

## Capítulo 3

# Prototipo experimental

### Introducción

En el tercer capítulo del presente proyecto se aborda la fabricación física de los prototipos de estudio. Se describirán todos los pasos llevados a cabo en el laboratorio para el diseño y fabricación de la línea microstrip. Es importante resaltar que las tapas metálicas que cubren la línea del experimento han sido lo único que no ha sido fabricado por el alumno. Estas tapaderas (de 0.5mm y 1mm de altura) han sido fabricadas externamente al proyecto por el encargado del taller del laboratorio de la Facultad de Física, lugar donde se ha desarrollado todo el proceso de investigación.

La segunda parte de este capítulo se dedicará a describir el aparato de medida que se va a utilizar (analizador de redes Agilent E8363B) y a dar detalles sobre el proceso de calibración TRL [5] que se ha llevado a cabo.

### Fabricación del prototipo

En 1951, aparece la tecnología MPC [19] (circuitos impresos de microondas). Basada en tecnología stripline. Estos circuitos destacaban por ser ligeros, de fácil fabricación, con un sustrato hecho de teflón y por tener una producción de bajo coste. En la imagen 18 se muestran diferentes aplicaciones de esta tecnología.

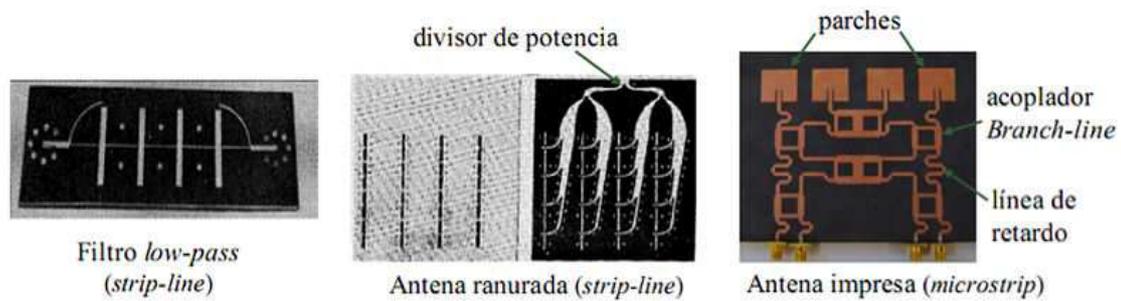


Imagen 18

En 1952, se crea la tecnología Microstrip, y con ella la HMIC (circuitos integrados de microondas híbridos). Este avance se debió en gran parte al fuerte desarrollo producido en los transistores FET frente a los BJT, se permitía trabajar a más alta frecuencia, eran más pequeños e introducían menos ruido. Con un sustrato compuesto de alúmina, dispone de una capa de metalización de sus conductores, líneas de transmisión y componentes discretos (resistencias, condensadores, inductores...), pegados al sustrato.

Las principales propiedades a destacar son: la reducción de la escala de fabricación, la alta permitividad de los sustratos, un gran nivel de integración y una posible producción a gran escala. La nueva tecnología permitía diseños como los de la imagen 19. De entre ellos cabe destacar la microtira ó microstrip, ya que será sobre el que se basará este proyecto. Una línea microstrip, tal como muestra la figura, consiste en una tira metálica depositada sobre un sustrato dieléctrico que se apoya en un plano de masa.



Imagen 19

Las claves del éxito de esta tecnología fueron el buen comportamiento que tenían a muy altas frecuencias y la estandarización de los procesos de fabricación. A la hora de la fabricación de la tecnología HMIC, se pueden destacar tres procesos, que nombramos a continuación destacando su principal característica:

- Fotograbado o Thin-Film: Con una producción en cadena y de espectro ancho.

- Serigrafía o Thick.Film: Proceso de fabricación barata, el cual cubre todo el espectro del rango de las frecuencias de microondas.
- Cerámica cocida a baja temperatura o Low-Temperatur Cofired Ceramic (LTCC): Fabricación multicapa, con una elevada integración y flexibilidad de diseño.

El prototipo del proyecto se va a fabricar sobre un sustrato de permitividad relativa 2.55 y de grosor  $h=1.524$  mm (250-LX-0600-55-55). Para este sustrato se ha escogido un ancho de la tira conductora de  $w=4.29$ mm, que asegura que la impedancia de la línea es de  $50 \Omega$ .

Se describen a continuación los pasos seguidos en el diseño y fabricación del prototipo microstrip deseado. Existirá una primera parte de diseño de la máscara mediante el ordenador y una segunda parte de fabricación manual del circuito.

Todos los pasos seguidos en el laboratorio han sido realizados con las correspondientes normas de seguridad. Se han usado los instrumentos de seguridad necesarios y habituales como son gafas, guantes, bata e incluso cubre zapatos para no ensuciar la cámara blanca. Los pasos seguidos se pueden resumir en lo siguiente,

1. Se diseña la máscara que permitirá *dibujar* la línea de transmisión en el sustrato. Antes de llegar al ploteado de la máscara, el diseño requiere una serie de pasos previos hechos con los pertinentes programas de diseño.
2. Mediante el programa Advanced Design System (aunque puede usarse otro) diseñamos la máscara, introducimos las dimensiones adecuadas y lo exportamos como archivo “.gerber”.
3. El archivo con extensión “.gerber”, se importa al Gerb2Bitmap, para convertirlo en “.bmp”, donde se exporta al programa Photoplotter Bitmap, guardándolo como “.FPF”.
4. Para asegurarse de que el diseño es correcto se puede visualizar con el programa View\_FPF, seguidamente mediante el Run\_Photo\_USB, el diseño es enviado al photoplotter (situado en la denominada “cámara oscura” del laboratorio). La resolución adecuada para este diseño es de 8192 y su intensidad de luz 145.



*Imagen 20*

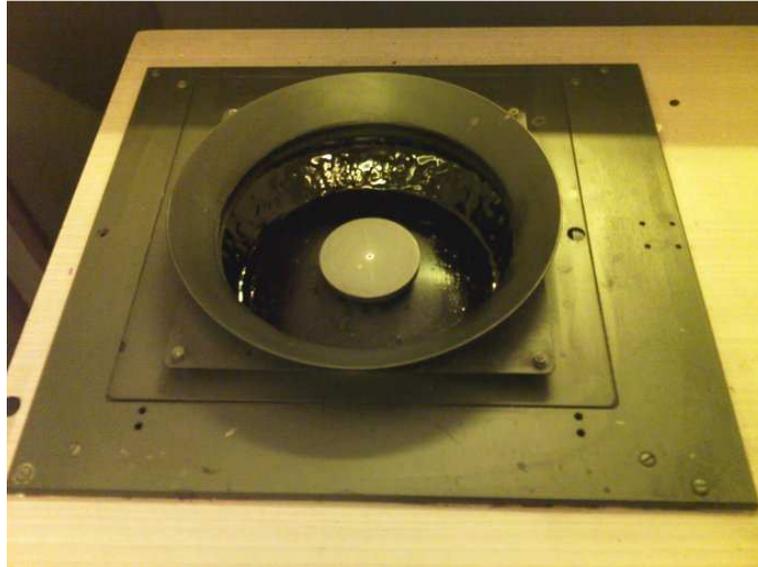
Un photoplottter **[20]** es un plotter que mueve un foco de luz que es proyectada sobre una película (una máscara) de alto contraste. La fuente de luz se dirige a través de un obturador y de una ranura para ser enfocada sobre la película.

5. El proceso del ploteado puede durar varias horas, dependiendo de lo fino que sea el diseño. Una vez terminado el ploteado se revela la máscara (con revelador, agua y fijador) y se deja secar.
  
6. Se corta un trozo de sustrato de tamaño máximo 15 cm x 15 cm, ya que no cabría un tamaño mayor en el spinner que se verá a continuación, y se limpia cuidadosamente. Para ello se usa limpia metales, tricloroetileno y metanol.



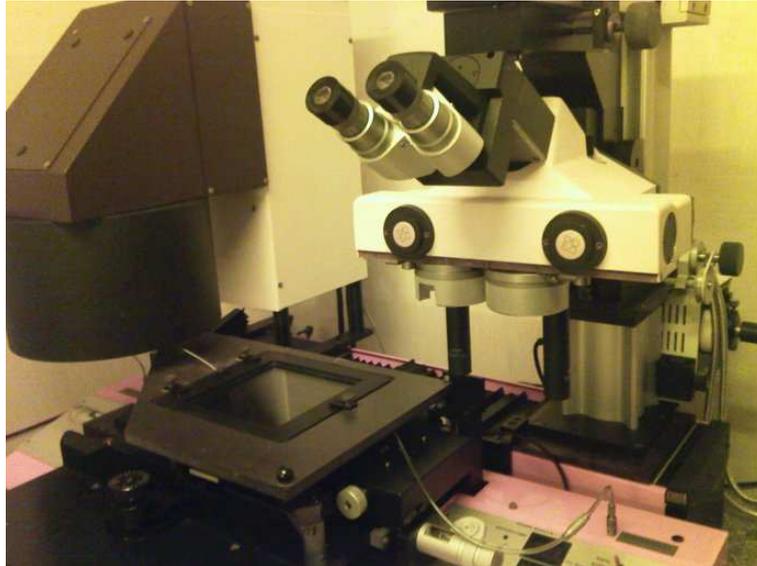
*Imagen 21*

7. Se deja secar en el horno a 100 °C durante unos minutos. Una vez fuera del horno se aplica una resina fotosensible positiva, después de revelar esta resina, las zonas donde incidió la luz desaparecen mientras que permanecen en las zonas donde no llegó la luz.
8. Se coloca en el spinner para extender de forma homogénea la capa de resina y se deja secar en el horno 15 minutos a 75 °C.

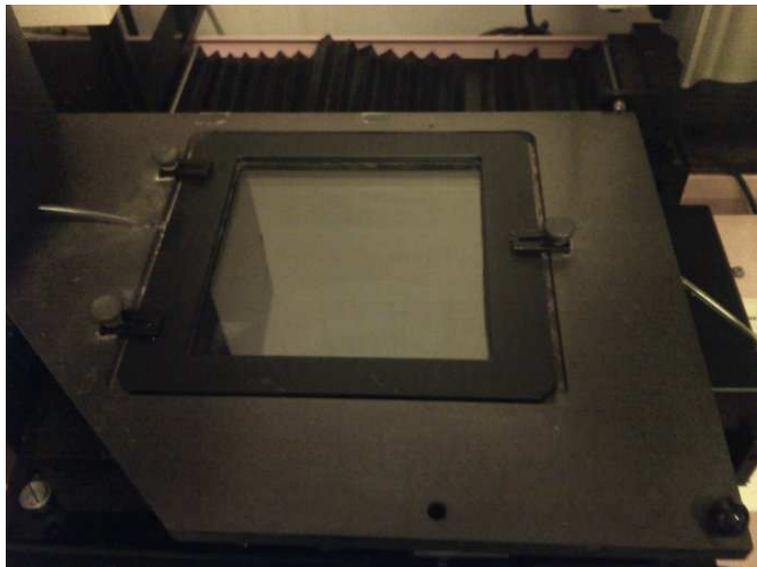


*Imagen 22*

9. Colocando la máscara encima del sustrato por la parte de la resina, se realiza la insolación con luz ultravioleta durante 10 segundos.



*Imagen 23*

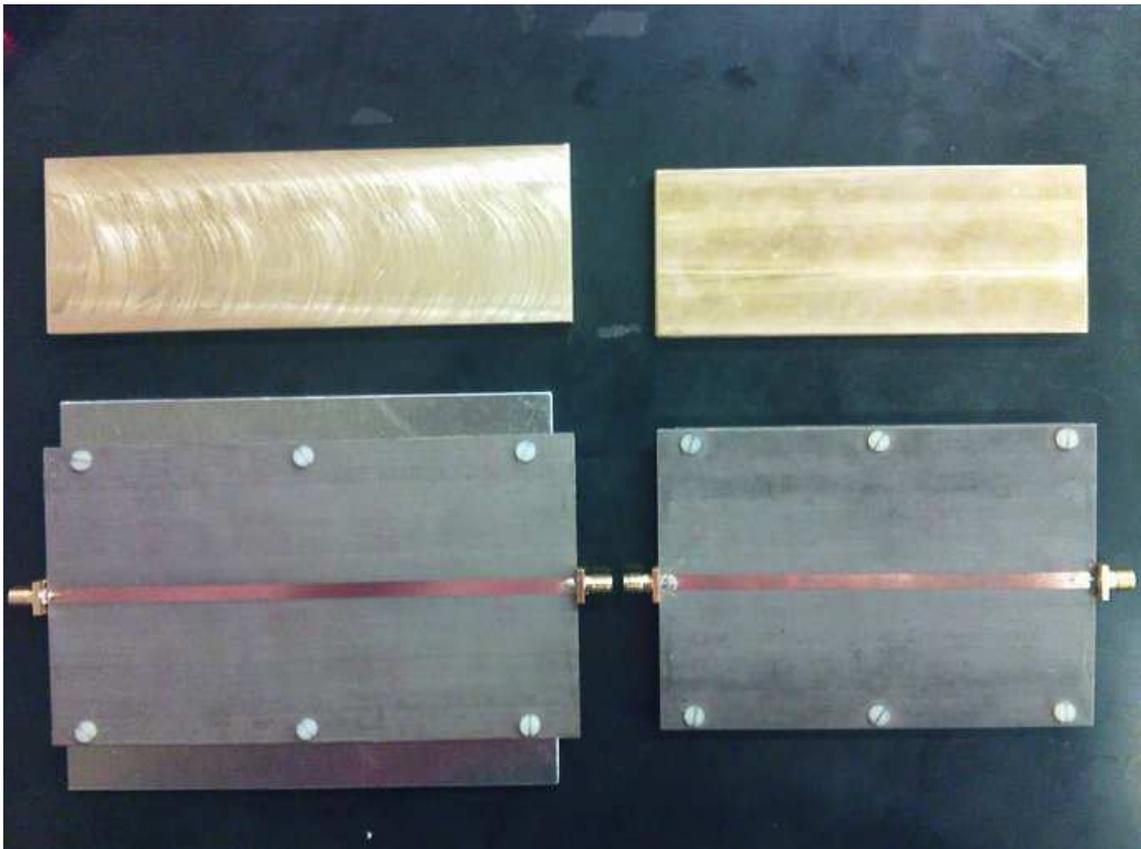


*Imagen 24*

10. Se revela el sustrato para retirar la resina de las zonas en las que ha incidido la luz. El revelador utilizado es Panreac, con una proporción de 7 gramos por litro de agua.
11. Una vez revelado se lava con agua y se realiza el ataque ácido. Después de haber retirado todo el metal, excepto el propio del circuito, se enjuaga con abundante agua y se deja secar.
12. Se limpia el sustrato con acetona pura, lo cual eliminará la resina que aún cubre el circuito.

Una vez que la línea ha sido fabricada se le añadirán los conectores a ambos extremos, y se atornillará a una base de metal mediante tornillos de plástico. Esto se hace para mantener el sustrato plano y proporcionarle rigidez, ya que posteriormente situaremos una tapadera metálica sobre la línea y queremos mantener una altura homogénea y bien controlada de la capa de aire entre la tapadera y el sustrato.

Con la técnica que se acaba de describir se han fabricado dos líneas de diferente longitud: 12cm y 14.8cm. El resultado final se muestra en la imagen 25.



*Imagen 25*

# Analizador de redes

## Introducción Teórica

Un analizador de redes [21,22], es un instrumento capaz de analizar las propiedades de las redes eléctricas, con especial atención a las asociadas con la reflexión y la transmisión de las señales eléctricas (parámetros de dispersión, parámetros S). El rango de funcionamiento puede comprender desde los 9 kHz hasta los 100 GHz.

Los analizadores de redes de altas frecuencias son usados para la fabricación de amplificadores de alta potencia y para filtros de radiofrecuencia. Aunque también existen analizadores que cubren rangos más bajos de frecuencias, de hasta 1 Hz, usados para el análisis de estabilidad de lazos abiertos o para la medición de audio y componentes ultrasónicos.

Existen dos tipos de analizadores de redes, los escalares y los vectoriales. Los primeros (SNA, funcionalmente idéntico a un analizador de espectro), miden los parámetros de scattering únicamente en amplitud, mientras que los segundos (VNA, o medidor de ganancia y fase o analizador de redes automático), permiten su medida en amplitud y fase.

Los modelos más frecuentes del mercado, suelen ser modelos de dos puertos, en nuestro caso (E8363B) se medirá con un modelo de cuatro puertos, los cuales son considerablemente más caros que los de dos puertos.

Algunos aspectos técnicos del analizador de redes pueden ser, el control de estímulo (STIMULUS), el cual determina la característica de la señal de radiofrecuencia que ataca al componente bajo medida (DUT, Device Under Test), y el control de respuesta (RESPONSE), con el que se define el parámetro que se desea medir, así como su formato y las opciones de medida (amplitud, fase, promediado, etc.).

En función de cada analizador existen otros muchos controles referentes a aspectos gráficos de la representación, como pueden ser la división de pantalla o el almacenamiento de las medidas, los cuales son específicos de cada fabricante

Se muestra en la imagen 26 un dibujo de un analizador de redes genérico. En el apartado 3.3.3 se detallará las características del analizador usado en el proyecto, el Agilent E8363B.

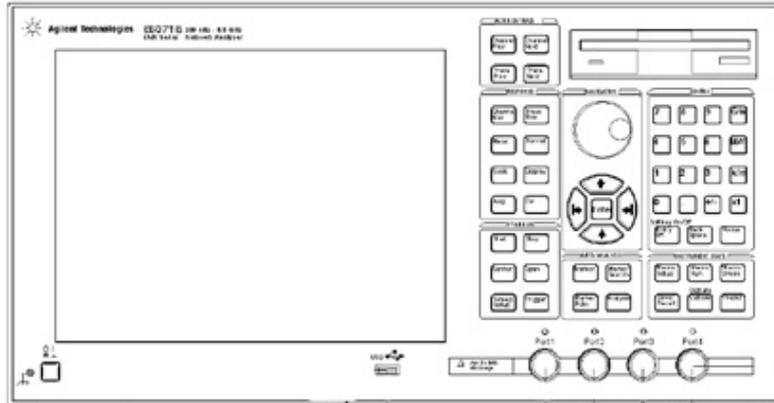


Imagen 26

## Calibración TRL

Antes de realizar cualquier medición con el analizador de redes, hay que calibrarlo. La teoría de la calibración, en este caso calibración TRL, viene definida en [5]. A continuación se resumirá su fundamento teórico.

El problema que se quiere solucionar con la calibración TRL es el lugar que sirve de referencia para la medida. Al medir la estructura con el analizador de redes usamos unos conectores, cuyos efectos en la señal deseada no controlamos, además los cables que unen el analizador de redes con el microstrip también pueden añadir pequeñas imperfecciones, las cuales no se controlan tampoco.

Con todo esto la calibración TRL, consiste en situar el plano de referencia en el lugar deseado para el análisis.

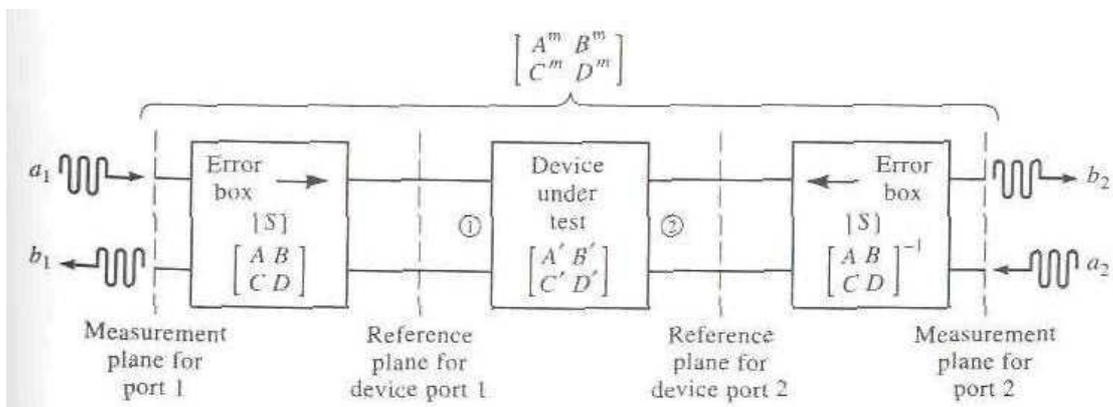


Imagen 27

La imagen 27 muestra todo lo comentado anteriormente, se define claramente dos sistemas de referencia, el primero es el visto por analizador con todos los componentes de la estructura, con cables y conectores de por medio (la caja denominada *error box*), estaría indicado en el dibujo por *measurement plane for port 1* y terminaría en *measurement plane for port 2*.

La intención de esta calibración es tomar las medidas en el sistema de referencia deseado, en la imagen entre *reference plane for device port 1* y *reference plane for device port 2*. Así sólo estaría analizando lo que ocurre dentro de la estructura, sin que esta medición se viera afectada por causas exteriores, que desvirtuaran los resultados obtenidos.

La manera más sencilla para calibrar un analizador de redes es usar distintos circuitos con 3 o más cargas conocidas, circuitos en corto, en abierto o con cargas acopladas. La calibración TRL (*Thru-Reflect-Line*), usa tres tipos de circuitos que permitirán simular estas cajas de error y poder tomar la medida deseada.

Estas tres configuraciones (Thru – Reflect – Line) se muestran en las siguientes imágenes,

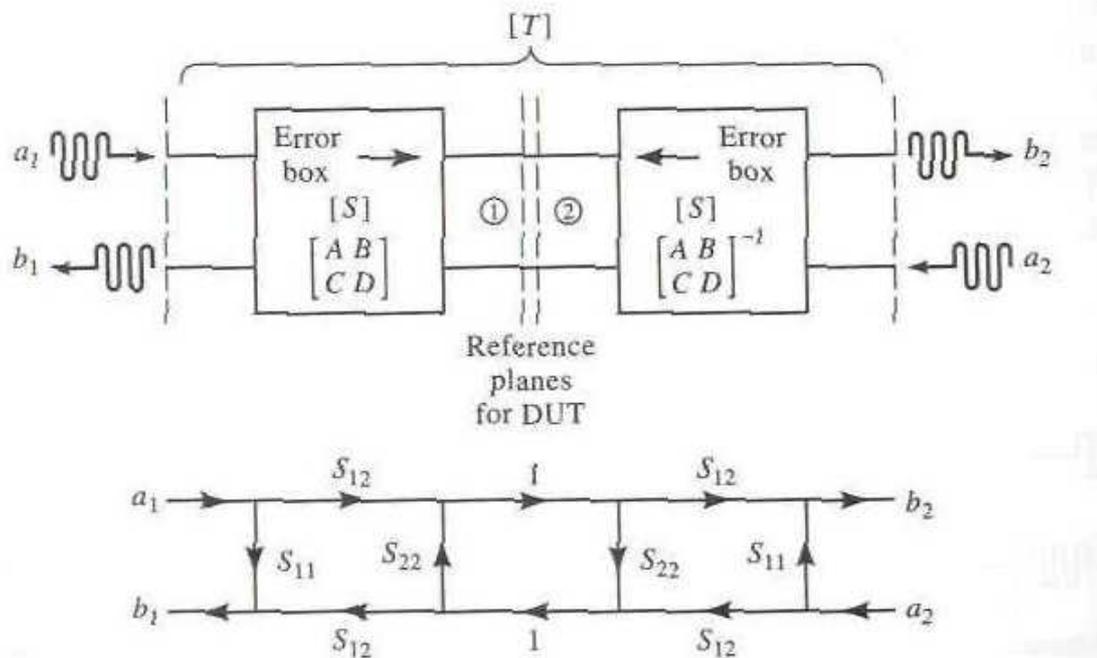


Imagen 28

En esta imagen se muestra el circuito Thru, para entenderlo mejor se utiliza la matriz de transmisión [ABCD], y un grafico de flujo del circuito. Esta configuración se basa en conectar directamente los puertos 1 y 2 ( $b_1/a_2$ ).

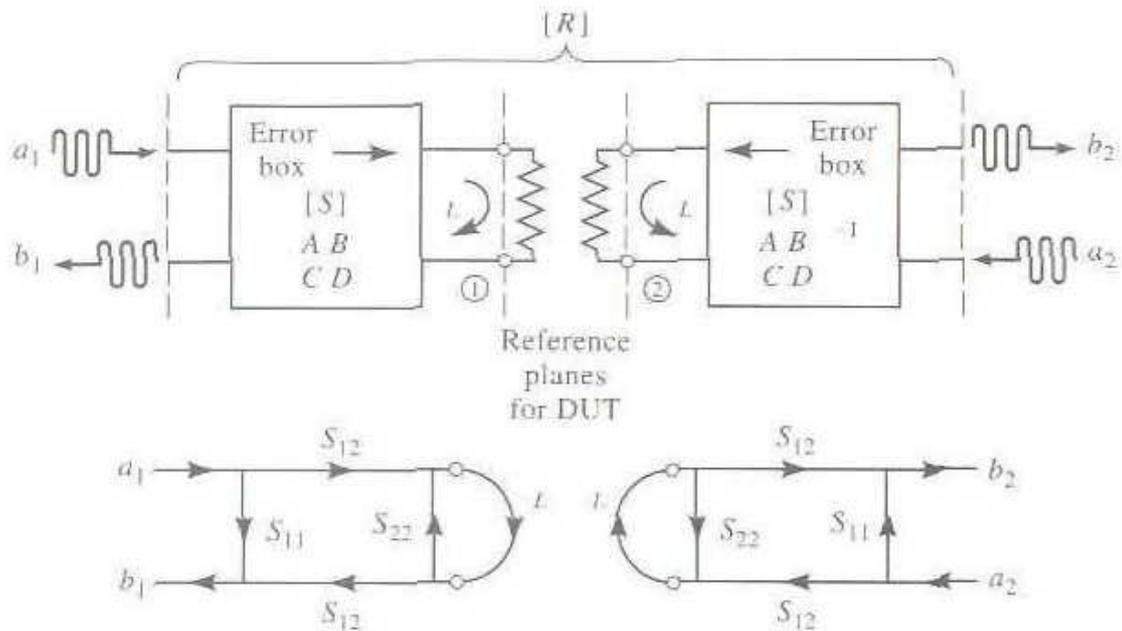


Imagen 29

La configuración de la imagen 30 se debe a la de Reflect, usa una carga con un coeficiente de reflexión grande,  $\Gamma_L$ . Es un circuito en abierto o en corto ( $b_1/a_1$ ).

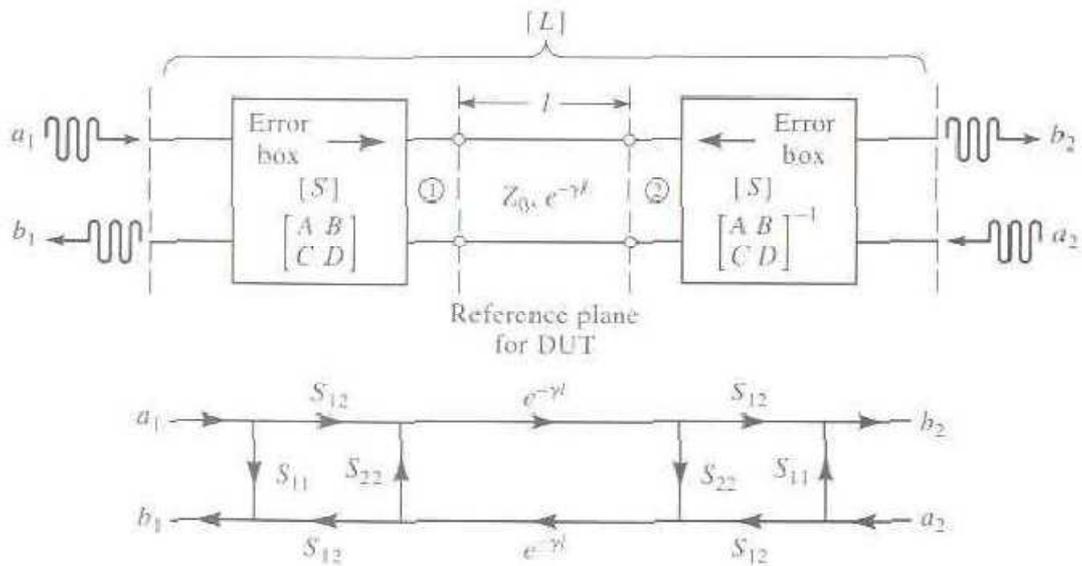


Imagen 30

La configuración de la imagen se debe al circuito Line, este circuito involucra a los puertos 1 y 3, conectados por una línea de transmisión acoplada de una determinada longitud. Es como el circuito del experimento pero de distinta longitud.

La caja de errores tendrá la característica de que  $S_{21}=S_{12}$  y una relación inversa entre las matrices [ABCD] para los puertos 1 y 2.

Se construye un circuito TRL siguiendo los mismos pasos que se siguieron para construir la estructura microstrip, cuyos pasos se describieron en el apartado 3.2.

Las dimensiones de las configuraciones de la TRL se definen en cuestión de varios parámetros como la frecuencia de trabajo central que se requiere para la TRL y su correspondiente longitud de onda  $\lambda$ .

Se definen los siguientes parámetros sobre los que se basa la construcción de las diferentes configuraciones,

- $\beta_{\min}$  y  $\beta_{\max}$ . Son las constantes de fase que corresponden a las frecuencias mínima y máxima, respectivamente, del intervalo de calibración. En este caso serán 3 GHz y 7 GHz.
- $\Delta L$ . Es la diferencia de longitud física entre la configuración *Thru* y *Line*.
- $\lambda$ . Longitud de onda de la frecuencia central de la calibración.
- $\epsilon_{re}$ . Constante relativa dieléctrica del sustrato (2.125).

La diferencia de longitud física ( $\Delta L$ ) entre *Thru* y *Line* se debe situar entre el siguiente rango,

$$\frac{20^\circ}{\beta_{\min}} < \Delta L < \frac{160^\circ}{\beta_{\max}} \quad (x.x)$$

Además,

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (x.x)$$

$$\lambda = \frac{300 \text{ mm}}{f(\text{GHz}) \cdot \sqrt{\epsilon_{re}}} \quad (x.x)$$

La frecuencia central de la calibración estará en 5 GHz, y habrá un rango para la TRL desde 3 GHz hasta los 7 GHz, las calibraciones TRL no suelen abarcar rangos muy amplios. Con estos datos se tendrá,

$$\beta = 0.1526;$$

$$\lambda = 41.16\text{mm};$$

$$\Delta L = 10.29\text{mm}$$

*Thru* y *Line* deben medir al menos 2 longitudes de onda, esto es debido a que se quiere que los modos superiores se desvanezcan. Además *Line* difiere  $\lambda/4$  en longitud con *Thru*.

Una vez dado estos resultados se toma las siguientes medidas para las distintas configuraciones (el *Reflect*, se comporta como un circuito abierto, por lo que no importará en exceso su longitud, por comodidad a la hora de la fabricación de la TRL, se le asignará el mismo tamaño que el *Line*).

- *Thru* medirá 12 cm o 120 mm, cumpliendo todas las especificaciones.
- *Reflect* medirá 10.971 cm o 109.71 mm, al igual que el *Line*.
- *Line* será de 109.71 mm, como se ha dicho anteriormente, cumpliendo también las especificaciones dadas.

La imagen 31 muestra las tres configuraciones de la TRL que se ha fabricado. Como el rango de frecuencias de trabajo para los dos prototipos que se han fabricado es el mismo (3GHz – 7GHz), esta estructura TRL servirá para ambos.

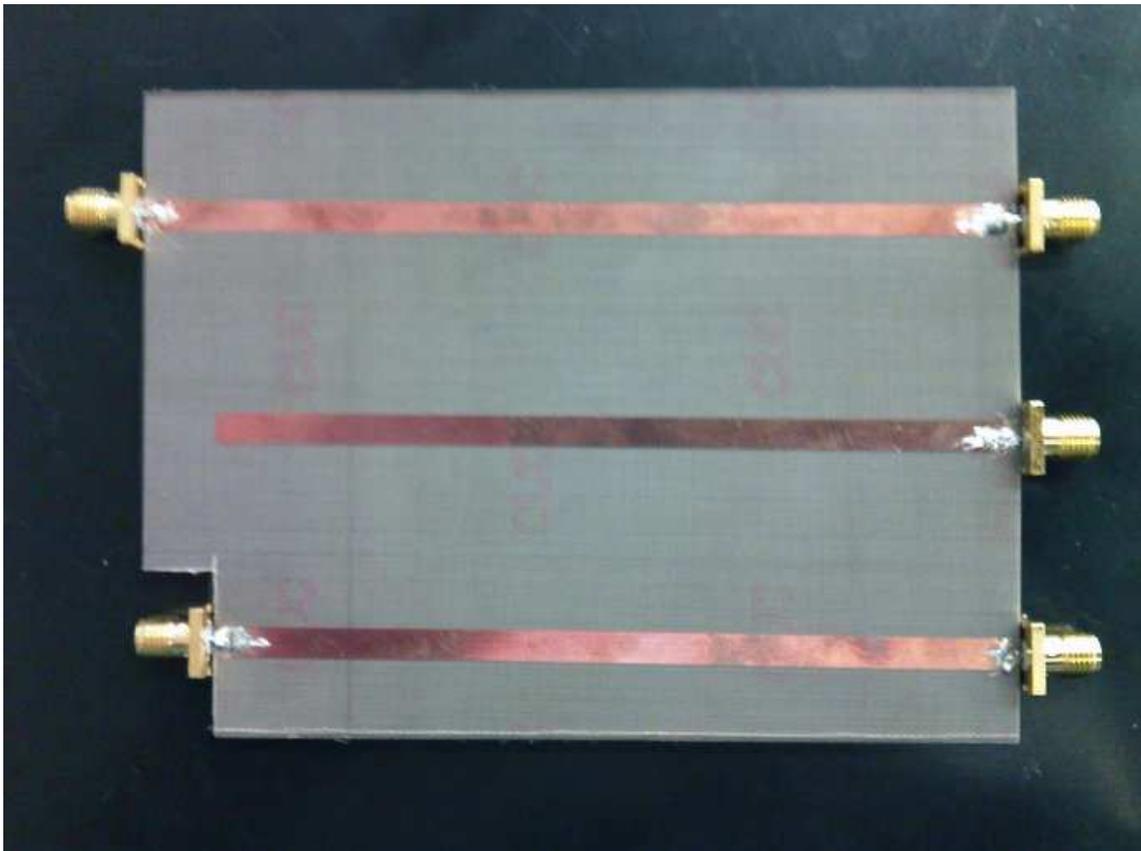


Imagen 31

Para la resolución teórica de la TRL, se han nombrado los coeficientes de cada configuración como *Thru* [T], *Reflect* [R] y *Line* [L]. Se resumen en las siguientes ecuaciones,

$$T_{11} = \frac{b_1}{a_1} (\text{con } a_2=0) = S_{11} + \frac{S_{22}S_{12}^2}{1 - S_{22}^2} \quad (3.1)$$

$$T_{12} = \frac{b_1}{a_2} (\text{con } a_1=0) = \frac{S_{12}^2}{1 - S_{22}^2} \quad (3.2)$$

$$R_{11} = \frac{b_1}{a_1} (\text{con } a_2=0) = S_{11} + \frac{S_{12}^2\Gamma_L}{1 - S_{22}\Gamma_L} \quad (3.3)$$

$$L_{11} = \frac{b_1}{a_1} (\text{con } a_2=0) = S_{11} + \frac{S_{22}S_{12}^2e^{-2\gamma l}}{1 - S_{22}^2e^{-2\gamma l}} \quad (3.4)$$

$$L_{12} = \frac{b_1}{a_2} (\text{con } a_1=0) = \frac{S_{12}^2e^{-2\gamma l}}{1 - S_{22}^2} \quad (3.5)$$

Por simetría suponemos  $S_{22} = S_{11}$ , para todos los L, T y R; y por reciprocidad  $S_{12} = S_{21}$ , resolviendo las ecuaciones [2], llegamos a los siguientes resultados,

$$S_{22} = \frac{T_{11} - L_{11}}{T_{12} - L_{12}e^{-\gamma l}} \quad (3.6)$$

$$S_{11} = T_{11} - S_{22}T_{12} \quad (3.7)$$

$$S_{12}^2 = T_{12}(1 - S_{22}^2) \quad (3.8)$$

$$\Gamma_L = \frac{R_{11} - S_{11}}{S_{12}^2 + S_{22}(R_{11} - S_{11})} \quad (3.9)$$

El último paso en la calibración TRL tras obtener los parámetros S, consiste en encontrar la matriz (ABCD), ya que se trabaja con cascadas de matrices y lo más cómodo es resolver con matrices (ABCD), para llegar a obtener la requerida en la imagen 28 de (A'B'C'D').

## El analizador de redes Agilent E8363B

El analizador de redes E8363B [23], es un analizador de redes también denominado microondas VNA, fabricado por la empresa Agilent Technologies. Su rango de funcionamiento va desde los 10 MHz hasta los 40 GHz.

Las principales características son,

- Rango dinámico de 110 dB hasta 40 GHz.
- Traza de ruido menor de 0.006 dB
- Velocidad de medida menor de 26  $\mu$ sec/punto.
- 32.000 canales
- 16.000 puntos
- Posibilidad de calibración TRL/LRM
- Toma de medidas para antenas, guías de onda, en la oblea o en circuito.
- Resultados de mezclador de pérdida de conversión, pérdidas de retorno, puertos aislados o retraso de grupo.
- Pulso RF, armónicos, IMD o amplificador de compresión de ganancia.



*Imagen 32*

El analizador contiene numerosos menús [24] para distintas mediciones, a continuación se nombran algunos de ellos, prestando atención a los parámetros que después se usaran en las medidas.

El analizador trabaja con el sistema operativo Windows XP, el cual permite un manejo más cómodo. Cualquier medida es posible hacerla tanto con el menú de Windows como con los botones que posee el analizador a la derecha de la pantalla.

Primeramente habrá que realizar una calibración, se podría hacer mediante una calibración propia del analizador (calibración eléctrica) o mediante una calibración TRL. En ambos casos hay que empezar en el menú *Calibration -> Calibration Wizard*.

Si se quisiera calibrar con el kit que trae el analizador, se usaría la opción *Use Electric Calibration (ECal)*. Se seleccionaría si se desea calibración de 1 Puerto o 2 Puertos, se sitúa la frecuencia de inicio y final mediante el menú *Channel -> Start/Stop* o mediante los botones del menú táctil del analizador, a continuación el analizador pedirá conectar los puertos deseados al kit de calibración y esperar unos segundos a que calibre el analizador. Después se guardará la calibración con el nombre que se desee y estará lista para ser usada.

Este es el método más usado a lo hora de calibrar en el analizador antes de medir, aunque existe un método más preciso, la calibración TRL. Para ello después del menú *Calibration Wizard*, se seleccionará la opción *UNGUIDED Calibration; Use Mechanical Standards*, a continuación se selecciona la opción TRL, la calibración realizada en el proyecto define a continuación como plano de referencia de la TRL al estándar del *Thru* y la impedancia TRL será del estándar *Line* y se pasa a medir en cada configuración siguiendo los pasos indicados en la pantalla.

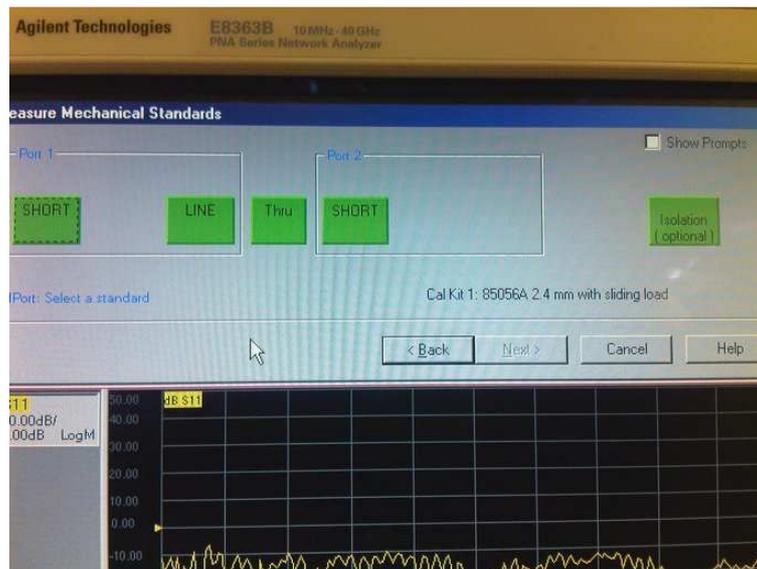


Imagen 33

Después de tener calibrado el analizador de redes, se pasaría a la medición de la estructura del proyecto. Para usar la calibración creada (TRL), se usa la opción del menú *Calibration -> Cal Set*, como se muestra en la imagen siguiente.

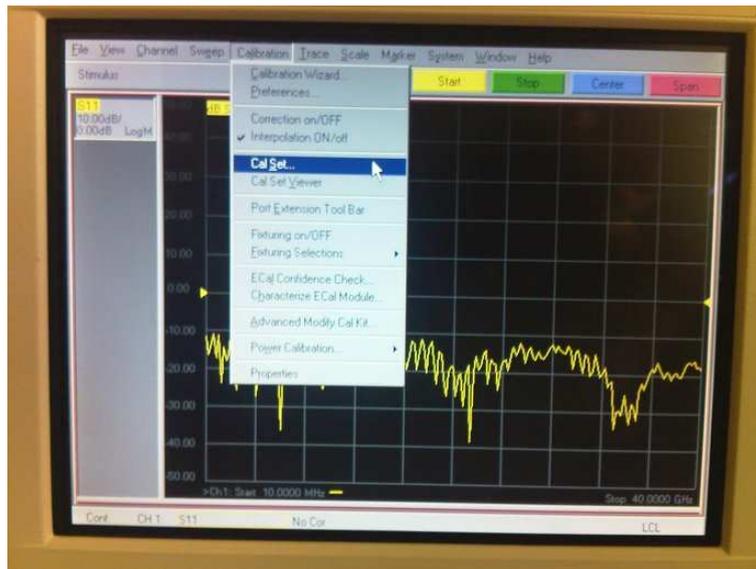


Imagen 34

Se elige la calibración TRL que se ha creado y nombrado, y sólo con *Apply Cal*, el analizador carga la calibración, colocando el rango de frecuencias deseado en pantalla.

La interfaz del analizador E8363B es la misma que un ordenador normal, ya que usa como sistema operativo Windows XP Service Pack 2. Esto conlleva a una mayor comodidad a la hora de usar el analizador. De cualquier modo, y tal como ya se ha comentado, el analizador puede también manejarse mediante los botones existentes a la derecha de la pantalla.

El menú del analizador contiene múltiples submenús, los más importantes o más usados en el proyecto se exponen a continuación,

- *File*. Contiene submenús como *Recall*, *Save*, *Save As*, *Print* o *Exit*. Este menú permite guardar los resultados o las gráficas obtenidas, para posteriormente mediante la salida USB poder almacenarlos en otros dispositivos.

- *Channel*. Con submenús como *Start/Stop*, *Center/Span* o *Average*. Permite fijar el rango de frecuencias a la que se trabaja y hacer una gráfica media de la señal de salida.

- *Calibration*. Menú detallado en la parte de calibración TRL.

- *Trace*. Con submenús como *New Trace*, *Measure* o *Math/Memory*. Ofrece la posibilidad de nuevas medidas, además de cambiar el parámetro mostrado en pantalla o guardar la imagen de una medida en pantalla para poder compararla con medidas posteriores.

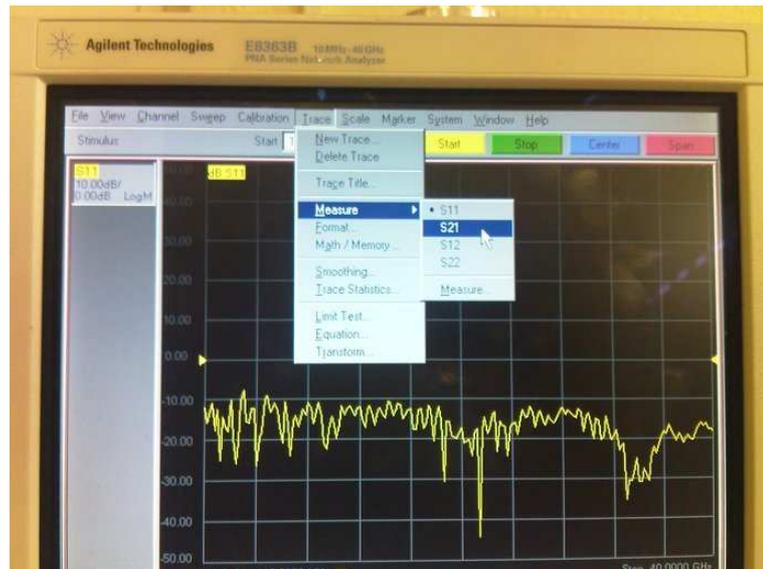


Imagen 35

- **Scale.** Este menú contiene la opción *Autoscale*, la cual escala automáticamente la magnitud mostrada en pantalla, centrándola y cambiando la escala si fuera necesario.

- **Marker.** Permite situar cursores a lo largo de la pantalla para saber el valor exacto en el punto marcado de la magnitud que se representa en la pantalla.