

# Taller de Comunicaciones Eléctricas

## Introducción Laboratorio 3

Ing. Sergio Arriola-Valverde. M.Sc

Ing. Néstor Hernández Hostaller. M.Sc

Ing. Alexander Barrantes Muñoz. M.Sc

Escuela de Ingeniería Electrónica  
Instituto Tecnológico de Costa Rica

I Semestre 2020

**TEC** | **Tecnológico**  
de Costa Rica

# Contenidos y Cronograma

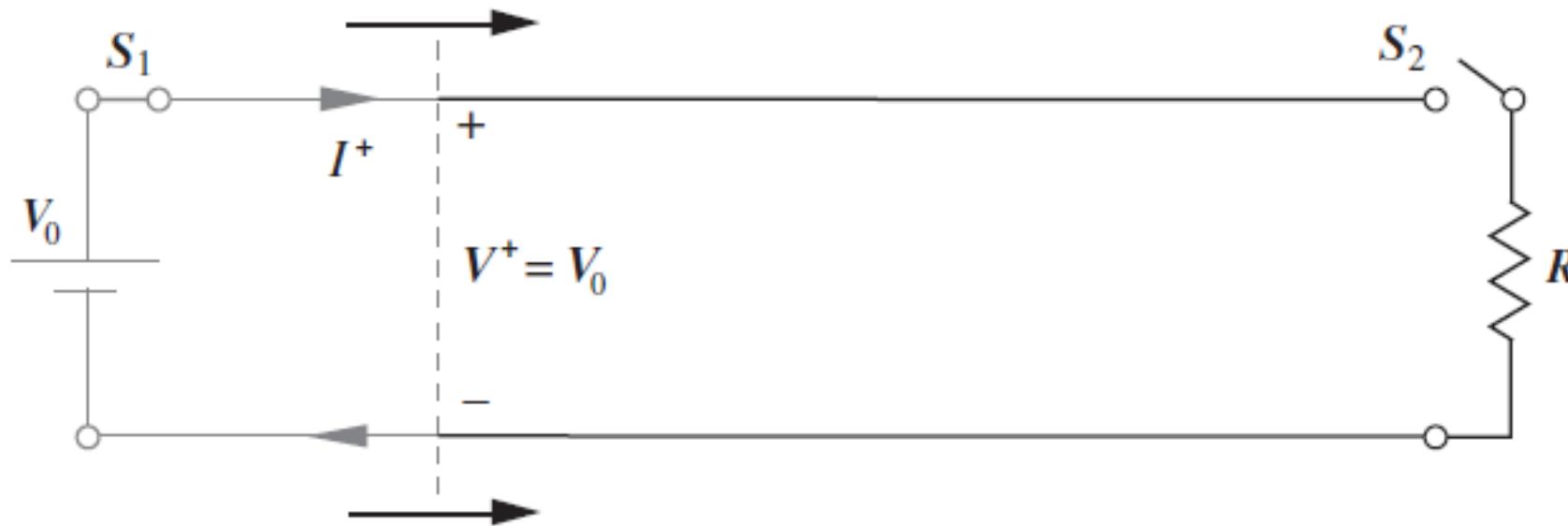
- Líneas de Transmisión
- Circuitos Impresos
- Filtros
- Analizador Vectorial de Redes (VNA)

# Contenidos y Cronograma

- Líneas de Transmisión
- Circuitos Impresos
- Filtros
- Analizador Vectorial de Redes (VNA).

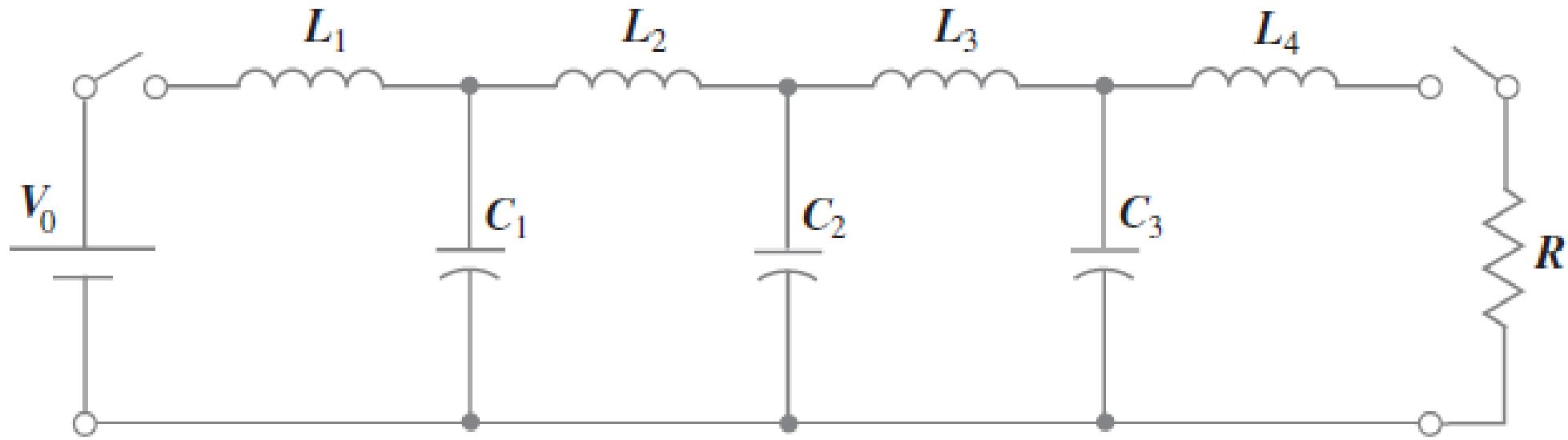
# Línea de transmisión

Algunas descripciones físicas para las líneas de transmisión se considera lo siguiente:



# Línea de transmisión

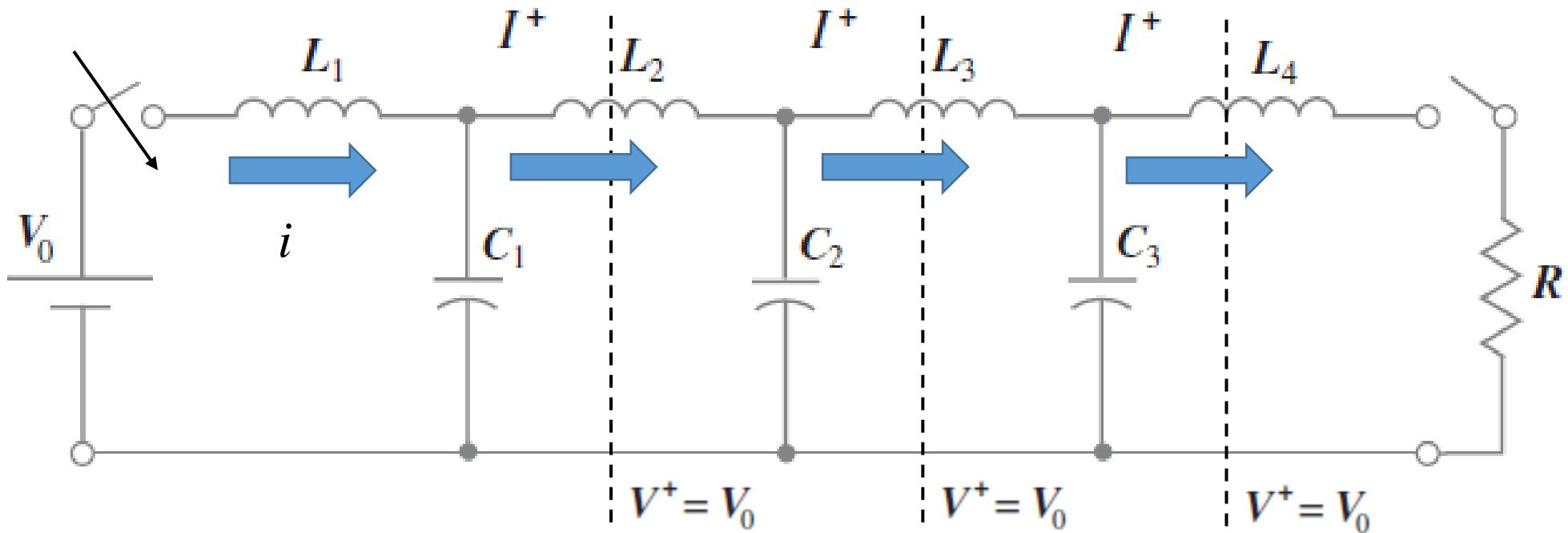
Si se consideran elementos distribuidos se tiene que:



Según la configuración que se tiene la red mostrada, es una red que es capaz de formar pulsos

# Línea de transmisión

Si se consideran elementos distribuidos se tiene que:

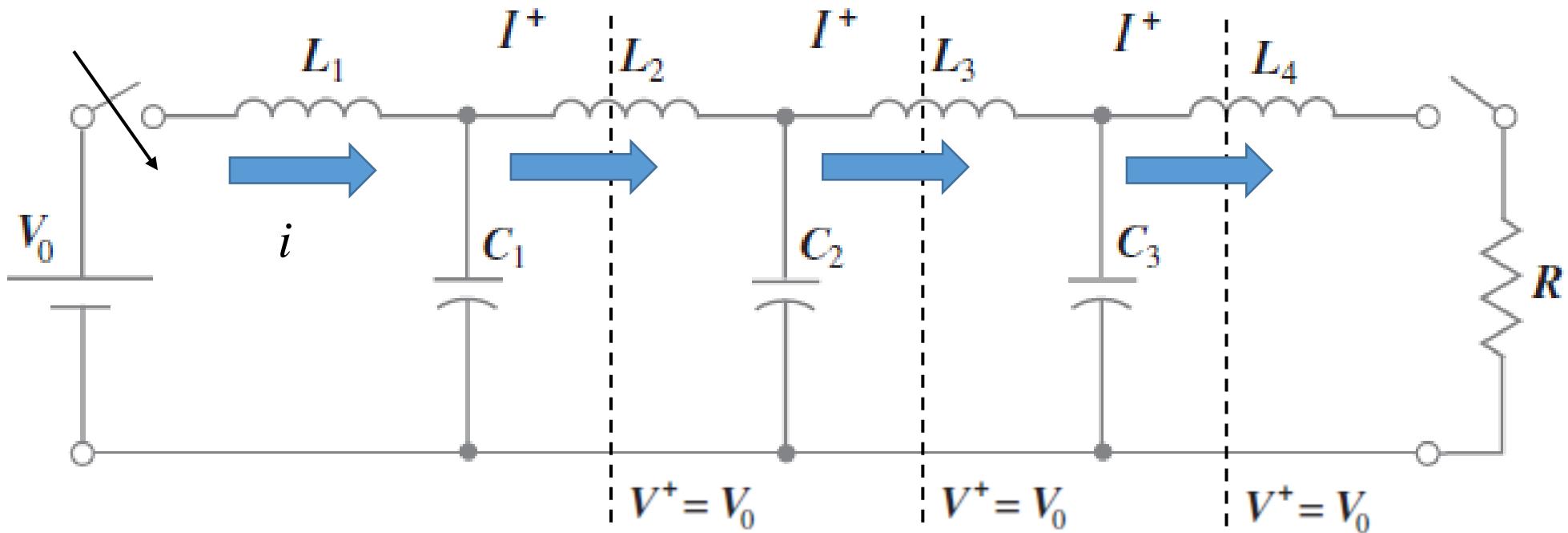


¿De que depende la velocidad?

NO depende la luz

# Línea de transmisión

Si se consideran elementos distribuidos se tiene que:

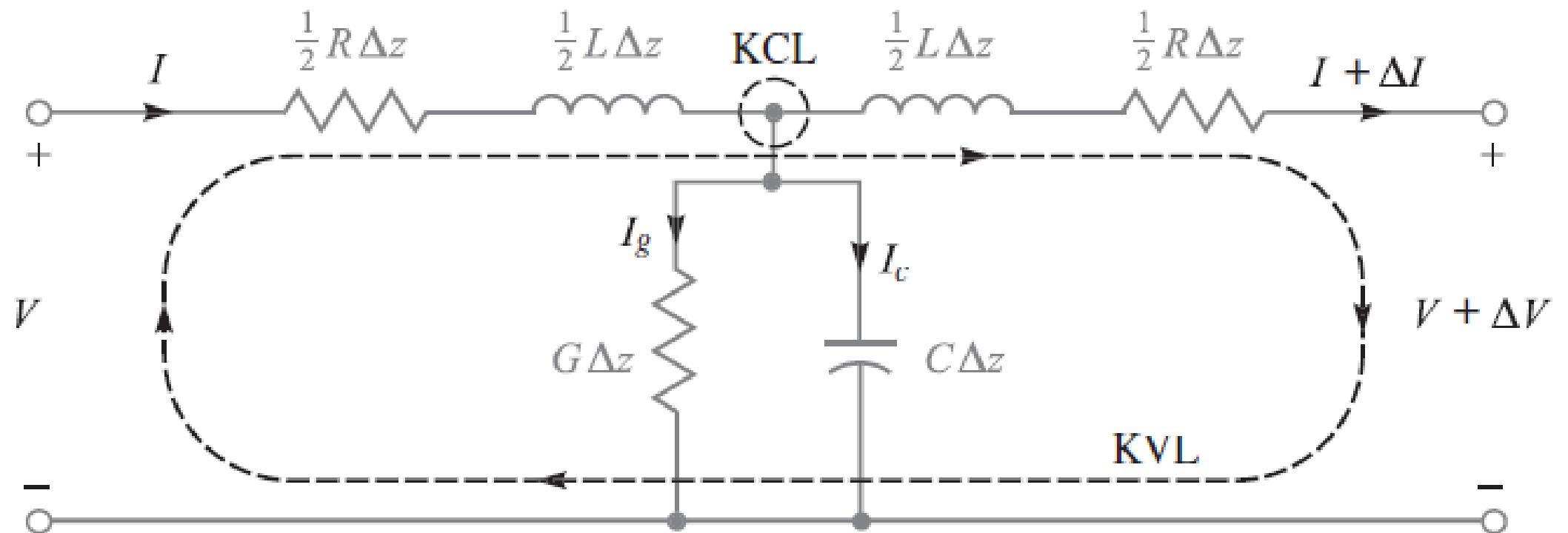


Asumiendo que este modelo de análisis es sin pérdidas

$$v = 1/\sqrt{LC}$$

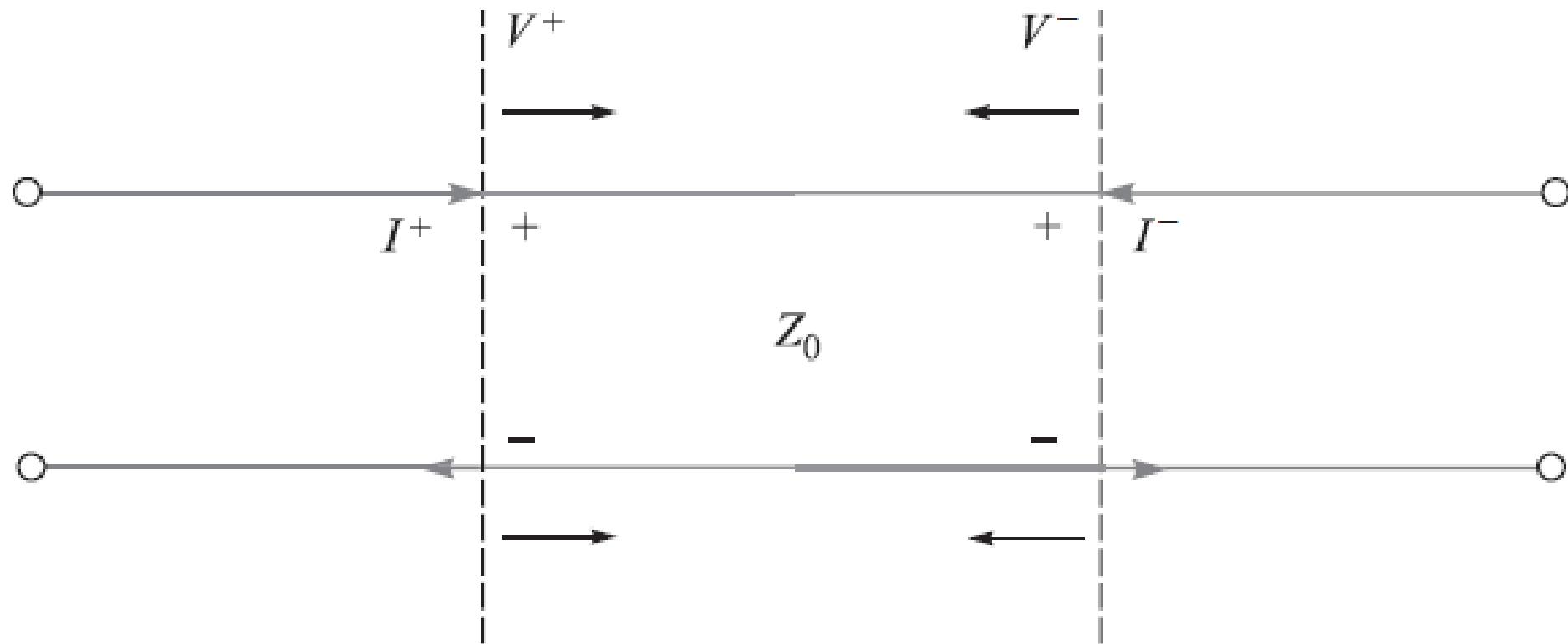
# Línea de transmisión

Finalmente tenemos un modelo a nivel de circuito eléctrico de una línea de transmisión



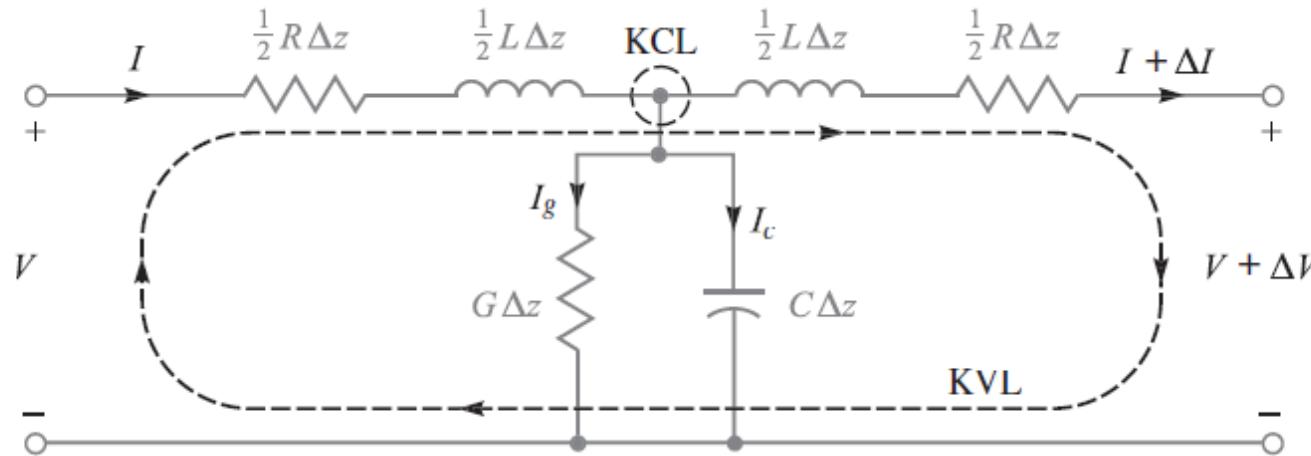
# Línea de transmisión

Considerando un modelo más general



# Ecuaciones de la LT

Sistema de  $n$  conductores que soportan ondas guiadas con  $n-1$  modos del tipo TEM



$$\frac{d^2V_s}{dz^2} = (\underbrace{R + j\omega L}_{Z})(\underbrace{G + j\omega C}_{Y}) V_s = \gamma^2 V_s$$

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

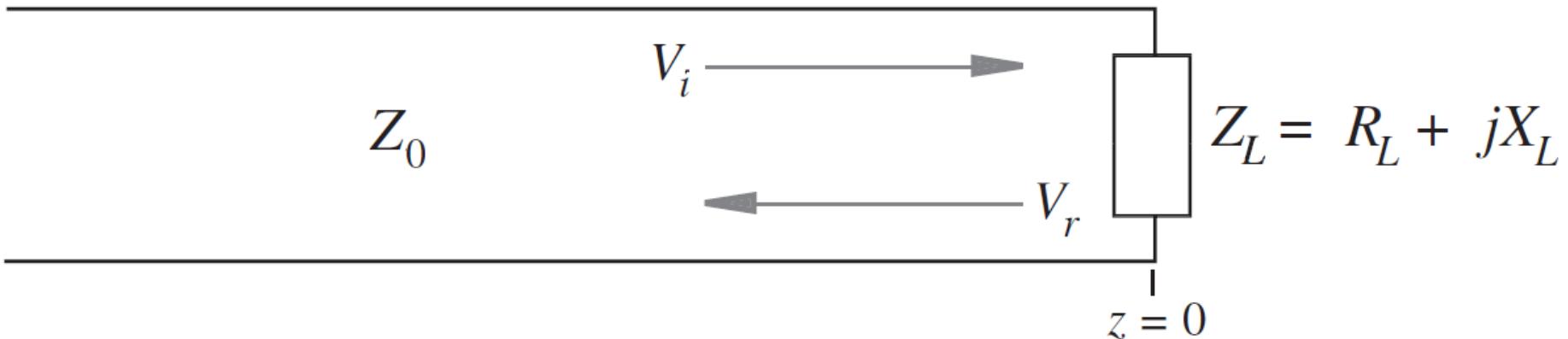
$$V_s(z) = V_0^+ e^{-\gamma z} + V_0^- e^{+\gamma z}$$

$$I_s(z) = I_0^+ e^{-\gamma z} + I_0^- e^{+\gamma z}$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} = |Z_0|e^{j\theta}$$

# Coeficiente de Reflexión

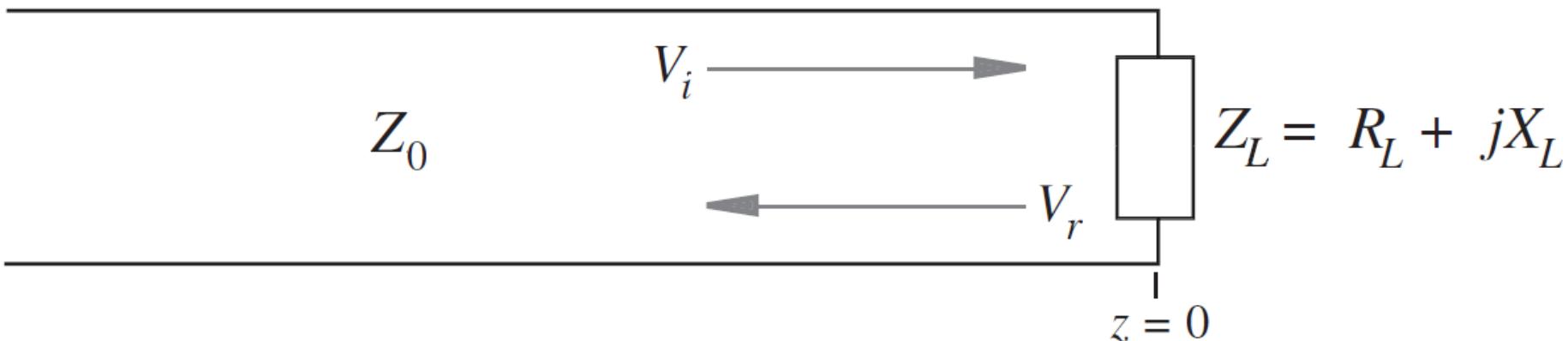
Según sean las condiciones de operación de la línea de transmisión es posible tener reflexiones en el sistema



$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} = |Z_0|e^{j\theta}$$

# Coeficiente de Reflexión

Según sean las condiciones de operación de la línea de transmisión es posible tener reflexiones en el sistema



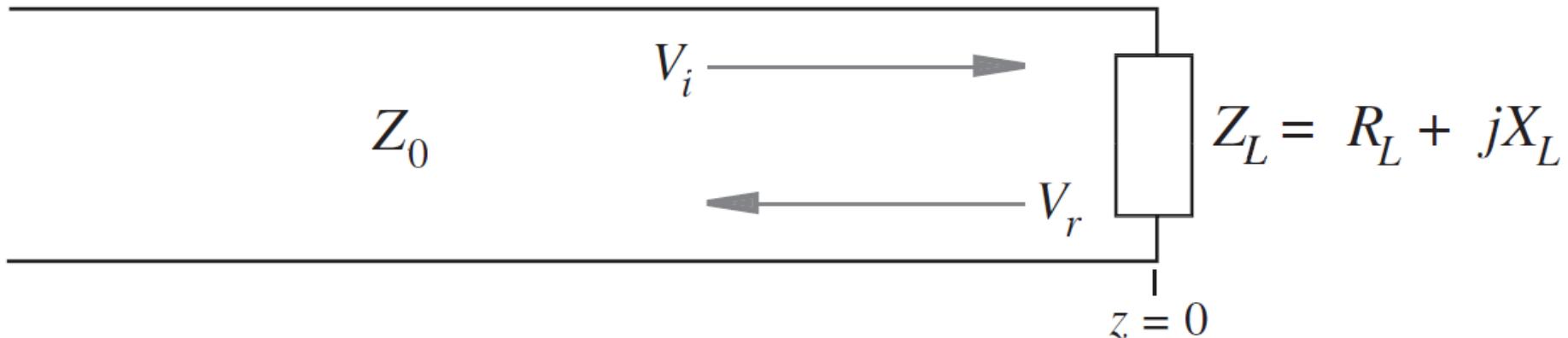
Buscando la relación entre reflejado e incidente se tiene que:

$$\Gamma \equiv \frac{V_{0r}}{V_{0i}} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} = |\Gamma|e^{j\phi_r}$$

Coeficiente de reflexión  
por tensión

# Coeficiente de Reflexión

Según sean las condiciones de operación de la línea de transmisión es posible tener reflexiones en el sistema



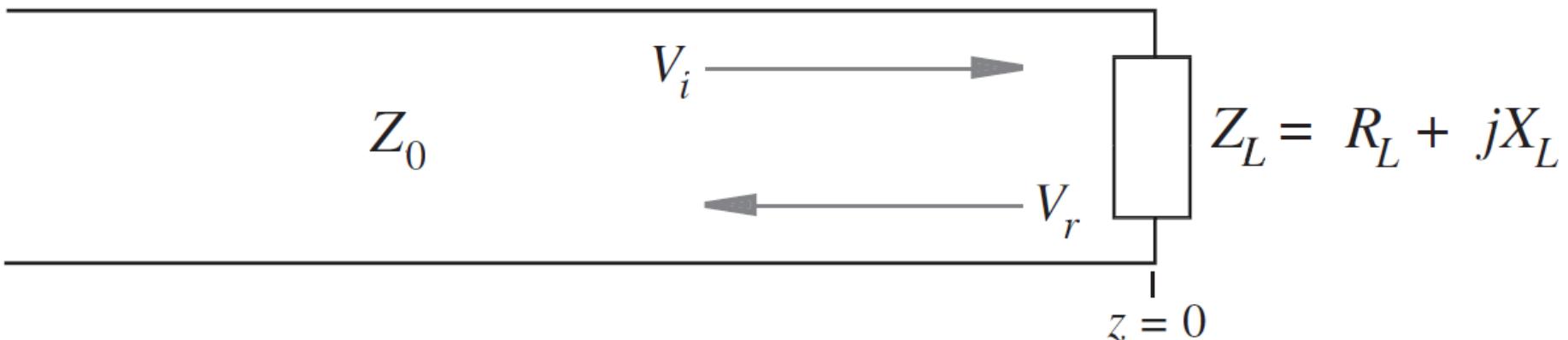
Buscando la relación entre reflejado e incidente se tiene que:

$$-\Gamma_L$$

Coeficiente de reflexión  
por corriente

# Coeficiente de Reflexión

Según sean las condiciones de operación de la línea de transmisión es posible tener reflexiones en el sistema



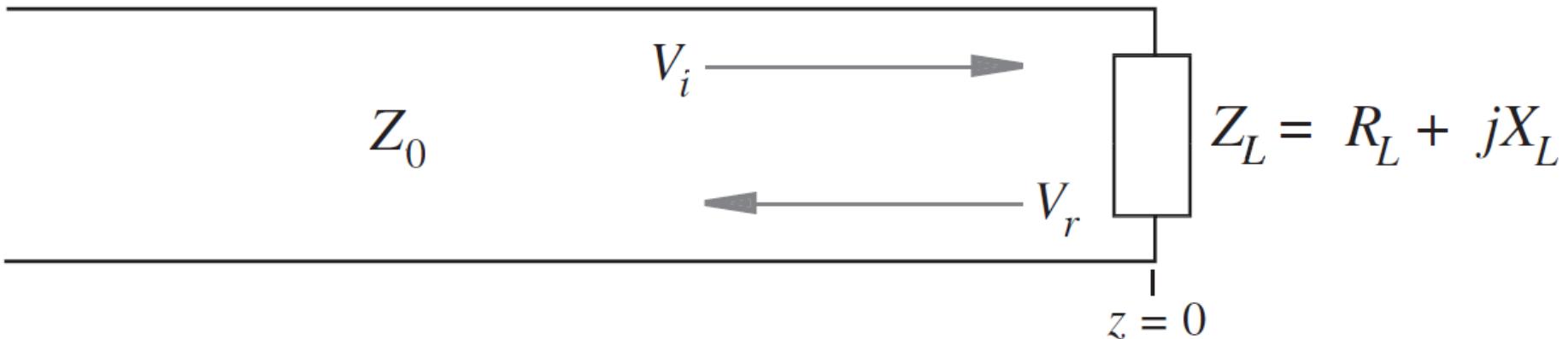
Es posible determinar el coeficiente de transmisión como:

$$\tau \equiv \frac{V_L}{V_{0i}} = 1 + \Gamma = \frac{2Z_L}{Z_0 + Z_L} = |\tau|e^{j\phi_t}$$

Coeficiente de  
transmisión

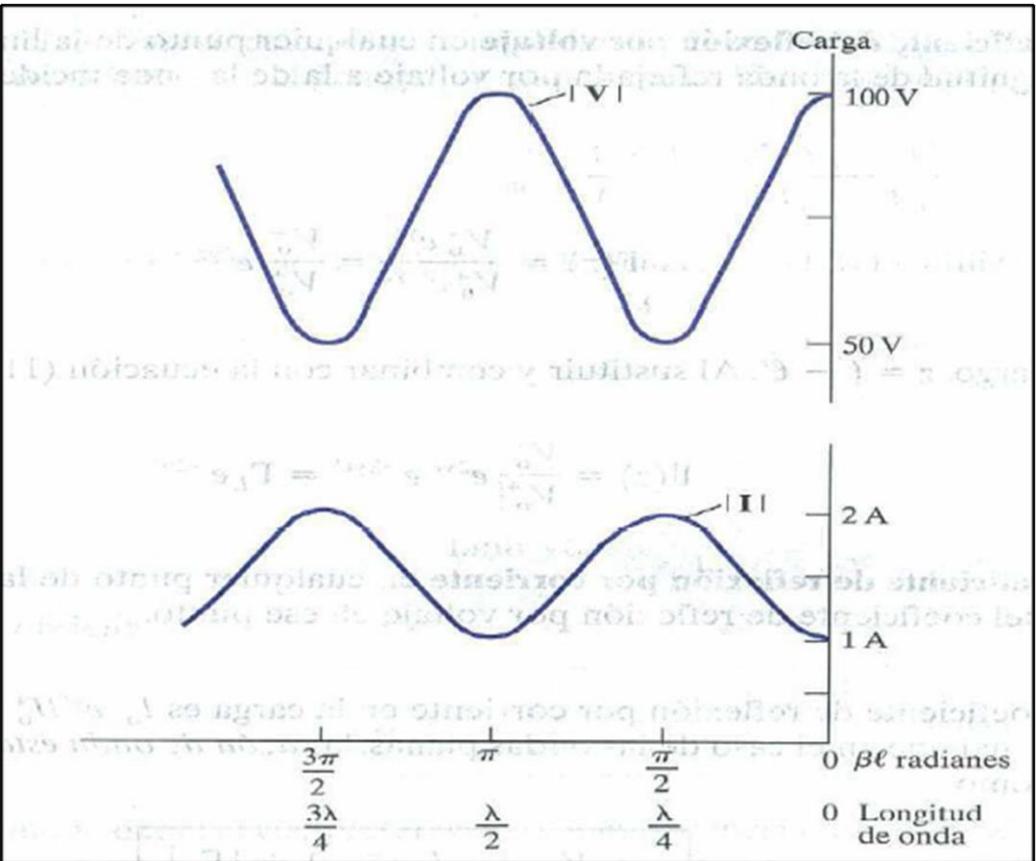
# Coeficiente de Reflexión

Según sean las condiciones de operación de la línea de transmisión es posible tener reflexiones en el sistema



$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} = |Z_0|e^{j\theta}$$

# Razón de Onda Estacionaria (ROE)

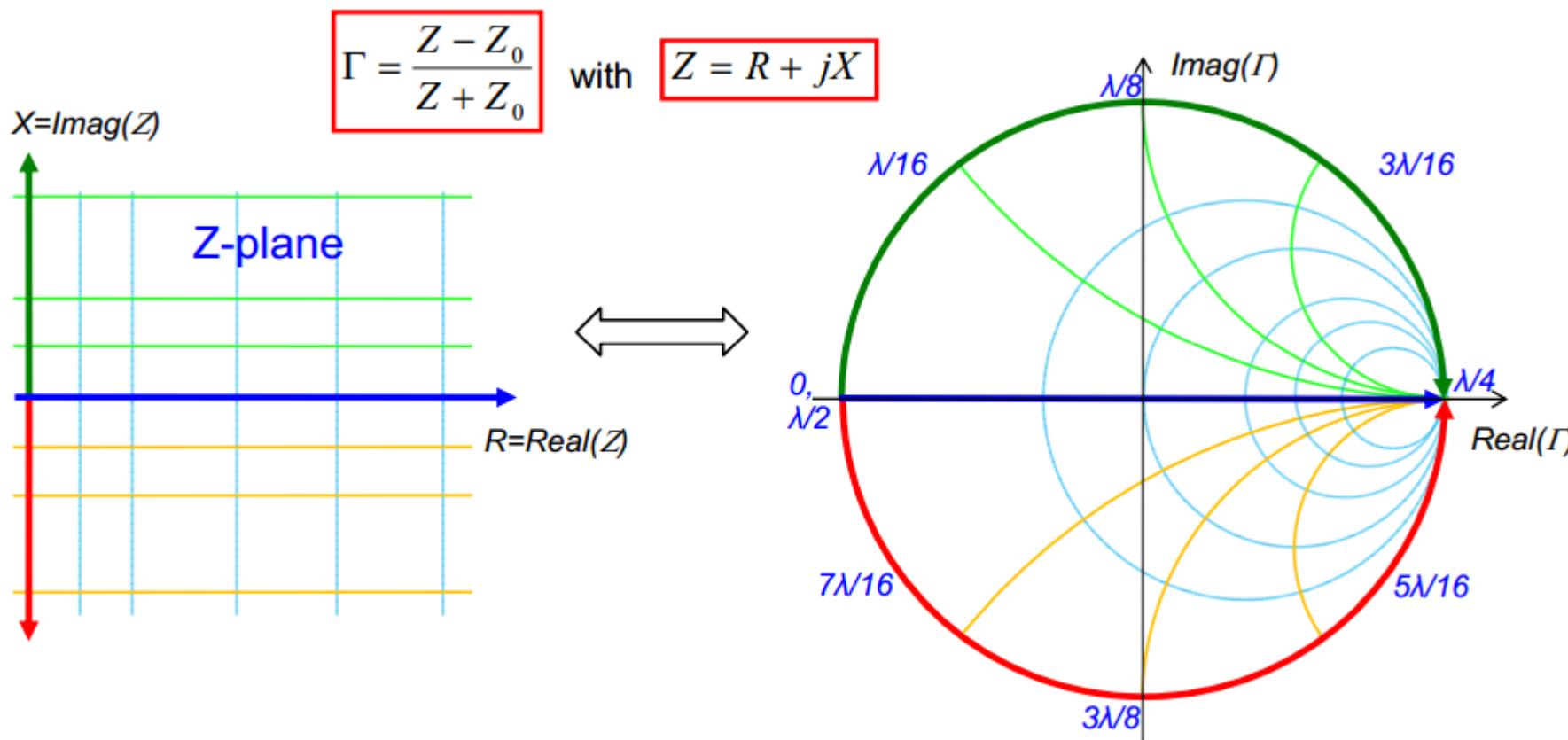


Patrones de onda de V e I en una línea sin pérdidas con carga resistiva.

$$S = \frac{V_{máx}}{V_{mín}} = \frac{I_{máx}}{I_{mín}} = \frac{1 + |\Gamma_L|}{1 - |\Gamma_L|}$$

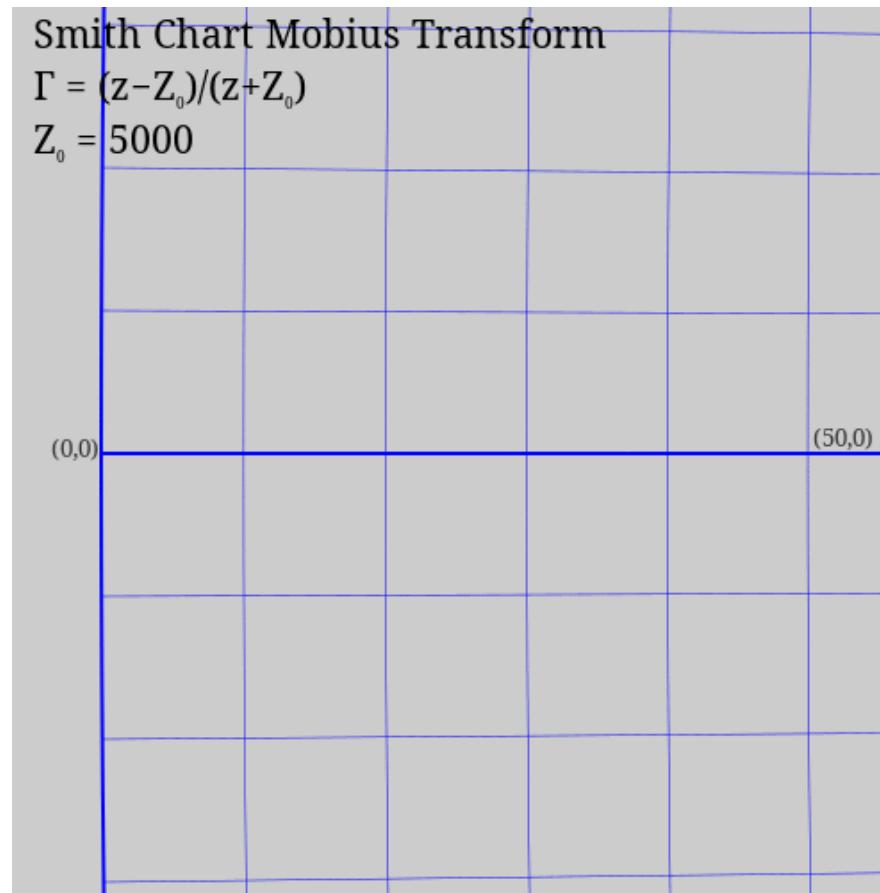
# Diagrama de Smith

Diagrama normalizado del factor de reflexión que permite visualizar la impedancia vista a lo largo de un sistema con líneas de transmisión.



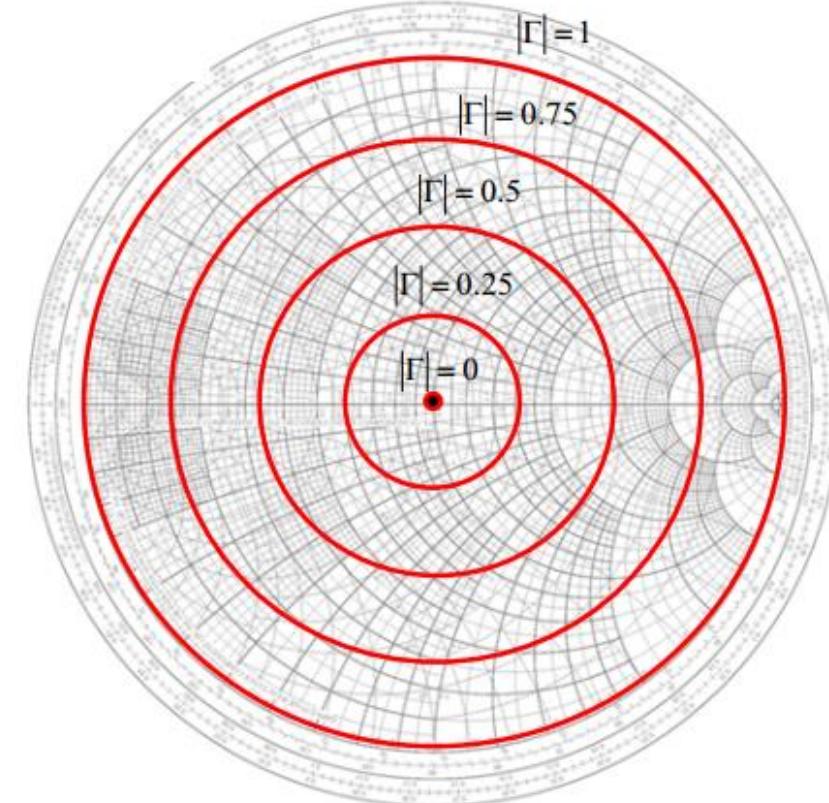
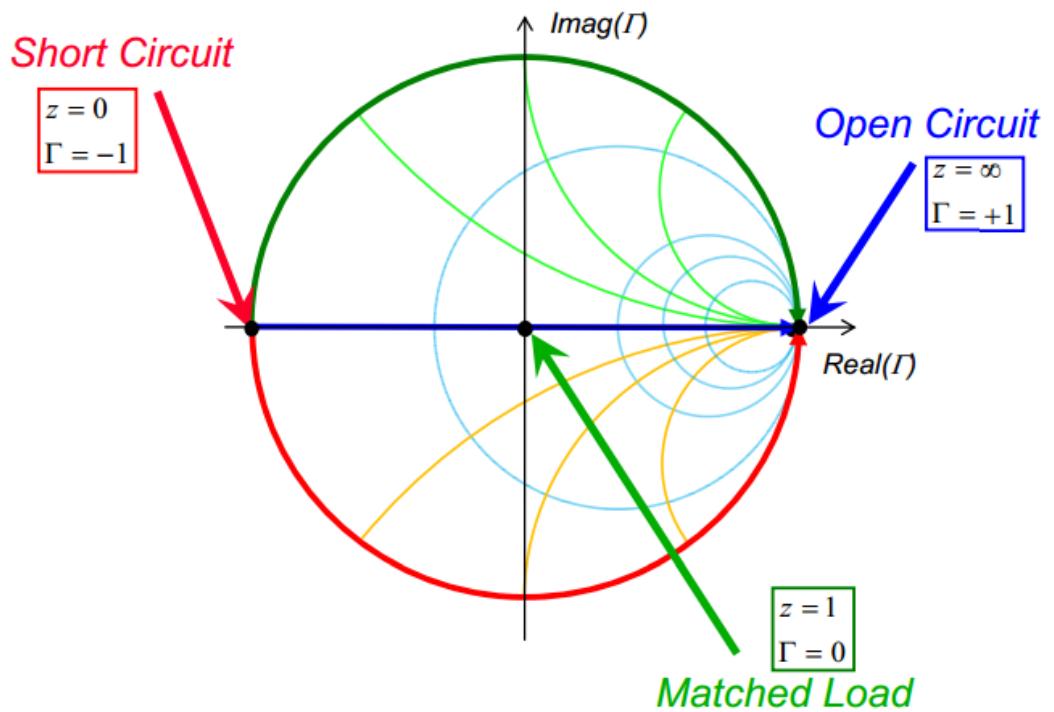
# Diagrama de Smith

Diagrama normalizado del factor de reflexión que permite visualizar la impedancia vista a lo largo de un sistema con líneas de transmisión.



Tomado de: [https://remcycles.net/blog.smith\\_chart\\_geometry.html](https://remcycles.net/blog.smith_chart_geometry.html)

# Diagrama de Smith: Generalidades



# Contenidos y Cronograma

- Líneas de Transmisión
- Circuitos Impresos
- Analizador Vectorial de Redes (VNA).

# Circuitos Impresos

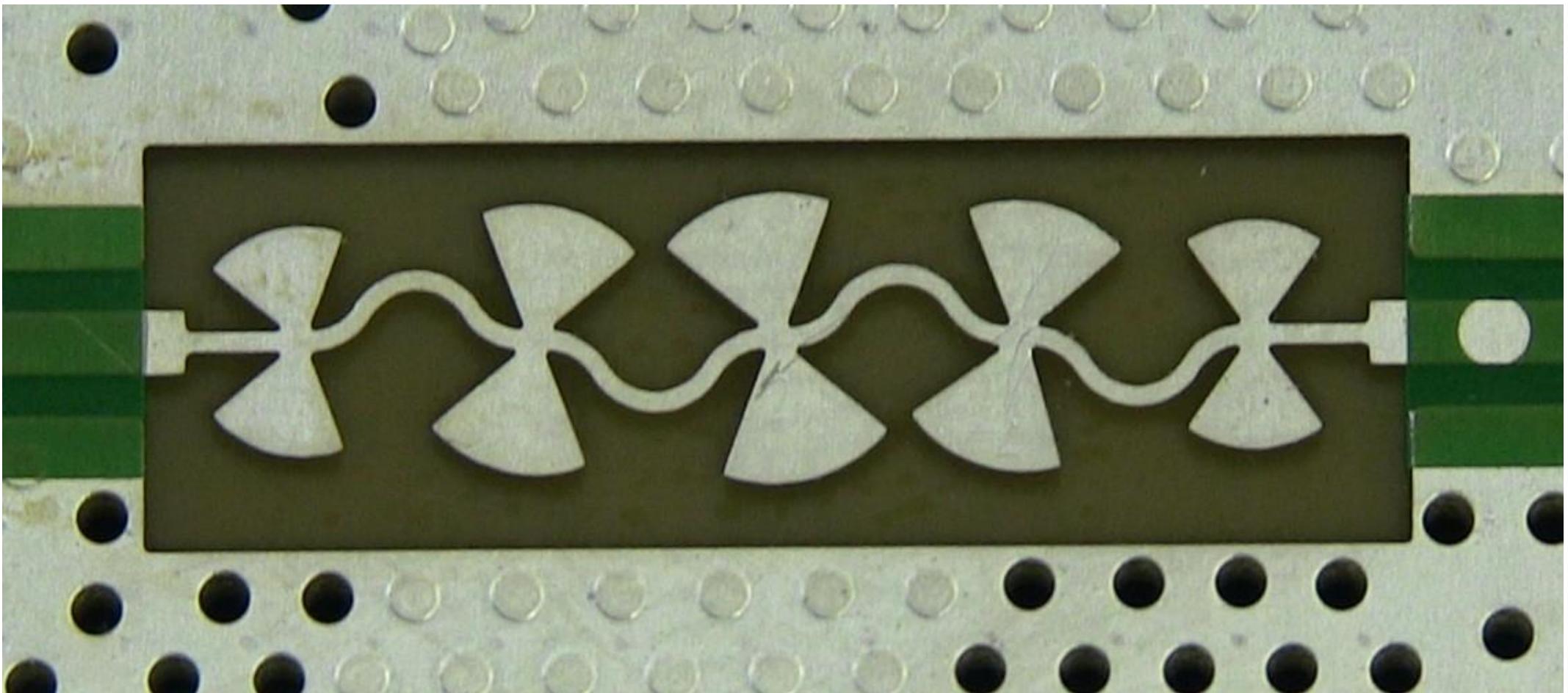
¿Qué es un circuito impreso ó PCB?

# Circuitos Impresos

## ¿Qué es un circuito impreso ó PCB?

Es una placa donde es posible hacer posicionamiento e interconexión eléctricas de diversos elementos que permiten la conformación de un circuito más complejo, entre otros.

# Circuitos Impresos



23

Tomado de: [https://en.wikipedia.org/wiki/File:Microstrip\\_Low\\_Pass\\_Bowtie\\_Stub\\_Filter.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Microstrip_Low_Pass_Bowtie_Stub_Filter.jpg)

# Circuitos Impresos

¿Qué es FR-4?

# Circuitos Impresos

## ¿Qué es FR-4?

Realmente FR-4 es una asignación dada por la (National Electrical Manufacturers Association) NEMA para materiales de tipo laminado epoxi reforzado con vidrio. La clasificación se debe a que el FR-4 es una composición de tela de fibra de vidrio con resina epoxi.

# Circuitos Impresos



Materials	Value
Thickness, h (mm)	1.6
Dielectric constant	4.7
Loss tangent	0.019
Dissipation factor	0.020
Surface resistivity ( $M\Omega$ )	$4 \times 10^6$
Volume resistivity ( $M\Omega\text{-cm}$ )	$2 \times 10^9$

Tomado de: <http://www.fortex.co.uk/product/fr-4/>

Integration of PIN diode switching circuit with Butler Matrix for 2.45 GHz frequency band

# Circuitos Impresos

¿Qué es un stack-up?

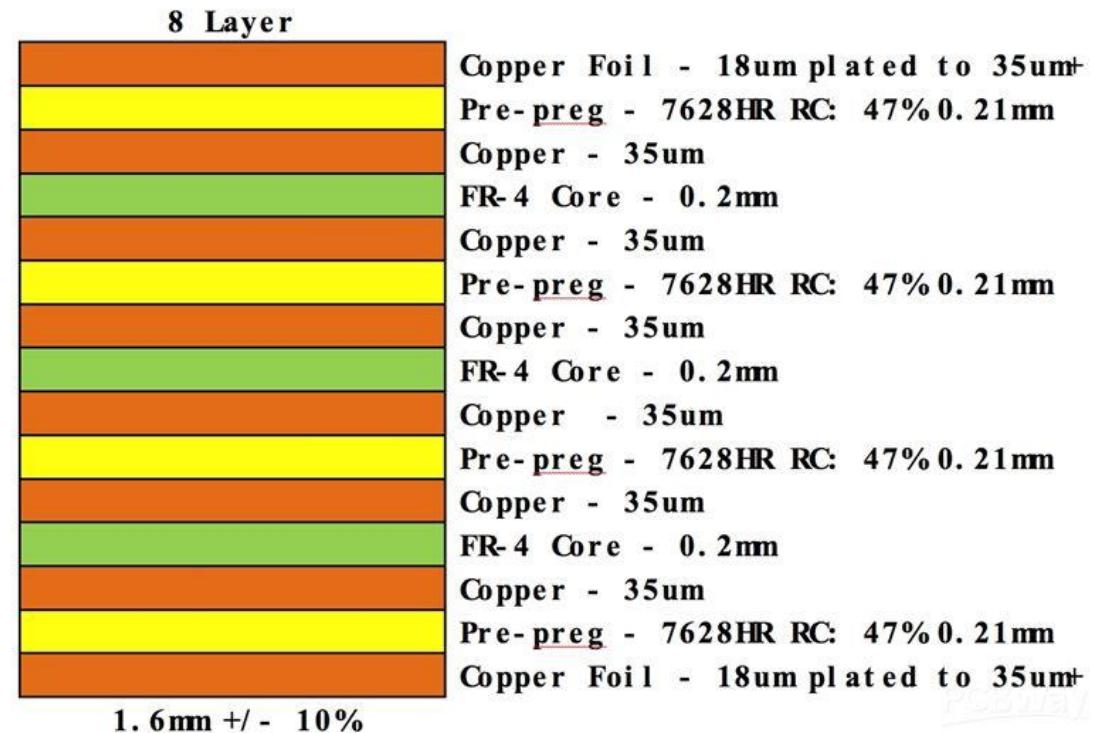
# Circuitos Impresos

## ¿Qué es un stack-up?

Es la disposición de las capas de cobre y aislantes que forman un PCB. Esta organización u ordenamiento permite la conformación de circuitos impresos de más de una capa.

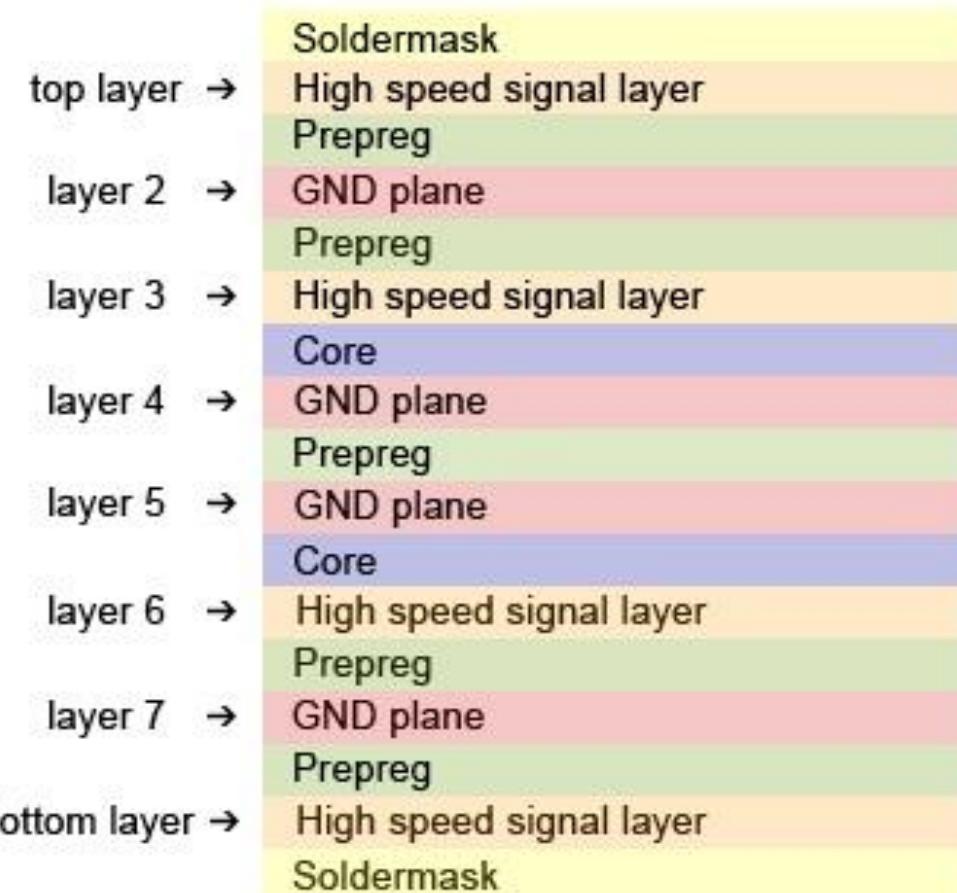
# Circuitos Impresos

2 Layers 1.6mm(0.062inch)Green for 1 Oz		
Layer stack up	Layer	Thickness(mm)
	Top Solder Mask	0.01
	Top Layer	0.035
	Core	1.5
	Bottom Layer	0.035
	Bottom Solder Mask	0.01



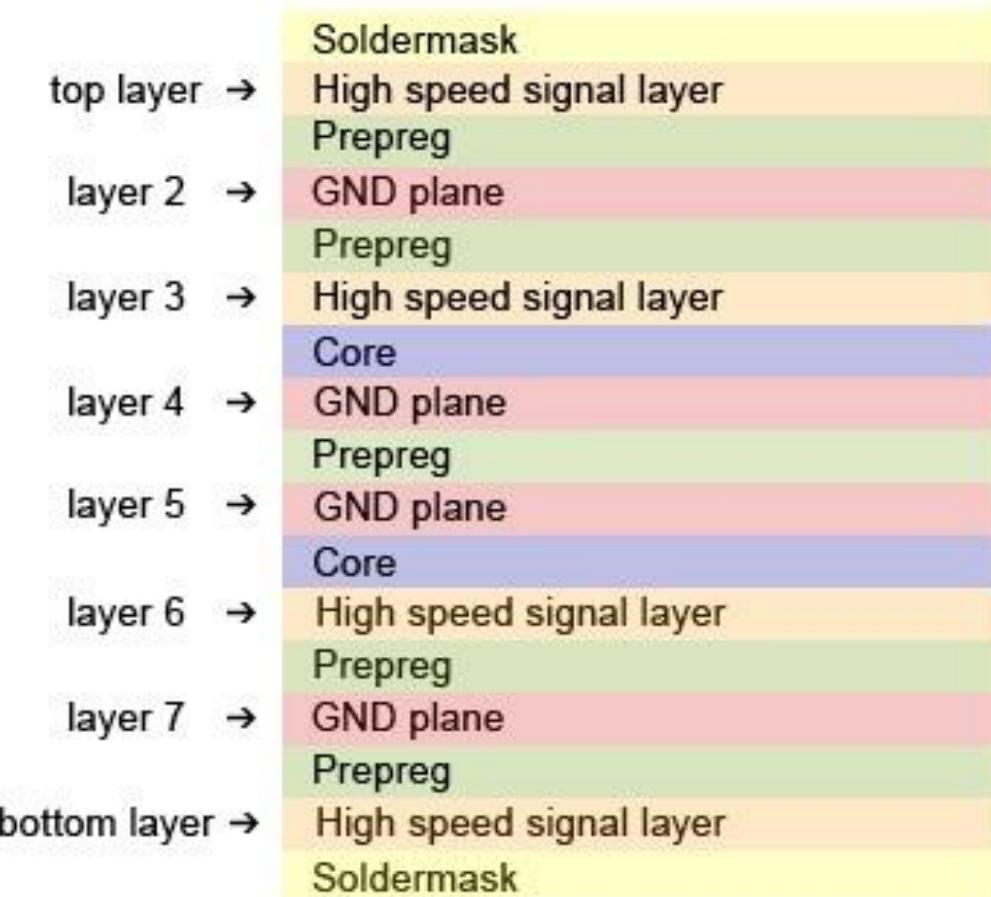
Tomado de: [http://www.ysbackupboard.com/news/PCB\\_drill\\_industry/StandardThicknesstwo-layerPCB.html](http://www.ysbackupboard.com/news/PCB_drill_industry/StandardThicknesstwo-layerPCB.html)  
[https://www.pcbway.es/pcb\\_prototype/What\\_is\\_layer\\_stack\\_up.html](https://www.pcbway.es/pcb_prototype/What_is_layer_stack_up.html)

# Circuitos Impresos



*Figure 1 Layer Stack-up Example of An 8-layer PCB*

# Circuitos Impresos



*Figure 1 Layer Stack-up Example of An 8-layer PCB*

Soldermask

Es una capa de protección, donde la aplicación de la misma es para proteger la placa y evita cortocircuitos

Tomado de: <https://www.quora.com/What-is-the-best-stack-up-for-an-8-layer-PCB>

# Circuitos Impresos

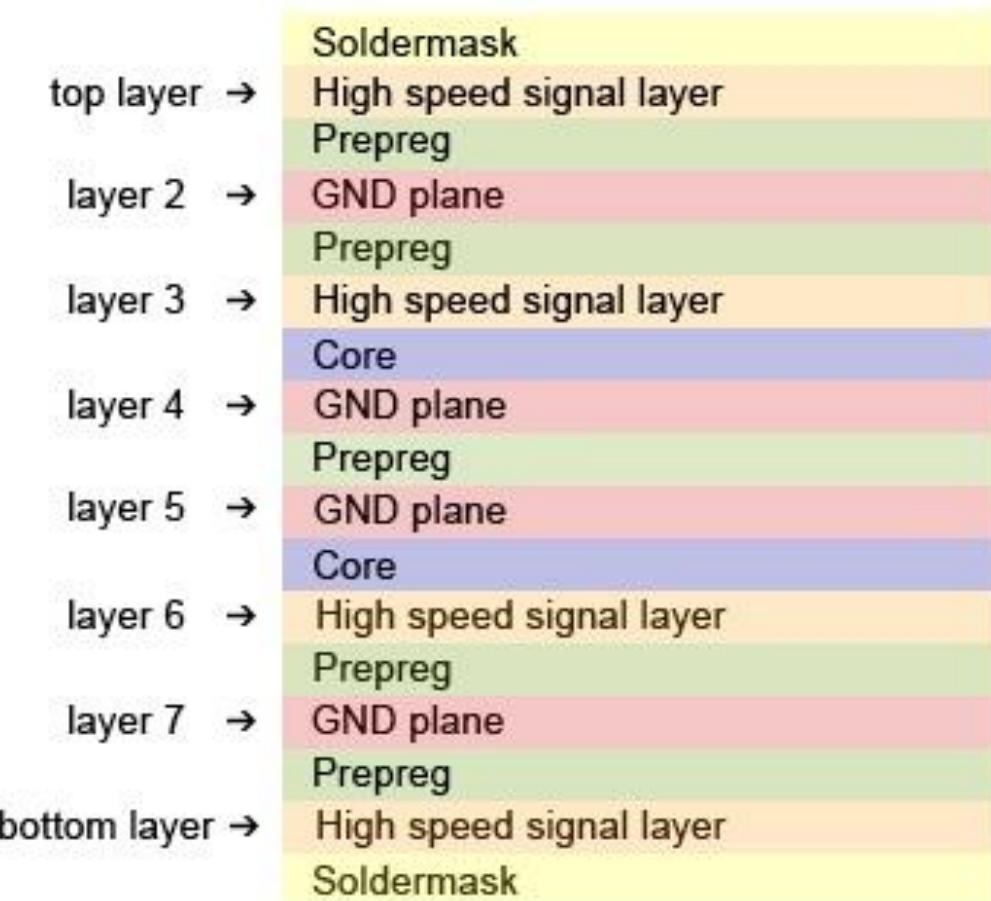


Figure 1 Layer Stack-up Example of An 8-layer PCB

Prepeg

Es una capa que permite mantener unidos los cores o si es un PCB multi-capa ayuda a mantener unidas las capas.

Esta capa es presionada y calentada, según especificaciones del stack-up.

Tomado de: <https://www.quora.com/What-is-the-best-stack-up-for-an-8-layer-PCB>

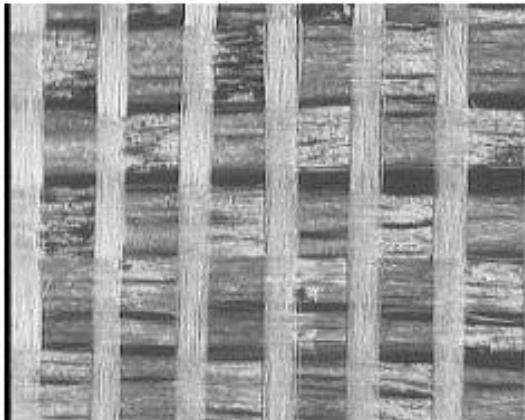
# Circuitos Impresos

FR4 Pre-preg **106**

Thickness 50 µm

$\epsilon_r = 2,8 - 3,7$

Resin content ~70%

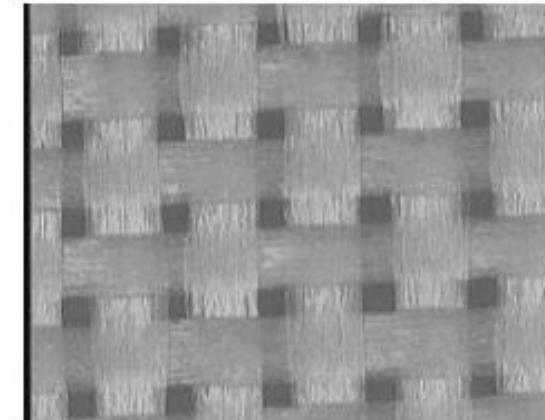


FR4 Pre-preg **2116**

Thickness 90 – 110 µm

$\epsilon_r = 3,6 - 3,8$

Resin content ~50%

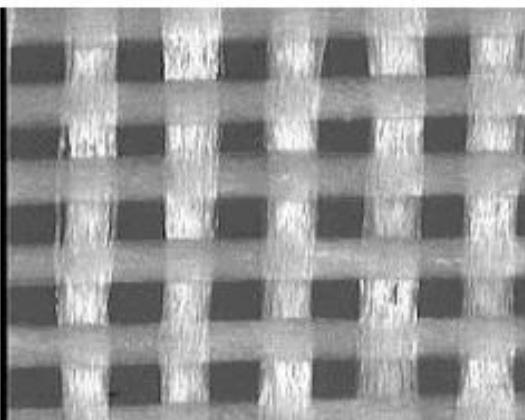


FR4 Pre-preg **1080**

Thickness 60 - 70 µm

$\epsilon_r = 3,2 - 3,7$

Resin content ~60%

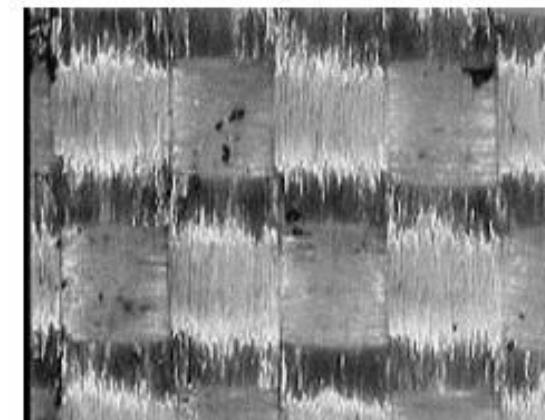


FR4 Pre-preg **7628**

Thickness 170 – 190 µm

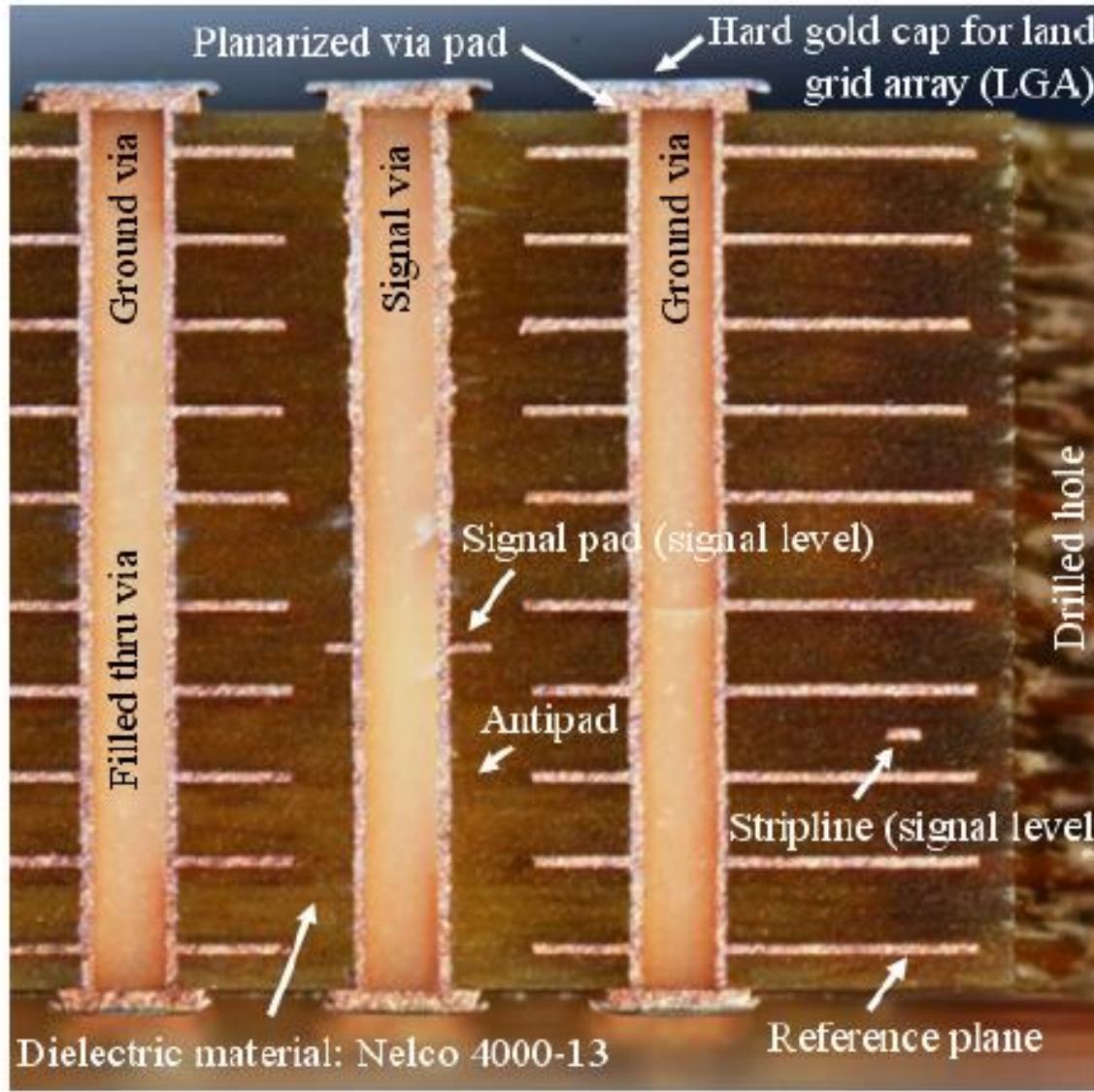
$\epsilon_r = 4,1 - 4,6$

Resin content ~45%



Tomado de: <https://resources.altium.com/p/pcb-core-vs-prepreg-material-what-designers-need-to-know>

# Circuitos Impresos



# Circuitos Impresos

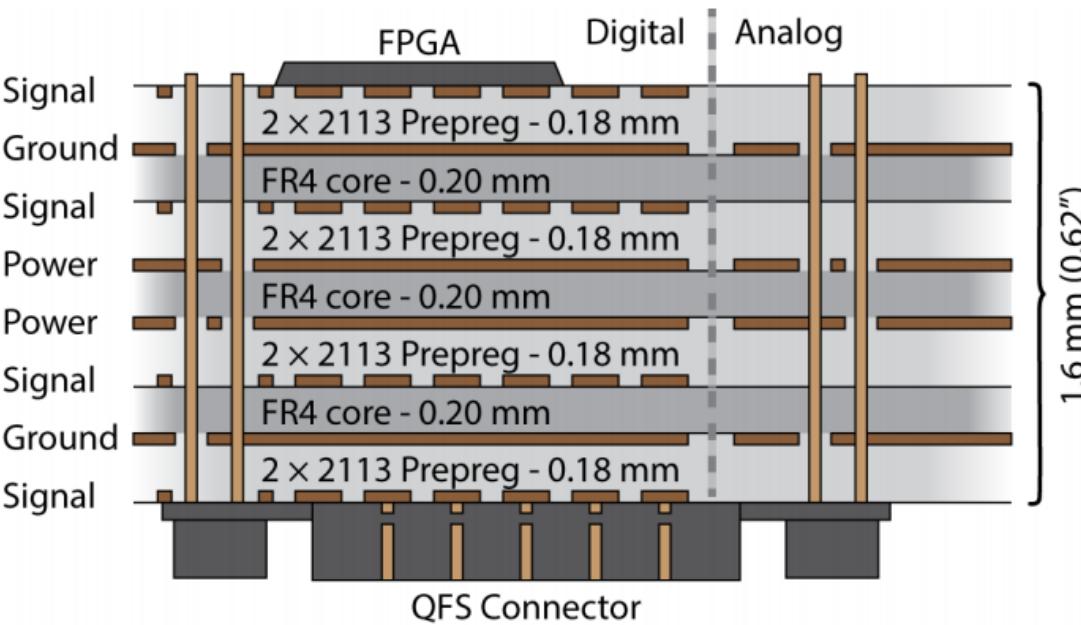


FIG. 2. Motherboard PCB 8-layer stackup: 35  $\mu\text{m}$  (1 oz) copper layers, with 3 FR4 cores, and 4 prepreg layers. The digital (signal and power) and analog (power only) domains are spatially separated on the PCB, and can have their grounds tied on the power distribution board, outside the fridge, or provided independently. Power pins of the QFS connectors are through-hole pins, and are connected to the power planes, while signal pins are surface-mount. PCB vias are not shown.

Tomado de: An FPGA-based Instrumentation Platform for use at Deep Cryogenic Temperatures

# Circuitos Impresos

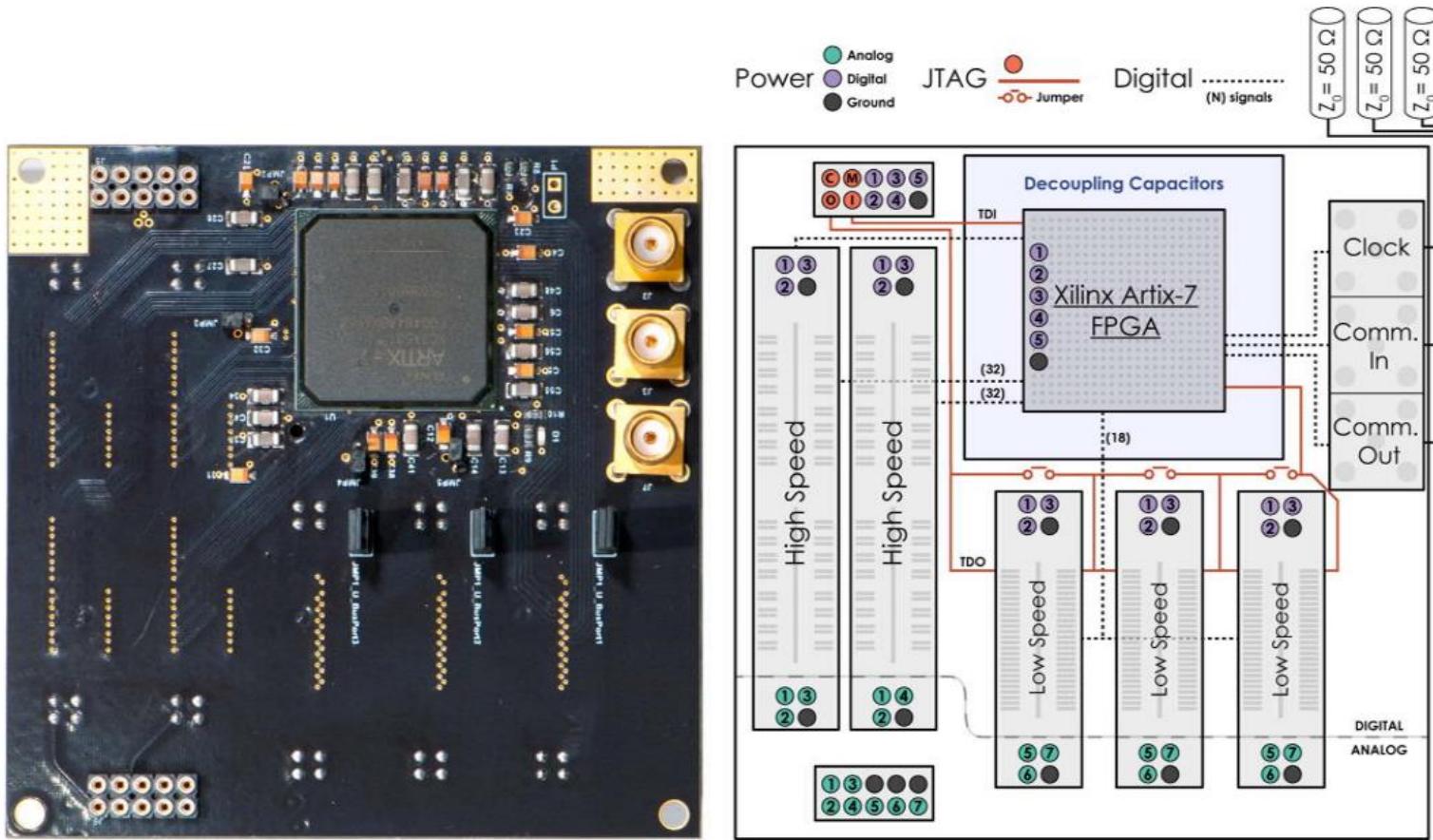
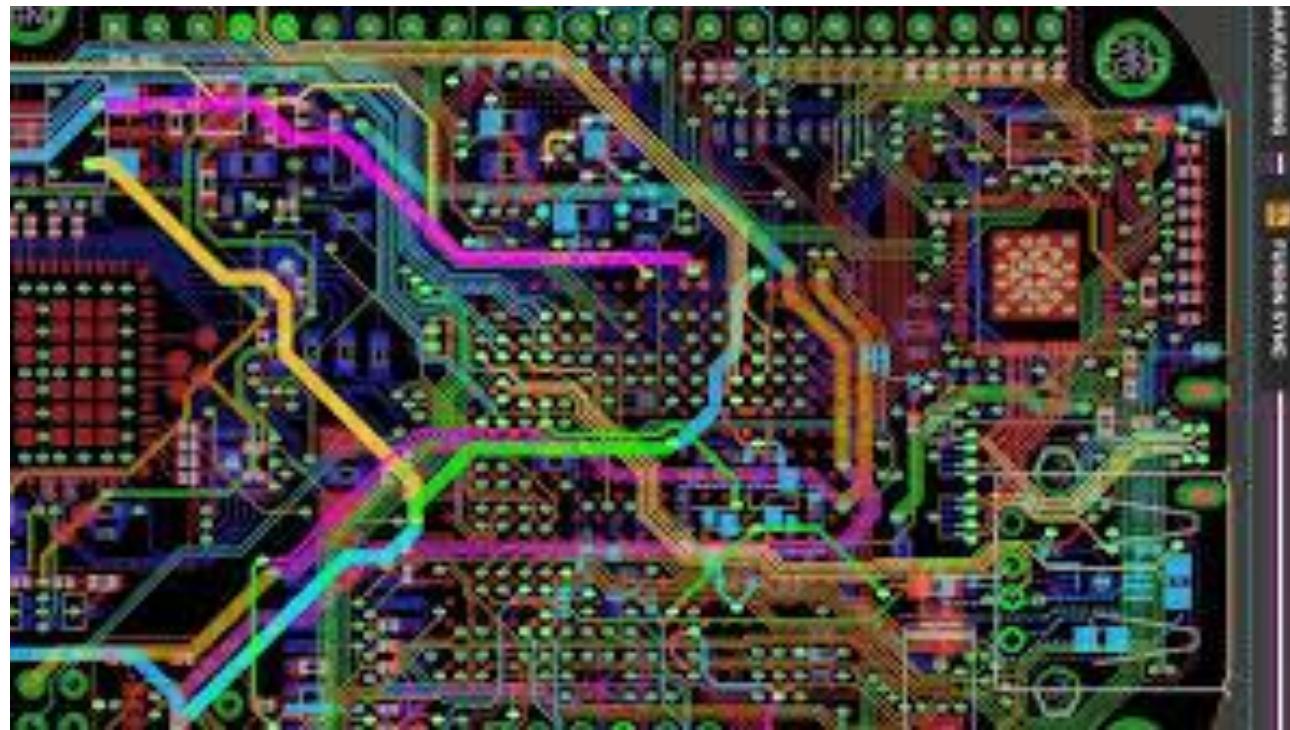


FIG. 3. Layout of the modular instrumentation platform motherboard. The purple and green circles show distribution of the 5 digital and 7 analog voltage rails, from the 10-pin SAMTEC SDL connectors to the modular expansion connectors (the digital and analog domains are spatially separated, as shown by the dashed line). Red lines indicate the JTAG data signal daisy-chain, with optional jumpers to bypass unused ports. Short dashed lines represent digital signals to and from the FPGA, with numbers indicating the total number of connections.

# Circuitos Impresos

Para el diseño de circuitos impresos existen diversas herramientas CAD entre las más utilizadas se encuentran EAGLE y Altium Designer.

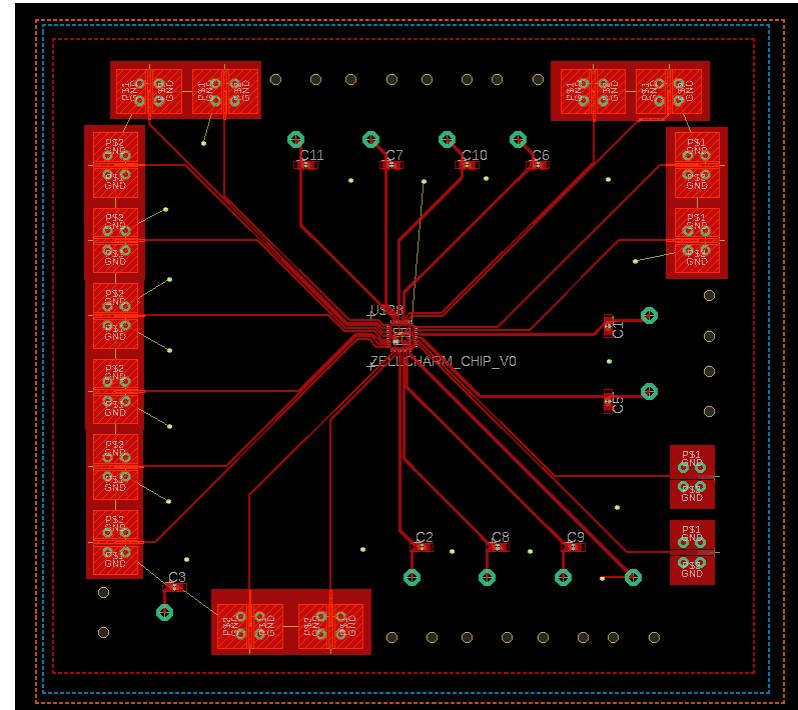
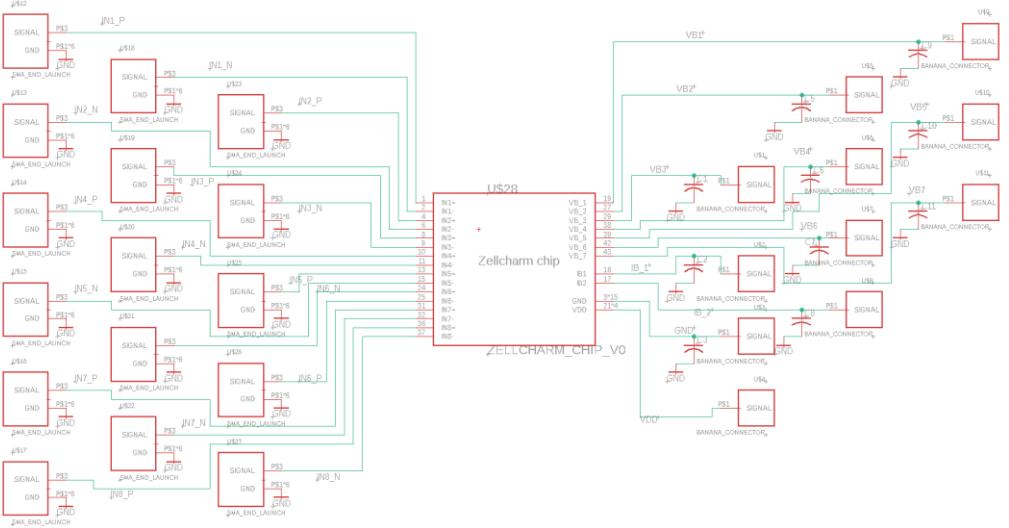


37

Tomado de: <https://www.autodesk.com/products/eagle/overview>

# Circuitos Impresos

En estos programas es posible llevar acabo el diseño de esquemático, tarjeta (board) entre otro productos que puede ser fabricados.



# Circuitos Impresos

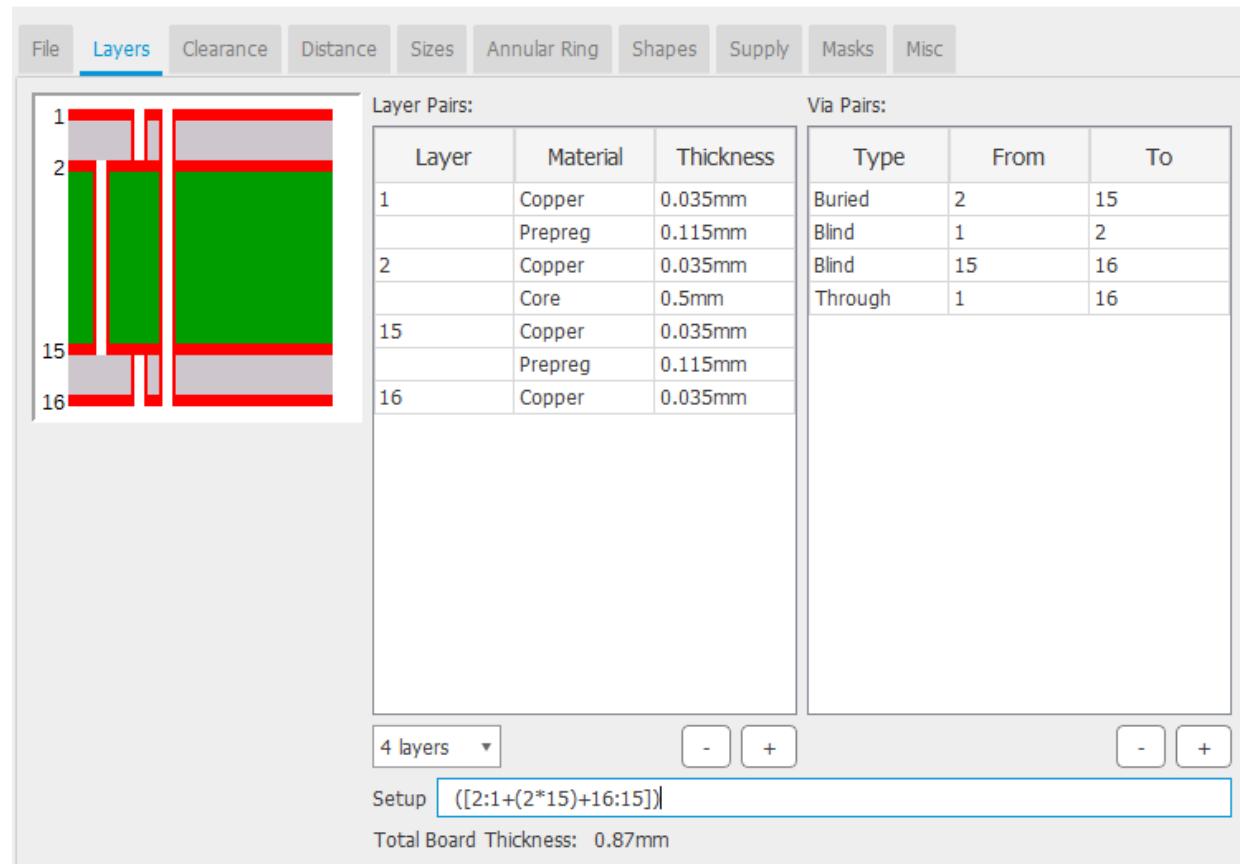
Cuando se realizan circuitos impresos los software de diseño y desarrollo permiten configurar aspectos tales como ERC y DRC, entre otras reglas importantes.

The screenshot shows a software interface titled "SCH ERC Errors". The main area is a table with columns for Type, Description, Sheet, and Module. The table has three sections: Consistency errors (3), Errors (0), and Warnings (10). The Consistency errors section contains three rows, each with a red warning icon and a message about different connections on pin VDD. The Warnings section contains ten rows, each with a yellow warning icon and a message about parts C1 through C10 having no value. At the bottom left is a checkbox labeled "Centered". At the bottom right are two buttons: "Clear all" and "Approve".

Type	Description	Sheet	Module
Consistency errors (3)	⚠ Different connections on U\$28 pin VDD and pad 33 (VDD / none)	1	
	⚠ Different connections on U\$28 pin VDD and pad 35 (VDD / none)	1	
	⚠ Different connections on U\$28 pin VDD and pad 41 (VDD / none)	1	
Errors (0)			
Warnings (10)	⚠ Part C1 has no value	1	
	⚠ Part C10 has no value	1	
	⚠ Part C11 has no value	1	
	⚠ Part C2 has no value	1	
	⚠ Part C3 has no value	1	
	⚠ Part C5 has no value	1	
	⚠ Part C6 has no value	1	
	⚠ Part C7 has no value	1	
	⚠ Part C8 has no value	1	
	⚠ Part C9 has no value	1	
Approved (0)			

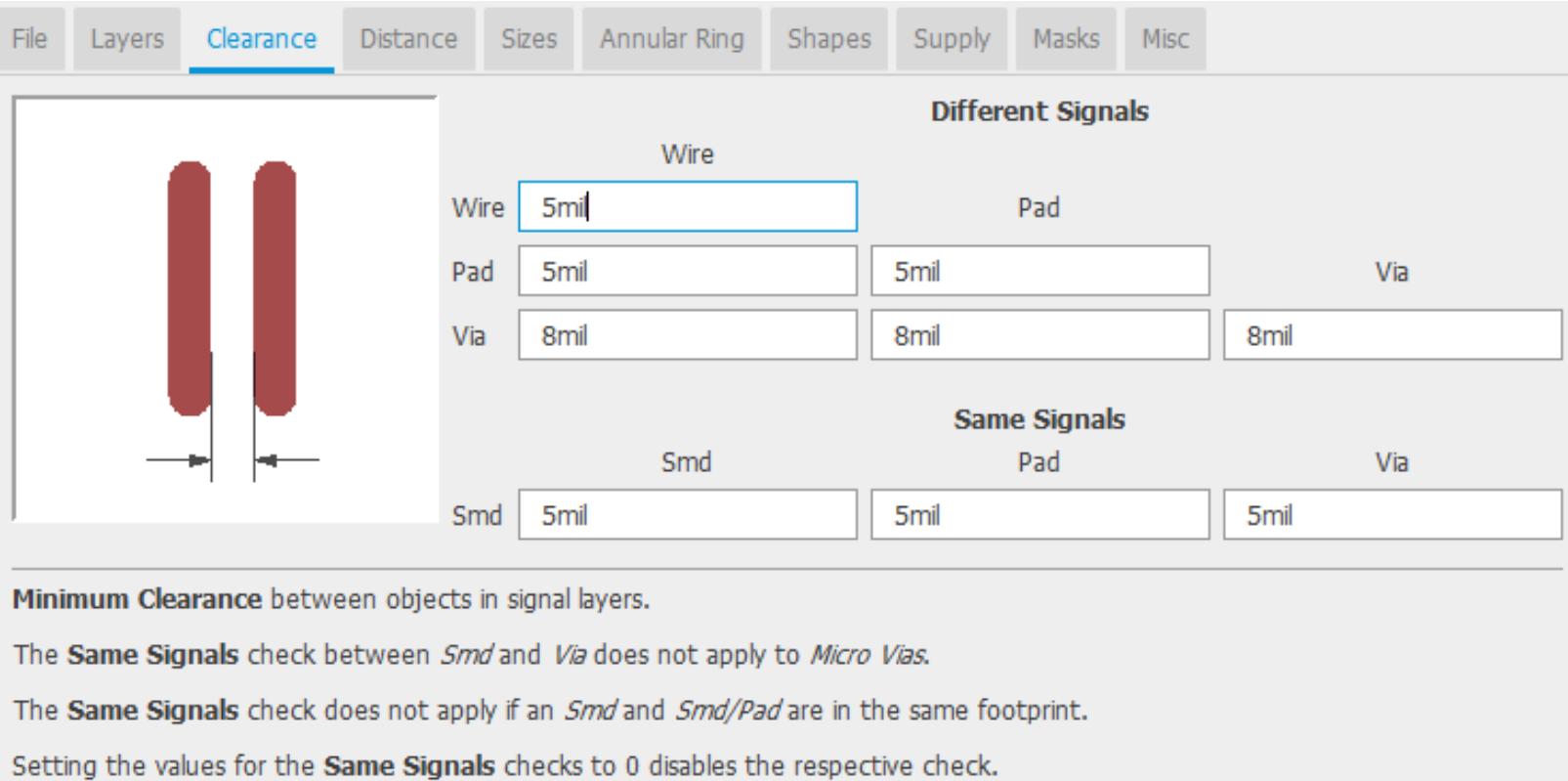
# Circuitos Impresos

Por ejemplo en el caso de DRC, es posible configurar el stack-up y las vías que puede contener el diseño



# Circuitos Impresos

Las distancias entre conectores, líneas, vías entre otras interconexiones es posible definirles distancia y anchos.



The screenshot shows the 'Clearance' tab selected in a PCB design software interface. On the left, there is a preview window showing two red vertical pads on a board. The main panel is divided into two sections: 'Different Signals' and 'Same Signals'.

**Different Signals:**

	Wire	Pad	Via
Wire	5mil		
Pad	5mil	5mil	
Via	8mil	8mil	8mil

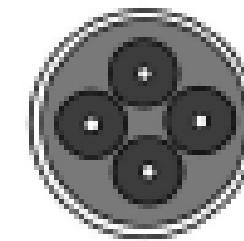
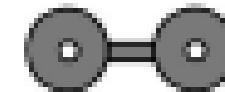
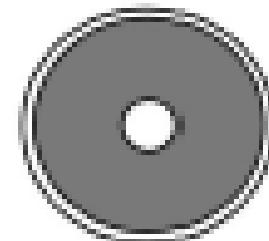
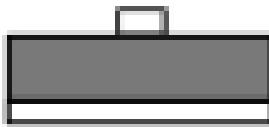
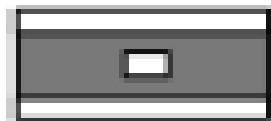
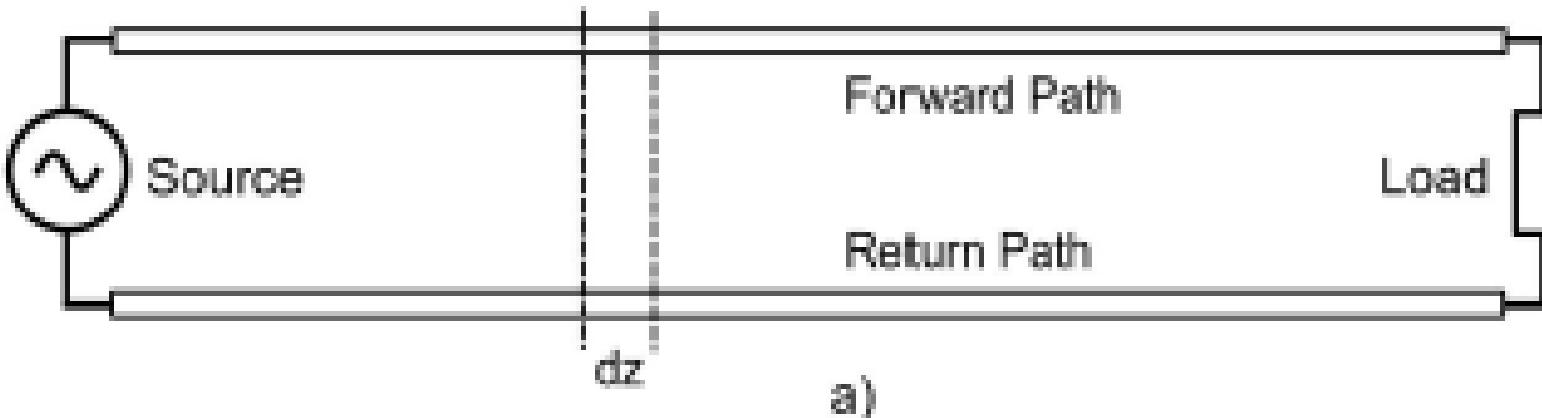
**Same Signals:**

Smd	Pad	Via
Smd	5mil	5mil
		5mil

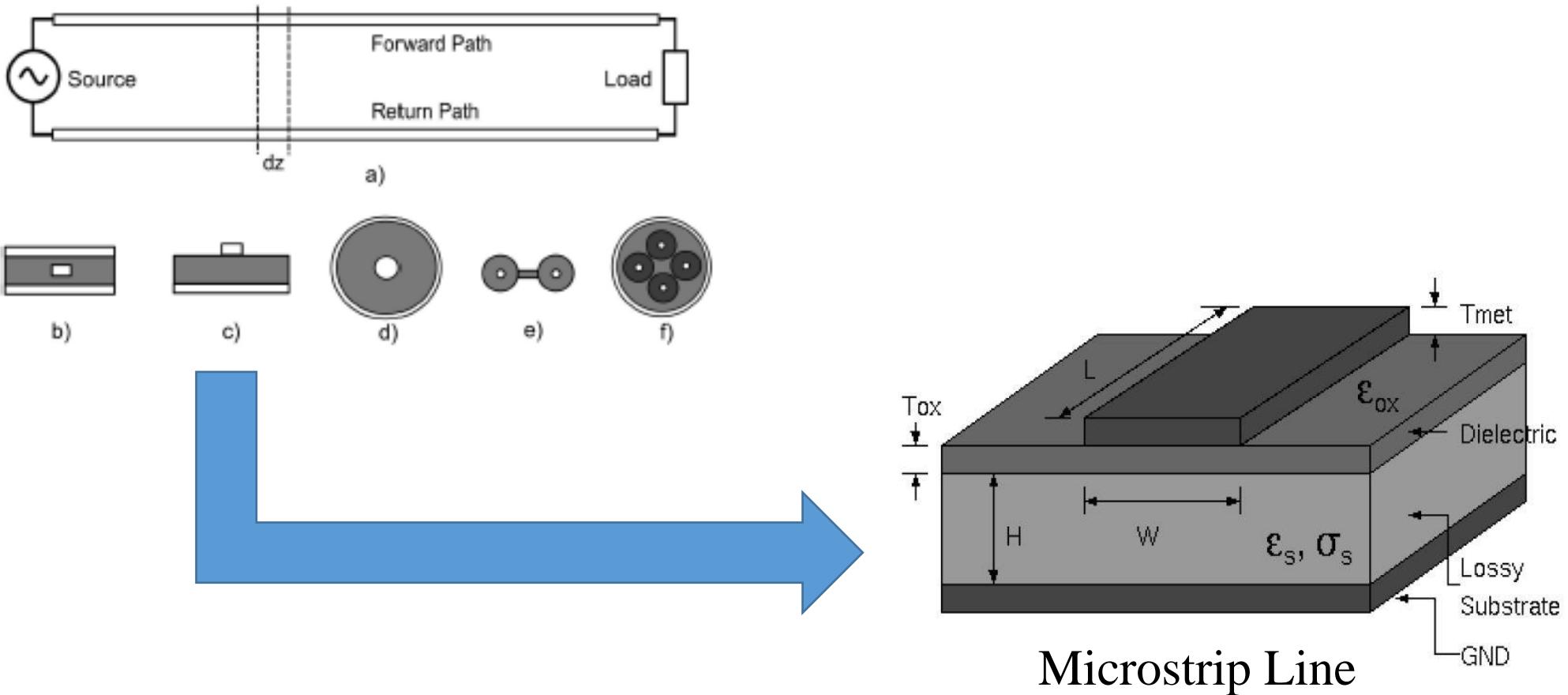
**Minimum Clearance** between objects in signal layers.  
The **Same Signals** check between *Smd* and *Via* does not apply to *Micro Vias*.  
The **Same Signals** check does not apply if an *Smd* and *Smd/Pad* are in the same footprint.  
Setting the values for the **Same Signals** checks to 0 disables the respective check.

# Circuitos Impresos

Sistema de  $n$  conductores que soportan ondas guiadas con  $n-1$  modos del tipo TEM.

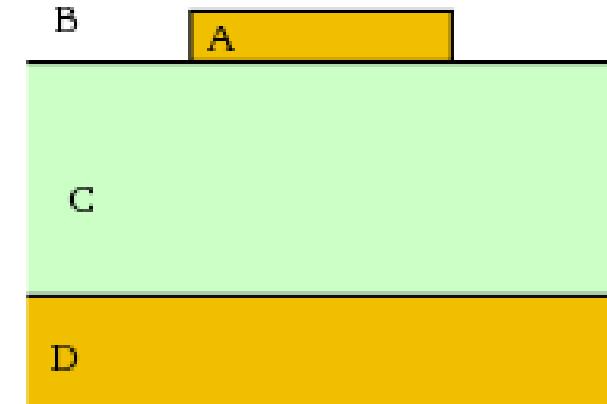
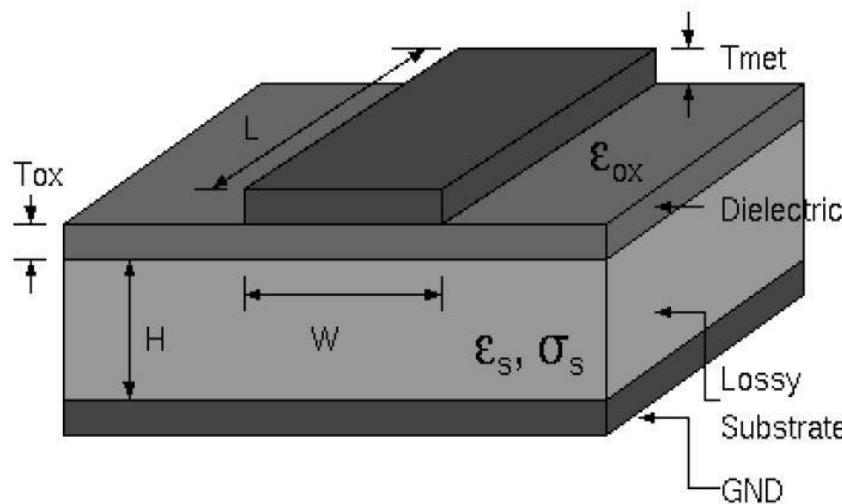


# Circuitos Impresos



# Circuitos Impresos

Líneas de transmisión tipo microstrip-line puede ser fabricada en circuitos impresos, donde es utilizada generalmente para sistemas de microondas.



# Circuitos Impresos

Debido a que la impedancia característica puede ser modificada según sus parámetros de construcción la impedancia es descrita como:

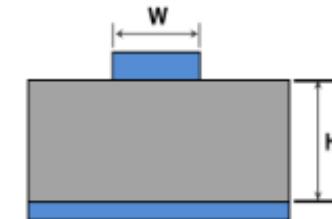
$$Z_{\text{microstrip}} = \frac{Z_0}{2\pi\sqrt{2(1+\varepsilon_r)}} \ln \left( 1 + \frac{4h}{w_{\text{eff}}} \left( \frac{14 + \frac{8}{\varepsilon_r}}{11} \frac{4h}{w_{\text{eff}}} + \sqrt{\left( \frac{14 + \frac{8}{\varepsilon_r}}{11} \frac{4h}{w_{\text{eff}}} \right)^2 + \pi^2 \frac{1 + \frac{1}{\varepsilon_r}}{2}} \right) \right)$$

# Circuitos Impresos

Existen herramientas en línea que permiten hacer el cálculo de una línea de transmisión de tipo microstrip-line, en un caso single-end.

Note: Units for width and height must be consistent

Dielectric Constant	4.47
Width:	2.54
Height:	1.5
<input type="button" value="Calculate"/>	



Result:

Width/Height: 1.693  
Effective Dielectric Constant: 3.345  
Impedance: 53.56 Ω

Tomado de: <https://www.pasternack.com/t-calculator-microstrip.aspx>

# Circuitos Impresos

Ahora bien si se considera utilizar líneas de transmisión de tipo diferencial se puede utilizar el siguiente applet:

Differential Microstrip Impedance Calculator

Calculate the Differential Microstrip Impedance of a Transmission Line

Note: This Calculator works for  $W/H < 1$

Trace Width (w)

Enter Value      mils

Trace Separation (d)

Enter Value      mils

Trace Thickness (t)

Enter Value      mils

Dielectric Thickness (h)

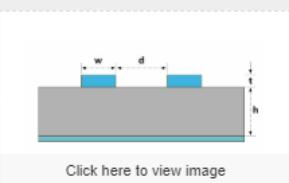
Enter Value      mils

Dielectric Constant ( $\epsilon_r$ )

Enter Value

**Calculate**    **Reset**

Click here to view image



**Result**

Differential Impedance

Single Ended Impedance

Recordar que 1 mil son 0,0254 mm

Tomado de: <https://www.everythingrf.com/rf-calculators/differential-microstrip-impedance-calculator>

# Circuitos Impresos

Algunas consideraciones que toma en cuenta el applet para determinar la impedancia son:

**Formula:**

$$Z_0 = \frac{87}{\sqrt{\epsilon_r + 1.41}} \ln \left( \frac{5.98 \times h}{0.8 \times w + t} \right)$$

$$Z_d = \frac{174}{\sqrt{\epsilon_r + 1.41}} \ln \left( \frac{5.98 \times h}{0.8 \times w + t} \right) \left( 1 - 0.48 \exp \left( -0.96 \frac{d}{h} \right) \right)$$

Where,

$Z_0$  = Single Ended Impedance

$Z_d$  = Differential Impedance

$d$  = Trace Separation

$w$  = Trace Width

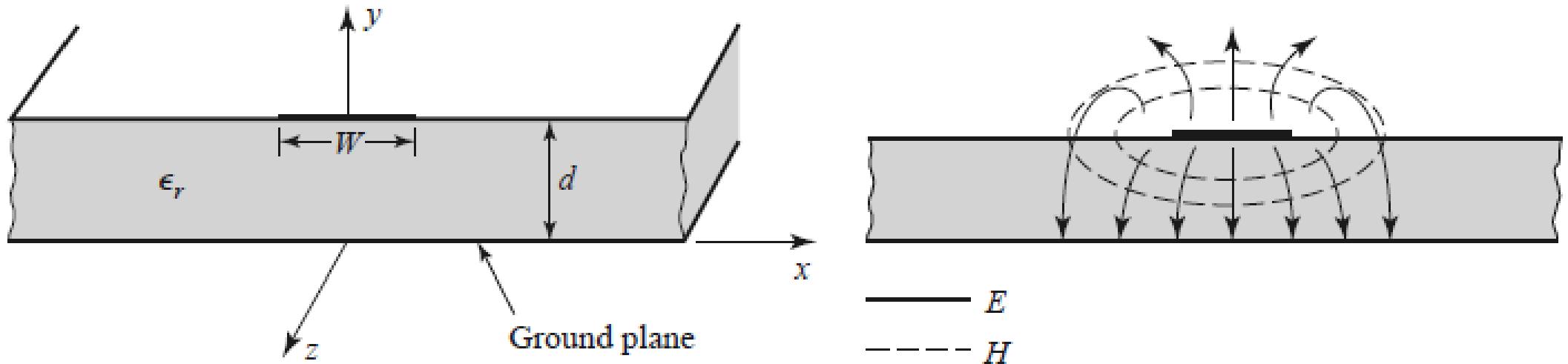
$t$  = Trace Thickness

$h$  = Dielectric Thickness

$\epsilon_r$  = Relative Dielectric Constant

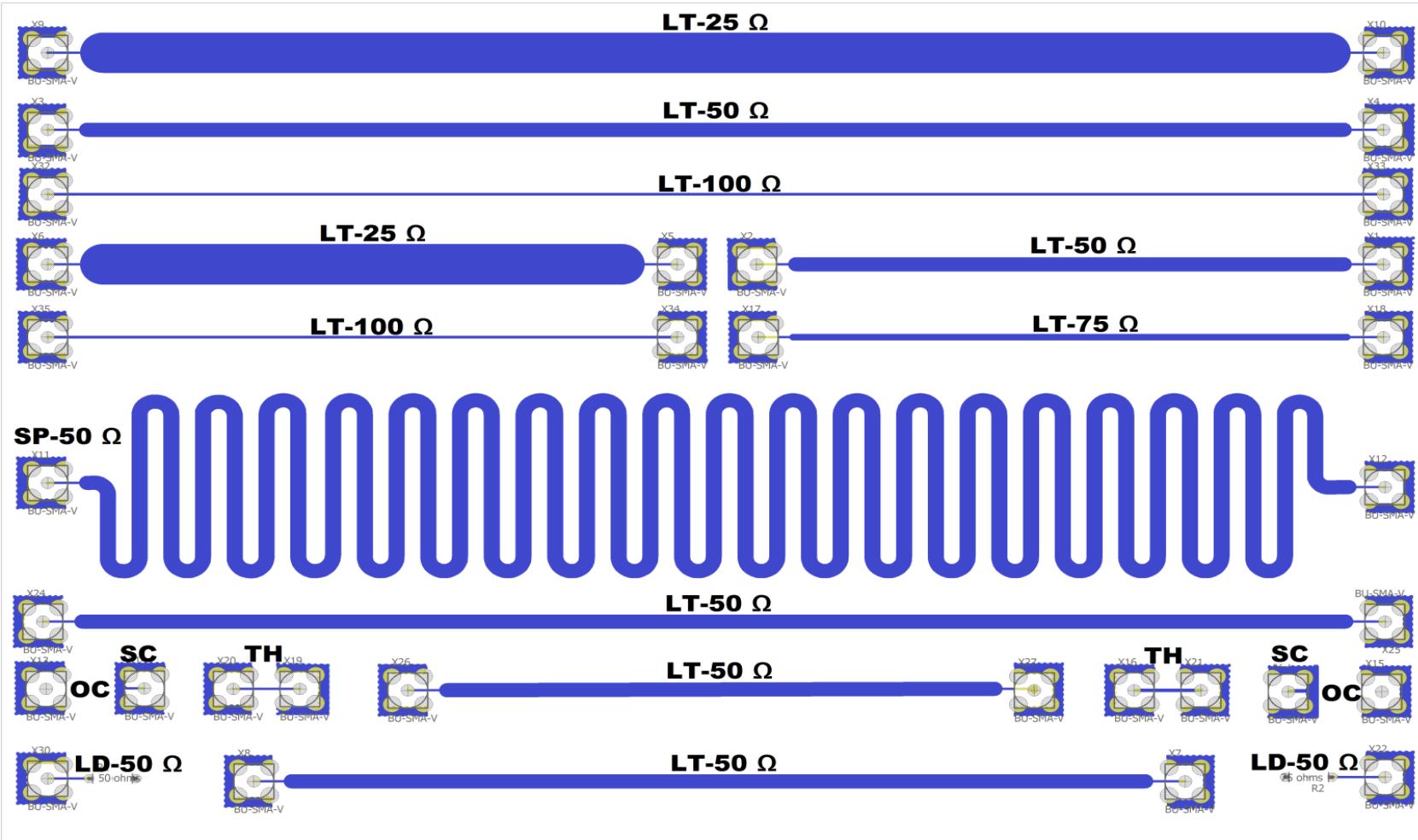
# Circuitos Impresos

En cuanto a distribución de campos, para las líneas de tipo microstrip-line se tiene que:



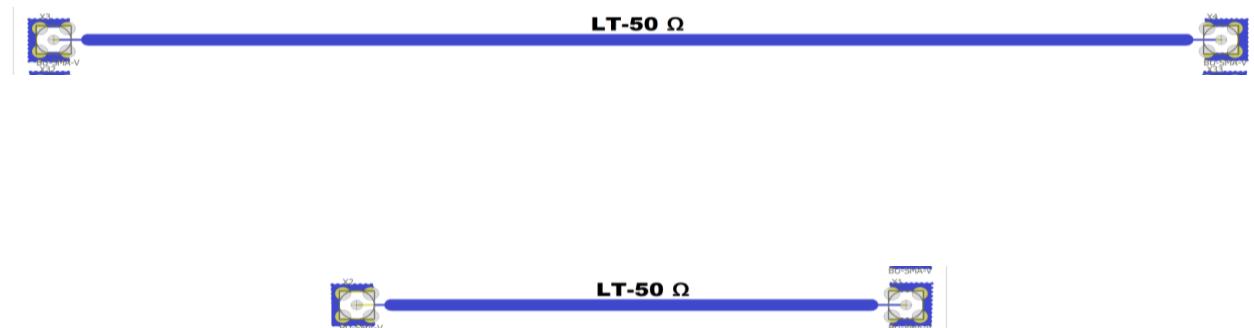
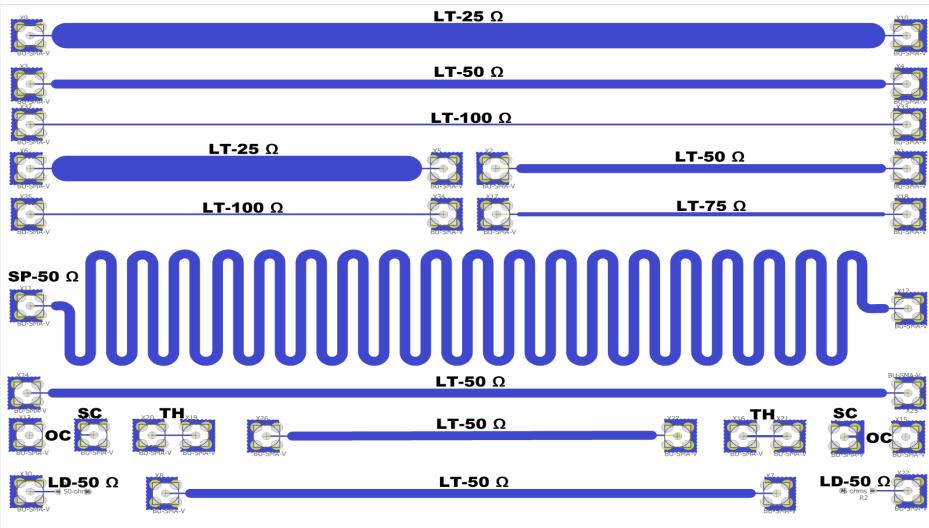
Tomado de: <https://mundotelecomunicaciones1.blogspot.com/2016/04/lineas-microstrip.html>

# Circuitos Impresos



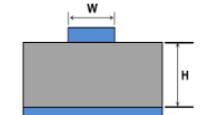
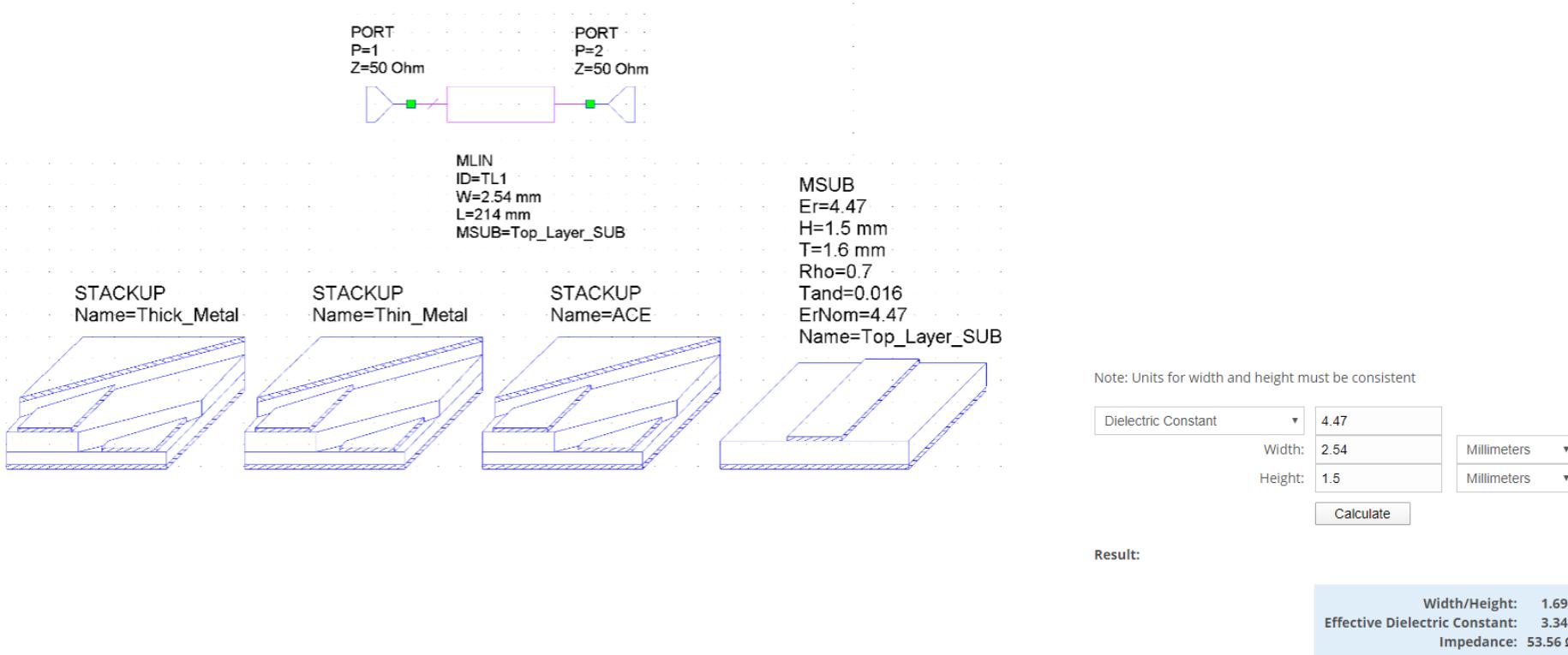
# Circuitos Impresos

Analizando que la placa que se mostró tiene diferentes líneas de transmisión, se tomará a manera de ejemplo una línea larga y corta de igual impedancia con el objetivo de observar el comportamiento.



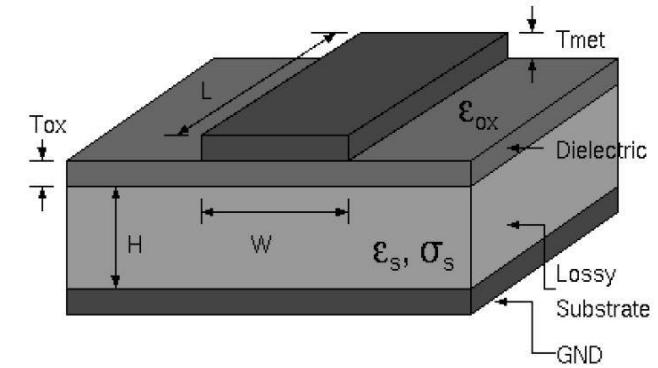
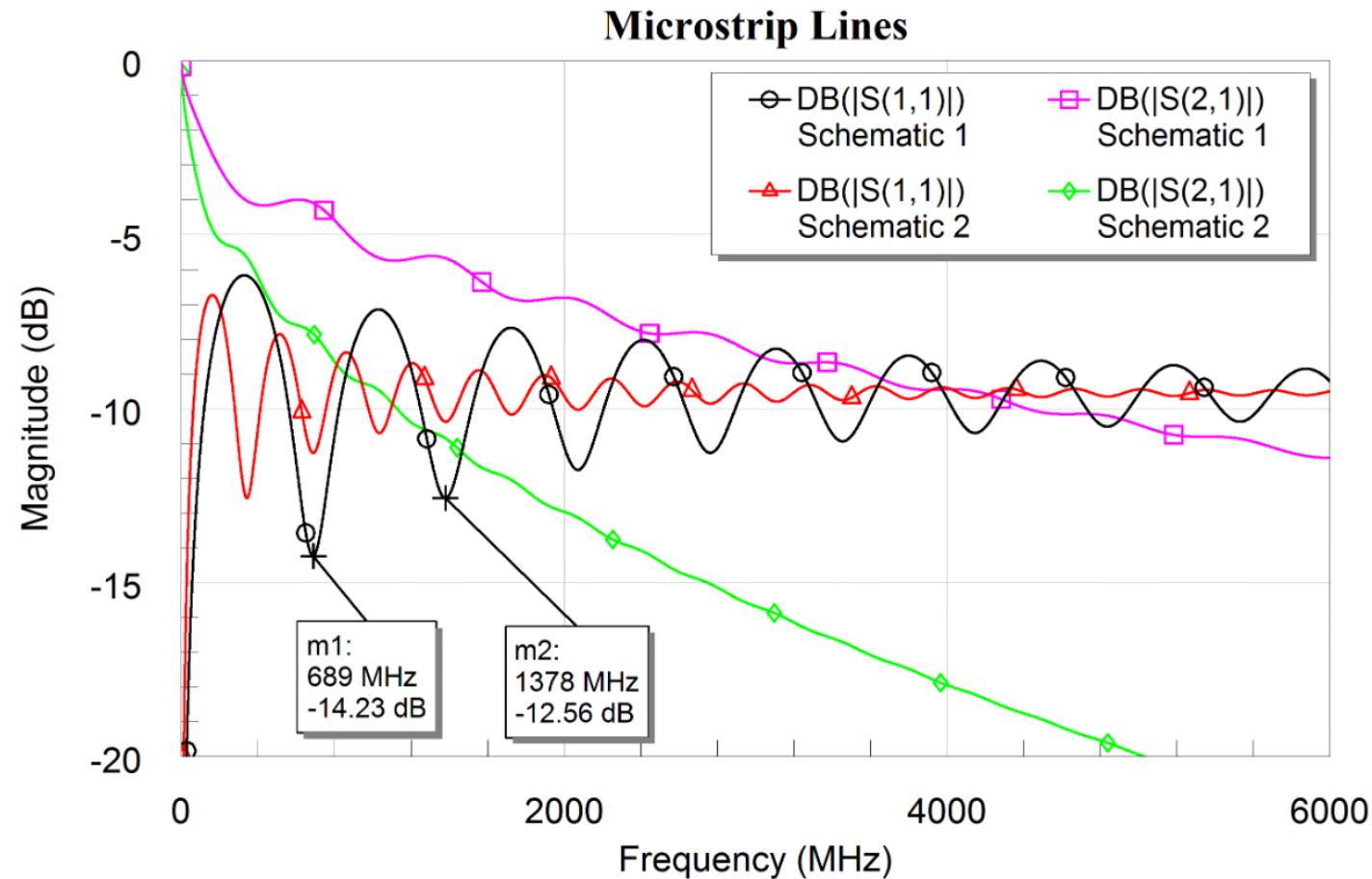
# Circuitos Impresos

Tomaremos respuesta de parámetros S a partir de un esquema de simulación de radio frecuencia en AWR.



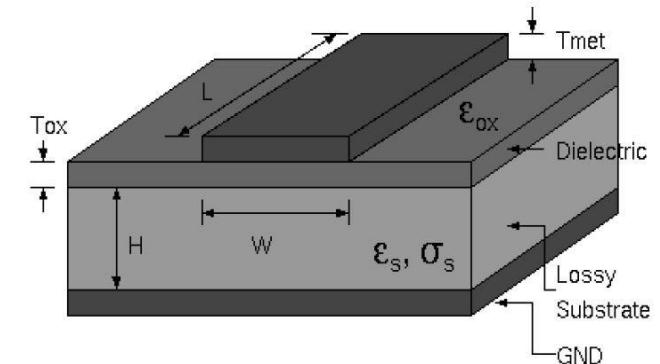
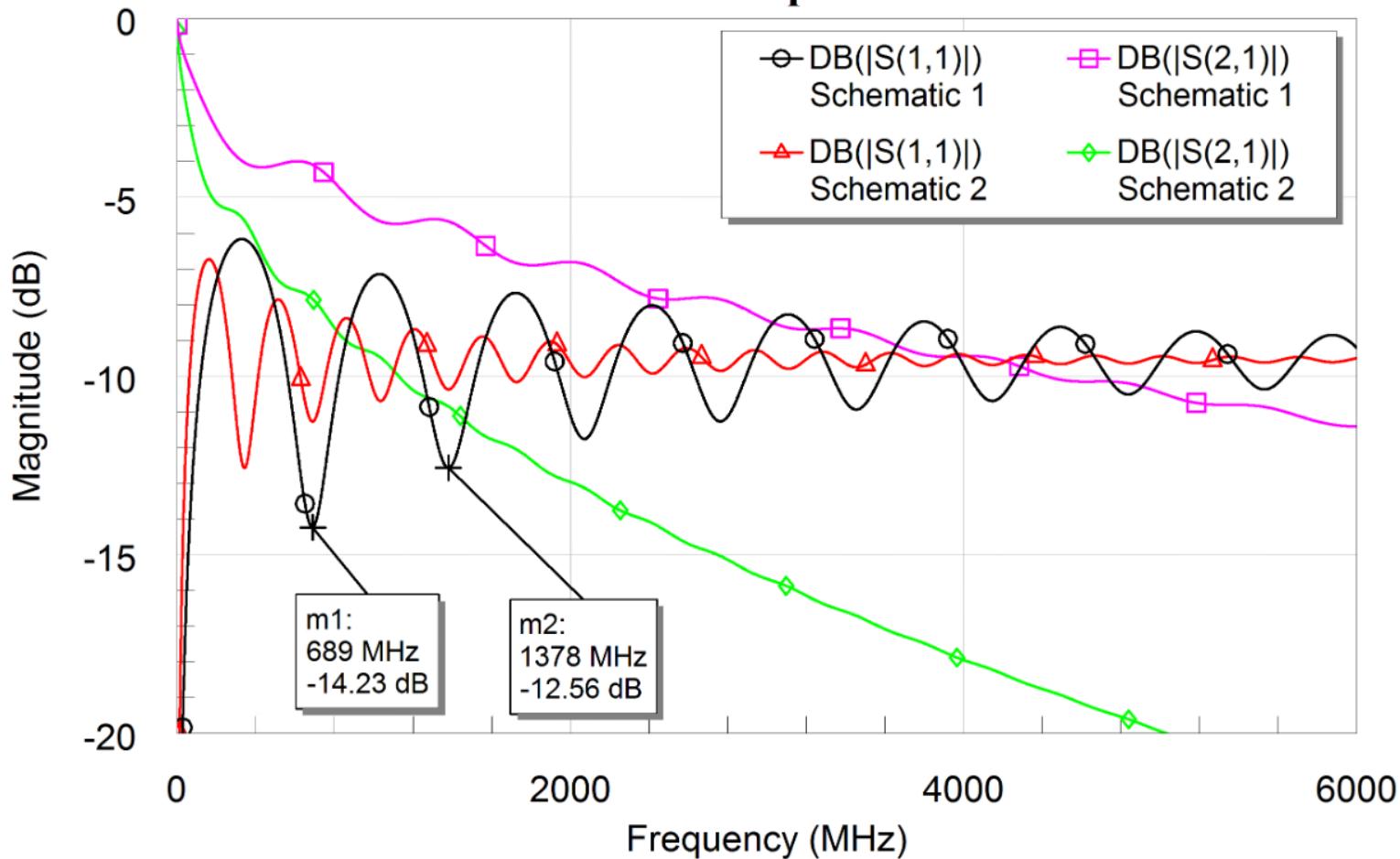
# Circuitos Impresos

A manera de ejemplo se obtiene la siguiente respuesta de parámetros S, según la variación de la longitud pero con la misma impedancia característica.



# Circuitos Impresos

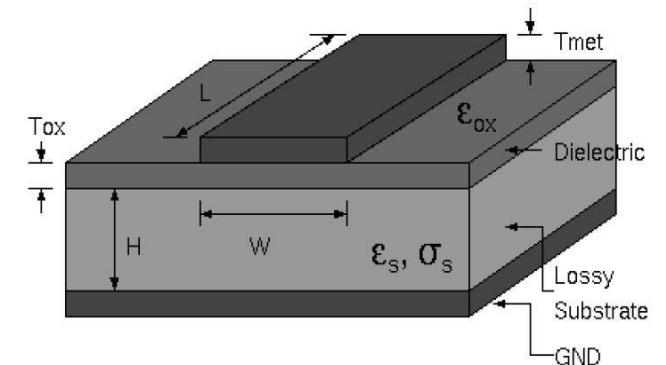
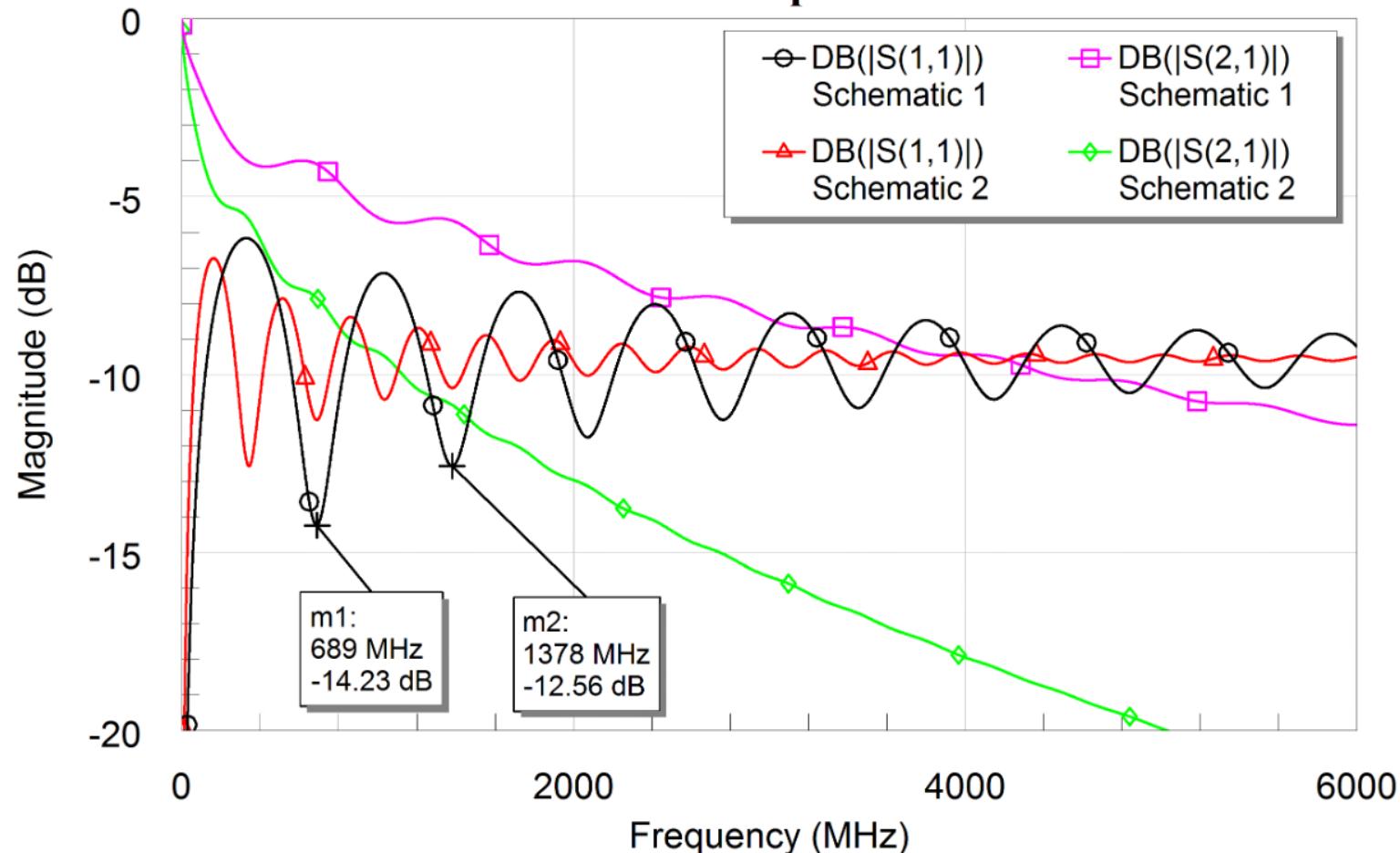
## Microstrip Lines



¿Qué velocidad de propagación se asume para este caso?

# Circuitos Impresos

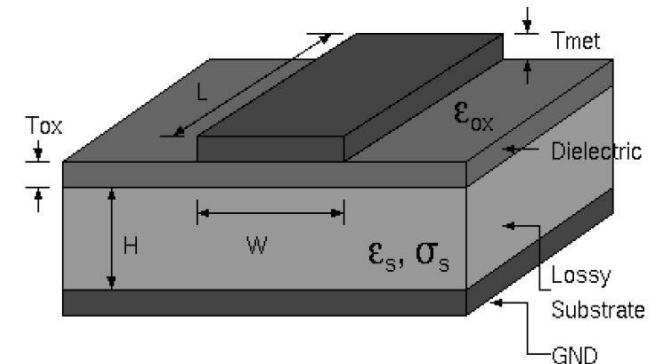
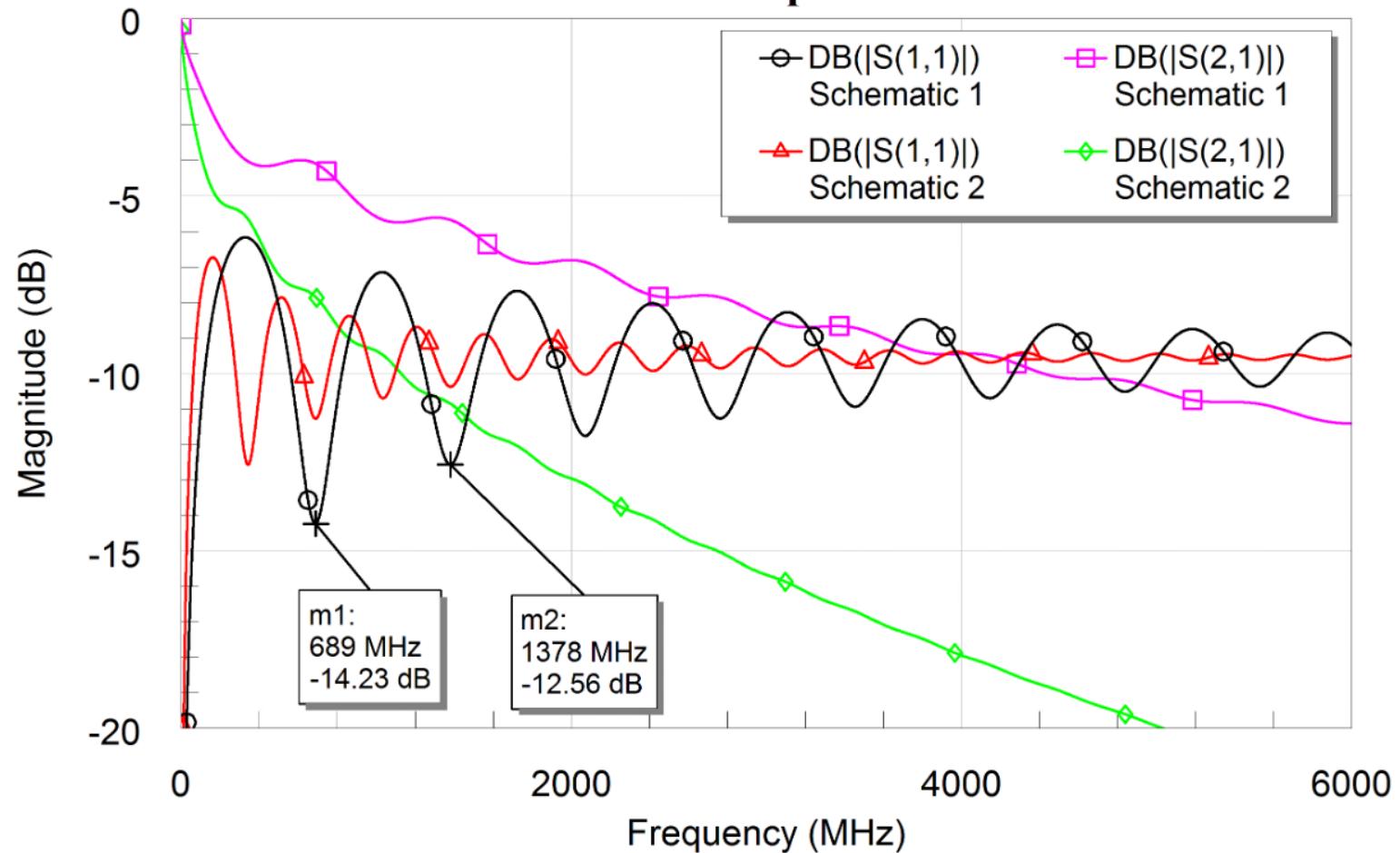
## Microstrip Lines



¿Qué velocidad de propagación se asume para este caso?  
La velocidad del cobre es menor a  $c$

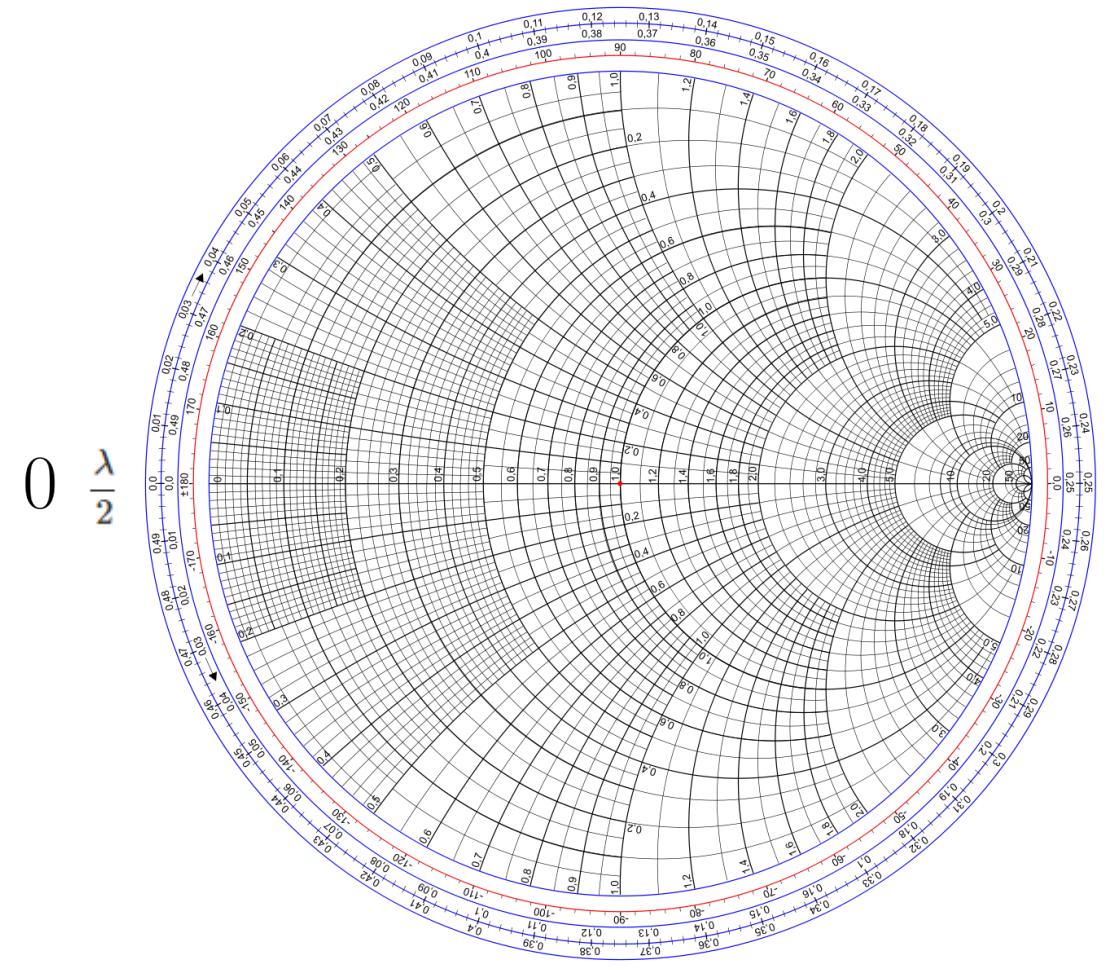
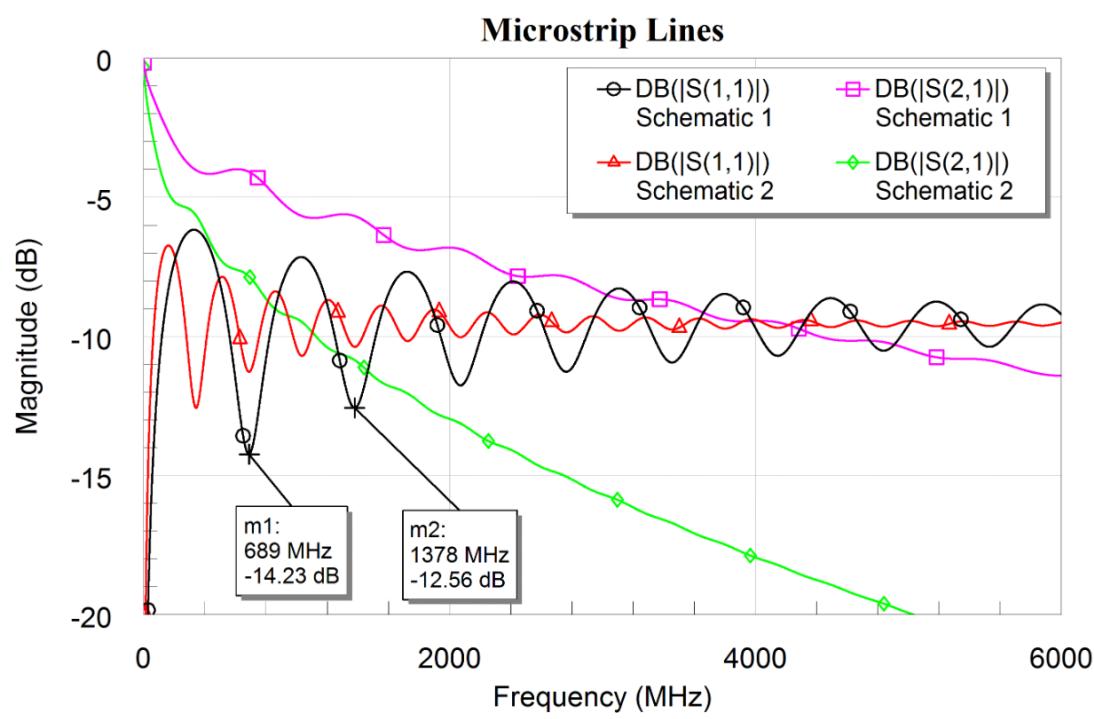
# Circuitos Impresos

## Microstrip Lines



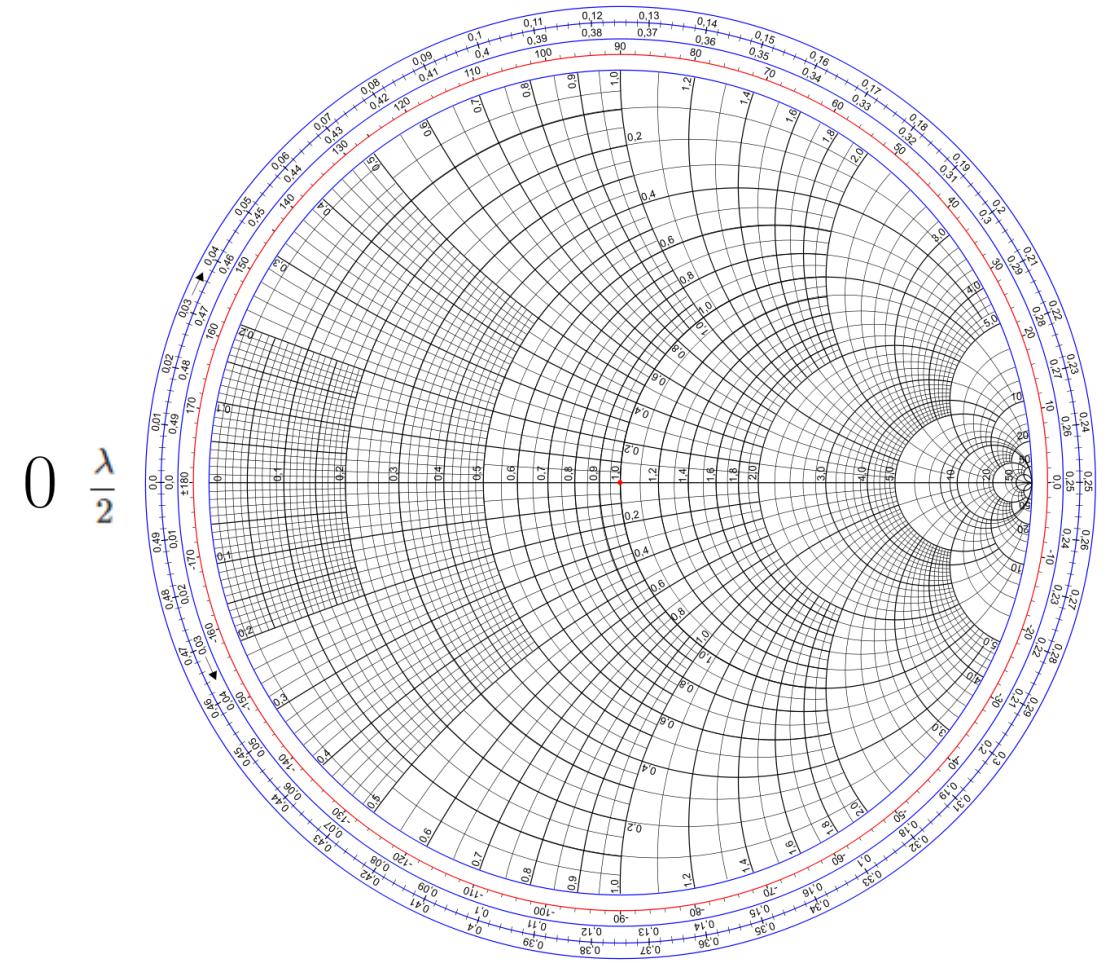
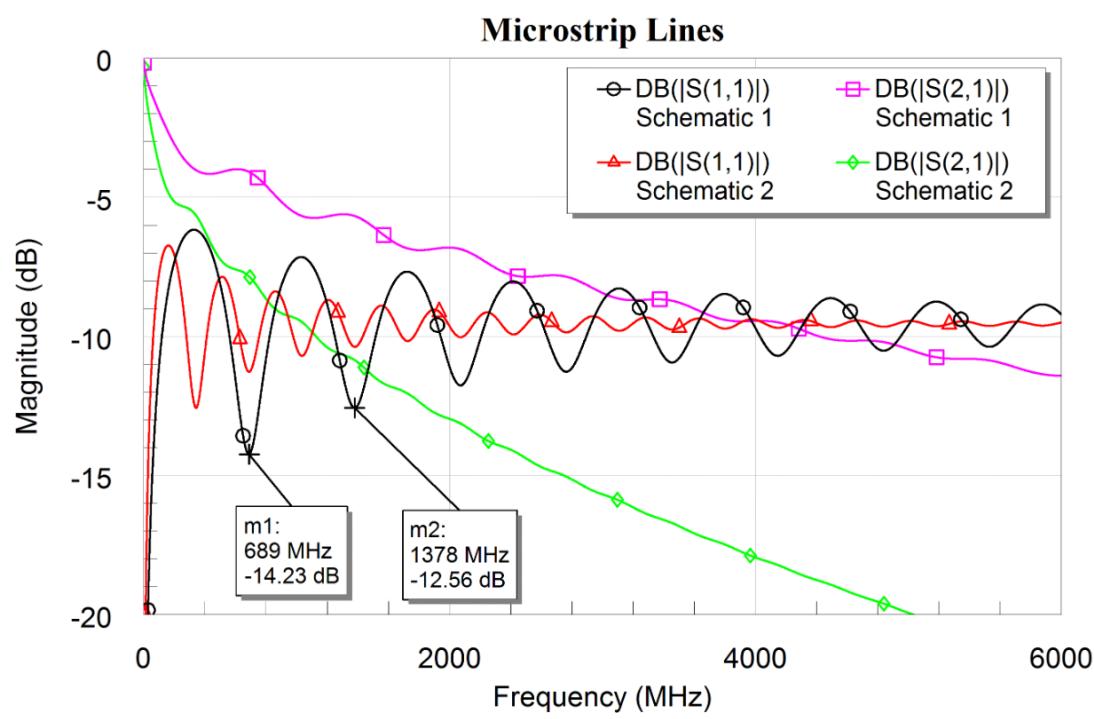
¿Cuál respuesta de parámetros S corresponde a una  
línea de transmisión corta?

# Circuitos Impresos



Tomado de: [https://es.wikipedia.org/wiki/Carta\\_de\\_Smith#/media/Archivo:Smith\\_chart\\_gen.svg](https://es.wikipedia.org/wiki/Carta_de_Smith#/media/Archivo:Smith_chart_gen.svg)

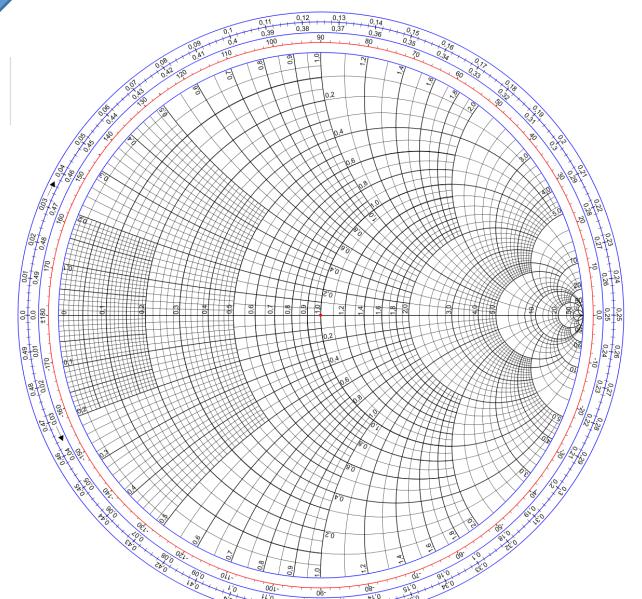
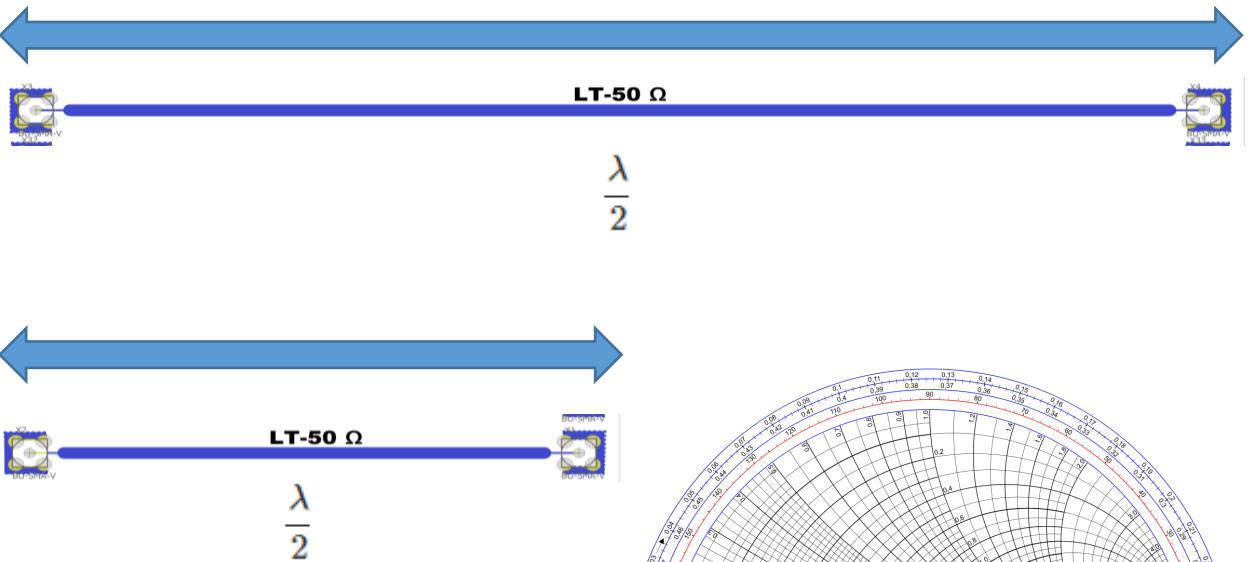
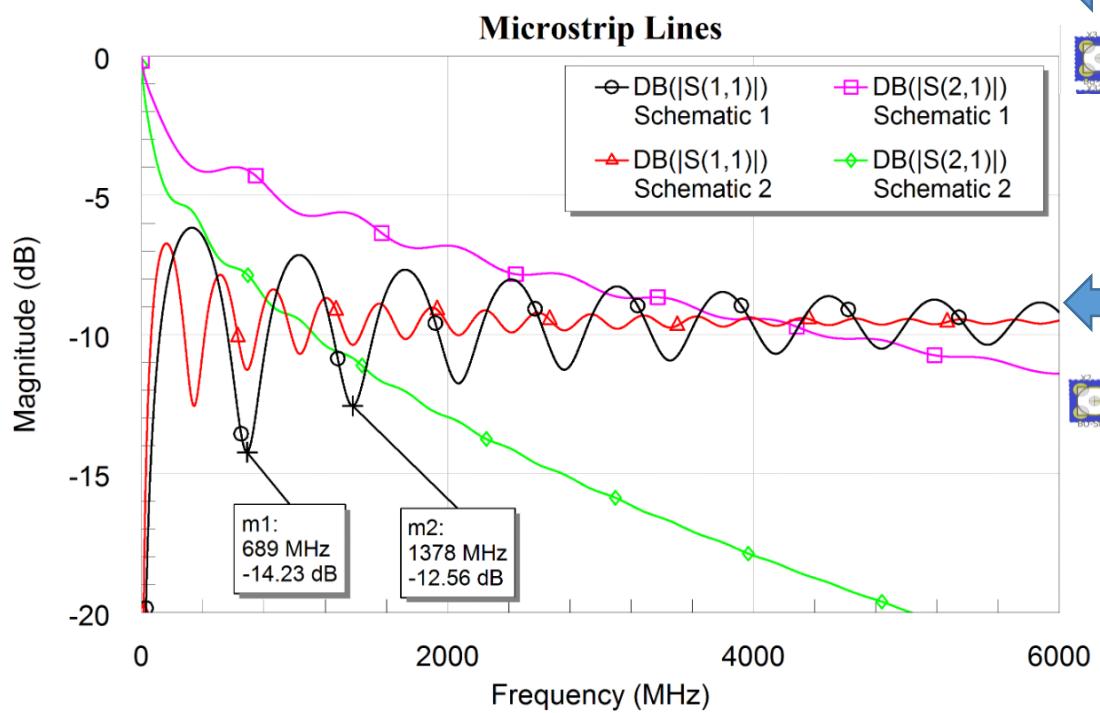
# Circuitos Impresos



Asumiendo que la velocidad de propagación es la misma

Tomado de: [https://es.wikipedia.org/wiki/Carta\\_de\\_Smith#/media/Archivo:Smith\\_chart\\_gen.svg](https://es.wikipedia.org/wiki/Carta_de_Smith#/media/Archivo:Smith_chart_gen.svg)

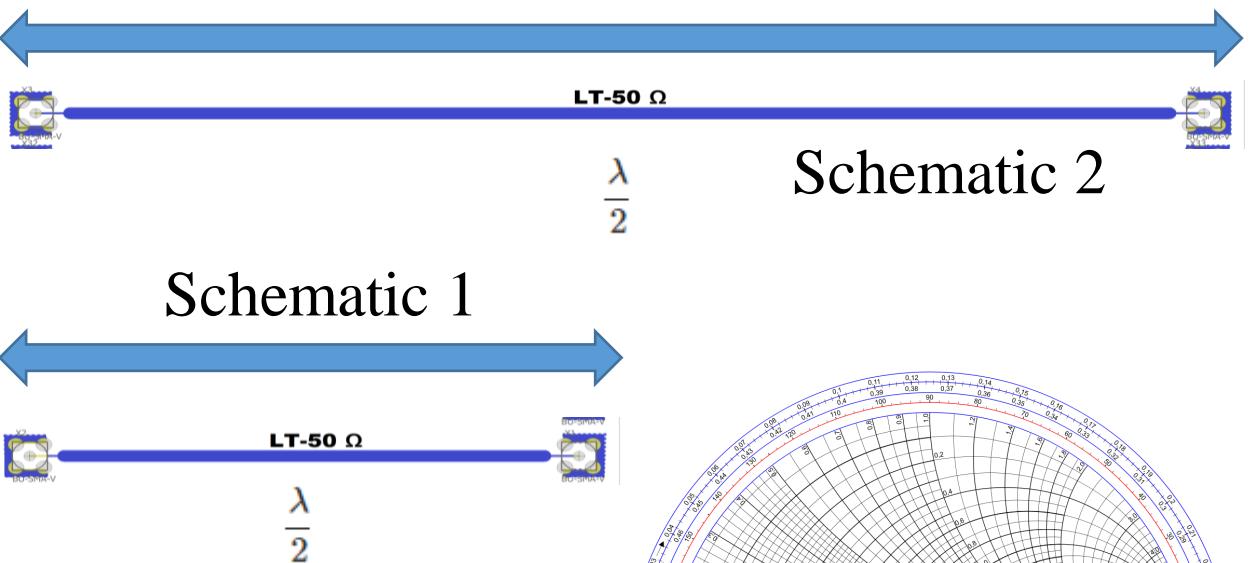
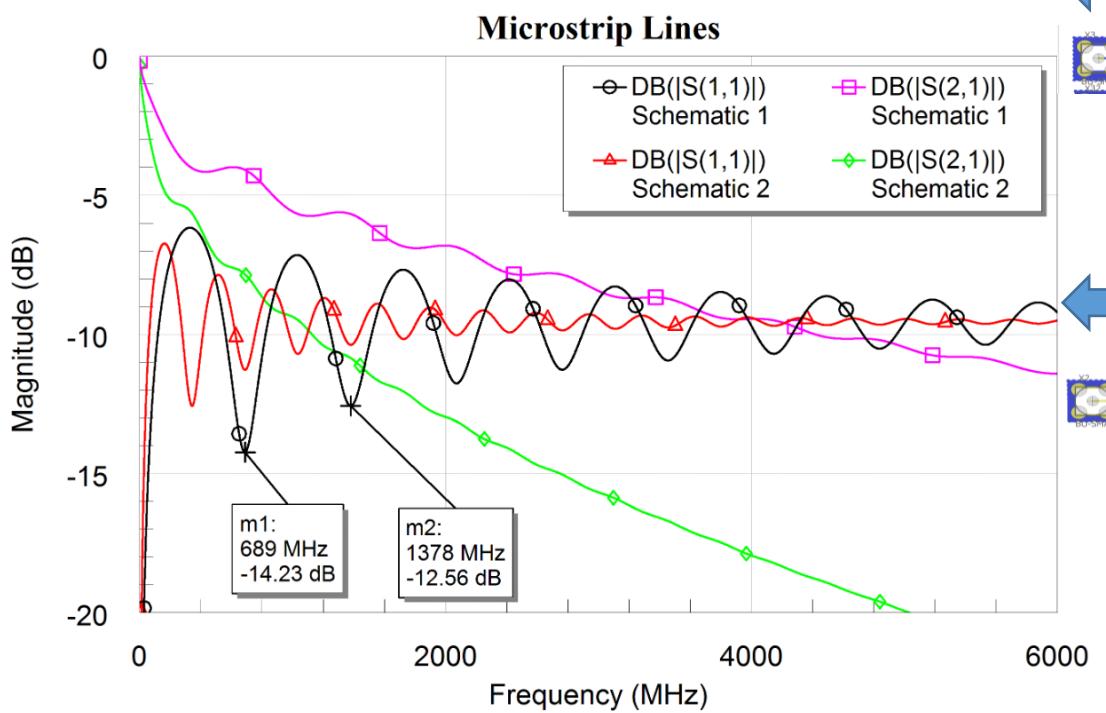
# Circuitos Impresos



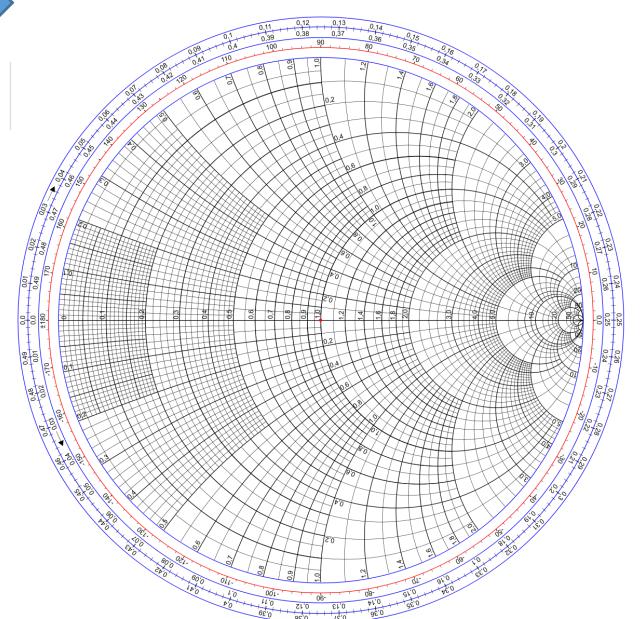
Al viajar a la misma velocidad de propagación una línea corta alcanza más rápido  $\frac{\lambda}{2}$

Tomado de: [https://es.wikipedia.org/wiki/Carta\\_de\\_Smith#/media/Archivo:Smith\\_chart\\_gen.svg](https://es.wikipedia.org/wiki/Carta_de_Smith#/media/Archivo:Smith_chart_gen.svg)

# Circuitos Impresos



Los parámetros S en cuanto a transmisión para una línea larga se ven más degradados debido a las pérdidas.



Tomado de: [https://es.wikipedia.org/wiki/Carta\\_de\\_Smith#/media/Archivo:Smith\\_chart\\_gen.svg](https://es.wikipedia.org/wiki/Carta_de_Smith#/media/Archivo:Smith_chart_gen.svg)

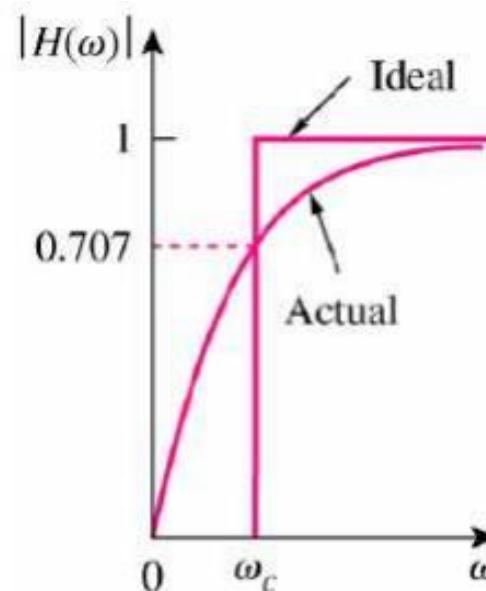
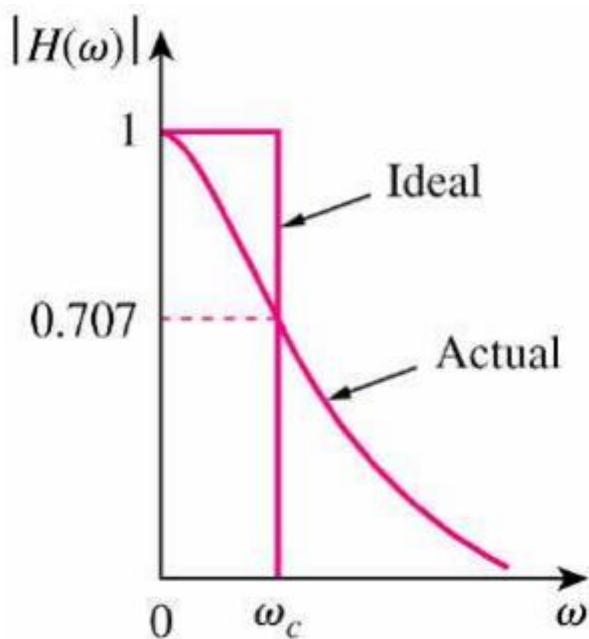
# Contenidos y Cronograma

- Líneas de Transmisión
- Circuitos Impresos
- Filtros
- Analizador Vectorial de Redes (VNA).

# Filtro

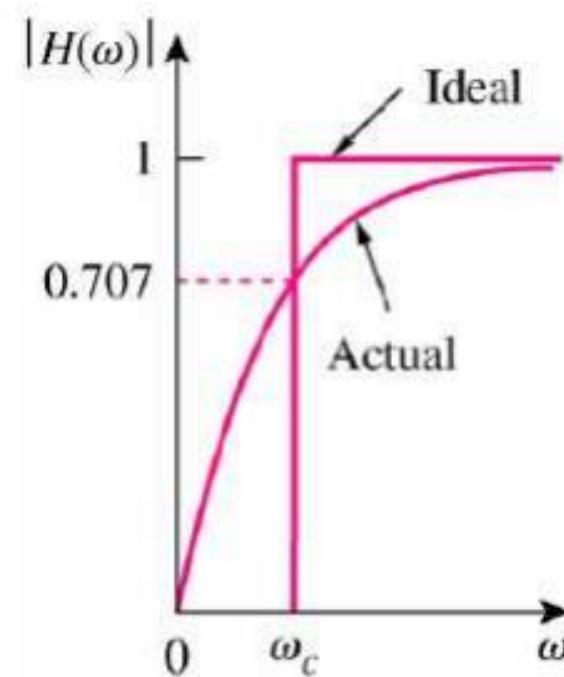
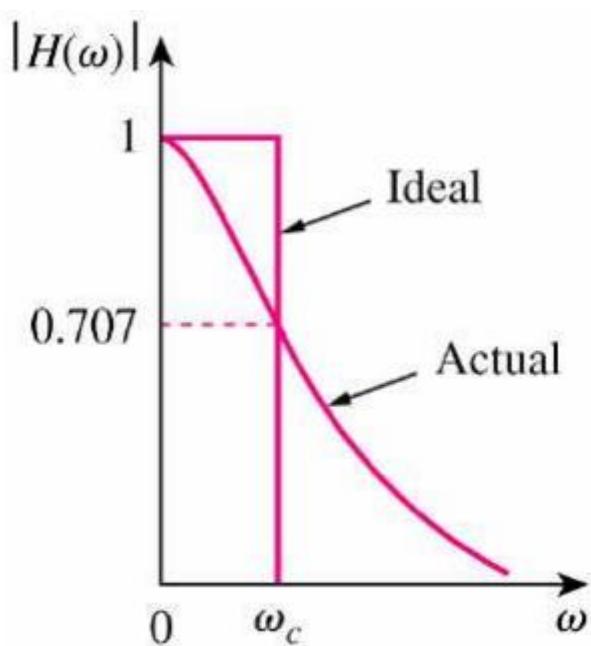
Red que atenúa cierta sección del espectro en frecuencias: pasa baja, pasa banda, paso alto, etc.

Pueden ser pasivos o activos y existen diferentes respuestas



# Filtro

En relación a filtros las respuesta en frecuencia de redes tipos LPF y HPF se describen como:



# Filtro

Algunos filtros comerciales en radio frecuencia pueden ser interconectados mediante conectores tipo N o SMA.



Tomado: <http://www.broadbandshop.com.au/lpf-566t-low-pass-filter-pass-0.3-566mhz-ins.-loss>  
<https://www.youtube.com/watch?v=nB6LhBNRw7k>

# Filtro

Un fabricante de filtros para RF de la marca Pasternack, posee un stock de filtro de diferentes configuraciones y anchos de bandas por ejemplo



Filtro Paso Bajo

Key Specifications (Click on Data Sheet Above for Additional Details)	
Min Frequency	DC
Max Frequency	11 GHz
Maximum Insertion Loss	1.5 dB
Impedance	50 Ohm
Input Max VSWR	2:1
Maximum Power	6 Watts
Connector-In Series	SMA
Connector-In Gender	Female
Connector-Out Series	SMA
Connector-Out Gender	Female

Tomado: <https://www.pasternack.com/11-section-low-pass-filter-dc-11-ghz-passband-11-ghz-pe87fl1017-p.aspx>

# Filtro

Entre algunas especificaciones que el fabricante proporciona son tales como:

## Configuration

Design

Number of Sections

Connector 1

Connector 2

Passband Frequency Range

Low Pass Filter

11

SMA Female

SMA Female

DC to 11 GHz

# Filtro

## Electrical Specifications

Description	Minimum	Typical	Maximum	Units
Passband Freq.	DC		11	GHz
Useable Freq. Range		DC to 11		GHz
Impedance		50		Ohms
Insertion Loss			1.5	dB
Passband VSWR			2:1	
Input Power			6	Watts
Rejection at 15 GHz	50			dB
Rejection at 18 GHz	50			dB

Tomado: <https://www.pasternack.com/images/ProductPDF/PE87FL1017.pdf>

# Filtro

## Mechanical Specifications

### Size

Length

Width

Height

Weight

1.2 in [30.48 mm]

0.55 in [13.97 mm]

0.44 in [11.18 mm]

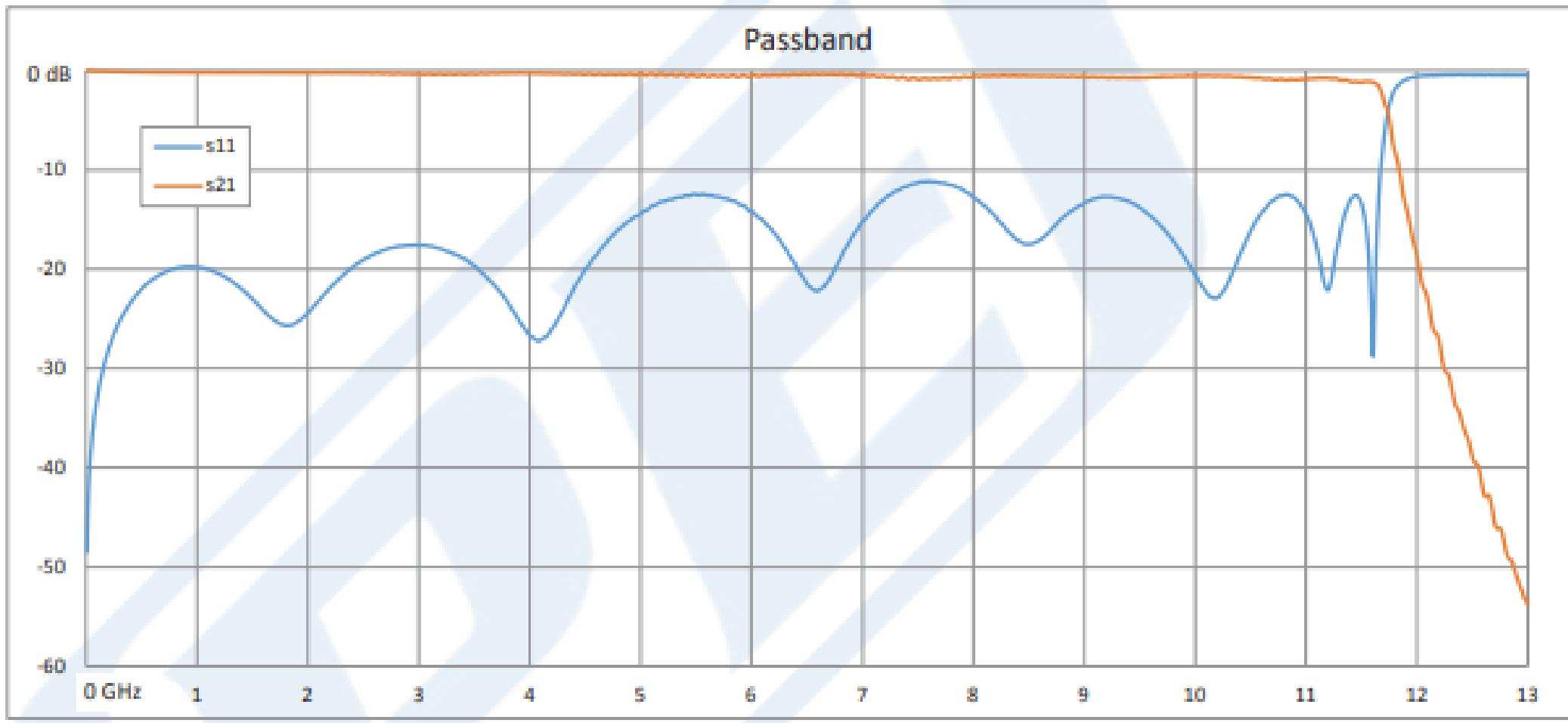
0.045 lbs [20.41 g]

### Connectors

Description	Connector 1	Connector 2
Type	SMA Female	SMA Female

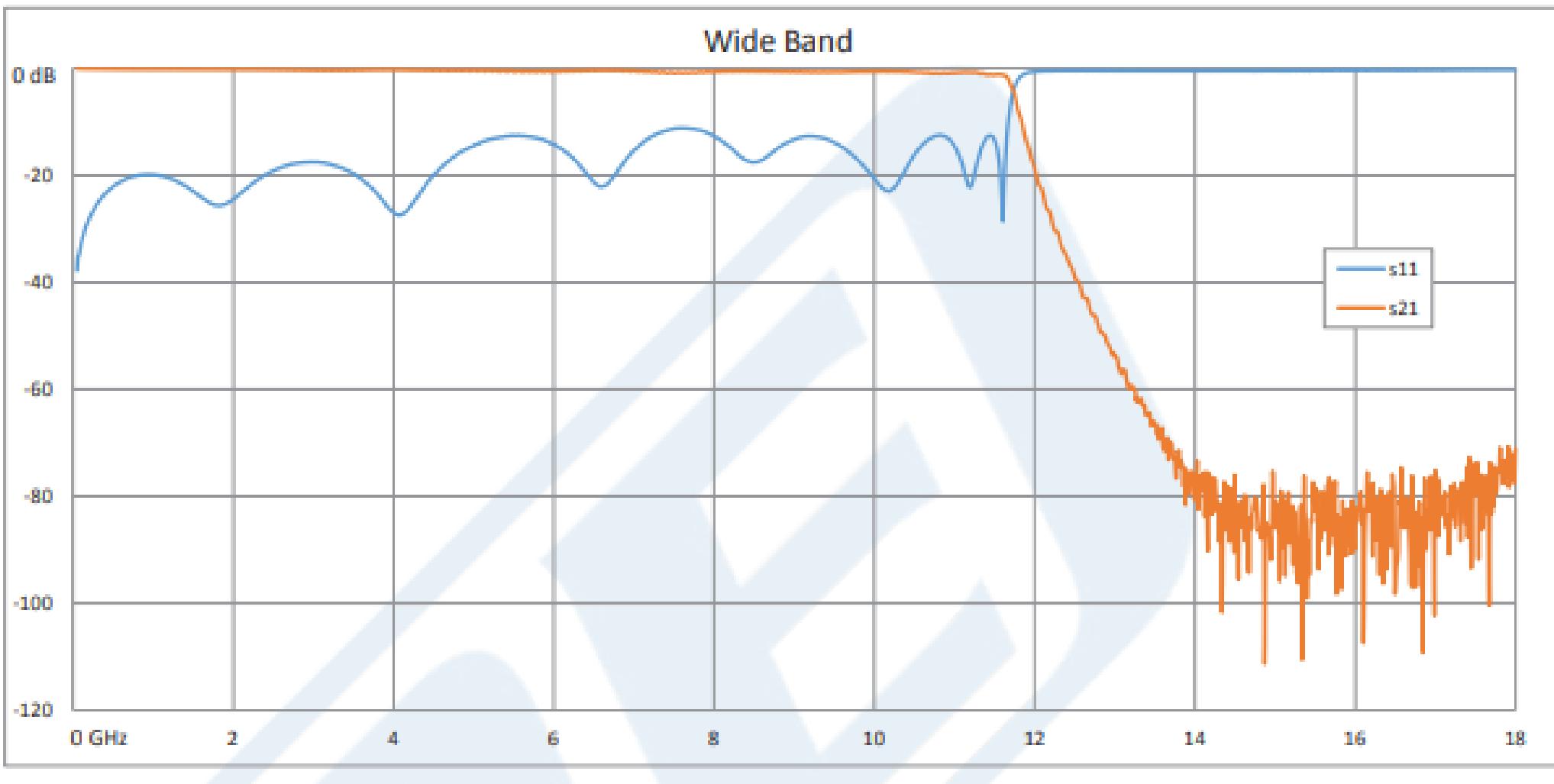
# Filtro

## Typical Performance Data



Tomado: <https://www.pasternack.com/images/ProductPDF/PE87FL1017.pdf>

# Filtro



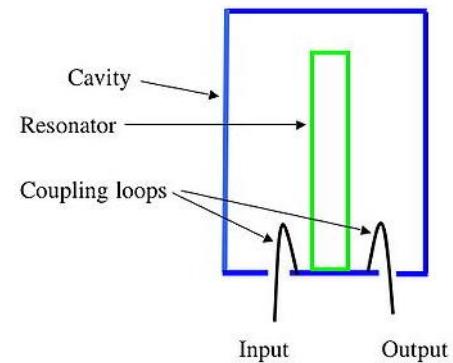
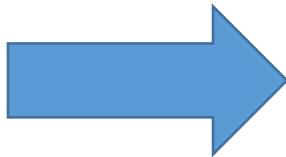
Tomado: <https://www.pasternack.com/images/ProductPDF/PE87FL1017.pdf>

# Filtro

Existen duplexer que están compuestos por filtros de tipo cavidad ó por cavity filter, entre algunas características están las siguientes:

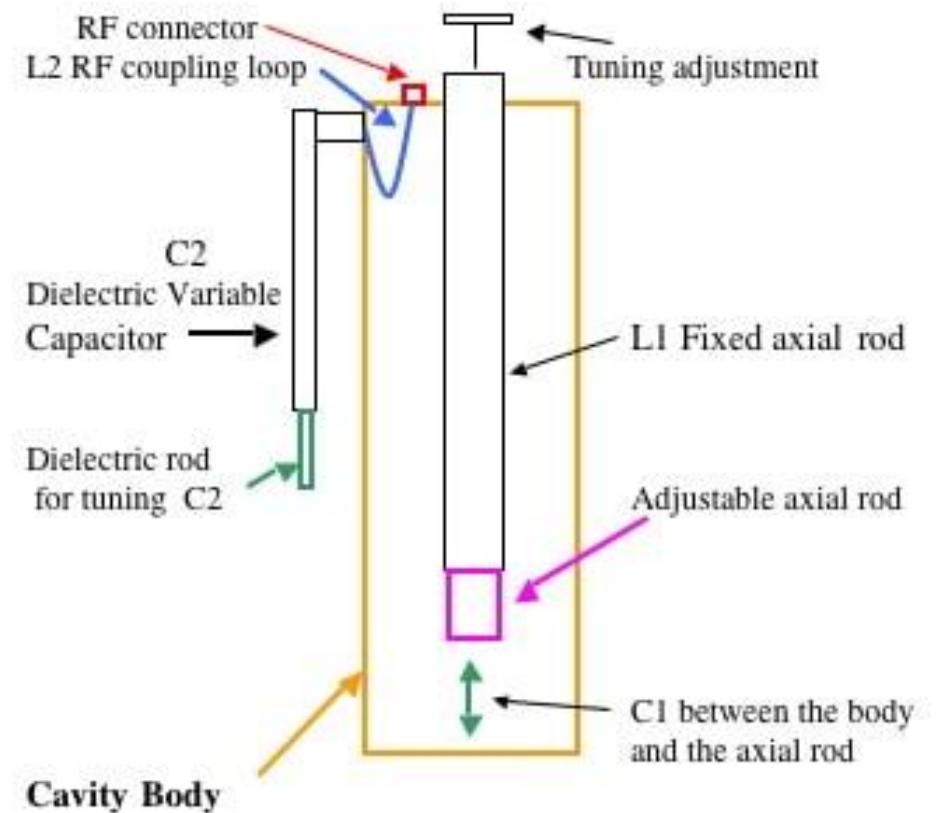
- Dispositivos de comunicación bidireccional, sobre una misma línea.
- Proporciona rechazo de ruido del transmisor en la banda de operación.
- Proporciona aislamiento suficiente para evitar la desensibilización del receptor.
- Su principio de construcción es basado en resonancia, según una topología de cavidad.

# Filtro



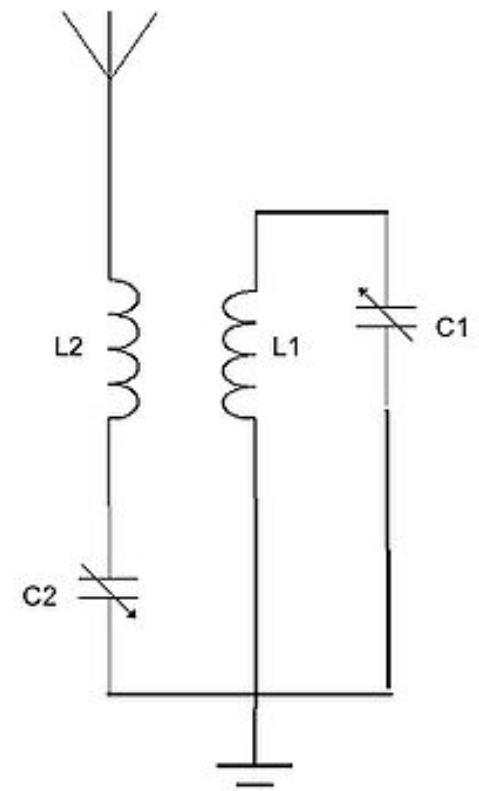
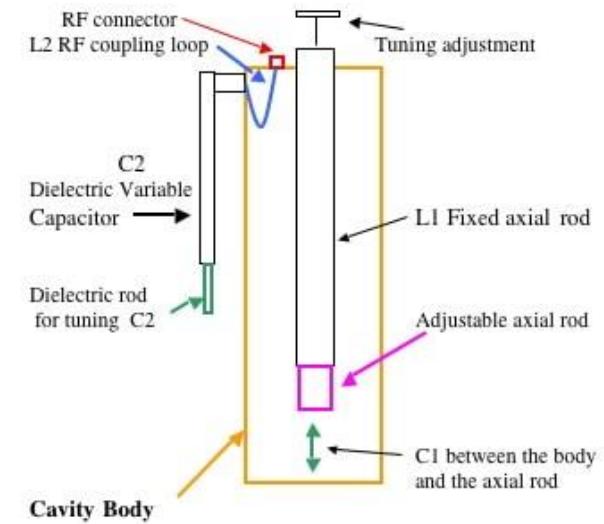
Tomado: <https://www.acalbfi.com/se/RF-components/Filter/Air-cavity/p/339-MHz--Low---351-MHz--High--Cavity-Duplexer-Filter/00000020KI#!prettyPhoto>  
<https://www.qsl.net/n9zia/spec/fil/index.html>  
<https://www.amateur-radio-wiki.net/what-is-a-cavity-filter/>

# Filtro



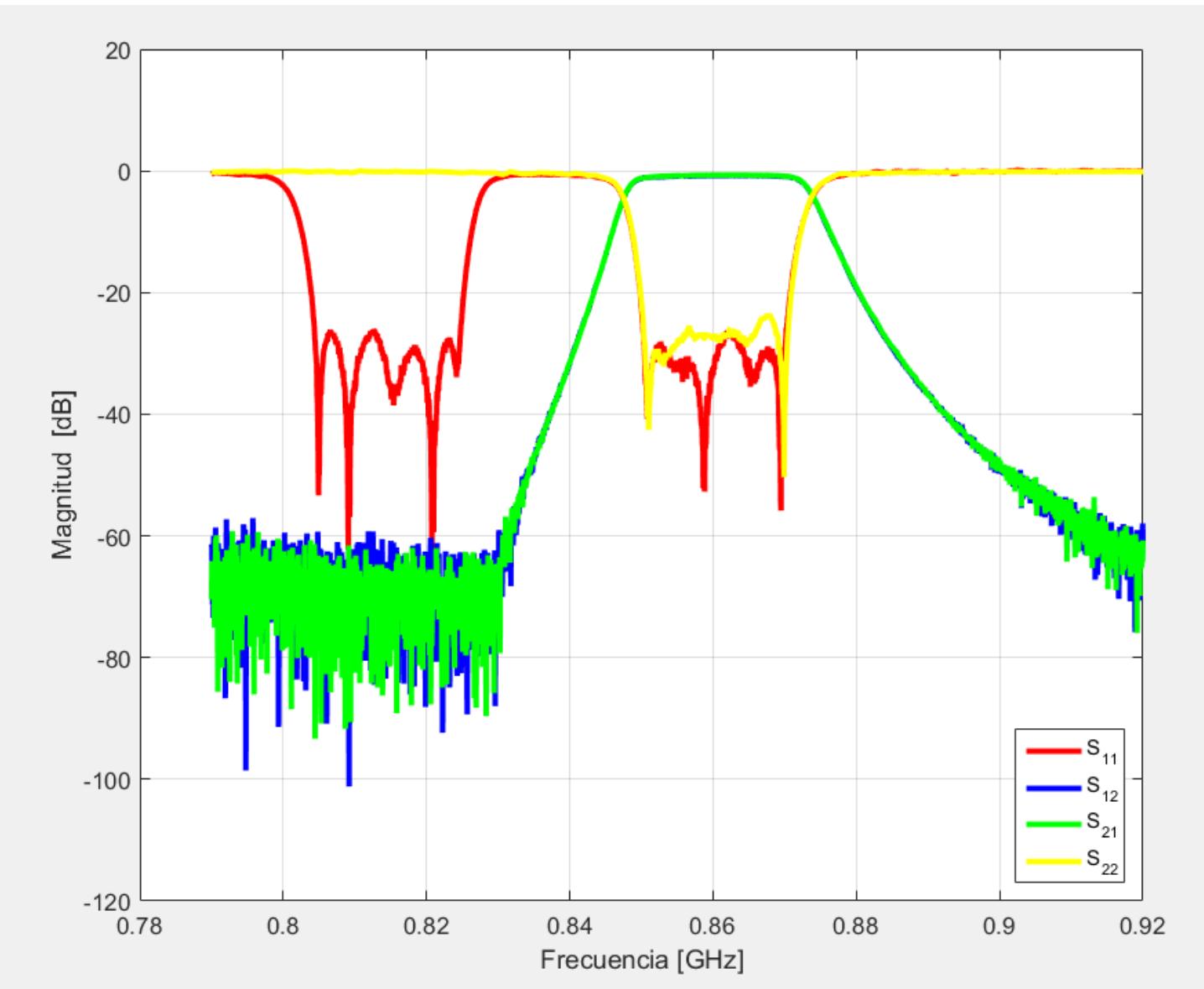
Tomado: <https://www.acalbfi.com/se/RF-components/Filter/Air-cavity/p/339-MHz--Low---351-MHz--High--Cavity-Duplexer-Filter/00000020KI#!prettyPhoto>  
<https://www.qsl.net/n9zia/spec/fil/index.html>  
<https://www.amateur-radio-wiki.net/what-is-a-cavity-filter/>

# Filtro



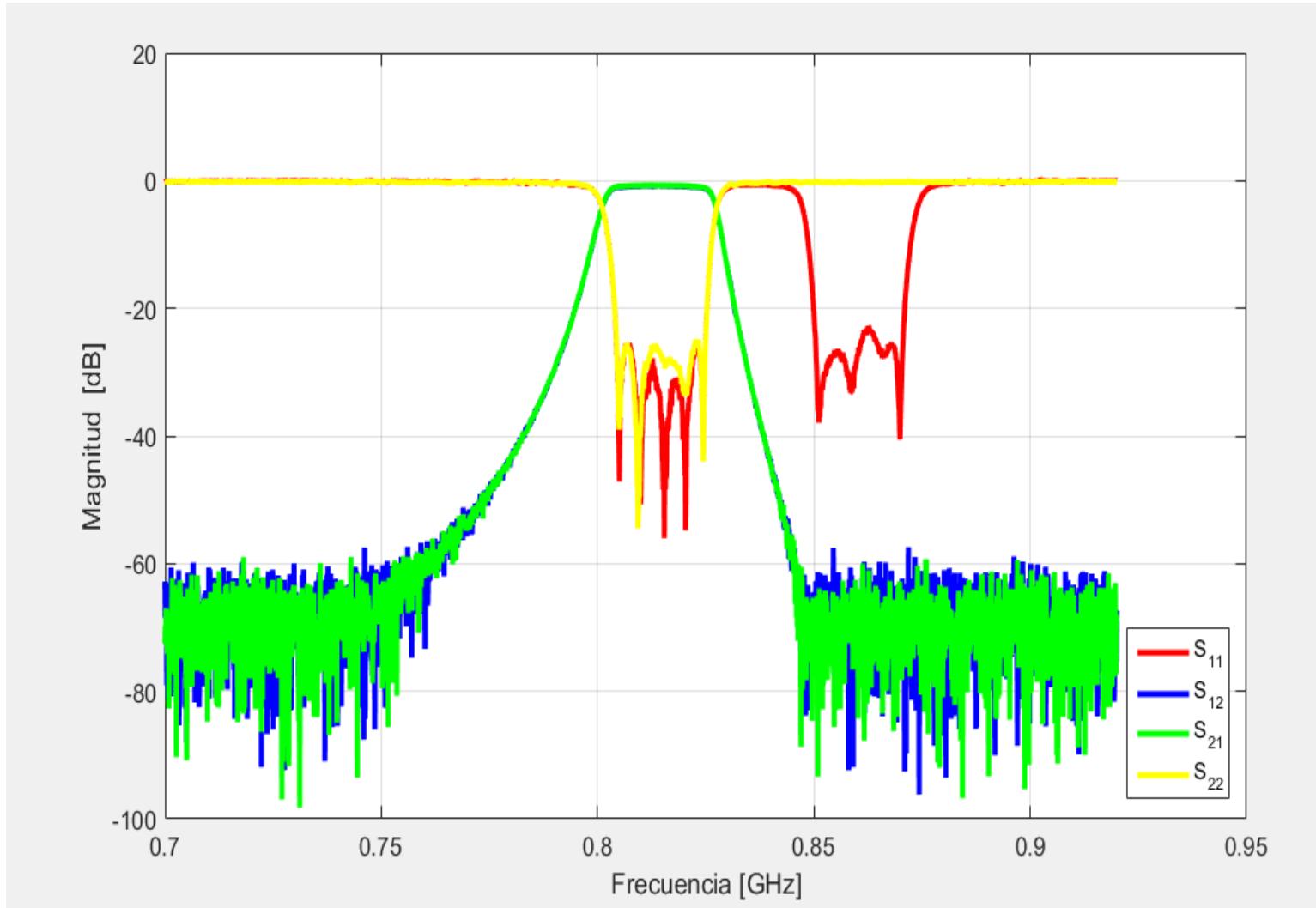
Tomado: <https://www.acalbfi.com/se/RF-components/Filter/Air-cavity/p/339-MHz--Low---351-MHz--High--Cavity-Duplexer-Filter/00000020KI#!prettyPhoto>  
<https://www.qsl.net/n9zia/spec/fil/index.html>  
<https://www.amateur-radio-wiki.net/what-is-a-cavity-filter/>

# Filtro



Respuesta en banda alta

# Filtro



Respuesta en banda baja

# Filtro

¿Qué es un retardo?

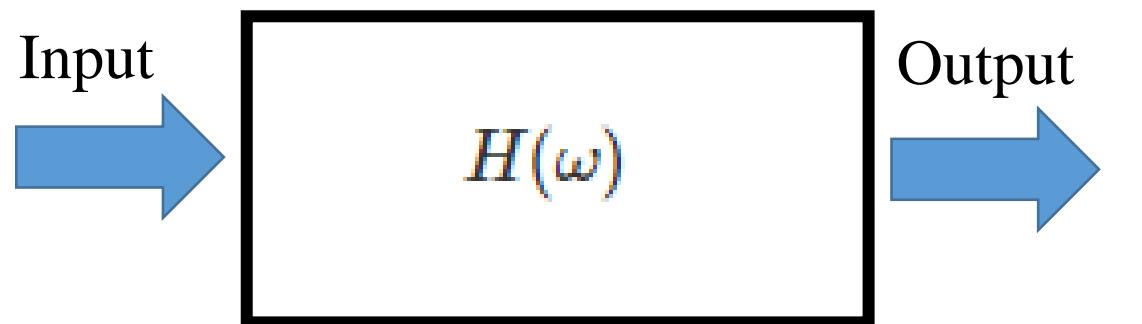
# Filtro

## ¿Qué es un retardo?

Un retardo o retraso a nivel de telecomunicaciones, se puede decir que es el tiempo que se demora una señal de información en atravesar un sistema ó DUT, desde el punto de entrada hasta la salida ó destino.

# Filtro

Para el análisis de filtros existen al menos dos tipos de retardo ó retrasos, los cuales serán ayuda para caracterización de dispositivos según sea el retardo de la señal de entrada cuando atraviesa un dispositivo.



Retraso

$$H(\omega) = ke^{-j\omega t_0}$$

$$|H(\omega)| = k$$

$$\angle H(\omega) = -\omega t_0$$

# Filtro

Si se reacomoda la expresión de la fase a un forma  $y=mx + b$

$$\angle H(\omega) = -\omega t_0$$

$$\angle H(\omega) = -t_0 \omega + 0$$

Donde:

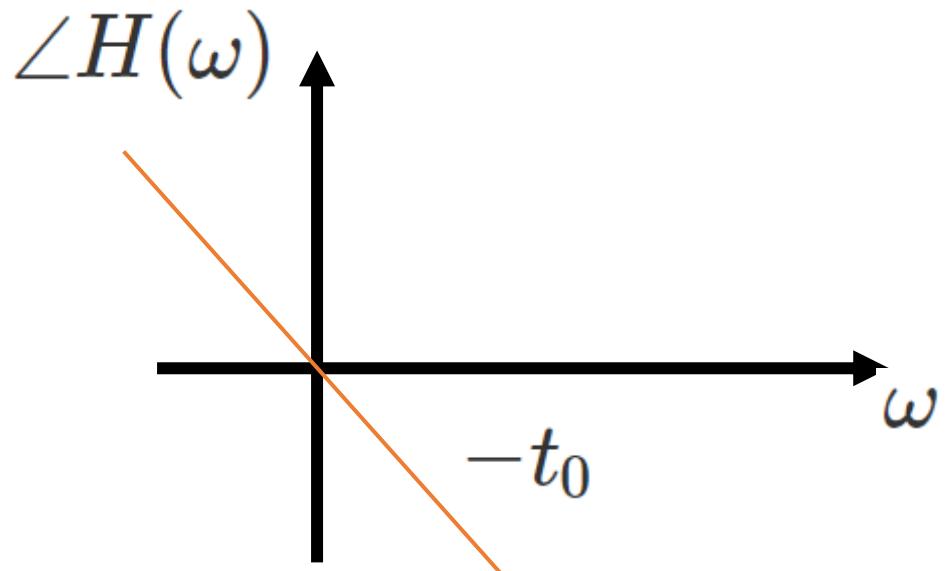
$$y = \angle H(\omega)$$

$$m = -t_0$$

$$c = 0$$

# Filtro

Considerando el siguiente plano se tiene que:



Retraso de fase

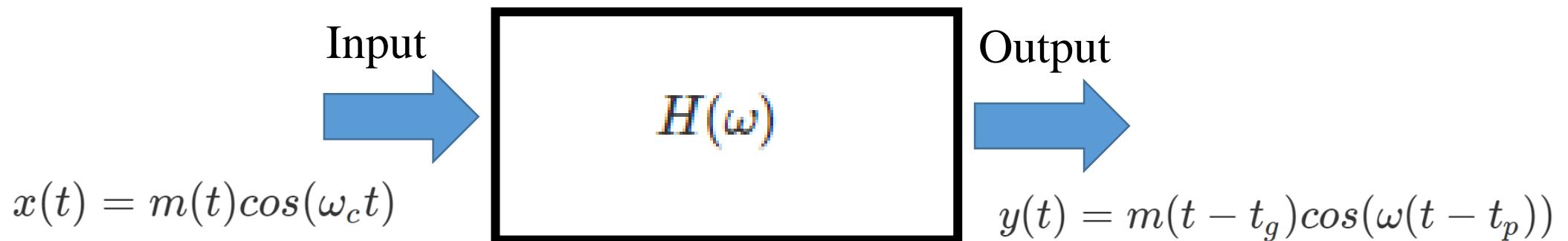
$$t_p = -\frac{\angle H(\omega)}{\omega}$$

Retraso de grupo

$$t_g = -\frac{d\angle H(\omega)}{d\omega}$$

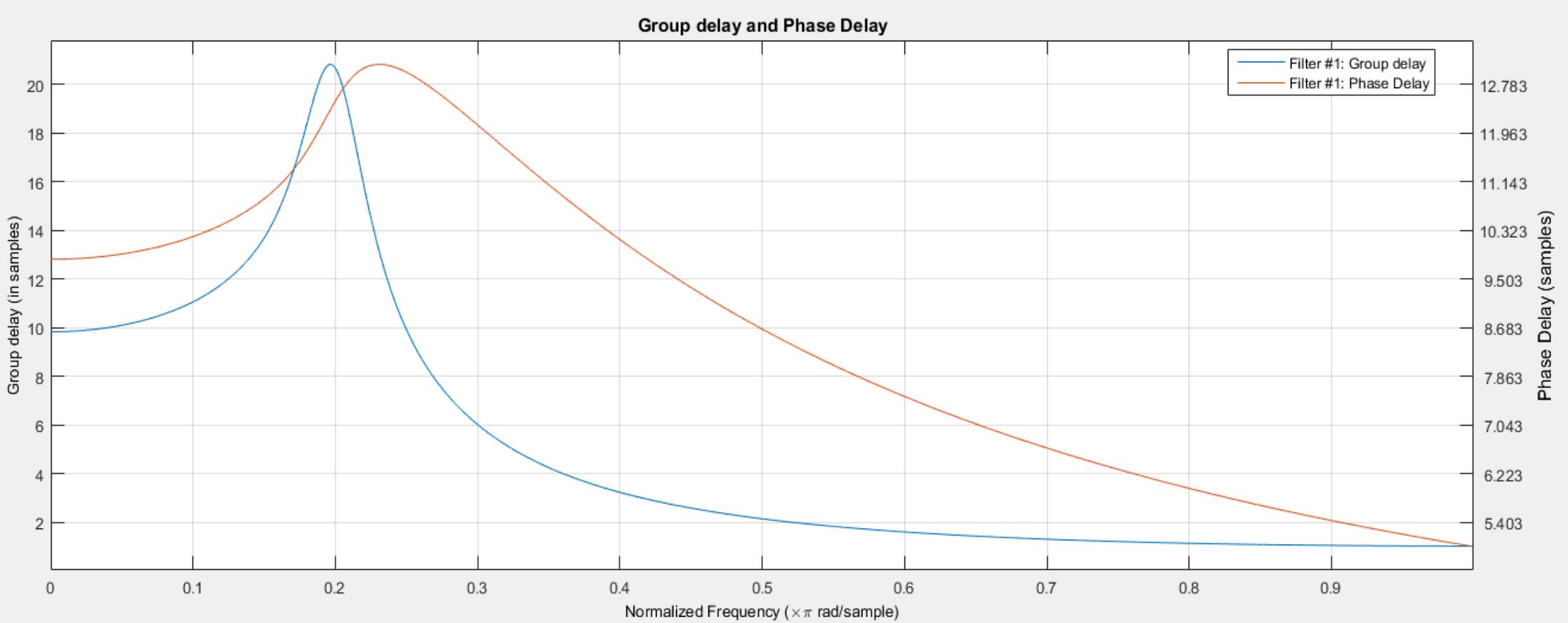
# Filtro

Si se analiza un caso real en cualquier sistema



Es posible observar que la respuesta resultante posee retraso de grupo y fase, esto es como que ocurra en dispositivos reales.

# Filtro



# Contenidos y Cronograma

- Líneas de Transmisión
- Circuitos Impresos
- Filtros
- Analizador Vectorial de Redes (VNA)

# Analizador Vectorial de Redes (VNA)

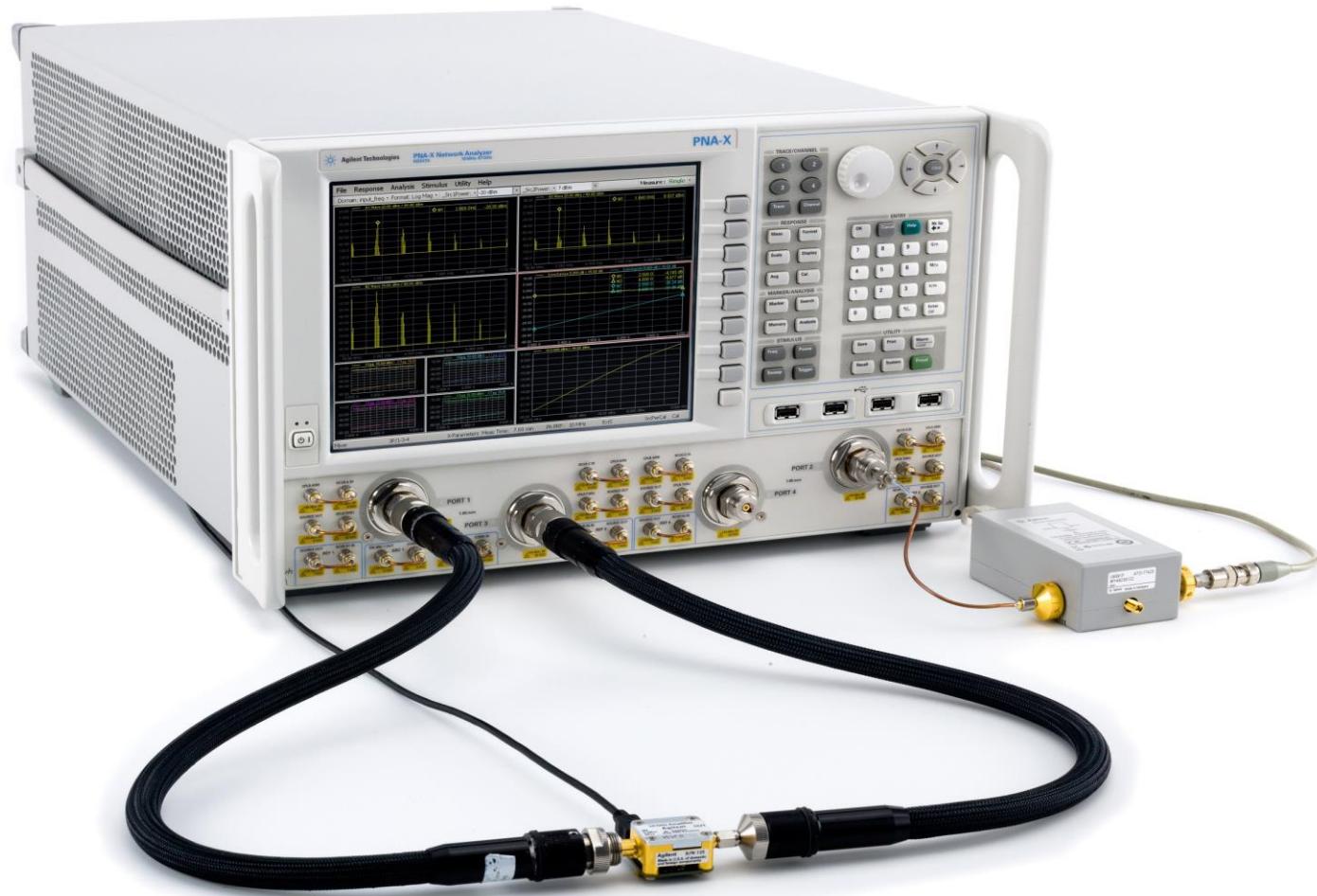
¿Qué es un analizador vectorial de redes (VNA)?

# Analizador Vectorial de Redes (VNA)

## ¿Qué es un analizador vectorial de redes (VNA)?

Un VNA es un instrumento que permite llevar a cabo análisis de propiedades eléctricas aplicado a dispositivos. Principalmente este equipo analiza reflexiones y transmisiones mediante el empleo de Parámetros S.

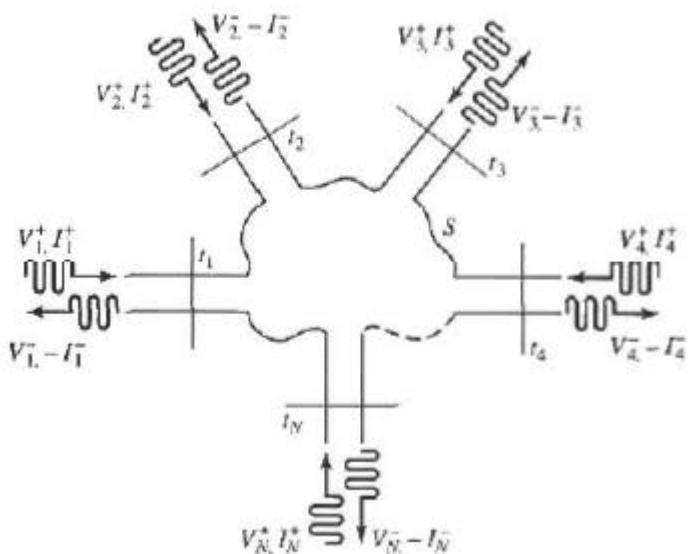
# Analizador Vectorial de Redes (VNA)



# Analizador Vectorial de Redes (VNA)

Representación que permite tratar un sistema general en términos de TL en las interfaces definidas como puertos, en función de la frecuencia.

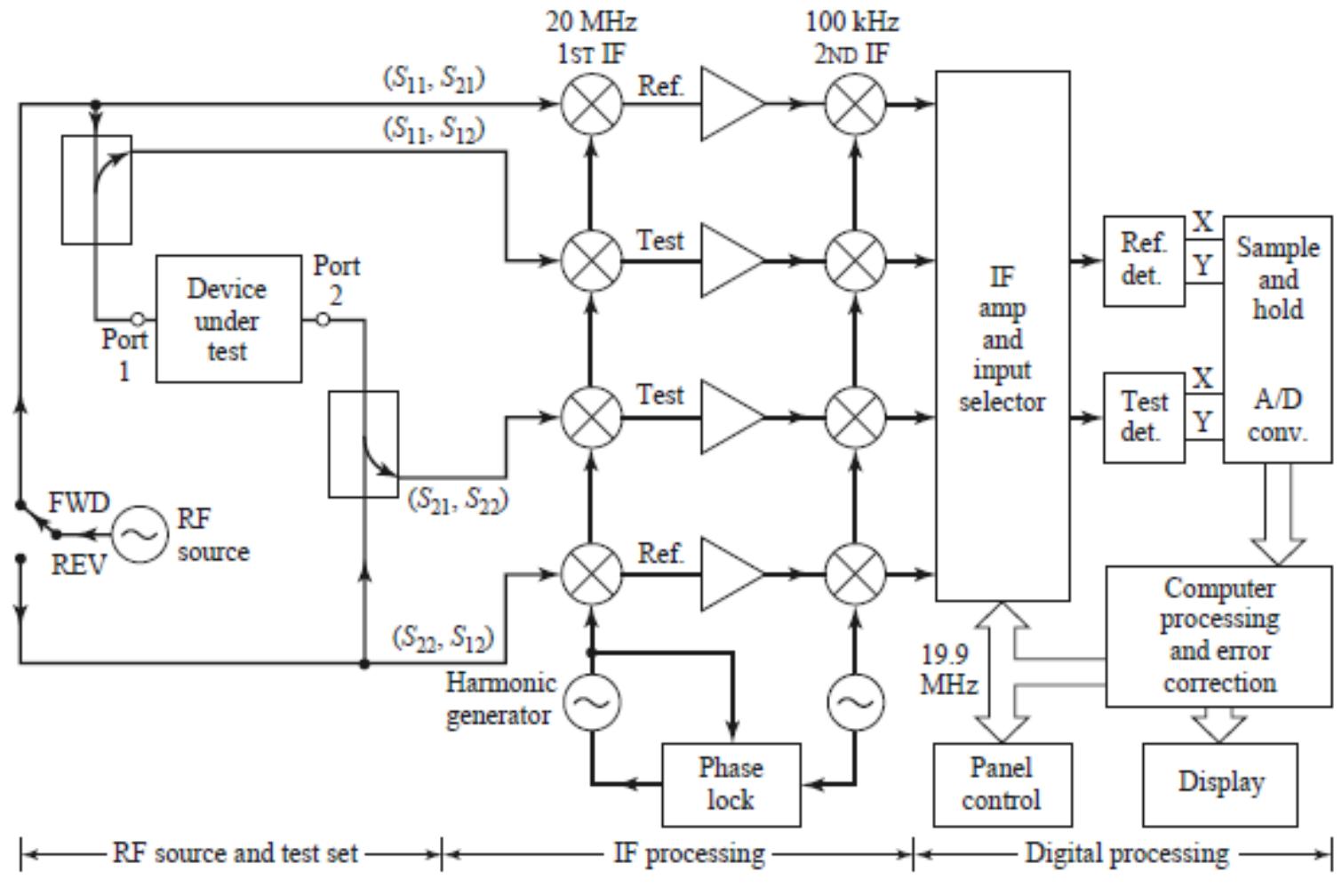
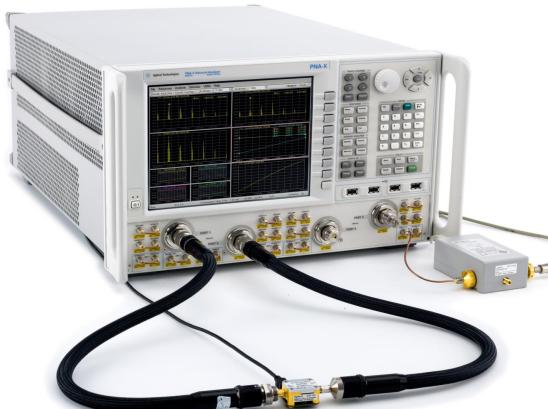
$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1N} \\ Z_{21} & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \\ Z_{N1} & \cdots & \cdots & Z_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_N \end{bmatrix},$$



$$\begin{bmatrix} V_1^- \\ V_2^- \\ \vdots \\ V_N^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1N} \\ S_{21} & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \\ S_{N1} & \cdots & \cdots & S_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^+ \\ V_2^+ \\ \vdots \\ V_N^+ \end{bmatrix},$$

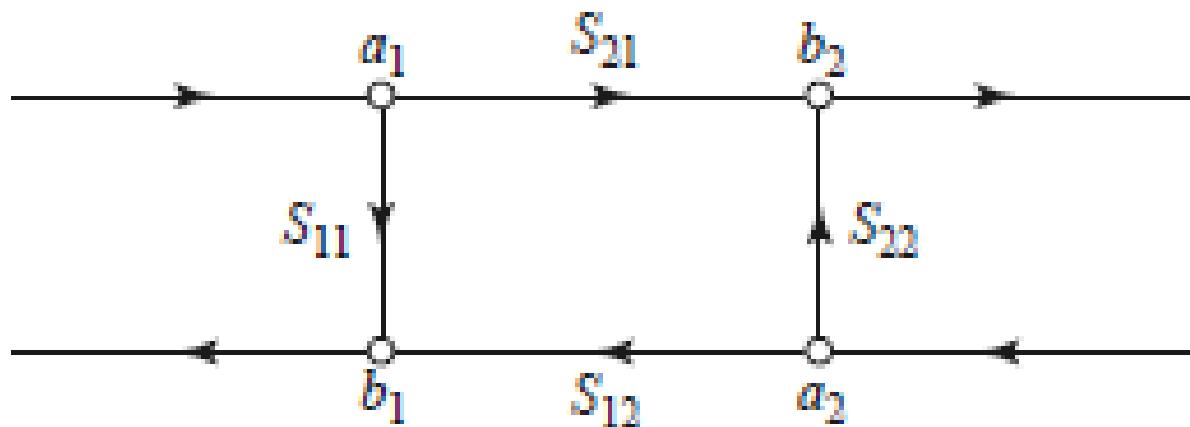
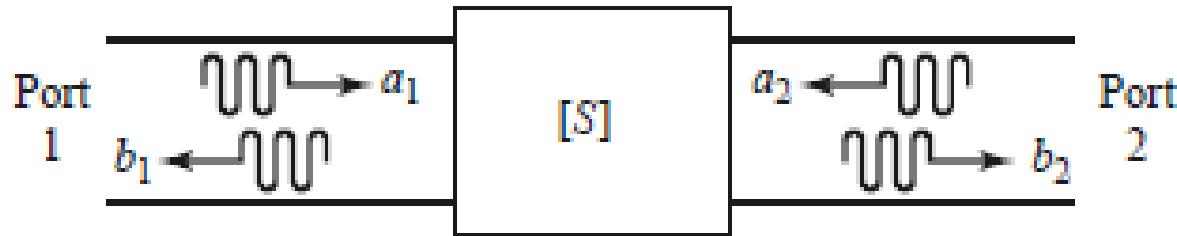
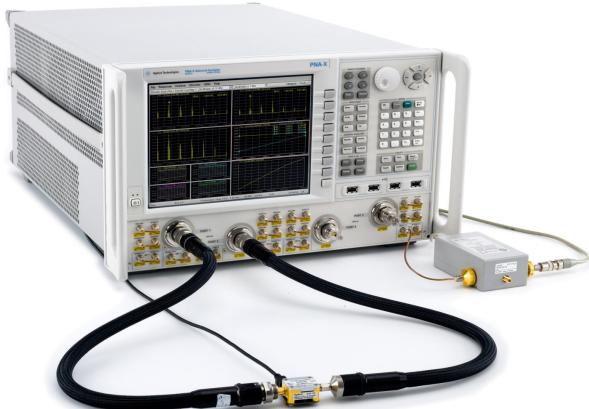
Lectura recomendada:  
Pozar, Microwave  
Engineering, 3 ed. Ch. 4.

# Analizador Vectorial de Redes (VNA)



Tomado: Pozar, Microwave Engineering

# Analizador Vectorial de Redes (VNA)



Tomado: Pozar, Microwave Engineering

# Analizador Vectorial de Redes (VNA)

¿Qué se puede medir con el VNA?

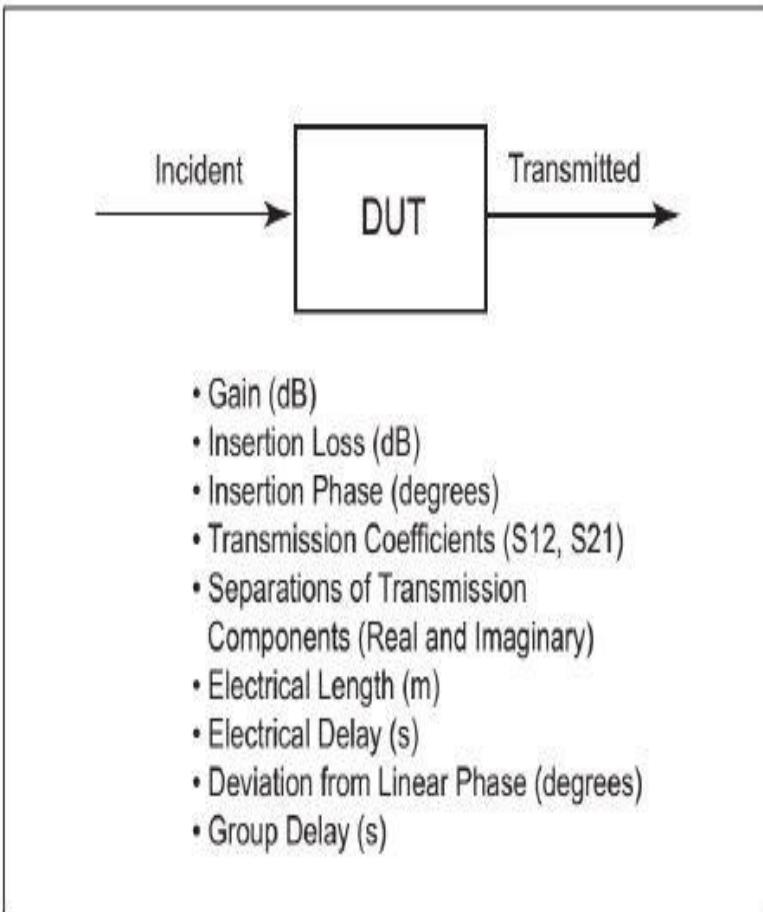


Figure 1. Transmission Measurements

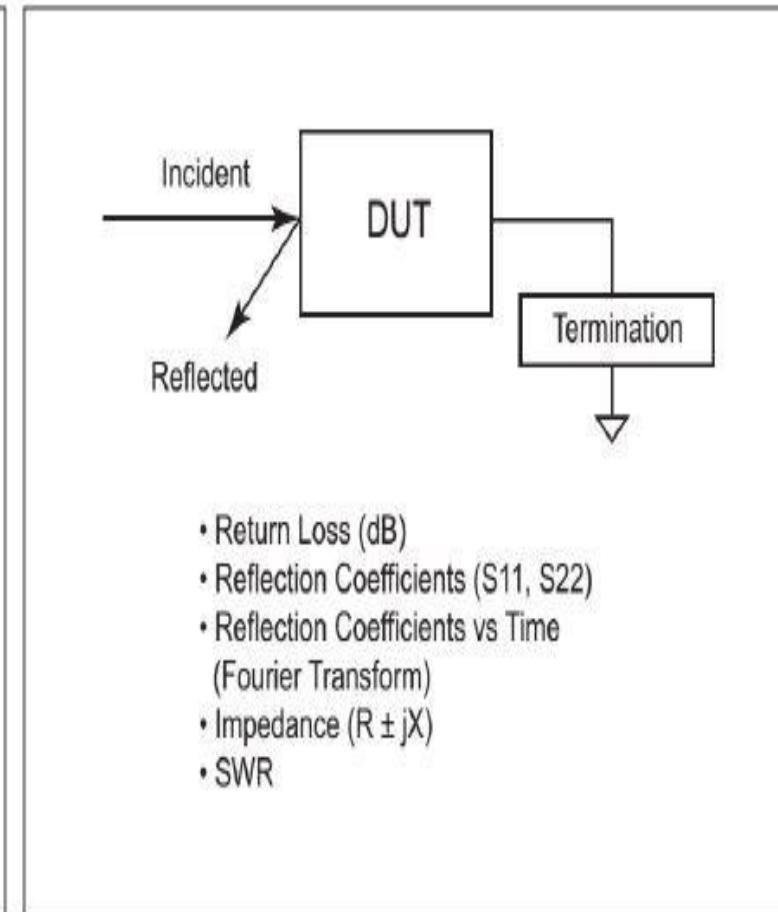


Figure 2. Reflection Measurements

# Analizador Vectorial de Redes (VNA)

Posee un medidor escalar (SNA) ignora la fase

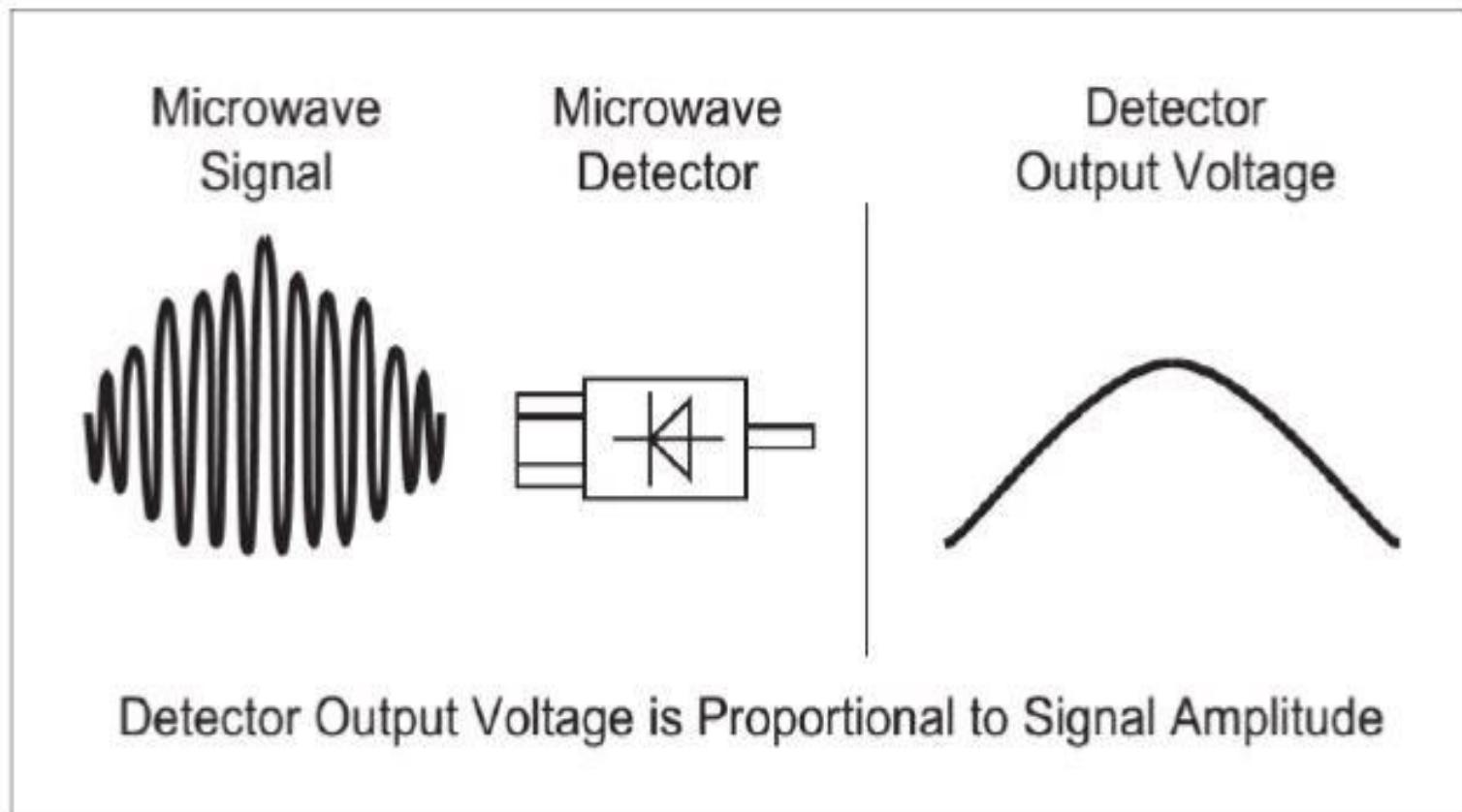
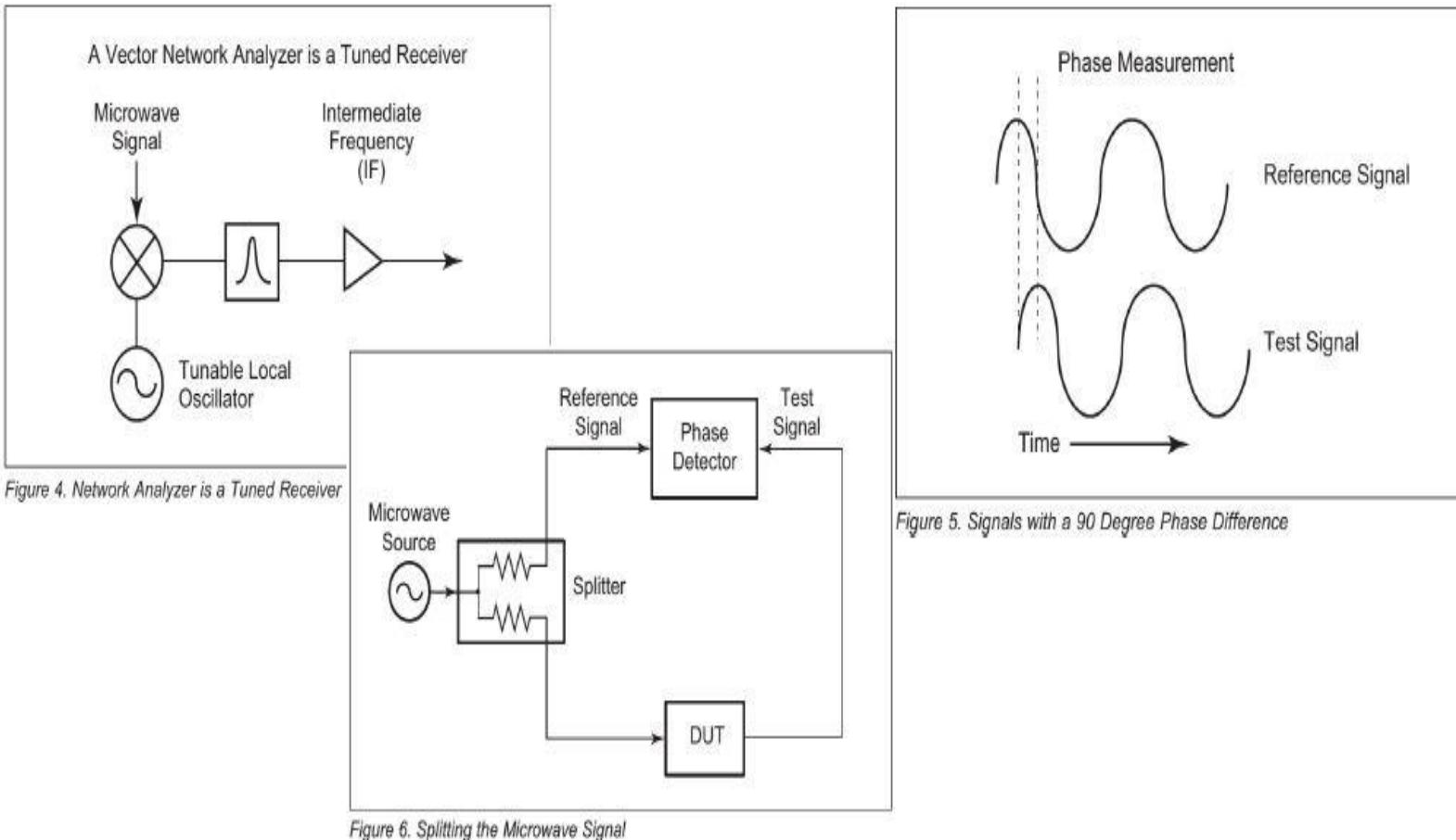


Figure 3. Scalar Analyzer Detection

# Analizador Vectorial de Redes (VNA)

El VNA incorpora la fase en las mediciones



# Analizador Vectorial de Redes (VNA)

Detecta cambios de fases en 0 y 360 grados, no más allá

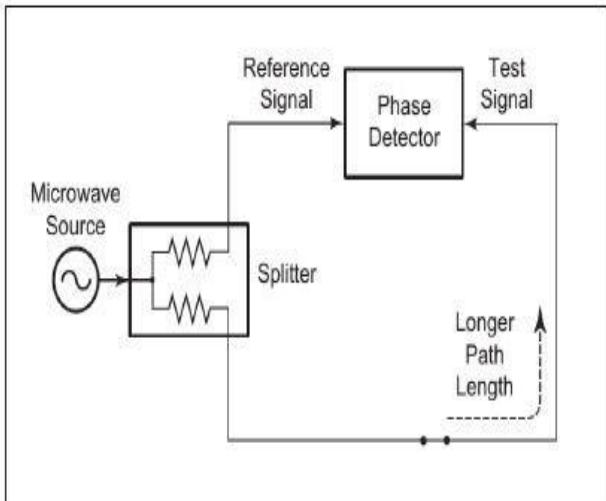


Figure 7. Split Signal where a length of line replaces the DUT

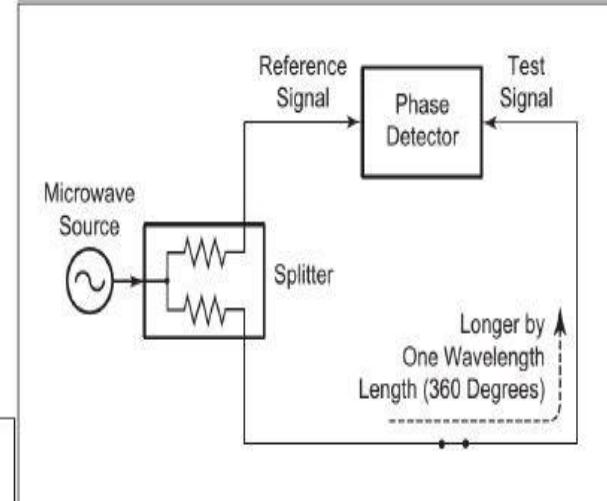


Figure 8. Split Signal where Path Length Differs by Exactly One Wavelength

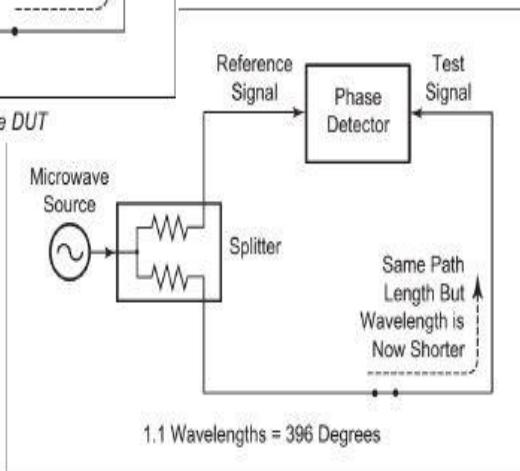


Figure 9. Split Signal where Path Length is longer than One Wavelength

# Analizador Vectorial de Redes (VNA)

Esta en capacidad de medir retardos eléctricos

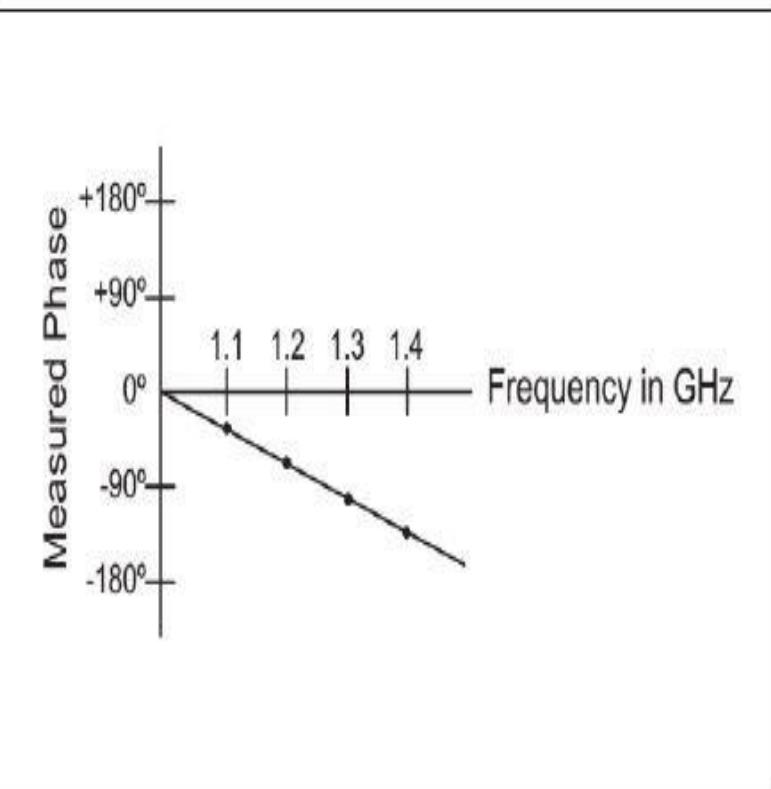


Figure 10. Electrical Delay

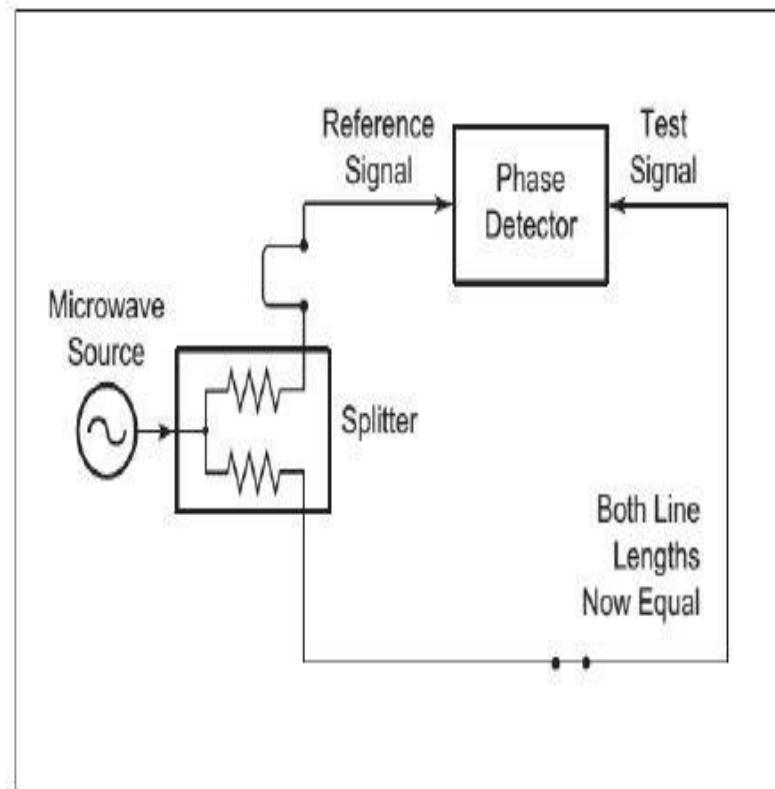


Figure 11. Split Signal where Paths are of Equal Length

# Analizador Vectorial de Redes (VNA)

Posee un software para llevar a cabo correcciones

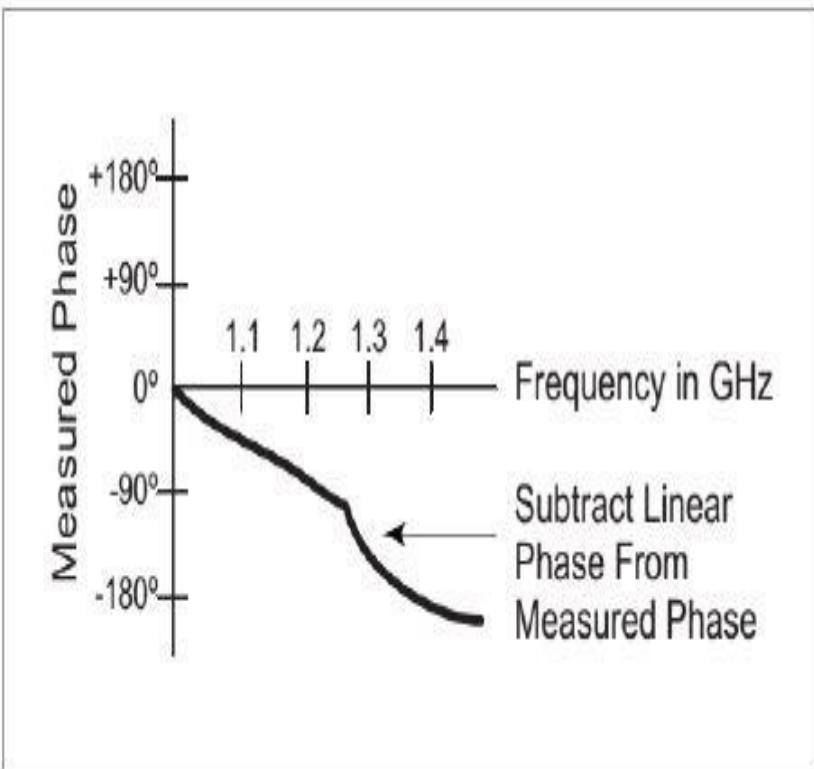


Figure 12. Phase Difference Increases Linearly with Frequency

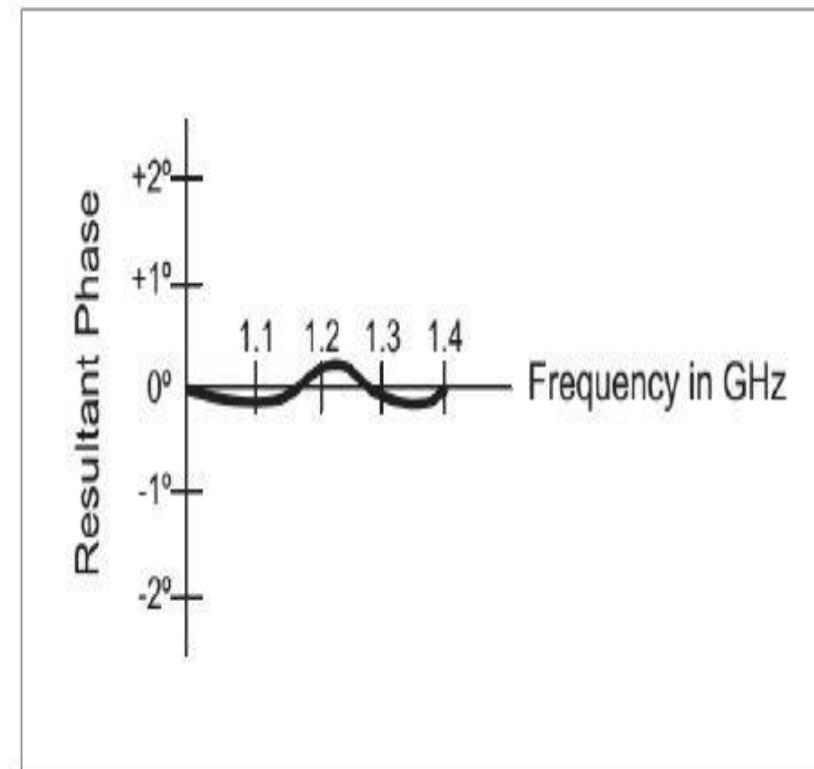


Figure 13. Resultant Phase with Path Length

# Analizador Vectorial de Redes (VNA)

Medición de parámetros S

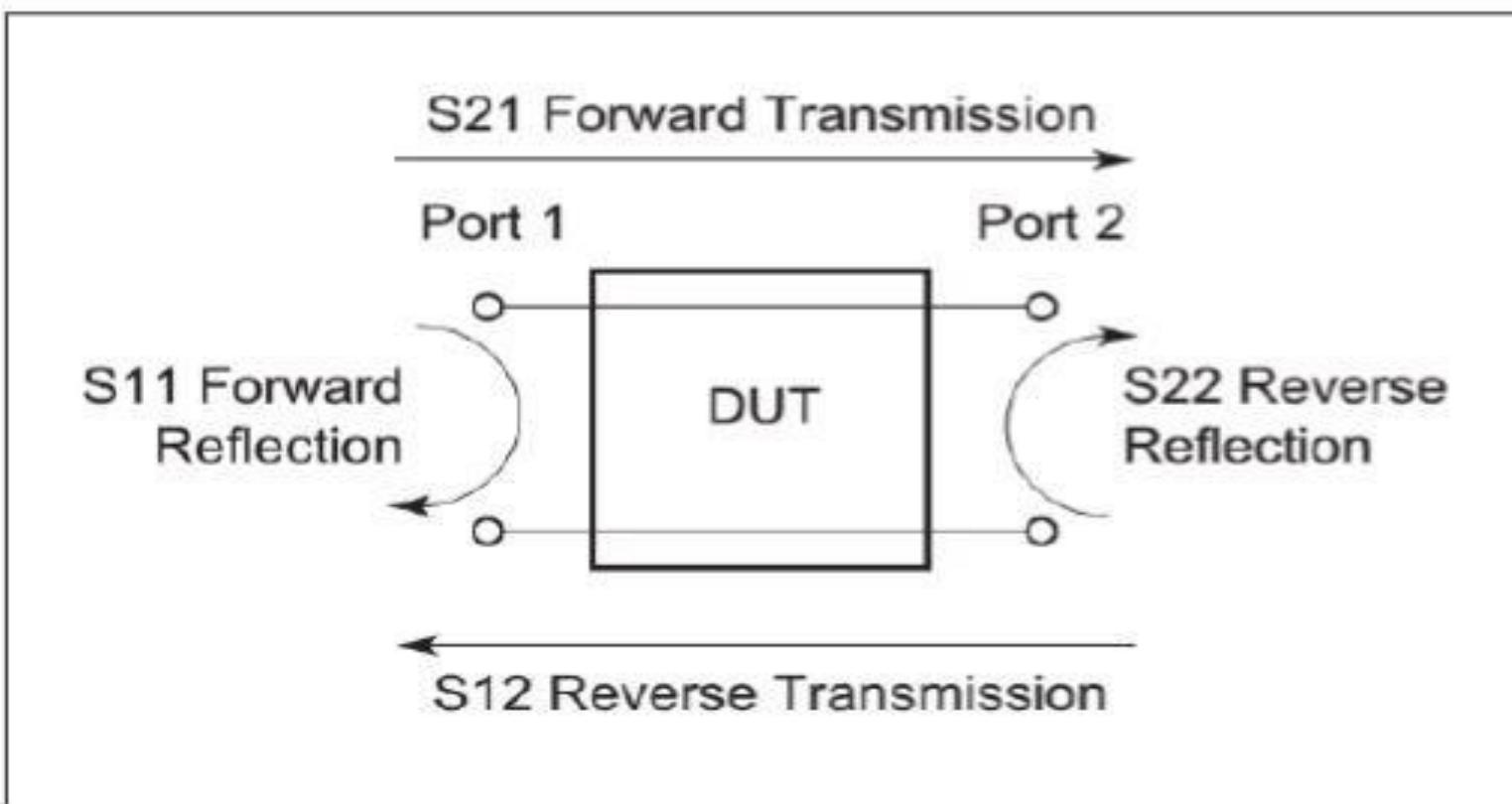


Figure 15. S-Parameters

# Analizador Vectorial de Redes (VNA)

Medición de fase

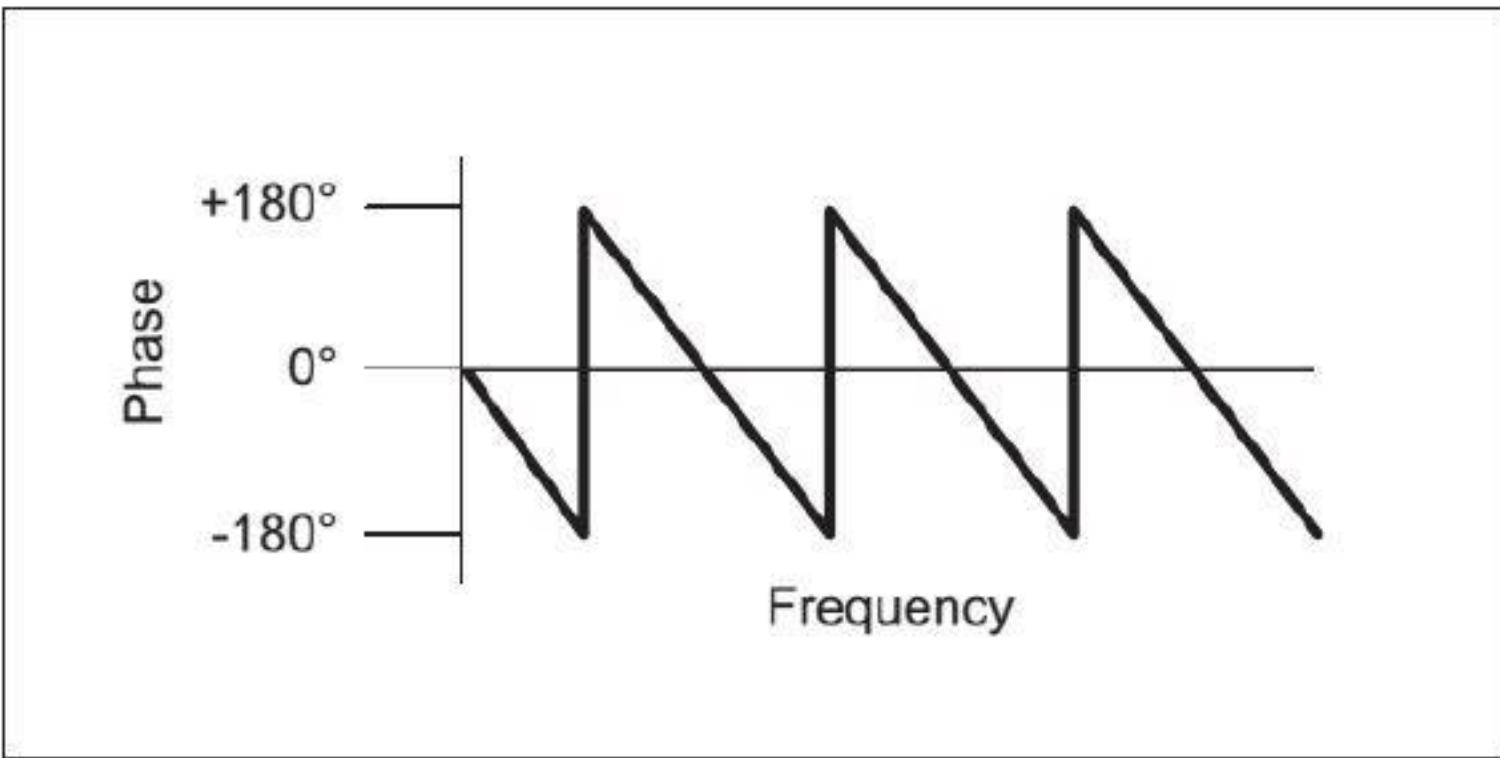


Figure 16. Linear Phase with frequency Waveform

# Analizador Vectorial de Redes (VNA)

Medición en un solo trazo

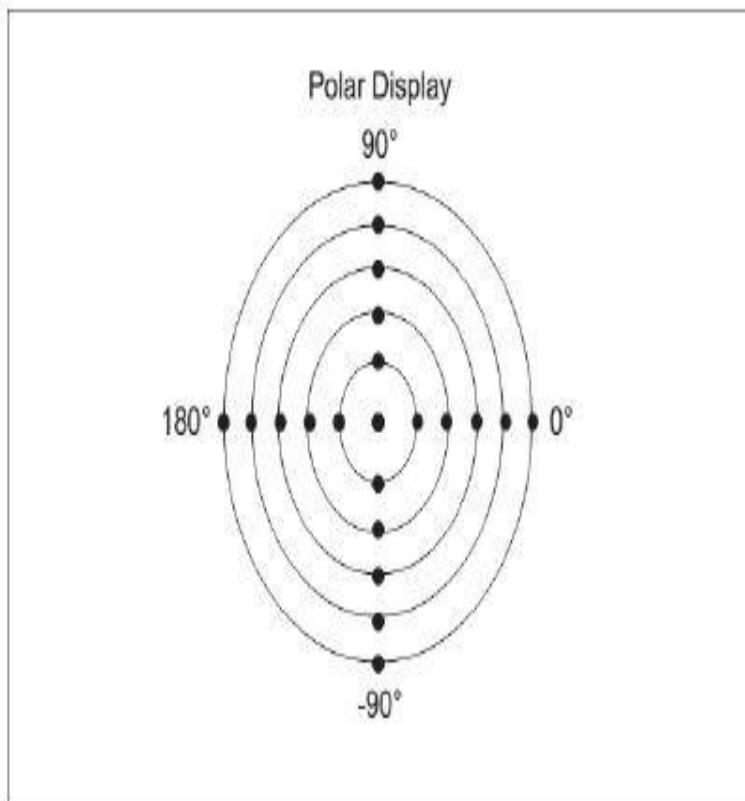


Figure 17. Polar Display

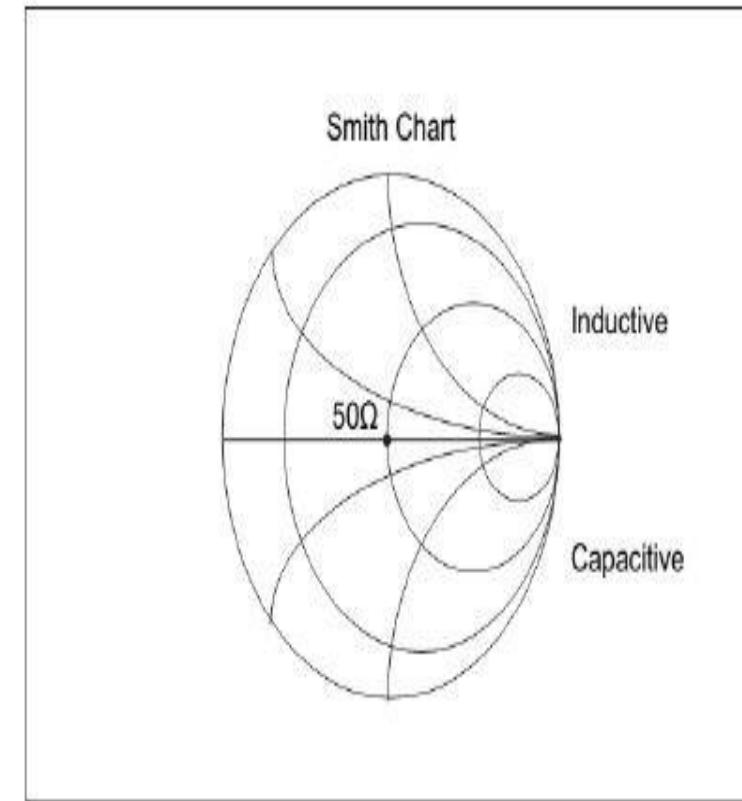


Figure 18. Smith Chart

# Analizador Vectorial de Redes (VNA)

¿Por qué es importante llevar acabo una calibración antes hacer una medición?

# Analizador Vectorial de Redes (VNA)

¿Por qué es importante llevar acabo una calibración antes hacer una medición?

La calibración es importante debido a se realiza la composición de una matriz de error que ayuda a llevar acabo un ajuste a la medición realizada por el equipo. Esta práctica debe llevarse acabo siempre antes de cualquier medición.

# Analizador Vectorial de Redes (VNA)

¿Qué es un calibrador tipo SOLT?

# Analizador Vectorial de Redes (VNA)

## ¿Qué es un calibrador tipo SOLT?

Es un calibrador que proporciona el fabricante de cada equipo donde se tiene pruebas Short-Open-Load-Thru, los cuales permiten hacer pruebas en cada puerto del equipo y corregir el eventual error de medición.

# Analizador Vectorial de Redes (VNA)



## Mechanical data

<b>Connector type</b>	R&S®ZV-Z135 model.02 R&S®ZV-Z135 model.03	3.5 mm, male 3.5 mm, female
<b>Gauge</b>	R&S®ZV-Z135 model.02 R&S®ZV-Z135 model.03	0 mm to 0.076 mm 0 mm to 0.076 mm
<b>Inner conductor material</b>		Au-plated age-hardened CuBe alloy
<b>Outer conductor material</b>		CuSnZn-plated Cu alloy
<b>Body</b>		blue anodized Al

# Analizador Vectorial de Redes (VNA)



Electrical data of R&S®ZV-Z135 (3.5 mm, female)

<b>Frequency range</b>	0 Hz to 15 GHz	
<b>Through standard</b>		
Return loss	0 Hz to 4 GHz	typ. 36 dB
	4 GHz to 8 GHz	typ. 30 dB
	8 GHz to 13 GHz	typ. 27 dB
	13 GHz to 15 GHz	typ. 25 dB
Insertion loss		typ. $0.02 \text{ dB} \cdot \sqrt{\text{f/GHz}}$
Electrical length		typ. 38.25 mm
<b>Open standard</b>		
Fringing capacitance	$C_0$	-7.425 fF
	$C_1$	2.47 fF/GHz
	$C_2$	-0.226 fF/GHz <sup>2</sup>
	$C_3$	0.00618 fF/GHz <sup>3</sup>
Offset length		9.24 mm
Loss		typ. $0.01 \text{ dB} \cdot \sqrt{\text{f/GHz}}$
<b>Short standard</b>		
Inductance	$L_0$	27.98 pH
	$L_1$	-5.01 pH/GHz
	$L_2$	0.3038 pH/GHz <sup>2</sup>
	$L_3$	-0.00613 pH/GHz <sup>3</sup>
Offset length		9.2 mm
Loss		typ. $0.01 \text{ dB} \cdot \sqrt{\text{f/GHz}}$
<b>Match standard</b>		
DC resistance		$50.0 \Omega \pm 0.5 \Omega$
<b>Return loss</b>		
	0 Hz to 4 GHz	typ. 42 dB
	4 GHz to 8 GHz	typ. 37 dB
	8 GHz to 13 GHz	typ. 30 dB
	13 GHz to 15 GHz	typ. 24 dB
Maximum input power		0.5 W

Tomado de: [http://anlage.umd.edu/Anritsu\\_understanding-vna-calibration.pdf](http://anlage.umd.edu/Anritsu_understanding-vna-calibration.pdf)  
[https://www.rohde-schwarz.com/sg/product/networkanalyzer\\_acc-productstartpage\\_63493-415488.html](https://www.rohde-schwarz.com/sg/product/networkanalyzer_acc-productstartpage_63493-415488.html)

# Analizador Vectorial de Redes (VNA)



**Shorts** - Defined by an S-parameter file or a model consisting of a transmission line length and a frequency-dependent inductance. The inductance is defined as

$$L = L_0 + L_1 \cdot f + L_2 \cdot f^2 + L_3 \cdot f^3$$

**Opens** - Defined by an S-parameter file or a model consisting of a transmission line length and a frequency-dependent capacitance. The capacitance is defined as

$$C = C_0 + C_1 \cdot f + C_2 \cdot f^2 + C_3 \cdot f^3$$

**Loads** - Defined by an S-parameter file or a model consisting of a transmission line length, a shunt capacitance, a resistance, and a series inductance, as shown in Figure 4.

**Thru** - Modeled as a transmission line length with some frequency dependent loss. A root-f frequency dependence of that loss is assumed. If 0 is entered for  $f_0$  (the reference frequency), the loss is assumed to be constant with frequency.

$$\text{Loss } (f) = \text{Loss } (f_0) \sqrt{\frac{f}{f_0}}$$

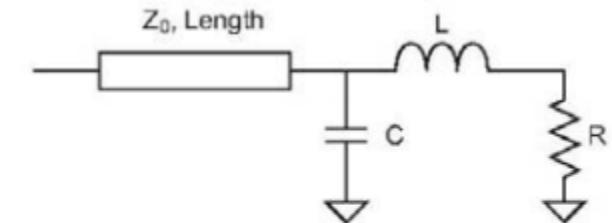


Figure 4 - A graphic representation of the load model

# Analizador Vectorial de Redes (VNA) ---



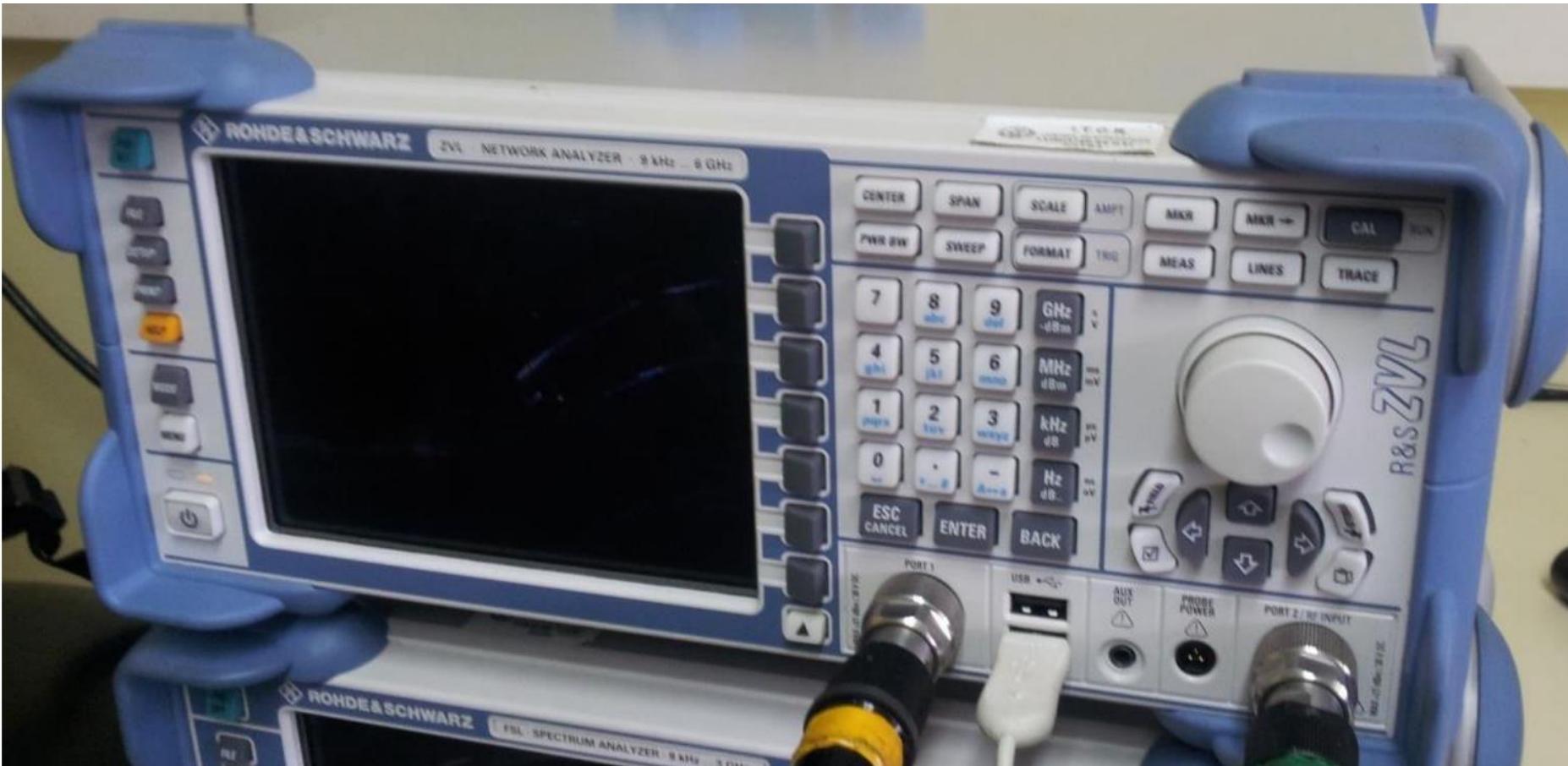
En equipos con más puertos y mayores anchos de banda se utiliza un calibrador más robusto.

Tomado de: [https://www.maurymw.com/Precision/3.5mm\\_Cal\\_Kits.php](https://www.maurymw.com/Precision/3.5mm_Cal_Kits.php)

# Analizador Vectorial de Redes (VNA)

¿Cómo se lleva acabo la calibración tipo SOLT en un VNA?

# Analizador Vectorial de Redes (VNA)



# Analizador Vectorial de Redes (VNA)

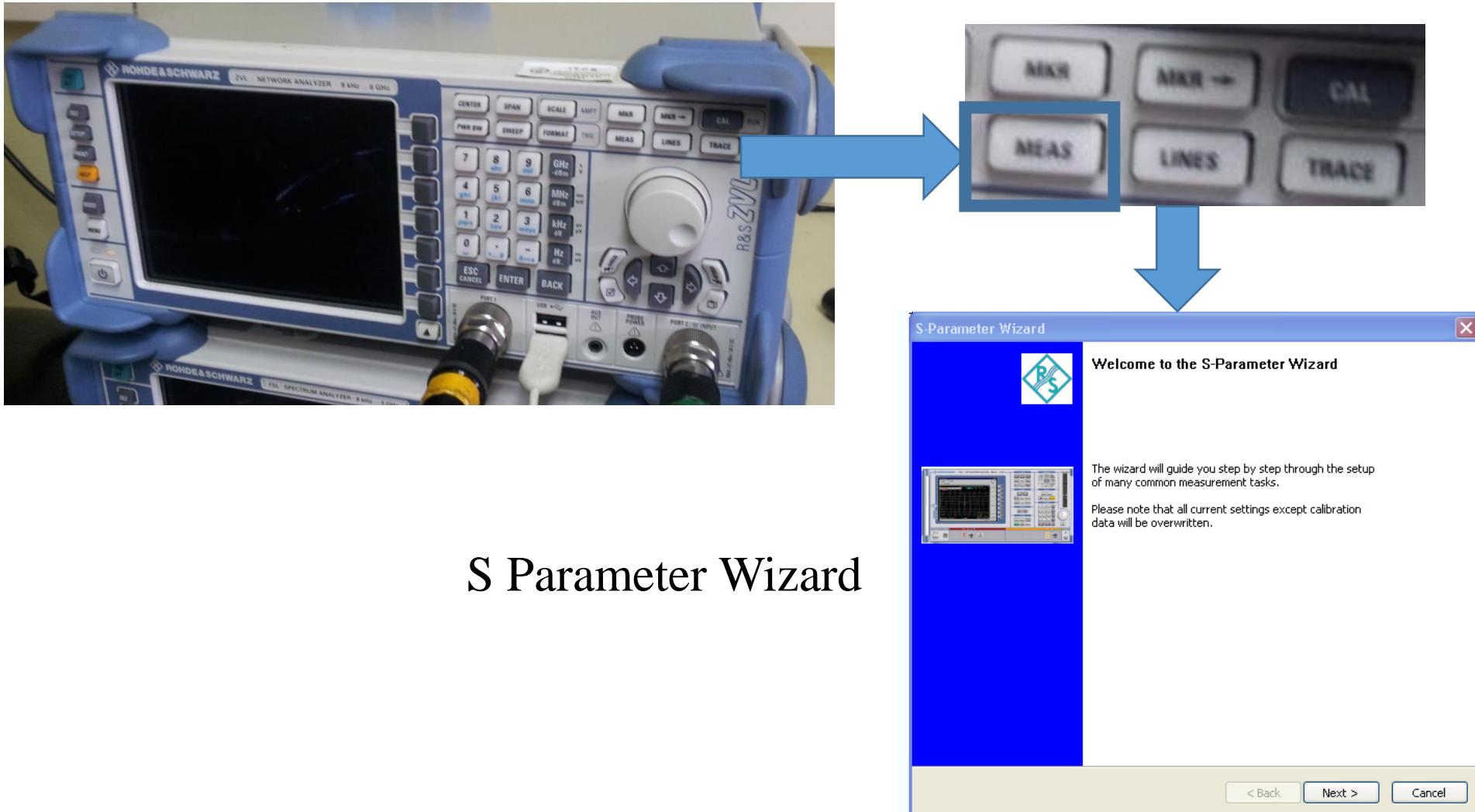


Kit de Cables tipo N a  $50 \Omega$   
Calibración a  $50 \Omega$

Type	Parameters calibrated	Uses
Full 2-port	$S_{11}$ , $S_{12}$ , $S_{21}$ , and $S_{22}$	Most complete calibration
Full 1-port	$S_{11}$ or $S_{22}$ or $S_{11}$ and $S_{22}$	Reflection only
1-path 2-port	$S_{11}$ and $S_{21}$ or $S_{22}$ and $S_{12}$	1-port reflection plus simple transmission (faster, lower transmission accuracy unless DUT very lossy)
Frequency response	Any one parameter (or pairs of symmetric parameters)	Normalization only. fast, lower accuracy

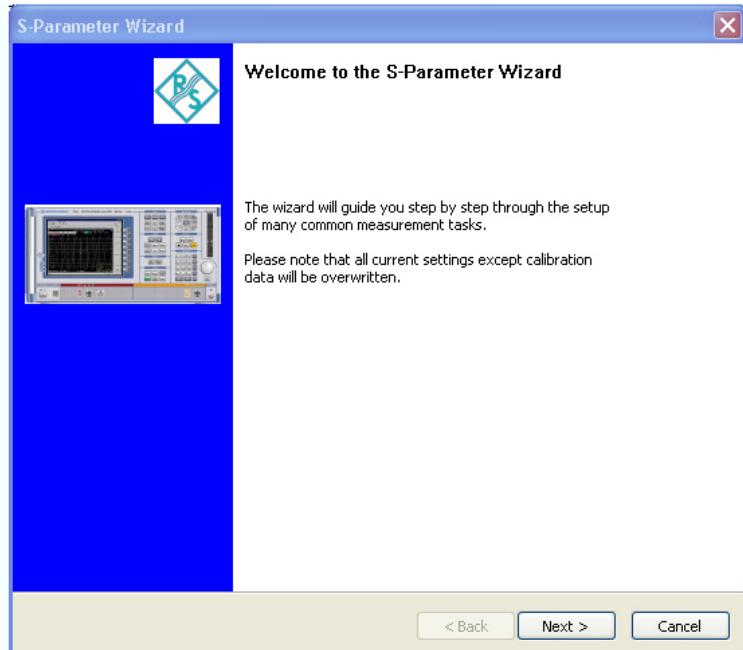
Tomado de: [http://anlage.umd.edu/Anritsu\\_understanding-vna-calibration.pdf](http://anlage.umd.edu/Anritsu_understanding-vna-calibration.pdf)

# Analizador Vectorial de Redes (VNA)

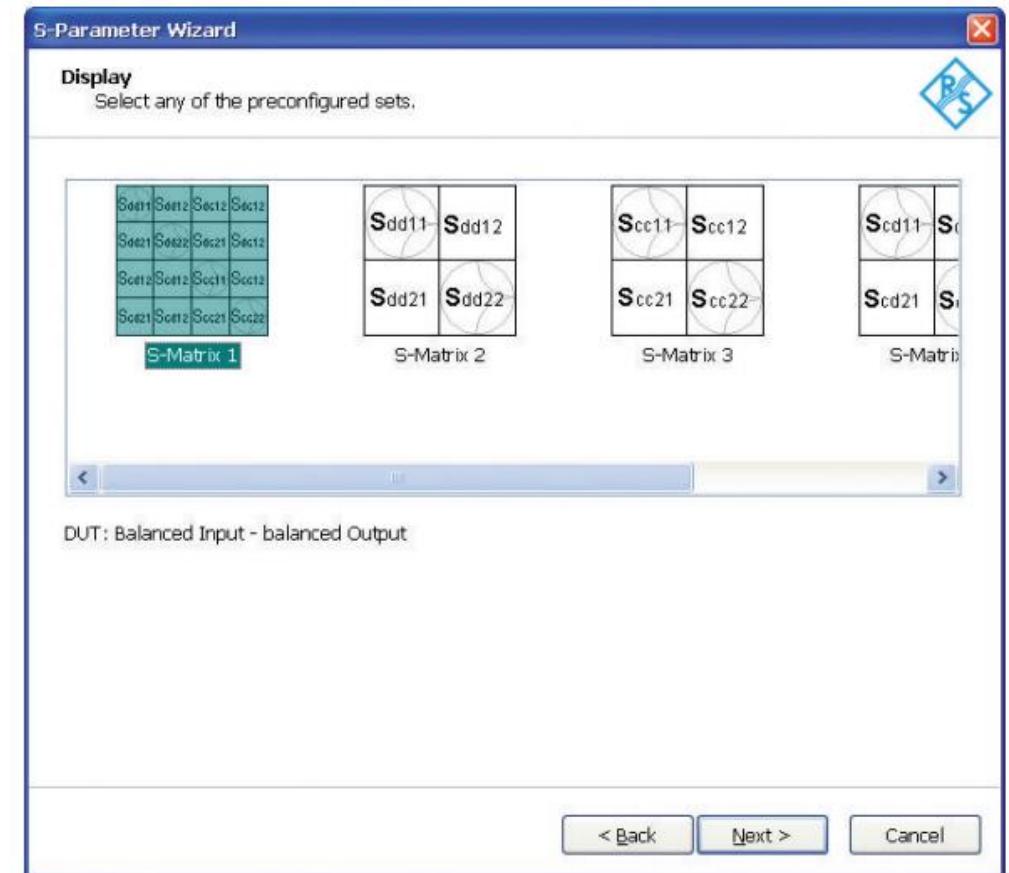
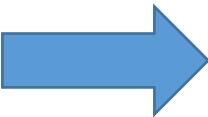


Tomado de: [http://www.av.it.pt/Medidas/data/Manuais%20&%20Tutoriais/40b%20-%20VNA%20-%20ZVB20/CD/documents/Help\\_Files/WebHelp\\_ZVT/MMI\\_Reference/System/Measurement\\_Wizard.htm](http://www.av.it.pt/Medidas/data/Manuais%20&%20Tutoriais/40b%20-%20VNA%20-%20ZVB20/CD/documents/Help_Files/WebHelp_ZVT/MMI_Reference/System/Measurement_Wizard.htm)

# Analizador Vectorial de Redes (VNA)



S Parameter Wizard

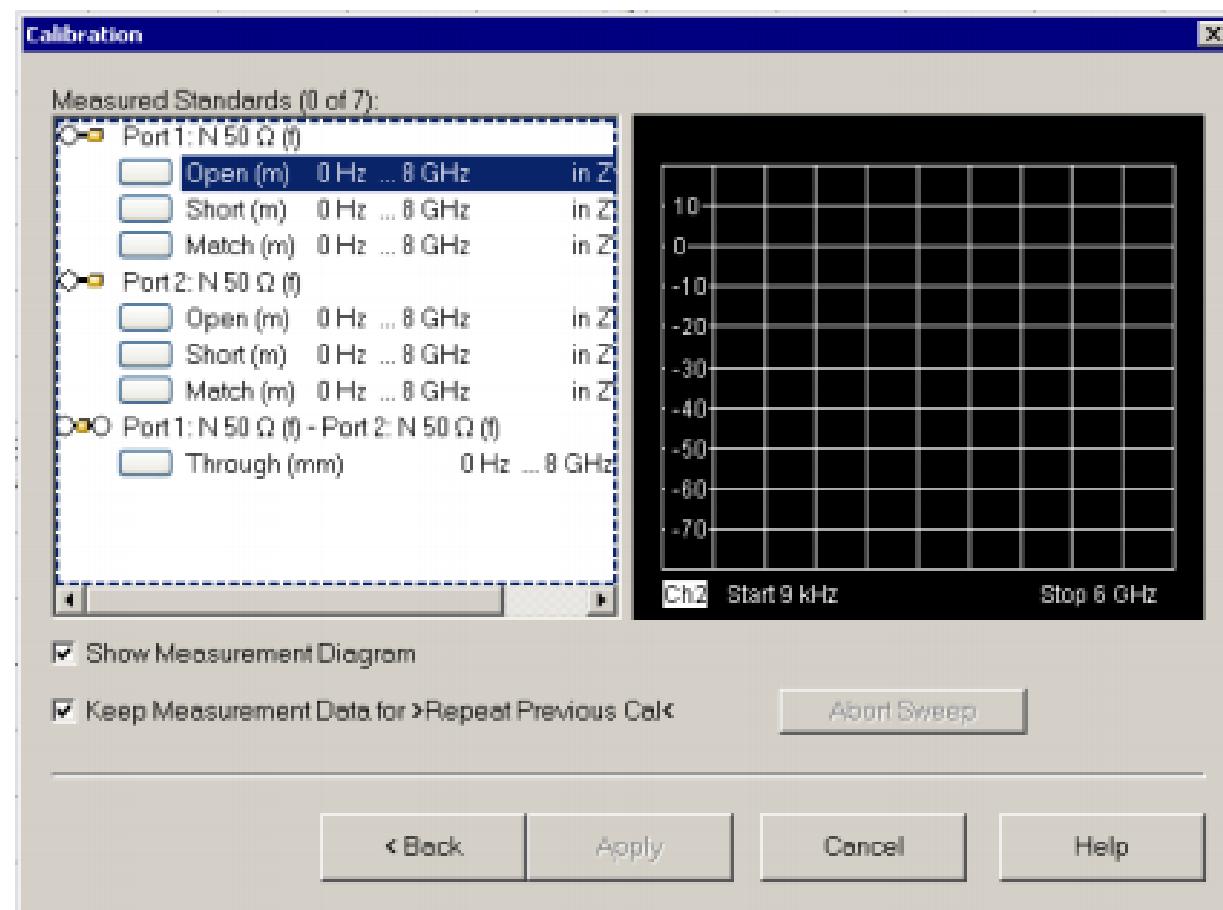


Matriz de Parámetros S  
Con 1000 puntos ó más según el caso

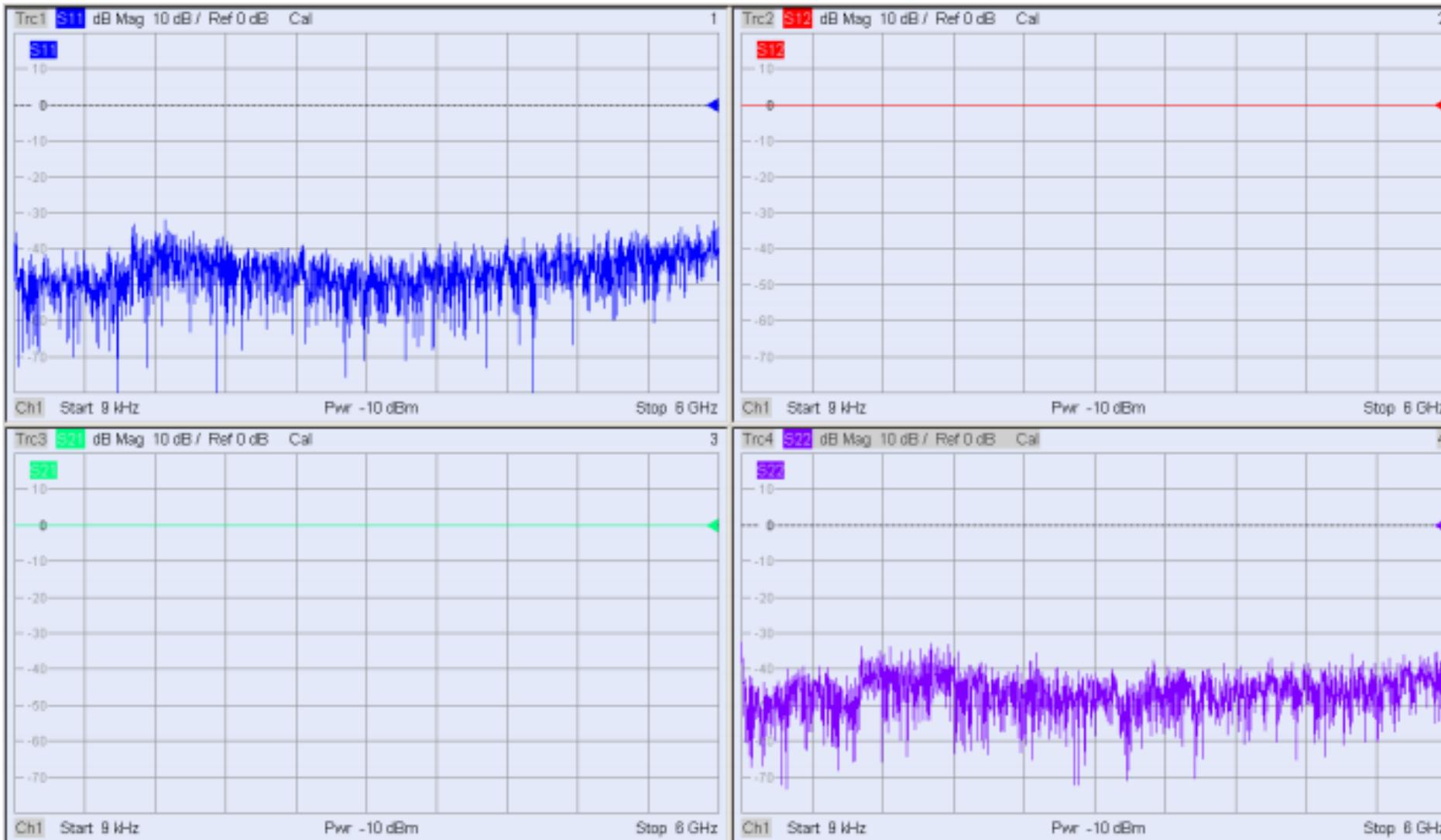
112

Tomado de: [http://www.av.it.pt/Medidas/data/Manuais%20&%20Tutoriais/40b%20-%20VNA%20-%20ZVB20/CD/documents/Help\\_Files/WebHelp\\_ZVT/MMI\\_Reference/System/Measurement\\_Wizard.htm](http://www.av.it.pt/Medidas/data/Manuais%20&%20Tutoriais/40b%20-%20VNA%20-%20ZVB20/CD/documents/Help_Files/WebHelp_ZVT/MMI_Reference/System/Measurement_Wizard.htm)

# Analizador Vectorial de Redes (VNA)



# Analizador Vectorial de Redes (VNA)



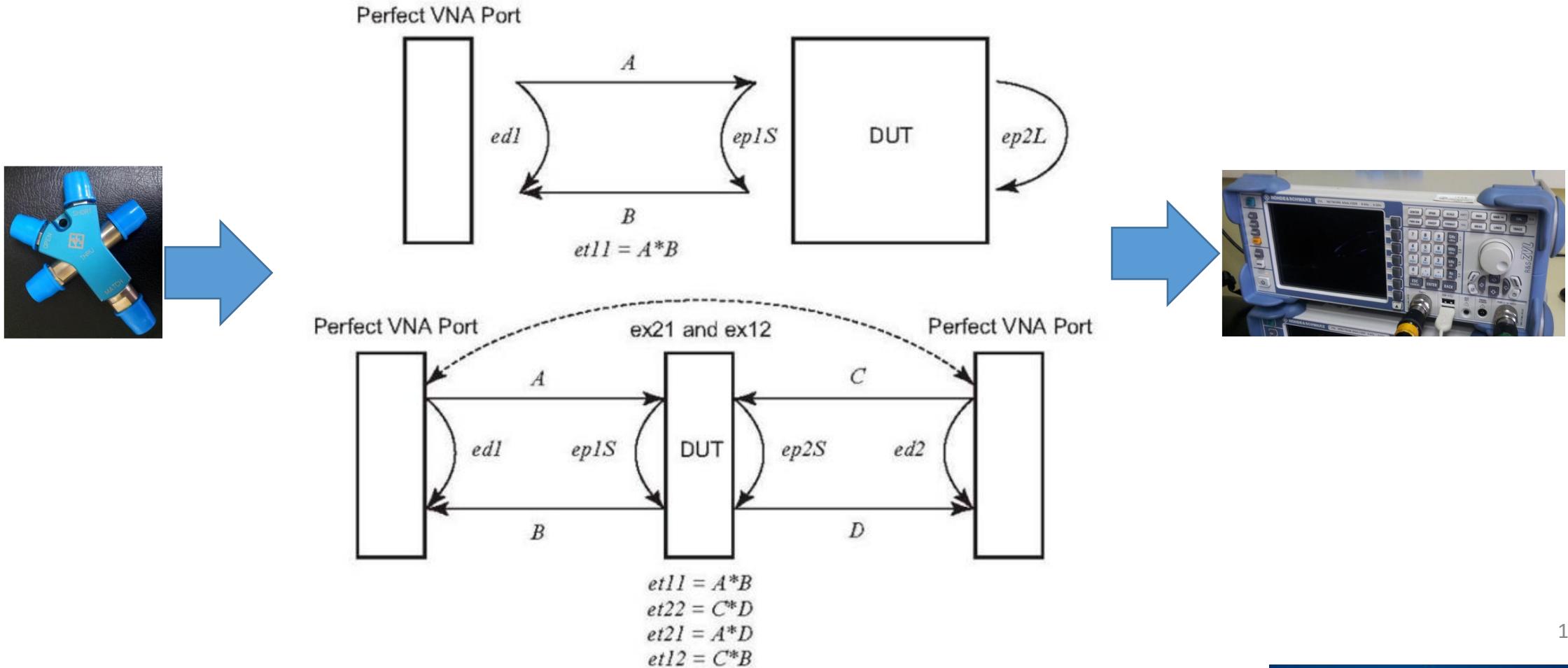
# Analizador Vectorial de Redes (VNA)

¿Pero realmente qué fue lo que sucedió en la etapa de calibración?

# Analizador Vectorial de Redes (VNA)

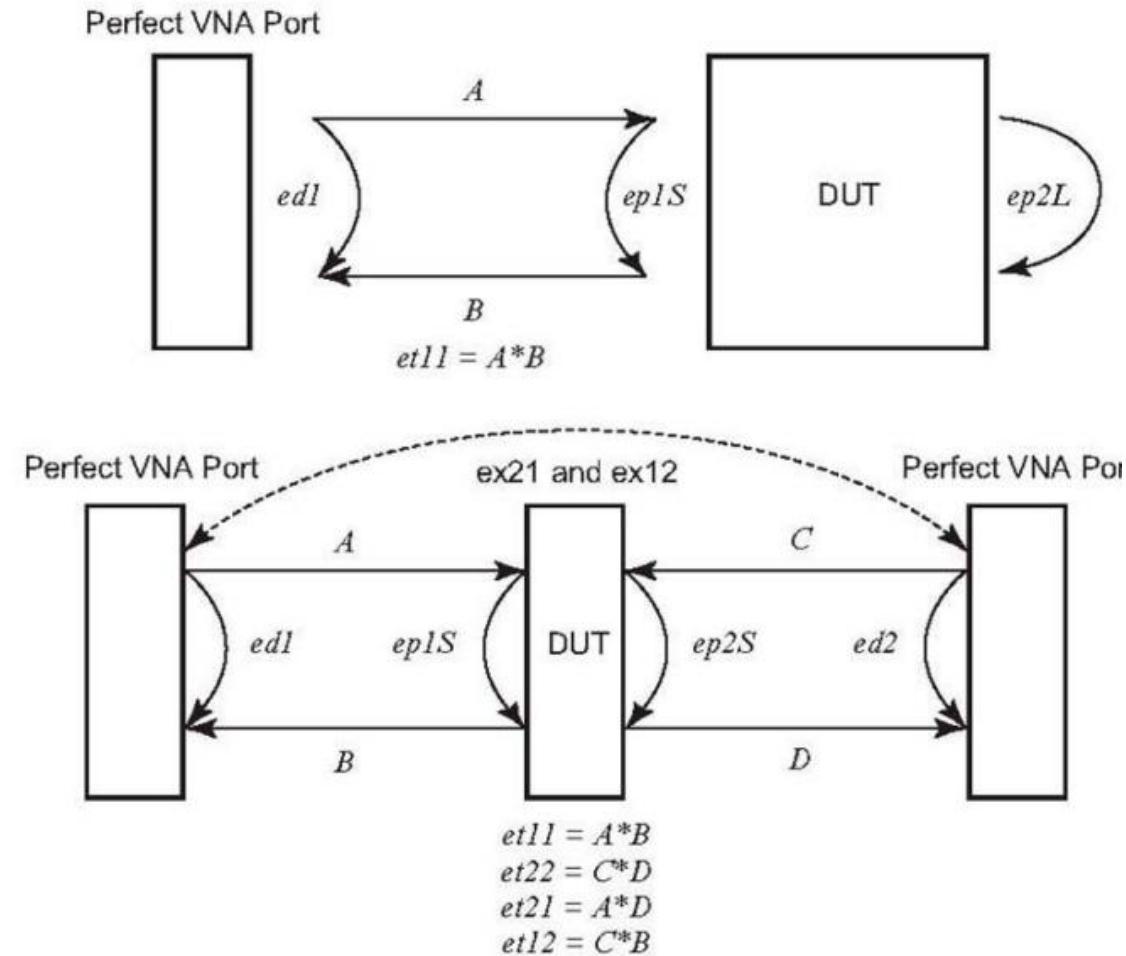


# Analizador Vectorial de Redes (VNA)



Tomado de: [http://anlage.umd.edu/Anritsu\\_understanding-vna-calibration.pdf](http://anlage.umd.edu/Anritsu_understanding-vna-calibration.pdf)

# Analizador Vectorial de Redes (VNA)



1. **Directivity (ed1 and ed2)** - Describes the finite directivity of the bridges or directional couplers in the system. Partially includes some internal mismatch mechanisms that contribute to effective directivity.
2. **Source Match (ep1S and ep2S)** - Describes the return loss of a driving port.
3. **Load Match (ep1L and ep2L)** - Describes the return loss of a terminating port. In the 8-term error models used as a basis for the LRL/ALRM and other calibration families, load match is treated the same as source match, but the incoming data is pre-corrected to take into account the measured difference in match between driving and terminating states.
4. **Reflection Tracking (et11 and et22)** - Describes the frequency response of a reflect measurement, including loss behaviors due to the couplers, transmission lines, converters, and other components.
5. **Transmission Tracking (et12 and et21)** - Same as above, but for the transmission paths. The tracking terms are not entirely independent and this fact is used in some of the calibration algorithms.
6. **Isolation (ex12 and ex21)** - This term takes into account certain types of internal (e.g., non-DUT dependent) leakages that may be present in hardware. It is largely present for legacy reasons and is rarely used in practice since this type of leakage is typically very small in modern VNAs. These terms are handled somewhat differently from the others and will be covered later in this guide.

Tomado de: [http://anlage.umd.edu/Anritsu\\_understanding-vna-calibration.pdf](http://anlage.umd.edu/Anritsu_understanding-vna-calibration.pdf)

# Bibliografía

- [1] Hayt, W. *Teoría Electromagnética*, Mc Graw-Hill, Octava Edición, 2013.
- [2] Sadiku M. *Elementos de Electromagnetismo*, Alfaomega, Traducción de la tercera edición en inglés, México, 2004.
- [3] Pozar, D.M., *Microwave Engineering*, 3 Ed. Wiley. 2005
- [4] Caspers, F, Basic Concepts: The Smith Chart, 2010.

Para más información pueden ingresar a: tec-digital ó <http://www.ie.tec.ac.cr/sarriola/>

Esta presentación se ha basado parcialmente en compilación para semestre anteriores de cursos de Laboratorio de Teoría Electromagnética II y Laboratorio de Comunicaciones Eléctricas por Aníbal Coto-Cortés, Renato Rimolo-Donadio, Sergio Arriola-Valverde y Luis Carlos Rosales.

**TEC** | Tecnológico  
de Costa Rica