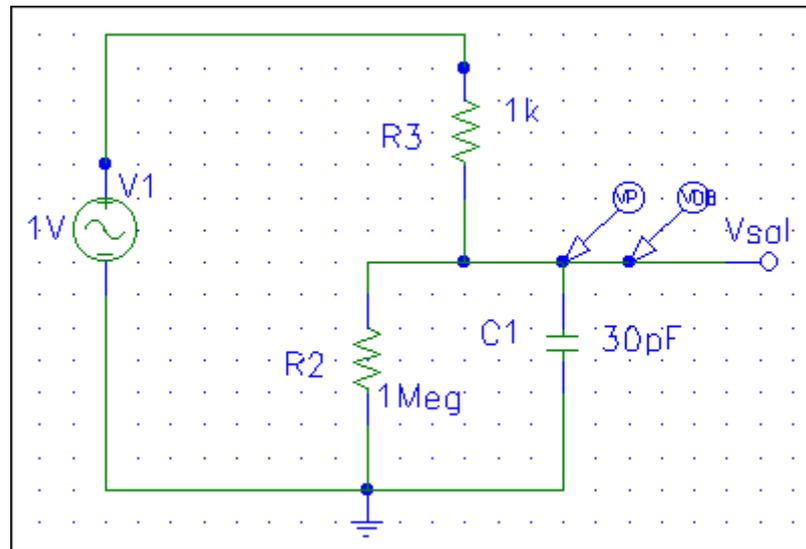


fig. 18

- d) Simular nuevamente el circuito presionando F11.

Una vez aparecida la gráfica del **Probe**, y a fin de mejorar la visualización, pueden asignarse escalas diferentes para el módulo (**VDB**) y la fase (**VP**) de la tensión del nodo analizado. Para ello, se puede proceder de la siguiente forma:

- a) Hacer clic, por ejemplo, sobre **VP** (en la parte inferior izquierda de la pantalla), con lo que cambiará al color rojo.
- b) Seleccionar **Cut** del menú **Edit**, con lo que desaparecerá del gráfico la curva correspondiente a la fase, que quedará en el portapapeles.
- c) Agregar un nuevo eje de abscisas escogiendo **Add Y Axis** del menú **Plot**.
- d) Pegar la curva cortada antes, seleccionando **Paste** del menú **Edit**. Con ello se obtendrá finalmente la figura siguiente, que corresponde al diagrama de Bode de amplitud y fase del circuito analizado:

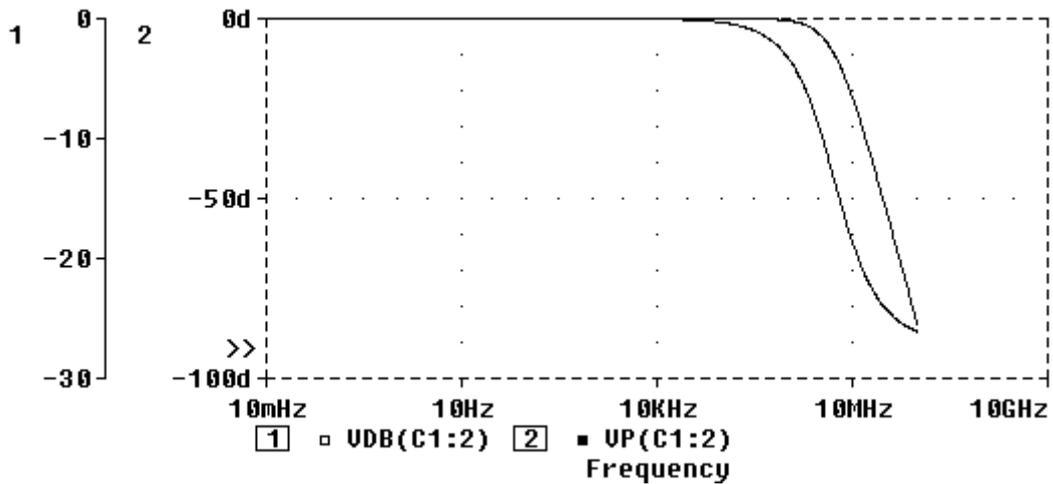


fig. 19

Un ejercicio adicional podría ser el analizar que ocurre cuando se varía, por ejemplo, la resistencia R3, o la capacidad C1.

8. Análisis transitorio

Para estudiar el análisis transitorio se utilizará el circuito del punto anterior, con algunas modificaciones. La idea que se propone como ejemplo, es excitar al circuito propuesto con un escalón, que puede conseguirse a través de una fuente de continua y una llave cuyo instante de cierre pueda controlarse. A continuación se enumeran las modificaciones recomendadas al circuito del punto anterior, para conseguir el objetivo mencionado:

- a) Se quita la fuente de tensión alterna (haciendo clic sobre ella y presionando “Supr” o “Delete” según corresponda), y se coloca en su lugar una de continua (VDC), a la cual se le asigna un valor de 12 V.
- b) Se busca, entre los elementos listados al seleccionar **Get New Part** del menú **Draw**, una llave que reúna las características deseadas. Ella es la **Sw_tClose**, que se coloca entre la fuente de tensión y R3. Este elemento tiene ciertos parámetros característicos (algunos de los cuales pueden ser visualizados, y eventualmente modificados, haciendo doble clic sobre él), que se describen a continuación:

- Ropen: resistencia equivalente de la llave en posición abierta.
- Rclosed: resistencia equivalente de la llave en posición cerrada.
- tclose: instante en el que se inicia el cierre de la llave.
- ttran: tiempo que tarda la resistencia equivalente de la llave en pasar de su valor inicial (Ropen) a su valor final (Rclosed).

A los fines del presente ejemplo se propone asignar a los parámetros antes definidos los siguientes valores:

$$tclose = 10n \quad ; \quad ttran = 0 \quad ; \quad Ropen = 100 \text{ G} \quad ; \quad Rclosed = 0.001 \text{ (*)}$$

A este punto ya se ha completado la definición del circuito a estudiar, que se muestra en la figura:

(*) El programa no admite el valor cero para este parámetro

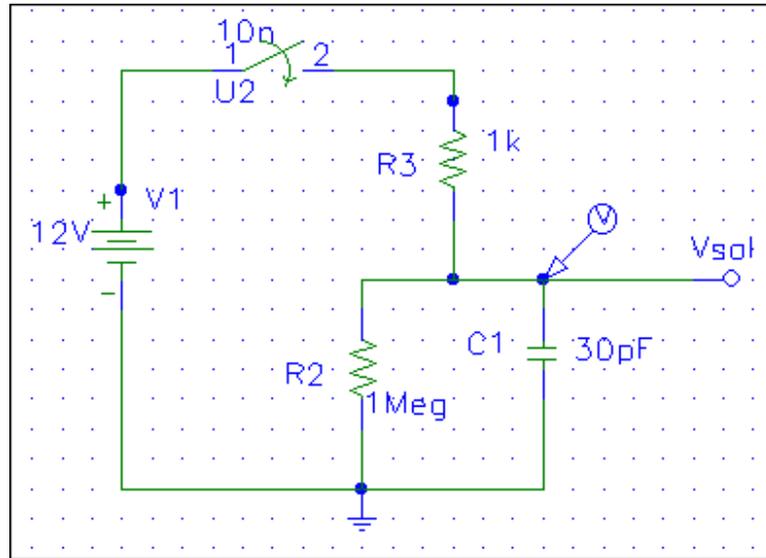


fig. 20

El paso siguiente sería ajustar las condiciones correspondientes a la simulación propiamente dicha. Para ello se puede proceder como sigue:

- a) Abrir el submenú **Setup** dentro del menú **Analysis**.
- b) Habilitar el análisis transitorio haciendo clic en el casillero correspondiente a **Transient...** de la columna **Enabled** respectiva. (Debe corroborarse que sea el único casillero con “x”).
- c) Seleccionar **Transient** haciendo clic sobre la barra correspondiente.
- d) Fijar, en la medida de lo posible de acuerdo a los valores esperados para el circuito a analizar, los distintos parámetros que definen el análisis transitorio. Para nuestro caso fijaremos sólo los valores correspondientes al paso (**Print Step**) y al tiempo total de graficación (**Final Time**), a los que se le asignarán los valores que se muestran en la figura.

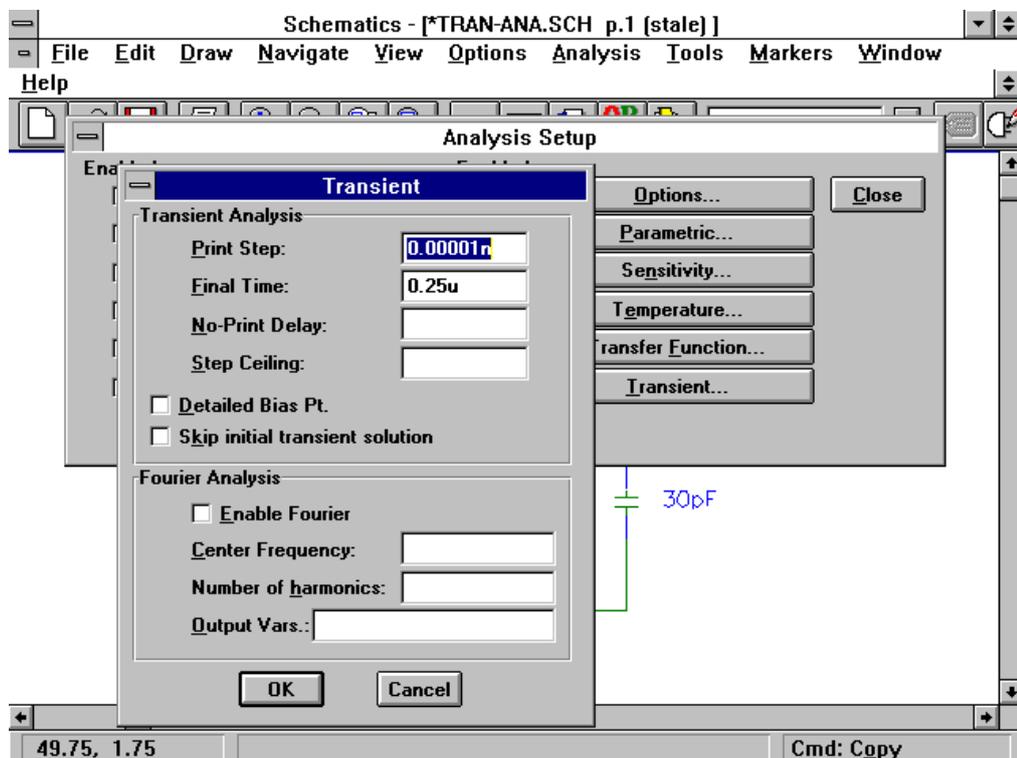


fig. 21

e) Aceptar las opciones mediante **OK** y cerrar la ventana **Analysis Setup**.

El paso siguiente sería la simulación del funcionamiento del circuito, lo que se consigue seleccionando **Simulate** del menú **Analysis** (o simplemente presionando F11). El resultado que se obtendrá será el siguiente:

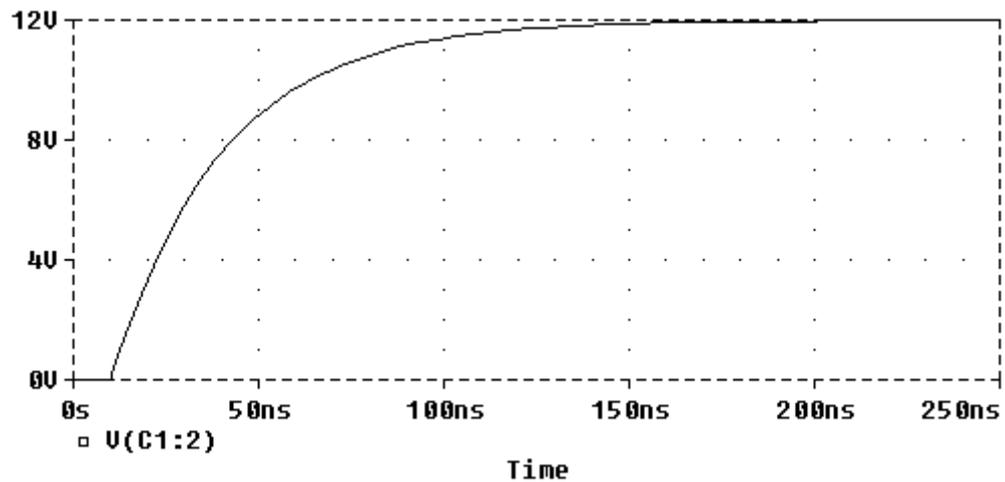


fig. 22

Como inquietud se podría ver que ocurre cambiando algunos valores, por ejemplo la Ropen de la llave a 1 Meg.

Otra alternativa interesante sería ver qué tiempo de subida tiene la señal de salida, utilizando las facilidades del Probe ¿Sería capaz de calcular el ancho de banda, con alguna otra simulación? Compare sus resultados.

Adicionalmente a lo obtenido en la figura anterior puede hallarse, a través del mismo Probe, una gráfica del análisis de Fourier de la onda dibujada. Para ello, basta simplemente seleccionar **Fourier** del menú **Trace**, con lo que se llega al resultado mostrado en la figura 23.

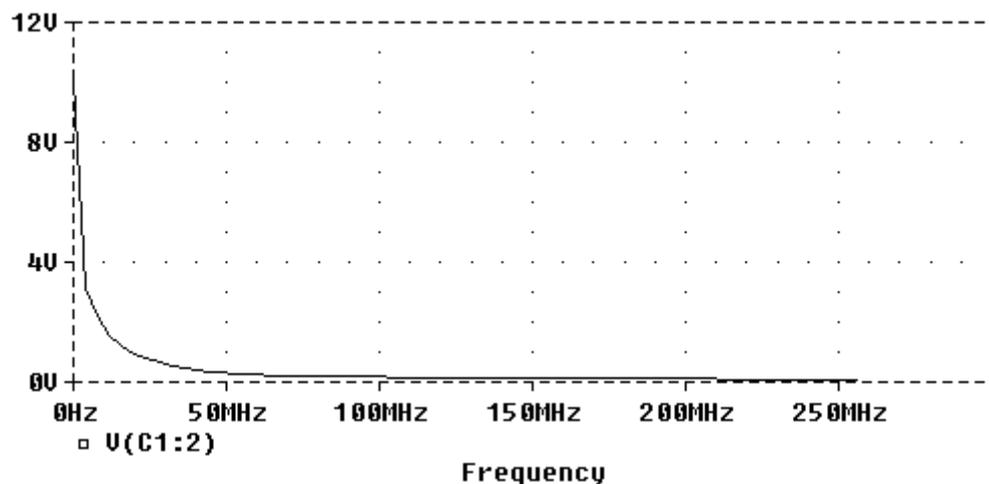
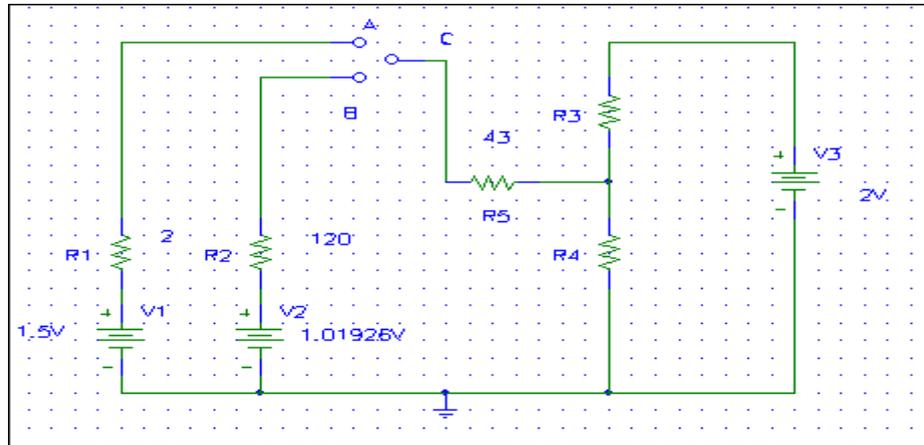


fig. 23

9. Ejercicios propuestos

En lo que antecede se han presentado ejemplos sencillos para comprender el uso del simulador. A continuación lo emplearemos como herramienta de diseño y cálculo, aplicada a la resolución de problemas típicos de la asignatura Medidas Eléctricas.

9.1. Considere el circuito que se presenta en la figura, que corresponde a un compensador. Interesaría determinar cuál es su error límite de insensibilidad cuando se lo arma con los parámetros indicados:



$K_i = 1\mu\text{A}/\text{div}$, resolución = 0,1 div., $R_3 + R_4 = 2000\ \Omega$

fig. 9.1

Determine además, qué influencia tendrá en ella el reemplazo del detector de cero (R_5 en la figura 9.1) por otro cuya resistencia sea de $400\ \Omega$, y su constante de intensidad $K_i = 0,03\ \mu\text{A}/\text{div}$., con una resolución de $1/20$ de división.

9.2. El de la figura que sigue es el circuito típico de un puente de Wheatstone. R_1 y R_2 son dos resistores que pueden tomar los valores 10 , 100 o $1000\ \Omega$ cada uno. R_3 es una caja formada por las siguientes décadas: 10×1000 , 10×100 , 10×10 , 10×1 , $10 \times 0,1\ \Omega$. La potencia de disipación de todos los elementos es de $0,25\ \text{W}$. Como galvanómetro se empleará uno de $200\ \Omega$, $1\ \mu\text{A}/\text{div}$. y resolución $1/10$ div.

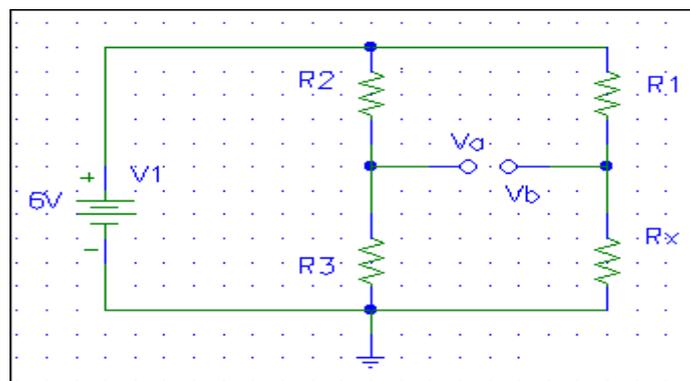


fig. 9.2

Como es sabido la sensibilidad del mismo es función, entre otros parámetros, del valor que adopte la incógnita. Interesa saber:

- a) ¿Hasta qué valor de X el error de insensibilidad se mantiene por debajo del 0,2 % ?
- b) ¿Qué influencia tiene en el error de insensibilidad, al medir una incógnita de aproximadamente 10 K Ω , que R1 y R2 sean reemplazadas por dos resistores de 10 K Ω cada uno?
- c) Compare las corrientes que circulan por las diferentes ramas del puente, cuando se lo arma con los valores originales para medir la incógnita de 10 K Ω o cuando se lo hace con la alternativa indicada en b).
- d) Analice de qué manera varía la sensibilidad cuando, para una dada incógnita, se logra el equilibrio con diferentes relaciones R₁/R₂. Trate de encontrar reglas de carácter general.

9.3. En la figura siguiente se representa un puente de Thomson. Interesa saber si la sensibilidad que se obtiene al medir con él una resistencia de $2.4 \times 10^{-4} \Omega$, es suficiente como para detectar variaciones de la misma del orden del 0,1 %.

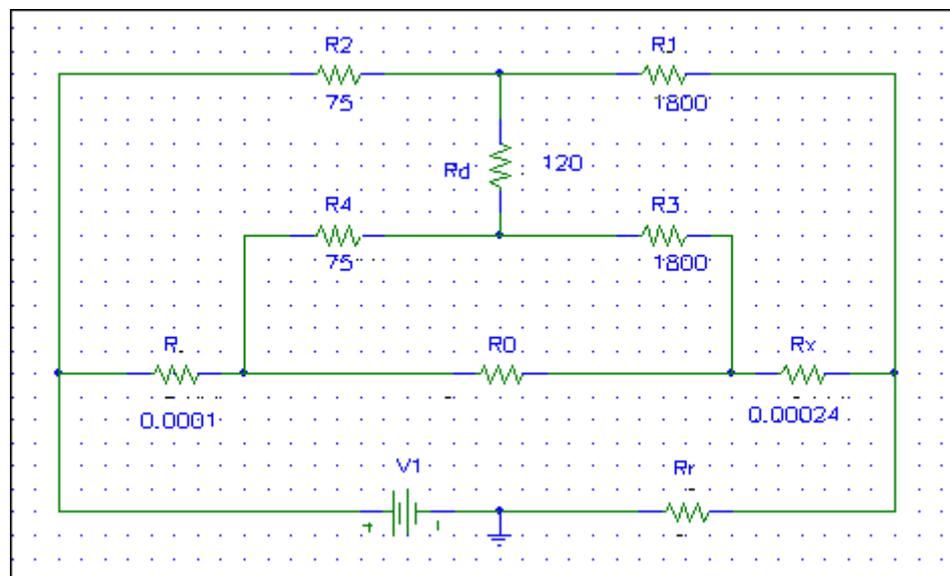


fig. 9.3

El detector de cero tiene una resistencia interna de 120 Ω , con una constante de intensidad de 0,003 $\mu\text{A}/\text{div.}$, y una resolución de 1/20 de división. La corriente de trabajo es de 5 A.

9.4. Cuando se trataron los puentes megóhmetros en las Discusiones de Temas, se dijo que una de sus características era el trabajar en condiciones de baja sensibilidad, debido a los valores de las resistencias que los componen. Simule el puente megóhmetro de la fig. 4.4. del Capítulo 4 de la publicación de la Cátedra, con los valores presentados como típicos en la pág. 9 del mismo, con el fin de obtener qué sensibilidad debiera tener el detector de cero para que puedan lograrse las exactitudes que se mencionan como típicas en la página citada. Suponga que la resistencia interna del detector es de 1 K Ω .

9.5. Se desea medir el transitorio de corriente que se produce al cerrar la llave L en el siguiente circuito. Se utilizará un osciloscopio con una impedancia de entrada de 1 M Ω en paralelo con 30 pF, con punta 1X con 1 m de cable coaxial de 100 pF/m. Encontrar qué error en amplitud se comete a los 0,75 μs del cierre de la llave.

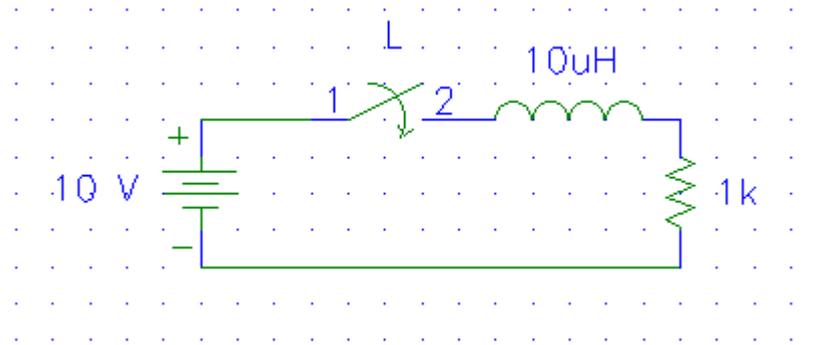


fig. 9.5

9.6. Con el fin de medir una señal cuyos tiempos de subida y bajada son de $1 \mu\text{s}$ y $5 \mu\text{s}$ respectivamente, y cuya amplitud es de 25 kV , se emplea el divisor de tensión que se indica en la fig. 9.6. Los valores de los capacitores $C1$ y $C2$ son, respectivamente, 300 pF y 40 nF . Como la salida que aparece en su lado de baja tensión (capacitor $C2$) es demasiado alta, se planea colocarle un atenuador de relación $10:1$, capacitivo, formado por dos capacitores, $C3$ y $C4$, cuyos valores son respectivamente 10 nF y 90 nF . En bornes del de 10 nF se colocará un osciloscopio cuya impedancia de entrada y modo de conexión son idénticos a los del utilizado en el problema **9.5**.

a) Diga si el circuito es apto, haciendo la simulación correspondiente.

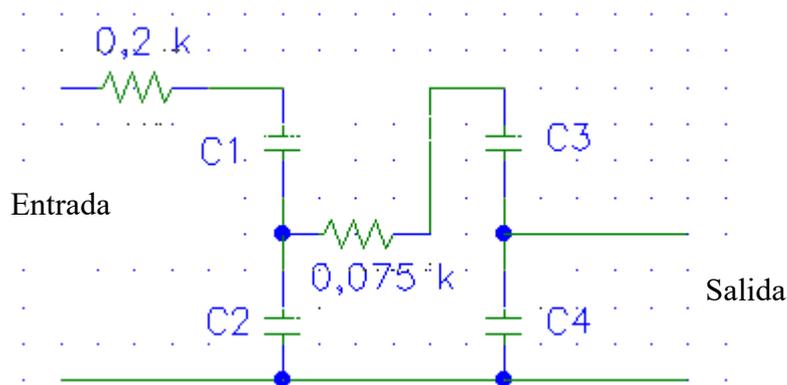


fig. 9.6

b) Indique qué error comete, en amplitud, a los $1,5 \mu\text{s}$ del comienzo de la onda.

c) Estudie si la resistencia de 200Ω influye en la respuesta al escalón del divisor básico, formado por la resistencia de 200Ω , $C1$, $C2$ y la resistencia de 75Ω .

d) Sugiera alguna alternativa a $C3$ y $C4$ que permita efectuar la medición pedida sin error apreciable.

e) Considerando el divisor básico al que se hizo referencia en el apartado c), diga en qué momento, luego de la aplicación del escalón, el error de amplitud alcanza el 10% . Formule comentarios.

Nota 1: Las resistencias de 200Ω y 75Ω no están colocadas por azar, sino que tienen que ver con la respuesta de los divisores reales en fenómenos muy rápidos, como se verá en materias posteriores.

Nota 2: Las señales pedidas por el problema pueden simularse, a partir de señales de continua con circuitos elementales, ya que la versión de PSpice de que se dispone no consiente formas de onda complejas.

9.7. Cuando se define la corriente dinámica de un transformador de intensidad, se alude al efecto del mismo tipo que produce el valor instantáneo máximo de la corriente de cortocircuito. Interesa saber si un transformador de relación 250/5 A, $I_{th} = 20 \text{ kAx1s}$, $I_{dyn} = 50 \text{ kA}$, puede ser utilizado en un circuito cuya equivalente visto desde el punto de conexión del TA es el de la figura. La duración del cortocircuito, regulada por elementos no representados en ella, no excede de 0,7 s.

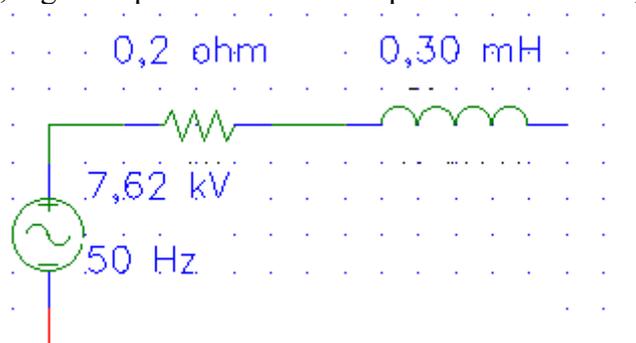


fig. 9.7

a) Efectuando la simulación correspondiente, diga dónde aparece la limitación, si en el aspecto térmico o dinámico.

b) Una vez representada la onda de corriente en el Probe, aplique el análisis de Fourier para encontrar las distintas componentes de frecuencia. Diga cuál de ellas puede tener un peso decisivo en la eventual saturación del núcleo.

9.8. Un amperímetro digital de alcance 20 A, presentación 3½ dígitos, indicación de valor eficaz verdadero, tiene un error garantizado por el fabricante, $E_1 = \pm 1 \% I_m + 2 \text{ díg.}$] en un rango de frecuencias de 20 a 500 Hz, factor de cresta 8. Interesa saber si podrá utilizárselo para medir la corriente que circula por un capacitor de 60 μF al ser excitado por una señal de la forma:

$$U = 319 \text{ sen } \omega t + 100 \text{ sen } 3\omega t + 50 \text{ sen } 5\omega t + 30 \text{ sen } 7\omega t, \omega = 2\pi f, f = 100 \text{ Hz.}$$

ANEXO

Breve resumen de los comandos más usuales

En lo que sigue se presenta un resumen de los comandos más usados en las simulaciones que hemos efectuado, con el fin de constituir un ayuda memoria hasta que el lector esté suficientemente familiarizado con los distintos componentes del paquete de simulación de circuitos analizado.

A1. Comandos en el Schematics

- **Para mover los textos asociados a los componentes**

1. Hacer clic sobre el texto para seleccionarlo.
2. Colocarlo sobre el lugar deseado.

- **Para cambiar el valor de los componentes**

1. Hacer doble clic sobre el valor.
2. Escribir el nuevo valor en el cuadro de dialogo Edit Value.
3. Hacer clic en OK.

- **Para cambiar el nombre de los componentes**

1. Hacer doble clic sobre el nombre.
2. Escribir el nuevo nombre en Edit Designator.
3. Hacer clic en OK.

- **Para asignar nombre a las conexiones y a las burbujas**

1. Hacer doble clic sobre la línea de conexión o la burbuja a la cual se le desea asignar un nombre.
2. Escribir el nombre en el espacio llamado Label del cuadro de dialogo.
3. Hacer clic en OK.

- **Para ver gráficos de Bode**

1. Seleccionar **Mark Advanced** del menú **Markers**.
2. Colocar una marca **vphase** en el punto en el que se desea el análisis
3. Colocar una marca **vdb** en el mismo indicado anteriormente.
4. Simular nuevamente el circuito.

A2. En el Probe

- **Para hacer aparecer las curvas deseadas**

1. Seleccionar **Add** del menú **Trace** o presionar  (Aparecerá un listado de todos los parámetros que se pueden graficar).
2. Hacer clic en los que se deseen, apretar OK (Aparecerán las curvas).

• **Para utilizar los cursores**

1. Seleccionar **cursor** del menú **Tools**.
2. Seleccionar **display** para activarlos (Aparecen dos cursores, uno de los cuales se maneja con el botón derecho y otro con el izquierdo del mouse).
3. Colocar los cursores en la señal haciendo clic con el botón correspondiente sobre el símbolo que se encuentra junto al nombre de la señal (En la parte inferior de la pantalla aparecen las coordenadas de los puntos seleccionados, y también las diferencias entre un cursor y otro. Notar que los cursores se desplazan exclusivamente sobre las curvas.).