

Capítulo-9: Simulación del Circuito de Microondas con Amplificadores Ideales

1 Introducción

En el presente capítulo discutiremos el siguiente paso a dar en la construcción del circuito de microondas final. Este no es más que la inclusión de una línea de transmisión para la conducción de la señal hacia la cadena de amplificadores que más tarde se instalará en la superficie del circuito.

Para ello, como primer paso debemos realizar el cálculo del ancho (W) de la línea para que la impedancia característica sea de $50\ \Omega$, consiguiendo de esta manera una adaptación completa con la entrada de la red.

En un paso posterior debemos realizar el diseño del layout incluyendo la línea de transmisión de impedancia característica $50\ \Omega$. Por último se realizará la simulación. Sobre ella se comentarán las particularidades más interesantes.

Como último paso se simulará el circuito completo con la inclusión de los amplificadores ideales: en primer lugar se estudiará el comportamiento de un solo amplificador ideal, pasando a continuación al estudio de una cadena de dos amplificadores.

2 Cálculo de las Dimensiones de la Línea de Transmisión

Debemos realizar el cálculo del ancho (W) de una línea de transmisión, para que su impedancia característica sea de 50Ω .

Para ello usaremos la herramienta disponible en el software ADS, "LineCalc". Esta herramienta está situada en la ventana de esquemático del programa. Para ello seguiremos los siguientes pasos:

- Como por defecto estamos colocados sobre la ventana de layout, lo primero que debemos hacer es abrir una ventana de esquemático. Para ello procederemos de la siguiente manera:
 - Nos vamos al siguiente menú: File -> New Design. Tras hacer click en "New Design", se nos abrirá un cuadro de diálogo, en el cual debemos optar por la opción "New Schematic Window".
- Una vez en la ventana de esquemático, navegamos hacia el siguiente menú: Tools -> LineCalc -> Start LineCalc. Una vez realizado lo anterior se nos abrirá un cuadro de diálogo sobre el cual deberemos ajustar los siguientes valores:
 - $\epsilon_r = 2,17$ (constante dieléctrica del teflón).
 - $Z_0 = 50 \Omega$ (impedancia característica de la línea).
 - $H = 0,5 \text{ mm}$ (espesor del dieléctrico).
 - $T = 0 \text{ mm}$ (espesor de la lámina metálica).
 - $\text{Cond} = 1e51$ (conductividad).
 - $\text{Freq.} = 8 \text{ GHz}$.
 - $E_{\text{Eff}} = 180$ grados.
- Para el resto de valores, dejamos los que vienen por defecto.
- Para que la herramienta nos devuelva W y L, en las unidades correctas, debemos ajustar a "mm" en los desplegables correspondientes. Una vez realizado esto, hacemos click en "Synthesize". Veremos cómo nos aparecen los valores de W y L. Estos son:
 - $W = 1,55608 \text{ mm}$.
 - $L = 13,6924 \text{ mm}$.

- El único valor de los anteriores que nos interesa para el ajuste de la impedancia característica es W. La longitud de la línea (L) tan solo ajustará la longitud eléctrica de ésta. Recordamos la expresión de la longitud eléctrica:

o $l_{elec} = \beta \cdot L$; Donde $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$. (Se ha ajustado la longitud de la línea para que la longitud eléctrica sea 180 grados).

- Nos debe quedar una ventana como la que se puede observar en la figura siguiente:

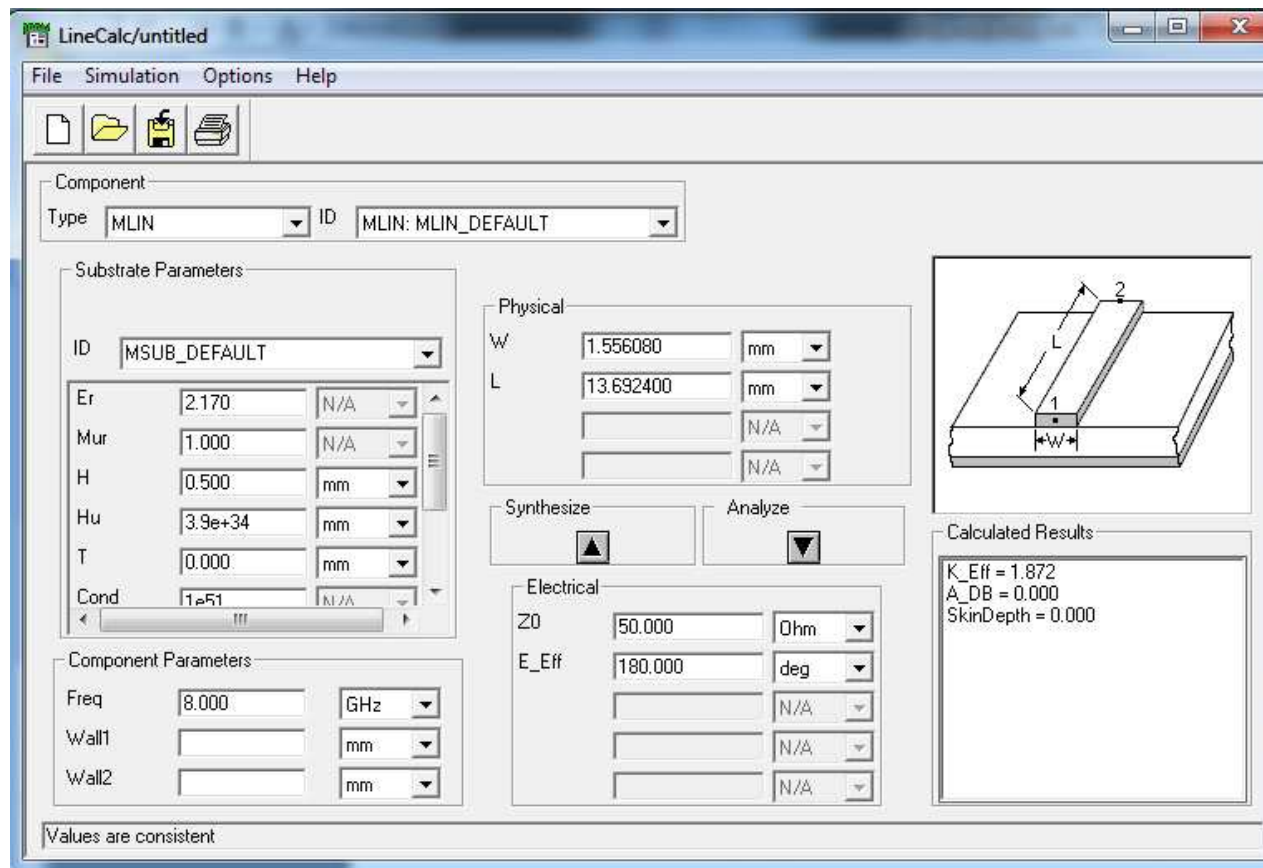


Ilustración 1: Ventana LineCalc

3 Layout de la Placa Base para Un Amplificador

3.1 Definición de la Estructura

Tras el cálculo efectuado sobre las dimensiones de la línea de transmisión necesaria para la transmisión de la señal en la estructura, vamos a proceder a realizar el diseño del layout de la misma.

La estructura se compondrá de las siguientes partes:

- Plano de tierra (GND).
- Capa de dieléctrico (Teflón).
- Capa STRIP: compuesta por dos tiras metálicas en los extremos, a través de las cuales se hará la puesta a tierra. Además, en esta capa será donde se coloque las líneas de transmisión necesarias.
- Capa de aire: de dimensiones infinitas.

Tras el uso de las herramientas necesarias (disponibles en ADS), el layout de la estructura queda de la siguiente forma:

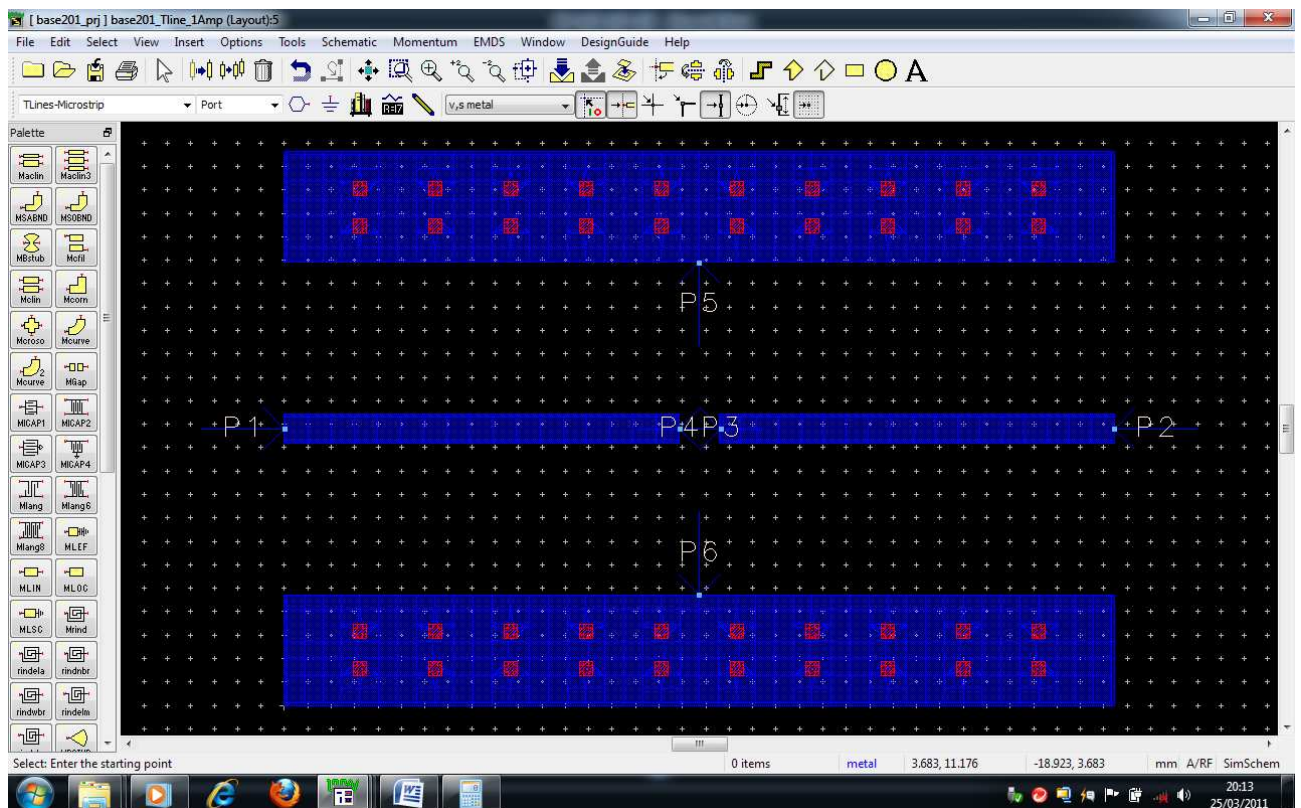


Ilustración 2: Circuito Base con las Líneas de Transmisión

Como podemos observar, los parámetros y elementos más importantes que componen la estructura son:

- Dimensiones de la placa de circuito impreso: 45 x 30 mm².
- Dimensiones de las microtiras de puesta a tierra: 45 x 6 mm².
- Dimensiones de las líneas de transmisión: 1,55608 x 21,42 mm².
- Cuatro filas de diez VH.
- Separación entre VH: 2 mm.
- Diámetro de las VH: 0,8 mm.
- Espacio entre las líneas de transmisión: 2,16 mm.
- Definición de seis puertos: carácter interno.

Las características de la simulación han sido las siguientes:

- Frecuencia inicial de barrido: 100 MHz.
- Frecuencia final de barrido: 8 GHz.
- Mesh frequency: 8 GHz.
- Número máximo de muestras: 20.

Como se puede ver en la figura anterior, solo se ha dejado espacio para colocar un amplificador en el hueco que aparece entre las líneas de transmisión.

3.2 Definición de Puertos

En la figura anterior, se han definido seis puertos. Veamos el por qué de cada uno de los seis puertos:

- P1 y P2: definirán la entrada y salida general de la estructura.
- P3: definirá la salida de la línea de transmisión de entrada. Supondrá la entrada al amplificador.
- P4: definirá la entrada de la línea de transmisión de salida. Supondrá la salida del amplificador.
- P5 y P6: se definen como puertos auxiliares. A estos puertos se les conectarían las posibles salidas secundarias del posible amplificador a colocar en nuestro circuito. Si el amplificador solo viniera definido con su entrada y su salida principal, estos puertos serían conectados a tierra.

3.3 Resultados de la Simulación

Tras la simulación del circuito propuesto en este capítulo, vamos a obtener una serie de resultados. El objeto de este apartado es presentarlos para realizar una posterior discusión de los mismos.

Antes de la presentación de los mismos, vamos a discutir qué deberíamos esperar de nuestra red de microondas. Comencemos discutiendo el parámetro S_{11} : representa las pérdidas por retorno de la red de microondas. Si tenemos una adaptación buena entre la entrada de la red y la línea de transmisión, dichas pérdidas deberían ser muy altas (teóricamente ∞). A continuación se presenta el resultado de la simulación:

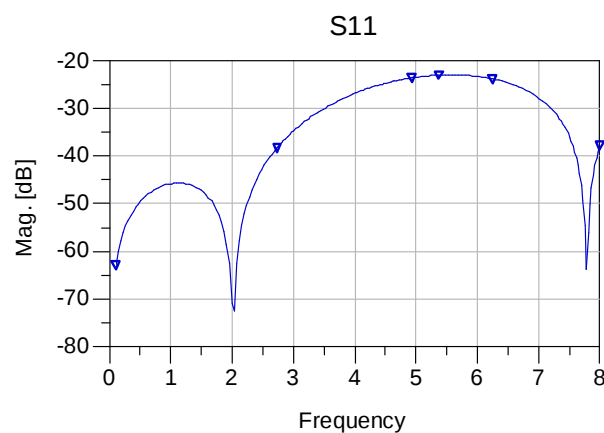


Ilustración 3: Pérdidas por Retorno en Circuito Base Microstrip

Como vemos en la figura anterior, los resultados son muy buenos a bajas frecuencias, siendo bastante aceptables para el resto de frecuencias también, dado que en todo momento S_{11} permanece por debajo de -20 dB. Por ello, podemos concluir que los resultados son satisfactorios.

Veamos el caso del parámetro S_{21} : representa las pérdidas de inserción de la red. En este caso, en que no se tiene conectado nada entre las líneas de transmisión, una vez que la señal llegue al final de la línea de transmisión de entrada, se encontrará con una impedancia infinita (dado que tenemos un circuito abierto), por lo que las pérdidas de inserción del circuito deberían ser ∞ , en un caso ideal. Veamos el resultado de la simulación:

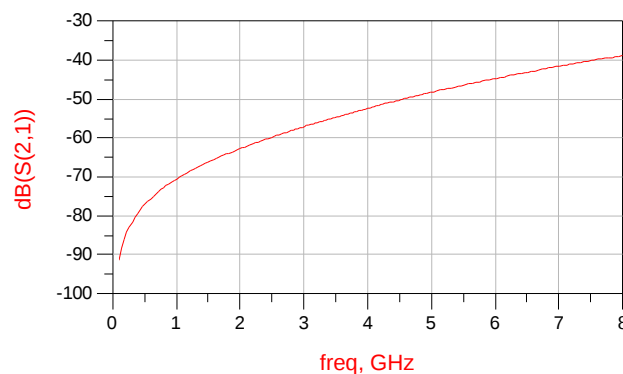


Ilustración 4: Pérdidas de Inserción en Circuito Base Microstrip

Vemos que los resultados se acercan mucho al caso ideal a bajas frecuencias (valores por debajo de -70 dB). Además en todo el rango de frecuencias estudiado estamos por debajo de los -40 dB, que es un resultado más que aceptable para nuestro caso. Por ello, y como conclusión final, podemos decir que los resultados son muy satisfactorios.

3.4 Inclusión del Modelo en el Esquemático

Como siguiente paso en la construcción del circuito de microondas, deberemos abandonar la ventana de layout para dar paso a una ventana de esquemático. Para ello, aprovecharemos el diseño anterior realizado en “momentum” para colocar finalmente un amplificador encima de la placa de circuito impreso.

Una vez en la ventana de esquemático, y en conjunción con los elementos activos de nuestro circuito, se volverá a realizar una simulación de los parámetros S, permitiéndonos realizar una siguiente discusión del comportamiento del mismo.

A continuación se detallarán los pasos a seguir en la creación de un bloque esquemático formado por nuestro diseño en la ventana de layout:

- En la ventana de layout nos vamos al siguiente menú: Momentum -> Component -> Create/Update... . Con ello, se nos desplegará un cuadro de diálogo en el que no tenemos que modificar ningún valor (dejamos todos los que vienen por defecto).
- Desde la ventana de layout creamos un nuevo diseño: será el esquemático a realizar. Procedemos del siguiente modo: File -> New Design. Se nos abrirá un cuadro de diálogo, en el cual debemos seleccionar la opción “New Schematic Window”. Hacemos click en “OK”.

- Desde la ventana de esquemático, nos vamos a la pestaña: Insert -> Component -> Component Library... . Se nos abrirá un cuadro de diálogo. En él, debemos buscar el nombre de nuestro diseño en layout realizado hasta ahora. Una vez localizado, lo seleccionamos.
- Hacemos click en nuestro diseño (que aparecerá a la derecha del cuadro de diálogo). Nos vamos a la ventana de esquemático y lo pegamos en el lugar más adecuado para nuestros intereses. De esta manera, podremos disponer de nuestro diseño como si fuera un esquemático más.

Tras esta serie de pasos, nos debería quedar una ventana de esquemático como la siguiente:

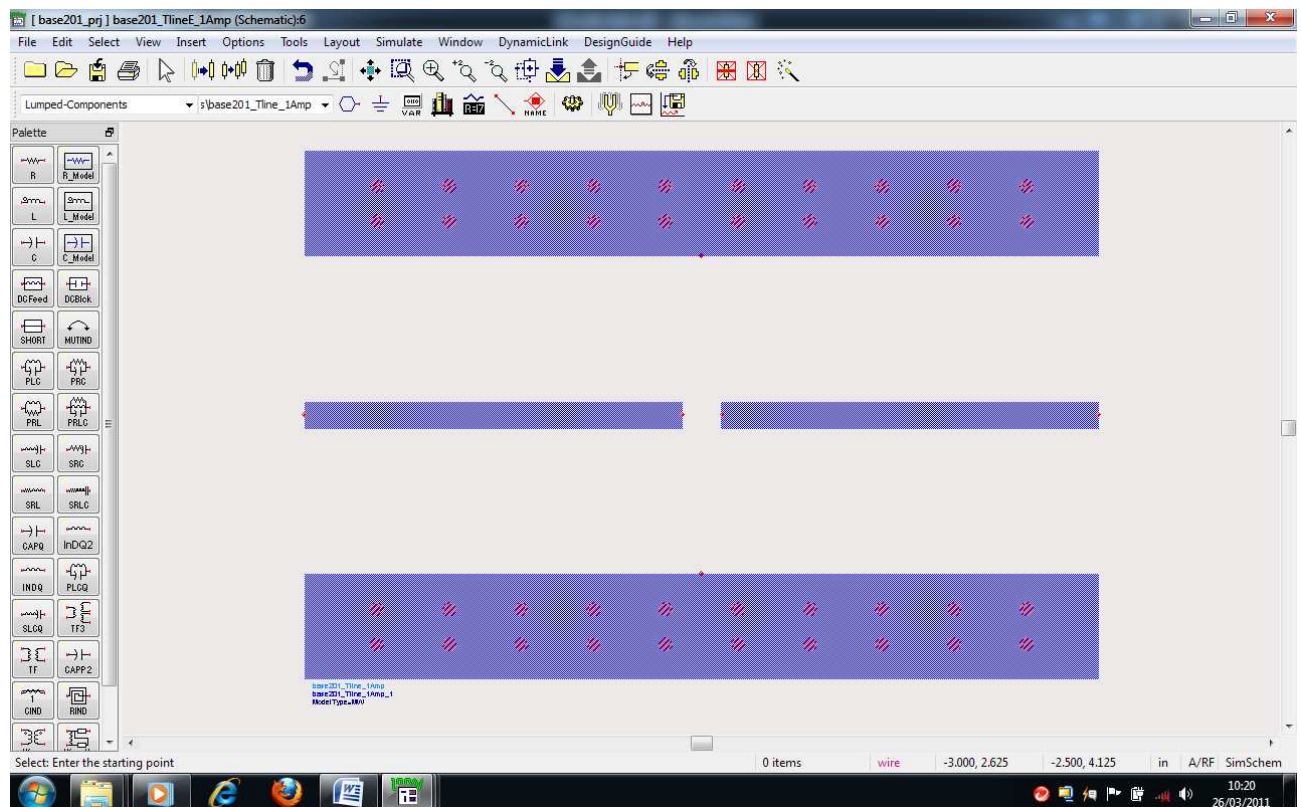


Ilustración 5: Ventana de Esquemático del Diseño en Layout para Un Amplificador

En la figura 135 podemos observar cómo los seis puertos colocados aparecen ahora como puntos de interconexión con otros posibles dispositivos. Para nuestro caso, estas interconexiones van a ser las siguientes:

- Para los puntos correspondientes a los puertos P1 y P2, se les conectará la entrada y salida de señal a la estructura.
- Para los puntos correspondientes a los puertos P3 y P4, se les conectará la entrada y salida del amplificador.

- Para los puntos correspondientes a los puertos P5 y P6, por defecto se conectarán a tierra, aunque si fuera necesario por las características de los amplificadores a conectar, se usarían a tal efecto.

3.5 Simulación de la Estructura con Un Amplificador Ideal en la Ventana de Esquemático

Como primer paso, se va a realizar la simulación de la estructura de tal forma que se cortocircuiten la salida de la línea de transmisión de entrada (puerto P3), con la entrada de la línea de transmisión de salida (puerto P4). De esta manera lo que cabe esperar de la red es lo siguiente:

Respecto a las pérdidas por retorno deberían ser muy altas, dado que la adaptación entre la entrada a $50\ \Omega$ y la línea de transmisión es la correcta. Respecto a las pérdidas de inserción deberían ser muy bajas también (S_{21} en torno a 0 dB), dado a que ahora la señal debería recorrer sin problemas la estructura desde el puerto de entrada al de salida.

Para ello, se le va a conectar un cable entre los puertos P3 y P4, permitiendo de esta manera el paso de señal. Además hay que conectar una serie de elementos que permita la simulación de los parámetros S en la ventana de esquemático. Éstos son los siguientes:

- Dos terminaciones de $50\ \Omega$: una para la entrada y otra para la salida.



- Un elemento de simulación de parámetros S.



- Conexiones a tierra: debemos colocar a tierra las terminaciones de $50\ \Omega$, junto a los puertos P5 y P6, que en este caso no se van a usar.

NOTA: Los dos primeros elementos se encuentran en el conjunto de elementos denotados en ADS como "Simulation-S_Param". La tierra se encuentra en la barra de herramientas.

Finalmente, nos debe quedar una figura como la siguiente:

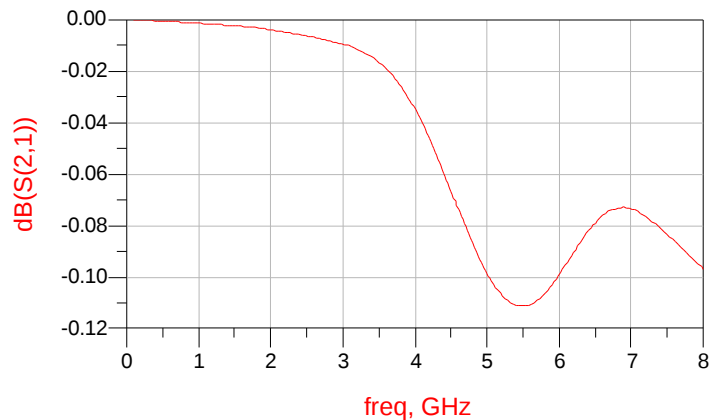


Ilustración 8: Pérdidas de Inserción Placa Cortocircuitada

Como vemos en las figuras anteriores, los resultados son muy buenos: nos aproximamos bastante al caso ideal para frecuencias de hasta 3 GHz, permaneciendo con resultados bastante aceptables en todo el rango de frecuencias de estudio.

A continuación vamos a proceder a colocar un amplificador ideal en el seno de la placa de circuito impreso. Para ello procedemos de la siguiente manera:

- Dentro de la barra de herramientas, nos vamos al desplegable donde se encuentran todos los elementos esquemáticos disponibles. Buscamos y elegimos “System-Amps & Mixers”.
- Elegimos el símbolo correspondiente a: “Amp”.



- Lo colocamos entre los puntos de interconexión correspondientes a los puertos P3 y P4 de la ventana de layout. Si hiciera falta hacemos uso de cables.

Las características del amplificador van a ser las que vienen por defecto, excepto que se dotará de una ganancia de 60 dB. Por ello en un caso ideal, las pérdidas por retorno de la red deberían ser, una vez más -0.05 , mientras que el coeficiente de transmisión de la red debería aproximarse mucho a la ganancia del amplificador. En un caso ideal, deberíamos tener un coeficiente de transmisión plano con la frecuencia e igual a la ganancia del amplificador.

Sin embargo, vamos a observar en las simulaciones que los resultados obtenidos difieren en cierta medida de lo comentado anteriormente. Todas las diferencias que se obtengan serán debidas a la placa de circuito impreso. Veamos los resultados de la simulación:

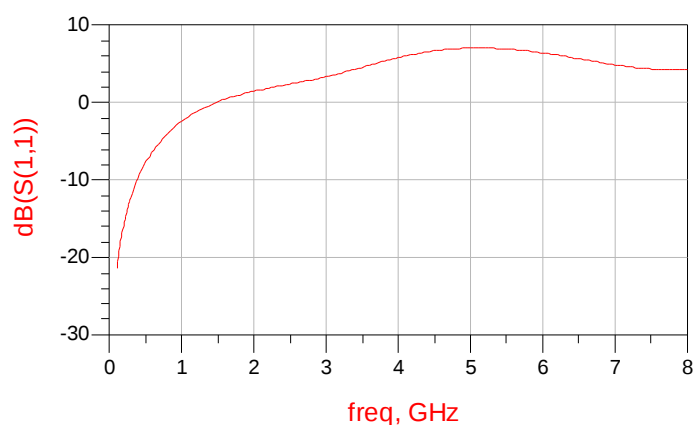


Ilustración 9: Pérdidas por Retorno Circuito con Un Amplificador de Ganancia 60 dB

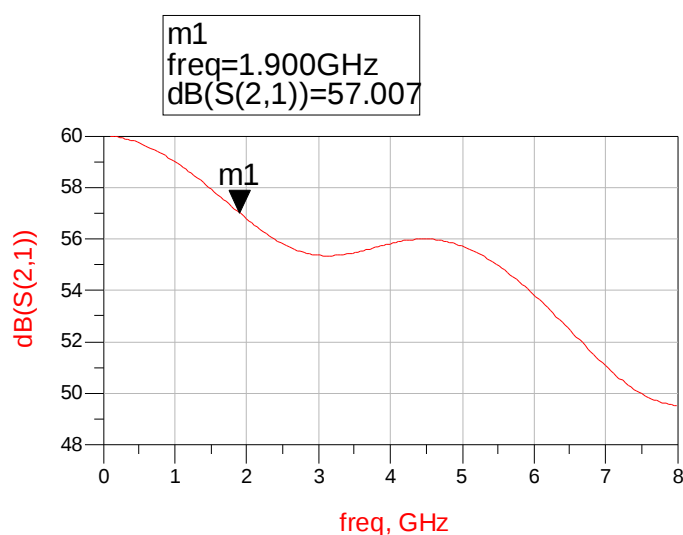


Ilustración 10: Pérdidas de Inserción Circuito con Un Amplificador de Ganancia 60 dB

Como podemos observar en las figuras anteriores, los resultados son prácticamente desastrosos. Vamos a intentar encontrar una explicación para ellos.

Respecto al parámetro S_{11} : vemos que a ninguna frecuencia se encuentra cerca de lo que podríamos considerar un valor cercano al caso ideal (-40 dB). Tan solo tenemos resultados aceptables a frecuencias bajas (hasta aproximadamente 1 GHz). Además podemos ver algo que nos puede llamar mucho la atención: S_{11} está por encima de 1 en un intervalo de frecuencias. Esto solo puede tener una explicación: debido al “leakage” de nuestra red, es decir, la presencia de señal procedente de la salida de la placa, en la entrada de la misma, la ganancia del bucle (como tuvimos ocasión de estudiar en la parte teórica) es mayor de 0 dB. Dada la alta

ganancia del amplificador, el nivel de señal que esté llegando procedente del fin de la placa (por pequeño que sea), se está amplificando en 60 dB.

Las consecuencias parecen evidentes en las figuras correspondientes. Si nos fijamos en el parámetro S_{21} , podemos ver la pérdida de ganancia del amplificador. A una frecuencia de 1.9 GHz tenemos una bajada de 3 dB de ganancia, como se ha remarcado en la figura.

Para seguir aclarando el asunto del “leakage” vamos a bajar la ganancia del amplificador a 40 dB, intentando de esta manera que la ganancia del bucle sea menor que 0 dB. Si todo fuera correctamente, deberíamos notar una mejoría en las simulaciones. Veamos a continuación los resultados:

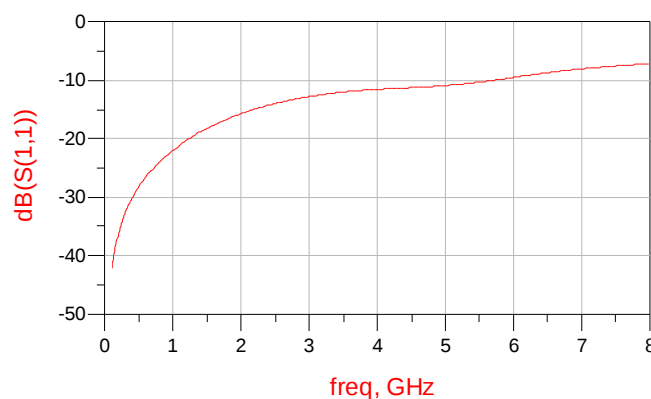


Ilustración 11: Pérdidas por Retorno Circuito con Un Amplificador de Ganancia 40 dB

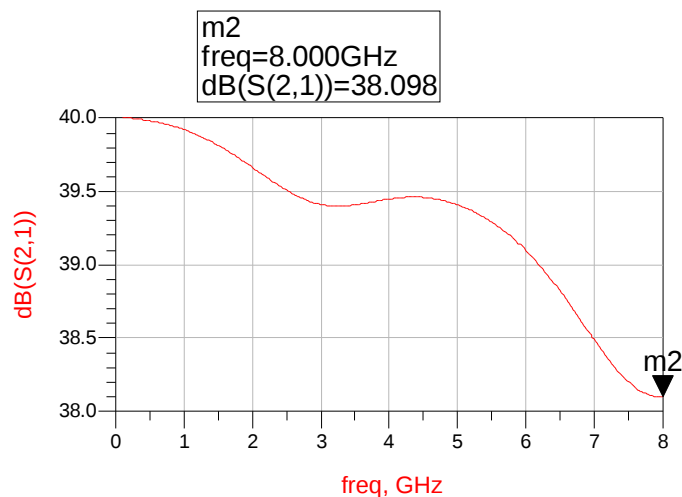


Ilustración 12: Pérdidas de Inserción Circuito con Un Amplificador de Ganancia 40 dB

Queda patente de las anteriores figuras el fenómeno de la retroalimentación parásita de radiación. Como podemos ver, ahora los resultados se aproximan algo más al caso ideal a frecuencias bajas, mientras que tendremos números aceptables en un rango más amplio de frecuencias.

Podemos comprobar esto último en la representación de S_{21} , en la que en todo el rango de frecuencias estudiado, no se llega a una disminución de la ganancia de 2 dB, mientras que en el caso anterior, alcanzábamos una reducción de 3 dB a una frecuencia de 1,9 GHz.

Como última evidencia del problema, vamos a bajar todavía más la ganancia del amplificador, haciendo todavía más baja la ganancia del bucle, reduciendo de esta manera los efectos del “leakage” de la placa de circuito impreso. Tomemos una ganancia de 20 dB para el amplificador, y veamos los resultados:

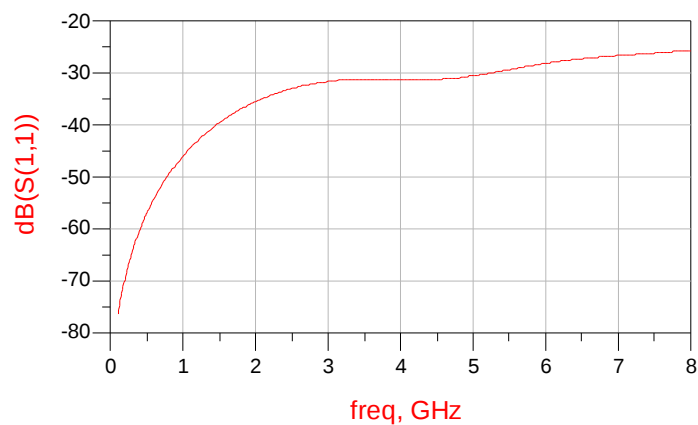


Ilustración 13: Pérdidas por Retorno Circuito con Un Amplificador de Ganancia 20 dB

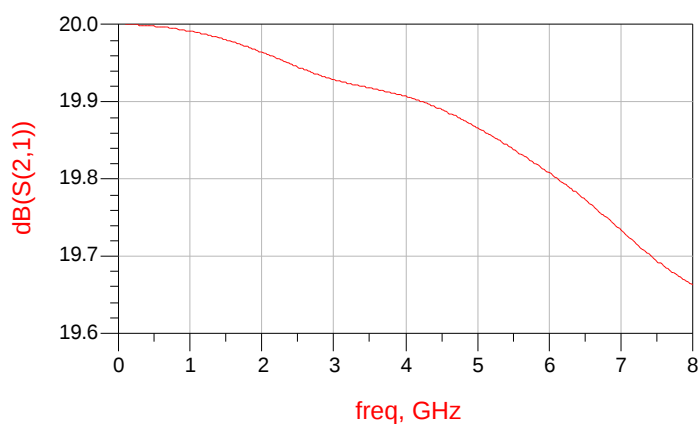


Ilustración 14: Pérdidas de Inserción con Un Amplificador de Ganancia 20 dB

Como podemos ver ahora, los resultados son muy parecidos al caso ideal a frecuencias bajas, siendo los resultados más que aceptables en el resto de frecuencias, además de ser los esperados en primera instancia.

4 Layout de la Placa Base para Una Cadena de Dos Amplificadores

4.1 Definición de la Estructura

El procedimiento para la definición de la estructura será similar al seguido en el punto 3.1 del presente capítulo. Por ello, nos vamos a ceñir a discutir los cambios tan solo, presentando el aspecto final de la red de microondas.

Los cambios se van a deber solo a la parte de línea de transmisión. Debemos adaptar esta parte para poder introducir una cadena de dos amplificadores. Para ello colocaremos tres líneas de transmisión, a saber:

- Línea de transmisión de entrada: será la encargada del transporte de señal desde la entrada de la red a la entrada del primer amplificador de la cadena. Sus características serán las siguientes:
 - o $W = 1,55608 \text{ mm}$.
 - o $L = 13,6924 \text{ mm}$.
 - o $\angle_{\text{eléct}} = 180 \text{ grados}$.
- Línea de transmisión de salida: será la encargada del transporte de señal desde la salida del segundo amplificador de la cadena a la salida de la red de microondas. Sus características serán las siguientes:
 - o $W = 1,55608 \text{ mm}$.
 - o $L = 13,6924 \text{ mm}$.
 - o $\angle_{\text{eléct}} = 180 \text{ grados}$.
- Línea de transmisión intermedia: será la encargada del transporte de señal desde la salida del primer amplificador a la entrada del segundo. Sus características serán las siguientes:
 - o $W = 1,55608 \text{ mm}$.
 - o $L = 13,2952 \text{ mm}$.
 - o $\angle_{\text{eléct}} = 174,779 \text{ grados}$.

Debemos prestar especial cuidado a la hora de definir el largo de las líneas (que definirá la longitud eléctrica de la misma), debido a que debemos evitar la formación de transformadores

en $\lambda/4$ en todo el rango de frecuencias a estudiar. Para ello, debemos evitar que la longitud eléctrica de la línea sea múltiplo impar de la longitud eléctrica correspondiente a $\lambda/4$.

La longitud de la línea intermedia se ha ajustado para que la longitud total de las líneas junto a los huecos habilitados para los amplificadores sea la longitud de la placa (45 mm).

En la figura siguiente se representa cómo debería quedar el layout:

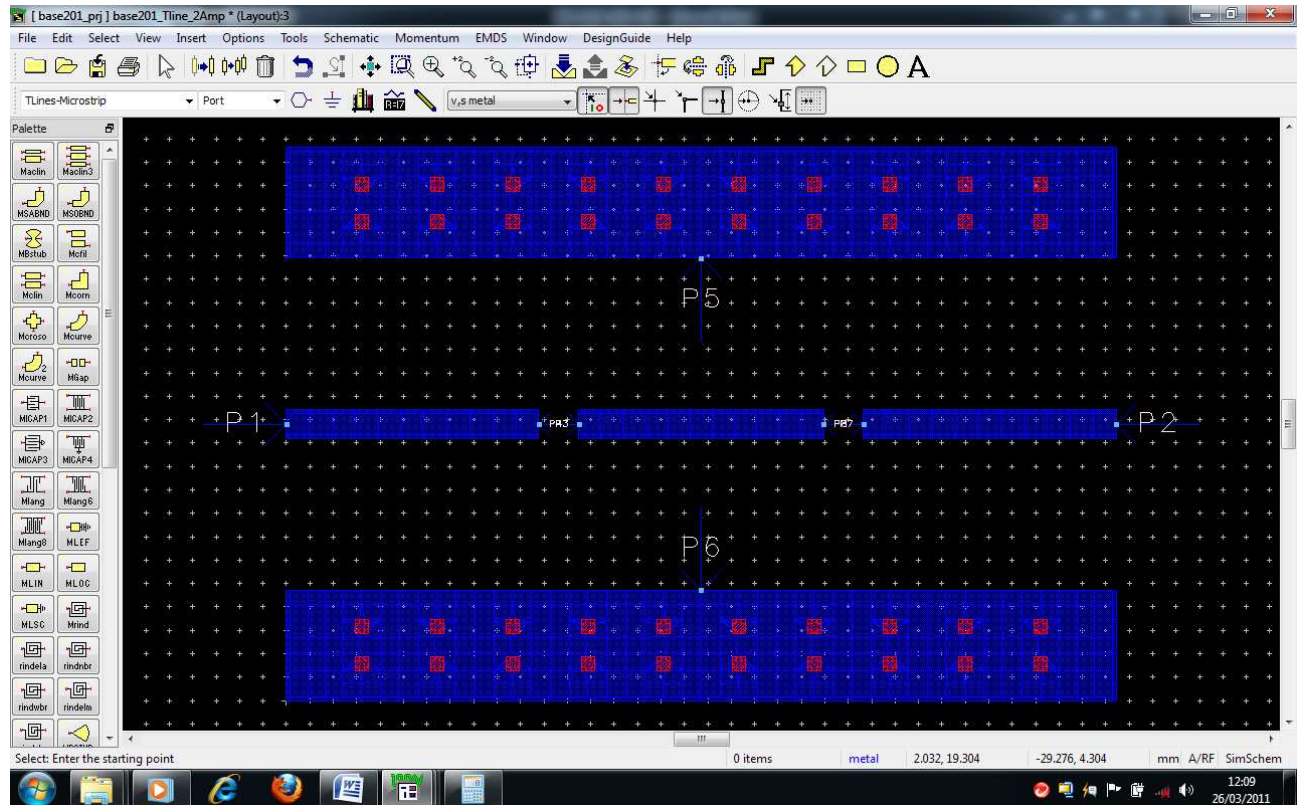


Ilustración 15: Placa de Circuito Impreso para Cadena de Dos Amplificadores

Los demás parámetros de la estructura son:

- Dimensiones de la placa de circuito impreso: 45 x 30 mm^2 .
- Dimensiones de las microtiras de puesta a tierra: 45 x 6 mm^2 .
- Cuatro filas de diez VH.
- Separación entre VH: 2 mm.
- Diámetro de las VH: 0,8 mm.
- Espacio entre las líneas de transmisión: 2,16 mm.
- Definición de ocho puertos: carácter interno.

Las características de la simulación van a ser las siguientes:

- Frecuencia inicial: 100 MHz.
- Frecuencia final: 8 GHz.
- Máximo número de puntos: 20.

4.2 Definición de Puertos

A continuación se van a definir los puertos que se han usado en la definición de la estructura:

- P1 y P2: se corresponden con la entrada y salida de la red de microondas. Colocados al inicio de la línea de entrada, y al final de la línea de salida.
- P3 y P4: se corresponden con la entrada al primer amplificador y su salida. Colocados al final de la línea de entrada y comienzo de la línea intermedia.
- P7 y P8: se corresponden con la entrada al segundo amplificador y su salida. Colocados al final de la línea intermedia y comienzo de la línea de salida.
- P5 y P6: serán los puertos auxiliares comentados en el apartado 3.2, que se pondrán a tierra por defecto.

4.3 Simulación de la Estructura con una Cadena de Amplificadores Ideales

Los resultados de la simulación del layout en “momentum” son similares a los presentados en el apartado 3.3 del presente capítulo, con lo cual se pasará directamente a la ventana de esquemático de la forma que ya se presentó en dicha sección.

Además, dentro del diseño esquemático se pasará directamente a comentar los resultados que se van a obtener colocando la cadena de amplificadores ideales. En la siguiente figura se muestra cómo debe quedar el circuito en la ventana de esquemático:

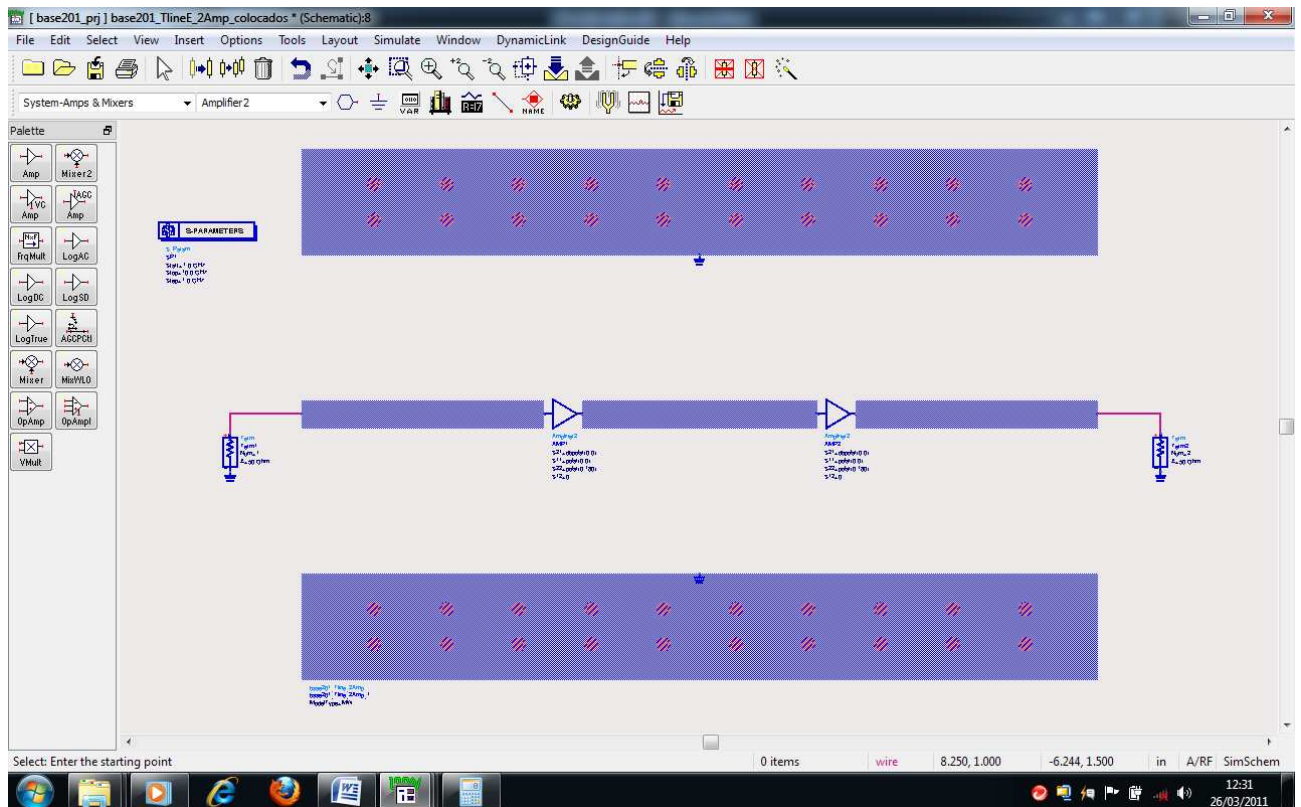


Ilustración 16: Ventana de Esquemático Circuito con Dos Amplificadores en Cascada

Ajustaremos la ganancia de cada amplificador a 30 dB. Con ello, la ganancia total de la cascada será de 60 dB. Debemos esperar unos resultados al menos igual de desastrosos que los obtenidos en el primer caso del punto 3.5 del presente capítulo. Los parámetros de simulación son los mismos que los seguidos en dicho punto. Veamos los resultados de la simulación:

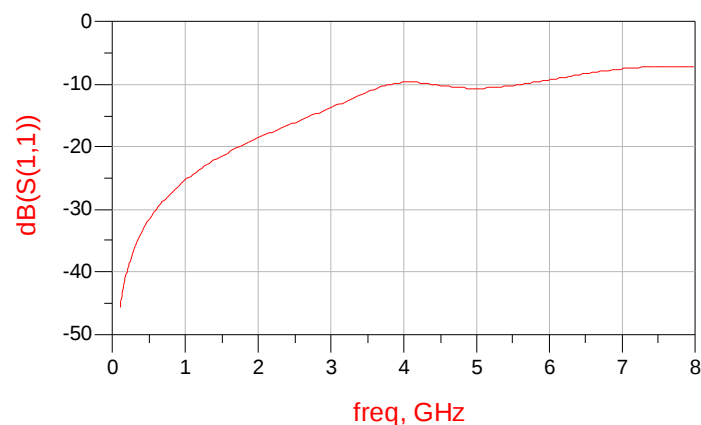


Ilustración 17: Pérdidas por Retorno Circuito con Una Cadena de Dos Amplificadores de Ganancia 30 dB

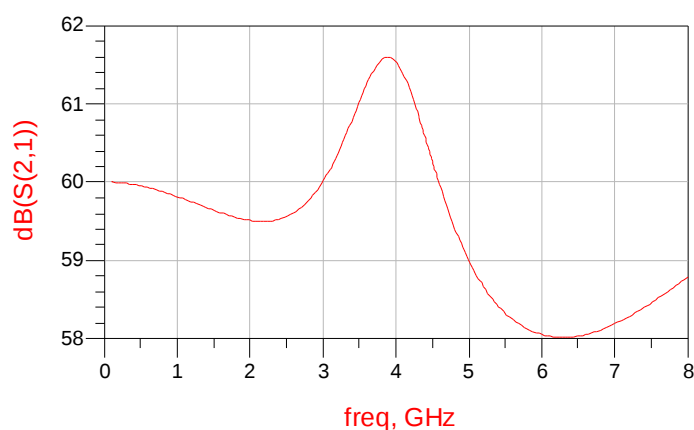


Ilustración 18: Pérdidas de Inserción con Una Cadena de Dos Amplificadores de Ganancia 30 dB

Nos encontramos con una inesperada primera sorpresa: los resultados son bastante mejores que los obtenidos con un solo amplificador de ganancia 60 dB. De hecho, los resultados son muy parecidos a los obtenidos con un solo amplificador de ganancia 30 dB. Podemos realizar una explicación de lo anterior.

La clave está en que se tratan de amplificadores ideales, por lo que tendrán un coeficiente $S_{12} = 0$. Esto quiere decir que todo lo que se le introduce al amplificador sale por su salida, no transmitiendo nada hacia atrás. De ahí el total desacople entre ambos amplificadores en la cadena propuesta, y los resultados obtenidos.

Vemos que obtenemos resultados bastante aceptables hasta una frecuencia aproximada de 2 GHz. Por ello, podemos concluir que la conciliación de alta ganancia con un buen comportamiento, no pasa por colocar amplificadores de mayor ganancia, sino de colocar un mayor número de ellos (todo esto sin perder de vista que, como se ha comentado, estamos tratando con amplificadores ideales).

Merece la pena comentar el pico de ganancia mayor de 60 dB obtenido a ciertas frecuencias, como podemos ver en la figura 148: esto podría deberse a que el “leakage” no solo llega al comienzo de la placa, sino que también puede llegar a puntos intermedios de la misma, más en concreto a la entrada del segundo amplificador de la cadena. Por ello, se produce un aumento de la ganancia total esperada.

Veamos por último el caso de una ganancia total de la cascada menor. Ajustamos la ganancia de los amplificadores a 20 dB, obteniendo de esta manera una ganancia total de 40 dB en la cadena. Los resultados obtenidos son:

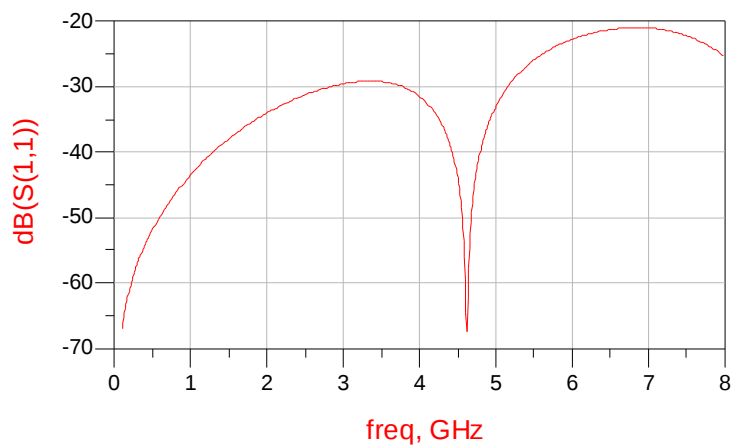


Ilustración 19: Pérdidas por Retorno Circuito con Una Cadena de Dos Amplificadores de Ganancia 20 dB

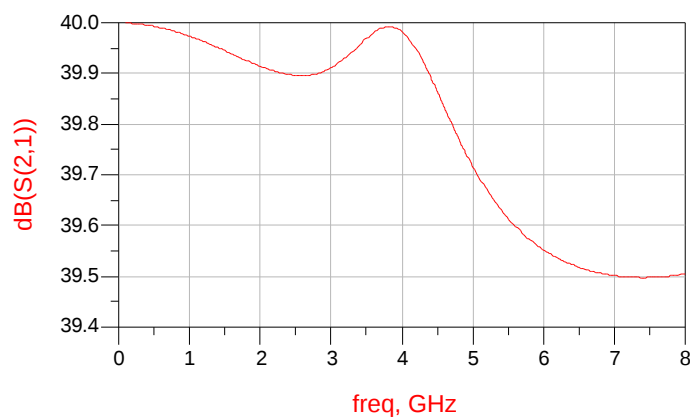


Ilustración 20: Pérdidas por Inserción Circuito con Una Cadena de Dos Amplificadores de Ganancia 20 dB

Como se puede observar, los resultados son más que buenos. Hemos aumentado el ancho de banda bastante respecto al caso de la colocación de un solo amplificador. Podríamos decir que tenemos un ancho de banda de aproximadamente 5 GHz (tomando como referencia un valor de ~~40 dB~~ para las pérdidas por retorno, y teniendo una mínima variación de la ganancia total).

Además, como vemos podemos gozar de un punto cercano a los 4,5 GHz en el que el comportamiento se aproximaría mucho al caso ideal. Se podría decir que en este punto estamos trabajando en un caso ideal.