

Laboratorio: Analizador Vectorial de Redes (VNA)

Introducción a las medidas básicas en RF y uso del VNA

19 de septiembre de 2022

1. OBJETIVOS

Después de finalizado el laboratorio el estudiante será capaz de:

- Manejar de forma básica el VNA (Vector Network Analyzer), incluyendo su calibración.
- Podrá medir el SWR, coeficiente de reflexión, impedancia, atenuación, ganancia.
- Desplegar los parámetros S del DUT (Device Under Test) en varios formatos: lineal, logarítmico, polar, amplitud-fase, real-imaginario y Carta de Smith
- Realizar un proceso básico de "De-embedding"

2. INTRODUCCIÓN

Un Analizador Vectorial de Redes (VNA - Vector Network Analyzer) es un instrumento de medida de precisión que sirve para conocer el desempeño en frecuencia de un cierto Device Under Test (DUT) que puede ser pasivo (ej: capacitor, línea de transmisión) o activo (ej: amplificador, mixer).

Un VNA es un sistema de medida tipo estímulo-respuesta, compuesto por una fuente de RF y múltiples receptores de medida. El mismo está especialmente diseñado para medir los coeficientes de reflexión directo e inverso, las características de transmisión o los parámetros S del DUT.

Los VNA proporcionan una gran exactitud en las medidas mediante la calibración del *Sistema de Pruebas* utilizando una técnica matemática llamada *Vector de Corrección de Errores* (EVC).

El EVC, representa el error en la medición en el propio analizador de redes, además de todos los cables de prueba, adaptadores, accesorios, y/o sondas que se encuentran entre el analizador y el DUT.

La calibración de un *Sistema de Pruebas* permite eliminar el mayor contribuyente de incertidumbre en la medición que son los errores sistemáticos. Los errores sistemáticos son errores repetibles, no aleatorios, que pueden ser medidos y eliminados matemáticamente. Como se puede ver en Fig. 2.1, se aprecia el DUT embebido en el *TEST FIXTURE* (Sistema de Pruebas). Esta es la situación mas general en donde el DUT no posee los conectores necesarios que permiten su conexión al VNA.

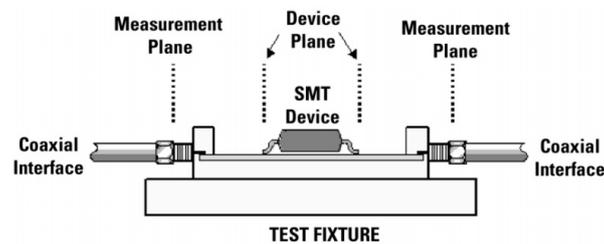


Figura 2.1: Setup de medición (Application Note 1364-1 Agilent)

Dicha técnica permite mediante operaciones matemáticas, trasladar los planos de referencia (Measurement Plane en Fig. 2.1) a los puertos del DUT para descontar las incertidumbres proporcionadas por el cableado al VNA y errores internos al propio VNA. Realizando medidas adicionales al *TEXT FIXTURE* o versiones modificadas del mismo, es posible estimar la medida en el propio DUT (Device Plane en Fig. 2.1). Este segundo proceso se conoce como “De-embedding” y se verán ejemplos del mismo en las secciones 5 y 6 de este Laboratorio.

3. PREINFORME

Se deberá traer al laboratorio un preinforme con las respuesta a las siguientes preguntas:

1. Es usual considerar el valor límite de $SWR = 2$ cuando se habla de una adaptación de impedancias aceptable. Calcule el valor de RL (*Return Loss*), $|\Gamma|$ y $\%P_r$ para los valores de $SWR = 2$, $SWR = 1,5$ y $SWR = 1$. ¿A que impedancia corresponden dichos valores?. (Sugerencia: revisar [3] y notas del curso)

2. Simular en *QUCS* dos líneas coplanares de largo l_1 y l_2 utilizando los siguientes datos:

- $\epsilon_r = 4,7$
- $h = 1,58mm$
- $t = 35\mu m$
- $\tan\delta = 0,03$
- $\rho = 1,71e^{-8}$
- $D = 0,15e^{-6}$
- $w = 0,82mm$
- $s = 0,15mm$
- $l_1 = 36mm$
- $l_2 = 108mm$

¿Para que rangos de frecuencia se pueden considerar líneas de impedancia característica $Z_0 = 50\Omega$?. Grafique el módulo en dB y la fase de $S(1,1)$, $S(2,1)$, $S(2,2)$ y $S(1,2)$. También muestre los resultados de $S(1,1)$ y $S(2,2)$ en la Carta de Smith.

4. CALIBRACIÓN DEL VNA

El VNA que se utilizará en el laboratorio es el *Rohde Schwarz ZVB8* de 4 puertos el cual dispone de un ancho de banda que va desde 300kHz a 8GHz. El mismo se aprecia en Fig. 4.1.

Los puertos son numerados desde el 1 al 4 y poseen adaptadores *Tipo-N Female*. Los DUTs a ser caracterizados en el presente laboratorio poseen conectores SMA, por lo tanto se utilizarán conectores *Tipo-N Male* a *SMA Female* y cables coaxiales *SMA Male - SMA Male* de calidad para poder extender los puertos de medición a una distancia razonable que permita la conexión del DUT.

A continuación, se detallará la lista de pasos necesarios para realizar una correcta calibración del VNA que permitirá extender los planos de medida desde los conectores *Tipo-N Female* al final del cable coaxial *SMA - SMA* insertado con lo cual se podrá descontar los efectos del cable y conectores.

1. Póngase la pulsera antiestática y coloque los adaptadores y cables SMA-SMA (Fig. 4.2) en el puerto 1 y 2 del VNA (Fig. 4.3).
2. Aprete el conector SMA utilizando el torquímetro de la Fig. 4.4. Este torquímetro permite ajustar los conectores y adaptadores con un torque determinado. Esto es importante para realizar medidas en RF de calidad pues variación en el cuán apretados están los conectores varían distancias internas de conexión al mismo, deforman los pines de conexión o generan separaciones en la conexión que alteran el comportamiento en alta frecuencia.

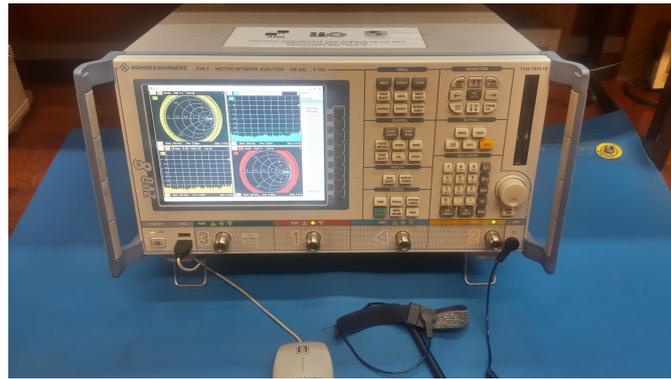


Figura 4.1: Analizador Vectorial de Redes *Rohde Schwarz ZVB8*

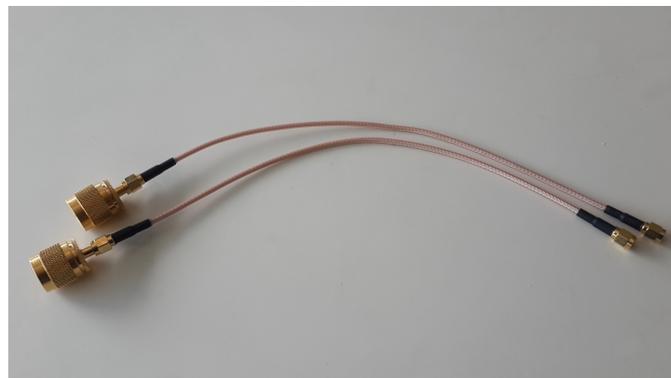


Figura 4.2: Adaptadores *Tipo-N Female* y cables *SMA Male - SMA Male*



Figura 4.3: Puerto 1 del VNA



Figura 4.4: Torquímetro del kit de calibración 85033E

3. Seleccionar *System, Measurement Wizard, S-Param Wizard*. Luego haga clic en *Next*.
4. En la ventana **Test Setup**:
Seleccione en DUT: Single-ended 2-port
Haga clic en *Next*.
5. En la ventana **Port Reference Impedance**:
Verifique que la impedancia sea 50Ω
Haga clic en *Next*.
6. En la ventana **Display**:
Seleccione *S-Matrix 1*
Haga clic en *Next*.
7. En la ventana **Frequency Sweep**:
Introduzca el valor de los parámetros: *Number of Points, Start Frequency* y *Stop Frequency* de acuerdo al ancho de banda y cantidad de muestras que sean necesarias.
Haga clic en *Next*.
8. En la ventana **Bandwidth and Power**:
Seleccione *Fast Sweep* y *Passive DUT*
Haga clic en *Next*.
9. En la ventana **Completing the S-Parameter Wizard**:
Seleccione: *Continue with Manual Calibration*
Haga clic en *Next*.
10. En la ventana que aparece (*Select Physical VNA Port Connector(s)*), seleccionar:

- Port1 PC 3.5(m)
- Port2 PC 3.5(m)

Calibration Kit

- 85033E

Haga clic en *Next*.

11. En la ventana **Measure Standards:**

Para cada puerto (*Port1* y *Port2*), calibre utilizando los standards correspondientes, es decir, para la calibración *Open* utilice el standard (Fig. 4.5) que tiene una letra *O* impresa, para la calibración *Short* utilice el que tiene una letra *S*, y así con los demás.



Figura 4.5: Standard: Open - Short - Match



Figura 4.6: Reciprocal Through

Para realizar la calibración de forma correcta, se debe utilizar el torquímetro de la Fig. 4.4 para darle el torque exacto a cada conector SMA.

La última calibración que resta es utilizando el *Unknown Reciprocal Through* de la Fig. 4.6.

Luego haga clic en *Next* y en *Apply*.

5. LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

El objetivo de esta parte del laboratorio es medir la respuesta en frecuencia de algunas líneas de transmisión de diferentes longitudes diseñadas para una impedancia característica de 50Ω . Luego, mediante el software de simulación QUCS, se importarán al programa los parámetros S medidos para dichas líneas para contrastar el modelo de la líneas en QUCS contra las medidas (incluyendo el efecto antes determinado de los conectores).

En la Fig. 5.1 y Fig. 5.2 se pueden ver los dos tipos de líneas a ser caracterizadas en el VNA.

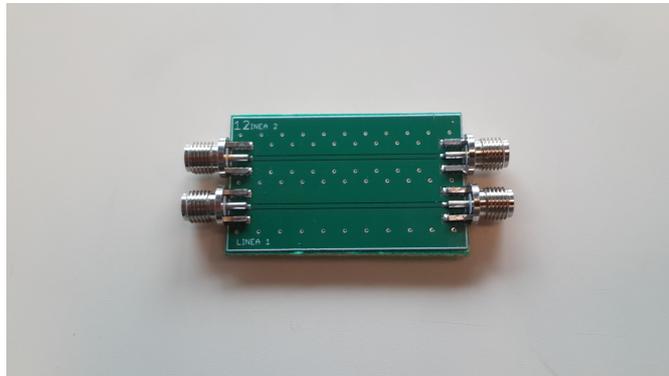


Figura 5.1: Líneas de transmisión coplanares de longitud $L=36\text{mm}$

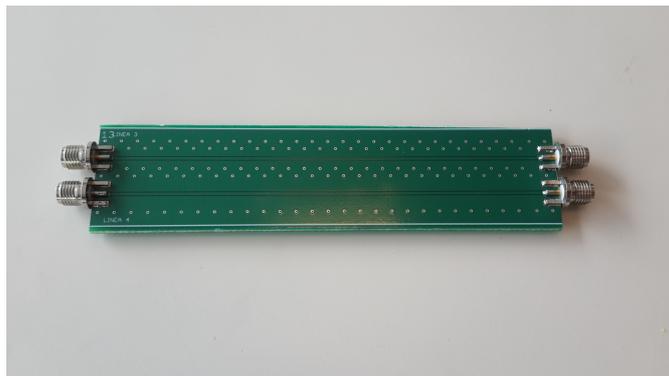


Figura 5.2: Líneas de transmisión coplanares de longitud $L=108\text{mm}$

5.1. MEDIDAS

Utilizando el VNA, releve los parámetros S de dos líneas de diferente largo. Para esta parte se relevarán 30000 muestras con un ancho de banda que va desde 300kHz a 8GHz.

5.2. COMPARACIÓN SIMULACIÓN VS. MEDIDAS

Para el informe realice los siguientes pasos.

1. Importe los parámetros S medidos, en el *QUCS*.
2. Estimación de ϵ_r [1][5]. Para poder efectuar un modelo aceptable de las líneas relevadas, es necesario conocer ϵ_r del dieléctrico utilizado (FR4). Se podría utilizar algún valor estándar para el FR4, pero el resultado no sería muy bueno dada la dispersión del ϵ_r conforme el fabricante del dieléctrico FR4.

Para estimar el valor del ϵ_r , se estimará primero el ϵ_{eff} para luego calcular dicho valor. Primero utilice la siguiente expresión para calcular la diferencia de la longitud eléctrica entre las dos líneas:

$$\Delta l_e = \sqrt{\epsilon_{eff}} \Delta l_p \quad (5.1)$$

donde Δl_e es la diferencia de longitud eléctrica y Δl_p es la diferencia de longitud física de las líneas.

La diferencia de fase $\Delta\phi$ entre las líneas se puede expresar como:

$$\Delta\phi = 2\pi f \Delta l_p \frac{\sqrt{\epsilon_{eff}}}{C} \quad (5.2)$$

La Ec. 5.3 relaciona el ϵ_r con el ϵ_{eff} para una línea de transmisión coplanar para los valores de w , s , t y h que se presentan en el siguiente cuadro.

- $h = 1,58mm$
- $t = 35\mu m$
- $\tan\delta = 0,03$
- $rho = 1,71e^{-8}$
- $D = 0,15e^{-6}$
- $w = 0,82mm$
- $s = 0,15mm$

$$\epsilon_r = 1,96\epsilon_{eff} - 0,96 \quad (5.3)$$

Utilizando las ecuaciones anteriores calcule ϵ_r para luego alimentar el modelo que se implementará en QUCS. Tome el valor de ϵ_r que se corresponde con 100MHz

3. Verifique que las líneas con los parámetros anteriores tiene una impedancia nominal cercana a 50Ω mediante el uso de la calculadora de líneas. Utilizando el modelo de línea coplanar presente en QUCS, cargue los valores de dieléctrico y dimensiones de las líneas en dicho programa y simule. ¿La simulación se corresponde con lo medido?. Explique.

Graficar módulo (en dB) y fase de $S(2,1)$ y el diagrama de Smith de $S(1,1)$ para cada línea medida comparándolas con su simulación.

4. ¿Para qué rango de frecuencias se puede considerar que las líneas medidas presentan $Z_0 = 50\Omega$?. Explicar.

6. MODELADO DE CONECTOR SMA

El objetivo de esta parte es caracterizar el comportamiento en frecuencia de 2 conectores *SMA - Female* para luego efectuar un modelo en base a los parámetros S medidos.

En la Fig. 6.1 se aprecia el modelo de 2 conectores SMA que están sobre un mismo sustrato de FR4 en el cual, la distancia entre ellos se puede considerar despreciable.

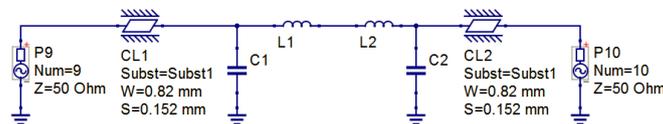


Figura 6.1: Modelo de 2 conectores SMA

Como se puede ver, el modelo es muy simple. Consta de una línea de transmisión de largo a determinar que depende de la longitud de las conexiones internas del conector. Además posee un capacitor y un inductor. Estos últimos componentes, modelan la transición entre el conector SMA y una línea coplanar.

6.1. MEDIDAS

Utilizando el VNA, releve los parámetros S de dos conectores SMA cortocircuitados entre sí que se aprecian en la Fig. 6.2.

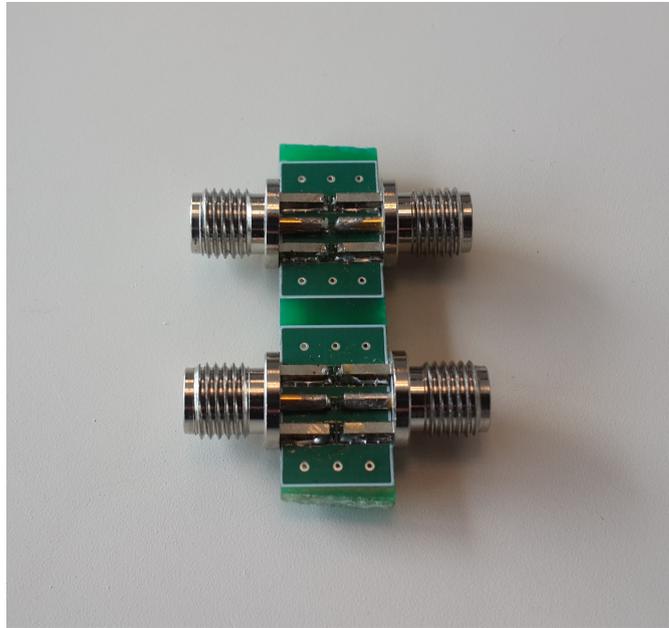


Figura 6.2: Conectores SMA

Para esta parte se relevarán 30000 puntos en un ancho de banda que va desde 300kHz a 8GHz.

6.2. MODELO

A partir de las medidas de parámetros S tomadas en la práctica, para el informe realice los siguientes análisis.

1. Importe los datos medidos en el *QUCS* y halle el módulo (en dB) y fase del $S(2,1)$ y el diagrama de Smith del $S(1,1)$.
2. Utilizando el modelo que se muestra en la Fig. 6.1, ajuste el largo de las líneas (iguales para los 2 conectores) para que coincida con el delay eléctrico introducido por el conector. Como dato, la longitud mecánica del conector SMA es de 9.4mm aprox. Pruebe con valores en dicho rango.

3. Luego del ajuste de longitud, ajuste los valores de C y L que mejor aproximan a las curvas. Recuerde que estos valores son los mismos para los 2 conectores.

Una vez ajustados C y L, puede volver a iterar ajustando nuevamente la longitud de las líneas para hacer coincidir la fase. Realice esto ultimo las veces que sea necesario.

4. Indicar para qué rangos de frecuencias se puede considerar que los conectores medidos presentan $Z_0 = 50\Omega$. Explique.
5. Incluya el modelo del conector SMA en el modelo de la parte 5 y compare la simulación con la medida.
6. Ajuste el largo de las líneas en las simulaciones para que se corresponda mejor con lo medido.

7. FILTRO PASA BANDA

El objetivo es relevar un filtro pasa banda (BPF) que se muestra en Fig. 7.1 de impedancia 50Ω para la banda de 2340MHz a 2530MHz para luego mediante las funciones de De-embedding[2][4] propias del VNA, descontar de la medida la influencia de los adaptadores.



Figura 7.1: Filtro pasabanda VBF-2435

7.1. MEDIDAS

Para esta parte, se relevarán 30000 muestras con un ancho de banda que va desde 300kHz a 8GHz.



Figura 7.2: Adaptador *SMA Female - SMA Female*

1. Utilizando el VNA, releve los parámetros S del adaptador deFig. 7.2.
2. Inserte el adaptador en el filtro pasabanda tal como se muestra en Fig. 7.3



Figura 7.3: Filtro pasabanda con adaptador

3. Coloque en el VNA el sistema BPF+Adaptador y realice el De-embedding del filtro BPF.
4. Haga clic en *Mode*, *Virtual Transform* y luego en *Single Port Deembedding*. Cargue los parámetros S del adaptador.

7.2. SIMULACIÓN

En el informe:

- Compare la respuesta del BPF medida con la respuesta proporcionada por el fabricante. Preste atención al SWR y al Insertion Loss.

- ¿Los rangos de frecuencia de operación son los esperados?
- ¿Hay alguna diferencia si se realiza el De-embedding o no?, ¿Por qué?. Explique.

REFERENCIAS

- [1] Nirod K Das, Susanne M Voda, and David M Pozar. Two methods for the measurement of substrate dielectric constant. *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, 35(7):636–642, 1987.
- [2] Anritsu Application Note. 1364-1. *Agilent Technologies, De-embedding and Embedding S-Parameter Networks Using a Vector Network Analyzer*, pages 1–24, 2004.
- [3] David M Pozar. *Microwave engineering*. John Wiley & Sons, 2009.
- [4] Agilent Technologies. 1364-1. *Agilent Signal Integrity Analysis Series, Part 3: The ABCs of De-Embedding*, 2007.
- [5] Sung-Mao Wu, Chi-Chang Lai, Hung-Hsiang Cheng, Yu-Che Tai, and Chen-Chao Wang. Frequency dielectric constant and loss tangent extracting of organic material using multi-length microstrip. In *Electronic Packaging Technology & High Density Packaging, 2008. ICEPT-HDP 2008. International Conference on*, pages 1–4. IEEE, 2008.