

INTRODUCCIÓN AL MACROMODELADO DE CIRCUITOS Y SISTEMAS ELECTRÓNICOS CON SPICE

Luis Serrano

Depto. de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad Pública de Navarra

E-31006 Pamplona, Navarra, España,

Telfno: 948 169264; Fax: 948 169169

E-Mail: lserrano@upna.es

RESUMEN.- En este trabajo se pretende dar una visión general de las posibilidades que brindan los programas de evaluación basados en SPICE, como el PSPICE, para el denominado *Macromodeling* de circuitos y sistemas electrónicos. Partiendo de las primitivas de sintaxis de SPICE se consigue modelar el comportamiento de numerosos circuitos, lo cual conecta directamente tanto con los modelos de elementos activos comunes, tipo Amplificador Operacional, como con la posibilidad de realizar modelos de otros elementos, activos o pasivos, no disponibles en las librerías de estos programas. Este tipo de proceder abre una vía al alumno para poder disponer en estos simuladores de modelos de sistemas electrónicos necesarios en sus proyectos y que evidentemente, no son proporcionados por los fabricantes para dichos simuladores.

1.- INTRODUCCIÓN

El uso de herramientas informáticas para la enseñanza se ha extendido tanto dentro como fuera de nuestras Universidades. En particular, la utilización de programas de simulación de circuitos electrónicos basados en el popular SPICE es una necesidad a la que ningún docente universitario relacionado con el tema debe permanecer ajeno [1].

Este tipo de programas basados en SPICE, como PSPICE o Is-SPICE, suelen ser de distribución gratuita, siendo esta una versión de evaluación limitada en casi todas las posibilidades que posee [2]. De esta forma, con su utilización, puede darse una visión adecuada de la manera de proceder en el diseño de circuitos electrónicos ya sean analógicos, digitales o mixtos. Aun así, es posible encontrarse en algún momento con las limitaciones antes mencionadas de estos programas en lo que se refiere al número de elementos activos, nodos, etc.

Una posible solución para solventar estas limitaciones puede ser la utilización de la técnica denominada *Macromodeling* [3]. Históricamente, el uso del modelado se introdujo debido a la limitada capacidad de cálculo de los ordenadores disponibles en las décadas pasadas. De esta forma, se propuso el primer modelo del omnipresente Amplificador Operacional, el cual se comportaba casi idéntico a la estructura transistorizada, pero su consumo de CPU era mucho menor [4]. Esto proporcionó la oportunidad de simular el comportamiento de estructuras más complejas utilizando estos modelos que a la postre se han impuesto. Así, hoy en día, las librerías de los simuladores eléctricos, de evaluación o profesionales, son exclusivamente modelos tanto de elementos activos tradicionales, tipo Amplificador Operacional, Comparador, etc., como de estructuras electrónicas más complejas.

Por otro lado, las limitaciones actuales en los laboratorios docentes no son problema de la capacidad de cálculo de los ordenadores sino de los simuladores en su versión de evaluación. La manera de superarlas también se basa en la técnica del modelado, tal y como se ha mencionado.

En este artículo, se presenta la experiencia adquirida a los largo de los últimos años al introducir la técnica del *Macromodeling* en el laboratorio de simulación [5]. En la sección 2 se muestra la metodología desarrollada para la obtención de modelos de circuitos sencillos. Posteriormente en la sección 3, se desarrolla un modelo para un circuito más complejo no disponible en la librería aprovechando la experiencia adquirida por el alumno. Por último, se extraen las conclusiones a las que se ha llegado con la realización de esta experiencia en el laboratorio.

2.- METODOLOGÍA

El punto de partida supone que el alumno tiene un conocimiento preciso de las estructuras electrónicas más comunes así como de la sintaxis de SPICE. De esta manera se le propone el desarrollo de macromodelos de circuitos sencillos tipo sumador o restador, figura 1.

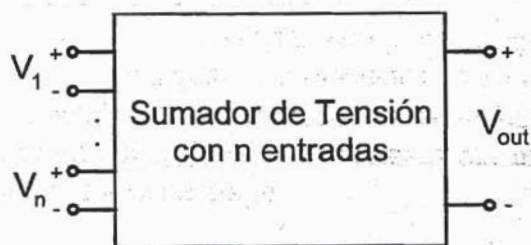


Figura 1.- Representación sencilla de un sumador de tensión.

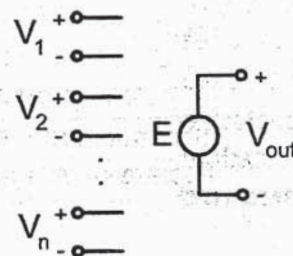


Figura 2.- Modelo para un sumador de tensión.

Las opciones de las que se disponen pueden reducirse a dos: o se intenta modelar el comportamiento de circuitos que ya se conocen basados en Amplificadores Operacionales o se simplifica el problema utilizando primitivas de SPICE, o sea, resistencias, condensadores, autoinducciones, fuentes de tensión o de intensidad tanto controladas como independientes. En este problema, evidentemente, se intenta simplificar la solución, de manera que la primera opción se deshecha.

Dado que el circuito en cuestión, sumador o restador, obedece a la función de transferencia indicada en la expresión (1), la solución más sencilla es utilizar una fuente de tensión controlada por tensión, VCVS (E), dependiente de dos o más entradas, figura 2. Además, se tiene la posibilidad de ajustar el factor de ganancia para cada entrada independientemente.

$$V_{out} = \sum_{i=1}^n K_i V_i \quad (1)$$

Dado que todos los circuitos estudiados por el alumno poseen cierta impedancia de entrada, la cual no es infinita, así como una impedancia de salida no nula, la propuesta para la realización de modelos consistirá en fijar siempre una etapa de entrada, una etapa de salida y una etapa de procesamiento de la señal, tal y como se representa en la figura 3. Esta manera de proceder no es ajena al alumno ya que en todos sus ejercicios de electrónica ha tenido que

calcular tanto impedancia de salida como de entrada, así como la ganancia, ya sea en tensión como en corriente, por lo que su asimilación es inmediata.

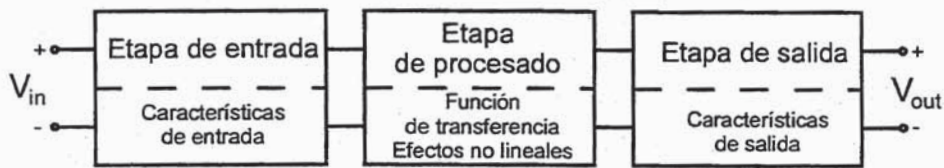


Figura 3.- Etapas básicas para el desarrollo de un modelo.

Planteada la estrategia a seguir para la realización de los modelos, es posible proponer otra solución para el sumador, figura 4. En este caso se utilizan fuentes de corriente controladas por tensión, G , de manera que la suma se realiza al conectar todas las ramas al mismo nodo. A su vez, se aísla la etapa de procesado de la de salida con una fuente de tensión controlada por tensión realizando la impedancia de salida deseada.

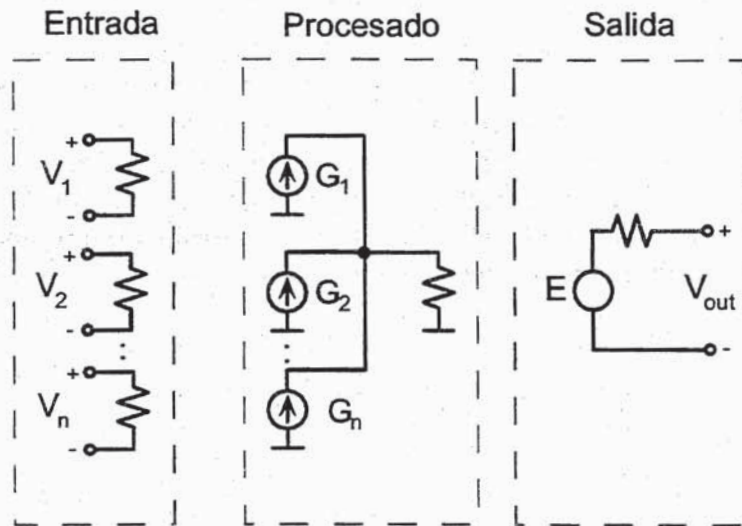


Figura 4.- Estructura equivalente para el modelo de un sumador de tensión de n entradas.

Proponer dos soluciones sencillas para el modelado de la misma estructura pone de manifiesto que la solución no es única por lo que el alumno puede desarrollar la suya propia. Elegir una propuesta u otra dependerá del compromiso adquirido entre la precisión del modelo y el tiempo de cálculo.

Una vez superado este primer paso, el siguiente objetivo es incluir la dependencia frecuencial que todo dispositivo electrónico posee. Evidentemente, la forma más directa es la inclusión de circuitos RC, ya sean atacados por fuentes de tensión o por fuentes de corriente, figura 5.



Figura 5.- Circuitos sencillos para la obtención de polos en la función de transferencia de los modelos propuestos.

Estos ejercicios tan básicos despiertan en el alumno una nueva forma de ver el diseño de circuitos la cual al fin y al cabo, se reduce a programar en un lenguaje muy especial.

A todo este trabajo se suma la comparación necesaria que se realiza entre los macromodelos propuestos y los circuitos reales a nivel de transistores. Además de los diferentes comportamientos observados se compara el tiempo necesario por el simulador, lo cual se introduce también como un parámetro del diseño. Así, es más interesante un macromodelo cuyo funcionamiento es aceptable en un rango de frecuencias de interés, que un diseño transistorizado cuyo consumo de CPU es elevado aunque mucho más preciso. En ciertos casos, esto último es imposible de realizar con versiones de evaluación por el número de transistores utilizados.

Los ejercicios que se proponen a continuación no son más que para ahondar en la técnica mostrada anteriormente. La propuesta de circuitos tales como limitadores de tensión, limitadores en corriente, generación de polos, generación de ceros, etc., se cierra con el desarrollo del macromodelo del Amplificador Operacional propuesto por Boyle, el cual no es sino una conexión de todos los modelos ya desarrollados, tal y como se muestra en la figura 6. De esta manera, el alumno comprende mucho mejor dicho macromodelo, sus limitaciones, sus inconvenientes, su rango de funcionamiento, y además, al tenerlo parametrizado, modelar uno u otro Amplificador Operacional es solo cuestión de variar el valor de ciertas resistencias, condensadores, etc.

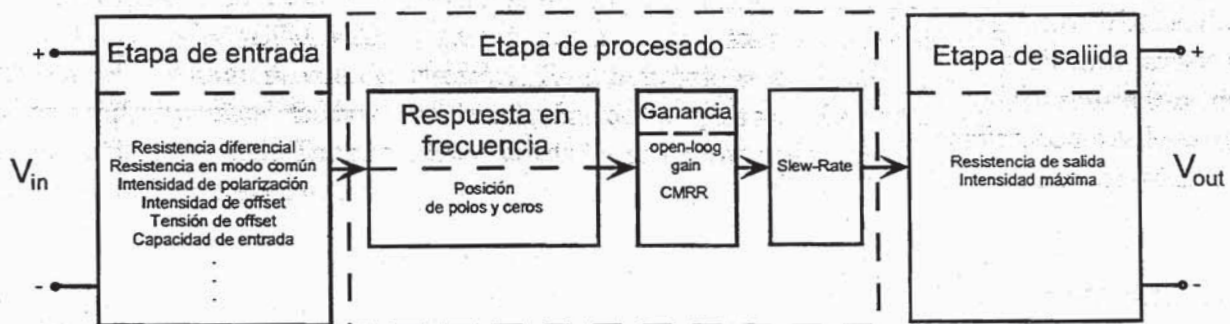


Figura 6.- Diagrama de bloques para el modelo de un Amplificador Operacional tipo 741.

III.- DESARROLLO DE UN MACROMODELO

Puesto que ya se ha obtenido un conocimiento extenso de las técnicas de modelado, se insta al alumno a desarrollar el macromodelo de un sistema electrónico complejo o, como en este caso, el macromodelo para un elemento activo no disponible en la librería.

Es bien conocido por todo el mundo la relación exponencial I-V de un diodo de silicio pero no lo es tanto el comportamiento de un diodo resonante, Resonant-Tunnel Diode, RTD [6]. Este tipo de diodos presentan una característica I-V dada por la figura 7. En ella se pueden distinguir tres zonas de comportamiento:

- a.- Zona de resistencia diferencial positiva que va desde 0 hasta V_p .
- b.- Zona de resistencia diferencial negativa que va desde V_p hasta una tensión V_v .
- c.- Zona de funcionamiento como un diodo.

La región que caracteriza a estos diodos y los hacen realmente útiles es la región de resistencia diferencial negativa.

Los modelos propuestos en la bibliografía para gran señal del diodo RTD se basan en tablas empíricas, lo cual es implementado en SPICE mediante el comando TABLE, lo que trae como consecuencia los innumerables problemas de convergencia que el simulador presenta.

La solución que se propone es la utilización de funciones continuas, las cuales se realizan con SPICE mediante los comandos FUNCTION o VALUE, que modelen su comportamiento. Las curvas experimentales I-V para estos diodos son diferentes en su forma pero en su gran mayoría presentan un único pico, a V_p , y matemáticamente pueden ser descritas mediante la superposición, tal y como muestra la figura 7, de dos componentes de la forma

$$I_{RTD}(V) = I_T(V) + I_D(V) \quad (2)$$

siendo $I_T(V)$ la intensidad de túnel e $I_D(V)$ la intensidad de diodo. En este modelo no se incluye ninguna resistencia parásita, R_s .

La intensidad de diodo, $I_D(V)$, se puede expresar mediante la función exponencial

$$I_D(V) = I_s e^{\frac{V}{N_V T}} \quad (3)$$

La intensidad de túnel, $I_T(V)$, puede obtenerse como la suma de la intensidad de la región de resistencia positiva, $I_{TP}(V)$, y la intensidad de la región con resistencia negativa, $I_{TN}(V)$. Teniendo en cuenta la característica I-V, figura 7, se puede elegir una función Gaussiana o una función exponencial para representar estas componentes ya que, aparte de ser funciones simples y suaves, varios de sus parámetros asociados como I_p , V_p , σ_p , σ_N , tienen una relación directa con los datos medidos y pueden ser muy fácilmente extraídos. La conexión entre ambas, se puede hacer multiplicando dichas funciones por una función peso. Por lo tanto, la corriente del túnel puede expresarse como

$$I_T(V) = I_{TP}(V) + I_{TN}(V) \quad (4)$$

siendo

$$I_{TP}(V) = I_p e^{\left\{ \frac{-(V-V_p)^2}{2\sigma_p^2} \right\}} e^{\left\{ \left(1 - \frac{V}{V_p} \right) e^{M(V-V_p)} \right\}} \quad (5)$$

y

$$I_{TN-G}(V) = \left\{ I_p e^{\left\{ \frac{-(V-V_p)^2}{2\sigma_N^2} \right\}} - I_{TP}(V) \right\} e^{\left\{ \left(\frac{V}{V_p} - 1 \right) e^{M(V-V_p)} \right\}} \quad (6)$$

$$I_{TN-E}(V) = \left\{ I_p e^{\left\{ \frac{-(V-V_p)}{2\sigma_N} \right\}} - I_{TP}(V) \right\} e^{\left\{ \left(\frac{V}{V_p} - 1 \right) e^{M(V-V_p)} \right\}} \quad (7)$$

El modelo completo en DC para el RTD debe de considerar una resistencia parásita, R_s , la cual únicamente produce una tensión extra $V_R = I_{RTD}(V) \cdot R_s$ a la tensión medida, de forma que $V_m = V + V_R$.

Teniendo en cuenta lo anterior, el modelo SPICE en DC para el diodo RTD puede ser implementado de la forma que muestra la figura 8. La fuente G representa las expresiones (5)-(7), que pueden realizarse a través de las funciones VALUE o FUNCTION [2].

En la figura 9 se recogen los resultados de simulación para la característica I-V de un diodo RTD con el modelado simétrico, Gaussiana-Gaussiana.

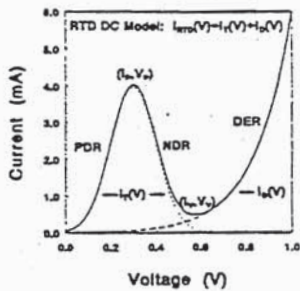


Figura 7.- Característica I-V para el diodo RTD

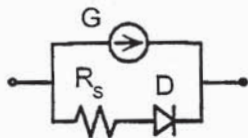


Figura 8.- Modelo SPICE para el diodo RTD.

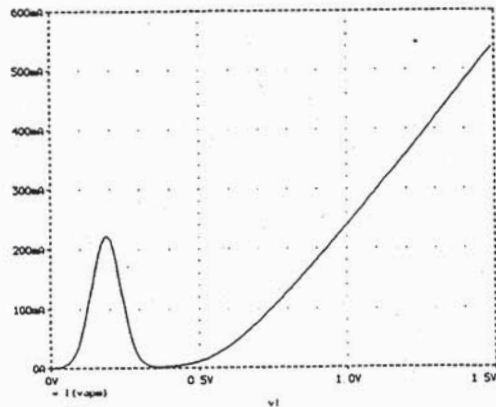


Figura 9.- Característica I-V del RTD simulado con PSPICE.

4.- CONCLUSIONES

En este artículo se han presentado las posibilidades que los programas de evaluación basados en el popular SPICE brindan a la hora de modelar el comportamiento de sistemas electrónicos, los cuales, o no pueden ser simulados por que su número de transistores excede del permitido, o por que no se dispone de un modelo para ellos en las librerías. De esta forma los alumnos son capaces de solucionar mediante esta técnica las deficiencias que se encuentran a la hora de desarrollar diseños complejos, los cuales requieren de sistemas electrónicos no disponibles para su simulador. Sumado a ello, la utilización de ciertas funciones proporcionadas por estos programas posibilitan la realización de modelos sencillos de ciertos dispositivos de los cuales únicamente se dispone de su característica I-V y cuyos parámetros tienen una relación directa con lo recogido en dicha característica.

AGRADECIMIENTOS

La realización de este trabajo ha contado con el apoyo económico del Gobierno de Navarra y CICYT. Asimismo, se agradece a todos los alumnos que han participado en la depuración de los modelos realizados, en particular, a Eduardo Zariquiegui y Luis Miguel Díaz.

REFERENCIAS

- [1] Actas del 1º Congreso sobre Tecnologías Aplicadas a la Enseñanza de la Electrónica, TAEE'94, 1994.
- [2] Microsim Corporation, *PSPICE User's Guide, version 6.2*, CA, USA, 1996
- [3] Connolly J. A., Choi P., "Macromodeling with SPICE", Prentice-Hall, 1992.
- [4] Boyle G. R., Cohn B. M., Pederson D. O., "Macromodeling of Integrated Circuit Operational Amplifiers", *IEEE J. of Solid-State Circuits*, Vol. SC-9, No. 6, pp. 353-363, December 1974.
- [5] Serrano L., "Macromodelado de Circuitos Electrónicos, Estudio de los Modelos del Diodo de Túnel Resonante, RTD", Informe Interno, U.P.Na., Octubre 1995.
- [6] Zhixin Y., Deen M. J., "New RTD Large-Signal DC Model Suitable for PSPICE", *IEEE Trans. on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, Vol. 14, No. 2, February 1995.