

INTRODUCCIÓN AL CAD DE MICROONDAS, MICROWAVE OFFICE

**Rosa Barrio Garrido
Magdalena Salazar Palma
Grupo de Radiofrecuencia. UC3M**

Índice

| | |
|--|-----------|
| Introducción al entorno de simulación Microwave Office | 3 |
| <i>1. Breve descripción del interfaz del programa</i> | <i>3</i> |
| <i>2. Creación del circuito</i> | <i>5</i> |
| <i>3. Simulación del circuito</i> | <i>13</i> |
| <i>4. Optimización del circuito</i> | <i>17</i> |

INTRODUCCIÓN AL ENTORNO DE SIMULACIÓN MICROWAVE OFFICE

El programa *Microwave Office* es una herramienta software que permite simular y optimizar la respuesta de un circuito en tecnología planar –*stripline*, *microstrip*...-. Los parámetros físicos del circuito son definidos a priori por el usuario mediante un “esquemático” (*circuit schematics*): en él se define el tipo de sustrato a emplear y las dimensiones físicas del diseño, tales como longitudes, anchuras y grosores de las líneas, así como la forma global del circuito o la disposición de las interconexiones entre los distintos componentes. Por ello es necesario, antes de crear el esquemático dentro del entorno de *Microwave Office*, realizar los cálculos previos que permiten conocer las dimensiones del circuito a partir de las impedancias deseadas de las líneas, la frecuencia de trabajo y el tipo de sustrato. Como luego se verá, para calcular las dimensiones de este diseño inicial puede ser de utilidad la herramienta TXLine, incluida en el *Microwave Office*.

Una vez realizado el diseño inicial y definido el esquemático en el entorno de trabajo de *Microwave Office*, la respuesta del circuito puede ser simulada en aquellos puntos de frecuencia que el usuario haya definido previamente, es decir, el dispositivo puede ser caracterizado eléctricamente mediante la representación gráfica de la matriz *S* –matriz de parámetros de dispersión-, o, si se prefiere, mediante la matriz de impedancias o de admitancias. Después de simularlo, el diseño puede ser optimizado de forma automática para mejorar la respuesta del dispositivo.

A continuación se presenta la descripción básica del entorno de simulación.

1.- Breve descripción del interfaz del programa.

Para ejecutar el programa, se pincha en el icono de acceso directo situado en el escritorio (llamado **AWR Microwave Office 2002**). Aparece entonces una ventana o interfaz de programa que representa el entorno de simulación sobre el cual se va a trabajar (ver figura 1). Esta ventana representa un “proyecto”, o “*project*”, el cual se puede nombrar, guardar, y volver a abrir tantas veces como se desee, y dentro del cual se va a definir, simular y optimizar el circuito. Los grupos de elementos más importantes del interfaz principal, son (ver figura 1):

- **Menús:** menús desplegables donde aparecen todas las opciones y comandos.
- **Barra de herramientas:** fila de botones donde se encuentran los comandos de uso más frecuente. Entre otros, por ejemplo, el botón en forma de “rayo” para ejecutar la simulación una vez se hayan definido todos los elementos necesarios.
- **Project Browser:** columna principal a la izquierda del interfaz. En esta columna se encuentran todos los datos y componentes que forman el proyecto. En particular, interesan las siguientes carpetas para comenzar:
 - **Project Options:** para definir las frecuencias de simulación, las unidades globales y la impedancia de referencia, entre otras cosas.
 - **Circuit Schematics:** Página de diseño en la que se realiza el esquemático o implementación de los elementos que componen el circuito a simular.

- **Graphs**: Carpeta de la que van a colgar los gráficos que se definirán cuando se desee simular el circuito.
- **Optimizer Goals**: para definir los objetivos del optimizador.
- **Workspace**: área central de la ventana, en la que se visualizan los diferentes elementos activos sobre los que se trabaja en cada instante: esquemáticos, gráficas, etc.
- **Tabs**: lengüetas situadas en la parte inferior izquierda de la ventana, que permiten elegir el tipo de *browser* a visualizar en el área izquierda del interfaz. El *browser* que aparece por defecto es el del proyecto, o *Project Browser*, denominado “*Proj*” en el *tab* correspondiente. Los otros *browsers*, son:
 - **Elem**: Despliega los elementos definidos en el entorno de trabajo del programa *Microwave Office* para implementar los circuitos, tanto en tecnología *stripline* como en *microstrip*. Estos elementos son, desde tramos de líneas, hasta líneas acopladas, pasando por uniones en T, divisores Wilkinson, etc. También aquí se encuentran definidos los diferentes tipos de sustratos (ver figura 2).
 - **Var**: Permite un acceso rápido a los valores de todos los parámetros del circuito definidos por el usuario (dimensiones de las líneas, parámetros eléctricos del sustrato, etc). Permite activar las opciones “*tune*”, para el ajuste manual, y “*optimize*”, para la optimización automática de los valores de estos parámetros.
 - **Layout**: Muestra las opciones para diseñar y representar el *layout* del circuito.

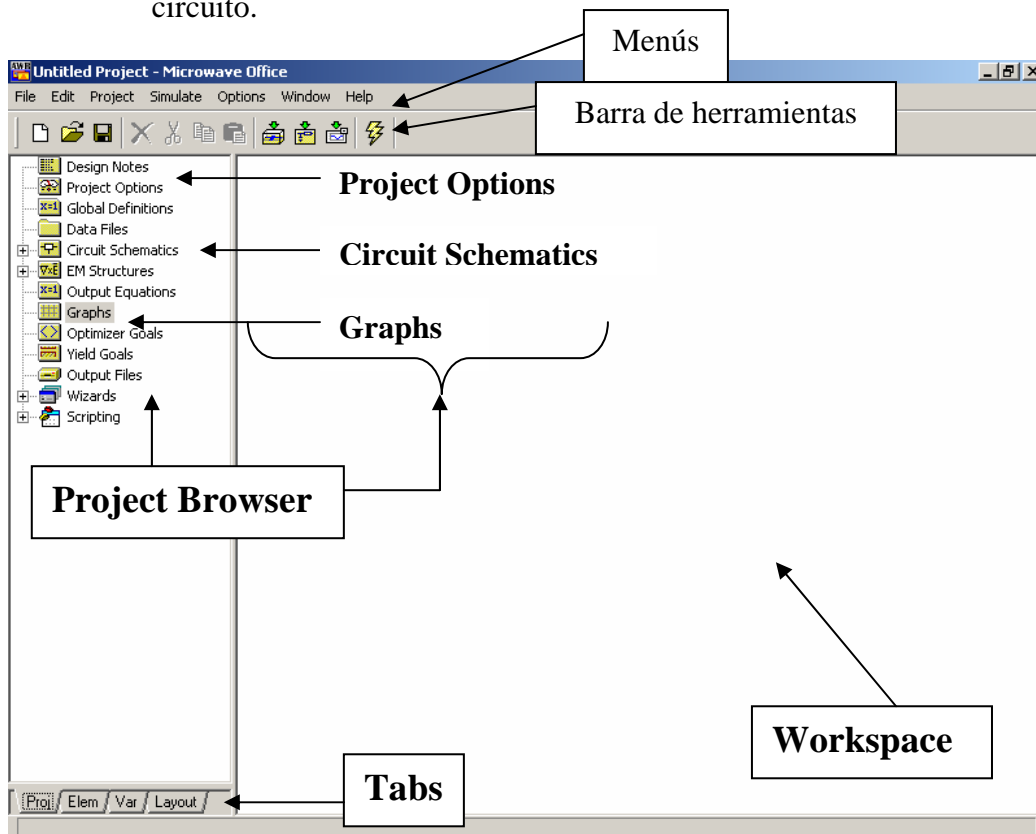


Figura 1

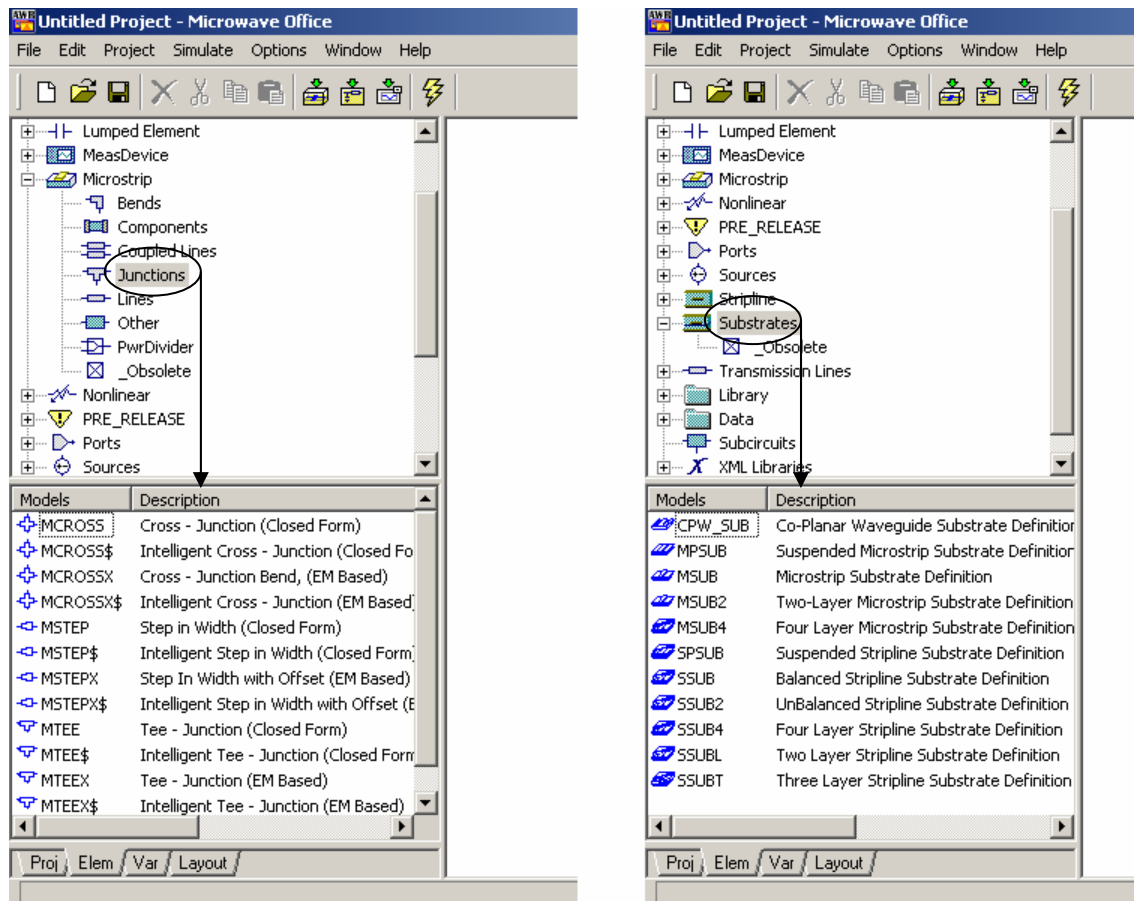


Figura 2: ejemplos de elementos disponibles en *Microwave Office*. Element browser.

Comentario a la figura 2: En esta figura se ven dos ejemplos (izquierda y derecha) de algunos de los tipos de elementos con los que cuenta el *Microwave Office* para implementar un circuito. Para tener acceso a estos elementos se ha desplegado el menú correspondiente a la lengüeta o *tab* denominada “Elem” (*Element Browser*). Una vez desplegado este menú, en el ejemplo de la izquierda se ha pinchado con el ratón en la opción “*microstrip*”, desplegándose un submenú relativo a los diferentes tipos de elementos disponibles en tecnología *microstrip*. Sobre este submenú de la parte superior de la pantalla, se ha elegido “*junctions*”. En la parte inferior aparecen, entonces, diversos tipos de uniones *microstrip*, como se puede apreciar. En el ejemplo de la derecha, se ha pinchado con el ratón la opción “*substrates*”, dentro del menú situado en la parte superior de la pantalla. Haciendo esto aparecen, en la parte inferior del interfaz, los distintos tipos de sustratos disponibles en la librería del *Microwave Office*.

2.- Creación del circuito.

Al abrir el programa *Microwave Office* aparece un nuevo proyecto en blanco, en el que hay que definirlo todo: el diseño del circuito, el sustrato, los puntos de frecuencia para la simulación, etc. Se puede guardar el proyecto en cualquier momento, sea cual sea el estado en el que se encuentre su desarrollo. Para hacerlo, basta con desplegar el menú “*File*” (barra superior del interfaz) y seleccionar “*Save Project*”. Los proyectos *Microwave Office* se guardan con la extensión *.emp*. Así mismo, se puede recuperar cualquier proyecto guardado con anterioridad desplegando el menú “*File*” y seleccionando “*Open Project...*”

Una vez abierto un proyecto en blanco (cada vez que se ejecuta el programa se abre un proyecto en blanco), los pasos básicos recomendados para implementar un circuito o esquemático son los siguientes:

1) Definición de los puntos de frecuencia y unidades globales: Project Options

Dentro del menú del *Project Browser* (columna izquierda del interfaz), al hacer doble click con el ratón sobre la opción “*Project Options*” aparece un cuadro de diálogo con diversas pestañas, como el que se muestra en la figura 3.

Con este cuadro de diálogo, y dentro de la pestaña *Frequency Values*, se puede definir el barrido de frecuencias para la simulación posterior. Este conjunto de frecuencias definirá, por tanto, el eje de abscisas en los gráficos resultantes de las simulaciones. Para ello se define la frecuencia inicial (*Start*), la frecuencia final (*Stop*), y el salto entre puntos de frecuencia consecutivos (*Step*).

En ese mismo cuadro de diálogo *Project Options*, pero dentro de la pestaña *Global Units*, se pueden definir las unidades que, por defecto, aparecerán en los cuadros de diálogo que definen las dimensiones de cada elemento del esquemático, por ejemplo. Especialmente hay que tener en cuenta que las dimensiones relativas a longitudes aparecen, por defecto, en micrometros, por lo que puede ser conveniente cambiarlas a milímetros.

Si se desea cambiar la impedancia de referencia, que por defecto es de 50 ohmios, se puede pinchar en la pestaña *Raw Data Format*, dentro del cuadro de diálogo *Project Options*.

2) Construcción del esquemático

El esquemático define el sustrato del circuito, los parámetros físicos o dimensiones del mismo –longitudes, anchuras y grosores de las líneas-, los elementos que lo componen y los puntos de interconexión entre ellos.

- **Creación del esquemático:** para realizar un esquemático, es necesario primero crear uno nuevo y darle nombre. Para ello, basta con ir al *Project Browser* (columna izquierda, ver figura 1), situarse con el ratón sobre la opción *Circuit Schematics*, y abrir el menú correspondiente haciendo click con el botón derecho. En el menú desplegable que aparece hay que seleccionar la opción *New Schematic*. Entonces aparece un cuadro de diálogo en el cual hay que introducir el nombre con el que identificar al circuito que vamos a crear. Este nombre no tiene por qué corresponderse con el nombre del proyecto. De hecho, un mismo proyecto puede tener varios esquemáticos, todos los cuales, a medida que vayan siendo creados, colgarán de la opción *Circuit Schematics* en el *Project Browser*.

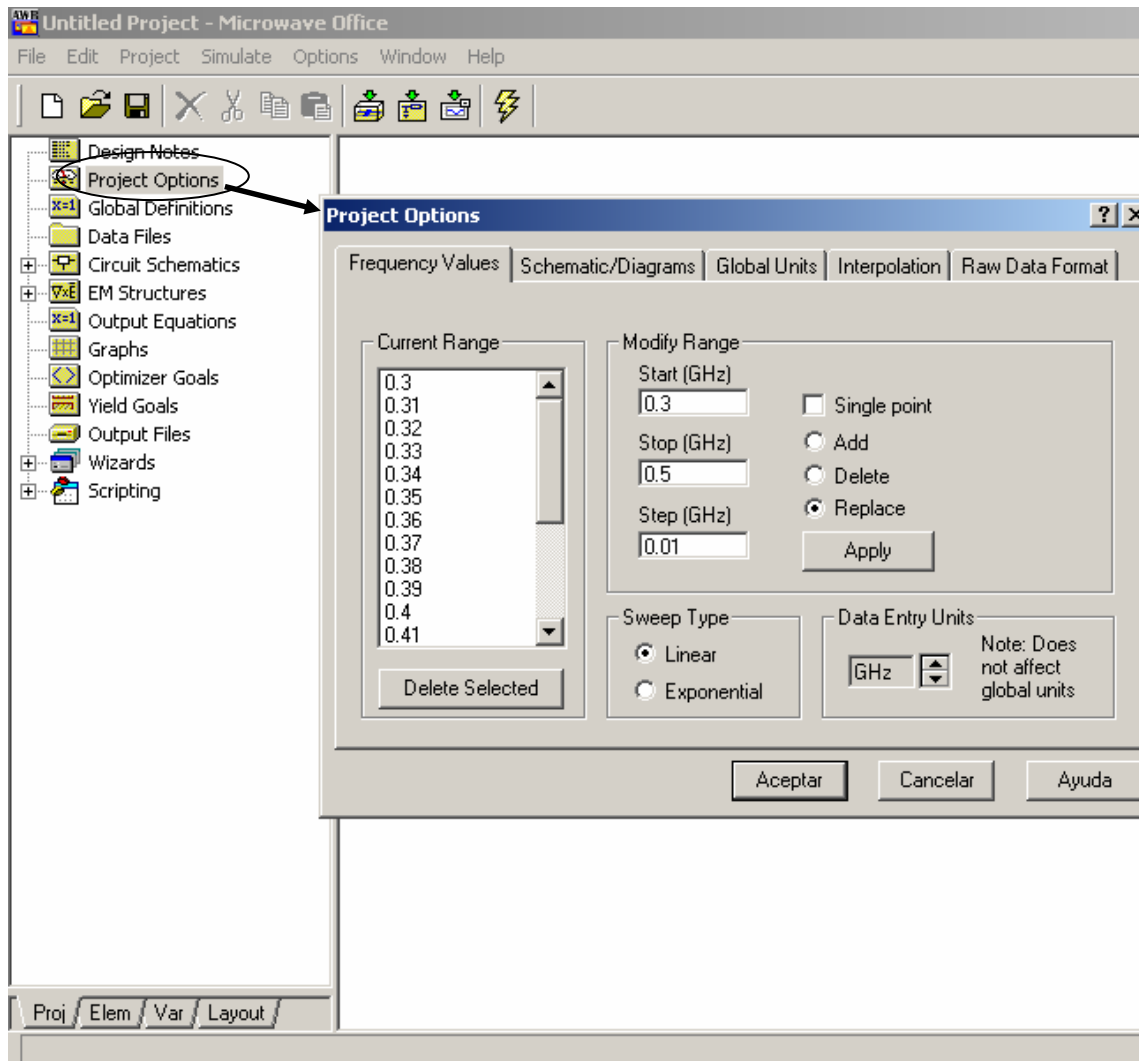


Figura 3: definición de unidades globales y puntos de frecuencia (*Project Options*)

Otra opción es pinchar, dentro del menú general del programa, la opción *Project*, a continuación seleccionar *Add Schematic* en el menú desplegable que aparece, y por último seleccionar *New Schematic*, y darle nombre.

Una vez que el esquemático ha sido creado, aparece en el *Workspace* (área central del interfaz, ver figura 1) una ventana con puntos que definen una rejilla rectangular. Sobre esta rejilla se define el esquemático, es decir, aquí se van a ir añadiendo y conectando los distintos elementos del circuito.

- **Definición del sustrato:** el primer elemento del circuito que es necesario definir es el sustrato. Una vez hemos creado un nuevo esquemático, hay que ir al *Element Browser*: para desplegarlo, basta con seleccionar la lengüeta o *tab* llamada “*Elem*”, situada en la parte inferior izquierda del interfaz (ver figura 1). Una vez allí, se selecciona la opción “*Substrates*” dentro del menú de conjuntos de elementos que contiene el *Element Browser* (ver figura 2). En la parte inferior izquierda de la pantalla aparecen entonces varios tipos de sustratos en diferentes tecnologías, tanto *stripline* como *microstrip*, junto con una breve descripción de los mismos.

Si esta breve descripción no aparece, se puede pinchar con el botón derecho sobre uno cualquiera de los elementos y seleccionar en el menú desplegable la opción “*show details*”: así aparecerán todos los elementos en forma de listado, con una breve descripción a su lado, como en la figura 2. Para ver una descripción más detallada de un elemento en concreto, junto con el significado de cada uno de los parámetros eléctricos del mismo, se puede pinchar igualmente con el botón derecho sobre el icono de interés, y seleccionar en el menú desplegable la opción “*Element help...*”. Esto abrirá la ventana de ayuda del programa *Microwave Office* en la página dedicada al elemento seleccionado. Se recomienda utilizar el sustrato más sencillo posible en cada caso. Por ejemplo, si el diseño va a implementarse en *microstrip* simple, basta con seleccionar el sustrato MSUB. Si se va a implementar en tecnología *stripline* sin que existan mayores restricciones de diseño, basta con seleccionar el sustrato denominado SSUB. No obstante, existen otros tipos de sustratos más complejos que permiten especificar diferente grosor para la capa superior e inferior del *stripline* (SSUB2), o distintas constantes dieléctricas para cada una de las dos capas (SSUBL), o con más de dos capas, etc.

Una vez seleccionado el sustrato que mejor se ajusta a nuestro diseño y necesidades, basta con pinchar sobre él, en la parte inferior izquierda del interfaz, y arrastrar con el ratón el elemento hasta situarlo en el *Workspace* o parte central de la pantalla, donde está la ventana con la página de diseño del esquemático que se acaba de generar. El sustrato se puede situar en cualquier parte del *Workspace*.

El último paso es dar valores a los parámetros eléctricos del sustrato. Una vez situado el icono del sustrato en la página de diseño del esquemático dentro del *Workspace*, aparece sobre este icono una lista de parámetros (*Er*, *Rho...*) con unos valores numéricos asignados. Cada sustrato, así como cada elemento, tiene definidos unos valores por defecto para todos sus parámetros eléctricos y geométricos, pero será necesario redefinir la mayoría de ellos para adecuarlos a las especificaciones de cada diseño particular. Para ello, se puede hacer doble click sobre cada uno de los valores numéricos y rellenar el campo correspondiente de forma directa, sobre el *Workspace*. Si el esquemático fuera demasiado pequeño, se recomienda utilizar la lupa (situada en la barra de herramientas) para ayudarse a visualizar mejor los valores. Para asignar estos valores también se puede hacer doble click sobre el icono del elemento, una vez esté situado sobre el esquemático, o seleccionar dicho icono y pinchar con el botón derecho del ratón sobre él y seleccionar “*Properties*” en el menú desplegable que aparece al pinchar con el botón derecho. Con cualquiera de estos dos métodos aparecerá en pantalla una tabla con todos los parámetros y sus valores asignados. Estos valores pueden cambiarse pinchando con el ratón sobre cada uno de ellos. En dicha tabla también se pueden seleccionar aquellos parámetros elegidos para el ajuste manual (*Tune*), o para la optimización automática (*Opt*), con posibilidad de elegir los límites superior e inferior para la optimización, como se explica más adelante.

En la figura 4 aparece esta tabla, una vez hecho doble click sobre el icono del sustrato. En dicha figura también se aprecia, sobre el icono, el listado de todos los parámetros del sustrato con sus valores correspondientes. Para saber

exactamente a qué corresponde cada parámetro, se recomienda acudir a la ayuda del elemento de la forma explicada anteriormente, o bien pinchando con el botón derecho del ratón en el icono del elemento situado en la página de diseño del esquemático y seleccionando “*Element Help*” en el menú desplegable.

Los valores que hay que definir normalmente son, tanto la constante dieléctrica, la tangente de pérdidas y el grosor del material dieléctrico que compone el sustrato, como el grosor de la línea metálica y su resistividad. Hay que tener cuidado al definir el valor de la resistividad del metal, porque se pide el valor de la resistividad normalizada respecto a la resistividad del oro, cuyo valor es $2,35 \times 10^{-8}$ W/m. La anchura de la línea metálica se define posteriormente para cada elemento o tramo de línea que se vaya a incorporar al esquemático, por lo que no se puede definir en este punto todavía. La constante dieléctrica normalizada no es necesario redefinirla normalmente. Tampoco es necesario renombrar el sustrato.

Una vez definidos los parámetros del sustrato, en el *Variable Browser* (lengüeta “Var” de la parte izquierda inferior del interfaz), aparece un listado con los valores numéricos correspondientes. Desde este listado también se pueden modificar estos valores en cualquier momento. En él están incluidas igualmente las opciones *Tune* y *Opt*.

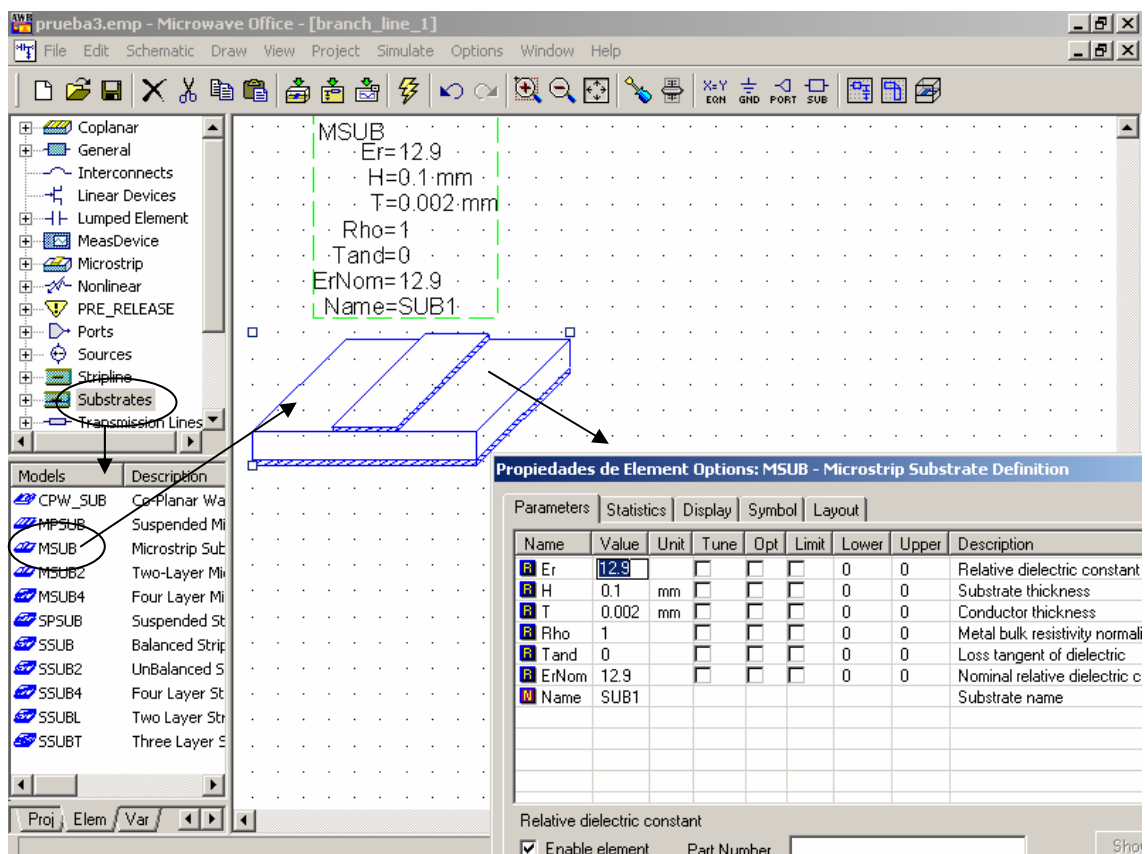


Figura 4: definición de los parámetros del sustrato

- **Añadir elementos:** una vez definido el sustrato con los valores eléctricos y geométricos de acuerdo a las especificaciones de diseño, ya se pueden añadir al

esquemático los diferentes elementos y tramos de línea que componen el circuito, e interconectarlos entre sí

Este proceso es muy similar al seguido para definir el sustrato. En el *Element Browser* se selecciona primero el grupo de componentes de interés. Normalmente los grupos de interés, a parte de los sustratos, suelen ser “*microstrip*” o “*stripline*”, según se esté empleando una u otra tecnología. Cada uno de estos grupos posee un submenú que se despliega automáticamente al hacer doble click con el ratón sobre cada uno de ellos, o al pinchar en la cruz que aparece a su lado: en el ejemplo de la izquierda de la figura 2 aparece desplegado, por ejemplo, el submenú correspondiente al grupo de elementos *microstrip*. En este submenú desplegable los elementos se agrupan en diferentes tipos de componentes: hay tramos de líneas, uniones, codos (*bends*), líneas acopladas y otros elementos diversos. Dentro del submenú se elige el subgrupo al cual corresponda el elemento que se desee insertar, y entonces aparece en la parte inferior izquierda del interfaz el conjunto de todos los elementos pertenecientes al subgrupo elegido. En el ejemplo de la izquierda de la figura 2, dentro del grupo “*microstrip*”, se ha elegido el subgrupo “*junctions*”, correspondiente a las uniones de tramos de líneas, por lo que en la parte inferior de la pantalla aparecen todas las posibles uniones *microstrip* disponibles en la librería de la herramienta *Microwave Office*.

Para ayudar a elegir un elemento dentro del conjunto de todos los posibles, y al igual que en el caso de los sustratos, se puede recurrir a la descripción detallada de un componente pinchando con el botón derecho del ratón sobre el elemento en cuestión y eligiendo la opción “*Element Help*”. Se recomienda emplear, a priori, el elemento más sencillo de entre todos los posibles, o aquel que requiera definir un menor número de parámetros, siempre que cumpla los requerimientos de diseño. Por ejemplo, para simular un tramo simple de línea *microstrip*, y siempre que no existan otras especificaciones al respecto o el diseño del circuito no lo exija, se recomienda emplear el elemento denominado MLIN, dentro del subgrupo “*lines*” del conjunto “*microstrip*”. Para simular un tramo de línea *stripline* simple, se recomienda emplear el elemento SLIN, dentro del subconjunto “*lines*” del grupo “*stripline*”. No obstante, otros tramos de líneas pueden ser útiles y necesarios en distintos puntos del circuito, como los tipos denominados “*tapered*”, que se emplean para interconectar líneas de diferentes grosores. Se recomienda recurrir a la ayuda del programa con asiduidad para familiarizarse de una manera rápida y segura con los distintos componentes, y conocer todas las posibilidades que ofrece la librería de componentes del entorno de simulación.

Una vez se ha elegido el elemento que se va a insertar en el circuito, se pincha sobre él y se arrastra hasta situarlo en la página de diseño del esquemático, dentro del *Workspace*, igual que se hizo cuando se incluyó el sustrato. A continuación se definen los parámetros físicos o dimensiones del elemento, de manera idéntica, de nuevo, a como se hizo al definir los parámetros del sustrato. Según el tipo de componente, será necesario definir unos parámetros u otros. Las dimensiones básicas a definir son casi siempre la longitud de la línea metálica y la anchura de la misma. El grosor de la línea, así como las características del metal y del dieléctrico están ya definidas en el

sustrato, por lo que no forman parte de los parámetros del elemento propiamente dicho. De hecho, cada elemento lleva asociado un sustrato: el tipo de sustrato sí es, por tanto, uno más de los parámetros a definir para cada componente. No obstante, si se ha implementado un único sustrato en el esquemático, éste será el que, por defecto, lleven asociados todos los elementos que se incorporen al circuito y no es necesario especificarlo para cada componente. Si se han definido varios sustratos, habrá que indicar sobre cuál de los sustratos definidos irá montado el elemento. Tampoco es necesario renombrar a cada elemento. Todos los parámetros definidos aparecen en el *Variable Browser*, donde se pueden especificar las opciones “*Tune*” o “*Opt*”, para el ajuste manual o la optimización automática posteriores de cada una de las variables de diseño de cada elemento.

Para interconectar los tramos de línea y elementos entre sí, basta con acercar los extremos de cada elemento lo suficiente: el programa se encarga de conectarlos directamente. Los extremos de cada elemento están marcados con cruces (ver figura 5, elemento sin conectar). Al conectarlos entre sí, las cruces se vuelven un cuadrado de color verde (ver figura 5, elementos conectados formando el esquemático de un *branch-line*)

Para realizar un mismo circuito, el esquemático puede realizarse mediante diversas soluciones geométricas, y utilizando diferentes tipos de elementos. Se recomienda sintetizar aquella forma que más se adecue a la realidad física del circuito. Por ejemplo, se recomienda incluir las líneas a las que luego se van a conectar los puertos físicos de entrada y salida del circuito.

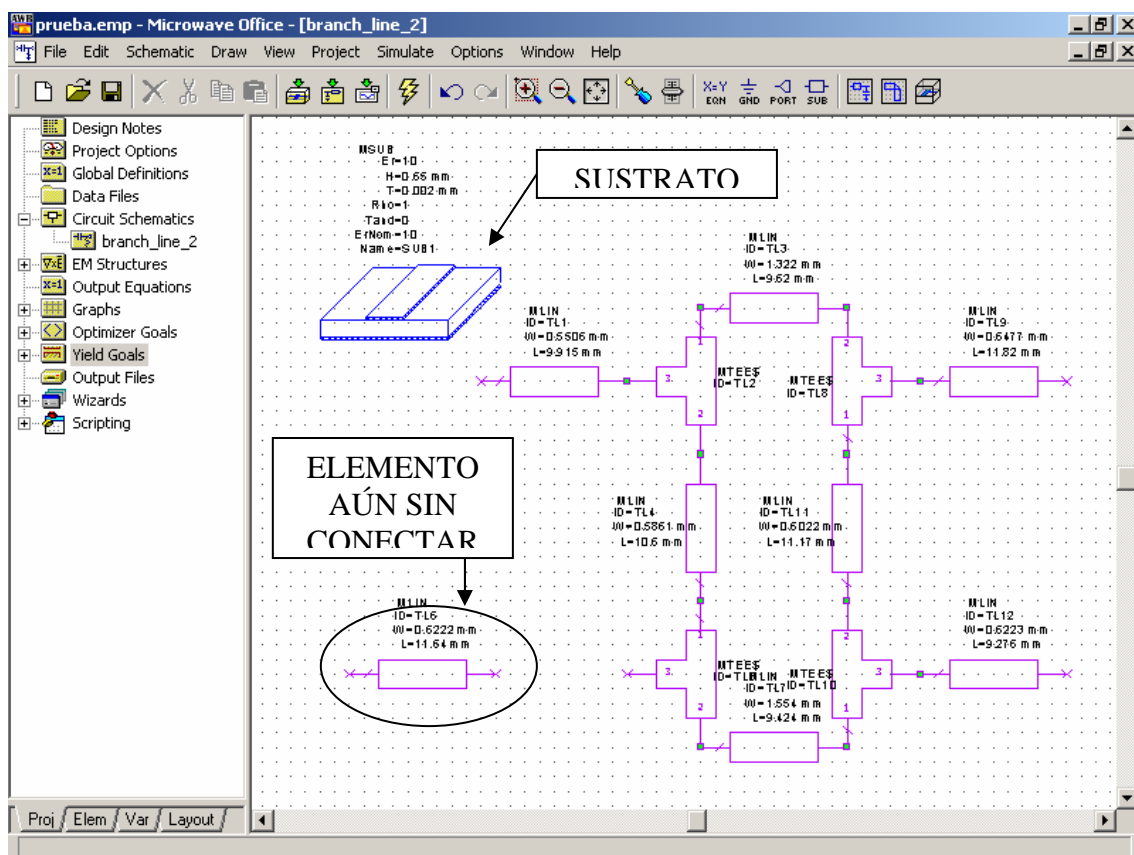


Figura 5: interconexión de los diferentes elementos del circuito

En la figura 5 se aprecia un esquemático de un circuito *branch-line*. Para realizarlo, se han empleado diversos tramos de línea de distinta longitud y distinto grosor (cada uno presentando las impedancias correspondientes para que el circuito cumpla su función eléctrica). Y cuatro uniones en T para la interconexión de tres tramos de línea. En el esquemático representado todos los elementos presentan, a su lado, una tabla con los valores de cada parámetro geométrico y/o eléctrico. Sólo falta por conectar el último tramo de línea. Sobre el esquemático del circuito se ve el sustrato que da soporte a toda la estructura. Las conexiones se representan con un punto cuadrado verde, y los puertos de cada elemento sin conectar se representan con una cruz.

3) Empleo de la herramienta TXLine

Para calcular las longitudes físicas y los grosores de las líneas según la impedancia y longitud eléctrica deseadas de cada tramo, dados un tipo de sustrato, una conductividad del metal y una frecuencia determinados, existen en la literatura diversas fórmulas empíricas aproximadas, así como tablas, que pueden emplearse en una primera aproximación antes de abordar la realización del esquemático. No obstante, el programa *Microwave Office* incluye una herramienta, llamada *TXLine*, que puede ayudar a obtener los parámetros físicos de diseño a partir de los parámetros eléctricos.

Para acceder a la herramienta *TXLine*, basta con pulsar el botón *Window*, dentro de la barra de menús, y entonces seleccionar “*TXLine*”.

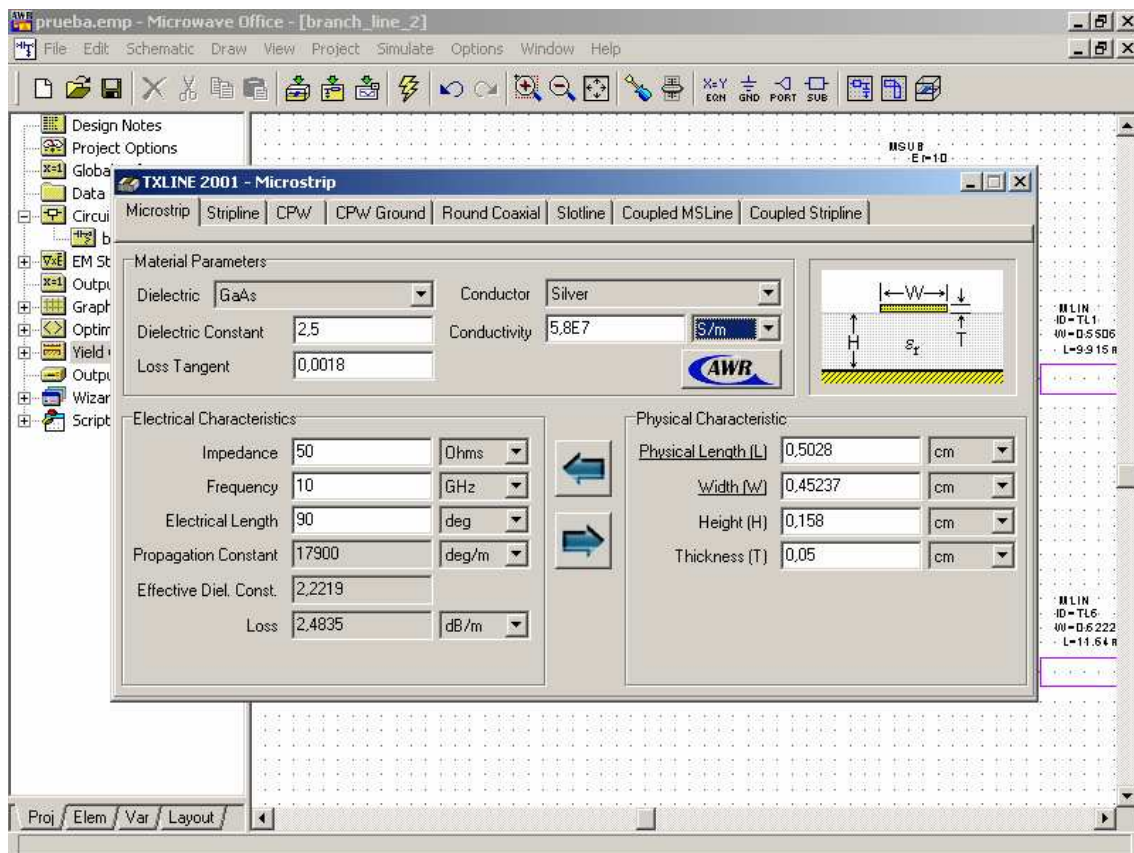


Figura 6

En la figura 6 se aprecia el interfaz de la herramienta TXLine. Como se ve, tiene varias pestañas (parte superior) para hacer los cálculos según se trate de una línea *microstrip*, una línea *stripline*, un *slotline*, diversos tipos de líneas acopladas, etc. En este tipo de “calculadora” hay que introducir como dato las características del dieléctrico empleado (constante dieléctrica y tangente de pérdidas), y la conductividad del metal. Estos parámetros, que deben ser conocidos a priori, se introducen en el cuadro de diálogo dispuesto a tal fin en la parte superior del interfaz TXLine. A continuación, se introducen las características eléctricas de la línea (parte izquierda del interfaz), tales como impedancia característica, frecuencia de trabajo, longitud eléctrica, etc., y, si se desea, el grosor del dieléctrico y el grosor de la tira metálica (parte derecha del interfaz), y se obtienen la longitud física y la anchura necesaria para obtener las características eléctricas deseadas. En muchos casos, también pueden introducirse los parámetros físicos y obtener los parámetros eléctricos equivalentes, es decir, también permite realizar los cálculos inversos, excepto en el caso de líneas acopladas. En cualquier caso, los parámetros calculados para unos datos de entrada determinados, aparecen subrayados en negro.

3.- Simulación del circuito.

Una vez diseñado el esquemático con todos los parámetros definidos, y una vez implementado el circuito mediante la unión en el esquemático de todos los elementos que lo componen, ya se puede pasar a realizar una simulación del mismo. Para ello, es necesario añadir los puertos, definir las gráficas, y simular.

- **Creación de los puertos:** hay que situar los puertos de entrada/salida en aquellos puntos del circuito que deseemos utilizar para medir la respuesta del mismo. Para añadir estos puertos, igual que se hizo para incluir el sustrato y cualquier otro elemento del circuito, basta con ir al *Element Browser*, seleccionar el conjunto de elementos “*Ports*”, y arrastrar hasta el esquemático el puerto más adecuado, conectándolo al punto deseado. Se recomienda utilizar el tipo de puerto simple denominado *Port*. En la figura 7 se aprecia el esquemático de *Branch-line* realizado en la figura 6, al cual se le han añadido cuatro puertos en las cuatro entradas/salidas.

Los parámetros de los puertos (nombre, número e impedancia de referencia), no es necesario modificarlos a priori, salvo que la impedancia de referencia sea distinta de 50 ohmios. Sí es conveniente tomar nota del número que el *Microwave Office* asigna por defecto a cada uno de los puertos. Así, por ejemplo, al especificar que se desea medir el parámetro S_{12} , se medirá el parámetro que realmente se desea medir, entre los puertos adecuados. Por otro lado, siempre se puede modificar el número del puerto según la convención que al usuario le parezca más lógica o intuitiva para evitar ese tipo de errores en la simulación.

No es necesario emplear un puerto que permita variar la señal de excitación a la entrada; el programa realizará la simulación con la única condición de indicarle claramente en el gráfico la medida que especifique el parámetro a medir. Basta, como se ha dicho, con seleccionar el puerto simple llamado “*Port*”.

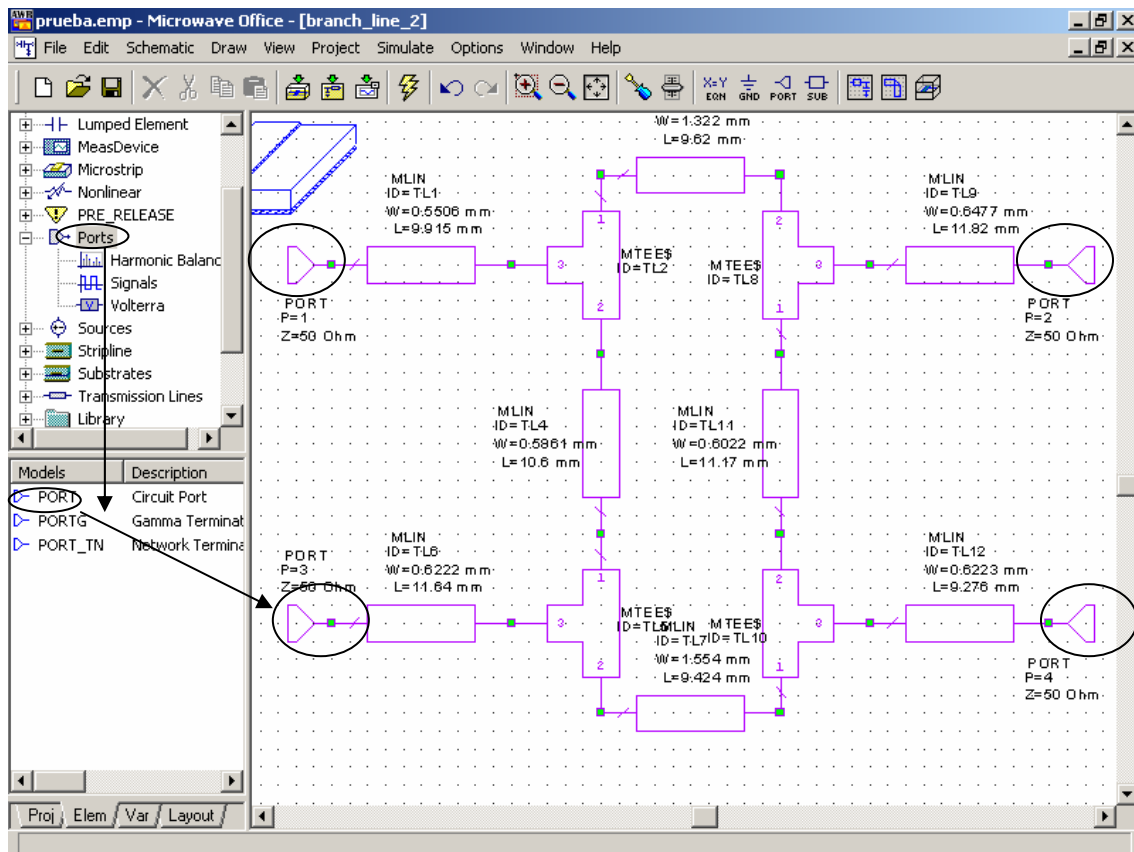


Figura 7: inclusión de puertos en el esquemático

- **Definición de gráficos:** una vez definidos los puertos, se pueden crear tantos gráficos como se desee. En el Project Browser, se pincha con el botón derecho sobre la opción *Graph* (ver figura 1), y a continuación se selecciona la opción *Add Graph*. Entonces aparece un cuadro de diálogo en el cual hay que introducir un nombre para el gráfico que vamos a crear, y un tipo de representación (polar, rectangular, carta de Smith, etc). Normalmente, para gráficos convencionales, y en una primera toma de contacto, interesa la representación rectangular, salvo que se indique expresamente lo contrario.

Al crear un gráfico nuevo, éste colgará del árbol *Graphs*, en el *Project Browser* (ver figura 8, columna izquierda). Colgarán tantos gráficos como creemos, y en cada gráfico podemos incluir tantas medidas como se necesiten, superponiéndose unas a otras. Cada una de las medidas también colgará, a su vez, del gráfico correspondiente en el Project Browser. Los gráficos como tal aparecen en la parte central de la pantalla, o *Workspace*.

Una vez creado el gráfico, y antes de ejecutar la simulación, hay que definir qué medidas deseamos que aparezcan en dicho gráfico. Para ello, una vez definido el gráfico, se pincha sobre él con el botón derecho del ratón, y en el menú desplegable que aparece se selecciona la opción *Add measurement*. Entonces aparece el cuadro de diálogo representado en la figura 8. En este cuadro de diálogo, hay que definir de qué esquemático se desea extraer la medida (puede haber más de un esquemático en un mismo proyecto, y por eso es necesario definir a cuál nos referimos): para ello, hay que definir el esquemático

deseado en el campo *Data Source Name*. Por defecto, en dicho campo aparece el valor *All Sources*, pero hay que cambiar esta opción por el nombre del esquemático creado.

A continuación hay que definir qué parámetros se desean medir (S, Y, Z, ABCD...) Para ello, se selecciona el tipo de parámetro en la columna denominada *Measurement*. El tipo de medida, o “*Meas. Type*”, es “*Port Parameters*”. También hay que especificar si la medida se desea en magnitud, fase, o en parte real o imaginaria, y si se desea en dB.

Por último, hay que especificar los puertos involucrados en la medida. Los puertos involucrados se seleccionan en los campos “*To Port Index*” y “*From Port Index*”. Por ejemplo, para medir el parámetro S_{11} , habrá que indicar el valor 1 en ambos campos.

Se podrán incluir tantas medidas como se deseen en un mismo gráfico. Para ello, una vez realizadas las acciones anteriores, se puede volver a pinchar con el botón derecho del ratón sobre el mismo gráfico en el *Project Browser* o parte izquierda del interfaz, y volver a seleccionar *Add Measurement*, rellenando el cuadro de diálogo de la figura 8 y volviendo a repetir el proceso tantas veces como se desee o como medidas se quieran incluir en una misma gráfica. Si dos medidas distintas no deben aparecer en el mismo gráfico, puede crearse un nuevo gráfico, pinchando con el botón derecho sobre la opción *Graphs* del *Project Browser* y seleccionando *Add Graph*, como se ha mencionado anteriormente.

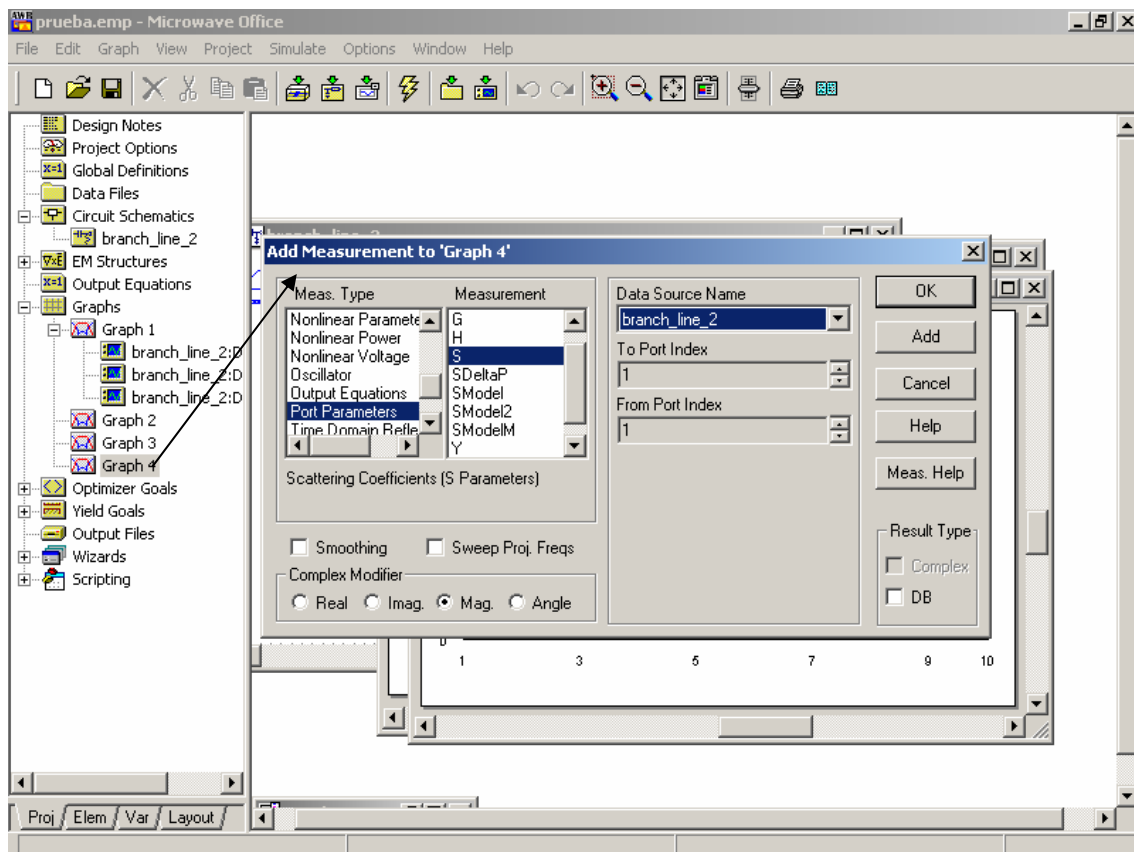


Figura 8: definir la medida que se desea incluir en un gráfico

- **Simulación:** una vez creado un gráfico y definida la medida que deseamos aparezca en él, para obtener dicha medida, es decir, simular el circuito con los parámetros definidos anteriormente, basta con ejecutar la simulación apretando el botón en forma de rayo que aparece en los menús (parte superior de la pantalla).

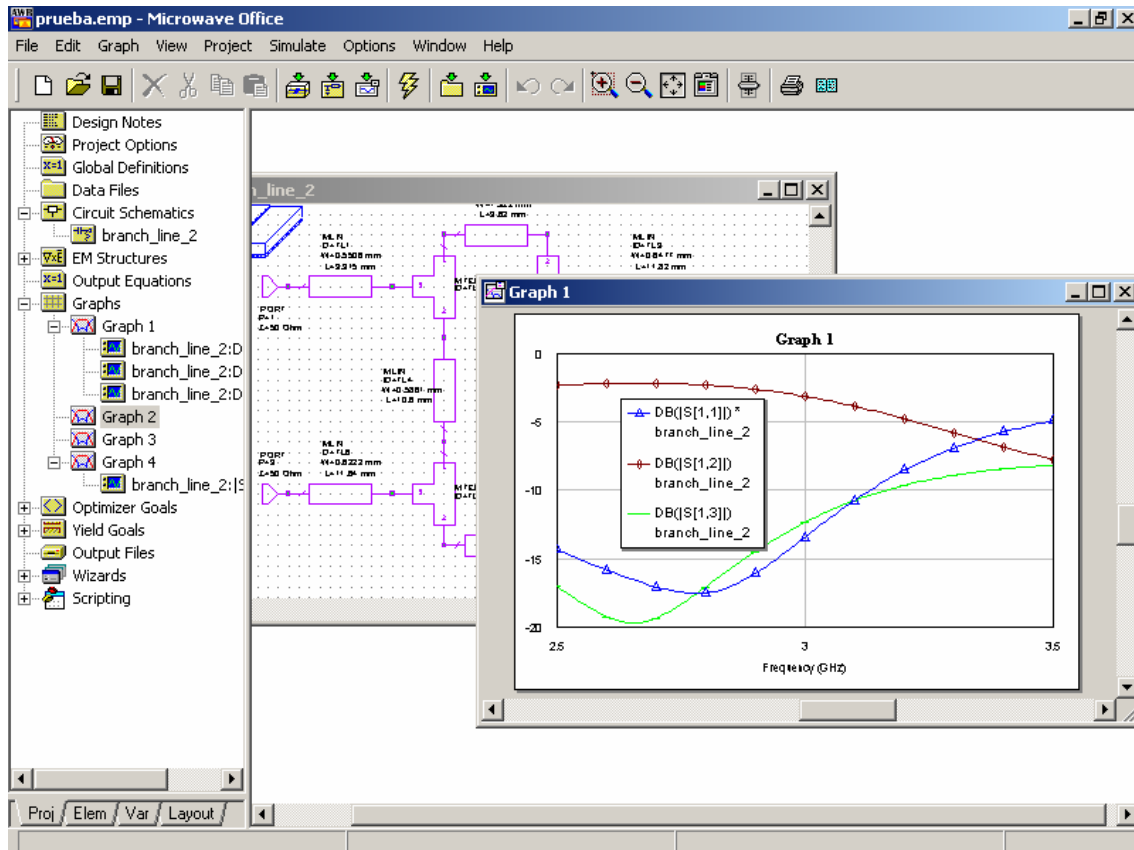


Figura 9: ejecución de la simulación en el gráfico 1, con tres medidas

Esto es lo que se ha hecho en la figura 9, donde se han definido 4 gráficos, que cuelgan de la opción *Graphs* en la parte izquierda de la pantalla o *Project Browser*, y donde, en el gráfico 1 –llamado *Graph 1*–, que es el que se ha ejecutado, se han definido 3 medidas distintas (correspondientes a los parámetros S_{11} , S_{12} y S_{13}). Estas medidas aparecen en la parte central del interfaz, o *Workspace*. Se ve que en el *Workspace* se genera un sistema de ventanas con el esquemático y tantos gráficos como se hayan creado.

Los puntos de frecuencia pueden modificarse (en el *Project Options*, tal y como se explicó en el punto 1 de este documento), tantas veces como se desee, y volver a ejecutar la simulación. A su vez, los parámetros del circuito, tanto del sustrato como de los elementos que lo componen, también pueden modificarse tantas veces como sea necesario, y actualizar a continuación las simulaciones. Pueden ser de mucha utilidad las herramientas “*Tune*” para el ajuste manual, y “*Opt*” para la optimización automática, a la hora de modificar los parámetros del circuito, como se verá a continuación.

4.- Optimización del circuito.

1) Opción “Tune”

La herramienta tune permite observar el efecto que tiene la variación de uno o más parámetros del circuito sobre la respuesta de éste.

- **Selección de los parámetros a ajustar:** el primer paso es seleccionar aquellos parámetros que se deseen variar o sintonizar. Estos parámetros pueden ser cualesquiera de entre todos aquellos susceptibles de ser definidos o modificados dentro de cada elemento del esquemático. Normalmente, suelen escogerse longitudes y anchuras de las líneas, pero también podemos incluir en la opción “tune” la conductividad del metal o la constante dieléctrica, por ejemplo (definidas en el sustrato). Hay varias opciones para seleccionarlos:
 - a) Con la página de diseño del esquemático activa en el *Workspace* aparece, en la barra de herramientas, un icono con forma de destornillador. Seleccionando este icono, y pinchando, dentro del esquemático, sobre aquel o aquellos valores de los parámetros que deseamos variar, éstos cambian a color azul. Eso indica que ya pueden ser incluidos en la herramienta “tune”. Para deseleccionarlos, basta con volver a pinchar con el icono del destornillador sobre ellos. Para seleccionar el destornillador, también puede accederse a él a través del menú (parte superior del interfaz), pinchando en la opción “*Simulate*”, y a continuación, en “*Tune tool*”.
 - b) En el *Variable Browser*, (pinchando sobre el *tab* o lengüeta *Var* en la parte inferior izquierda de la pantalla) aparecen con sus valores todas las variables de diseño, o parámetros definidos por el usuario para cada uno de los elementos del circuito. Pinchando, al lado de cada elemento que desee sintonizarse, en el recuadro “T”, se seleccionan los parámetros a incluir en la herramienta “Tune”, de la misma forma que con el destornillador de la barra de herramientas.
 - c) Haciendo doble click sobre cada elemento del esquemático, aparece una tabla como la de la figura 4, con los valores de cada parámetro definido para ese elemento en cuestión. Ahí también se puede elegir, pinchando la opción “T”, aquellos parámetros a sintonizar.
- **Ajuste o sintonía mediante “tune”:** una vez seleccionados los parámetros a ajustar, se selecciona el icono “Tune” en la barra de herramientas, situado al lado del icono en forma de destornillador. Para acceder a esta herramienta, también se puede ir al menú “*Simulate*”, en la parte superior del interfaz, y seleccionar “Tune”. A continuación aparece un interfaz con tantos mandos o ajustes variables como parámetros se hayan elegido para el ajuste. Un ejemplo de este interfaz se puede ver en la figura 10.

Si, debajo del interfaz “tune”, aparece una ventana con una de las gráficas de simulación, se puede observar de forma directa cómo se modifica la gráfica a medida que variamos mediante los mandos de ajuste de la herramienta Tune, los valores de los parámetros. Esto puede ser de gran utilidad para conocer cómo

afecta, cualitativa y cuantitativamente la variación de los parámetros físicos del circuito a la respuesta del mismo.

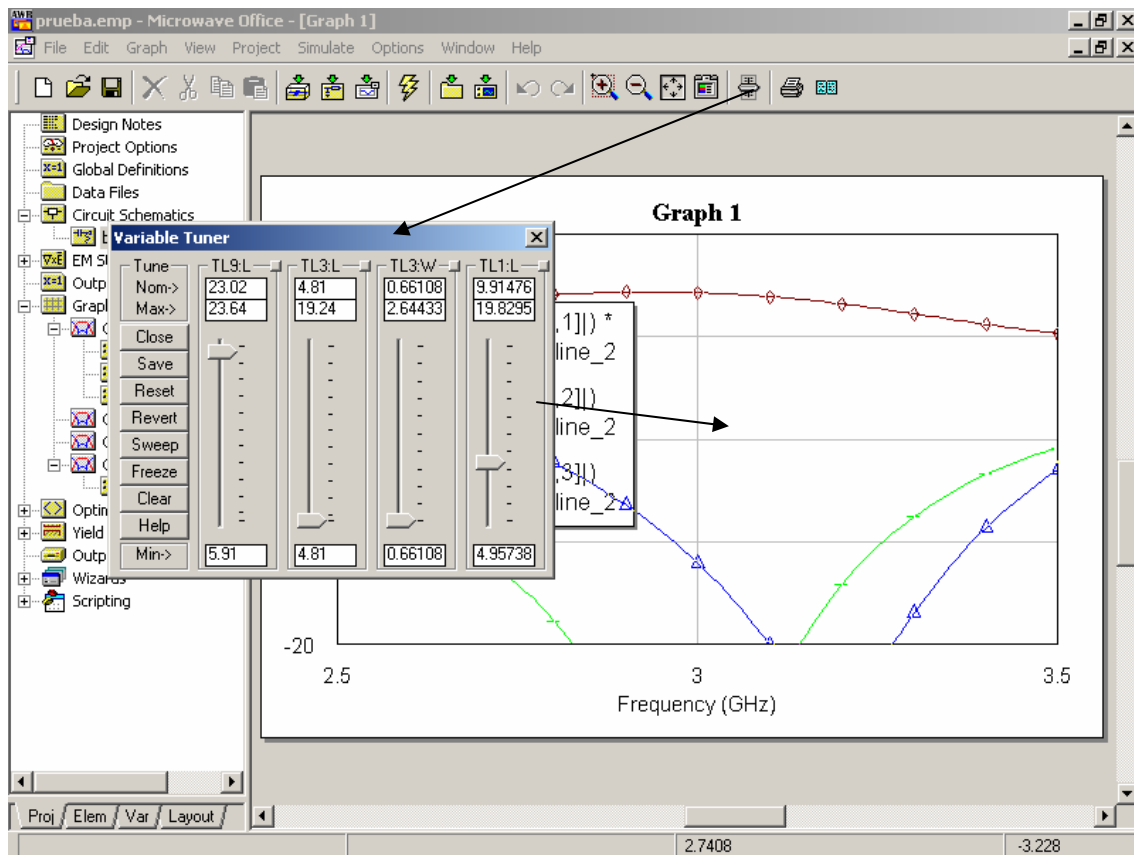


Figura 10

En el ejemplo de la figura 9, se han seleccionado 4 parámetros del esquemático (2 anchuras y 2 longitudes de línea), y por eso aparecen 4 “potenciómetros” o controles, con el valor nominal, el máximo y el mínimo. El valor de estos 4 parámetros se modifica de forma independiente subiendo o bajando los controles del interfaz “*Variable Tuner*”. La gráfica seleccionada se modifica cada vez que se varían estos parámetros mediante los controles del interfaz. Cada vez que se desee, se puede guardar un conjunto de valores, con la opción “*Save*” dentro del interfaz *Variable Tuner*, y seguir modificando los valores a partir de ese punto. Cada estado guardado recibe un nombre, y para volver a uno de los estados anteriores guardados, incluido el inicial, existe la opción “*Revert*”, dentro del mismo interfaz. Para que sean más sencillas las comparaciones, se puede congelar un estado de la gráfica con la opción “*Freeze*”, que mantiene en pantalla los valores de los gráficos para un conjunto de valores dados, y seguir variando los valores de los parámetros mientras se modifica la gráfica, pero superponiéndose a los valores de la gráfica que existían en el estado en el que se ejecutó “*Freeze*”.

Esta herramienta es extremadamente útil para conocer cómo varía la respuesta de un circuito respecto a cada uno de los parámetros que entran en juego, y cuál es su sensibilidad respecto a las variaciones de cada uno de ellos.

2) Herramienta de optimización automática

Esta herramienta permite, una vez establecido un objetivo a alcanzar (*goal*) en lo que a la respuesta del circuito se refiere, optimizar las variables de diseño seleccionadas (longitudes, grosores de las líneas, etc) para mejorar la respuesta del dispositivo, es decir, para alcanzar los objetivos de diseño hasta donde sea posible. Puede ser necesario que el parámetro S_{11} se anule –o se acerque lo suficientemente a ello- en determinados puntos de frecuencia en los que se desea una transmisión total entre la entrada y la salida, o que el parámetro S_{21} sea lo suficientemente cercano a la unidad en esos mismos puntos.

Por ejemplo, si se desea diseñar un acoplador branch-line con un coeficiente de acoplo de 5 dB, esto implica que, a la frecuencia de trabajo el parámetro S_{13} debe valer 0.56, es decir, -5 dB. En teoría, este valor podría ser obtenido en las simulaciones si todos los cálculos respecto a los grosores y longitudes de las líneas fueran exactos y el comportamiento de los dispositivos fuera ideal. Sin embargo, se verá que en una primera fase de diseño, normalmente no se alcanzan los objetivos planteados. Ello es debido a la no idealidad de los componentes como las pérdidas y otros fenómenos y efectos parásitos que no se tienen en cuenta en los cálculos previos y que el *Microwave Office* sí es capaz de simular.

A partir del diseño inicial, llevado a cabo según se ha descrito en los apartados precedentes, se puede llevar a cabo una optimización siguiendo los siguientes pasos:

- **Selección de los parámetros a optimizar:** el primer paso es seleccionar aquellos parámetros que se deseen variar en el proceso de optimización, dando un valor máximo y un valor mínimo, que será el rango de variación dentro del cual se le permite al optimizador variar estos parámetros. Estos parámetros pueden ser cualesquiera de entre todos aquellos susceptibles de ser definidos o modificados dentro de cada elemento del esquemático. Normalmente, suelen escogerse longitudes y anchuras de las líneas, igual que en el caso de la opción “*tune*”.
 - a) En el *Variable Browser*, (pinchando sobre el *tab* o lengüeta *Var* en la parte inferior izquierda de la pantalla) aparecen con sus valores todas las variables de diseño, o parámetros definidos por el usuario para cada uno de los elementos del circuito. Pinchando, al lado de cada elemento que desee optimizarse, en el recuadro “O”, se seleccionan los parámetros a incluir en la herramienta de optimización, de la misma forma que se hizo en el caso de la herramienta “*tune*”.
 - b) Haciendo doble click sobre cada elemento del esquemático, aparece una tabla como la de la figura 4, con los valores de cada parámetro definido para ese elemento en cuestión. Ahí también se puede elegir, pinchando la opción “O”, aquellos parámetros a sintonizar.
- **Objetivos del optimizador:** una vez seleccionados los parámetros, se pincha con el botón derecho del ratón en la opción *Optimizer Goals* del *Project Browser*. Aparece entonces un cuadro de diálogo como el de la figura 11. Hay que especificar, entonces, qué parámetro de los medidos se desea optimizar, y dar el valor que se desea alcanzar, en torno a un punto de frecuencia en concreto,

o bien dentro de un rango de frecuencias completo. También se puede especificar que el objetivo a alcanzar no sea exacto, sino que la medida debe quedar por encima o por debajo de dicho valor.

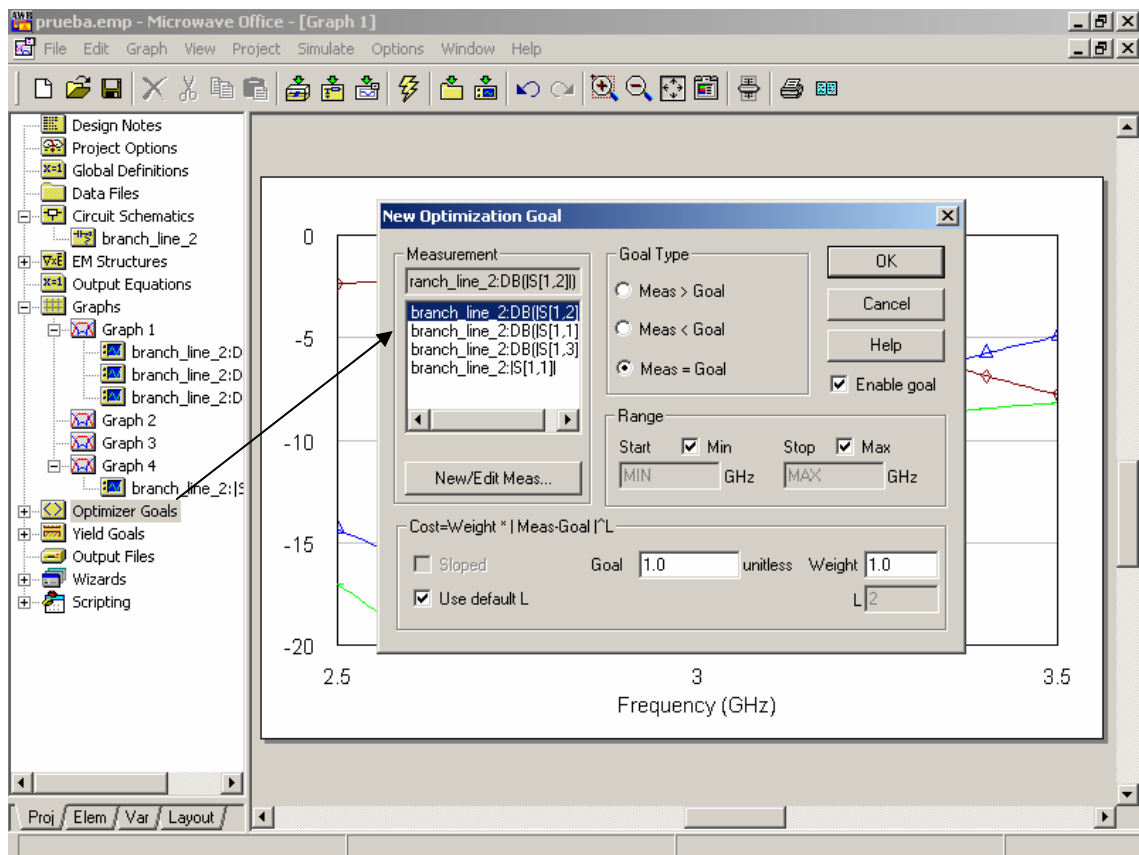


Figura 11

- **Optimizaci3n:** por 3ltimo, se selecciona, dentro de la barra de herramientas, la opci3n *Simulate*, y a continuaci3n, *Optimize*. Seleccionar un n3mero de iteraciones y comenzar la optimizaci3n pulsando el bot3n *Start*. El optimizador concluir3 cuando se haya alcanzado el objetivo del optimizador, o bien cuando se hayan sobrepasado el n3mero de iteraciones. Este proceso puede tardar unos minutos. Los valores finales del optimizador pasan directamente a los par3metros del esquem3tico, y la gr3fica se actualiza autom3ticamente.