

# SPICE: UNA VISION CRITICA

Celma S., Martínez P. A., Gutiérrez I.

Area de Electrónica - Facultad de Ciencias  
Universidad de Zaragoza  
Ciudad Universitaria  
E-50009 Zaragoza

Tlfn: (976) 56 64 70

Fax: (976) 56 79 20

e-mail: uelec@cc.unizar.es

## RESUMEN

*Los simuladores eléctricos tipo SPICE pueden incidir positivamente en la enseñanza de la Electrónica. Sin embargo, en esta comunicación queremos hacer una reflexión sobre su correcto uso desde un punto de vista pedagógico: de sus indiscutibles ventajas, pero también de sus riesgos. La discusión la centraremos en el contexto de la enseñanza de la Electrónica Analógica; mediante sencillos ejemplos y contraejemplos ilustraremos lo que consideramos una adecuada utilización de este tipo de simuladores.*

## 1. INTRODUCCION

Cuando Pederson y su grupo de estudiantes del *Dept. of Electrical Engineering and Compute Science* de la Universidad de Berkeley desarrollaron en los años '70 el SPICE: *Simulator Program with Integrated Circuit Emphasis* y lo ofrecieron gratuitamente para uso académico e industrial, difícilmente podían adivinar la trascendencia y el impacto que éste iba a suponer sobre las técnicas de diseño electrónico. Con el transcurso de los años, lejos de perder vigencia, ha sabido adaptarse hasta convertirse en un *standard* dentro de las herramientas CAD/CAE de Ingeniería Electrónica. Actualmente en la práctica totalidad de las universidades no se concibe la enseñanza de la Electrónica sin el apoyo de este tipo de herramientas.

Con el desarrollo espectacular de los sistemas VLSI y sus potentes entornos informáticos de diseño, rara vez se necesita descender a simulación a nivel de dispositivo para disponer de una caracterización fiable del producto, quedando relegado el SPICE a un plano secundario. Sin embargo, simuladores eléctricos tipo SPICE todavía constituyen herramientas imprescindibles en el diseño *full-custom*, donde se persigue altas prestaciones a través de la optimización de celdas básicas.

No obstante, el SPICE ha desbordado los límites iniciales de su concepción y es utilizado en tareas donde no es la única herramienta disponible, ni siquiera la mejor.

A título de ejemplo, podemos citar el creciente número de libros de texto sobre Teoría de Circuitos que incluyen el SPICE, o más aún, que lo adoptan como núcleo central alrededor del cual se desarrollan los diferentes temas [1-3]. Básicamente se fundamentan en la supeditación de las técnicas analíticas en pro de las numéricas. Muchos profesores ya han manifestado su preocupación por esta tendencia, que llevada a su extremo, inculca al alumno la falsa idea de que ningún circuito *serio* se puede resolver sin, al menos, un ordenador personal [4, 5].

El Prof. Nagel, nada sospechoso como detractor del SPICE por ser uno de esos estudiantes que lo desarrollaron, afirma que la intuición y la creatividad de los alumnos puede verse mermada con el uso indebido de este tipo de herramientas. Coincidimos plenamente con él cuando dice que hay que saber formar a los alumnos para que ante sistemas aparentemente complejos no recurran de inmediato al ordenador, que difícilmente les proporcionará una solución satisfactoria, sino que sean capaces de crear modelos simples que describan correctamente dichos sistemas y, posteriormente, puedan ser depurados con la ayuda de simuladores.

Por otro lado, especial incidencia están teniendo los simuladores tipo SPICE en la enseñanza de la Electrónica Analógica, tanto fundamental como avanzada. Creemos que los cursos introductorios son el momento más adecuado para la familiarización con estas herramientas, pero debe hacerse de una forma racional y progresiva. Aunque es indiscutible el potencial pedagógico que supone, en ocasiones puede llegar a ser contraproducente. Por ejemplo, se está extendiendo el uso de estas técnicas como sustitución del laboratorio en lugar de servir de complemento del mismo. Una exagerada *virtualización* del laboratorio, aunque es una solución muy económica..., puede acarrear serias deficiencias en la formación integral del futuro diseñador de sistemas electrónicos. No podemos dejar que los alumnos conciban la falsa idea de que los resultados obtenidos por computador son infalibles, porque la validez de los modelos y la exactitud del algoritmo de cómputo están seriamente limitadas, y en ocasiones los resultados de la simulación requieren una interpretación más propia de un experto que de un estudiante neófito.

Pues bien, en este contexto de la enseñanza de la Electrónica Analógica asistida mediante SPICE se inscribe nuestra ponencia. Mediante sencillos ejemplos y contraejemplos ilustraremos lo que consideramos un correcto uso del SPICE en esta disciplina. Incidiremos en aquellos aspectos más comprometedores del uso del simulador, y en aquellos otros donde resulta ser una herramienta verdaderamente imprescindible. Algunos de los ejemplos descritos han sido seleccionados del material de prácticas de simulación<sup>1</sup> que imparten los autores como complemento de las actividades en el laboratorio.

## 2. ASPECTOS GENERALES

Como premisa de partida, consideramos que la simulación de circuitos eléctricos y electrónicos realizada por ordenador debe utilizarse exclusivamente en aquellas tareas donde

---

<sup>1</sup> *Microcap III student* (Spectrum Software) es la versión utilizada en prácticas. Sin embargo, para obtener una mayor calidad en las gráficas hemos preferido usar la versión *Is-spice* (Intusoft) en la elaboración de este trabajo.

se presente como una herramienta más eficiente que el propio laboratorio. A continuación se exponen brevemente algunas tareas que, sin pretender ser exhaustivos, pueden realizarse dentro del contexto de la asignatura en cuestión.

**Laboratorio virtual.** El simulador puede convertirse en un sustituto de la instrumentación no disponible en el laboratorio de alumnos, como analizadores de espectros, medidores de distorsión, etc.

**Control sobre las condiciones de contorno del experimento.** Puede acotarse el “universo del experimento” imponiendo las condiciones de contorno deseadas. En este sentido podemos realizar el “experimento ideal”.

**Validación de modelos.** Podemos fácilmente aumentar o disminuir el grado de complejidad de un modelo; por ejemplo, pasar de una descripción analítica o funcional a otra más sofisticada que añada factores como las no linealidades, ruido, etc. Este proceso nos posibilita estudiar el grado de validez de los modelos en los distintos estratos de la jerarquización.

**Análisis de sensibilidad.** Este tipo de análisis está disponible en la mayoría de los simuladores tipo SPICE permitiendo el estudio de la sensibilidad frente a variaciones determinísticas o estocásticas. Como consecuencia, la optimización de características es también factible.

**Variación paramétrica.** Posibilita la evaluación de la dependencia de una determinada característica frente las variaciones controladas de cualquier parámetro o de la temperatura.

Por otro lado, las limitaciones de la simulación son fundamentalmente de dos tipos: las inherentes a los algoritmos numéricos del programa y las correspondientes a las deficiencias de los modelos empleados. Un estudio detallado de las mismas supera los límites de este trabajo, no obstante, cuestiones relativas a estos problemas se encuentran en [6, 7].

### 3. EJEMPLOS

A continuación pasamos a exponer algunos ejemplos que creemos nos ayudarán a concretar más los aspectos ventajosos o problemáticos de la simulación con SPICE.

#### **Ejemplo 1. Circuitos RC y RCL. Modelado de componentes pasivos**

En el laboratorio de electrónica es común iniciar las sesiones con el estudio experimental de circuitos RC y RCL. Esto permite al alumno familiarizarse con la instrumentación, a la vez que recordar conceptos propios del análisis transitorio y estacionario. Además, las conclusiones del análisis de estos circuitos serán el fundamento de algunos aspectos del comportamiento de los amplificadores y filtros. Aunque estos circuitos pueden simularse, consideramos que en este caso la simulación no aporta información adicional a la obtenida en el laboratorio. En todo caso, debido al reducido número de componentes y a la simplicidad de los mismos, el uso del ordenador estará justificado si sirve para iniciar al alumno en el manejo del simulador y su entorno. Entendemos que como primer ejercicio de simulación, y

siempre que le preceda la correspondiente práctica de laboratorio, puede resultar muy instructivo. No obstante, incluso a este nivel elemental puede evidenciarse el potencial del simulador, si se busca alguna aplicación donde éste suponga una alternativa preferente al laboratorio.

Un ejemplo sencillo es la correcta modelización de los componentes pasivos. El caso particular de una resistencia discreta de película metálica o de carbón presenta un comportamiento frecuencial que debe incluir efectos capacitivos e inductivos, tal como se muestra en la Figura 1 [8].

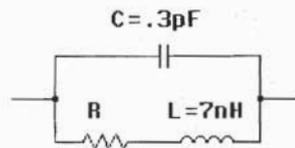


Figura 1. Modelo de resistencia

Estos efectos parásitos empiezan a ser apreciables a muy alta frecuencia y por lo general la caracterización frecuencial de la impedancia no es fácilmente medible con los medios disponibles en un laboratorio de alumnos. Esto se debe principalmente a la limitación frecuencial del generador de señales: 1 ó 2 MHz, y a las características del montaje: placas de prototipo y conexionado introducen mayores componentes capacitivas e inductivas que las que presenta la propia resistencia.

El SPICE puede desempeñar la función de laboratorio virtual, idealizando las condiciones de la medida. Diferentes situaciones pueden ser fácilmente reproducidas modificando los valores de  $C$  y  $L$ ; por ejemplo, si se supone que la resistencia está montada en posición horizontal sobre una PCB y justo encima de un plano de masa al que tiene conectado uno de sus terminales, se debe añadir aproximadamente  $.3 \text{ pF}$  a la capacidad; además, por cada milímetro de contacto adicional habrá que sumar  $1 \text{ nH}$  a la autoinducción [9]. La modelización es fácilmente extensible a otros componentes pasivos como los condensadores y las autoinducciones.

Este estudio permite deducir modelos simplificados y especificar las condiciones bajo las cuales resultan adecuados para describir el comportamiento de un dispositivo real. Este concepto es fundamental en el tratamiento de sistemas eléctricos y electrónicos.

Para compensar estos efectos parásitos y, en consecuencia, extender el rango frecuencial en el que el elemento resistivo puede considerarse ideal, existe una técnica que se basa en la propiedad de que los valores de estos componentes dependen de la geometría y tecnología del dispositivo, pero son prácticamente independientes del valor nominal de la resistencia. Así, puede demostrarse fácilmente que cuando el efecto parásito dominante es el capacitivo, una misma resistencia obtenida por combinación serie de  $n$  elementos idénticos multiplica el rango frecuencial por un factor también  $n$ . Análogamente, cuando es predominante el efecto inductivo, puede extenderse el rango frecuencial en un factor proporcional al número de elementos resistivos iguales conectados en paralelo, necesarios para obtener una misma resistencia.

Creemos que con este sencillo ejemplo el alumno puede empezar a comprender que el simulador es una valiosa herramienta en la estimación de características o predicción de comportamientos reales, que le es imposible obtener en el laboratorio, permitiéndole además imponer fácilmente las condiciones del experimento.

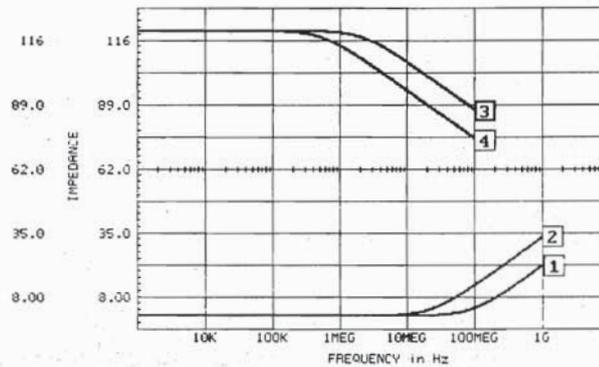


Figura 2. Módulo de la impedancia equivalente de una resistencia única: curvas 2 (1Ω) y 4 (1MΩ); y de la combinación de cuatro elementos curvas: 1 (1Ω) y 3 (1MΩ)

### Ejemplo 2. Dependencia de las características del diodo semiconductor con la temperatura

Las prácticas de laboratorio diseñadas para extraer la característica global I/V de distintos diodos semiconductores son relativamente fáciles de realizar. Es sabido que dichas características dependen drásticamente con la temperatura, de tal forma que se hace necesario usar técnicas de compensación térmica para reducir sus efectos sobre el comportamiento global de un circuito. Es evidente, pues, la necesidad de ilustrar al alumno esta dependencia para una mayor comprensión de su grado de influencia, e incluso de sus aplicaciones como fundamento de los sensores de temperatura. Sin embargo, si se pretende medir ciertos parámetros, tales como su intensidad inversa de saturación,  $I_s$ , o su variación térmica, nos vemos obligados a utilizar instrumentación, que por lo general, no está disponible en un laboratorio de alumnos. Para diodos de Ge aún sería factible, pero resulta muy difícil para los de Si y prácticamente imposible para los de GaAsP. La única solución experimental es recurrir a técnicas de estimación a partir de la característica directa [10], pero que suelen exigir un alto grado de adiestramiento en técnicas experimentales y un consumo de tiempo que desborda los límites de varias sesiones de prácticas.

Para este propósito, el SPICE puede jugar el papel de laboratorio virtual, al igual que en el ejemplo anterior. No obstante, ahora se deben adoptar ciertas precauciones relativas al modelo del diodo. Como ya apuntábamos en la sección #2, los valores de los parámetros proporcionados por el fabricante son estimados supuestas condiciones normales de operación. En el caso de los diodos de Si de propósito general, se presupone que serán utilizados preferentemente en aplicaciones donde la corriente de difusión sea dominante y, por tanto, suele proporcionarse un coeficiente de emisión,  $N$ , cercano a la unidad.

Sin embargo, una simulación para obtener la dependencia con la temperatura de la intensidad inversa de saturación nos proporciona resultados poco realistas. Para esta clase de diodos se

encuentra experimentalmente que la deriva térmica es tal que la intensidad inversa de saturación aproximadamente se duplica cada  $10^{\circ}\text{C}$  de aumento [11, 12]. Para reconstruir este resultado por simulación es necesario modificar el valor del coeficiente de emisión a  $N=2$ , y esto parece plausible ya que el fenómeno de generación en la zona de transición es el término dominante en la conducción de corriente cuando el diodo está polarizado en inversa.

En la Figura 3.a, se muestra  $I_V$  a distintas temperaturas, deduciéndose por simple inspección una concordancia bastante buena con los resultados experimentales. Notar que el modelo no incluye la dependencia de la corriente con la tensión inversa de polarización. La característica I/V en polarización directa es mostrada en la Figura 3.b, donde puede deducirse que la deriva térmica en  $\text{V}/^{\circ}\text{C}$  coincide bastante bien con los valores experimentales que presenta este tipo de diodo: entre  $-2.3 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$  y  $-2.7 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ . En cualquier caso, también es reproducible la dependencia de este coeficiente con la intensidad de trabajo. Similares conclusiones pueden deducirse para versiones integradas y en la caracterización de otro tipo de diodos.

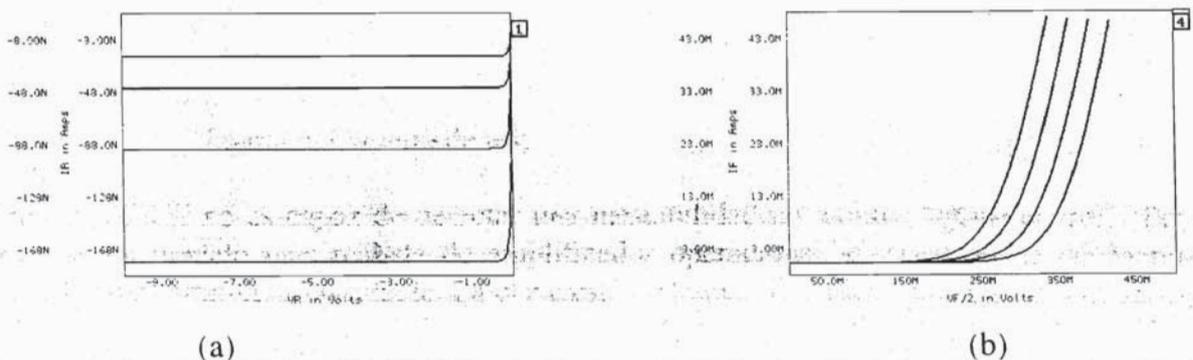


Figura 3. Dependencia con la temperatura de la característica I/V: (a) inversa y (b) directa  
rango: 25, 35, 45,  $55^{\circ}\text{C}$

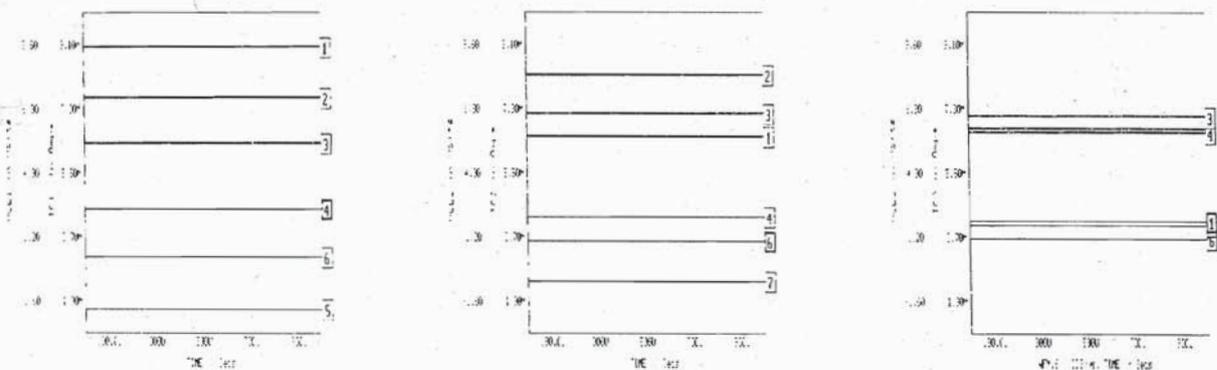
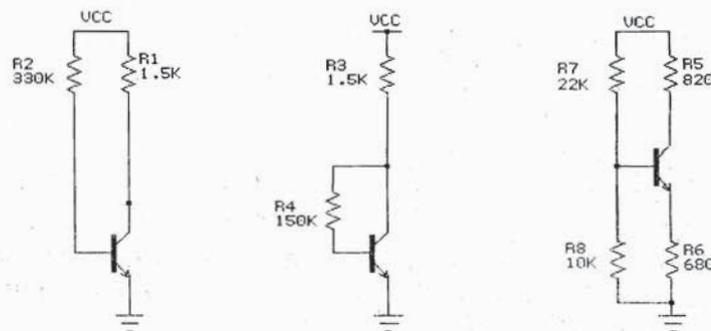
Este ejemplo es tan simple como representativo del efecto que puede tener una confianza excesiva en la exactitud del modelo. Hay que tener en cuenta que los valores de los parámetros han sido elegidos para que el modelo presente un correcto funcionamiento en una región de trabajo concreta. En ocasiones se procede a un ajuste multiparamétrico para hacer coincidir la característica del modelo con la experimental en un rango más amplio. No obstante, este procedimiento proporciona valores de los parámetros que no siempre son realistas, o incluso dejan de tener una interpretación física.

### Ejemplo 3. Redes de polarización

La simulación es una herramienta muy eficaz cuando se requiere un análisis de sensibilidad para determinar el error relativo debido a las tolerancias de los componentes pasivos o de los parámetros de los elementos activos. La mayoría de las versiones SPICE incluyen opciones de análisis de sensibilidad determinístico o estocástico. Sin embargo, el uso de este tipo de análisis rara vez está justificado en un primer curso de Electrónica debido a su inherente complejidad matemática. No obstante, aprovechando la capacidad iterativa de estos simuladores, puede extraerse información sobre la desviación de una característica mediante métodos más sencillos e intuitivos.

La polarización de los transistores bipolares es un ejemplo de lo crítico que puede ser la elección de la topología de la red y de los valores de sus elementos para conseguir una característica (en este caso un punto de trabajo) lo más insensible posible a factores como la temperatura, dispersión de parámetros intrínsecos, etc.

Para ilustrar este hecho proponemos al alumno la simulación de las tres redes mostradas en la Figura 4, suponiendo que la beta del transistor puede adoptar los valores máximo, nominal y mínimo proporcionados por el fabricante. Los resultados de un análisis transitorio muestran diáfanaamente la distinta desviación del punto de operación ( $I_C$ ,  $V_{CE}$ ) para las tres redes. Por simple inspección (Figura 5) puede comprobarse la correlación de los resultados con los respectivos factores de estabilidad deducidos teóricamente.



Figuras 4 y 5. Redes de polarización y correspondientes puntos de operación.  $\beta$ : 50, 100, 150

En este caso el parámetro modificado ha sido sólo la beta del transistor, simplificando así la interpretación de los resultados. Se insta al alumno a modificar cualquier otro parámetro relevante en el modelo e interpretar los resultados. Este tipo de operación es sumamente sencilla; por el contrario, la variación multiparamétrica o el análisis tipo Monte Carlo, aunque proporcionan resultados más rigurosos, resultan ser mucho menos intuitivos.

#### Ejemplo 4. Osciladores sinusoidales

Los osciladores sinusoidales son sistemas inherentemente no lineales y un estudio riguroso de ellos requiere aproximaciones numéricas o métodos analíticos que superan los objetivos de

una Electrónica básica. Sin embargo, el oscilador es un tópico frecuentemente tratado desde una perspectiva lineal en los libros de texto, por lo que la simulación podría servir de complemento al estudio teórico para comprobar la validez de las aproximaciones utilizadas.

Desafortunadamente, en este caso el simulador se presenta como una herramienta poco efectiva. Para entender esto, tomemos como ejemplo el oscilador puente de Wien basado en el amplificador operacional como elemento activo y con cuadripolo pasivo simétrico. Un análisis lineal nos proporciona un valor de la ganancia en dc ligeramente superior a 3 para asegurar el autocomienzo de las oscilaciones. Teniendo en cuenta esto, hacemos un análisis transitorio con el simulador y como resultado no obtenemos una solución periódica; al contrario, las tensiones en todos los nodos permanecen imperturbablemente en sus puntos de operación. Este resultado no es demasiado preocupante, simplemente nos hemos olvidado de emular la perturbación que provoca la respuesta natural del circuito; en el laboratorio esta señal espúrea es producida, por ejemplo, al conectar la fuente de alimentación. La solución a este problema es sencilla; por ejemplo, basta con imponer condiciones no nulas a uno de los condensadores o inyectar un impulso de corta duración. Existen otras soluciones, pero desde un punto de vista didáctico están menos justificadas, induciendo a errores conceptuales.

Reiniciando la simulación puede ocurrir que la señal de salida decaiga hasta un valor constante, o que el sistema sea un *astable* casi perfecto, o bien que sufra efecto *latch-up*. La solución del problema pasa por un ajuste fino de la condición de oscilación. Pero esto no es tan sencillo; lo que se suponía iba a conseguirse en un número reducido de intentos, se convierte en un proceso "iterativo" plagado de errores de convergencia o comportamientos anómalos del sistema. En función del modelo utilizado para el amplificador operacional, el problema puede volverse extremadamente crítico, requiriendo incluso precisiones del .01% en el valor de la resistencia de control. El tema todavía se complica más si se pretende simular el oscilador bajo condiciones de mínima distorsión: el transitorio se vuelve infinitamente largo, presentándose un difícil compromiso entre tiempo de cálculo y precisión de la señal de salida. Por otra parte, debido a que los mecanismos no lineales no son debidamente modelados y a los errores cometidos en el análisis transitorio (.FOUR), se desaconseja su uso para el cálculo de la distorsión de la señal generada [13].

Mientras, en el laboratorio, puede montarse y comprobarse el funcionamiento de este circuito en el mismo tiempo que lleva la edición del fichero *netlist*. El ajuste experimental de la condición de oscilación es mucho menos problemático y, en consecuencia, hace el procedimiento de medida mucho más rápido.

En conclusión, la simulación de un oscilador puede llevarnos varias horas de estresante trabajo y con pocas garantías de éxito, en cambio, la comprobación experimental es casi inmediata.

### **Ejemplo 5. Jerarquización de niveles de simulación**

Una estrategia seguida en la simulación de sistemas complejos es la denominada jerarquización de niveles a la que hacemos alusión en la sección #2. Sin embargo, podemos incurrir en serios errores imputados a una desmesurada idealización de los elementos que intervienen en un circuito.

Para entender esto supongamos el circuito mostrado en la Figura 6. Un análisis teórico de la estabilidad nos confirma que se trata de un sistema inestable. En cambio, la simulación nos proporciona un comportamiento asombrosamente estable (Figura 7.a) cuando el elemento activo es modelado mediante una fuente ideal de tensión controlada por tensión y con ganancia 200.000. Esta paradoja ha sido recientemente publicada en [14].

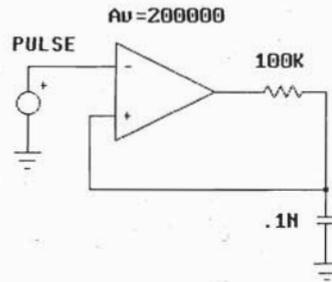
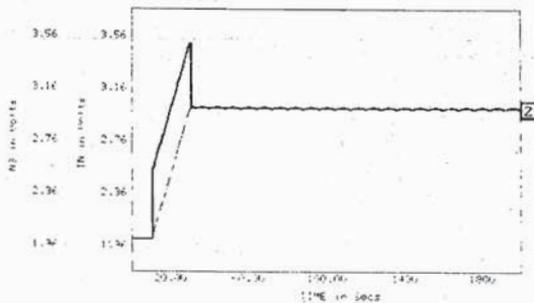
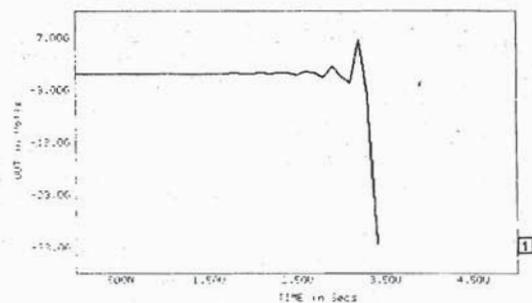


Figura 6. Circuito de test

¿Qué ocurre? ¿Por qué el SPICE no es capaz de detectar una inestabilidad tan contundente como ésta? Si probamos un modelo más realista de amplificador operacional, el sistema responde con su esperado comportamiento inestable. La clave está en la excesiva idealización del modelo. El sistema con el elemento ideal necesita una pequeña perturbación o condiciones iniciales no nulas para que el algoritmo de cómputo "converja" en una solución inestable (*overflow*), como se muestra en la Figura 7.b.



(a)



(b)

Figura 7. (a) Respuesta estable y (b) respuesta inestable del circuito de la Figura 6

Este ejemplo nos evidencia el hecho de que para la obtención de un comportamiento cercano al real mediante simulación deben tenerse en cuenta aspectos propios del modelo y del algoritmo del simulador, si queremos obtener conclusiones válidas. En la jerarquización de niveles deberemos tener presente que aquellos aspectos no considerados en las distintas fases no sean cruciales para determinar del correcto funcionamiento del sistema [15].

Otro ejemplo de "delicada" simplificación lo constituyen las simulaciones .AC: suelen ser muy atractivas por el reducido tiempo de cálculo que precisan, pero debe considerarse que es

la caracterización más alejada del comportamiento real de un sistema. Es decir, los modelos han sido extraordinariamente simplificados y consiguientemente se pierde información. Por ejemplo, deberemos asegurar previamente que los puntos de operación coincidan con los reales y que la estabilidad quede garantizada .

## 5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. Chattergy. "Spicey Circuits". CRC Press, London. 1992.
- [2] R. P. Clayton. "Analysis of Linear Circuits". McGraw-Hill, New York. 1989.
- [3] T. W. Thorpe. "Computerized Circuit Analysis with Spice". J. Wiley, New York. 1992.
- [4] R. Roher. "Taking circuits seriously". *IEEE Circ. Dev.* Vol. 6, nº 4, pp 27-31, July, 1990.
- [5] A. Ioinovici. "Teaching circuits seriously". *IEEE Circ. Dev.* Vol. 7, nº 3, p 56, May, 1991.
- [6] C. Hymowitz. "Step-by-step procedures help you solve Spice convergence problems". *EDN*, pp 121-124, March, 1994.
- [7] J. Williams (ed.) "Analog Circuit Design". Butterworth-Heinemann, London. 1991.
- [8] A. P. Malvino. "Principios de Electrónica". McGraw-Hill, Madrid. 1991.
- [9] S. C. Hageman. "Improve simulation accuracy when using passive components". *The Design Center Source*, pp 8-12, April, 1994.
- [10] D. D. Damljanovic. "Remodeling the P-N junction". *IEEE Circ. Dev.* Vol. 9, nº 6, pp 35-37, November, 1993.
- [11] D. Hodges. "Analysis and Design of Digital Integrated Circuits". McGraw-Hill, NY, 1983.
- [12] P. Antognetti. "Semiconductor Device Modeling with SPICE". McGraw-Hill, NY, 1988.
- [13] A. W. Swager. "Dos-based analog-simulation software". *EDN*, pp 125-143, May, 1992.
- [14] P. Kinget et al. "Are circuit simulators becoming too stable?". *Network for European Analogue Research Newsletter*. Vol. 1, nº 4, pp 35-36, March, 1994.
- [15] S. Celma, P. A. Martinez. "A comprehensive simulation macromodel for CCII". *European Simulation Multiconference Short Papers Proceedings*. Barcelona, June, 1994.

---

Este trabajo ha sido financiado por la Universidad de Zaragoza