

4.- Diseño

4.1.- Elección del sustrato

Antes de ponernos a trabajar con el formato que tendrá la placa del circuito, realizamos un análisis de dos tipos de sustratos para circuitos de microondas de los que podíamos hacer uso en el laboratorio del área de radiocomunicación de la Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla. Para ello los clasificaríamos teniendo en cuenta la realizabilidad de las líneas microstrip, en cuanto a grosor y a espesor de la placa, con el fin de que puedan fabricarse en la máquina CAM que posee el laboratorio de radio. En la tabla 3 se muestran las características de ambos sustratos.

	ϵ_r	Espesor del sustrato	Espesor del metal	δ	Anchura microstrip @50 Ω
Substrato 1	4.8	1600 μm	0.017	0.01	2900 μm
Substrato 2	2.17	500 μm	0.017	0.01	1530 μm

Tabla 3.- Comparativa de dos sustratos.

Donde ϵ_r es la constante dieléctrica relativa, δ es la tangente del ángulo de pérdidas, a continuación se indica la anchura que debe tener la línea microstrip para que la impedancia característica de la línea sea de 50 Ω .

Como podemos observar a primera vista y como no tiene demasiada trascendencia, podemos seleccionar el sustrato llamado 2 puesto que parece que posee mejores características, ya que tiene unas dimensiones menores en el espesor de la placa y en la anchura de las líneas de transmisión para obtener los 50 Ohmios. Lo que hace pensar que el diseño final será más compacto y más económico, puesto que el material con ϵ_r menor es además menos costoso.

4.2.- Red de adaptación de entrada

En este punto supondremos que el amplificador de bajo ruido que pretendemos construir se conectará a una antena con 50Ω de impedancia o a un generador con 50Ω de impedancia interna, puesto que desconocemos los datos de la fuente de señal al diseñar un amplificador que no es específico para un caso en concreto. Puede demostrarse que el factor de ruido de un amplificador se expresa como [6,7]:

$$F = F_{min} + \frac{R_n}{G_s} \cdot |Y_s - Y_{opt}|^2$$

Donde R_n es la resistencia de ruido equivalente del amplificador, Y_s es la admitancia de la fuente vista desde el amplificador y Y_{opt} es la admitancia óptima. Como se puede extraer con sencillez de la expresión, al suponer la fuente con impedancia real de 50Ω , la impedancia que minimiza el ruido es en principio el mismo valor de 50Ω , esto real para un tono, aunque no necesariamente para toda una banda de frecuencias que pretendemos usar, por ello a la red de adaptación una vez diseñada se le ajustarán los componentes mediante la herramienta de ajuste de ADS para obtener en la banda que queramos el menor ruido plausible.

Para conseguir la impedancia deseada a la entrada, el procedimiento que seguimos fue el de realizar una red de adaptación simple con líneas de transmisión y un condensador, puesto que no deseábamos “ensuciar” la débil señal que tendremos a la entrada del amplificador. Esto ha sido posible también ya que las dimensiones de esta red de entrada no han sido excesivas afortunadamente; el método que se ha seguido ha sido el de partiendo de la impedancia conjugada de entrada del bloque transistor-red estabilizadora que se obtiene con suma sencillez a través del programa de simulación, se realizan los artificios necesarios con estos condensadores y líneas para llegar hasta el centro de la carta de Smith, así al ubicar la red, desde el generador y al final de la red

de adaptación se tendrá la impedancia de entrada del bloque transistor-red estabilizadora y se evitarán en gran medida las reflexiones.

En la figura 25 puede observarse el recorrido que se hace desde la impedancia conjugada de entrada (Z_{in}^*) hasta la de la fuente (Z_s), para la que se usa una línea de transmisión primero que es un círculo concéntrico en la carta de Smith y después un condensador serie hasta llegar al objetivo. Finalmente se añade un pequeño trozo de línea de transmisión al final de esta red, es decir, a la entrada del circuito o de la placa ya que será necesario soldarle un conector a la placa para introducir las señales o la antena. En la figura 26 se representa el circuito esquemático de la red de adaptación de entrada.

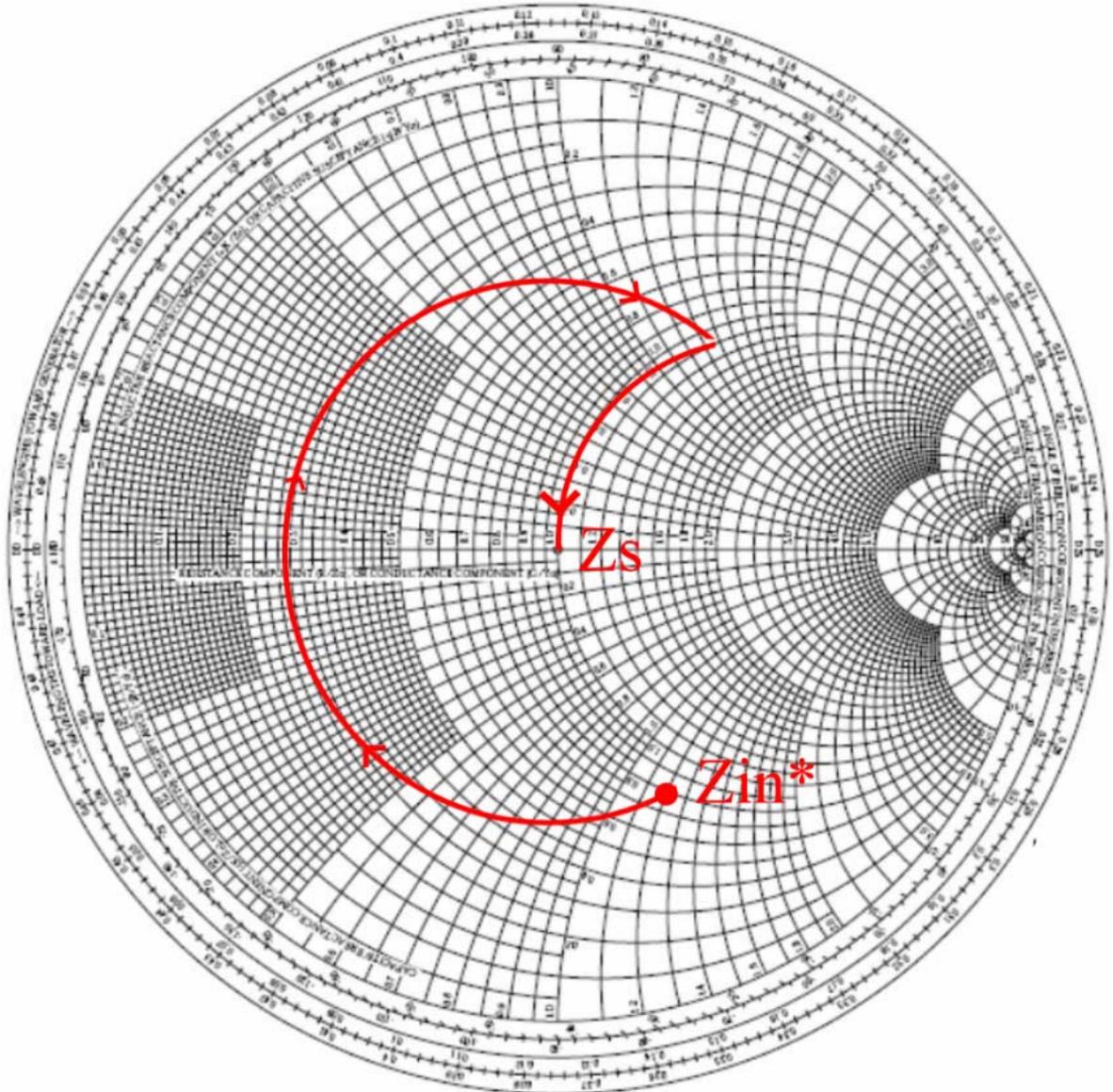


Figura 25.- Recorrido en la carta de Smith para el diseño de la red de adaptación de entrada.

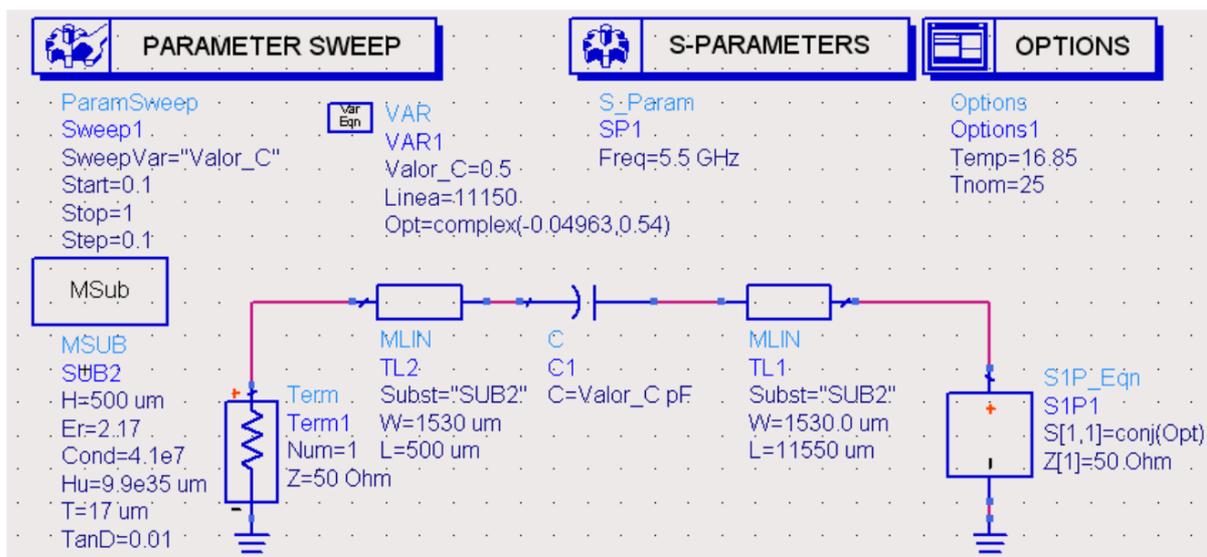


Figura 26.- Red de adaptación de entrada.

4.3.- Red de adaptación de salida

Esta otra red se realiza de forma muy similar a la red de adaptación de entrada, en primer lugar decir que será sencilla también, formada por líneas de transmisión y un condensador con el objetivo de inalterar la señal lo mínimo. En este caso partiremos de la impedancia de salida o en el drenador que presenta el transistor con las redes de estabilización y de adaptación de entrada, y supondremos que la carga que tendrá el amplificador presenta una impedancia característica de entrada de 50Ω que es lo más extendido. En la figura 27 se muestra el recorrido a través de la carta de Smith que seguirá la impedancia hasta llegar al centro de dicha gráfica, es decir, al punto de impedancia normalizada igual a la unidad y en la figura 28 se encuentra representado el circuito esquemático del circuito de adaptación de salida.

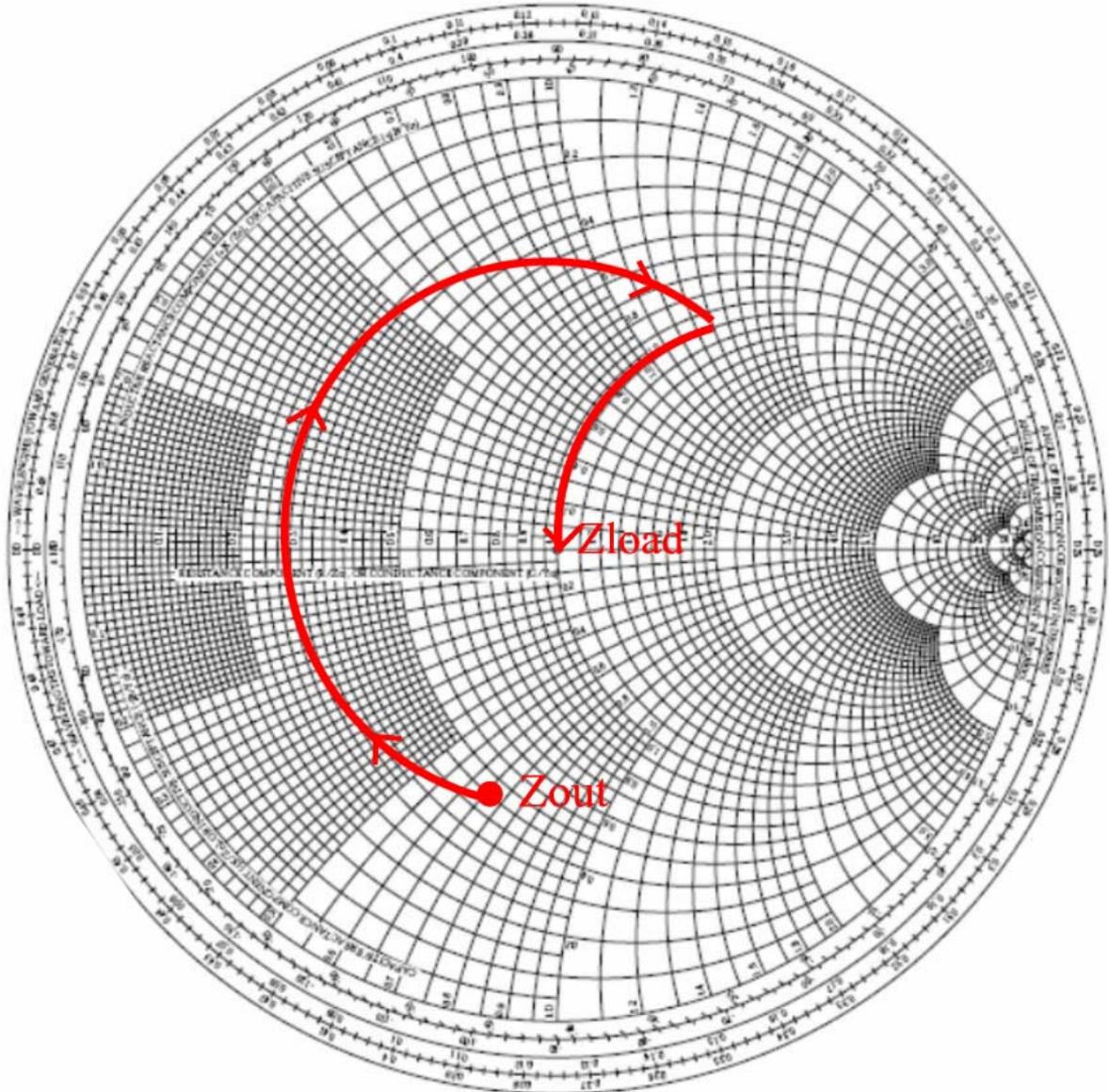


Figura 27.- Recorrido en la carta de Smith para el diseño de la red de adaptación de salida.

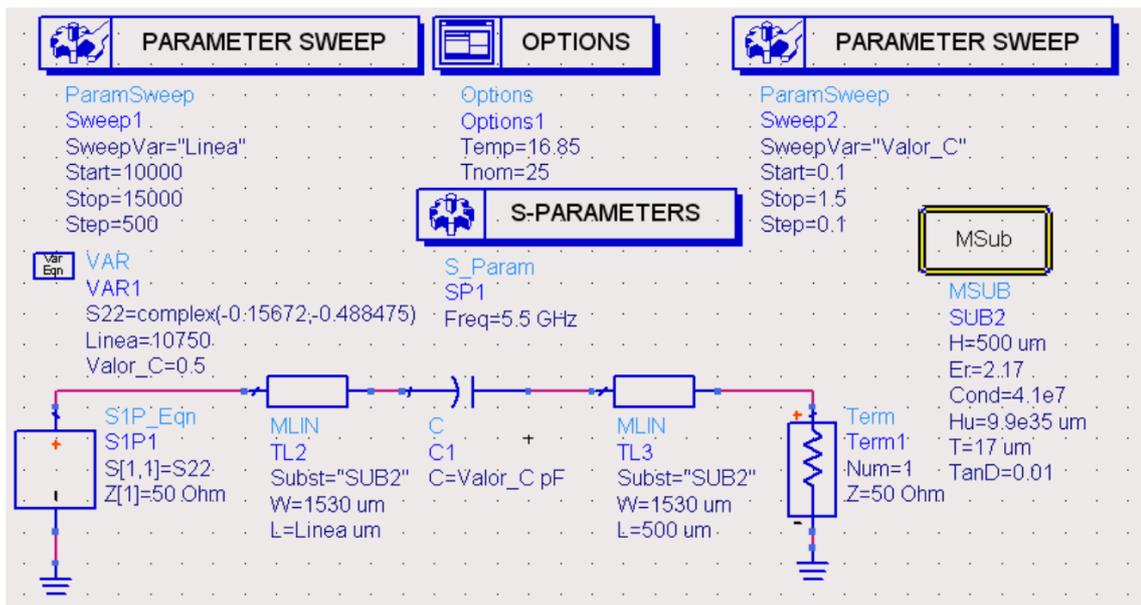


Figura 28.- Red de adaptación de salida.

Al igual que en el caso de entrada, a la salida de la señal de la placa base se coloca una pequeña línea microstrip necesaria para hacer el conexionado con el conector pertinente. A continuación el siguiente apartado trata acerca de la polarización, y en el se detalla que son necesarias dos nuevas redes de alimentación del transistor, que se diseñan de modo que su influencia en radiofrecuencia sea mínima, no obstante influyen levemente, por lo que cabe comentar que fue necesario un reajuste de estas dos redes de adaptación para que el funcionamiento fuese el idóneo.

4.4.- Sistema de alimentación

Este apartado consta de dos partes, en primer lugar se muestran unas curvas aproximadas de los puntos de polarización del HEMT Excelics y en segundo lugar se detallan las redes de alimentación que incluirá nuestro LNA.

Con respecto al punto de polarización en el que trabajará nuestro dispositivo, resulta complicado determinarlo de antemano, puesto que sin disponer del modelo de transistor Excelics en el programa de simulación ADS 2003A que usamos, no podemos realizar análisis de las características físicas del dispositivo de estado sólido, y tan solo podemos trabajar con los parámetros S del modelo no lineal. Así pues utilizaremos el HEMT de Mitshubitshi

ph_mit_MGF491GC_19930915, que tal y como vimos en la tabla 1 se asemeja mucho al estudiado.

En la figura 29 se muestra el esquemático utilizado para obtener las curvas paramétricas de polarización de la figura 30, en las que se observa un comportamiento similar a los Mosfets, con sus tres regiones de funcionamiento: corte, lineal y saturación.

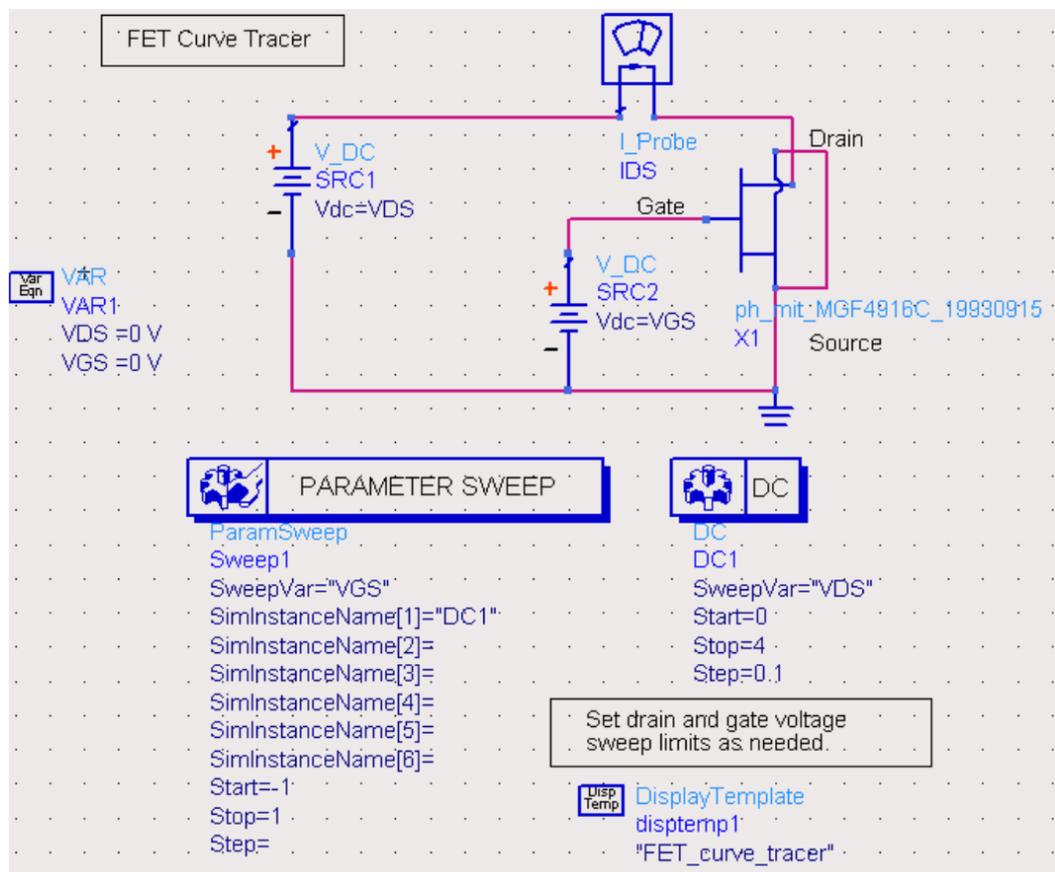


Figura 29.- Circuito esquemático de curvas paramétricas de polarización.

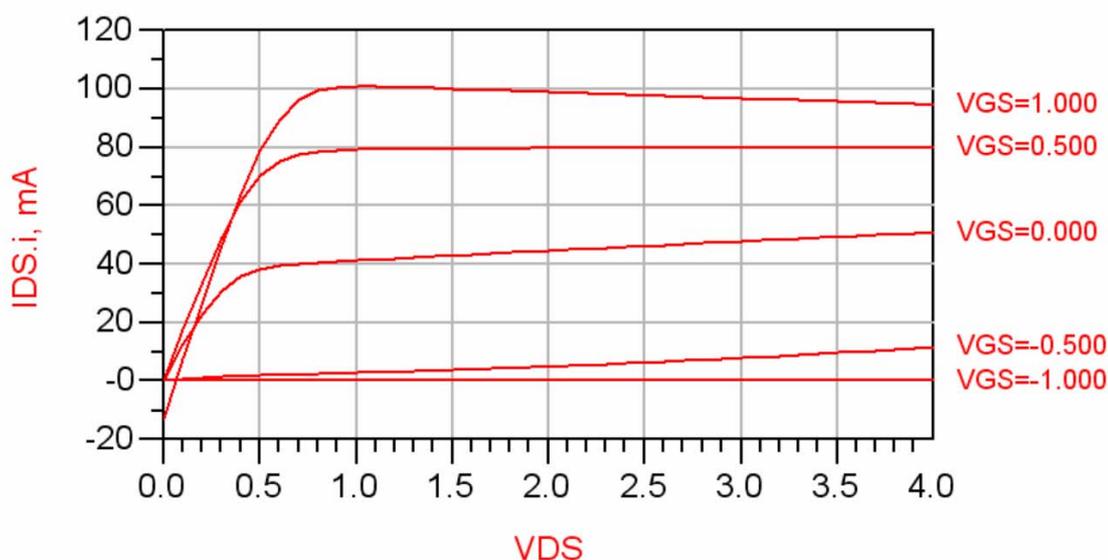


Figura 30.- Curvas de polarización del Hemt Mitshubitshi.

En nuestro caso y tal y como recomienda nuestro fabricante en el catálogo utilizaremos una tensión drenador-fuente de 2V y trabajaremos en la zona de saturación del transistor, como suele ser corriente. Necesitaremos también una corriente en el canal de 15mV, por lo que según la figura 30 será indispensable tener una tensión alrededor de -0.5V en la puerta. Para obtener ambas tensiones y al ser un prototipo, utilizaremos un par de fuentes de tensión externas a la placa que obviamente deberán poder conectarse con esta, para lo que se deben crear dos puertos más, hasta llegar a un total de cuatro.

En este punto surge la problemática de que en el diseño hay que introducir dos puertos más que idealmente deben estar conectados en DC y tener alta impedancia en radiofrecuencia, para ello se hicieron pruebas con diferentes formas de un mismo diseño hasta llegar al sistema de alimentación de la figura 31, que básicamente es un transformador en $\lambda/4$ con un condensador, más una bobina de DC. La línea de transmisión microstrip con longitud $\lambda/4$ (tomando la λ de la frecuencia central de la banda de 5.5Ghz) convierte la baja impedancia de un condensador grande de 120pF en alta impedancia en el punto de conexión con el circuito amplificador y además, la bobina especialmente diseñada para alimentar circuitos de microondas de la familia Minicircuits, presenta en radiofrecuencias una admitancia muy pequeña que ayuda a incrementar la impedancia del punto de conexión de la red alimentadora. En DC la corriente continua para sin problemas por la bobina y por el condensador no pasa nada puesto que se comporta como un circuito abierto.

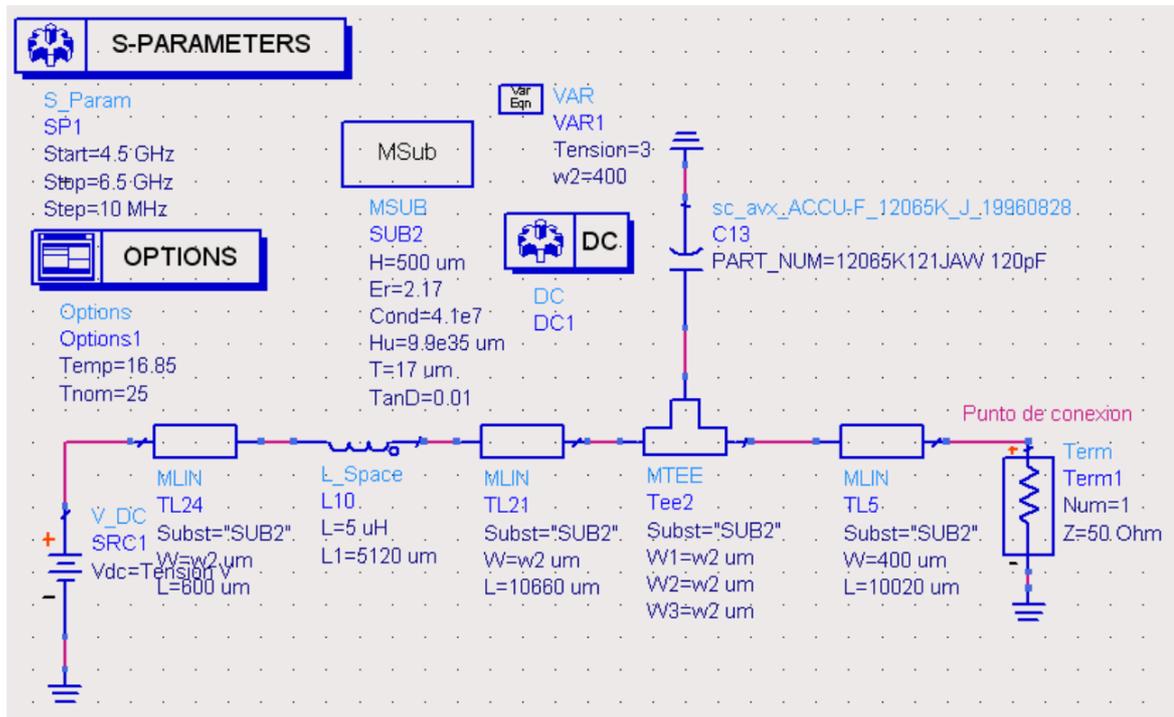


Figura 31.- Sistema de alimentación del amplificador LNA.

El módulo de la impedancia en función de la frecuencia en el punto de conexión puede verse en la figura 32, donde se observará lo alta que puede llegar a ser la impedancia mediante este sistema.

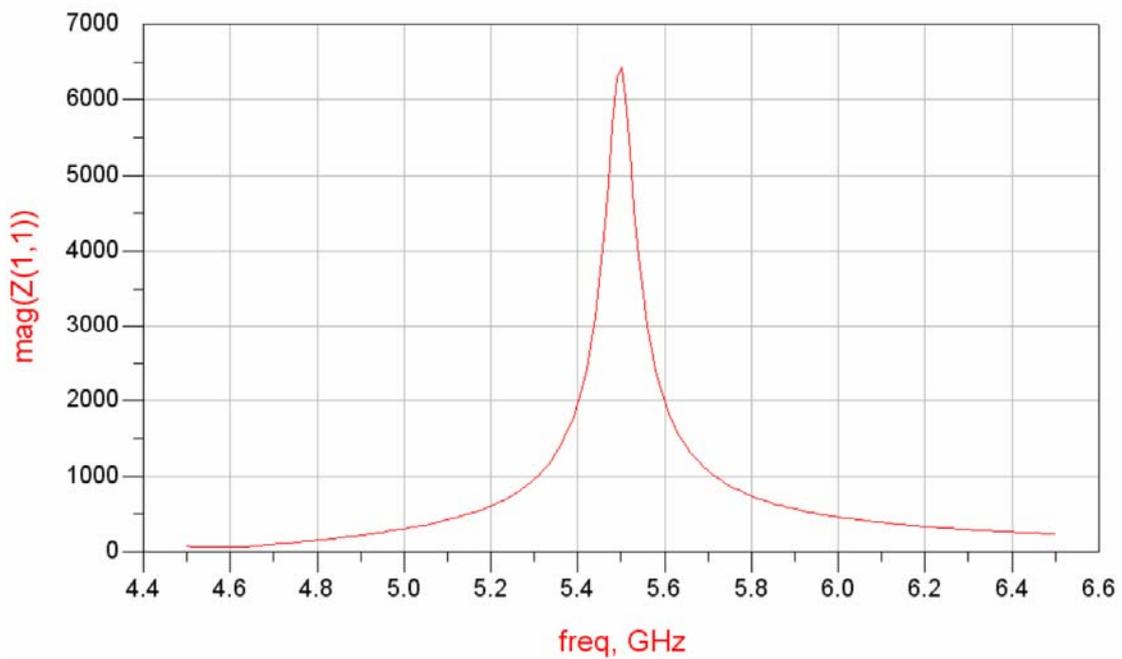


Figura 32.- Módulo de la impedancia en el punto de conexión en función de la frecuencia.

4.5.- Diseño final del LNA

El último paso para tener el diseño finalizado es el de sustituir los componentes genéricos utilizados (bobinas, resistencias y condensadores) por componentes reales de algún fabricante que se encuentren en la librería del “Advanced Design Systems”. Cabe comentar que nosotros durante las fases previas hemos hecho uso ya de algunos de estos componentes reales para avanzar en el diseño y analizar los cambios previamente, ya que los componentes reales no están disponibles para todo valor de capacidad, inductancia o resistividad, además de presentar efectos capacitivos o inductivos parásitos, y es necesario amoldarse en el diseño a los dispositivos que haya.

Estos dispositivos hay que introducirlos en el diseño convenientemente, procurando no variar el prototipo en exceso y escogiendo cada componente con la tolerancia adecuada a la situación en que se encuentre en el circuito, es decir, si por ejemplo es una resistencia, y un cambio de resistividad afecta mucho a las prestaciones del amplificador, se deberá elegir una resistencia buena con tolerancia baja, que será más cara.

Una vez hechos estos cambios y reajustado los valores se obtienen los circuitos de los planos 1 (esquemático) y 2 (layout), donde se puede observar el diseño final del amplificador de bajo ruido diseñado, así como el valor de todos los componentes que lo componen. Las prestaciones que presenta este amplificador pueden ser observadas en las figuras 33 y 34, de las que se puede destacar el excelente ancho de banda de unos 7Ghz en torno a los 5.5Ghz, una figura de ruido en torno a los 5Ghz de 2dB y una ganancia en tensión de 12dB (recordemos que la ganancia en tensión es $20\log(|S(2,1)|)$).

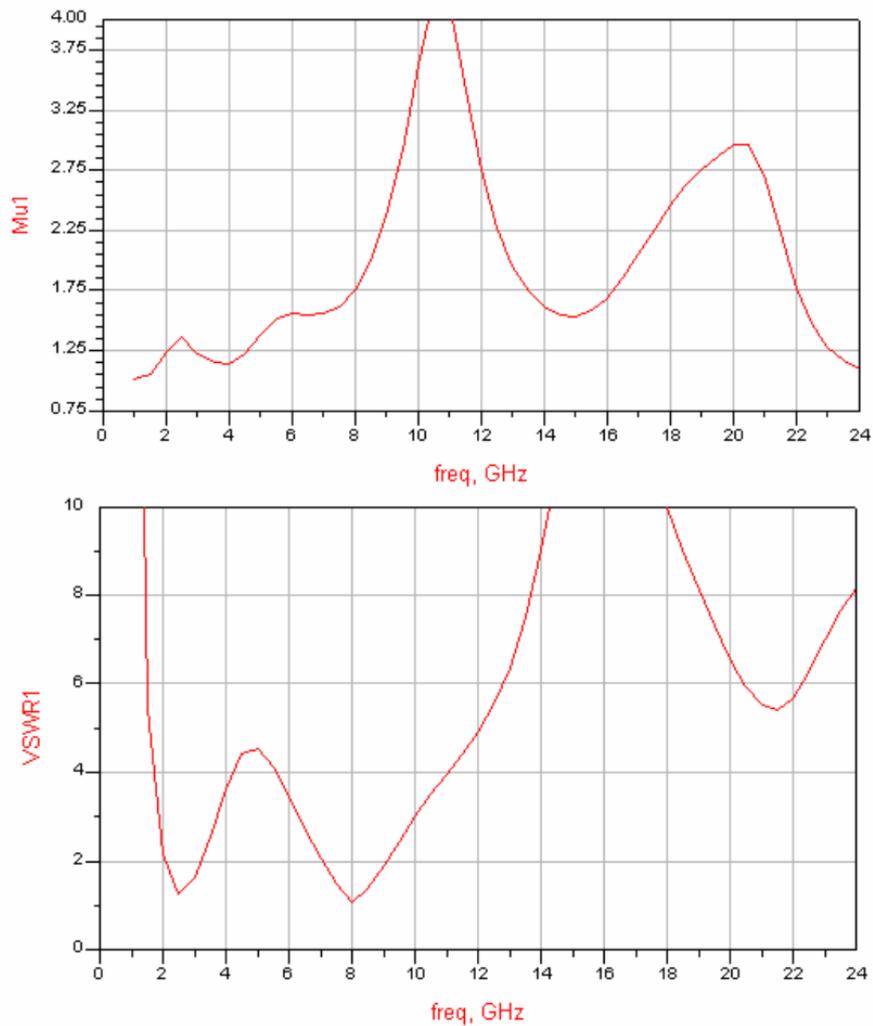


Figura 33.- Parámetro mu de estabilidad y coeficiente de onda estacionaria del LNA.

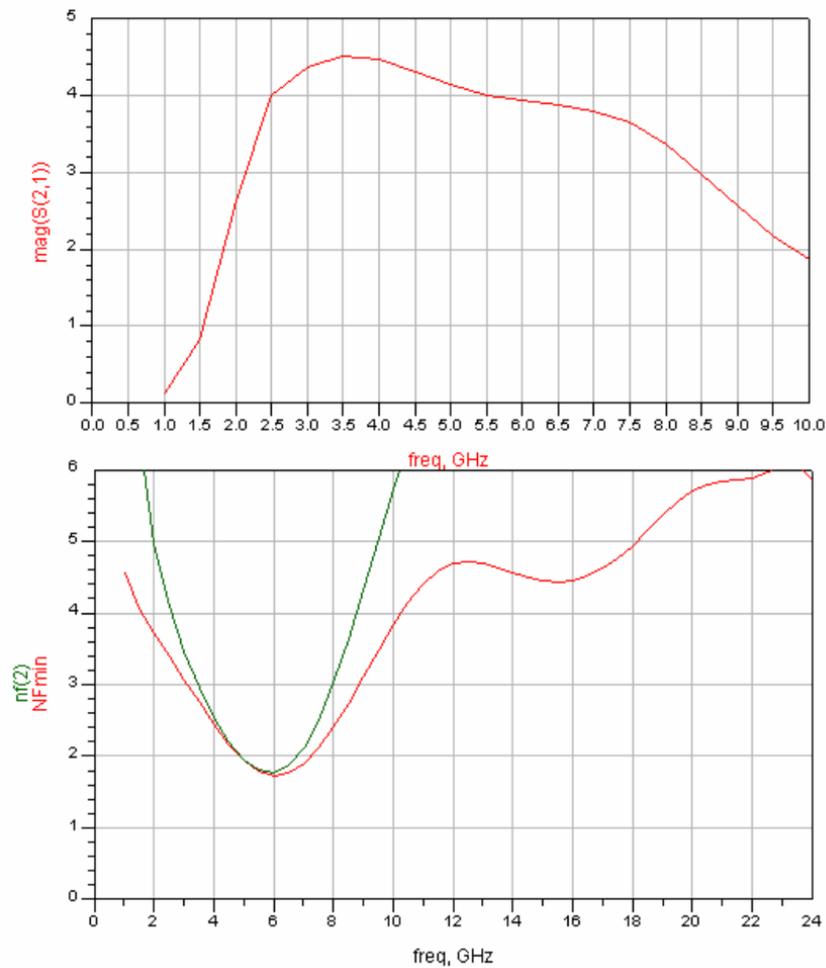


Figura 34.- Módulo de $S(2,1)$, figura de ruido mínima (dB) y figura de ruido (dB).

Una vez diseñado el LNA con éxito, el siguiente paso sería el implementarlo físicamente, para después medirlo con ayuda de un analizador vectorial y comparar los resultados medidos con los determinados con anterioridad por el simulador ADS. No obstante, debido al elevado coste del Hemt con el que hemos trabajado, el departamento de Teoría de la Señal y las Comunicaciones de la Universidad de Sevilla no ha creído conveniente financiar este proyecto por lo que a pesar de los buenos resultados obtenidos, el diseño no ha podido ser implementado y testeado.

Aún así, una vez hecho el diseño, procedimos a la preparación del prototipo para su implementación, esto lo hicimos exportando el archivo del ADS del layout en formato .DXF para poder introducirlo en el CircuitCAM, que es un software que traduce los archivos de un CAD a otros archivos de fabricación asistida por ordenador (CAM) que entienda la maquina que tiene la Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla para fabricar placas de microondas de montaje superficial y microstrip.

Una vez que en el Circuitcam disponemos del gráfico del circuito diseñado, hay que decirle al programa como debe fabricar el circuito. El material del que partimos es una placa de substrato grande que por una cara está recubierta de cobre conductor. Sobre el Circuitcam siguiendo una serie de sencillos pasos hay que decirle cual es el contorno del circuito, para cortarlo del resto de placa y que parte de cobre debe dejar y cual no. La parte que deje serán las líneas de transmisión microstrip y los conectores para los componentes de montaje superficial, y la parte que se elimine se hará por medio de un torno del que dispone la maquina para eliminar el cobre de este tipo de placa. En la figura 35 se puede observar el interfaz CircuitCAM, así como las operaciones que va a realizar la maquina de CAM sobre la placa, en rojo está el cobre que se deja, el verde por donde pasará el torno que eliminará el cobre y en gris el recorrido del trompo que liberará el circuito de la placa.

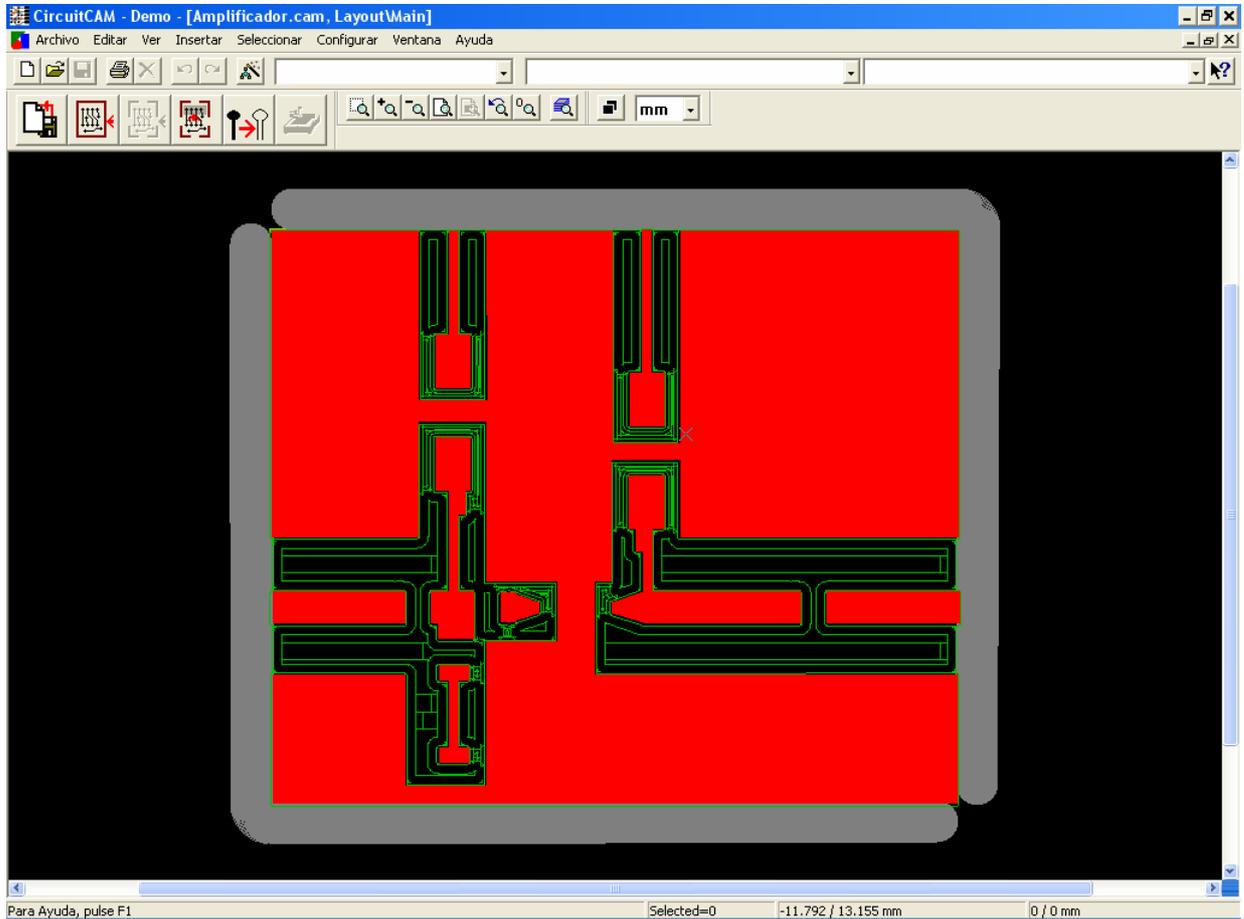


Figura 35.- Interfaz del Circuitcam y procedimiento de fabricación del LNA.

Del CircuitCAM se obtienen los archivos .CAM y .LMD que entenderá la maquina de CAM y que cortará la placa del circuito que hemos diseñado. A esta placa le faltará por colocar y soldar los componentes de montaje superficial, y las conexiones para los cables de entrada y salida, así como los de alimentación y ya tendremos fabricada nuestra placa amplificadora de bajo ruido.