

## Tema III: Régimen transitorio

### 1 Consideraciones generales

Este tema está dedicado a la consideración del régimen transitorio que se produce en un circuito cuando la excitación a la que está sometido (excitación inicial) es sustituida bruscamente (en un tiempo nulo, instantáneamente) por una excitación diferente (excitación final). Una y otra excitación pueden ser de naturalezas muy diversas (continuas, sinusoidales, en dientes de sierra, etcétera), pero limitaremos el estudio a las situaciones en que ambas son continuas. En ese caso las excitaciones están representadas por fuentes DC independientes. Tanto una como otra pueden ser nulas, con lo que, dependiendo de cuál de ellas lo sea, se tendrá una aplicación brusca de la excitación (la inicial es nula) o una supresión brusca de ésta (la final es nula).

El paso de la excitación inicial a la final se simboliza mediante la actuación de un interruptor ideal (es un cortocircuito cuando está cerrado, y un circuito abierto cuando está abierto). El cierre del interruptor permite la conexión de una excitación al circuito y su apertura elimina dicha conexión. En una situación dada pueden actuar varios interruptores.

La actuación de varios interruptores puede ser simultánea (todos ellos cambian de estado -de cerrado a abierto o viceversa- en el mismo instante de tiempo) o bien tener lugar secuencialmente. En este texto restringiremos el estudio a la situación en la que el cambio es simultáneo; en esas condiciones supondremos arbitrariamente que dicho cambio tiene lugar en el instante  $t=0$  s. Con este planteamiento, diremos que la excitación inicial es la que está aplicada entre  $t=-\infty$  y  $t=0$  s, mientras que la final es la que hay que considerar entre  $t=0$  y  $t=\infty$  s.

PSpice dispone, en su librería de elementos, de uno que simboliza el comportamiento de un interruptor. Se trata de un interruptor real, en el que el cambio no se produce instantáneamente, sino en un intervalo temporal de cierta duración. Además, tal interruptor tiene pérdidas (representadas por un cierto valor de la resistencia asociada al mismo). Sin embargo, en este texto consideraremos únicamente situaciones en las que actúan interruptores ideales. Ello, como veremos más adelante, exige resolver un problema de régimen transitorio utilizando dos pasos como mínimo.

El régimen transitorio es la respuesta del circuito al cambio en las condiciones de la excitación, o, en otras palabras, al paso de la excitación inicial a la final. Durante el régimen transitorio, y pese a que la excitación (final) es continua, las corrientes y tensiones en los distintos elementos no permanecen constantes, sino que varían con el paso del tiempo. Es decir, el circuito evoluciona en tres etapas: comportamiento continuo mientras está aplicada la excitación inicial, comportamiento variable como consecuencia del cambio en la posición del interruptor (o de los interruptores) y de nuevo comportamiento continuo, esta vez ajustado a las condiciones de la excitación final. Ello es debido a que el régimen transitorio tiene una duración finita, lo cual significa que se extingue una vez transcurrido cierto tiempo.

La aparición del régimen transitorio se debe a la presencia de inductancias y capacidades en el circuito (en un circuito cuyos elementos pasivos son únicamente resistencias no hay régimen transitorio; su comportamiento se adapta instantáneamente al cambio de excitación). En las primeras la corriente no puede variar instantáneamente; en las segundas, esta restricción

afecta a la tensión. Esta circunstancia define el objeto concreto del interés de este tema, que puede desdoblarse en todos o algunos de los siguientes puntos:

- Determinación de corrientes y tensiones en el circuito (régimen DC inicial) mientras está aplicada la excitación inicial. En todo el intervalo de tiempo en el que ésta está presente las inductancias se comportan como cortocircuitos y las capacidades, como circuitos abiertos.
- Determinación de corrientes y tensiones en el circuito (régimen DC final) mientras está aplicada la excitación final. Salvo en el intervalo en el que está presente el régimen transitorio, es aplicable lo que se ha mencionado en el punto anterior.
- Determinación de corrientes y tensiones en el circuito durante el régimen transitorio. Mientras este régimen está presente, las corrientes y las tensiones en las inductancias y las capacidades pueden tomar cualesquiera valores, que, en principio, varían de un instante a otro. Aparte de representar estas variaciones mediante expresiones temporales (véase la TCC al respecto), también puede hacerse de forma gráfica mediante curvas.

El tercer punto es el más interesante (en lo relativo al régimen transitorio) para ser tratado con PSpice, ya que el programa, tras analizar el circuito, presenta tales curvas con ayuda del módulo *Probe*. Ahora bien, para utilizar correctamente este módulo es necesario realizar previamente el primero de los pasos que se acaban de citar, ya que de él se obtienen los valores (valores iniciales) de las tensiones en las capacidades y las corrientes en las inductancias que hay al principio del régimen transitorio. Recuérdese que estas magnitudes no pueden cambiar instantáneamente; de ahí que inductancias y capacidades inicien el régimen transitorio con los valores de corrientes y tensiones, respectivamente, que tienen al final del régimen DC inicial.

En este tema dedicamos una sección específica a los dos aspectos relevantes que acabamos de mencionar: determinación y utilización de valores iniciales y uso del módulo *Probe* para representar curvas características del comportamiento del circuito durante el régimen transitorio.

## 2 Determinación y utilización de valores iniciales

Para ilustrar la realización de esta tarea puede considerarse, a modo de ejemplo, la situación representada en la figura III.1.

Como puede verse en ella, se dispone de un circuito que en  $t=0$  s es sometido a un cambio brusco en las condiciones de la excitación. Para  $t<0$  s la capacidad estaba sometida a la excitación  $V_G$ . En  $t=0$  s pasa a estarlo a la excitación  $V_S^1$ . Para  $t<0$  s el circuito (la parte relevante del mismo) se encontraba en régimen DC y tenía la configuración indicada en la parte izquierda de la segunda línea de la figura III.1. En principio, podríamos analizar este circuito utilizando los procedimientos mencionados en el tema anterior. Ello significaría que hay que suprimir la capacidad, pero, al hacerlo, quedarían sus conexiones al aire, lo cual no puede ser tratado por PSpice. En consecuencia, analizamos manualmente esa situación llegando a la conclusión de

---

<sup>1</sup> Cuando hablamos de que el circuito experimenta un cambio en las condiciones de la excitación estamos refiriéndonos implícitamente al cambio que sufren las capacidades y las inductancias, que son los elementos responsables de la aparición del régimen transitorio.

que la tensión en la capacidad vale 2 V para cualquier instante ( $t=0$  s incluido) comprendido en el intervalo en el que está aplicada la excitación inicial.

### Preparación para el estudio del régimen transitorio en un circuito

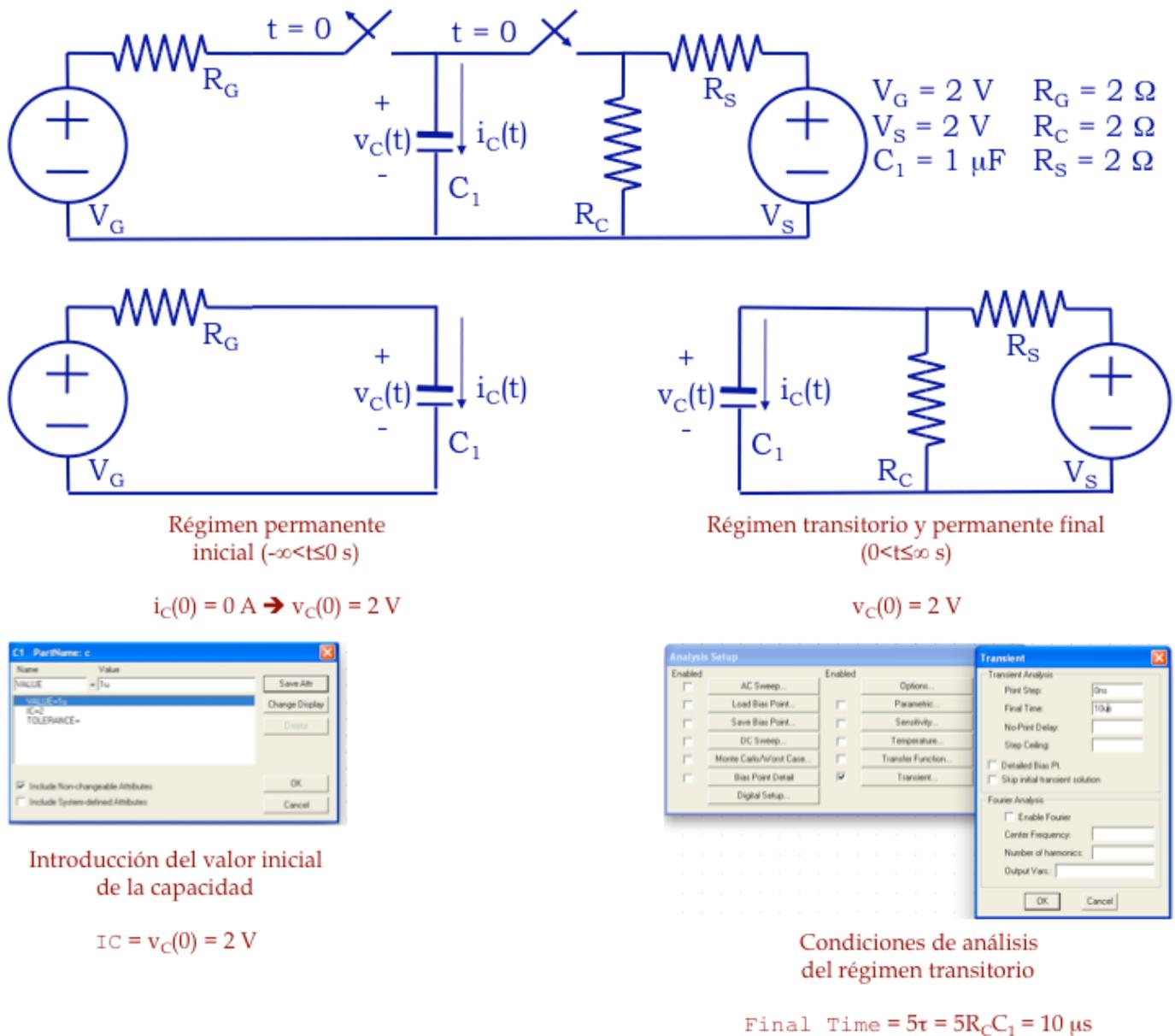


Figura III.1. Procedimiento para analizar con PSpice un circuito que experimenta un régimen transitorio.

Ahora la cuestión es analizar el circuito en las condiciones correspondientes a la excitación final. El circuito en esa situación tiene la configuración mostrada en la parte derecha de la segunda línea de la figura III.1. En la figura puede verse cómo introducir el dato relativo al valor inicial de la capacidad. A este respecto conviene tener muy presentes dos circunstancias:

- El valor inicial se introduce en el parámetro  $IC$ , que significa "initial condition" (condición inicial). Es decir, no denota el valor de la corriente  $i_C$ . El mismo procedimiento se aplica en el caso de las inductancias, en las que el parámetro aludido hace referencia al valor de la corriente en  $t=0$  s. Si el valor inicial es nulo no es necesario introducir ningún valor para el parámetro citado.
- Hay que tener la precaución de mantener la coherencia entre valores numéricos y polaridad de las tensiones (sentidos de las corrientes en el caso de las inductancias). La capacidad que se muestra en la figura III.1 ha sido dibujada en de forma que la corriente entra por su extremo superior (véase la sección 3 en el tema I). Es decir, su terminal positivo es el superior. Sin embargo, si  $v_C(0)$  fuese negativa en el terminal superior de la capacidad, la contradicción se resolvería con un signo menos en el parámetro  $IC$ . En este caso se ha optado por la primera posibilidad.

El circuito de la parte derecha de la segunda línea de la figura III.1 no puede analizarse utilizando los procedimientos detallados en el tema anterior porque incluye una capacidad que está jugando un papel fundamental, dado que tiene una tensión inicial. La alternativa es utilizar el análisis transitorio específico (*Transient*, como se indica en la parte inferior derecha de la figura). Al abrir el cuadro de diálogo correspondiente, el parámetro *Print Step* se deja con un valor nulo (salvo en circunstancias muy especiales).

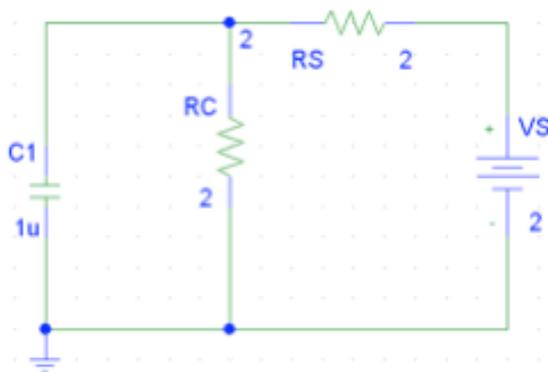
Por lo que se refiere al parámetro *Final Time* éste viene a ser una especie de compromiso entre la necesidad de poner un valor temporal elevado (con objeto de garantizar que el análisis cubre todo el régimen transitorio hasta la extinción de éste) y un valor temporal bajo (para reducir en lo posible el tiempo de cálculo). Una forma de solventar este compromiso consiste en estimar que el régimen transitorio se alarga durante un periodo aproximadamente igual a cinco constantes de tiempo (véase TCC). No es imprescindible calcular exactamente el valor de la constante de tiempo para efectuar tal estimación; un cálculo razonable puede involucrar a la capacidad o la inductancia considerada y la resistencia más próxima a ella. Si hay varias constantes de tiempo en el circuito conviene hacer la estimación sobre la duración del régimen transitorio a partir de la más elevada entre aquéllas.

Completados todos los pasos anteriores ya puede activarse el análisis (como se indicó en el tema anterior y habiendo guardado el circuito en un archivo). Una vez concluido éste, aparece en la pantalla del ordenador la pantalla principal del módulo *Probe*, cuyas características más relevantes son detalladas en la sección siguiente.

### 3 Características principales del módulo *Probe*

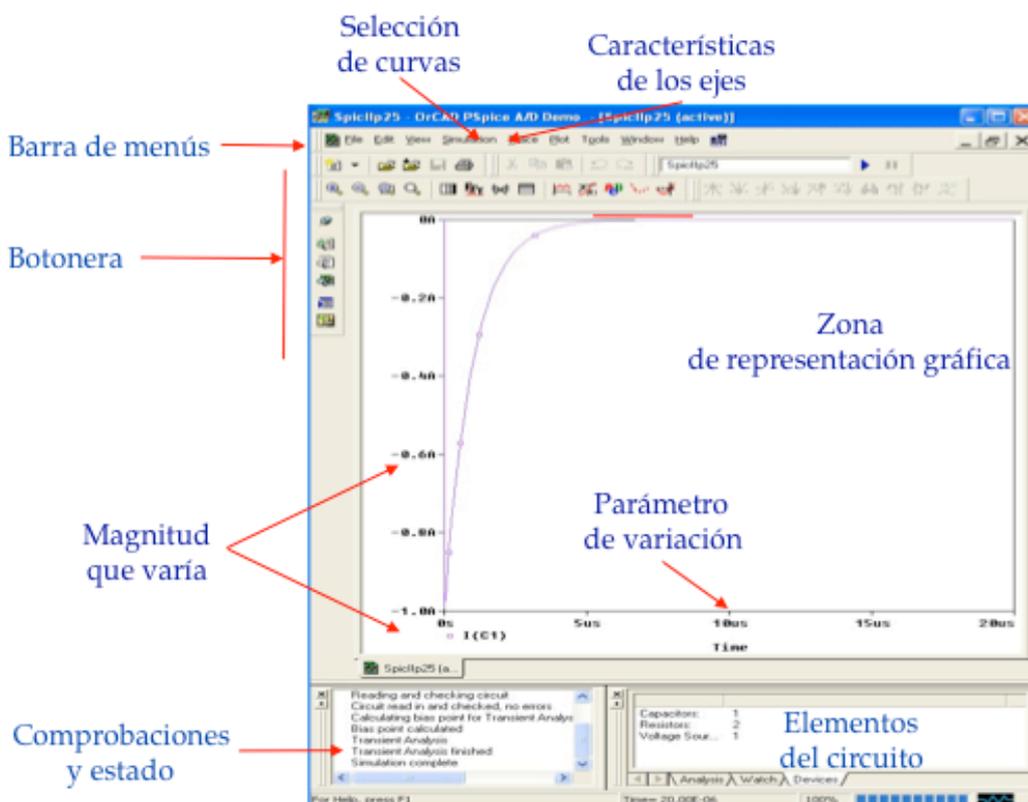
El módulo *Probe* es la parte de PSpice que permite representar gráficamente las curvas que definen la variación de determinadas variables en función de la variación de un cierto parámetro. Desde la perspectiva de este texto, consideraremos las variaciones de corrientes, tensiones y potencias en el régimen transitorio asociado al paso de un régimen DC a otro distinto, las variaciones de las mismas magnitudes en un circuito en el que la excitación total es la suma algebraica de dos excitaciones parciales, y las variaciones de los módulos y las fases de corrientes y tensiones en circuitos sometidos a una excitación del tipo sinusoidal permanente. En cuanto al parámetro de variación consideraremos únicamente los casos en los que tal parámetro es el tiempo o la frecuencia de una excitación sinusoidal permanente.

## El módulo *Probe*



### CIRCUITO A ANALIZAR

El terminal positivo de C1 está en la parte superior ( $IC = 2\text{ V}$ ).  
 El terminal positivo de RC está en la parte superior.  
 El terminal positivo de RS está en la izquierda.



### PANTALLA PRINCIPAL DE PROBE

Figura III.2. Pantalla principal del módulo *Probe*.

En la forma más habitual de utilizar PSpice, *Probe* se activa automáticamente cuando concluye el análisis prefijado por el usuario. Surge así la pantalla principal de *Probe*, en la que pueden distinguirse distintos tipos de elementos (véase la figura III.2; el circuito a analizar es el que corresponde en PSpice a la parte derecha de la segunda línea de la figura III.1). La disposición de los elementos y las acciones que éstos pueden realizar son comparables a sus equivalentes en la pantalla principal de PSpice.

Como detalle particular cabe señalar que, debajo de la pantalla hay dos recuadros.

- En el de la izquierda se muestran ciertos datos acerca de la ejecución del programa; en concreto, se indica si el circuito contiene errores.

- En el de la derecha se indican cuántos elementos y de qué tipo constituyen el circuito analizado.

Tras la ejecución del análisis la pantalla de *Probe* se muestra vacía (excepto en un caso específico, al que nos referiremos más adelante). Únicamente figura en ella el parámetro de variación (el tiempo en el ejemplo considerado en la figura III.2). El intervalo de valores de este parámetro, que aparece indicado automáticamente en la pantalla, es el comprendido entre 0 y el valor de *Final Time* (en el caso particular del análisis en régimen transitorio) especificado por el usuario al definir las condiciones del análisis.

Para seleccionar las magnitudes a representar se activa la opción *Trace* en la barra de menús, con lo que aparece el menú mostrado en la figura III.3. En dicho menú se escoge la opción *Add Trace...*, que, una vez activada, presenta el cuadro de diálogo representado en la misma figura. En el cuadro se tienen la lista de variables (a la izquierda) cuyas curvas temporales han sido obtenidas por *Probe* y la lista de operaciones matemáticas (a la derecha) susceptibles de ser realizadas sobre tales variables. En la lista mostrada en el cuadro intermedio de la figura III.3 algunas variables son designadas también con nombres alternativos (*Alias Names*); para evitar confusiones, sobre todo en el caso de que el número de variables sea elevado, puede eliminarse la marca  en el recuadro correspondiente a la opción indicada, con lo que se tiene la situación mostrada en el cuadro de la derecha de la figura.

### Variables en *Probe*

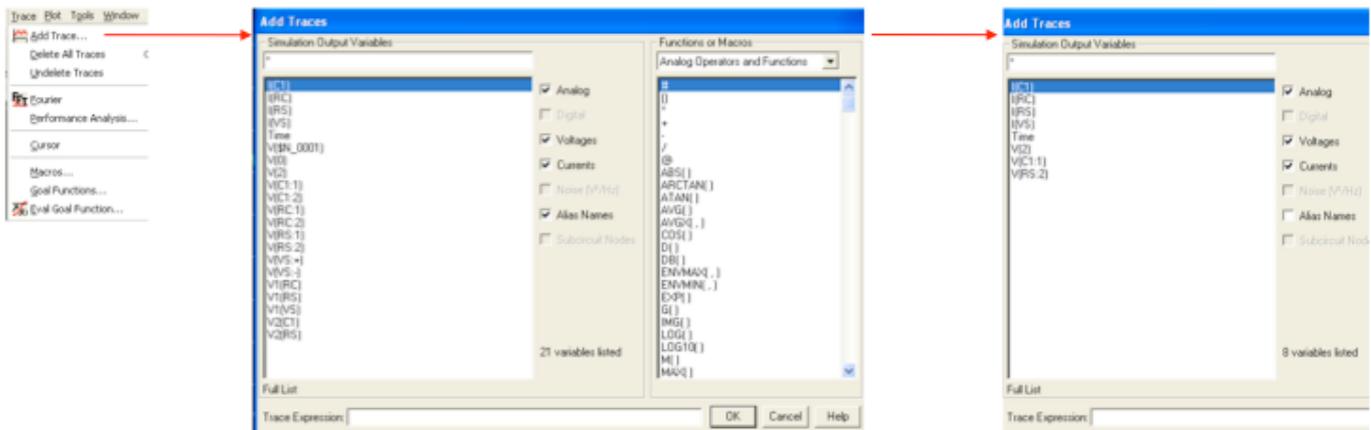


Figura III.3. Selección de variables a representar en el módulo *Probe*.

En el caso mostrado en la figura III.2 se ha elegido representar la corriente en la capacidad. Cada una de las variables mostradas en la pantalla se diferencia de las restantes por un color de la curva, el conjunto de símbolos marcados sobre ésta y el nombre, indicado al pie y a la izquierda de la curva. La escala correspondiente a la variable es ajustada automáticamente por el programa.

Es posible representar varias curvas sobre la misma pantalla. En ese caso, el eje de ordenadas es común, lo cual puede conducir a distorsiones en la representación si los valores de las distintas variables son muy diferentes. Otra posibilidad consiste en ejecutar la opción de utilizar un eje de ordenadas específico para cada variable; dejaremos al lector la tarea de averiguar por sí mismo cómo puede hacer uso de tal posibilidad.

Es importante destacar el hecho de que la corriente mostrada en la figura III.2 se ajusta a lo dispuesto en el dibujo del circuito en PSpice; es decir, está entrando en la capacidad por el terminal superior. Si no hubiéramos girado la capacidad para que la corriente entrase en ella por el terminal inferior (lo cual comportaría que habría que cambiar el signo del valor asignado a  $I_C$ ) la corriente iría desde 1 A hasta 0 A a lo largo de una curva simétrica a la representada con relación al eje de abscisas.

La curva de la figura III.2 permite deducir cuál es la duración del régimen transitorio. Como puede observarse, a partir de  $5 \mu\text{s}$  aproximadamente ( $10 \mu\text{s}$ , si se quiere ser más preciso) el valor de la corriente en la capacidad ya no cambia significativamente. Eso significa que el régimen transitorio se extingue a partir de  $5\text{-}10 \mu\text{s}$ . Esta circunstancia nos permite deducir cuál es el valor final de la corriente (es decir, el que adquiere cuando ya sólo está presente el régimen DC permanente final). Para ello, determinamos su valor para un instante claramente superior al de finalización del régimen transitorio (por ejemplo,  $20 \mu\text{s}$ ), obteniendo un valor nulo de la corriente, lo cual es coherente con el hecho de que una capacidad es un circuito abierto en DC.

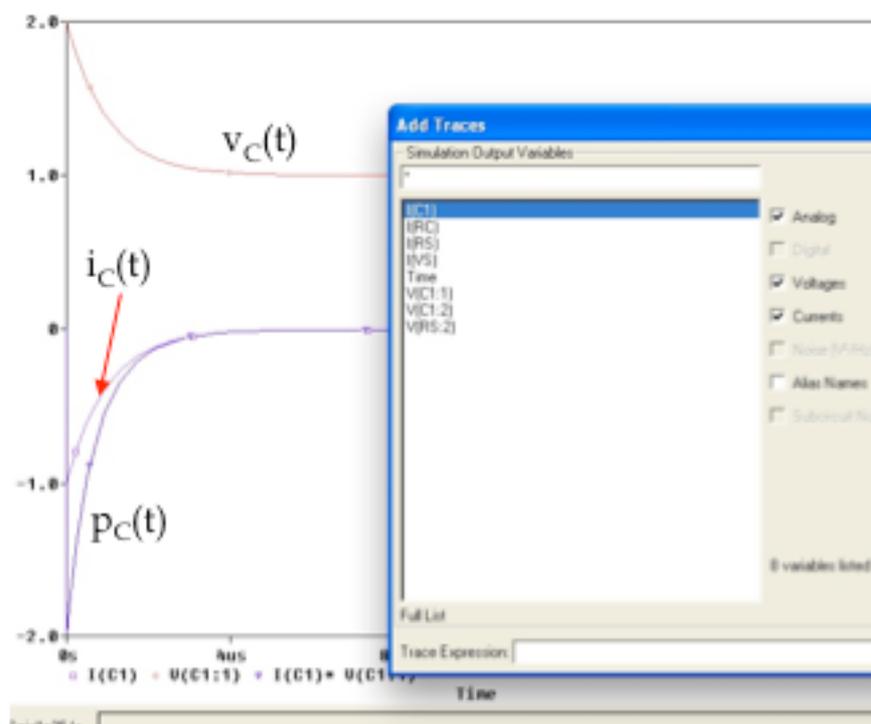


Figura III.4. Representación de magnitudes derivadas en *Probe*.

Puede notarse que la lista de variables susceptibles de ser representadas con *Probe* únicamente incluye corrientes y tensiones (magnitudes principales o independientes). Sin embargo, en determinados casos es necesario mostrar las curvas correspondientes a otras variables (magnitudes derivadas o combinadas), como, por ejemplo, la potencia. Esto puede hacerse escribiendo en el cajetín asociado a *Trace Expression*: la expresión matemática correspondiente a la variable que deseamos representar. En la figura III.4 se muestra cómo representar la evolución temporal de la potencia en la capacidad. Dicha magnitud es el producto de la corriente por la tensión (debe ponerse atención en la elección de signos; la tensión en el nudo 2 coincide con la de la capacidad si se fuerza que ésta tenga su terminal

positivo en el extremo superior). Las magnitudes de corriente y tensión se escriben en el cajetín seleccionándolas directamente en la lista de variables, mientras que el asterisco, representativo del producto, es escrito por el usuario.

Si se desea eliminar cualquier curva de la representación, basta con seleccionarla al pie de la pantalla y luego activar la opción *Delete* en el menú *Edit*.

## 4 Otras características del módulo *Probe*

Con lo indicado en la sección precedente es suficiente para resolver, con ayuda de *Probe*, gran número de problemas de régimen transitorio. Sin embargo, el módulo tiene otras prestaciones, además de las ya reseñadas. Entre ellas se encuentran las que se mencionan en esta sección.

Una posibilidad de *Probe* es alterar la configuración de los ejes coordenados para que la figura resulte más ilustrativa de lo que se pretende observar. Para ello se selecciona la opción *Axis Settings* en el menú *Plot* (la opción *Add Y Axis* permite añadir ejes de ordenadas adicionales, de forma que, como se indicó anteriormente, sea posible atribuir cada uno de ellos a una variable diferente), lo cual da origen al cuadro representado en la figura III.5.

### Cambio de ejes en *Probe*

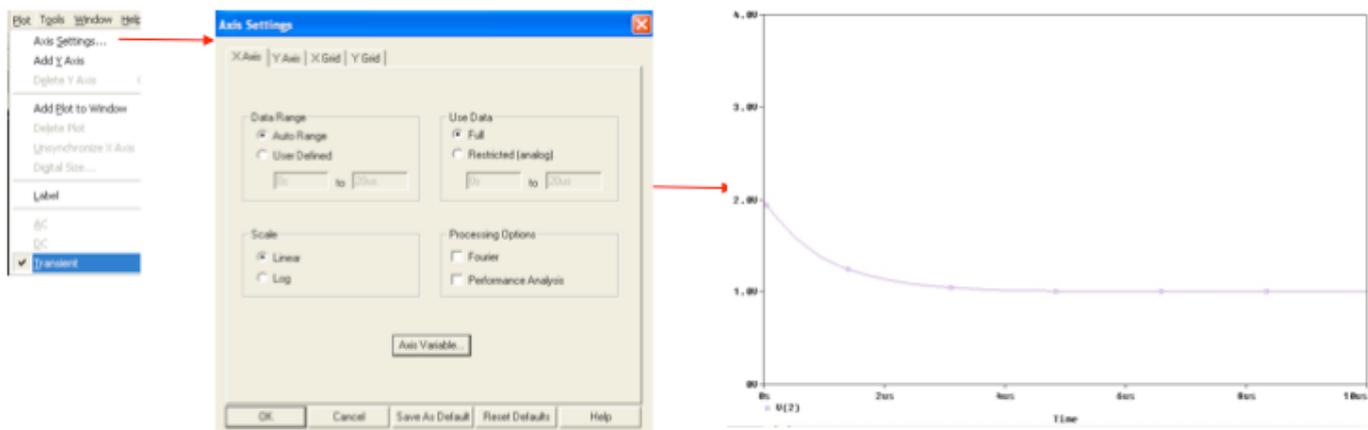


Figura III.5. Cambio en los ejes coordenados para modificar la representación de variables en *Probe*.

Actuando en dicho cuadro (véase la figura III.5) es posible modificar los rangos de valores cubiertos por los ejes (puede elegirse mantener las escalas proporcionadas automáticamente por el programa o definir unas nuevas), el tipo de representación (lineal o logarítmica; la segunda es especialmente adecuada para representar la variación de las características de un circuito con la frecuencia de operación), o las características de las rejillas que aparecen en la pantalla. A título de ejemplo en la figura III.5 se muestra una representación modificada de la tensión en el nudo 2 a la que se hizo alusión en figuras anteriores. Se han cambiado las escalas horizontal y vertical y se ha suprimido por completo la representación de la rejilla; en cambio ha permanecido sin alterar la naturaleza lineal de las escalas utilizadas.

Hasta el momento nos hemos referido a situaciones en las que el usuario elige libremente entre distintas posibilidades a la hora de representar las curvas. Sin embargo, cuando está claramente definido con anterioridad el conjunto de variables cuyas representaciones se desea conocer hay un modo de abreviar ligeramente el proceso. En esencia, consiste en seleccionar sobre el circuito las variables que se desea obtener mediante la utilización de marcadores. Para ello, tal y como se muestra en la figura III.6, se recurre a la opción *Markers* en la barra de comandos de la pantalla principal de PSpice. Una vez en ella, se seleccionan uno o más marcadores.

## Utilización de marcadores en *Probe*

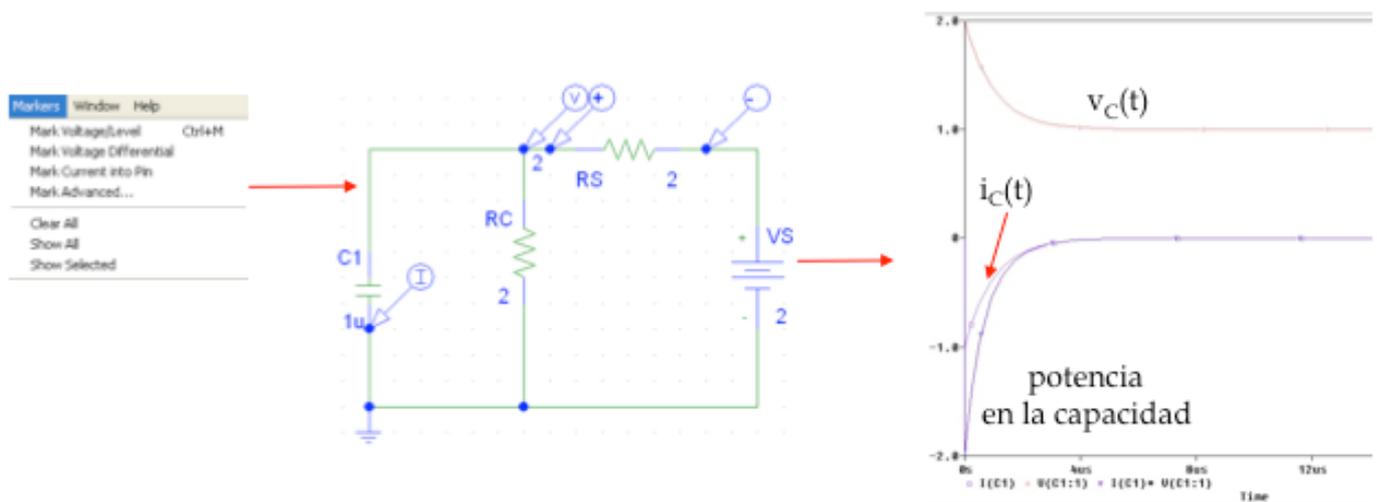


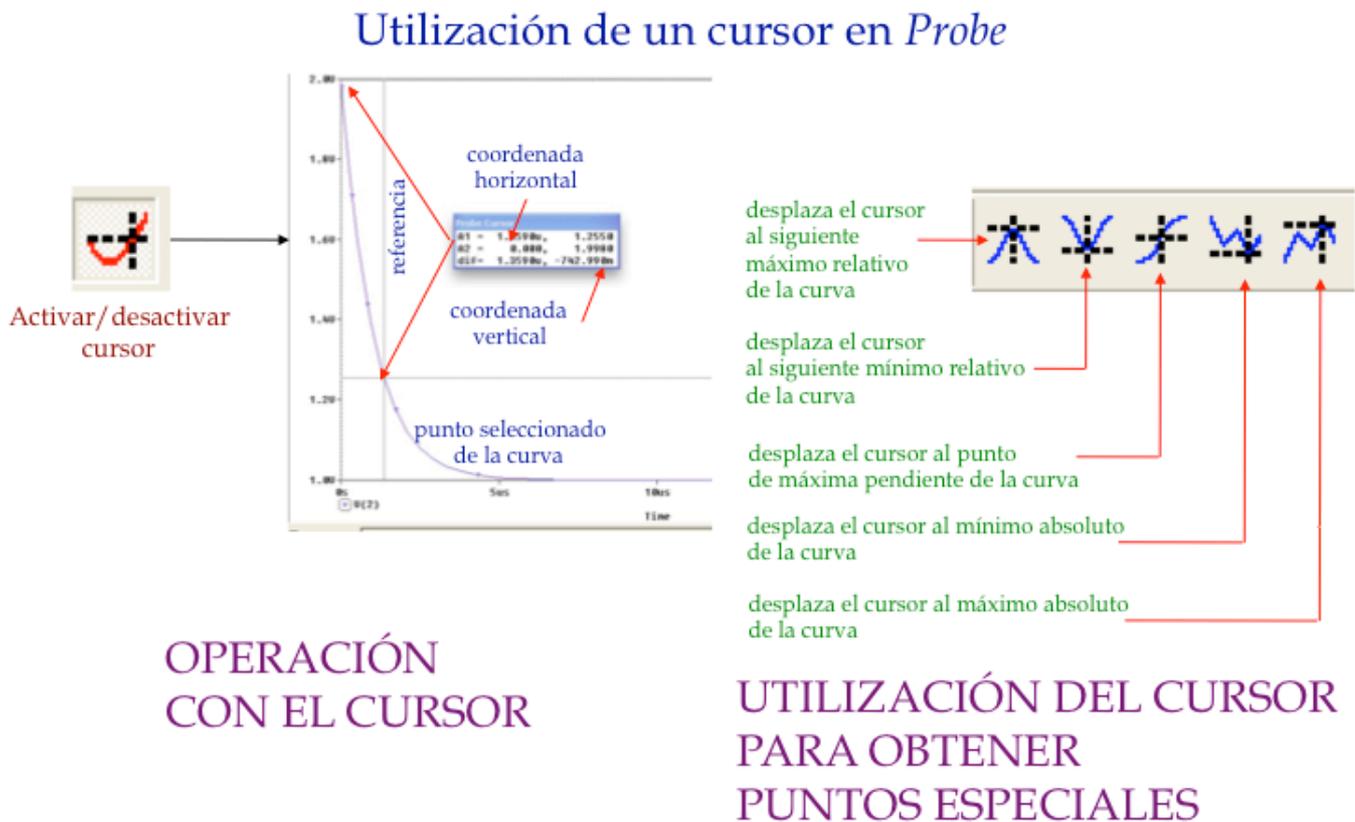
Figura III.6. Utilización de marcadores para seleccionar directamente las variables a representar.

Los marcadores de mayor interés desde la perspectiva de los objetivos de este texto son de tres tipos:

- **Mark Current into Pin.** Hace referencia a la corriente que entra en un elemento por el extremo del mismo en el que se dispone el marcador. Éste ha de ser colocado efectivamente en un extremo del elemento y no en un nudo. En el ejemplo de la figura III.6 un marcador de este tipo, denotado con la letra *I*, es utilizado para obtener la corriente que entra en la capacidad por el extremo inferior de la misma.
- **Mark Voltage/Level.** Hace referencia a la diferencia de tensión entre el nudo en el que se dispone y el nudo de tierra. En el ejemplo de la figura, un marcador de este tipo, denotado con la letra *V*, proporciona la tensión en el nudo 2.
- **Mark Voltage Differential.** Se especifica mediante dos flechas, marcadas con los signos más y menos, respectivamente (los símbolos de los marcadores, incluidos los dos mencionados anteriormente, surgen automáticamente en el área de dibujo cuando se seleccionan sus nombres en el cuadro de diálogo mencionado más arriba). Cada una de ellas se dispone, a elección del usuario, en una rama de conexión a un nudo. En el ejemplo de la figura se trata de obtener la caída de tensión en la resistencia *Rs*. Obsérvese que el valor final de esta tensión es negativo porque, tal y

como se indicó en la figura III.2, RS se ha dispuesto de modo que la corriente entre ella por su extremo izquierdo.

Otra posibilidad que ofrece *Probe* es la de utilizar un cursor para obtener con cierta precisión resultados numéricos a partir de una curva. El cursor se activa (o se desactiva, si estaba activado previamente) pulsando el botón de la botonera de la pantalla principal de *Probe* mostrado en la figura III.7.



**Figura III.7.** Empleo de un cursor para determinar puntos específicos en las curvas representadas en *Probe*.

Una vez activado dicho botón, en la curva aparece un esquema de ejes coordenadas que, en principio, puede ser desplazado moviendo el ratón a lo largo de aquélla. También aparece en la pantalla un cuadro flotante, en el que se indican las coordenadas del punto seleccionado en cada momento y las correspondientes a una referencia fija (en el ejemplo de la figura la referencia es el punto de la curva determinado por el origen del eje de abscisas). De esta forma es posible conocer con bastante exactitud el valor de la magnitud representada en el eje de ordenadas que corresponde a un valor dado del parámetro de variación (el tiempo, en este caso).

La operación del cursor puede reforzarse con ayuda de los botones, también presentes en la botonera de *Probe*, representados en la misma figura. Activándolos, se realizan de forma automática las funciones indicadas para cada uno de ellos. Puede comprobarse que, dada la naturaleza de la curva considerada en este ejemplo, ninguno de tales botones realiza función alguna al ser activado.

## 5 Ejercicios propuestos

Se sugiere al lector que intente resolver por su cuenta el problema presentado en la figura III.8 con objeto de que compruebe si ha adquirido la destreza suficiente para manejar con soltura los aspectos de PSpice mencionados en este tema.

- 1 Representad gráficamente las variaciones con el tiempo, para  $t \geq 0$  s, de las corrientes y las tensiones en la capacidad y la inductancia del circuito adjunto. ¿Cuánto valen tales magnitudes para  $t=0$  s y para  $t=\infty$  s?

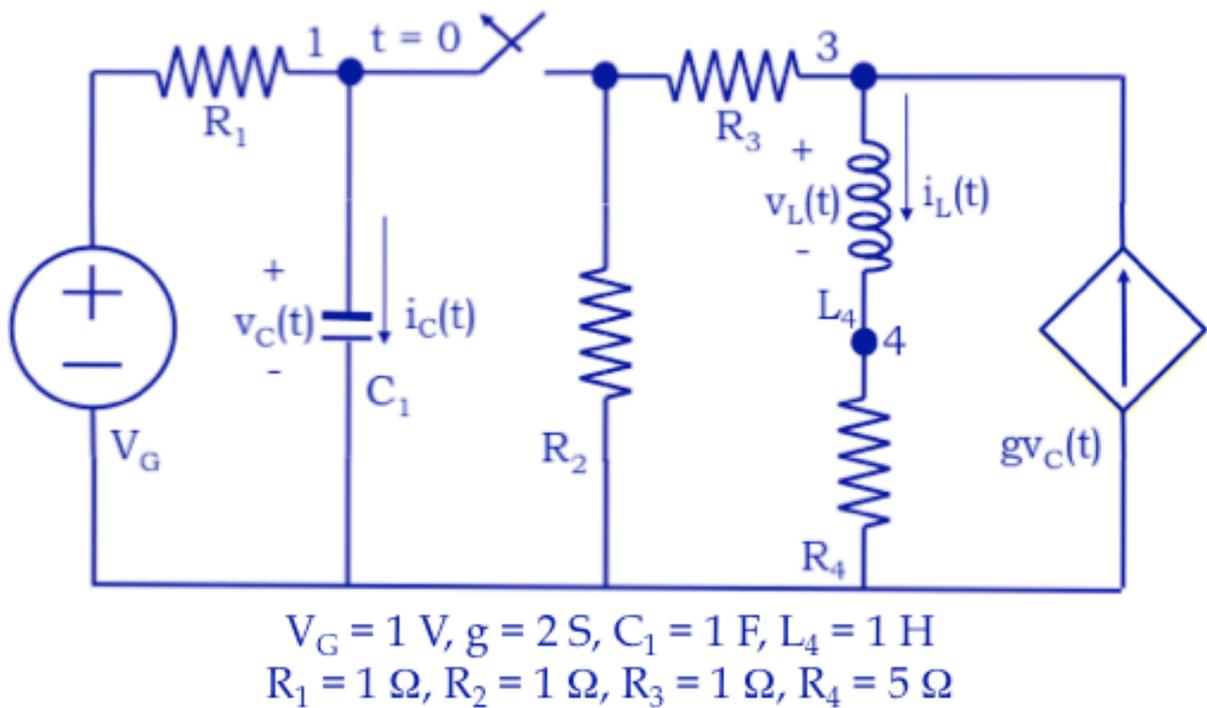


Figura III.8. Ejercicio para comprobar la destreza en la caracterización del régimen transitorio utilizando PSpice.