

CIRCUITOS ELECTRÓNICOS

SESIÓN DE SIMULACIÓN

(Introducción a LTspice IV)

Nota: Este tutorial servirá de guía para el aprendizaje del software de simulación. El día de la sesión práctica tendréis que trabajar sobre los circuitos y simulaciones aquí incluidos, pero con valores de componentes diferentes a los que aparecen en él. **Es obligatoria su lectura previa a la sesión práctica y muy recomendable su realización.** Se permitirá llevar al laboratorio portátiles personales en los que los circuitos puedan estar implementados de antemano.

2º Grado en Ingeniería Informática y Doble Grado en
Ingeniería Informática/Matemáticas

Universidad Autónoma de Madrid

Preparado por el Prof. Jose Luis Castaño, Dpto. Física Aplicada

SPICE (Simulation Program with Integrated Circuits Emphasis) es un programa de simulación de circuitos electrónicos analógicos. Desarrollado en la Universidad de California en los años 70, constituye el núcleo sobre el que posteriormente se han desarrollado muy diferentes versiones que suelen incorporar otras funcionalidades. Actualmente todas las versiones disponen de una interfaz gráfica que hace muy cómodo su manejo.

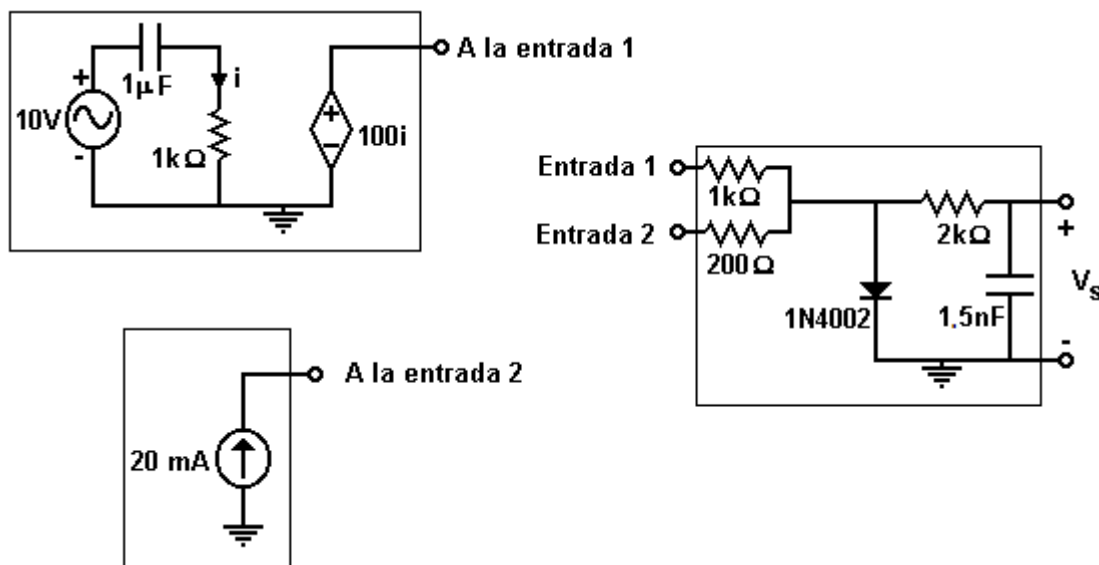
LTspiceIV es una versión gratuita puesta a disposición por el fabricante de circuitos integrados Linear Technology, desde cuya página web se puede descargar (<http://www.linear.com/>). También en la página de Linear Technology se puede encontrar una guía más completa del programa.

Una vez instalado el programa, y en la carpeta donde se instala, encontraremos una subcarpeta (examples) que contiene a su vez otras dos: “jigs”, con un gran número de ejemplos de circuitos construidos a partir de circuitos integrados del propio fabricante, y “Educational” que contiene también un buen número de ejemplos de circuitos de todo tipo muy interesantes y que ilustran el funcionamiento no sólo de los propios circuitos sino también de diferentes características del programa.

Estas páginas constituyen una guía de auto aprendizaje del manejo de las características más importantes del programa.

Está dividida en dos partes: la primera acerca de cómo realizar el diseño de circuitos eléctricos, y la segunda parte sobre cómo establecer los distintos tipos de simulaciones que permite el programa, y como visualizar y extraer información de las simulaciones realizadas.

Para ilustrar las diferentes partes del programa y su manejo, seguiremos el circuito de ejemplo que se muestra a continuación.





Este circuito está constituido por tres subcircuitos. El de la derecha es un amplificador (aunque en este caso concreto se trate de un “desamplificador” porque su ganancia es menor que la unidad). Su factor de ganancia o amplificación es variable y se puede controlar según sea el valor de la corriente suministrada a la entrada 2. A su vez la señal suministrada por la entrada 1 es amplificada y aparece en los terminales de salida (V_s).

El subcircuito de la figura superior es el que suministra la señal alterna que se va a amplificar. Contiene una fuente gobernada para poder tratar en este manual acerca del uso de estas fuentes.


Creación del circuito

Tras iniciar la ejecución del programa podemos abrir un esquema ya creado (“File”, “Open”) o iniciar la creación de uno nuevo (“File”, “New Schematic”). En este último caso se abre la página donde iremos diseñando el circuito y, en cualquier momento, podemos decidir el nombre y la ubicación que daremos a este nuevo circuito (que por defecto se crea con el nombre “Draft1.asc”) mediante “File” y “Save As”.

Aunque durante la simulación de un circuito se pueden ir generando distintos ficheros en la misma ubicación donde lo hayamos creado, para poder seguir trabajando con un cierto circuito en otro ordenador donde también esté instalado LTspice tan solo es necesario exportar el archivo de tipo “Nombre.asc”

Las herramientas para la edición de un circuito se encuentran tanto bajo la pestaña “Edit” como en los botones de la barra de herramientas superior, siendo “Component”() y “Wire”() las dos herramientas básicas.

Componentes




Aunque los componentes más habituales (resistencia, condensador, inductancia y diodo) tienen su propio botón, podemos acceder a todos los componentes a través del botón “Component”(). Tras pulsar sobre él se abre una ventana donde podemos seleccionar el componente necesario. Los que utilizaremos con mayor frecuencia son:


- res (Resistencia)
- cap (Condensador)
- ind (Inductancia)



- diode (Diodo)
- zener (Diodo Zener)
- npn (Transistor bipolar npn)
- pnp (Transistor bipolar pnp)
- Opamps (Picando dos veces se abre la biblioteca de amplificadores operacionales disponibles)

- voltage (Fuente de tensión independiente; puede ser continua, alterna, sinusoidal o de otros tipos)
- current (Fuente de tensión independiente; puede ser continua, alterna, sinusoidal o de otros tipos)
- e, e2 (Fuentes de tensión gobernadas por tensión; se diferencian únicamente en la disposición de los terminales que gobiernan, para facilitar el cableado)
- g, g2 (Fuentes de corriente gobernadas por tensión; se diferencian únicamente en la disposición de los terminales que gobiernan, para facilitar el cableado)
- f y h (Fuentes, respectivamente, de corriente y tensión, gobernadas por corriente. Las fuentes gobernadas por corriente no disponen de terminales específicos para la medida de la corriente que gobierna; para ello hay que insertar, en la rama donde queramos medirla, el elemento tradicional en spice para la medida de corriente: una fuente independiente de tensión de voltaje igual a cero. En cualquier caso, para implementar fuentes gobernadas por corriente es más práctico hacerlo mediante fuentes de comportamiento arbitrario)
- bv (fuente de tensión de comportamiento arbitrario; el valor de la tensión proporcionada lo definimos mediante una función)
- bi (fuente de corriente de comportamiento arbitrario; el valor de la corriente proporcionada lo definimos mediante una función)

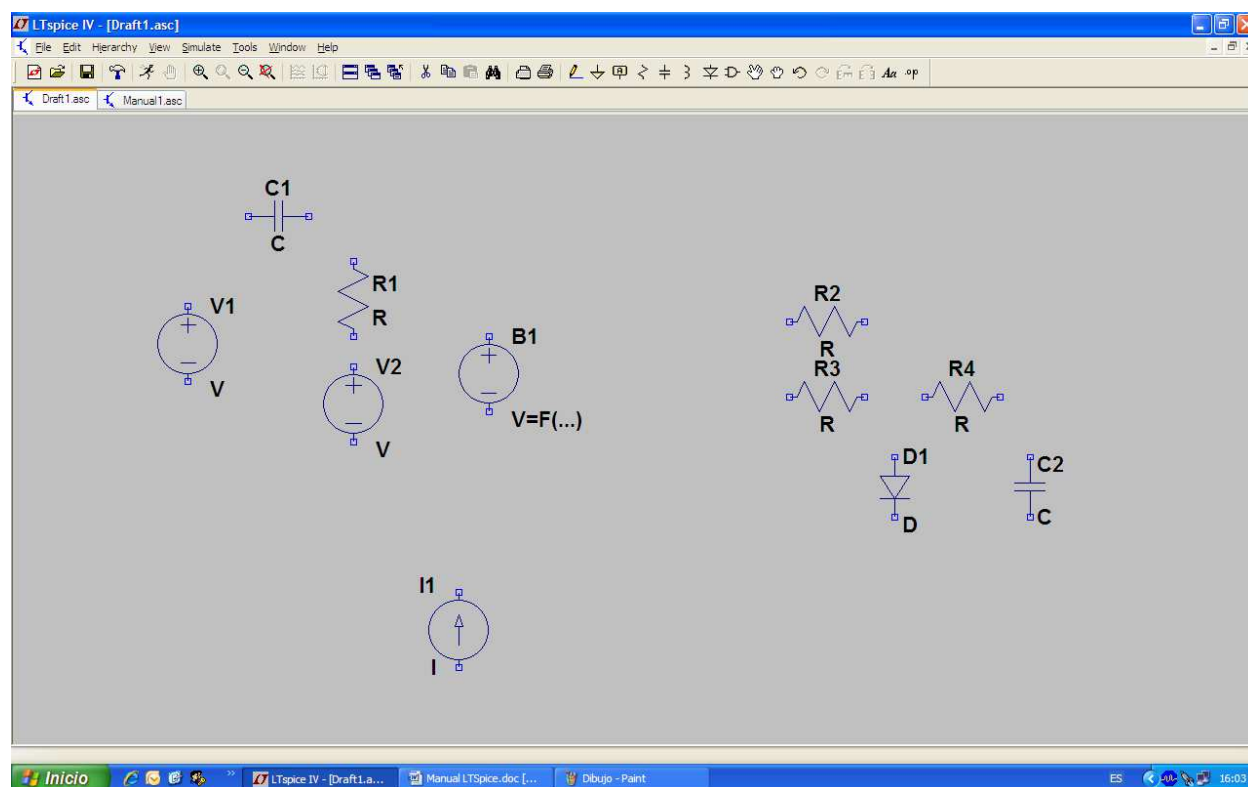
Una vez seleccionado un componente, y tras pulsar OK, podemos ir añadiendo a la hoja del esquema nuevas unidades del elemento seleccionado a cada pulsación del botón izquierdo del ratón; pulsando con el botón derecho dejamos de añadir nuevas unidades.

Pulsando en la herramienta “Move” () podemos, a continuación, seleccionar un elemento del circuito (picando sobre él con el botón izquierdo), o toda una región del circuito (picando y arrastrando para delimitar una región rectangular). El elemento o la región seleccionados podemos desplazarlo, girarlo (pulsando sobre “Rotate” ,  , mientras el elemento está seleccionado) o reflejarlo (pulsando sobre “Mirror”, ). Una vez que el elemento o región se encuentra en la posición y orientación adecuadas, pulsando con el botón izquierdo lo depositamos en su nueva ubicación. La pulsación del botón derecho elimina la herramienta de selección.


La pulsación sobre el botón “Cut” () convierte el cursor en unas tijeras mediante las que podemos eliminar un elemento del circuito (picando sobre él), o toda una región rectangular (picando y arrastrando); la pulsación con el botón derecho elimina la herramienta de corte.

Y, finalmente, los botones “Undo” () y “Redo” () permiten corregir errores durante el diseño.


Iremos añadiendo a la hoja del esquema los distintos elementos de nuestro circuito hasta tener una distribución similar a la que se muestra en la figura. La fuente B1 es una fuente de tensión de comportamiento arbitrario mediante la que implementaremos una fuente de tensión gobernada por la corriente que desciende por R1; y para medir dicha corriente pondremos, en serie con R1, una fuente de tensión (en este caso V2; la corriente medida por V2 es la que entra por su terminal positivo)

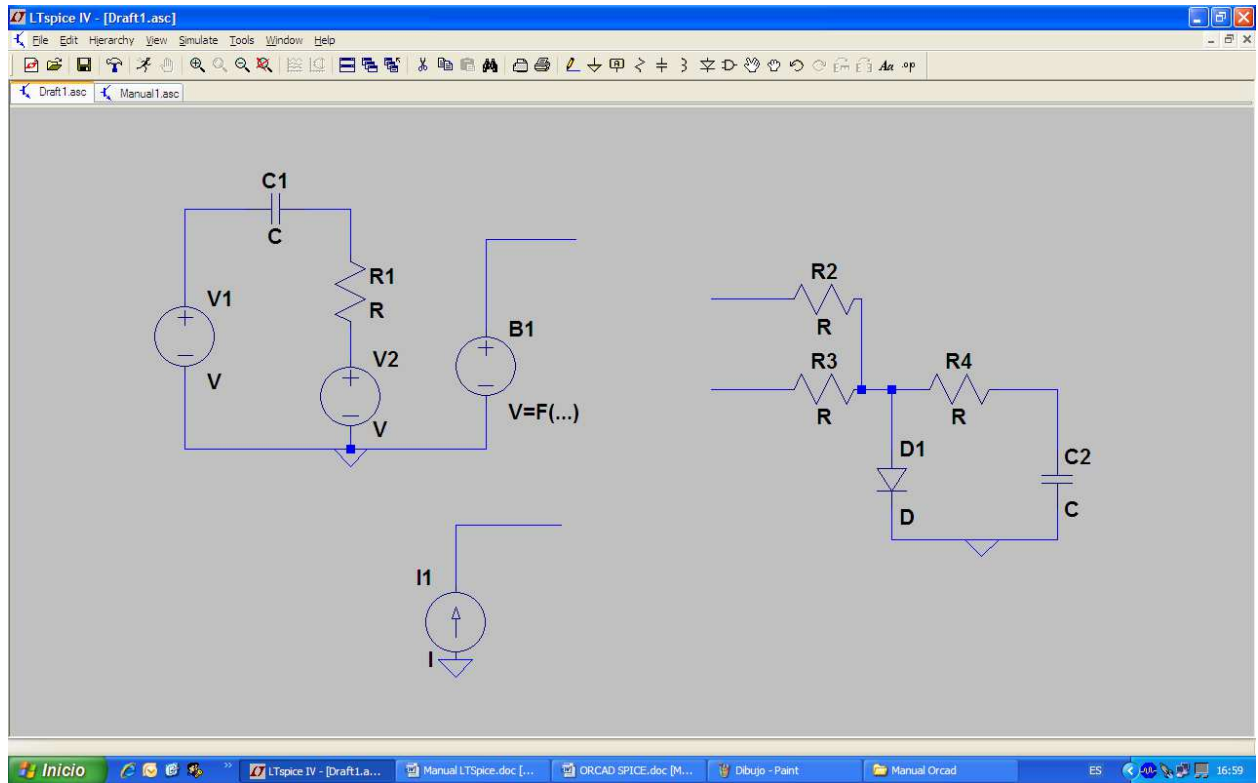


Una vez añadidos los distintos elementos del circuito, cada uno en su correspondiente posición y orientación, procedemos a realizar el cableado del circuito.


Para ello pulsamos el botón “Wire” (), y el cursor se convierte en una cruz. Cada vez que pulsamos con el botón izquierdo sobre un terminal de un elemento o sobre otra línea de conexión anterior iniciamos o terminamos una nueva conexión. También una pulsación con el botón izquierdo en una zona en blanco

fuerza a establecer un código en la línea que estamos trazando. Pulsando con el botón derecho terminamos con el cable actual o con el proceso de cableado.

Una vez acabado el esquema de nuestro circuito, aún es necesario añadir un elemento muy importante: la tierra o referencia de tensiones (Sin este elemento el programa de simulación no sabe con respecto a qué nodo calcular las tensiones de los demás nodos, y considera por tanto que los distintos nodos del circuito están “flotantes”). Para ello pulsar el botón “Ground”() de la barra de herramientas y añadir el símbolo de referencia en los nodos necesarios. Podemos añadir varios símbolos de tierra y todos ellos constituirán el nodo de referencia sin necesidad de realizar explícitamente el cableado entre ellos.

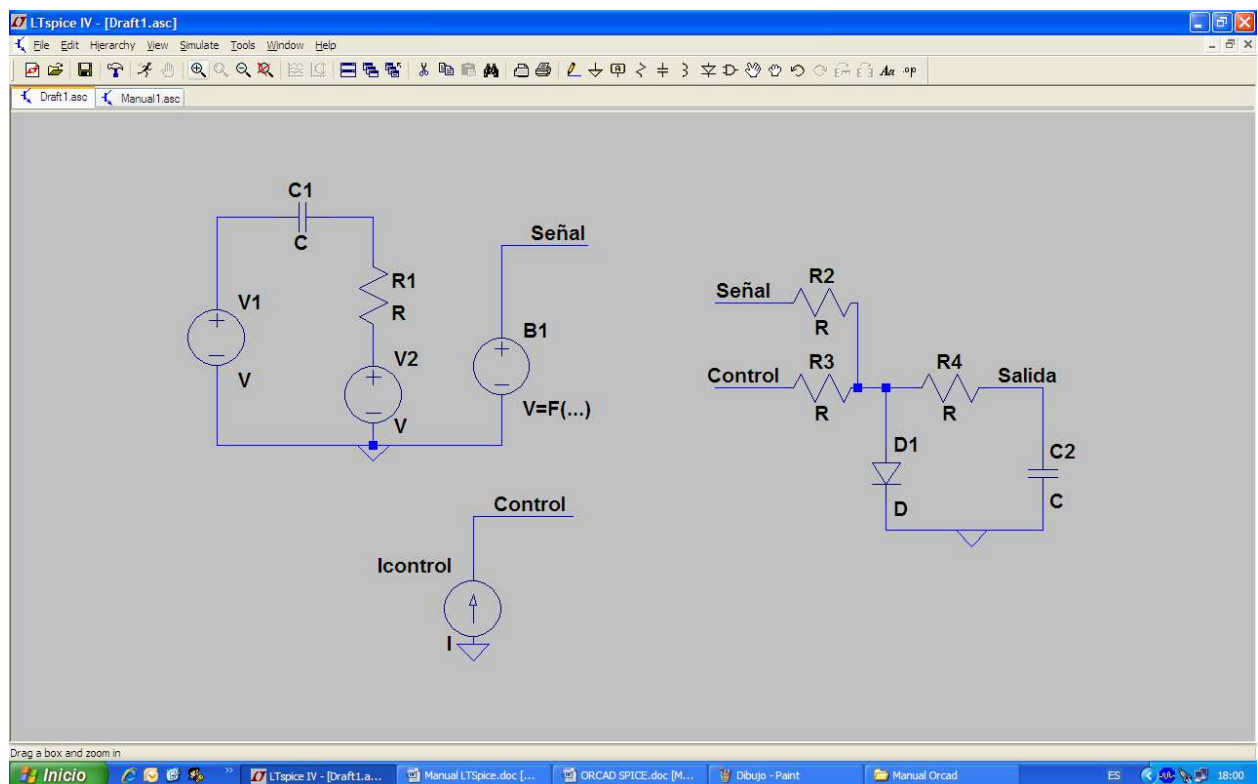


Cuando desde un mismo nodo de un circuito hay que realizar conexiones a varios puntos distintos, y para simplificar el cableado y ganar en claridad en el esquema, puede ser conveniente etiquetar los nodos.

Pulsando el botón “Label Net” () se abre una ventana donde podemos escribir el nombre que queramos para un nodo. Tras pulsar OK, podemos situar la misma etiqueta en los distintos puntos del circuito que deseemos. Todos los nodos etiquetados con el mismo nombre pasan a constituir un nodo único aunque no estén explícitamente cableados entre sí. Pulsando con el botón derecho dejamos de poner etiquetas.

Los distintos nodos de un circuito se numeran de forma automática y no fácilmente identificable (excepto el nodo de referencia que es el nodo 0). Para acceder más cómodamente a los resultados de las simulaciones es conveniente identificar los nodos de interés (por ejemplo el nodo de salida), y ello lo haremos también mediante el etiquetado de dichos nodos.

Los distintos elementos que usamos en nuestro circuito se van nombrando de forma automática conforme los vamos añadiendo a la hoja del esquema (R1,R2...V1,V2...etc). Puede ser conveniente renombrar algunos de estos elementos para tenerlos especialmente identificados. Picando con el botón derecho en la etiqueta del nombre se abre una ventana que permite escribir el nuevo nombre (en nuestro caso hemos cambiado el nombre a la fuente de corriente de I1 a Icontrol). No está permitido utilizar el mismo nombre para dos elementos distintos.



El último paso para completar el esquema eléctrico es asignar los valores de los componentes utilizados.

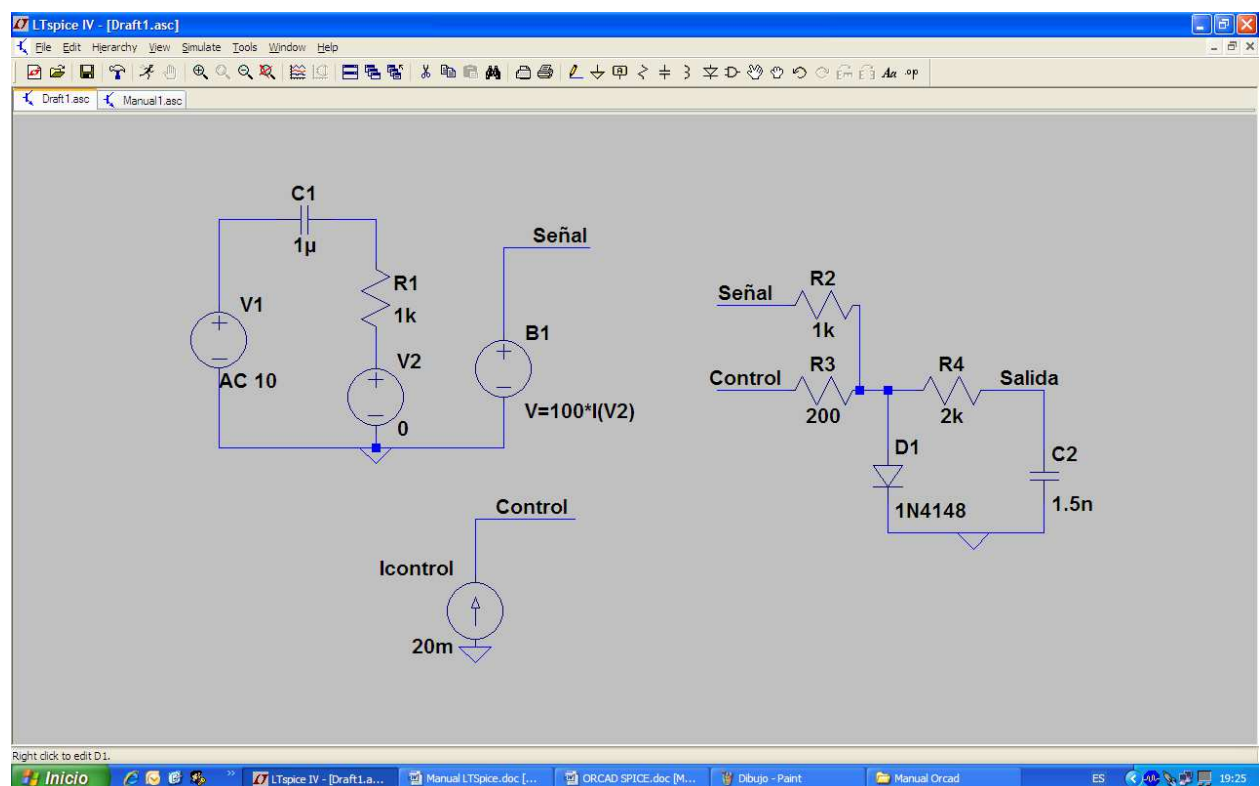
En el caso de resistencias, condensadores o inductancias, el cursor se convierte en una mano cuando lo pasamos sobre el símbolo del componente. Picando con el botón derecho se abre una ventana donde podemos rellenar el valor correspondiente.

En el caso de fuentes independientes de corriente o tensión, picando también con el botón derecho sobre el símbolo del componente se abre una ventana donde podemos rellenar el valor de la corriente o tensión continuas. Si queremos otro tipo de comportamiento picamos en “Advanced” y, en la nueva ventana que se abre rellenamos los valores correspondientes al tipo de comportamiento requerido. En nuestro caso, la fuente V1 es una fuente AC de 10V de amplitud.

Para fuentes de comportamiento arbitrario y, tras picar con el botón derecho sobre el símbolo del componente, rellenaremos, en la ventana que se abre, el campo “Value” con la función necesaria. En nuestro caso, como queremos que la fuente B1 proporcione una tensión igual a 100Ω por la corriente que atraviesa la fuente V2, rellenaremos ese campo con $V=100*I(V2)$

Para fuentes gobernadas por tensión (e y g) el campo “Value” lo rellenaríamos con el valor de la ganancia correspondiente.

En el caso de diodos y transistores, tras picar con el botón derecho sobre el símbolo del componente, pulsaremos en el botón “Pick New Diode” (o “Pick New Transistor”). Se abre otra ventana donde podemos elegir el modelo concreto del componente.



Simulación

Una vez completado el diseño del circuito podemos simular su comportamiento.

Spice permite realizar diferentes tipos de simulaciones. Los cuatro principales tipos que usaremos son:

- “DC Operating Point” o punto de polarización. Este tipo de análisis resuelve el circuito determinando las componentes continuas de corrientes y tensiones en todas las ramas y nodos del circuito.
- “DC Sweep” o barrido en continua. Se determinan los valores de corrientes y tensiones continuas del circuito en función de la variación de una de las fuentes continuas (de corriente o de tensión) que contenga dicho circuito.
- “AC Analysis” o barrido en frecuencia. Se determinan las amplitudes de las componentes alternas de corriente y tensión en función de la frecuencia. Par realizar este tipo de análisis el circuito debe contener, al menos, una fuente alterna (AC) de corriente o tensión, cuya frecuencia es susceptible de variación.
- “Transient” o análisis temporal. Se determinan los valores instantáneos de corrientes y tensiones en función del tiempo. Habitualmente se utiliza para determinar formas de onda de corrientes y tensiones del circuito en respuesta a una fuente variable incluida en el mismo. Aunque el tipo de fuente más habitual es la sinusoidal, se pueden definir distintas formas de onda.

Excepto el primer tipo de análisis, los otros tres nos pueden mostrar gráficamente las curvas de variación de alguna variable elegida en función de una corriente o tensión (DC), de la frecuencia (AC) o del tiempo (Time).


También, en estos tres tipos de análisis, es posible anidar la variación continua de la variable principal (tensión, corriente, frecuencia, tiempo) dentro de la variación discreta de algún otro parámetro (puede ser el valor de una resistencia, la capacidad de un condensador, una corriente, etc.). Esto es lo que se denomina análisis paramétrico, y nos proporciona un conjunto de curvas correspondientes, cada una de ellas, a uno de los valores discretos del parámetro.

Iremos viendo los distintos tipos de análisis sobre el mismo circuito de ejemplo.

Análisis del punto de polarización

Pulsando en la pestaña “Simulate” y a continuación en “Edit Simulation Command” se abre una ventana donde podemos elegir el tipo de simulación.

Pulsamos a su vez en la pestaña “DC op pnt” y salimos con OK. Se genera una etiqueta de texto con el comando de simulación elegido (en este caso “.op”) que podemos situar en alguna zona conveniente de la hoja del esquema (pulsando en el botón izquierdo del ratón)

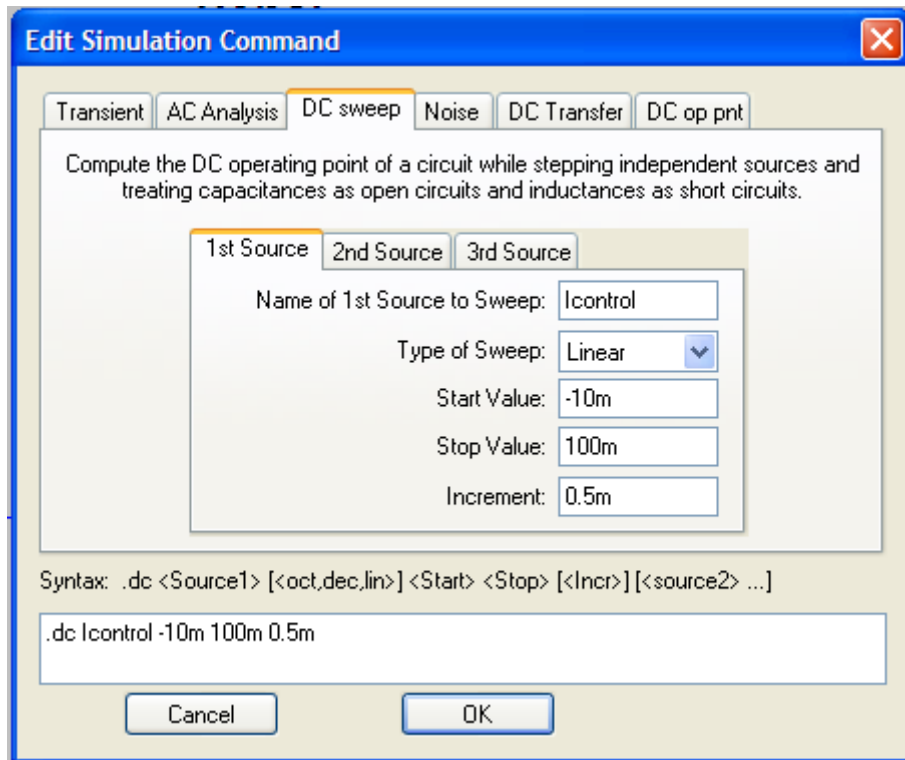
Pulsando en el botón “Run”() de la barra superior se ejecuta la simulación pedida, abriéndose una ventana que nos muestra una relación de las tensiones de todos los nodos del circuito y de las corrientes asociadas a todos los elementos. También podemos observar los resultados de esta simulación cerrando la ventana anterior y moviendo el cursor por el esquema: cada vez que pasamos por encima de un nodo, en la barra inferior se muestra el nombre del nodo y su tensión asociada; cada vez que pasamos por encima de un elemento se muestra la corriente que lo atraviesa y su potencia disipada (>0) o entregada (<0)

Barrido en continua

En este tipo de análisis el programa de simulación calcula las corrientes y tensiones continuas en las distintas ramas y nodos cuando una de las fuentes continuas del circuito (de tensión o de corriente) la hacemos variar entre unos ciertos límites.

En nuestro caso vamos a variar la corriente que suministra la fuente de control.

Como en el caso anterior pulsamos la pestaña “Simulate” en la parte superior, y a continuación “Edit Simulation Command”. En la ventana que se abre elegimos la pestaña “DC Sweep” y rellenamos los distintos campos como muestra la siguiente figura



La forma de barrido de la variable puede ser lineal o logarítmica. En este caso haremos una variación lineal entre -10mA y 100mA. El valor “Increment” es un dato importante a rellenar. Ninguna gráfica debería contener menos de 100 puntos para que la representación de la curva refleje el comportamiento real. Un número de puntos demasiado pequeño haría que la representación esté formada por una sucesión de tramos rectilíneos. Elegimos un valor del incremento que nos permita tener un número adecuado de puntos.

Tras pulsar “OK” se genera una etiqueta de texto con el comando de simulación que acabamos de editar (“.dc Icontrol -10m 100m 0.5m”). Lo situamos en una zona conveniente del esquema y automáticamente el anterior comando de simulación se inactiva (pasa de “.op” a “;op”)

Tras pulsar “Run” se ejecuta la simulación y aparece la ventana de visualización de resultados donde, en el eje horizontal, aparece la variable que hemos definido en el barrido con sus límites correspondientes. No se muestra ninguna gráfica hasta que especifiquemos que variable queremos representar frente a la corriente de control.

Hay dos formas de especificar la variable que queremos representar.

La primera de ellas es la más simple y permite visualizar la variación de todas las tensiones y corrientes del circuito. Para ello, y estando activa la ventana del esquema, movemos el cursor por encima del

circuito; cada vez que pasamos por encima de un nodo (o un elemento) el cursor se convierte en una punta de prueba de medida de tensión (o en un medidor de corriente).

Pulsando con el botón izquierdo aparece automáticamente la gráfica correspondiente a esa tensión o corriente. Una nueva pulsación en otro nodo añade la gráfica correspondiente. Con dos pulsaciones seguidas en el mismo nodo o elemento se eliminan las gráficas anteriores y deja únicamente la última gráfica seleccionada.

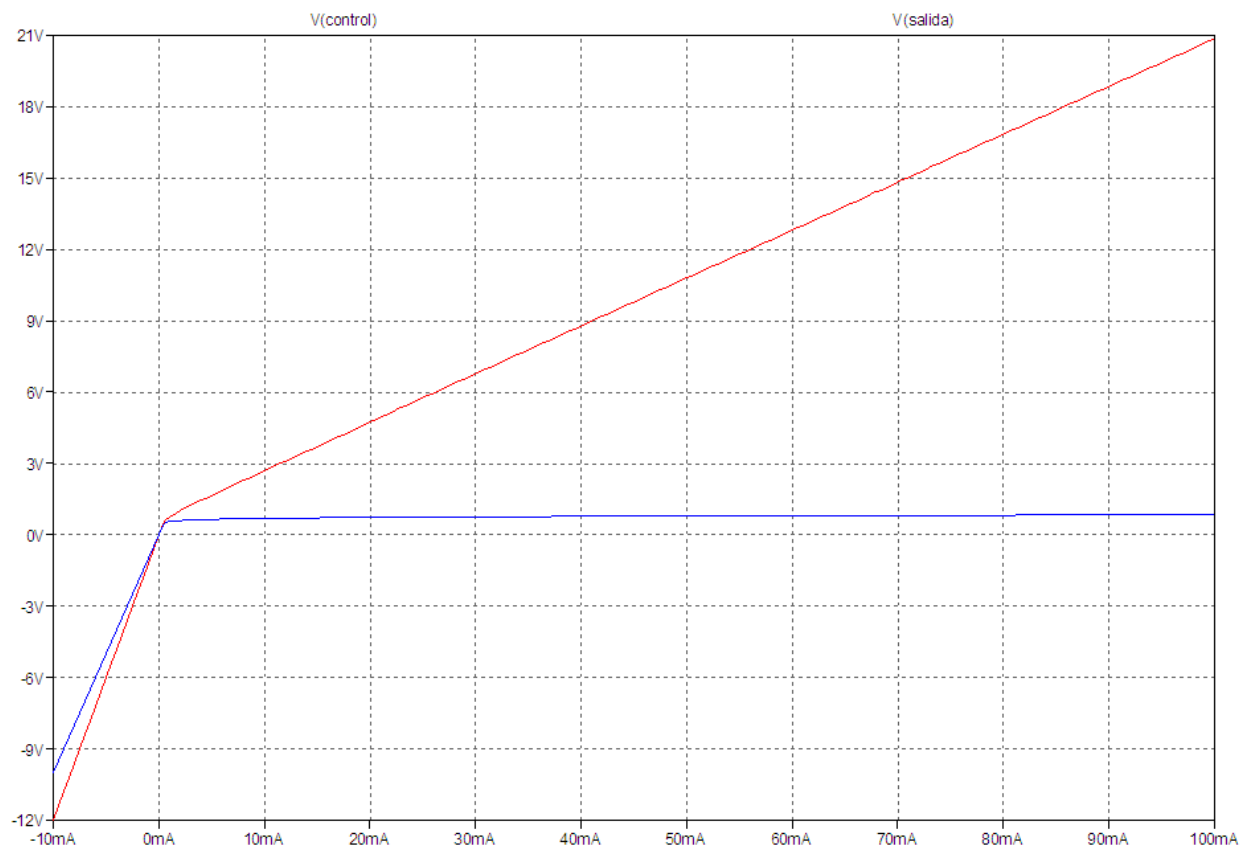
Si pulsamos en un nodo y arrastramos hasta otro nodo se representa la diferencia de potencial del primer nodo respecto al segundo.

La segunda forma de representar resultados es, estando activa la ventana de representación, pulsar en la pestaña “Plot Settings” y a continuación “Add Trace”. En la ventana que se abre aparece un listado con todas las variables eléctricas del circuito. Se aprecia la importancia de haber nombrado ciertos nodos o ciertos elementos para identificar con facilidad las variables asociadas.

Marcando una u otra variable, estas se añaden a la línea inferior de la ventana (“Expressions to add”).

En esta línea podemos escribir, no sólo variables, sino también expresiones matemáticas que las involucren.

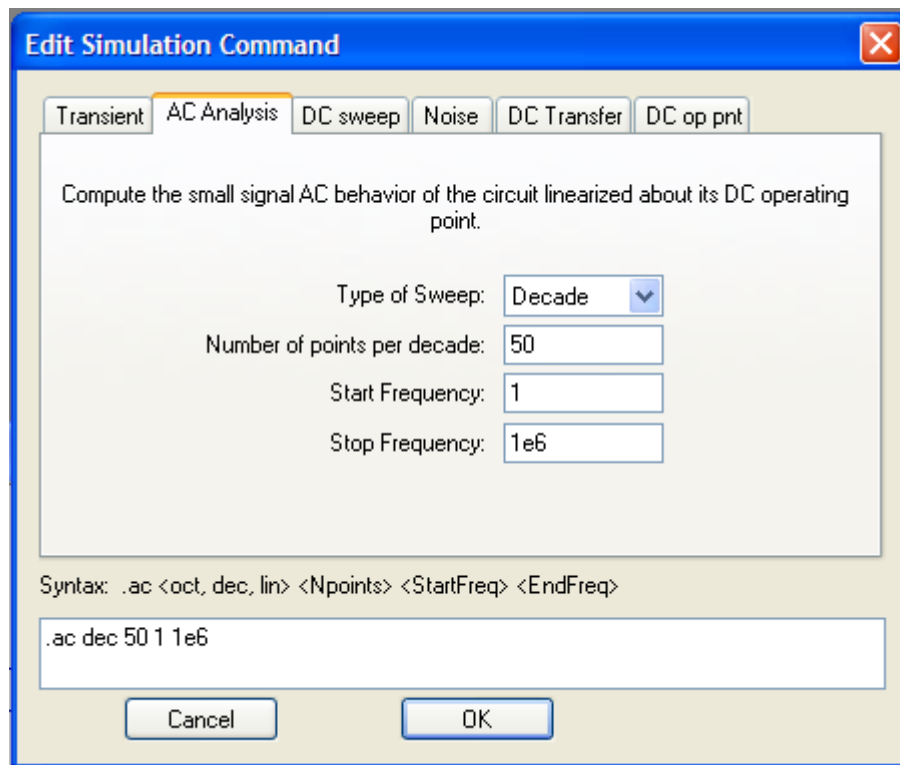
Si marcamos las dos variables $V(\text{control})$ y $V(\text{salida})$ y aceptamos con OK se representan las curvas que muestra la siguiente figura



Barrido en frecuencia

También como en los casos anteriores pulsamos la pestaña “Simulate”, y a continuación “Edit Simulation Command”. En la ventana que se abre elegimos la pestaña “AC Analysis” y rellenamos los campos como muestra la siguiente figura para obtener un análisis de comportamiento para frecuencias comprendidas entre 1Hz y 1MHz

Habitualmente el análisis en frecuencia se extiende a varios órdenes de magnitud, por lo que se suele escoger una variación de tipo logarítmico (en nuestro caso con variación por décadas), a fin de poder apreciar el comportamiento del circuito en cualquier rango de frecuencias.



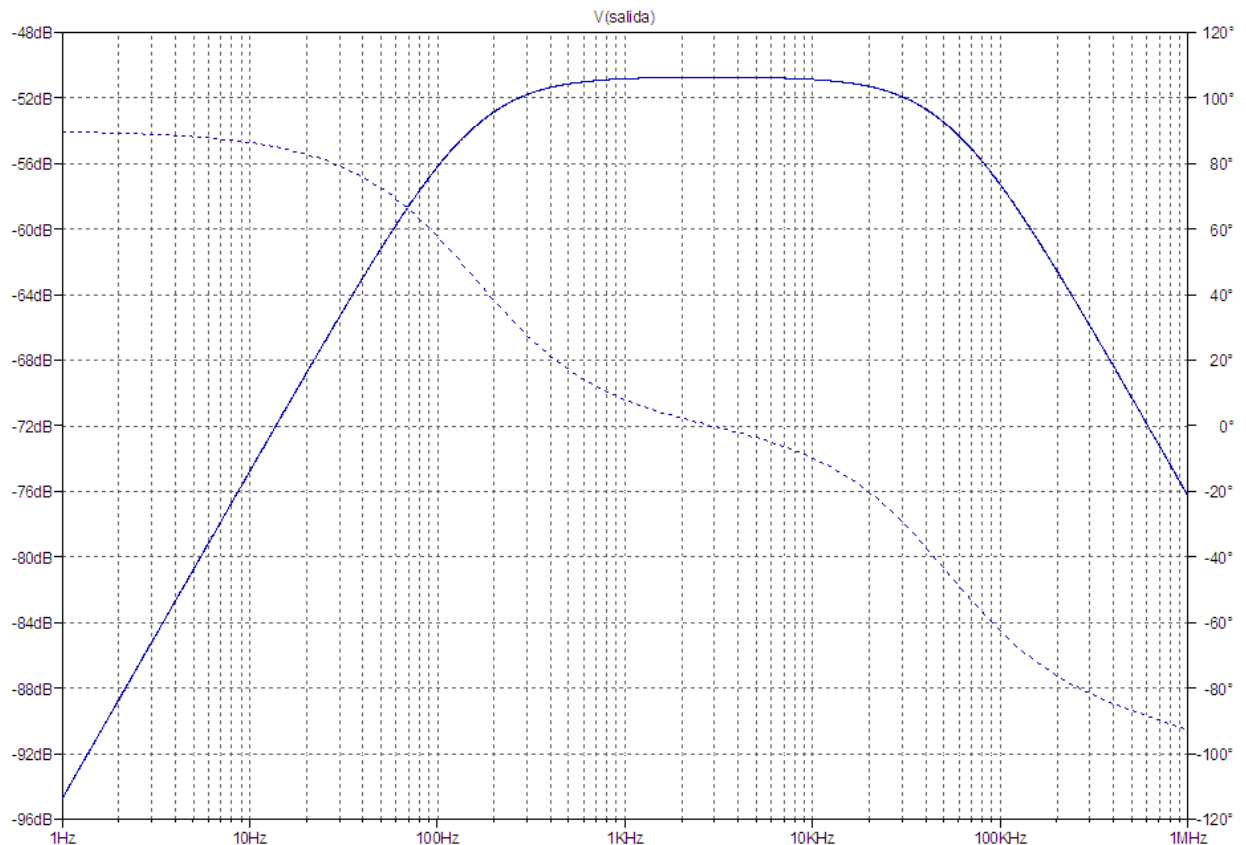
Tras pulsar “OK” se genera una etiqueta de texto con el comando de simulación que acabamos de editar (“.ac dec 50 1 1e6”). Lo situamos en una zona conveniente del esquema lo que automáticamente inactiva los anteriores comandos.

Tras pulsar “Run” para ejecutar esta última simulación y abrirse la ventana de visualización de resultados, podemos elegir la variable a representar sin más que desplazar el cursor por el esquema y pinchar sobre el nodo o elemento cuya tensión o corriente queremos obtener.

Diagramas de Bode

Para los análisis de comportamiento frente a la frecuencia, la forma más habitual de visualizar los resultados es mediante los diagramas de Bode (magnitud en dB como $20 \log |V|$ o $20 \log |I|$, según corresponda a una magnitud de tensión o de corriente) y fase de la variable elegida), y es la forma en que, por defecto, nos mostrará spice los resultados para este tipo de simulación.

Si pinchamos con la punta de prueba en el nodo de salida, en la ventana gráfica aparecen las dos curvas que muestra la siguiente figura: la magnitud de la tensión de salida, en trazo continuo, y referida al eje vertical de la izquierda, y la fase, en trazo discontinuo, medida en grados con respecto al eje vertical de la derecha.

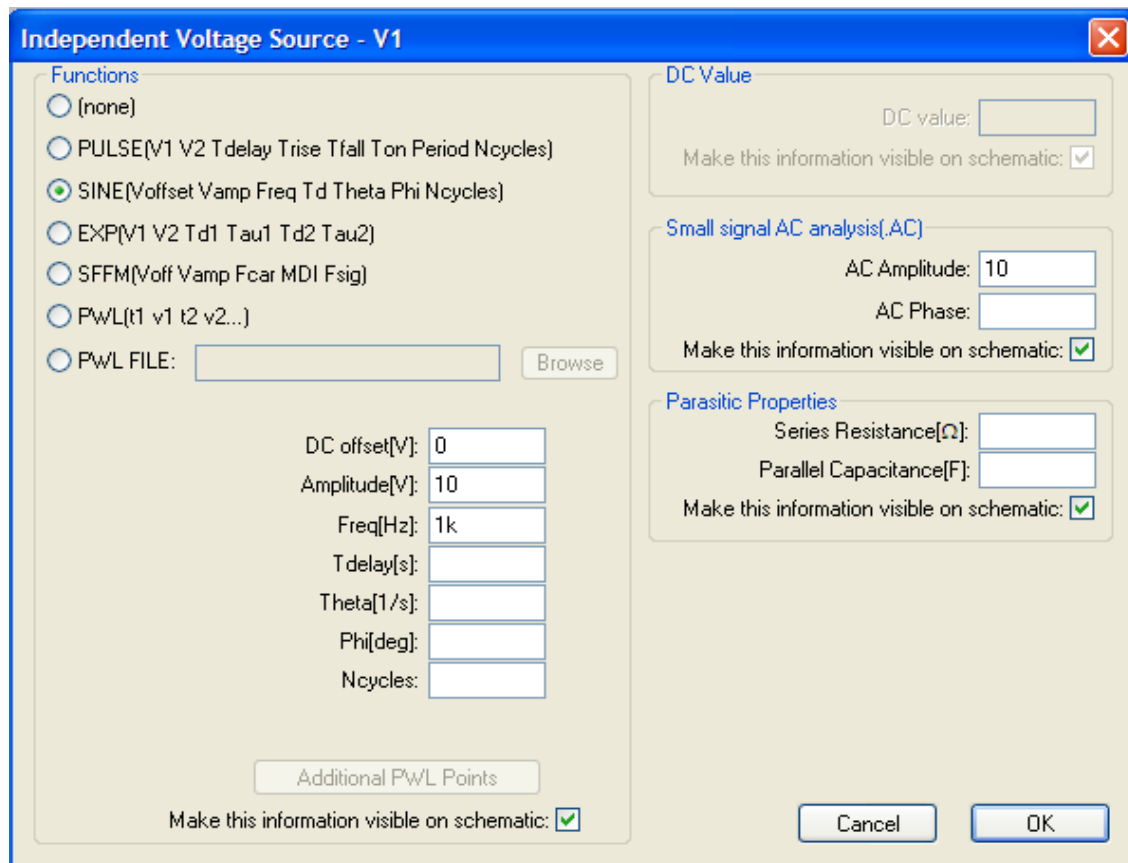


Análisis temporal-Formas de onda

En este tipo de análisis se determina el comportamiento temporal de las distintas tensiones y corrientes en respuesta a las variaciones impuestas por, al menos, una de las fuentes del circuito. Esta fuente puede tener un comportamiento sinusoidal, de pulsos, exponencial, etc.

Por ello vamos a cambiar el comportamiento de la fuente V1 de AC a sinusoidal con frecuencia fija. Cerramos la ventana de visualización de resultados para quedarnos sólo con la hoja del esquema. Marcando con el botón derecho sobre el símbolo de V1 se abre la ventana donde podemos definir su comportamiento. Marcamos comportamiento sinusoidal y rellenamos los campos como aparecen en la siguiente figura: componente continua cero, amplitud alterna 10V y frecuencia 1kHz.

El campo “AC Amplitude” que anteriormente figuraba con 10V es opcional eliminarlo o no; en cualquier caso no se tiene en cuenta para el análisis temporal. Puede ser útil dejarlo para no tener que volver a modificar las propiedades de la fuente si queremos volver a ejecutar un análisis en frecuencia.



Independent Voltage Source - V1

Functions

- ☐ (none)
- ☐ PULSE(V1 V2 Tdelay Trise Tfall Ton Period Ncycles)
- ☒ SINE(Voffset Vamp Freq Td Theta Phi Ncycles)
- ☐ EXP(V1 V2 Td1 Tau1 Td2 Tau2)
- ☐ SFFM(Voff Vamp Fcar MDI Fsig)
- ☐ PwL(t1 v1 t2 v2...)
- ☐ PwL FILE:

DC offset[V]:
 Amplitude[V]:
 Freq[Hz]:
 Tdelay[s]:
 Theta[1/s]:
 Phi[deg]:
 Ncycles:

Make this information visible on schematic: ☒

DC Value

DC value:

Make this information visible on schematic: ☒

Small signal AC analysis[AC]

AC Amplitude:
 AC Phase:

Make this information visible on schematic: ☒

Parasitic Properties

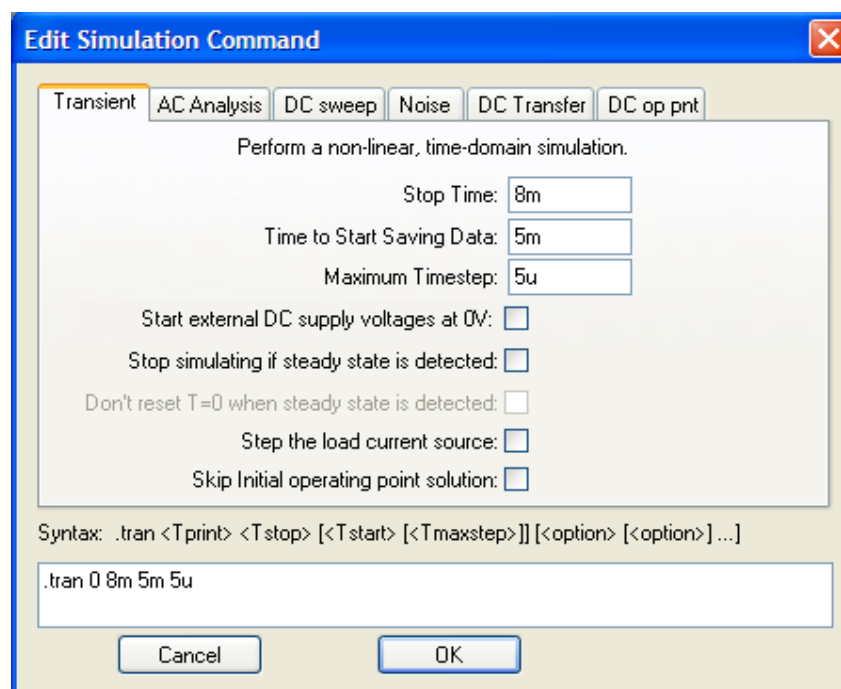
Series Resistance[Ω]:
 Parallel Capacitance[F]:

Make this information visible on schematic: ☒

Tras aceptar con “OK” definimos un nuevo comando de simulación pulsando, como en ocasiones anteriores, en “Simulate”, “Edit Simulation Command” y eligiendo en esta ocasión la pestaña “Transient”

Vamos a visualizar el comportamiento de las señales para el intervalo de tiempo comprendido entre 5 y 8ms. Habiendo elegido 1kHz para la frecuencia de nuestra fuente sinusoidal, ello nos permite observar tres periodos de la señal, eliminando el comportamiento transitorio de los primeros periodos asociado a la puesta en marcha. El tamaño del incremento de tiempo de 5μs nos permitirá tener 600 puntos en la representación gráfica.

Rellenamos por tanto los campos del comando de simulación temporal como muestra la figura siguiente



Edit Simulation Command

Transient | AC Analysis | DC sweep | Noise | DC Transfer | DC op pnt

Perform a non-linear, time-domain simulation.

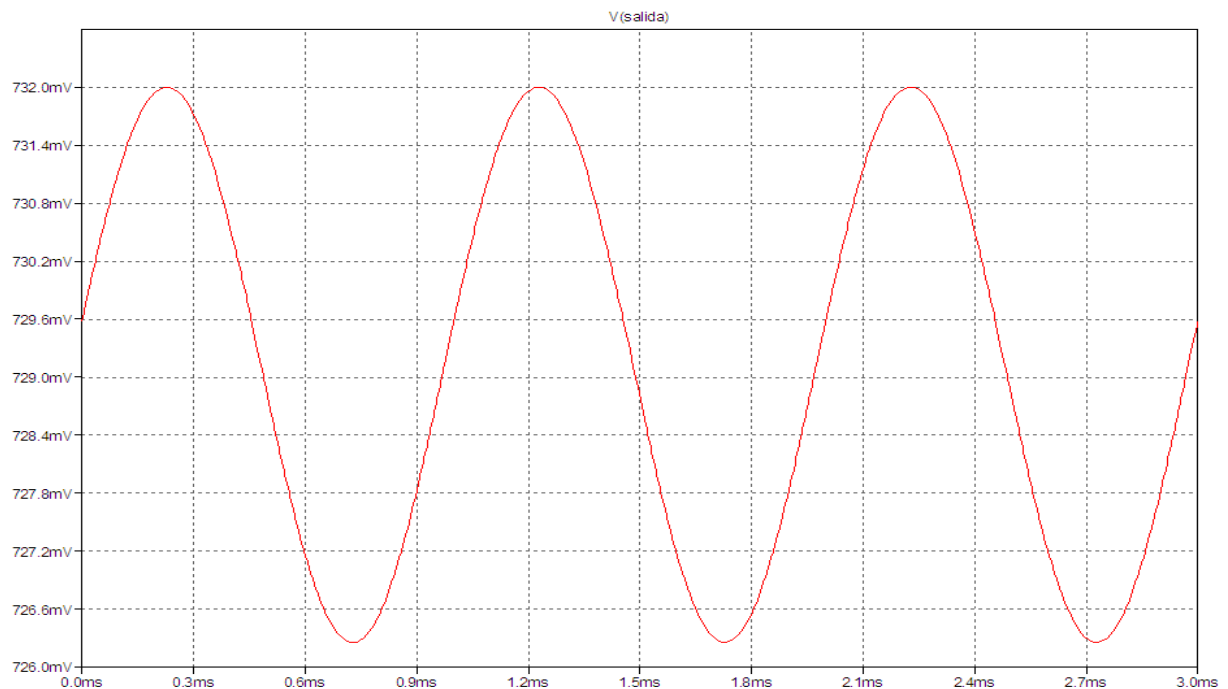
Stop Time:
 Time to Start Saving Data:
 Maximum Timestep:

Start external DC supply voltages at 0V: ☐
 Stop simulating if steady state is detected: ☐
 Don't reset T=0 when steady state is detected: ☐
 Step the load current source: ☐
 Skip Initial operating point solution: ☐

Syntax: .tran <Tprint> <Tstop> [<Tstart> [<Tmaxstep>]] [<option> [<option>] ...]

Tras aceptar con “OK” en la ventana anterior, situamos la etiqueta del comando (.tran 0 8m 5m 5u) en la hoja del esquema y ejecutamos la simulación con “Run”

Si ahora pulsamos con la punta de prueba en el nodo de salida podremos observar la forma de onda de tensión que muestra la gráfica.



Como se observa el instante $t=0$ en la gráfica corresponde al tiempo 5ms que definimos como instante inicial para la toma de datos.

Análisis Paramétrico

Este tipo de simulación está basada en alguna de las tres anteriores. El comportamiento completo del circuito frente a la variación de una variable principal (tiempo, frecuencia, etc.) se recalcula para cada uno de los valores que le hagamos tomar a otra variable que actúa como parámetro.


En nuestro caso utilizaremos como barrido primario la variación de frecuencia.

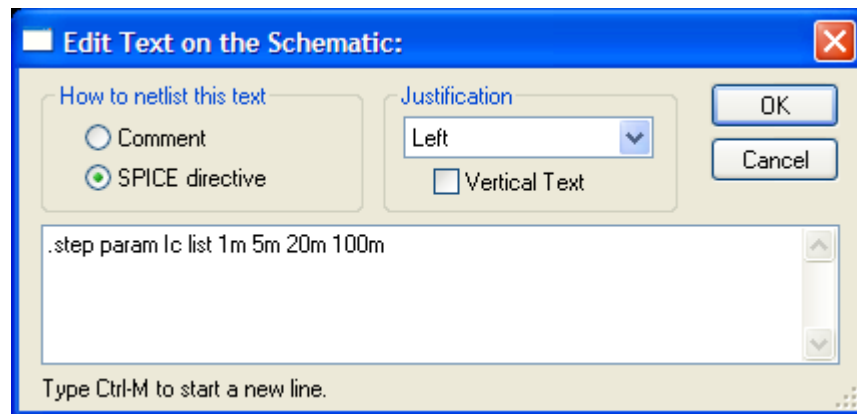
El parámetro puede ser la tensión o corriente de una fuente independiente, el valor de una resistencia o condensador, la ganancia de una fuente gobernada, etc. Veremos un par de ejemplos donde variaremos de forma paramétrica la corriente de la fuente de control, y la ganancia de la fuente gobernada.

Como punto previo, y puesto que para hacer barridos en frecuencia necesitamos de una fuente AC, volvemos a rellenar el campo “AC Amplitude” de la fuente V1 con 10V en caso de que lo hubiésemos eliminado anteriormente (no es necesario eliminar el comportamiento sinusoidal)

Veremos en primer lugar el comportamiento de la amplitud de salida frente a la frecuencia para distintos valores de la corriente de control (1mA, 5mA, 20mA y 100mA)

Por una parte, el valor de la corriente de dicha fuente, que estaba establecido en 20mA, lo cambiamos por un nombre de variable apropiado encerrado entre llaves {} (por ejemplo {Ic}).

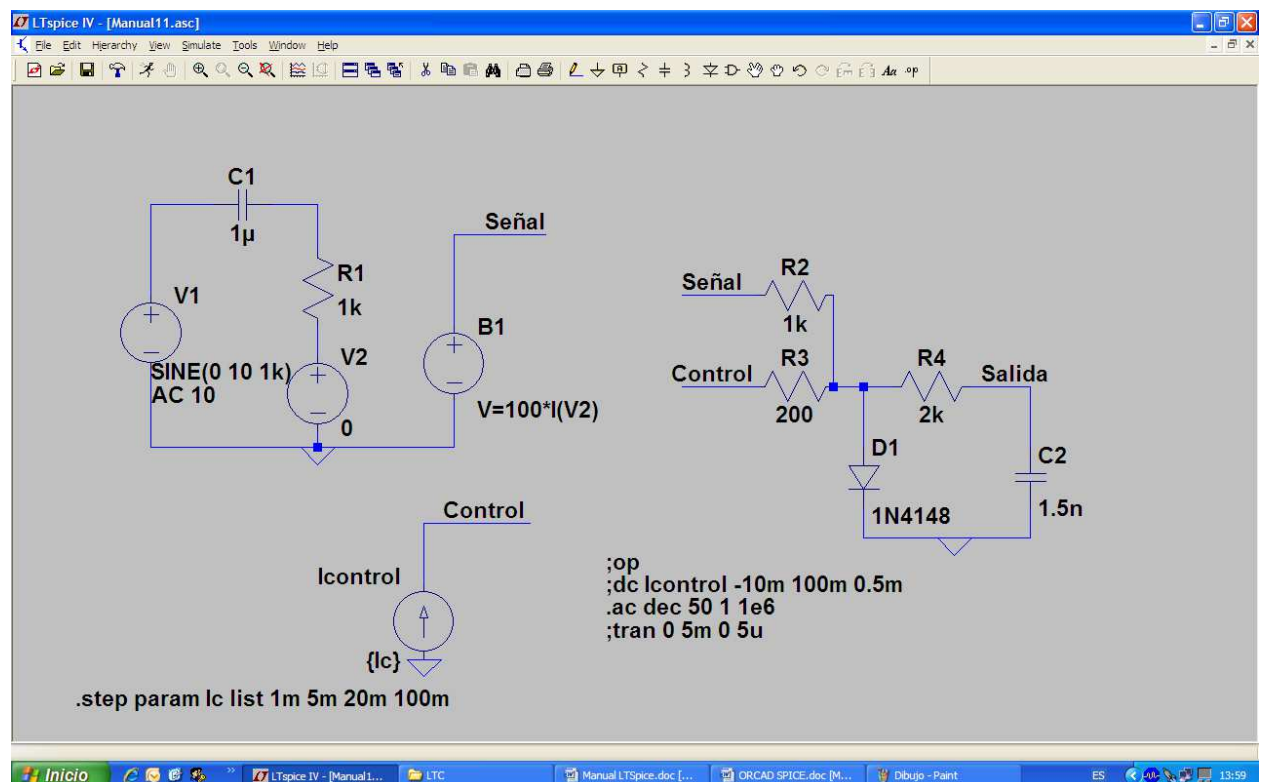
Y a continuación, para describir la forma de variación de esa variable, pulsamos en el botón “Spice Directive” () de la barra superior y escribimos, en la ventana que se abre, el siguiente comando: “.step param Ic list 1m 5m 20m 100m”



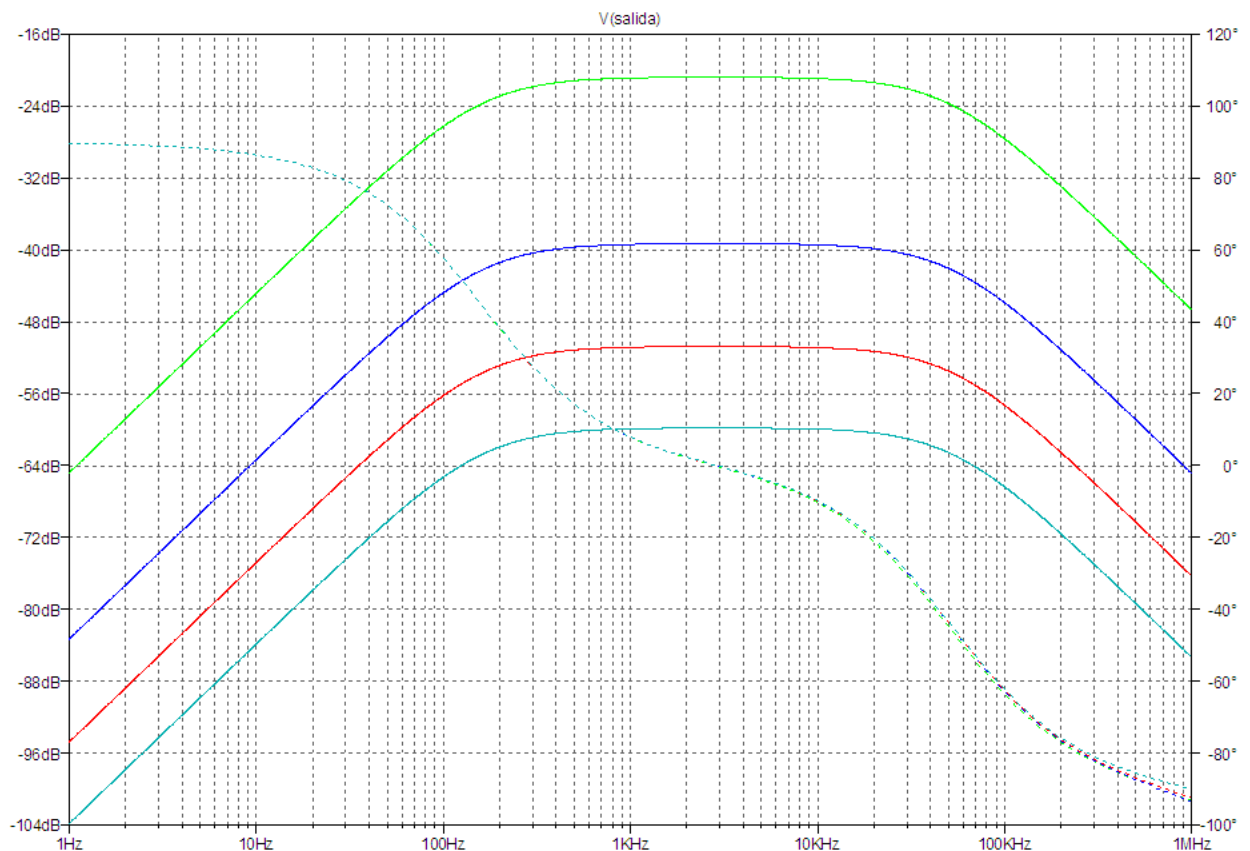
Tras aceptar con “OK” situamos la etiqueta que se genera con el comando anterior en una zona adecuada de la hoja del esquema.

Pulsamos de nuevo en “Simulate” y “Edit Simulation Command”, saliendo de esa ventana desde la pestaña “AC Analysis” (debe estar rellena con los datos anteriores) para dejarla activada.

La siguiente figura muestra el aspecto de la hoja del esquema tras los cambios anteriores



Si ejecutamos ahora la simulación y ponemos la punta de prueba en el nodo de salida obtenemos las curvas que se muestran en la siguiente figura



(En la sección cursores, al final del manual, veremos cómo identificar las diferentes curvas)

Sintaxis del comando .step

Además del nombre de la variable, hay que especificar su forma de variación, que puede ser lineal, logarítmica (bien por décadas o por octavas) o mediante una lista de valores, y el rango de valores que se barren. Las siguientes líneas muestran ejemplos de distintos casos:

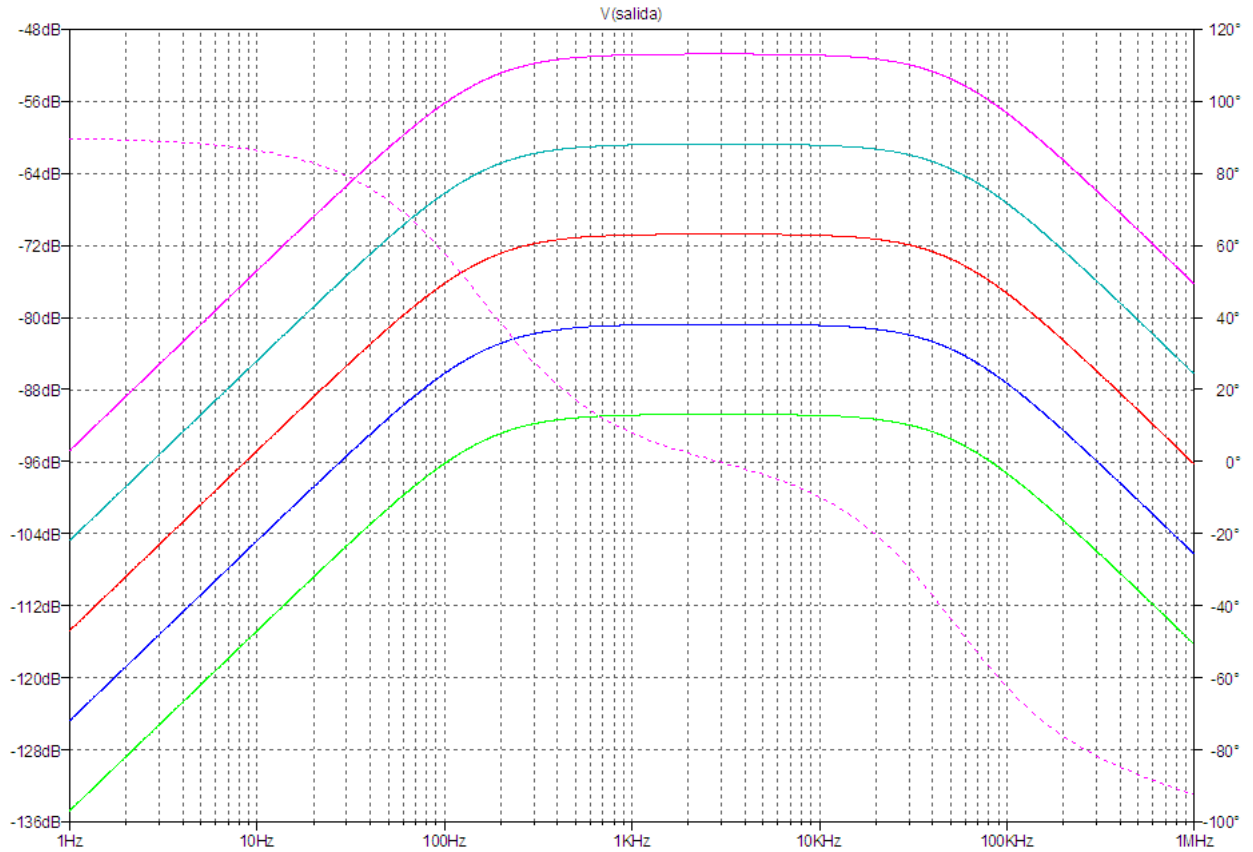
- .step param Rc 1k 2k 200 Variación lineal de Rc entre 1k y 2k con incrementos de 200
- .step dec param Rc 100 100k 20 Variación logarítmica entre 100 y 100k con 20 puntos por década
- .step oct param Rc 100 2k 10 Variación logarítmica entre 100 y 2k con 10 puntos por octava
- .step param Rc list 200 500 1k Variación de Rc con los tres valores especificados.

Y por último veremos un ejemplo de análisis paramétrico, en el que la variación discreta está asociada a la ganancia de la fuente gobernada.

En primer lugar deshabilitamos la variación paramétrica anterior, restableciendo el valor de la corriente de control a 20mA y eliminando el comando step (si no queremos eliminarlo, para un uso futuro, podemos deshabilitarlo precediéndolo de “;”)

Y a continuación establecemos la nueva variación paramétrica: el valor de la tensión de la fuente B1 lo sustituimos por “V={Ganancia}*I(V2)”, y editamos un nuevo comando step de la forma “.step dec param Ganancia 1 100 2” para variarlo logarítmicamente entre 1 y 100 con dos puntos por década.

Si ahora ejecutamos la simulación y pinchamos con la punta de prueba en el nodo de salida obtenemos las curvas que muestra la siguiente figura



Podríamos no haber deshabilitado la variación paramétrica de I_c . En ese caso habríamos obtenido 20 curvas correspondientes a las distintas combinaciones de valores de I_c y Ganancia. Es posible anidar la variación de hasta 3 parámetros.

Para barridos en continua es posible anidar la variación paramétrica de hasta 3 fuentes directamente desde la pestaña "DC Sweep" ("Simulate", "Edit Simulation Command", "DC Sweep", 2ª y 3ª fuentes)

Notas adicionales sobre representación y análisis de resultados

Uso de los cursores

Existen dos cursores que podemos asociar a las curvas representadas para medir con precisión las coordenadas de sus puntos.

Para asociar un cursor a una curva picamos con el botón izquierdo del ratón sobre la etiqueta de esa curva. Para asociar los dos cursores picamos con el botón derecho en la etiqueta y, en la ventana que se abre, elegimos 1º y 2º en el desplegable correspondiente.

Para asociar cada uno de los cursores a una curva diferente picamos con el botón derecho en las respectivas etiquetas y le asociamos uno a cada una con el mismo desplegable anterior.

Los cursores los podemos desplazar a lo largo de las curvas bien arrastrándolos con el ratón, o bien mediante las flechas derecha-izquierda del teclado. En este caso el cursor que se desplaza es el último marcado con el ratón.

Siempre que haya cursores activados aparece una ventana con la información numérica de las posiciones de los cursores; también se muestran las diferencias, en vertical y en horizontal, de las posiciones de ambos cursores.

Cuando tenemos distintas curvas paramétricas representadas podemos cambiar la asociación del cursor de una a otra mediante las flecha arriba-abajo del teclado. Para obtener información sobre el valor del parámetro en una curva determinada llevamos el ratón a la posición del cursor (se convierte en un número, 1 o 2, el número del cursor) y picamos con el botón derecho, abriéndose una ventana que nos indica el valor del parámetro.

Añadir un nuevo eje Y

Por defecto, las distintas curvas que tengamos en una misma representación están referidas a un único eje Y cuya escala se genera de forma automática.

Si los rangos de valores representados para dos curvas son muy diferentes entre sí (por ejemplo una toma valores en el rango de voltios y otra en el de miliamperios), una de ellas se representará prácticamente como una línea horizontal y no será posible apreciar sus detalles.

Para evitar este inconveniente podemos, o bien representar una de las curvas multiplicada por un cierto factor constante adecuado (estando activa la ventana de representación, mediante “Plot Settings”, “Add Trace” y escribiendo la expresión de la curva a representar), o bien creando un nuevo marco de representación, con su propia escala (mediante “Plot Settings”, “Add Plot Pane”); podemos cambiar una curva desde un marco hacia otro simplemente picando y arrastrando su etiqueta.

Cambio del eje X

Por defecto en el eje X se representa la variable que hemos definido en el barrido del perfil de simulación. Aunque esto es habitualmente lo más conveniente, hay situaciones en que interesa cambiar esa variable.

Para ello, moviendo el cursor por debajo del eje horizontal, aquel se convierte en una regla. Si entonces pinchamos con el botón izquierdo, se abre una ventana donde podemos cambiar la magnitud que se representa, así como establecer manualmente el rango de valores o elegir entre escala lineal o logarítmica. Para el eje vertical también podemos, de forma similar, cambiar el rango de valores representados.

Prefijos y unidades

Las unidades en las que se especifican (y el programa nos muestra) las distintas variables de un circuito son: voltios, amperios, vatios, ohmios, faradios, henrios, segundos, hercios y grados. El especificar las unidades es opcional.

La forma de especificar los valores puede ser: en notación decimal (p. ej. 0.056), en notación exponencial (5.6e-2) o utilizando los siguientes prefijos

F	E-15	femto
P	E-12	pico
N	E-9	nano
U	E-6	micro
M	E-3	mili
K	E+3	kilo
MEG	E+6	mega
G	E+9	giga
T	E+12	tera

No se distinguen mayúsculas de minúsculas y el prefijo no puede ir separado del valor por ningún espacio (56m es correcto, 56 m no)

Simulación Activa

Los distintos perfiles de simulación que hemos ido definiendo se deshabilitan automáticamente al crear uno nuevo (quedan precedidos por “;”). Para volver a habilitar un perfil anterior no hay más que entrar en “Simulation”, “Edit Simulation Command”, y salir con “OK” habiendo elegido la pestaña del tipo de simulación deseado.