

CAPÍTULO 4.

DISEÑO DE CIRCUITOS CON LÍNEAS MICROSTRIP.

Con los capítulos anteriores hemos establecido las bases teóricas necesarias sobre las que se cimentará el desarrollo práctico del proyecto. En este capítulo vamos a ver cómo es todo el proceso de diseño de los circuitos que vamos a implementar posteriormente. Así, en primer lugar, modelaremos el esquemático del circuito con una herramienta software de diseño de circuitos. Posteriormente, haremos el diseño del *layout* de los dispositivos, con lo que al final del capítulo tendremos los circuitos perfectamente definidos y preparados para pasar a la fase de construcción de los mismos, que se explicará en el capítulo posterior. Así, vamos a ir viendo todo el proceso de diseño circuito a circuito.

4.1. FILTRO DE LÍNEAS.

4.1.1. Diseño en línea microstrip.

Una vez vistos los fundamentos teóricos de los filtros de líneas en el capítulo anterior, pasamos al desarrollo práctico de dicho filtro, es decir, su implementación. En primer lugar vamos a realizar la implementación software del diseño. Para ello, necesitamos basarnos en un conocimiento previo de la respuesta del dispositivo que queremos llevar a cabo, con lo que tendremos que recurrir a algún libro de texto o a alguna publicación en alguna revista donde se encuentre el desarrollo teórico y la respuesta teórica del circuito a implementar. En nuestro caso, utilizaremos como fuente un libro de gran divulgación y reconocido prestigio como es el *Microwave Engineering*, de David M. Pozar, de la editorial John Wiley & Sons, Inc., en su segunda edición.

Así, en la página 467 de dicho libro se encuentra el modelo en el cual nos vamos a basar, con las impedancias características de cada sección de línea *microstrip*. En la Figura 4.1 vemos el esquema de dicho filtro en línea *microstrip*.

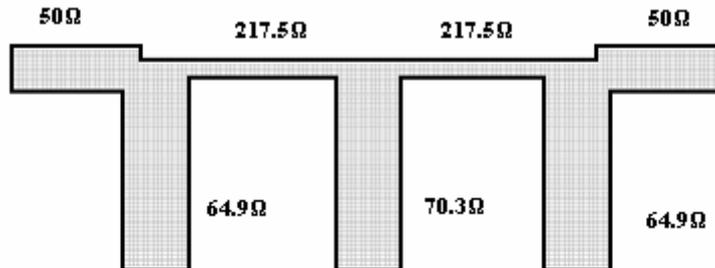


Figura 4.1. Fabricación en línea *microstrip*

Por supuesto, la respuesta de este filtro es conocida, y nuestro objetivo será conseguir una respuesta lo más parecida posible a la respuesta teórica ideal.

Se trata, pues, de un filtro paso de bajo, cuya frecuencia de corte es de 700 Mhz, de tercer orden, impedancia de 50 ohmios, y una característica de igual rizado de 3 dB. Sin embargo, este valor del rizado, por exigencias de la aplicación del filtro que se va a implementar en el proyecto, será modificado, y se intentará minimizar por todos los medios, dejándolo con valores inferiores a los 0.5 dB en toda la zona de paso, como se verá posteriormente.

Para obtener el modelo en línea *microstrip* del circuito, se realizan una serie de pasos:

- Se parte de los valores de los elementos del prototipo paso de baja normalizado, que se encuentran en la Tabla 8.4 del libro, para obtener el circuito de elementos concentrados formado por bobinas serie y condensadores (en este caso sólo uno, al ser de tercer orden) paralelo.
- Se aplica la transformada de Richard para convertir las bobinas serie en *stubs* serie, y los condensadores paralelo en *stubs* paralelo. Para la síntesis de las líneas commensuradas, la longitud de todos los *stubs* es de $\lambda/8$ a $\omega = \omega_c$.
- Puesto que los *stubs* serie son muy difíciles de implementar en forma *microstrip*, se usan las identidades de Kuroda para convertir los *stubs* serie en *stubs* paralelo.
- Finalmente, sólo falta desnormalizar el circuito multiplicando todos los valores por 50, que es el valor de la impedancia característica, y elegir la longitud de las líneas y *stubs* para que sean $\lambda/8$ a 700 Mhz.

Así, obtenemos el circuito deseado que queremos implementar, cuya respuesta teórica aparece en la Figura 8.37 del Pozar.

Ahora, pues, pasamos a diseñar el dispositivo en algún programa de diseño de circuitos informático. En nuestro caso, usaremos el *Advanced Design System* o ADS, en su versión 2003A, que es un programa de diseño profesional de uso muy extendido por todo el mundo, debido a su potencia y fácil manejo.

Antes de realizar el diseño, hay que tener en cuenta el sustrato sobre el que vamos a realizar la implementación física del dispositivo, puesto que las características de dicho sustrato influirán en la respuesta del circuito. En nuestro caso, las características del sustrato serán las siguientes:

- ϵ_r (permitividad relativa): 4.8
- H (altura del sustrato): 1.6mm
- T (grosor de la tira): 0.017m
- TanD (tangente de pérdidas): 0.1m

El resto de valores permanecen por defecto.

Como ya hemos comentado, de entre las múltiples tecnologías disponibles, vamos a desarrollar el diseño en tecnología *microstrip*, ya que dicho filtro se realiza normalmente con dicha tecnología. Así, el diseño del circuito en línea *microstrip* queda como se muestra en la Figura 4.2.

Como nota, es conveniente destacar la importancia de poner las cargas de 50 ohmios en las terminaciones de los puertos, para que no haya pérdida de potencia al hacer las medidas de los parámetros-S, y las respuestas sean satisfactorias.

Para el ajuste de la respuesta en frecuencia, el programa ADS dispone de una opción,



llamada *Tune Parameters* (también se puede encontrar en *Simulate>Tuning...*), que permite el ajuste fino de la respuesta, mediante la modificación de las variables que nosotros elijamos, a fin de obtener el resultado que andamos buscando. Este ajuste es muy importante, ya que aunque metamos todos los parámetros correctamente, siempre habrá que hacer una pequeña labor de corrección a fin de depurar al máximo la respuesta deseada y que se asemeje lo máximo posible a la respuesta teórica.

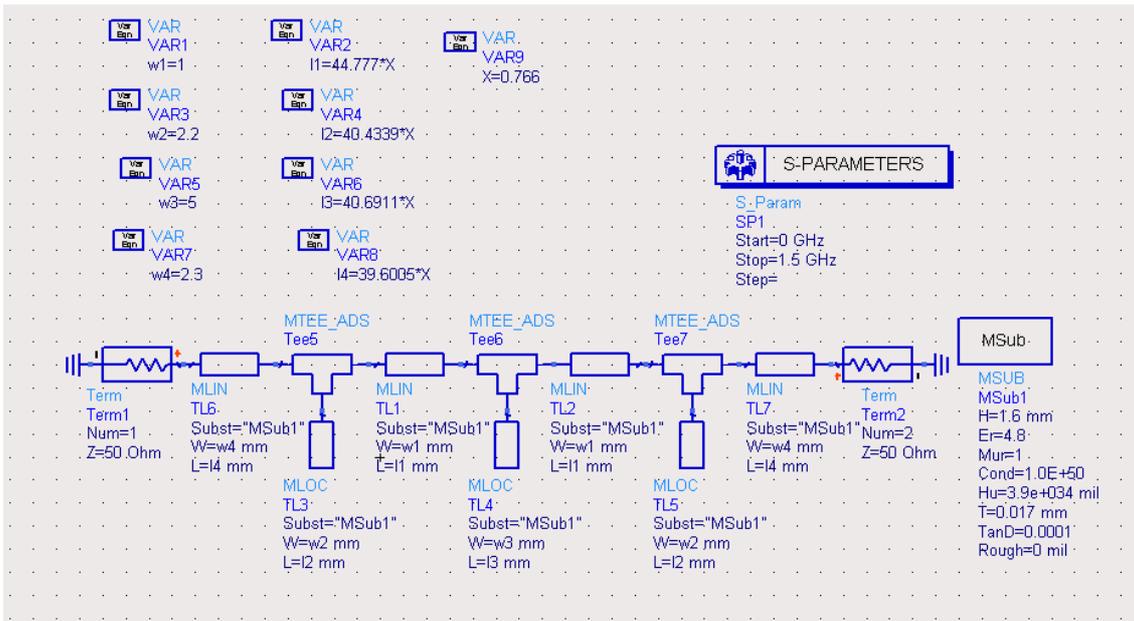


Figura 4.2. Diseño del filtro en línea *microstrip*.

Un ajuste fino en la etapa de diseño será fundamental, ya que luego en la implementación física habrá pérdidas y desajustes que repercutirán en la respuesta del filtro, debidas a las limitaciones físicas propias de los dispositivos y herramientas de modelado (imprecisión, cálculo “a ojo”, desgaste de herramientas, elementos de montaje superficial, etc.), y dichas pérdidas se deben minimizar en esta etapa de ajuste.

La respuesta en magnitud frente a la frecuencia del filtro (incluyendo las pérdidas por retorno) aparece en la Figura 4.3.

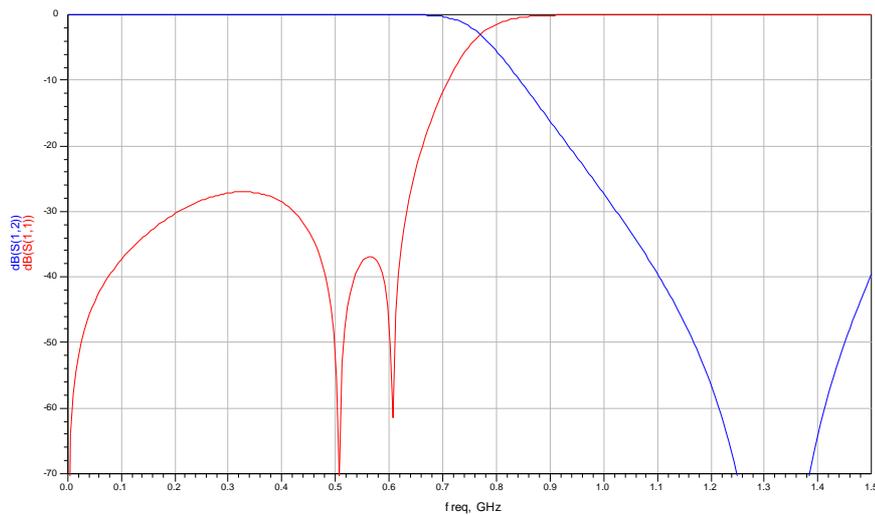


Figura 4.3. Respuesta en magnitud frente a frecuencia del filtro paso de bajo.

En dicha Figura podemos ver que gracias a la opción de ajuste o *tuning* de la que dispone el programa ADS hemos podido mejorar considerablemente la respuesta del filtro, tanto en el rizado en la banda de paso, que ha sido prácticamente eliminado, como en las pérdidas por retorno, que en toda la banda de paso quedan por debajo de 25 dB.

Los parámetros-S del dispositivo, representados en la carta de Smith, se muestran en la Figura 4.4.

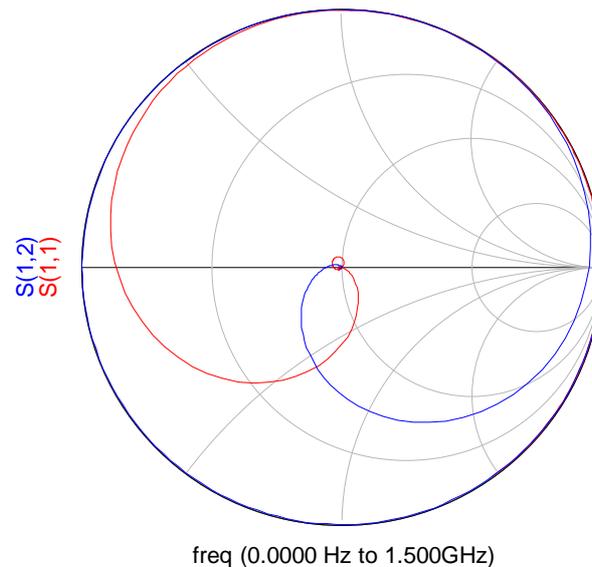


Figura 4.4. Parámetros-S del filtro paso de bajo.

Así pues, partiendo de un modelo teórico extraído de un libro, hemos conseguido mejorar el diseño gracias a la ayuda de un programa informático. Una vez cumplido el objetivo, pasamos al diseño del *layout*.

4.1.2. Diseño del layout.

Esta etapa es fundamental porque nos dará el aspecto que tendrá finalmente el filtro paso de baja. Para el diseño del *layout*, disponemos de dos opciones:

- 1) Implementarlo con el programa ADS, ya que dispone de una opción que permite generar el *layout* del dispositivo a partir de su esquemático, denominada *generate/update layout*, y exportarlo posteriormente a algún programa que maneje los ficheros que entiende la máquina que realizará la implementación física del dispositivo. Dicha máquina es de la compañía LPKF, en concreto es el modelo *ProtoMat C20*. En nuestro caso, el programa que usaremos será el *CircuitCAM*, versión 4.0, que es el programa que sirve de interfaz con el controlador de la máquina, que es el programa *Boardmaster*.

- 2) Implementarlo directamente en el programa *CircuitCAM*, versión 4.0. Esta opción tiene como inconveniente que no nos permite generar directamente el *layout* a partir del esquemático, sino que tenemos que darle las medidas adecuadas y construirlo pieza a pieza, lo cual es más engorroso.

Así pues, en este caso hemos optado por la primera opción, es decir, implementarlo con el programa ADS y luego exportarlo al *CircuitCAM*. La causa por la que nos hemos decantado por esta opción es que el ADS dispone de una opción que permite obtener el diseño del *layout* directamente del diseño en línea *microstrip*, con lo cual nos ahorramos la implementación y la posibilidad de equivocarnos en el proceso del mismo.

Por tanto, a partir del *layout* del diseño en línea *microstrip*, mediante la opción *Export* del ADS, obtenemos el fichero que vamos a exportar, que salvaremos con formato HPGL/2, que es uno de los formatos exportables al programa *CircuitCAM*. El fichero podemos verlo en la captura de la Figura 4.5.

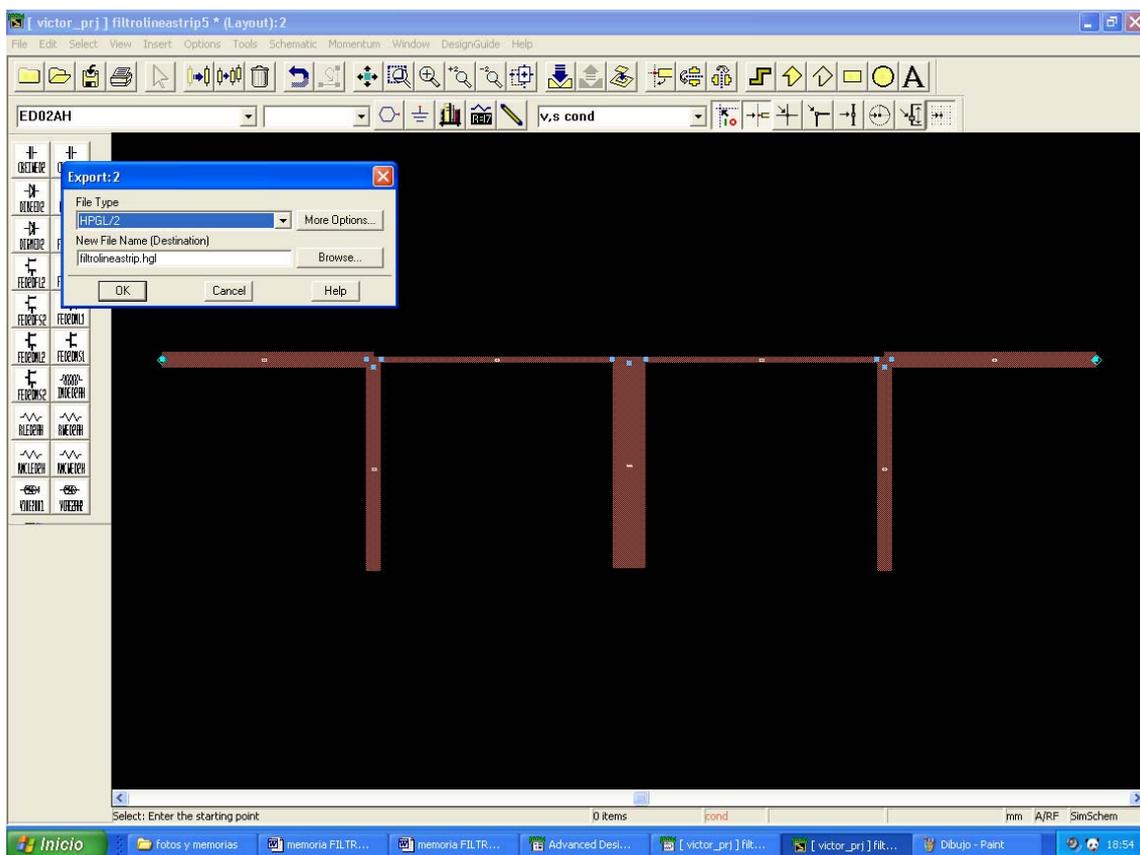


Figura 4.5. Fichero a exportar.

4.2. DIVISOR DE WILKINSON.

4.2.1. Diseño en línea microstrip.

Al igual que ya hemos comentado anteriormente, todos los conocimientos teóricos necesarios para el diseño del dispositivo se han visto en el capítulo 2, con lo cual nos encontramos en disposición de pasar al desarrollo práctico, es decir, al diseño del circuito. Empezamos realizando la implementación software del diseño. Puesto que necesitamos basarnos en algún modelo teórico ya implementado para poder contrastar los valores obtenidos con los teóricos, utilizaremos como fuente el libro *Microwave Engineering*, de David M. Pozar, de la editorial John Wiley & Sons, Inc., en su segunda edición.

Por supuesto, la respuesta de este divisor de Wilkinson es conocida, y nuestro objetivo será conseguir una respuesta lo más parecida posible a la respuesta teórica ideal, que aparece en la Figura 4.12 de la página 367 del Pozar.

Una vez que ya tenemos el modelo en el cual vamos a basar nuestro diseño, pasamos a diseñar el dispositivo en el programa ADS. El sustrato que usaremos será el mismo que hemos usado para el filtro de líneas y el que usaremos en general para la fabricación de todas las placas, ya que los parámetros de dicho sustrato vienen fijados por las características físicas de la placa de trabajo, y no por las características propias de cada circuito. Como ya hemos visto anteriormente, las características del sustrato son las siguientes:

- ϵ_r (permitividad relativa): 4.8
- H (altura del sustrato): 1.6mm
- T (grosor de la tira): 0.017m
- TanD (tangente de pérdidas): 0.1m

El resto de valores permanecen por defecto.

Como ya hemos comentado, de entre las múltiples tecnologías que permite el divisor de Wilkinson, vamos a desarrollar el diseño en tecnología *microstrip*. Así, el diseño del circuito en línea *microstrip* se muestra en la Figura 4.6.

Conviene recordar la importancia de poner las cargas de 50 ohmios en las terminaciones de los puertos, para que no haya pérdida de potencia al hacer las medidas de los parámetros-S, y las respuestas sean satisfactorias.

Una vez que tenemos el diseño del divisor en línea *microstrip*, usamos la opción de ajuste o *tuning* de que dispone el ADS para conseguir la respuesta más satisfactoria del dispositivo tanto en parámetros de transmisión como de reflexión. En este caso, después de un ajuste fino, conseguimos valores de pérdidas de reflexión de hasta 75 dB. En la Figura 4.7 podemos ver la respuesta en frecuencia del divisor de Wilkinson, en la que se incluyen las respuestas de todos los puertos.

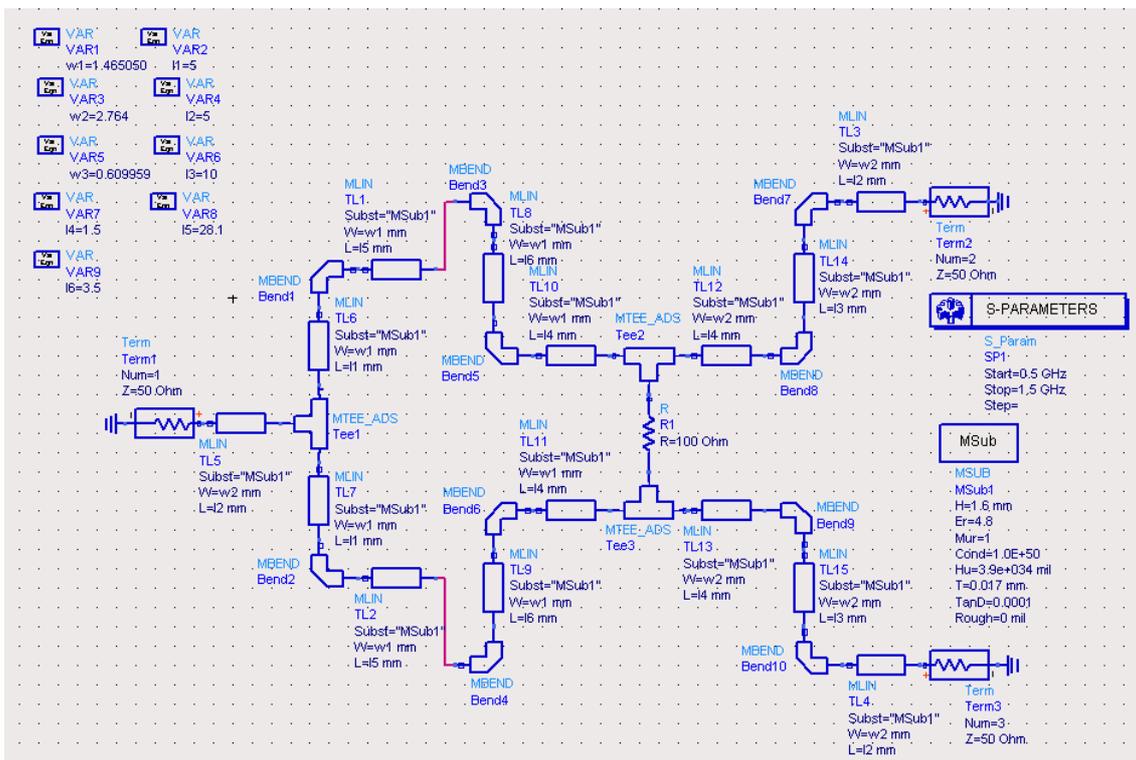


Figura 4.6. Diseño del filtro en línea *microstrip*.

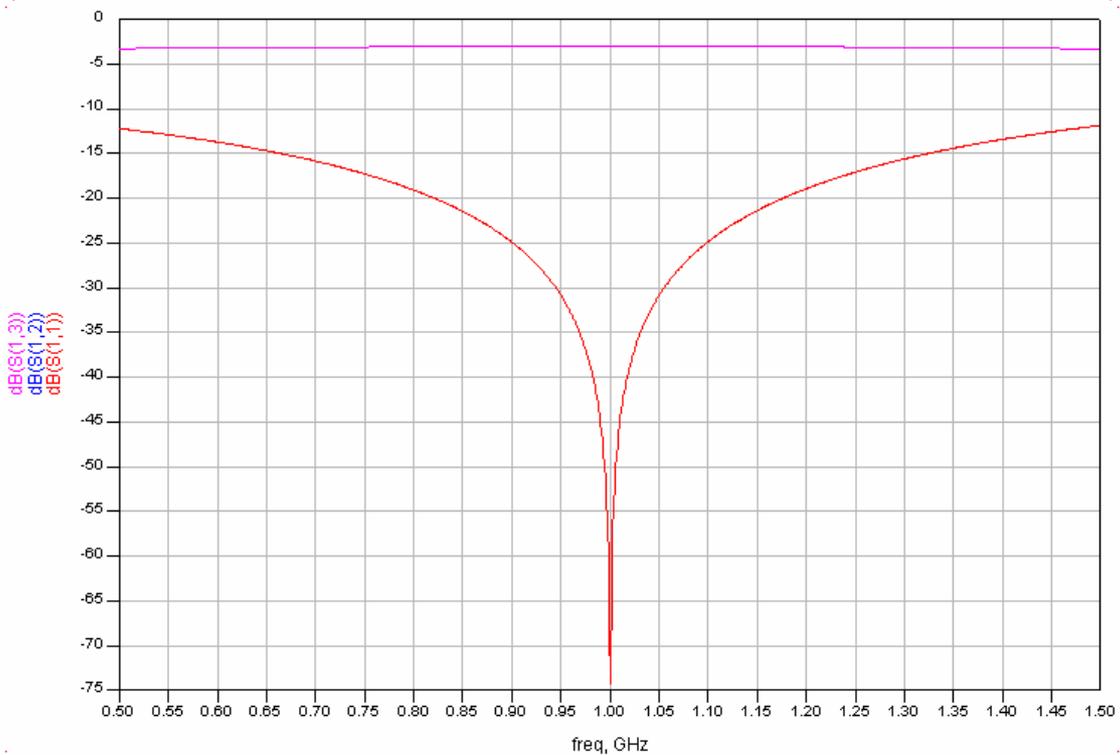


Figura 4.7. Respuesta en magnitud frente a frecuencia del divisor de Wilkinson.

En dicha Figura podemos ver que gracias a la opción de ajuste o *tuning* de la que dispone el programa ADS hemos podido mejorar considerablemente la respuesta del divisor.

Los parámetros-S del dispositivo, representados en la carta de Smith, se muestran en la Figura 4.8.

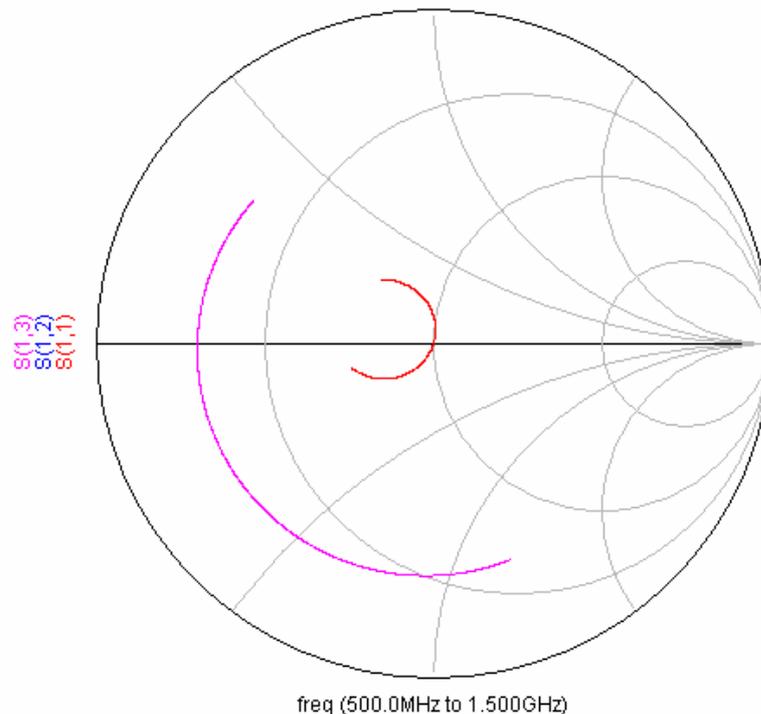


Figura 4.8. Parámetros-S del divisor de Wilkinson.

Podemos comprobar que dicha respuesta es incluso mejor que la que aparece en el *Microwave Engineering*, lo cual demuestra que el comportamiento del divisor es muy bueno, al menos en su concepto de simulación teórica. Este margen de error que nos permite una respuesta teórica así de óptima es muy importante, ya que a la hora de implementar el modelo real se producirán una serie de imperfecciones durante el proceso de creación que degradarán en parte el comportamiento del dispositivo. Por eso, cuanto más margen de error tengamos, más errores podremos permitirnos cometer durante la fabricación del dispositivo, y aún así conseguiremos una placa cuya respuesta seguirá satisfaciendo nuestras necesidades y restricciones iniciales.

Ahora pasamos al diseño del *layout*.

4.2.2. Diseño del layout.

Como ya hemos comentado, para diseñar el *layout* disponemos de dos opciones, que son o bien generar el *layout* en el ADS, mediante la opción *generate/update layout*, y exportarlo al CircuitCAM, o bien implementarlo directamente en el CircuitCAM. Como se ha comentado ya en repetidas ocasiones, elegiremos la primera opción, es decir, implementarlo con el programa ADS y luego exportarlo al CircuitCAM, puesto que es la opción con la que ya hemos trabajado anteriormente, y por tanto la más segura de que obtengamos buenos resultados.

Por tanto, a partir del *layout* del diseño en línea *microstrip*, mediante la opción *Export* del ADS, obtenemos el fichero que vamos a exportar, que salvaremos con formato HPGL/2. El fichero tendrá extensión “.hgl”. En la Figura 4.9 podemos ver el *layout* del circuito.

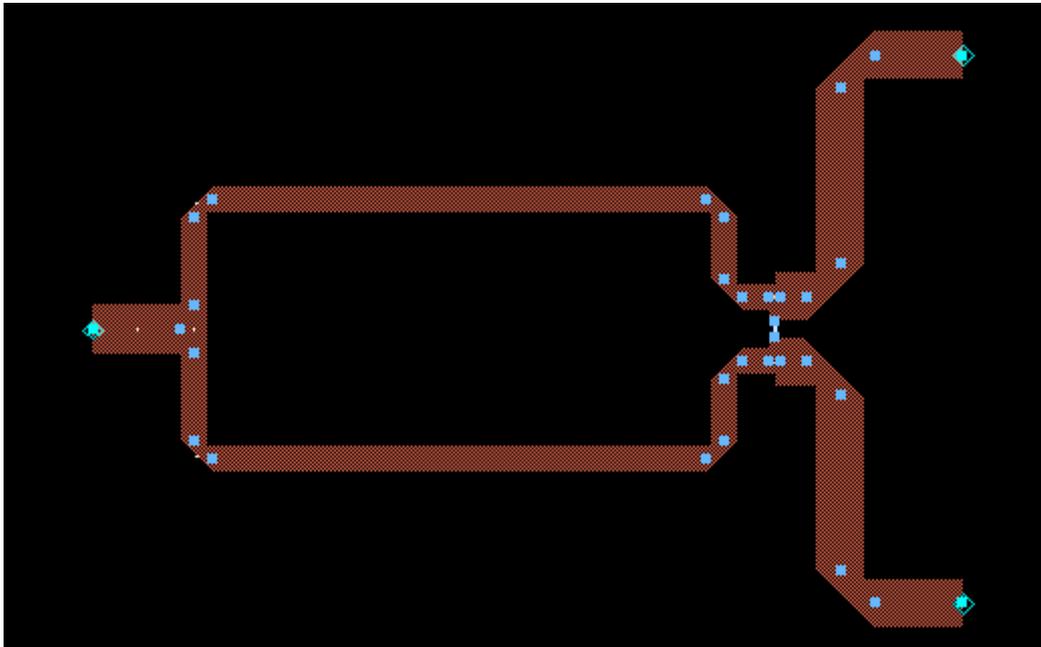


Figura 4.9. *Layout* del divisor de Wilkinson.

4.3. ACOPLADOR DE LÍNEAS ACOPLADAS.

4.3.1. Diseño en línea microstrip.

En el capítulo anterior ya vimos los fundamentos teóricos necesarios para el diseño del acoplador de líneas acopladas. Por tanto, nos encontramos en disposición de pasar a la parte práctica, es decir, al diseño del dispositivo. Como ya hemos hecho con los otros circuitos anteriores, comenzamos realizando la implementación software del diseño, para posteriormente realizar su implementación física.

La respuesta teórica en la que nos deberíamos basar como referencia, a diferencia de los circuitos vistos anteriormente, no aparece en el libro *Microwave Engineering*. Sin embargo, puesto que sabemos cuál debe ser el comportamiento de cada uno de los puertos del circuito, no nos hará falta conocer dicha respuesta teórica. El puerto *through* deberá dejar pasar cuanta más energía mejor, con lo que las pérdidas deben ser mínimas o nulas; el puerto *input* debe quedar adaptado en el rango de trabajo, el puerto *isolated* deberá estar lo más aislado posible, con un valor de pérdidas superior a los 20 dB, mientras que el puerto *coupled* no debería tener un acoplamiento inferior a 15 dB.

Una vez que sabemos cuál debe ser el comportamiento del circuito, pasamos a diseñar el dispositivo en el programa ADS. El sustrato que usaremos será el mismo que hemos usado para el filtro de líneas y el divisor de Wilkinson. Como ya hemos visto anteriormente, las características del sustrato son las siguientes:

- ϵ_r (permitividad relativa): 4.8
- H (altura del sustrato): 1.6mm
- T (grosor de la tira): 0.017m
- TanD (tangente de pérdidas): 0.1m

El resto de valores permanecen por defecto.

Al igual que hemos hecho con el resto de dispositivos, de entre todas las tecnologías que permite la fabricación de este dispositivo, vamos a desarrollar el diseño en tecnología *microstrip*. Así, el diseño del circuito en línea *microstrip* se muestra en la Figura 4.10.

Conviene recordar la importancia de poner las cargas de 50 ohmios en las terminaciones de los puertos, para que no haya pérdida de potencia al hacer las medidas de los parámetros-S, y las respuestas sean satisfactorias.

Una vez que tenemos el diseño del acoplador en línea *microstrip*, usamos la opción de ajuste o *tuning* de que dispone el ADS para conseguir la respuesta más satisfactoria del dispositivo tanto en parámetros de transmisión como de reflexión. En la Figura 4.11 podemos ver la respuesta en frecuencia del acoplador de línea acoplada, en la que se incluyen las respuestas de todos los puertos.

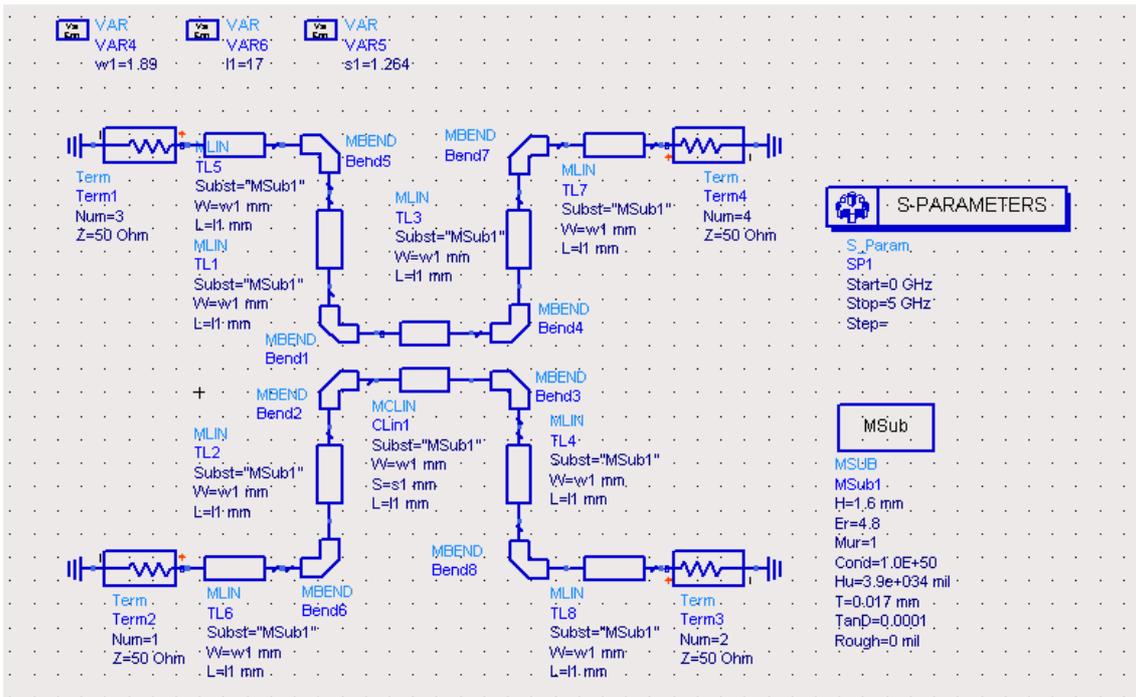


Figura 4.10. Diseño del acoplador en línea *microstrip*.

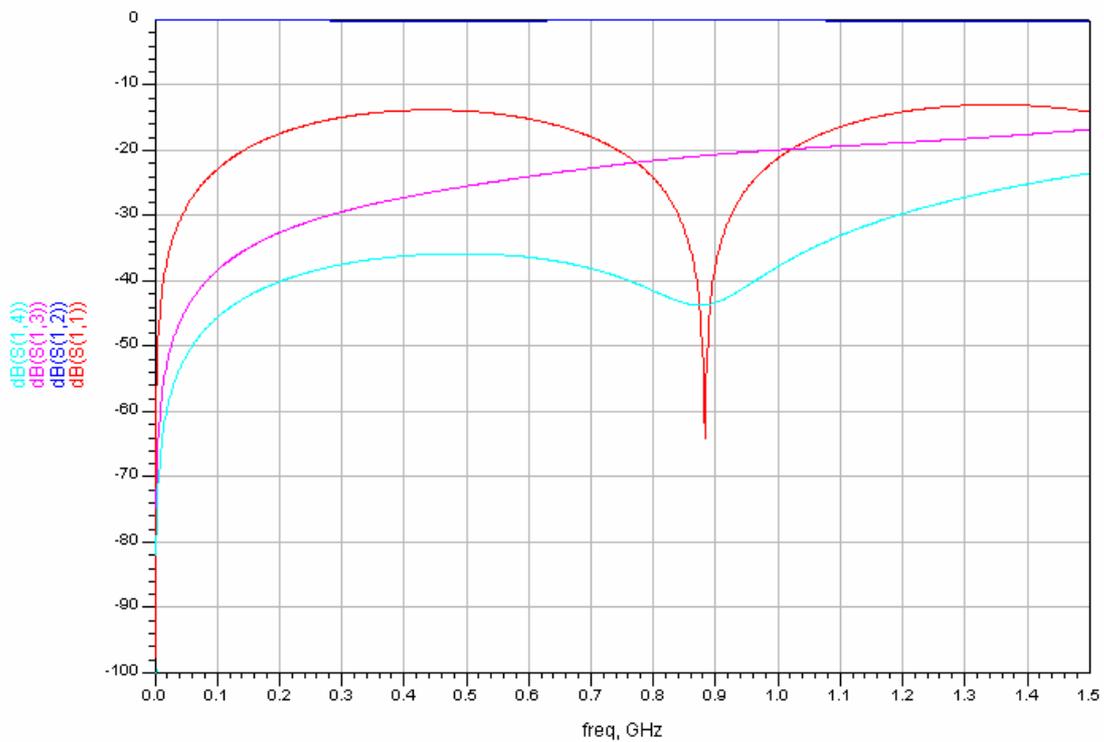


Figura 4.11. Respuesta en magnitud frente a frecuencia del acoplador de línea acoplada.

Los parámetros-S del dispositivo, representados en la carta de Smith, se muestran en la Figura 4.12.

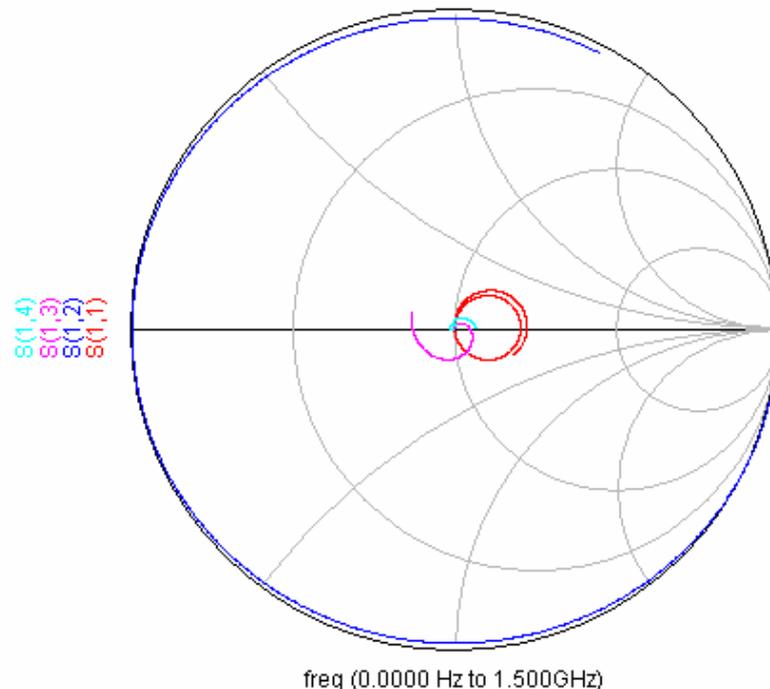


Figura 4.12. Parámetros-S del acoplador de línea acoplada.

Podemos comprobar que dicha respuesta es incluso mejor que la que aparece en el Pozar, lo cual demuestra que el comportamiento del acoplador es muy bueno, al menos en su concepto de simulación teórica. Este margen de error que nos permite una respuesta teórica así de óptima es muy importante, ya que a la hora de implementar el modelo real se producirán una serie de imperfecciones durante el proceso de creación que degradarán en parte el comportamiento del dispositivo. Por eso, cuanto más margen de error tengamos, más errores podremos permitirnos cometer durante la fabricación del dispositivo, y aún así conseguiremos una placa cuya respuesta seguirá satisfaciendo nuestras necesidades y restricciones iniciales.

4.3.2. Diseño del layout.

Como ya hemos comentado en repetidas ocasiones, para diseñar el *layout* disponemos de dos opciones, que son o bien generar el *layout* partiendo del esquemático en el ADS, mediante la opción *generate/update layout*, y exportarlo posteriormente al CircuitCAM, o bien implementarlo directamente en el CircuitCAM. Como se ha comentado ya muchas veces, elegiremos la primera opción, es decir, implementarlo con el programa ADS y luego exportarlo al CircuitCAM, puesto que es la opción con la que ya hemos trabajado anteriormente, y por tanto la más segura de que

obtenemos buenos resultados. Sin embargo, no usar la segunda opción no significa que ésta sea peor o dé peores resultados, ya que dicha solución es perfectamente válida también y da resultados similares.

Por tanto, a partir del *layout* del diseño en línea *microstrip*, que tiene extensión “.dsn”, que aparece en la Figura 4.13, mediante la opción *Export* del ADS, obtenemos el fichero que vamos a exportar, que salvaremos con formato HPGL/2. El fichero tendrá extensión “.hgl”, y será inteligible por el programa CircuitCAM.

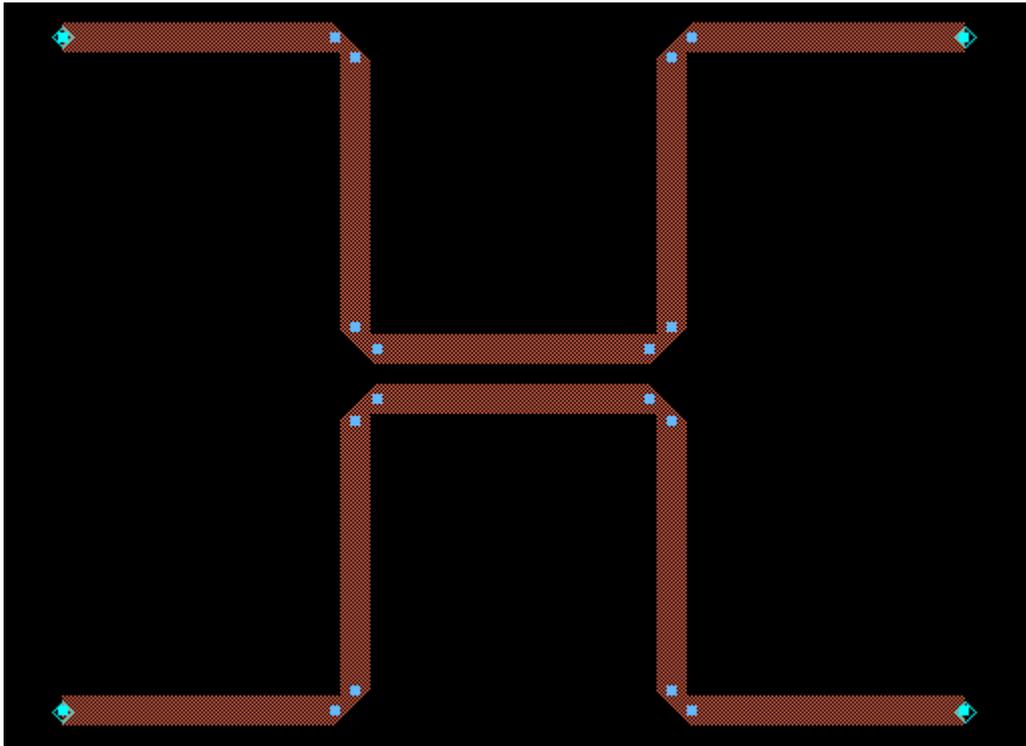


Figura 4.13. *Layout* del acoplador de líneas acopladas.

4.4. ANILLO HÍBRIDO.

4.4.1. Diseño en línea microstrip.

Una vez vista toda la introducción teórica pertinente en el segundo capítulo, pasamos a la realización de la implementación software del diseño. El modelo teórico en el que nos vamos a basar parte de la respuesta de la Figura 7.46 que se encuentra en la página 407 del libro *Microwave Engineering*, de David M. Pozar, de la editorial John Wiley & Sons, Inc., en su segunda edición. Éste es nuestro objetivo de diseño, e intentaremos que el comportamiento real final del dispositivo se parezca lo máximo posible a esta respuesta, que como ya sabemos muy difícilmente será igual debido a las imperfecciones durante el proceso de fabricación.

Una vez que ya tenemos el modelo en el cual vamos a basar nuestro diseño, pasamos a diseñar el dispositivo en el programa ADS. El sustrato que usaremos será el mismo que hemos usado para los anteriores dispositivos. Como ya hemos visto anteriormente, las características del sustrato son las siguientes:

- ϵ_r (permitividad relativa): 4.8
- H (altura del sustrato): 1.6mm
- T (grosor de la tira): 0.017m
- TanD (tangente de pérdidas): 0.1m

El resto de valores permanecen por defecto.

El anillo híbrido se puede fabricar con múltiples tecnologías, aunque, debido a la naturaleza de sus aplicaciones, se desarrolla principalmente en tecnología de guía de onda. Sin embargo, nosotros vamos a desarrollar el diseño en tecnología *microstrip*. Así, el diseño del anillo en línea *microstrip* se muestra en la Figura 4.14.

Conviene recordar la importancia de poner las cargas de 50 ohmios en las terminaciones de los puertos, para que no haya pérdida de potencia al hacer las medidas de los parámetros-S, y las respuestas sean satisfactorias.

Una vez que tenemos el diseño del anillo en línea *microstrip*, usamos la opción de ajuste o *tuning* de que dispone el ADS para conseguir la respuesta más satisfactoria del dispositivo tanto en parámetros de transmisión como de reflexión. En la Figura 4.15 podemos ver la respuesta en frecuencia del anillo híbrido, en la que se incluyen las respuestas de los cuatro puertos. El fichero resultante que contiene el diseño en línea *microstrip* tendrá extensión “.dsn”.

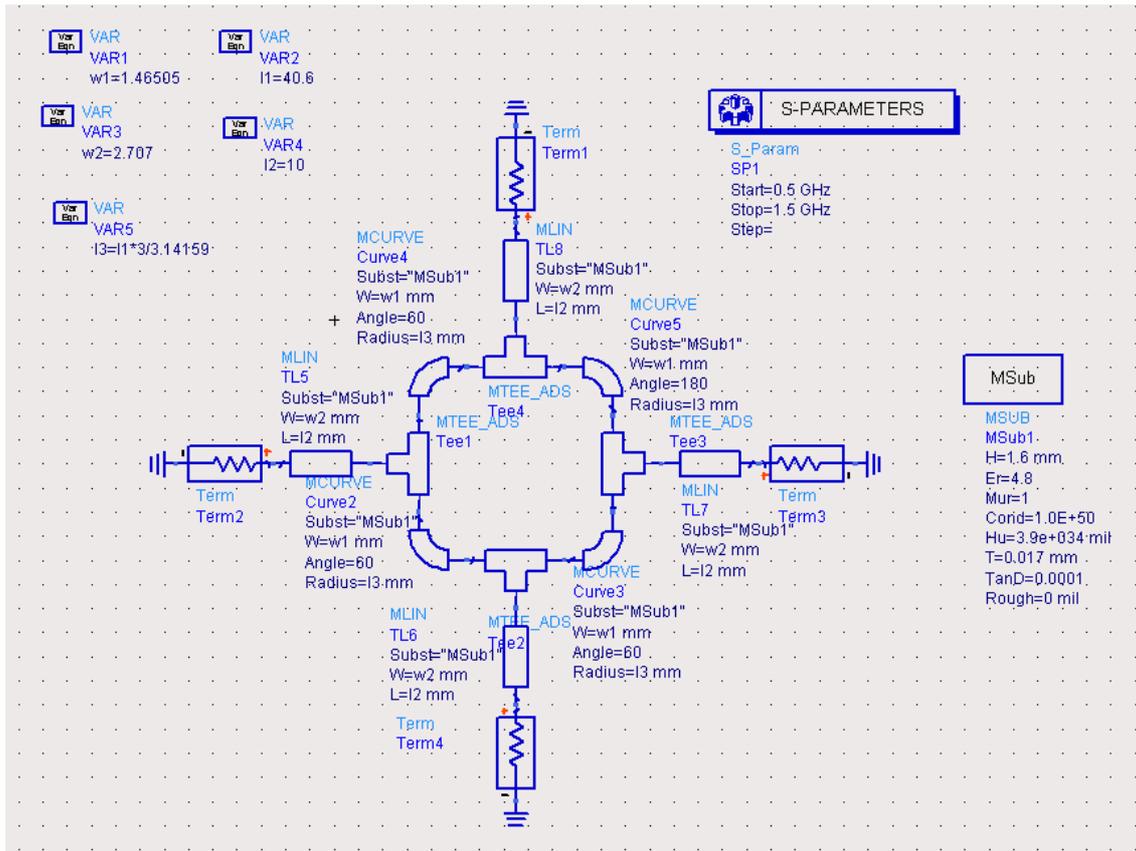


Figura 4.14. Diseño del anillo híbrido en línea *microstrip*.

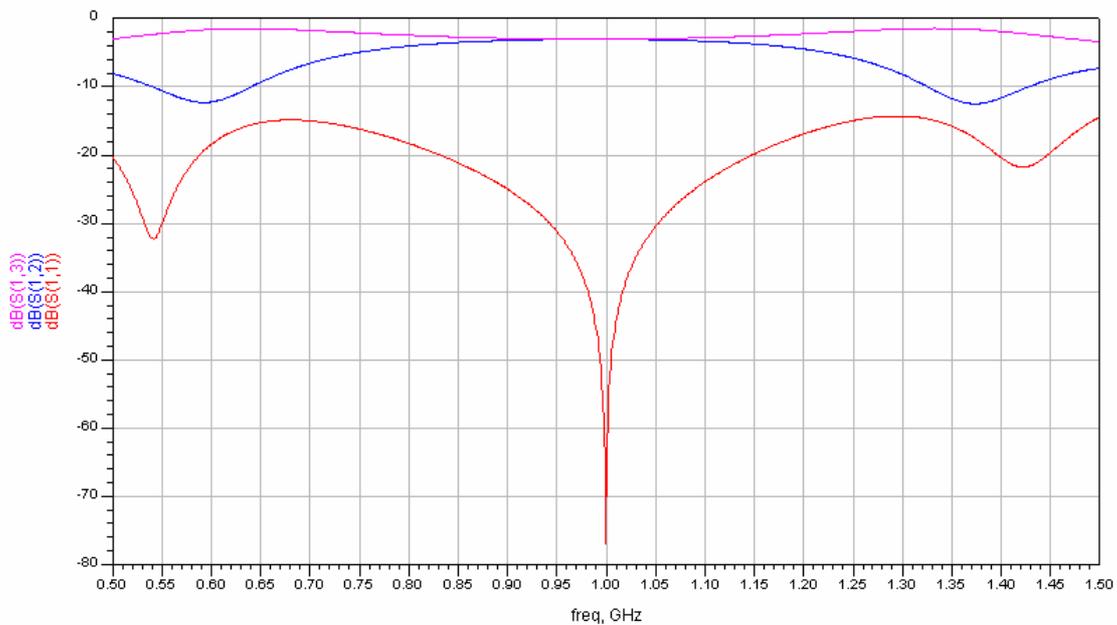


Figura 4.15. Respuesta en magnitud frente a frecuencia del anillo híbrido.

Los parámetros-S del dispositivo, representados en la carta de Smith, se muestran en la Figura 4.16.

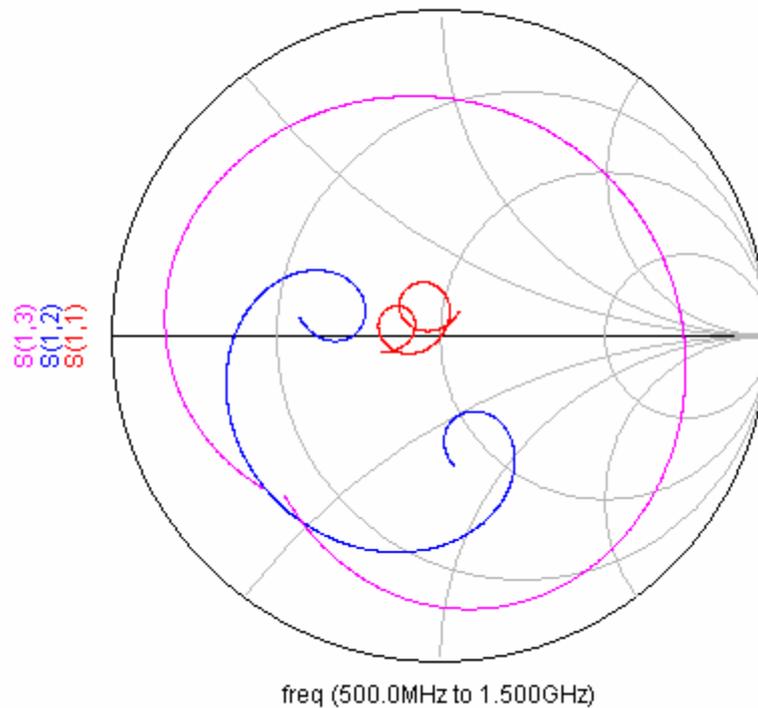


Figura 4.16. Parámetros-S del anillo híbrido.

Como se puede comprobar por medio de la gráfica de la magnitud frente a la frecuencia, la respuesta del diseño que hemos implementado en el ADS es mejor que la que aparece en el Pozar, ya que el coeficiente de reflexión tiene una caída mayor a la frecuencia de trabajo (1GHz), mientras que los coeficientes de transmisión tienen un comportamiento similar, lo cual demuestra que el comportamiento del anillo es muy bueno, al menos en su concepto de simulación teórica. Este margen de error que nos permite una respuesta teórica así de óptima es muy importante, ya que a la hora de implementar el modelo real se producirán una serie de imperfecciones durante el proceso de creación que degradarán en parte el comportamiento del dispositivo. Por eso, cuanto más margen de error tengamos, más errores podremos permitirnos cometer durante la fabricación del dispositivo, y aún así conseguiremos una placa cuya respuesta seguirá satisfaciendo nuestras necesidades y restricciones iniciales.

4.4.2. Diseño del layout.

Para diseñar el *layout*, partimos del diseño del esquemático en línea *microstrip* que hemos creado en el ADS, y mediante la opción *generate/update layout* de que dispone el programa de diseño, el propio ADS genera dicho *layout* a partir del esquemático. Posteriormente, lo exportamos al programa de diseño CircuitCAM.

Por tanto, a partir del *layout* del diseño en línea *microstrip*, que aparece en la Figura 4.17, mediante la opción *Export* del ADS, obtenemos el fichero que vamos a exportar, que salvaremos con formato HPGL/2, y cuya extensión será de tipo “.hgl”, que es un tipo de fichero que el programa CircuitCAM es capaz de interpretar.

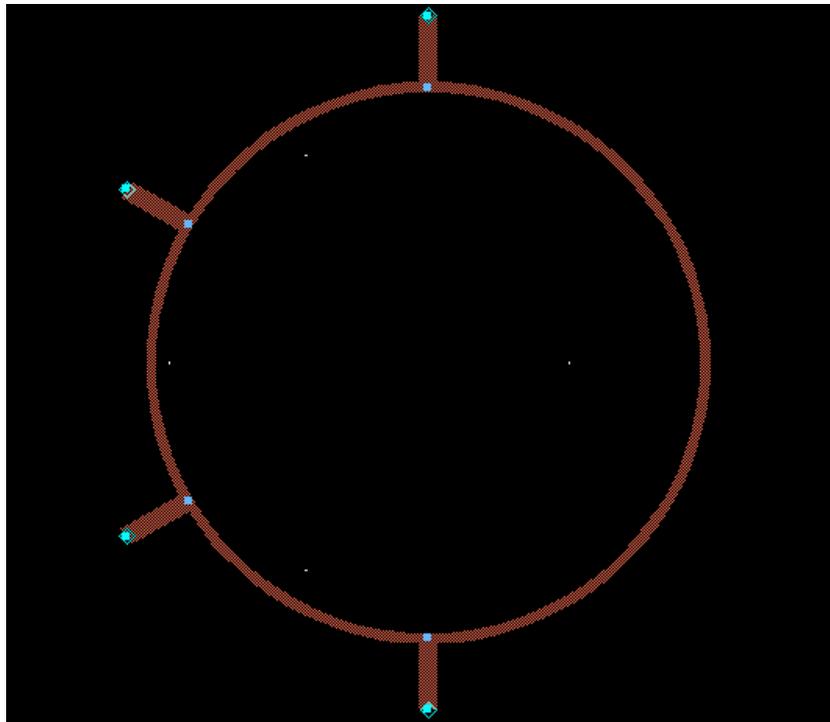


Figura 4.17. *Layout* del anillo híbrido.