



SYMBULATOR: UN SIMULADOR SIMBÓLICO DE CIRCUITOS PARA CALCULADORA

Roberto Pérez Franco

perezfranco@yahoo.com

*Rama Estudiantil: Universidad Tecnológica de Panamá
Procedencia: Ciudad de Panamá, Panamá*

EXTRACTO

El proyecto Symbulator consiste en crear un simulador simbólico de circuitos lineales poderoso, capaz de correr en una calculadora, para ayudar a los estudiantes de circuitos con la parte matemática del análisis a lo largo de sus diferentes cursos, y permitir la solución numérica y simbólica en corriente directa, corriente alterna, análisis transitorio y dominio de la frecuencia de un circuito lineal cuya descripción sea sencilla y reutilizable. Una versión del Symbulator ya ha sido programada con éxito en el lenguaje BASIC de las calculadoras TI-89.

SOBRE LA NECESIDAD DE UN SIMULADOR SIMBÓLICO

Para el ingeniero, la matemática es - más que un objetivo - una herramienta de trabajo. En el análisis de circuitos en ingeniería, los cálculos matemáticos son un medio para llegar a conocer la respuesta de un circuito dado; no son un propósito en sí mismos. Cuando un estudiante se inicia en el análisis de nuevos circuitos, debe enfrentar dos retos. El primero y más importante es comprender a cabalidad la naturaleza del nuevo tipo de circuitos que se le presenta, la lógica que yace detrás de su análisis, y sus aplicaciones en la ingeniería. El segundo es dominar los métodos matemáticos que le permitirán estudiar la respuesta de este tipo de circuitos. Es deseable que el estudiante se concentre en lo primero, dejando lo segundo a una máquina asistente.

Cuando se resuelven circuitos a mano, una infinidad de detalles insignificantes, tales como un signo que se pierde de vista o un punto decimal que se coloca mal, pueden hacer la diferencia entre una respuesta correcta y una incorrecta. Los ingenieros profesionales pueden utilizar en su lugar de trabajo un simulador de circuitos numérico en una computadora personal. La mayoría de los estudiantes no

tienen esta opción en el salón de clases debido a limitantes académicas y económicas. En muchos casos los errores en el análisis de circuitos se deben a una mala manipulación matemática de las fórmulas y los valores, producto de ojos cansados o la presión mental propia de un examen universitario.

A inicios de este año me fijé como meta crear el simulador de circuitos lineales más poderoso de cuantos pueden correr en una calculadora, diseñado de tal forma que ayude al estudiante en el salón de clases con la parte matemática del análisis de circuitos a lo largo de sus diferentes cursos. El simulador debía permitir análisis tanto numérico como simbólico, en corriente directa, corriente alterna, análisis transitorio y dominio de la frecuencia, y aceptar una amplia gama de elementos lineales.

TRABAJOS PREVIOS SOBRE EL TEMA

Un paso preliminar en mi proyecto fue perfeccionar los mejores simuladores de circuitos para calculadoras disponibles en ese momento. Lo hice con dos de ellos.

El primero fue el simulador numérico CSim 2.61 para HP48GY, creado por el ingeniero finés Per Stenius en 1991. Tras varias semanas de consultas y muchas horas de programación, presenté el simulador numérico CSim 3.01. Esta versión es más fácil de usar que la versión anterior. Programé paralelamente dos variantes del CSim: una para estudiantes novatos, llamada Assistant II y otra enfocada al análisis de circuitos de potencia, llamada ZAC 1.4. El algoritmo, por desgracia, no se prestaba para aplicaciones simbólicas en la HP48GX, así que abandoné este curso de acción.

El segundo fue el simulador numérico NFAP para HP48GX., creado por Don Robinsons en 1994. Escribí dos variantes simbólicas de este programa: el Buscador Simbólico de Voltajes (o Symbolic Voltage

Finder) y el Buscador Simbólico de Corrientes (o Symbolic Current Finder). No estuve satisfecho: estos simuladores simbólicos funcionaban bien en corriente alterna, pero tenían demasiadas limitaciones y no llenaban el propósito de ser una herramienta completa para acompañar al estudiante de circuitos a lo largo de sus estudios universitarios.

En ese punto supe que era necesario atacar el problema en una forma diferente, con un método y un simulador totalmente nuevo.

PLANTEAMIENTO: EL PROYECTO SYMBULATOR

Llamé a mi proyecto Simulador de Circuitos Simbólicos, y lo apodé Symbulator. Lo visualicé como una herramienta tan poderosa que no fuese comparable con ningún otro simulador antes que él, usando como plataforma una calculadora en el entorno del salón de clases, con las características ya expuestas arriba.

ALTERNATIVAS CONSIDERADAS

Métodos considerados. En cuanto al método de análisis de circuitos que utilizaría para desarrollar el nuevo algoritmo, consideré dos alternativas: el método del análisis de nodos (simple, modificado o con transformada gyrator) y el método de generación de ecuaciones.

Calculadoras consideradas. En cuanto a la calculadora que serviría de plataforma para desarrollar y ejecutar el programa, consideré como alternativas las calculadoras Hewlett-Packard y Texas Instruments existentes en ese momento.

EVALUACIÓN DE LA VIABILIDAD DE ESTAS ALTERNATIVAS

Evaluación de métodos.

El método del análisis de nodos es poderoso para el análisis de circuitos. Sus ventajas se manifiestan básicamente en la simulación de circuitos numéricos. Sus desventajas son la complejidad de la extracción de respuestas del vector final resultante y el difícil manejo de sus matrices en el caso de circuitos simbólicos.

El método de generación de ecuaciones es un método innovador y flexible. Consiste en generar y

resolver ecuaciones que describan los voltajes y corrientes del circuito. Su ventaja principal es la facilidad en la descripción de fuentes dependientes y la exactitud en la simulación tanto simbólica como numérica. Su desventaja es que su programación es mucho más compleja que el método del análisis de nodos.

Evaluación de calculadoras

Los sistemas de álgebra de las calculadoras Hewlett-Packard HP48GX y HP49G no poseen las capacidades de manipulación simbólica y resolución de ecuaciones requeridas por mi simulador. El comando solve() del modelo HP49G es muy débil.

La T189 posee un sistema de álgebra muy poderoso, basado en un programa de computadora de nombre Derive, que permite la manipulación simbólica y el reemplazo automático de expresiones definidas. Posee el comando solve() más poderoso que haya tenido calculadora alguna en la historia.

El comando solve() se usa para resolver ecuaciones no lineales simultáneas.

SELECCIÓN Y JUSTIFICACIÓN

Selección del método. Decidí utilizar el método de la generación de ecuaciones.

Justificación. Es mucho más amigable para el usuario, pues requiere descripciones de circuito mucho más sencillas que el método del análisis de nodos.

Selección de la calculadora. Seleccioné la calculadora T189 para ser la plataforma que daría soporte al simulador.

Justificación. Su software algebraico es el más poderoso. Por ahora, es la única que posee las características necesarias para manejar un programa de esta naturaleza.

PLAN DE ACCIONES

Programé primero una aplicación para análisis de corriente directa con los elementos básicos de circuito: resistor y fuentes independientes. Una vez estuvo lista, me basé en ella para programar las aplicaciones de análisis de corriente alterna, análisis en dominio de la frecuencia y análisis transitorio.

Enriquecí la variedad de elementos aceptados, para incluir inductores, capacitores, amplificadores operacionales, transformadores ideales, inductancias mutuas y bipuertos con los seis parámetros $z/y/h/g/a/b$.

Inicié la programación del Symbulator aprovechando los días libres de la Semana Santa, en abril de 1999. Aunque todavía estoy perfeccionando su código fuente, es claro que ha sido un verdadero éxito.

A continuación, describiré algunas de sus características principales.

SOBRE LA DESCRIPCIÓN DEL CIRCUITO

El circuito con el cual se alimenta el Symbulator se describe usando una notación particular, similar a la del simulador SPICE, con la particular ventaja de ser mucho más sencilla para definir redes bipuertos y fuentes dependientes de corriente y voltaje. Las fuentes dependientes se describen en la misma forma en que lo hacen los libros de texto, sin necesidad de una notación especial. Esto hace que el Symbulator sea más fácil de usar que el SPICE en lo que a fuentes dependientes se refiere.

SOBRE LA SIMULACIÓN DEL CIRCUITO

Para simular un circuito, basta con escribir en la línea de comando de la calculadora el tipo de análisis que se desea, seguido de la descripción del circuito. Existen cuatro análisis disponibles: corriente directa DC, corriente alterna AC, análisis transitorio TR y dominio de la frecuencia FD. En el caso de corriente alterna, se solicita la frecuencia de trabajo, la cual puede dejarse en términos de una variable simbólica.

Internamente, el Symbulator escribirá las ecuaciones que describen el comportamiento de ese circuito, las resolverá y almacenará las respuestas en variables con nombres característicos. Todo análisis da como respuestas expresiones para los voltajes en cada nodo y las corrientes en cada elemento del circuito. En el caso de corriente directa y alterna, el programa también da como respuestas las potencias consumidas por cada elemento del circuito. En caso de dominio de la frecuencia y análisis transitorio, el programa se apoya en las rutinas de transformada de Laplace escritas por el danés Lars Frederiksen, quien es mi amigo personal.

HERRAMIENTAS

El Symbulator posee herramientas que facilitan aún más el trabajo del estudiante. He escrito herramientas para encontrar el equivalente Thévenin de un circuito (ya sea activo o pasivo), los parámetros $z/y/h/g/a/b$ de un circuito de dos puertos, las ganancias de un amplificador y para graficar los diagramas de Bode de amplitud y fase. Las dos primeras trabajan en corriente directa, corriente alterna y dominio de la frecuencia, permitiendo encontrar las funciones de transferencia de un circuito en términos de la frecuencia s . En el área de electrónica, escribí herramientas para simular un transistor de unión bipolar (BJT) en corriente directa, y detectar su región de operación. En el área de potencia, escribí herramientas para encontrar las pérdidas, la regulación y la eficiencia de un transformador real a partir de sus pruebas de corto circuito y circuito abierto, y su carga nominal. Estas herramientas se apoyan en las aplicaciones de simulación del Symbulator para agilizar procedimientos generalmente tediosos a mano. Son muy fáciles de usar.

LIMITACIONES DEL SYMBULATOR

El Symbulator tiene básicamente dos limitaciones: circuitos no lineales y circuitos muy grandes. Existen alternativas para aliviar estas limitaciones. Para la primera, el modelado de los elementos no lineales usando sus equivalentes lineales. Para la segunda, reducir partes del circuito a sus equivalentes en términos de Thévenin o de bipuerto.

EJEMPLOS DE PROBLEMAS RESUELTOS CON EL SYMBULATOR

Presento ahora una selección de cuatro problemas de circuitos lineales que fueron resueltos usando únicamente el Symbulator, con una sola línea de comandos: uno de corriente directa, uno de corriente

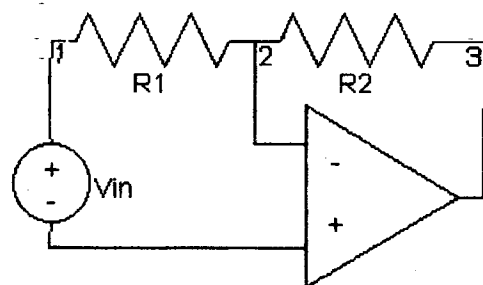


Fig. N°1. Circuito del Ejemplo 1

alterna, uno de análisis transitorio y uno de dominio de la frecuencia.

Ejemplo 1: Corriente directa. Dado el circuito de la figura N° 1, encuentre el voltaje en el nodo 3. Para resolver este problema usando Symbulator, escriba en el área de entrada de su calculadora la siguiente línea de comandos:

```
scs\dc((e1,1,0,vin,0;r1,1,2,r1,0;r2,2,3,r2,0;o1,0,2,3,0)):v3
```

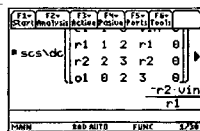


Fig. N°2. Pantalla de la TI-89 para el Ejemplo1

La primera parte de esta línea es la orden de realizar un análisis en corriente directa al circuito que se describe entre paréntesis. La segunda es la solicitud del voltaje en el nodo 3. Podemos solicitar el voltaje en cualquier nodo y la corriente y potencia consumida en cualquier elemento del circuito. Nótese sencilla descripción del circuito (los ceros al final de la descripción de cada elemento son relleno). Mi calculadora TI-89 con 187KB libres en su RAM tomó 44 segundos en resolver este problema. La respuesta se muestra en la pantalla: $(-r2 \text{ vin})/r1$. Veamos ahora otro ejemplo.

Ejemplo 2. Corriente alterna. Un circuito consiste de una resistencia en serie con una capacitancia. ¿Cuáles son sus valores si al aplicar un voltaje de 240 V r.m.s. y 200 Hz se obtiene Una corriente de $1.2 + 1.6i$ A? Para resolver este problema usando Symbulator, escriba en el área de entrada de su calculadora la siguiente línea de comandos:

```
scs\ac((e1,1,0,240.*sqrt(2),0;r1,1,2,r,0;cx,2,0,c,0),2*Pi*200.):solve(real(irl)=1.2 and imag(irl)=1.6,{r,c})
```

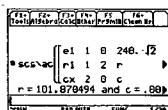


Fig. N°3. Pantalla de la TI-89 para el Ejemplo2.

La primera parte de esta línea es la orden de realizar un análisis en corriente alterna al circuito que se describe entre paréntesis. Nótese que se dieron valores simbólicos a la resistencia y la capacitancia. La segunda parte es para solicitar los valores de resistencia y de capacitancia que cumplen con la corriente compleja descrita por el encabezado

del problema. Mi calculadora TI-89 con 187KB libres en su RAM tomó 32 segundos en resolver este problema y dar la respuesta de 102 ohmios y 5.86 microfaradios (debe darse scroll hacia la derecha para ver en la pantalla de la calculadora el resto de la respuesta).

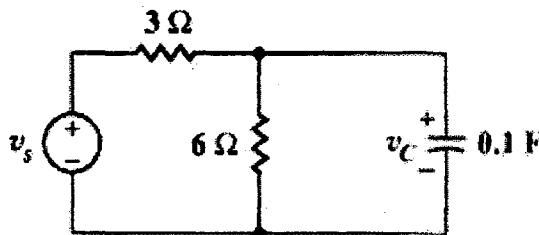


Fig. N°4. Circuito del Ejemplo 3

Ejemplo 3: Análisis transitorio. Dado el circuito de la figura N°4, encuentre una expresión simbólica para el voltaje $vc(t)$ si $vs(9 \cos(t))$ y $vc(0)=2V$. Para resolver este problema usando Symbulator, escriba en el área de entrada de su calculadora la siguiente línea de comandos:

```
scs\tr((es,1,0,9*cos(t),0;r3,1,c,3,0;r6,c,0,6,0;cx,c,0,1/10,2)):vc
```

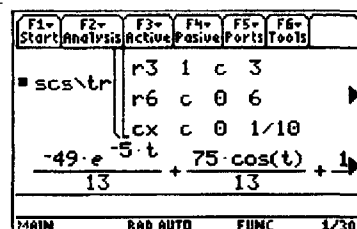


Fig. N°5. Pantalla de la TI-89 para el Ejemplo 3.

La primera parte de esta línea es la orden de realizar un análisis transitorio al circuito que se describe entre paréntesis. Nótese dos cosas: 1) el nodo c tiene una letra por nombre, y 2) la condición inicial del capacitor se colocó en el quinto espacio de su descripción. Este quinto espacio es precisamente para colocar condiciones iniciales de capacitores e inductores en análisis transitorio, y en los demás elementos y análisis suele ser cero. La segunda parte de la línea es para pedir el voltaje en el nodo c, o sea $vc(t)$. Mi calculadora TI-89 con 187KB libres en su RAM tomó 80 segundos en resolver este problema (la respuesta sigue hacia la derecha de la pantalla). El análisis transitorio es el que más tiempo consume. Recuérdese que el simulador nos entrega como respuestas las expresiones de todos los voltajes y Corrientes del circuito, y a cada uno debe aplicarle la

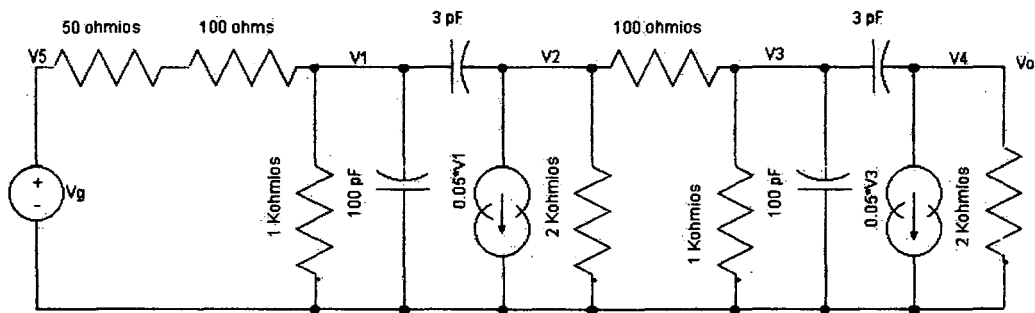


Fig. N°6. Circuito del Ejemplo 4.

transformada inversa de Laplace para llevarla al dominio del tiempo. Por esto tarda más.

Ejemplo 4: Dominio de la frecuencia. Dado el circuito de la figura N°6, grafique el diagrama de ganancia de Bode para V_4/V_5 y frecuencias entre 104 y 1013 rad/seg. Para resolver este problema usando Symbulator, escriba en el área de entrada de su calculadora la siguiente línea de comandos (Figuras 7 y 8).

La primera parte de esta línea es la orden de realizar un análisis en dominio de la frecuencia al circuito que se describe entre paréntesis. Este es un circuito considerablemente grande. La segunda parte es para activar el graficador de Bode del Symbulator. Simular el circuito en mi calculadora TI-89 con 187KB libres en su RAM tomó 4 minutos con 5 segundos. Graficar el diagrama de ganancia de Bode tomó 52 segundos. El tiempo total de trabajo de la calculadora es, por lo tanto, inferior a 5 minutos.

Que sirvan estos problemas como una rápida muestra de lo que puede hacer el Symbulator. En la página del programa en la red Internet se pueden encontrar alrededor de cuarenta ejemplos y problemas resueltos, cada uno con una característica distintiva.

RESULTADOS HASTA EL PRESENTE

Hasta el presente, los resultados obtenidos por el Symbulator son sumamente satisfactorios.

Personalmente, lo utilizo en mis clases y me siento complacido por la facilidad con que se describe el circuito, la precisión de los resultados y la velocidad del programa. Con el Symbulator, he logrado resolver en un par de minutos algunos problemas de análisis transitorio que a mano habrían tomado un cuarto de hora o más. He aplicado el Symbulator con mucho éxito a problemas de los cursos de Circuitos I, Circuitos II, Circuitos III, Electrónica I, Electrónica II y Conversión de Energía I.

```
scs\fd ([e1,5,0,1.,0;r1,5,1,150.,0;r2,1,0,1000.,0;cc1,1,0,1E-10,0;
cc2,1,2,3E-12,0;jd1,2,0,0.05*v1,0;r3,2,0,2000.,0;r4,2,3,100.,0;
r5,3,0,1000.,0;cc3,3,0,1E-10,0;cc4,3,4,3E-12,0;jd2,4,0,0.05*v3,0;
r6,4,0,2000.,0]):scs\plot()
```

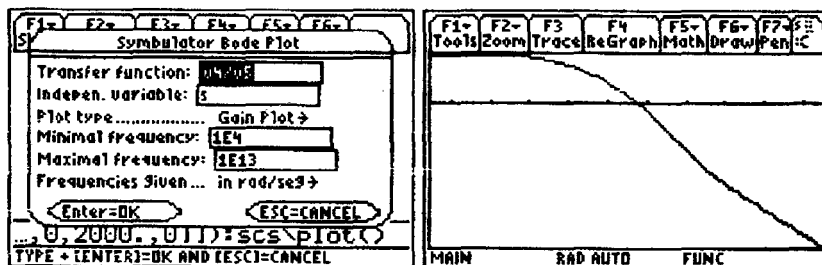


Fig. N°7 y N°8. Pantallas de la TI-89 para el Ejemplo 4.

He recibido muchos comentarios positivos de docenas de personas que utilizan este simulador como una herramienta cada vez más importante en sus estudios. A medio año de haber sido presentado en la red Internet el Symbulator tiene usuarios en todo el mundo, quienes han descargado gratuitamente el programa desde su página oficial. He recibido mensajes de agradecimiento y reportes de funcionamiento de estudiantes y profesionales de la ingeniería eléctrica y áreas afines, provenientes de lugares tan diversos y distantes como Australia, Austria, Bélgica, Brasil, España, Estados Unidos (de los estados de California, Kentucky, Missouri, New York, Ohio, Pennsylvania, Texas), Finlandia, Francia, Gran Bretaña (Oxford), Israel, Italia, Noruega, la República Checa y Suiza, entre otros. Muchos de estos usuarios reportaron estar compartiendo el programa con sus compañeros de clases, creando así una cadena que ha aumentado el número de usuarios que se benefician del Symbulator. Un estudiante de Texas reportó que sólo en su salón de clases, doce estudiantes utilizaban el programa Symbulator para su curso de circuitos.

Quiero citar aquí el más elocuente de los comentarios que he recibido. Lo envió Chris Riegel, un estudiante de ingeniería eléctrica y de computadoras y presidente de la Rama estudiantil del IEEE en la Universidad de Kentucky: "Para los cursos EE 211 y EE 221, el Symbulator en verdad funciona mejor que el SPICE porque se obtienen los resultados simbólicamente".

EVALUACIÓN DE COSTOS VS. BENEFICIOS

La programación del Symbulator para la TI-89 ha tenido un costo relativamente bajo en tiempo y en dinero. Desarrollar el concepto básico me tomó una semana de meditaciones y consultas. Programarlo me ha llevado menos de cien horas de trabajo. Ya me he ahorrado más tiempo que el que invertí, gracias a su ayuda en exámenes y tareas. La inversión que he hecho en calculadoras TI-89 y sus cables para conectarlas con mi computadora es de menos de B/.500.00.

Dado que se ofrece de forma gratuita en la Internet el costo del Symbulator para un estudiante que ya tenga su TI-89 es nulo. Para aprender a usar el Symbulator en su TI-89, el tiempo que necesita un alumno promedio es alrededor de dos horas, que es lo que toma leer y entender a cabalidad la documentación del programa. El tiempo se reduce para estudiantes familiarizados con el SPICE u otro simulador. Según mi propia experiencia puedo decir que en sus primeras semanas con el Symbulator, el estudiante se ahorra más tiempo que el invertido si lo usa para resolver circuitos

en sus clases, tareas y exámenes. Además, reducirá dramáticamente el riesgo de respuestas equivocadas: al programa le basta con que el usuario defina bien el circuito, lo cual es muy fácil con la sencilla notación usada. El Symbulator brinda al estudiante de ingeniería eléctrica y electrónica muchos beneficios, sin gasto en dinero y a un bajo costo en tiempo.

El éxito obtenido por el Symbulator se debe medir en la mejora en el aprendizaje y rendimiento de los muchos estudiantes que ya lo están utilizando alrededor del mundo para enfocarse en el concepto de los circuitos que estudian, en vez de la matemática que involucra su análisis.

Les invito a visitar el sitio en la red del Symbulator (<http://scs.ticalc.org>) y examinar los más de cuarenta ejemplos y problemas resueltos, los halagadores comentarios de los usuarios alrededor del mundo y la descripción completa de la instalación y utilización del Symbulator y todas sus herramientas.

CONCLUSIÓN TÉCNICA

Hemos visto que el proyecto Symbulator se ha llevado a cabo con éxito, y que son muchos los estudiantes que se están beneficiando con él. Ahora sólo resta esperar a depurar cualquier error que pudiese descubrirse en el código. Para concluir, quiero presentar un comentario que Jay Myers, un estudiante de Ingeniería Eléctrica en la Universidad de Texas en Arlington (EUA) y asiduo usuario del Symbulator, hiciera en un grupo de discusión sobre ingeniería eléctrica en la red Internet.

«Este programa es el mejor simulador de circuitos para calculadoras. Si, hay otros, pero ninguno es mejor. Este programa es similar al SPICE en la manera en que se usa, y es incluso más fácil cuando se trata de simulación de fuentes dependientes y bipuertos. Una vez se ha resuelto el circuito, el usuario tiene toda la información que podría querer, voltaje en los nodos, corriente en los elementos, potencia absorbida por los elementos y caída de voltaje en los elementos mediante diferencia de voltajes en los nodos. Resuelve simbólicamente, a diferencia de casi todos los demás simuladores de circuito (incluso para PC). Este programa es, en verdad, el mejor programa para análisis de circuitos que he visto. La resolución de circuitos grandes puede ser lenta y agotar la memoria de la calculadora. Existen alternativas, las cuales incluyen herramientas para partir el circuito en grupos de equivalentes Thévenin o bipuertos. No podría ensalzar este programa lo suficiente. Es difícil de creer que el señor Pérez-Franco permita al mundo usar su fantástico programa libre de costo. ¡excelente trabajo!»