

# Trabajo práctico N°1: Líneas de transmisión

Vázquez, Matías Fernando - 91523  
mfvazquezfiuba@gmail.com

15 de abril de 2018

*En el siguiente trabajo se caracterizarán 3 líneas de transmisión coaxiales. Se utilizará el medidor RLC y el VNA para obtener la impedancia característica, la velocidad de propagación y la permitividad relativa. También se obtendrá la pérdida por inserción utilizando el VNA y el analizador de espectros junto a un generador de RF.*

## 1. Longitud física de las líneas

Se dispuso de 3 líneas distintas y se procedió a relizar la medición del largo de cada una con una cinta métrica. En la tabla 1 se encuentran los datos de cada línea junto al número de línea que será utilizado a lo largo de todo el trabajo para diferenciar cada línea.

Línea	Largo	Tipo
$\ell_1$	0,96 m	RG-213
$\ell_2$	2,05 m	RG-58
$\ell_3$	2,075 m	RG-58

Tabla 1: Parámetros obtenidos para los canales de aire

## 2. Especificaciones del fabricante

A continuación se listan las especificaciones de las líneas RG-213 [1] y RG-58 [2] del fabricante.

En la tabla 2 se muestran las especificaciones eléctricas, siendo  $Z_o$  la impedancia característica y  $k$  el factor de velocidad de la línea.

Tipo	$Z_o$	$k$	Frecuencia máxima	Capacidad
RG-213	50 $\Omega$	66 %	1 GHz	101,05 pF/m
RG-58	50 $\Omega$	65,9 %	5 GHz	101,05 pF/m

Tabla 2: Especificaciones eléctricas de las líneas utilizadas

En las tablas 3 y 4 se muestran la atenuación en base ala frecuencia de la línea RG-213 y RG-58 respectivamente.

Frecuencia	100 MHz	400 MHz	1 GHz
Atenuación	6,89 dB/100m	15,75 dB/100m	26,25 dB/100m

Tabla 3: Atenuación en función de la frecuencia de la línea RG-213

Frecuencia	10 MHz	100 MHz	1 GHz	5 GHz
Atenuación	4,59 dB/100m	16,08 dB/100m	65,62 dB/100m	196,85 dB/100m

Tabla 4: Atenuación en función de la frecuencia de la línea RG-58

Las especificaciones mecánicas de ambas líneas se muestran en la tabla 5.

Tipo	Conductor interno		Dielectrico		Conductor externo		Cubierta	
	Tipo	Diametro	Tipo	Diametro	Tipo	Diametro	Tipo	Diametro
RG-213	Cobre 7 filamentos	2,29 mm	PE	7,24 mm	Cobre trenzado	7,98 mm	PVC	10,29 mm
RG-58	Cobre estañado 19 filamentos	0,91 mm	PE	2,95 mm	Cobre estañado trenzado	3,51 mm	PVC	4,95 mm

Tabla 5: Especificaciones mecánicas

### 3. Medición utilizando el medidor RLC

Para medir la inductancia  $L$  por unidad de longitud de la línea se procedió por conectar un extremo de la línea al medidor RLC y en el otro extremo realizar un cortocircuito. Configurando para que el medidor RLC mida inductancias en serie, se realizaron mediciones a distintas frecuencias.

Para medir la capacidad  $C$  por unidad de longitud de la línea se dejó el otro extremo de la línea abierto y se configuró el medidor RLC para que mida capacidades en paralelo y se realizaron las mediciones en distintas frecuencias.

En la tabla 6 se encuentran las mediciones realizadas.

		$f = 1 \text{ kHz}$	$f = 10 \text{ kHz}$	$f = 40 \text{ kHz}$	$f = 100 \text{ kHz}$
$\ell_1$	$L_{total}$	160 nH	130 nH	110 nH	90 nH
	$C_{total}$	160 pF	112 pF	99 pF	97 pF
$\ell_2$	$L_{total}$	560 nH	540 nH	520 nH	510 nH
	$C_{total}$	240 pF	195 pF	183 pF	155 pF
$\ell_3$	$L_{total}$	580 nH	550 nH	540 nH	520 nH
	$C_{total}$	240 pF	196 pF	185 pF	183 pF

Tabla 6: Mediciones con el medidor RLC realizadas

Estas mediciones son las capacidades e inductancias netas del cable, por lo que es necesario dividir las por la longitud del cable para obtener las inductancias y capacidades por unidad de longitud. En la tabla 7 se muestran las inductancias y capacidades por unidad de longitud de la línea.

		$f = 1 \text{ kHz}$	$f = 10 \text{ kHz}$	$f = 40 \text{ kHz}$	$f = 100 \text{ kHz}$
$\ell_1$	$L$	166 nH/m	135 nH/m	114 nH/m	93,8 nH/m
	$C$	166 pF/m	116 pF/m	103 pF/m	101 pF/m
$\ell_2$	$L$	273 nH/m	263 nH/m	253 nH/m	248 nH/m
	$C$	117 pF/m	95,1 pF/m	89,3 pF/m	75,6 pF/m
$\ell_3$	$L$	280 nH/m	265 nH/m	260 nH/m	251 nH/m
	$C$	116 pF/m	94,5 pF/m	89,2 pF/m	88,2 pF/m

Tabla 7: Inductancias y capacidades por unidad de longitud

En este método se emplea el modelo de línea de bajas pérdidas, este modelo se utiliza cuando:

$$R \ll \omega L \quad G \ll \omega C$$

Con este modelo la impedancia característica se simplifica de la siguiente forma:

$$Z_o = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \approx \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Por lo que se la calcula con la siguiente ecuación:

$$Z_o = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (1)$$

Al ser una línea de bajas pérdidas el número de onda se simplifica de la siguiente forma:

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \approx \sqrt{j\omega L j\omega C} = j\omega \sqrt{LC}$$

Resultando:

$$\alpha = 0 \quad \beta = \omega\sqrt{LC}$$

La velocidad de propagación de las ondas armónicas es:

$$v = \frac{\omega}{\beta}$$

Reemplazando  $\beta$  obtenemos la siguiente ecuación para calcular la velocidad de propagación:

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2)$$

La velocidad de propagación de una onda en una línea se obtiene de la expresión estándar:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

Siendo  $c$  la velocidad de la luz en el vacío.

Se despeja  $\epsilon_r$ :

$$\epsilon_r = \left(\frac{c}{v}\right)^2 \quad (3)$$

Utilizando las ecuaciones obtenidas se realizan los cálculos utilizando **Matlab 2016b** mediante el código mostrado en el apéndice **A**. En la tabla **8** se muestran los resultados obtenidos.

		$f = 1 \text{ kHz}$	$f = 10 \text{ kHz}$	$f = 40 \text{ kHz}$	$f = 100 \text{ kHz}$
$\ell_1$	$Z_o$	$32 \Omega$	$34 \Omega$	$33 \Omega$	$30 \Omega$
	$v$	$190 \cdot 10^6 \text{ m/s}$	$252 \cdot 10^6 \text{ m/s}$	$291 \cdot 10^6 \text{ m/s}$	$325 \cdot 10^6 \text{ m/s}$
	$\epsilon_r$	2,50	1,42	1,06	0,85
$\ell_2$	$Z_o$	$48 \Omega$	$53 \Omega$	$53 \Omega$	$57 \Omega$
	$v$	$177 \cdot 10^6 \text{ m/s}$	$200 \cdot 10^6 \text{ m/s}$	$210 \cdot 10^6 \text{ m/s}$	$231 \cdot 10^6 \text{ m/s}$
	$\epsilon_r$	2,88	2,26	2,04	1,69
$\ell_3$	$Z_o$	$49 \Omega$	$53 \Omega$	$54 \Omega$	$53 \Omega$
	$v$	$176 \cdot 10^6 \text{ m/s}$	$200 \cdot 10^6 \text{ m/s}$	$208 \cdot 10^6 \text{ m/s}$	$213 \cdot 10^6 \text{ m/s}$
	$\epsilon_r$	2,91	2,25	2,09	1,99

Tabla 8:  $Z_o$ ,  $v$  y  $\epsilon_r$  calculados.

Para todas las líneas se observa que  $v$  aumenta con el aumento de la frecuencia, mientras que  $\epsilon_r$  disminuye con el aumento de la frecuencia.

## 4. Determinación analítica de la impedancia característica

La impedancia característica de una línea coaxial se calcula mediante la ecuación:

$$Z_o = \frac{\eta}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \quad (4)$$

Siendo  $a$  el diámetro del conductor interno,  $b$  el diámetro del conductor externo y  $\eta$  se calcula mediante:

$$\eta = \frac{\eta_o}{\sqrt{\epsilon_r}} = \eta_o k \quad (5)$$

Siendo  $\eta_o = 377 \Omega$  la impedancia característica en el vacío y  $k$  el factor de propagación de la línea. Reemplazando la ecuación **5** en la ecuación **4** se obtiene:

$$Z_o = \frac{\eta_o k}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \quad (6)$$

Utilizando los datos provistos por el fabricante para la línea **RG-213** se obtiene:

$$Z_o = \frac{\eta_o k}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right) = \frac{377 \Omega \cdot 0,66}{2\pi} \ln\left(\frac{7,98 \text{ mm}}{2,29 \text{ mm}}\right) = 49,4 \Omega$$

Y para la línea RG-58:

$$Z_o = \frac{\eta_o k}{2\pi} \ln \left( \frac{b}{a} \right) = \frac{377 \Omega 0,66}{2\pi} \ln \left( \frac{3,51 \text{ mm}}{0,91 \text{ mm}} \right) = 53,5 \Omega$$

## 5. Mediciones utilizando el analizador vectorial de redes (VNA)

### 5.a. Calibración

La calibración corrige los efectos sistemáticos, ligados a la línea utilizada para realizar las mediciones, se debe realizar siempre que se cambie el rango de frecuencias. Para la calibración se utiliza un kit de calibración cuyas condiciones eléctricas son conocidas y el VNA computa correcciones para el rango de frecuencias elegido.

### 5.b. Medición del coeficiente de reflexión

Para esta medición se utilizó solo el puerto 1 del VNA. Se realizó la calibración para un rango de frecuencias comprendido entre 200 MHz y 1,5 GHz.

Posteriormente se conectó una línea, dejando en el otro extremo un circuito abierto y realizando un diagrama de Smith en el VNA y se guardó el parámetro  $S_{11}$  de la medición. Luego se agregó un cortocircuito en el extremo de la línea y nuevamente se realizó un diagrama de Smith y se guardó el parámetro  $S_{11}$ .

Este procedimiento se repitió para cada línea y se utilizó el código en **Matlab 2016b** mostrado en el apéndice **B**.

El parámetro  $S_{11}$  de una línea de transmisión es el coeficiente de reflexión visto desde el puerto en el que se realizó la medición.

#### 5.b.1. Línea 1

En las figuras **1** y **2** se muestran las mediciones realizadas del coeficiente de reflexión para la línea  $\ell_1$ .

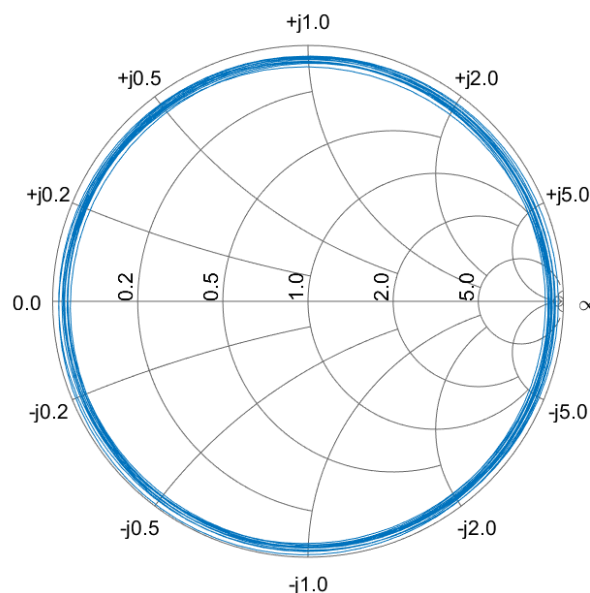


Figura 1: Diagrama de Smith con circuito abierto en la salida

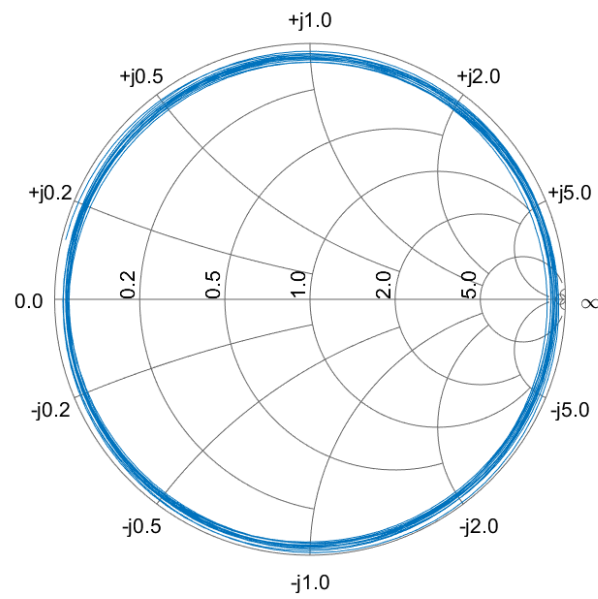


Figura 2: Diagrama de Smith con cortocircuito en la salida

### 5.b.2. Línea 2

En las figuras 3 y 4 se muestran las mediciones realizadas del coeficiente de reflexión para la línea  $\ell_2$ .

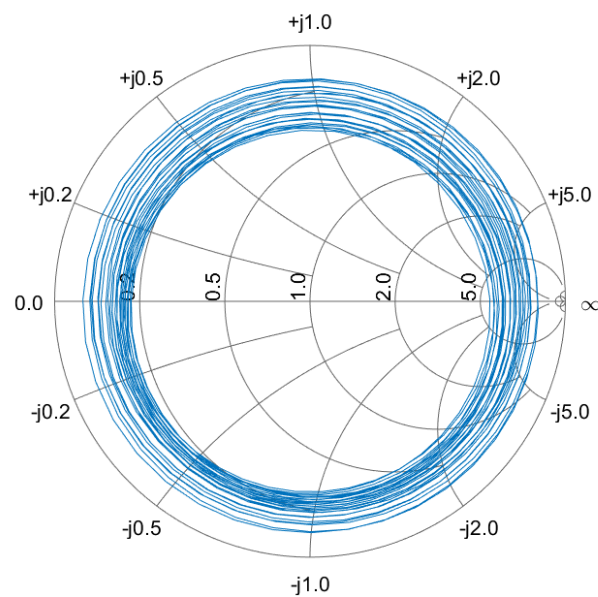


Figura 3: Diagrama de Smith con circuito abierto en la salida

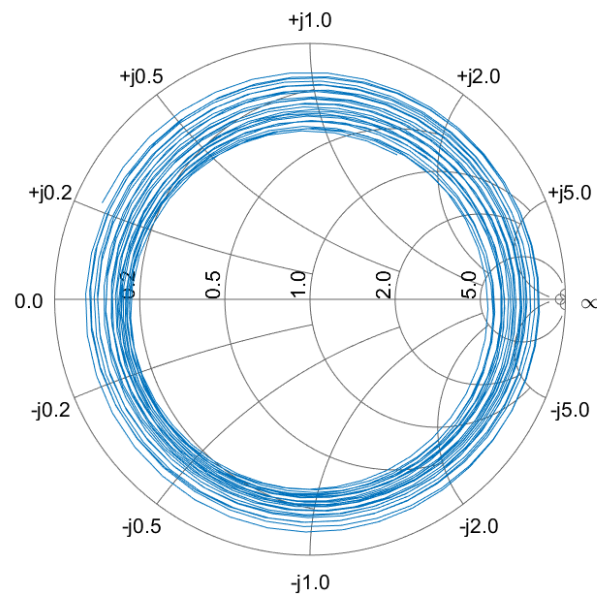


Figura 4: Diagrama de Smith con cortocircuito en la salida

### 5.b.3. Línea 3

En las figuras 5 y 6 se muestran las mediciones realizadas del coeficiente de reflexión para la línea  $\ell_3$ .

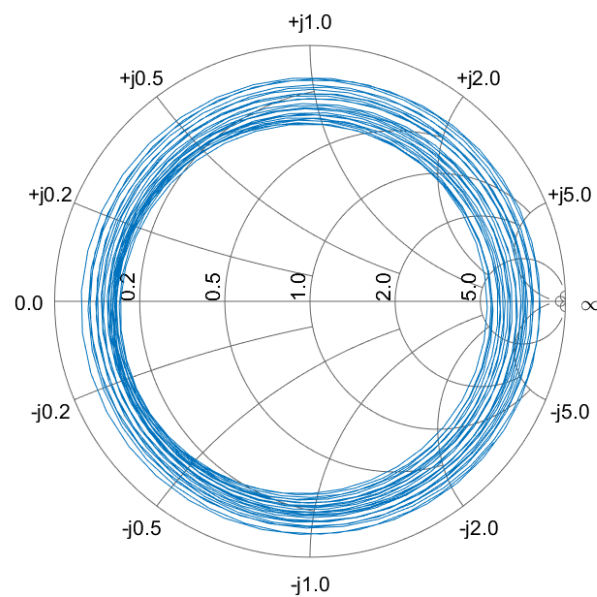


Figura 5: Diagrama de Smith con circuito abierto en la salida

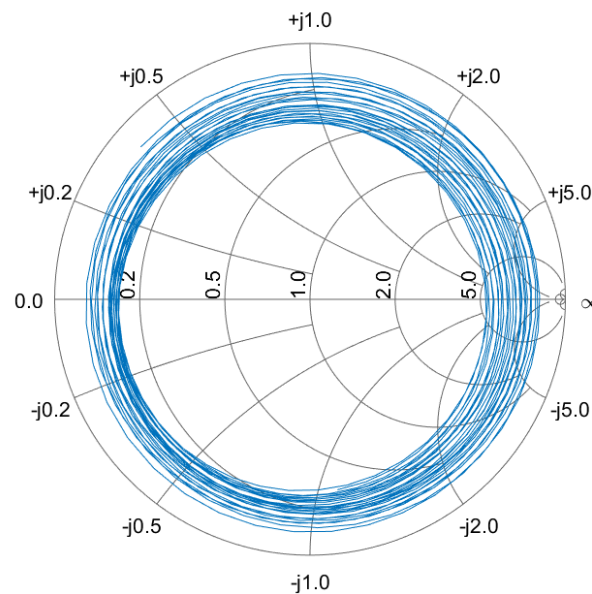


Figura 6: Diagrama de Smith con cortocircuito en la salida

### 5.c. Determinación de la impedancia característica

De la expresión general de la impedancia vista a la entrada de una línea cargada con  $Z_L$  y de largo  $\ell$ :

$$Z_{in} = Z_o \frac{Z_L + jZ_o \tan(\beta\ell)}{Z_o + jZ_L \tan(\beta\ell)} \quad (7)$$

Siendo  $\beta$ :

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi f}{v} \quad (8)$$

Se pueden hallar expresiones simplificadas de la impedancia de entrada para el caso en que la carga es un circuito abierto o cuando es un cortocircuito.

#### 5.c.1. Circuito abierto en la salida

Dejando el circuito abierto en la salida se puede aproximar que la carga  $Z_L$  tiende a infinito. El denominador de la ecuación 7 si  $\tan(\beta\ell)$  no tiende a cero resulta:

$$Z_o + jZ_L \tan(\beta\ell) \approx jZ_L \tan(\beta\ell)$$

Debido a que:

$$Z_o \ll jZ_L \tan(\beta\ell)$$

El numerador de la ecuación 7 si  $\tan(\beta\ell)$  no tiende a infinito resulta:

$$Z_L + jZ_o \tan(\beta\ell) \approx Z_L$$

Debido a que:

$$Z_L \gg jZ_o \tan(\beta\ell)$$

Realizando estas aproximaciones a la ecuación 7 resulta:

$$Z_{inCA} \approx Z_o \frac{Z_L}{jZ_L \tan(\beta\ell)} = Z_o \frac{1}{j \tan(\beta\ell)} \quad (9)$$

Esta expresión es valida solo cuando se conecta la salida a un circuito abierto y si se cumple:

$$\tan(\beta\ell) \rightarrow 0 \quad \tan(\beta\ell) \rightarrow \infty$$

Estas condiciones se cumplen si:

$$\beta\ell \neq k\frac{\pi}{2}$$

Siendo  $k$  cualquier número entero.

Reemplazando la ecuación 8 se obtiene:

$$\frac{2\pi f}{v}\ell \neq k\frac{\pi}{2}$$

Se despeja  $f$ :

$$f \neq \frac{kv}{4\ell}$$

Por lo tanto la ecuación 9 es valida solo si:

$$f \neq \frac{kv}{4\ell} \quad \forall k \in \mathbb{Z}$$

### 5.c.2. Cortocircuito en la salida

Haciendo un cortocircuito en la salida se puede considerar que  $Z_L$  tiende a cero.

El numerador de la ecuación 7 si  $\tan(\beta\ell)$  no tiende a cero resulta:

$$Z_L + jZ_o \tan(\beta\ell) \approx jZ_o \tan(\beta\ell)$$

Debido a que:

$$Z_L \ll jZ_o \tan(\beta\ell)$$

Y la expresión del denominador de la ecuación 7 si  $\tan(\beta\ell)$  no tiende a infinito resulta:

$$Z_o + jZ_L \tan(\beta\ell) \approx Z_o$$

Debido a que:

$$Z_o \gg jZ_L \tan(\beta\ell)$$

Realizando estas aproximaciones a la ecuación 7 resulta:

$$Z_{inCC} \approx Z_o \frac{jZ_o \tan(\beta\ell)}{Z_o} = Z_o j \tan(\beta\ell) \quad (10)$$

Esta expresión solo es valida si se cumple:

$$\tan(\beta\ell) \rightarrow 0 \quad \tan(\beta\ell) \rightarrow \infty$$

Que son las mismas condiciones que se deben cumplir para la aproximación realizada dejando abierta la salida.

Por lo que la ecuación 10 sólo es valida si:

$$f \neq \frac{kv}{4\ell} \quad \forall k \in \mathbb{Z}$$

### 5.c.3. Determinación de la impedancia característica

Haciendo el producto de las dos impedancias de entradas se obtiene:

$$Z_{inCA} Z_{inCC} = Z_o \frac{1}{j \tan(\beta\ell)} Z_o j \tan(\beta\ell) = Z_o^2$$

Por lo que conociendo la impedancia de entrada dejando el circuito abierto en la salida  $Z_{inCA}$  y la impedancia de entrada haciendo un cortocircuito en la salida  $Z_{inCC}$ , se puede obtener la impedancia característica de la línea mediante:

$$Z_o = \sqrt{Z_{inCA} Z_{inCC}} \quad (11)$$



Esta ecuación solo es válida cuando las expresiones de  $Z_{inCA}$  y  $Z_{inCC}$  son validas, para esto se debe cumplir:

$$f \neq \frac{kv}{4\ell} \quad \forall k \in \mathbb{Z}$$

Para valores cercanos a estas frecuencias las impedancias características calculadas no serán correctas.

En las mediciones realizadas se obtuvo el parámetro  $S_{11}$  de la línea, del cual se puede obtener la impedancia de entrada de la línea utilizando la ecuación 12.

$$S_{11} = \Gamma = \frac{Z_L - Z_o}{Z_L + Z_o} \quad (12)$$

Siendo  $Z_o = 50 \Omega$  la impedancia característica de la línea utilizada por el VNA la cual se conecta a la carga que se desea medir. Y  $Z_L$  es la impedancia de la carga que ve el VNA, que en esta medición es la impedancia de entrada de la línea que se desea medir.

De la ecuación 12 conociendo  $Z_o$  se puede obtener la impedancia de la carga conectada:

$$Z_L = Z_o \frac{\Gamma + 1}{\Gamma - 1} \quad (13)$$

Mediante la ecuación 13 dejando en el extremo de la línea un circuito abierto se obtendrá  $Z_L = Z_{inCA}$  y haciendo un cortocircuito se obtendrá  $Z_L = Z_{inCC}$ .

Luego se utilizó la ecuación 11 para obtener la impedancia característica de cada línea. En el apéndice B se encuentra el código utilizado para este cálculo.

En las figuras 7, 8 y 9 se muestra la curva de  $Z_o$  en función de la frecuencia para las líneas  $\ell_1$ ,  $\ell_2$  y  $\ell_3$  respectivamente. También se incluye el valor medio de estas curvas, que son valores cercanos a los  $50 \Omega$ . Se observa que las curvas tienen picos, esto ocurre en las frecuencias en las que la ecuación 11 no es válida.

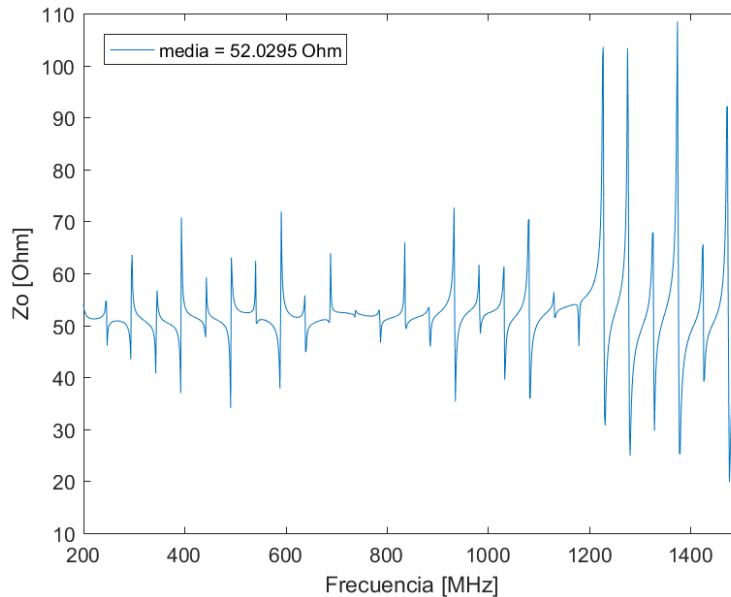


Figura 7: Impedancia característica en función de la frecuencia para la línea 1

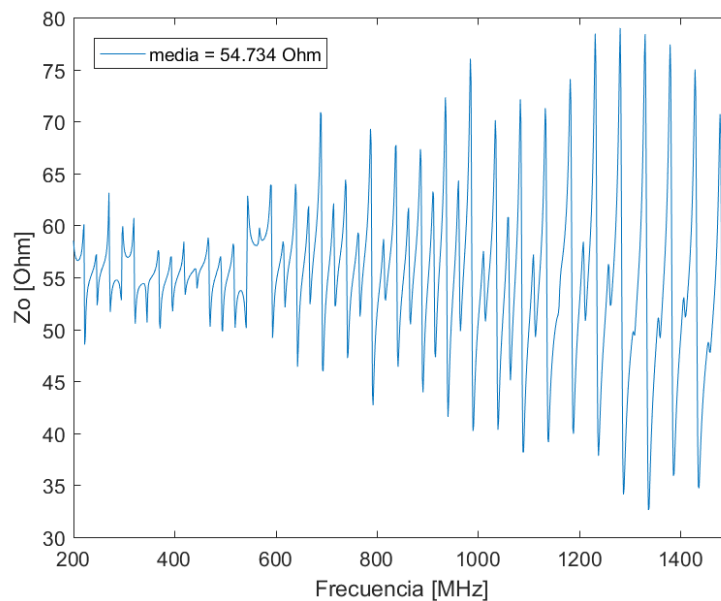


Figura 8: Impedancia característica en función de la frecuencia para la línea 2

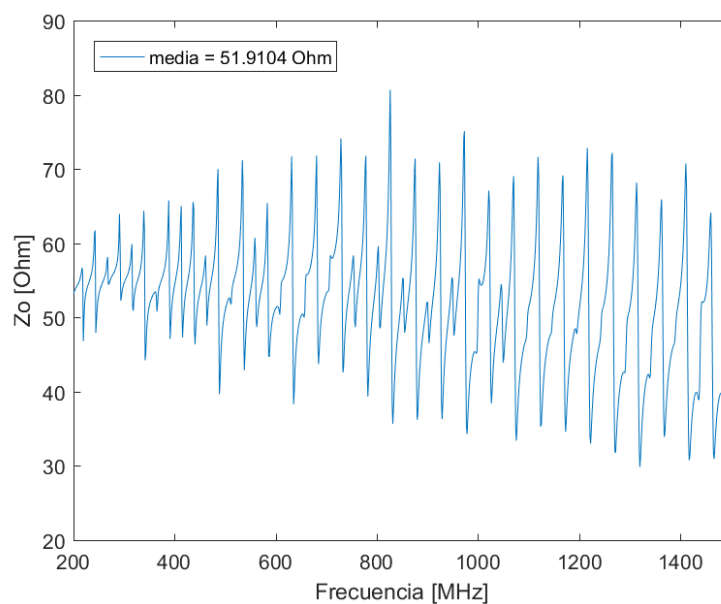


Figura 9: Impedancia característica en función de la frecuencia para la línea 3

## 6. Medición de la pérdida por inserción y la atenuación

Las pérdidas por inserción consideran tanto la desadaptación de la línea como las pérdidas óhmicas. En cambio las pérdidas por atenuación solo considera las pérdidas óhmicas. Por lo que las mediciones realizadas son las pérdidas por inserción.

### 6.a. Medición de ganancia con el VNA

Para esta medición se utilizaron los 2 puertos del VNA. Teniendo que calibrarlo nuevamente, esta vez conectando una carga conocida en cada puerto, la calibración se realizó para un rango de frecuencias comprendido entre 1 GHz y 3 GHz.

Posteriormente se conectó la línea en ambos puertos del VNA y se grabaron los parámetros  $S$ . Esta medición se realizó para las 3 líneas.

Las pérdidas por inserción están definidas por la ecuación:

$$I_L[\text{dB}] = 10 \text{ dB} \log \left( \left| \frac{(1 - S_{11}\Gamma_G)(1 - S_{22}\Gamma_L) - S_{12}S_{21}\Gamma_G\Gamma_L}{S_{21}(1 - \Gamma_L\Gamma_G)} \right|^2 \right)$$

Si la línea está perfectamente adaptada se puede reducir a:

$$I_L[\text{dB}] = 10 \text{ dB} \log \left( \frac{1}{|S_{21}|^2} \right) \quad (14)$$

Por lo que con sólo el parámetro  $S_{21}$  se puede determinar las pérdidas por inserción. Luego se deben normalizar para cables de 100 m

## 6.b. Medición con el analizador de espectros

Para esta medición se utilizó un generador de RF y un analizador de espectros. Para cada línea se conectó un extremo en el generador de RF y el otro extremo a la entrada del analizador de espectros. Se configuró el generador de RF para que genere señales de  $-40 \text{ dBm}$  de potencia y en cada medición se fué eligiendo una frecuencia comprendida entre 1 GHz y 3 GHz a intervalos de 500 MHz. Luego se midió la potencia recibida en el analizador de espectros.

Las pérdidas por inserción del generador hacia la carga se puede calcular mediante la ecuación 15.

$$I_L[\text{dB}] = 10 \text{ dB} \log \left( \frac{P_i}{P_o} \right) \quad (15)$$

Esta ecuación se puede expresar en función de las potencias medidas:

$$I_L[\text{dB}] = 10 \text{ dB} \log \left( \frac{P_i}{1 \text{ mW}} \right) - 10 \text{ dB} \log \left( \frac{P_o}{1 \text{ mW}} \right) = P_i[\text{dBm}] - P_o[\text{dBm}]$$

Luego se debe expresar los resultados en dB/100m, para esto se utiliza la ecuación 16 siendo  $\ell$  el largo de la línea.

$$I_L[\text{dB}/100\text{m}] = \Delta P[\text{dB}] \frac{100 \text{ m}}{\ell} \quad (16)$$

En las tablas 9, 10 y 11 se muestran los datos medidos y calculados para las líneas  $\ell_1$ ,  $\ell_2$  y  $\ell_3$  respectivamente.

Frecuencia	$P_i[\text{dBm}]$	$P_o[\text{dBm}]$	$I_L[\text{dB}]$	$I_L[\text{dB}/100\text{m}]$
1 GHz	$-40 \text{ dBm}$	$-43,3 \text{ dBm}$	3,3 dB	344 dB/100m
1,5 GHz	$-40 \text{ dBm}$	$-45 \text{ dBm}$	5 dB	521 dB/100m
2 GHz	$-40 \text{ dBm}$	$-43 \text{ dBm}$	3 dB	313 dB/100m
2,5 GHz	$-40 \text{ dBm}$	$-43,4 \text{ dBm}$	3,4 dB	354 dB/100m
3 GHz	$-40 \text{ dBm}$	$-42 \text{ dBm}$	2 dB	208 dB/100m

Tabla 9: Potencias medidas para la línea 1

Frecuencia	$P_i[\text{dBm}]$	$P_o[\text{dBm}]$	$I_L[\text{dB}]$	$I_L[\text{dB}/100\text{m}]$
1 GHz	$-40 \text{ dBm}$	$-44,3 \text{ dBm}$	4,3 dB	210 dB/100m
1,5 GHz	$-40 \text{ dBm}$	$-46 \text{ dBm}$	6 dB	293 dB/100m
2 GHz	$-40 \text{ dBm}$	$-44,5 \text{ dBm}$	4,5 dB	220 dB/100m
2,5 GHz	$-40 \text{ dBm}$	$-45 \text{ dBm}$	5 dB	244 dB/100m
3 GHz	$-40 \text{ dBm}$	$-43,9 \text{ dBm}$	3,9 dB	190 dB/100m

Tabla 10: Potencias medidas para la línea 2

Frecuencia	$P_i$ [dBm]	$P_o$ [dBm]	$I_L$ [dB]	$I_L$ [dB/100m]
1 GHz	-40 dBm	-44,3 dBm	4,3 dB	207 dB/100m
1,5 GHz	-40 dBm	-44,5 dBm	4,5 dB	260 dB/100m
2 GHz	-40 dBm	-44,3 dBm	4,3 dB	207 dB/100m
2,5 GHz	-40 dBm	-44,7 dBm	4,7 dB	227 dB/100m
3 GHz	-40 dBm	-43,9 dBm	3,9 dB	188 dB/100m

Tabla 11: Potencias medidas para la línea 3

### 6.c. Comparación de las atenuaciones

En las figuras 10, 11 y 12 se comparan las pérdidas por inserción de las líneas  $\ell_1$ ,  $\ell_2$  y  $\ell_3$  respectivamente. En cada gráfico se encuentran las pérdidas medidas utilizando el VNA, el analizador de espectros y los datos suministrados por el fabricante.

Se observa que las curvas medidas con el VNA y los datos aportados por el fabricante están correlacionados. Sin embargo los datos medidos utilizando el analizador de espectros están dispersos y no parecen estar correlacionados con las demás curvas. Esto se puede deber a que con este método si la línea no esta perfectamente adaptada se pueden generar pérdidas, en cambio con el VNA al calibrarse se adapta a la línea.

En el apéndice C se encuentra el código utilizado para generar los gráficos.

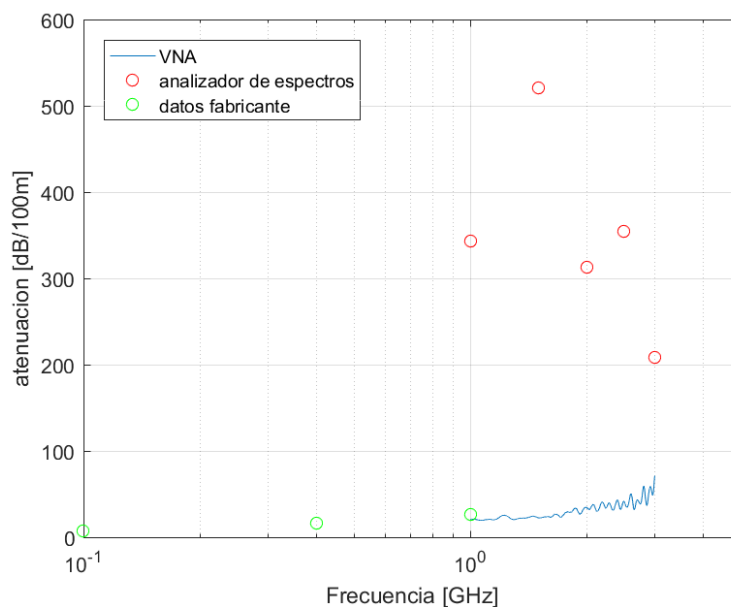


Figura 10: Pérdidas por inserción en la línea 1

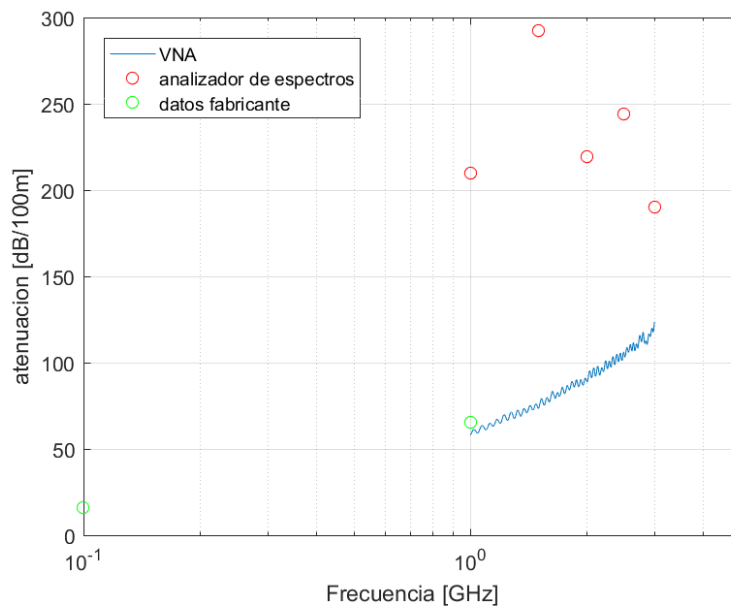


Figura 11: Perdidas por inserción en la línea 2

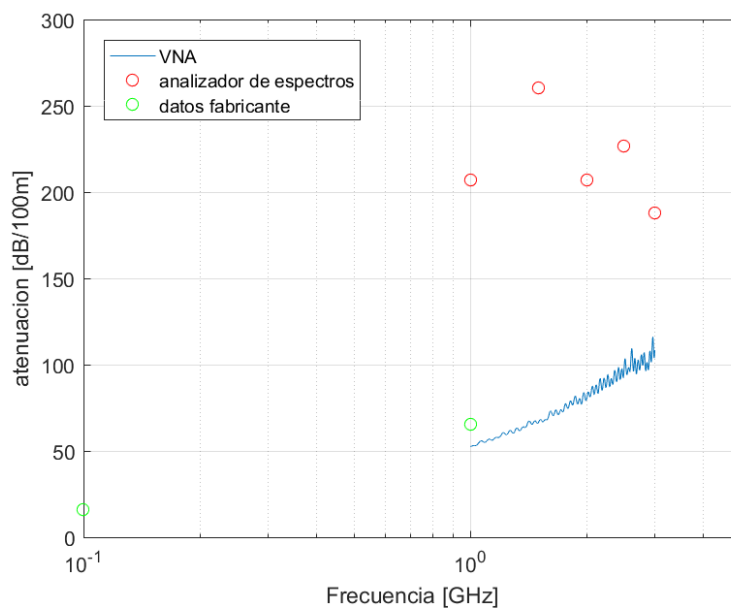


Figura 12: Perdidas por inserción en la línea 3

## 7. Conclusiones

Se logró caracterizar cada línea, obteniendo sus parámetros con distintos métodos de medición. Algunos métodos no fueron exactos para algunas líneas.

La medición utilizando el módulo RLC para la línea  $\ell_1$  no se obtuvieron resultados esperados. La línea RG-213 tiene una impedancia característica de  $50\Omega$  sin embargo se obtuvieron valores alrededor de los  $32\Omega$  para todas las frecuencias. La capacidad medida para esta línea concuerda con los datos del fabricante, por lo que la medición de la inductancia es la que suministró valores incorrectos.

Para el resto de las líneas, RG-58 se obtuvieron los resultados esperados en esta medición.

Se calculó la impedancia característica de forma analítica utilizando los datos provistos por el fabricante, se obtuvieron resultados esperados para ambos tipos de líneas.

Utilizando el VNA se pudo comprobar que la línea RG-58 tiene mayor atenuación que la línea RG-213, ya que en los diagramas de Smith dieron curvas con menor coeficiente de reflexión.

El VNA resultó ser un instrumento muy útil pero debe ser utilizado correctamente para evitar datos erróneos. Es de vital importancia calibrarlo para cada puerto utilizado siempre que se mida en un rango de frecuencias nuevo. Con este instrumento se obtuvieron las curvas de la impedancia característica en función de la frecuencia para cada línea. Este método en promedio dio valores esperados, pero no sirve para cualquier valor de frecuencia ya que la ecuación utilizada tiene aproximaciones que no son válidas para frecuencias múltiplos de  $\frac{v}{4\ell}$ .

Finalmente se midieron las pérdidas por inserción utilizando el VNA, obteniéndose resultados similares a los provistos por el fabricante. Esto no ocurrió con el generador de RF y el analizador de espectros, que se obtuvieron valores de atenuación mayores a los esperados y sin seguir algún tipo de curva. Esto se puede deber a una desadaptación en el banco de medición, efecto que en el VNA se evita ya que se realiza una calibración para eliminar este tipo de error sistemático.

## A. Código utilizando los datos del medidor RLC

```
1 %% LINEA 1
2
3 linea.largo = 0.96;
4
5 linea.mediciones(1).f = 1e3;
6 linea.mediciones(1).L = 160e-9;
7 linea.mediciones(1).C = 160e-12;
8
9 linea.mediciones(2).f = 10e3;
10 linea.mediciones(2).L = 130e-9;
11 linea.mediciones(2).C = 112e-12;
12
13 linea.mediciones(3).f = 40e3;
14 linea.mediciones(3).L = 110e-9;
15 linea.mediciones(3).C = 99e-12;
16
17 linea.mediciones(4).f = 100e3;
18 linea.mediciones(4).L = 90e-9;
19 linea.mediciones(4).C = 97e-12;
20
21 lineas(1) = linea;
22
23 %% LINEA 2
24
25 linea.largo = 2.05;
26
27 linea.mediciones(1).f = 1e3;
28 linea.mediciones(1).L = 560e-9;
29 linea.mediciones(1).C = 240e-12;
30
31 linea.mediciones(2).f = 10e3;
32 linea.mediciones(2).L = 540e-9;
33 linea.mediciones(2).C = 195e-12;
34
35 linea.mediciones(3).f = 40e3;
36 linea.mediciones(3).L = 520e-9;
37 linea.mediciones(3).C = 183e-12;
38
39 linea.mediciones(4).f = 100e3;
40 linea.mediciones(4).L = 510e-9;
41 linea.mediciones(4).C = 155e-12;
42
43 lineas(2) = linea;
44
45 %% LINEA 3
46
47 linea.largo = 2.075;
48
49 linea.mediciones(1).f = 1e3;
50 linea.mediciones(1).L = 580e-9;
51 linea.mediciones(1).C = 240e-12;
52
53 linea.mediciones(2).f = 10e3;
54 linea.mediciones(2).L = 550e-9;
55 linea.mediciones(2).C = 196e-12;
56
57 linea.mediciones(3).f = 40e3;
58 linea.mediciones(3).L = 540e-9;
```

```
59 linea.mediciones(3).C = 185e-12;
60
61 linea.mediciones(4).f = 100e3;
62 linea.mediciones(4).L = 520e-9;
63 linea.mediciones(4).C = 183e-12;
64
65 lineas(3) = linea;
66
67 %% Divido los valores medidos por el largo
68
69 for x = 1:length(lineas)
70     linea = lineas(x);
71     for y = 1:length(linea.mediciones)
72
73         linea.mediciones(y).L = linea.mediciones(y).L / linea.largo;
74         linea.mediciones(y).C = linea.mediciones(y).C / linea.largo;
75         disp(['Linea ', num2str(x), ' f = ', num2str(linea.mediciones(y).f)]);
76         fprintf('L = %f\n', linea.mediciones(y).L*1e9);
77         fprintf('C = %f\n', linea.mediciones(y).C*1e12);
78     end
79     lineas(x) = linea;
80 end
81
82 %% Calculo Zo, V y Er
83 c = 3e8; % velocidad de la luz
84
85 for x = 1:length(lineas)
86     linea = lineas(x);
87     for y = 1:length(linea.mediciones)
88         Zo = sqrt(linea.mediciones(y).L/linea.mediciones(y).C);
89         V = 1/sqrt(linea.mediciones(y).L*linea.mediciones(y).C);
90         Er = (c/V)^2;
91
92         linea.mediciones(y).Zo = Zo;
93         linea.mediciones(y).V = V;
94         linea.mediciones(y).Er = Er;
95
96     end
97     lineas(x) = linea;
98 end
99
100 %% Imprimo los datos en una tabla de latex
101
102 for x = 1:length(lineas)
103     linea = lineas(x);
104
105     % Zo
106     fprintf('\multirow{3}{*}{$\ell_1$} & $Z_o$ ')
107     for y = 1:length(linea.mediciones)
108         fprintf('& $\unit[%f]{\Omega}$ ', linea.mediciones(y).Zo)
109     end
110     fprintf('\cline{2-6}\n');
111
112     % v
113     fprintf('& $v$ ')
114     for y = 1:length(linea.mediciones)
115         fprintf('& $\unit[%f]{10^6}\{m/s\}$ ', linea.mediciones(y).V/1e6)
116     end
117     fprintf('\cline{2-6}\n');
118
```



```
119     % Er
120     fprintf( '& $\\epsilon_r$ ' )
121     for y = 1:length(linea.mediciones)
122         fprintf( '& $%.2f$ ', linea.mediciones(y).Er )
123     end
124     fprintf( '\\\\ \\hline\\n' );
125
126 end
```

## B. Código utilizando los datos del VNA

```
1 close all
2 clear
3
4 archivos = dir(fullfile('data','*.slp'));
5
6 x = 1;
7
8 Zo = 50;
9
10 for x = 1:length/archivos)/2
11     Scc = sparameters(fullfile(archivos(x*2-1).folder,archivos(x*2-1).name)
12     );
13     s1lcc = rfparam(Scc,1,1);
14     figure
15     smithchart(s1lcc)
16     saveas(gcf,fullfile('imagenes',[num2str(x) 'CC.png']))
17
18     Sca = sparameters(fullfile(archivos(x*2).folder,archivos(x*2).name));
19     s1lca = rfparam(Sca,1,1);
20     figure
21     smithchart(s1lca)
22     saveas(gcf,fullfile('imagenes',[num2str(x) 'CA.png'] ))
23
24     Zincc = Zo * (s1lcc + 1) ./ (1-s1lcc);
25     Zinca = Zo * (s1lca + 1) ./ (1-s1lca);
26
27     Zo_calculado = sqrt(abs(Zincc.*Zinca));
28
29     figure
30     plot(Scc.Frequencies/1e6, Zo_calculado); %paso la frecuencia a MHz
31     legend(['media = ' num2str(mean(Zo_calculado)) ' Ohm'], 'Location','
32     northwest');
33     ylabel('Zo [Ohm] ');
34     xlabel('Frecuencia [MHz] ');
35     xlim([Scc.Frequencies(1) Scc.Frequencies(end)]/1e6)
36     saveas(gcf,fullfile('imagenes',[num2str(x) 'Zo.png']))
37 end
```

## C. Código para graficar las pérdidas

```
1 close all
2 clear
3
4 archivos = dir(fullfile('data','*.s2p'));
5
6 f = [1e9 1.5e9 2e9 2.5e9 3e9];
7 mediciones = [ [3.3 5 3 3.4 2];[4.3 6 4.5 5 3.9];[4.3 5.4 4.3 4.7 3.9]];
8 l = [0.96 2.05 2.075];
9
10 f_fabricante = {[100e6 400e6 1e9] [10e6 100e6 1e9 5e9] [10e6 100e6 1e9 5e9
11 ]};
12 datos_fabricante = {[6.89 15.75 26.25] [4.59 16.08 65.62 196.85] [4.59
13 16.08 65.62 196.85]};
14
15 for x = 1:length/archivos)
16     S = sparameters(fullfile(archivos(x).folder,archivos(x).name));
17     S21 = rfparam(S,2,1);
18
19     atenuacion = 10*log10(1./abs(S21).^2) *100/l(x);
20
21     figure
22     semilogx(S.Frequencies/1e9, atenuacion);
23     hold on
24     semilogx(f/1e9, mediciones(x,:) *100/l(x), 'ro')
25     hold on
26     semilogx(f_fabricante{x}/1e9, datos_fabricante{x}, 'g');
27     grid
28     xlim([100e6 5e9]/1e9)
29     ylabel('atenuacion [dB/100m]');
30     xlabel('Frecuencia [GHz]');
31     legend('VNA','analizador de espectros','datos fabricante','Location',
32           'northwest')
33     saveas(gcf, fullfile('imagenes',[num2str(x) 'atenuacion.png'])))
34 end
```

## Referencias

- [1] Especificaciones de la línea RG-213  
<https://www.pasternack.com/images/ProductPDF/RG213-U.pdf>
- [2] Especificaciones de la línea RG-58  
<https://www.pasternack.com/images/ProductPDF/RG58C-U.pdf>