

Medición de parámetros de componentes

Parte 1: AF y teoría RF

Carlos A. Zerbini

Cátedra Medidas Electrónicas 2

Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Córdoba

Año lectivo 2019

Agenda

- ❑ Mediciones en baja frecuencia
 - ❑ Trazadores de curvas
 - ❑ Parámetros del amplificador operacional (TP N° 1)
 - ❑ Parámetros de componentes digitales (TP N° 1)
- ❑ Mediciones en alta frecuencia
 - ❑ Conceptos importantes
 - ❑ Líneas de transmisión y ondas progresivas
 - ❑ Comportamientos lineal y no lineal
 - ❑ Parámetros S y diagrama de Smith
 - ❑ Voltímetro vectorial
 - ❑ Analizador vectorial de redes

Agenda

- ❑ Mediciones en baja frecuencia
 - ❑ Trazadores de curvas
 - ❑ Parámetros del amplificador operacional (TP N° 1)
 - ❑ Parámetros de componentes digitales (TP N° 1)
- ❑ Mediciones en alta frecuencia
 - ❑ Conceptos importantes
 - ❑ Líneas de transmisión y ondas progresivas
 - ❑ Comportamientos lineal y no lineal
 - ❑ Parámetros S y diagrama de Smith
 - ❑ Voltímetro vectorial
 - ❑ Analizador vectorial de redes

Parámetros de componentes en baja frecuencia: Trazadores de curvas

- **Aplica una tensión variable y mide la corriente resultante.** Se obtienen curvas **corriente vs. tensión** entre dos terminales.
- Se puede **parametrizar** respecto a una **corriente o tensión de entrada**, obteniendo **función de transferencia entrada-salida**
- **Instrumento muy versátil**, utilizado para obtener **curvas de hoja de datos, comparación de distintos componentes, o verificación de funcionamiento correcto/fugas, etc.**
- Se puede adquirir como un instrumento integrado con todos los controles, o utilizar como **un accesorio del osciloscopio (mucho menor costo, para aplicaciones comunes)**

https://www.changpuak.ch/electronics/Curve_Tracer_advanced.php

<http://www.techlib.com/electronics/curvetrace.html>

<https://www.instructables.com/id/Transistor-Curve-Tracer/>

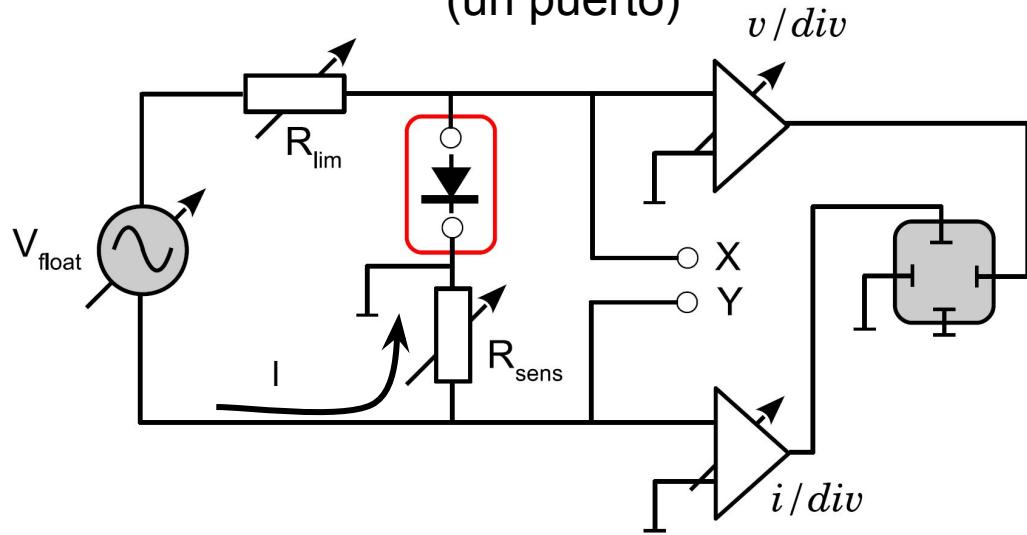
<http://www.jammarcade.net/simple-component-tester-a-k-a-octopus-curve-tracer/>

<http://www.electronics-lab.com/diy-generic-curve-tracer/>

<https://www.youtube.com/watch?v=Gwo3pEH7hUE>

<https://www.youtube.com/watch?v=c-y8UmoHbtw>

Trazador de curvas: componentes de dos terminales (un puerto)



- Corto / circuito abierto
- Resistencias, capacitores, inductores
- Diodos / zener / tunel
- Diacs

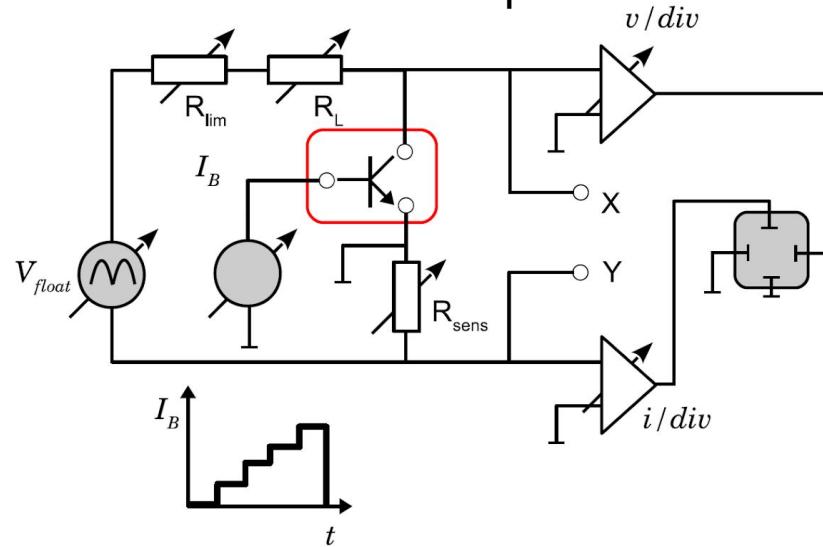
La fuente de tensión es flotante.

R_{lim} actúa como resistencia limitadora de corriente, a fin de controlar la máxima potencia en el dispositivo.

R_{sens} es una resistencia calibrada, cuya caída de tensión es directamente proporcional a la corriente en el dispositivo.

Los instrumentos específicos incluyen los amplificadores horizontal/vertical y la pantalla **ya calibrada en tensión/corriente**. En instrumentos de bajo costo, se lleva a un osciloscopio en modo X-Y.

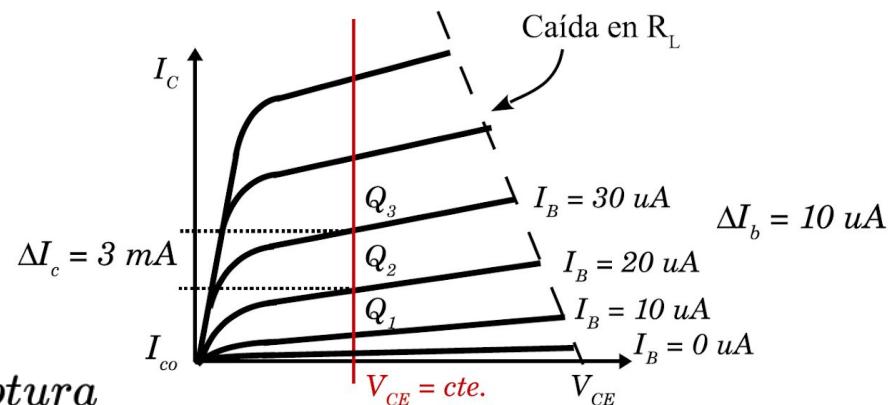
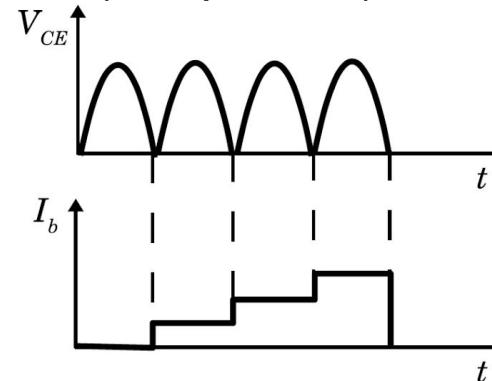
Trazador de curvas: componentes de tres terminales (dos puertos)



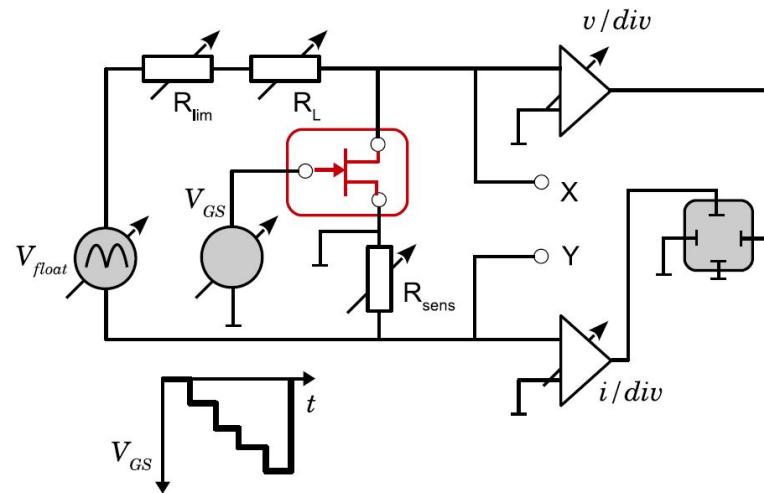
$$h_{fe} = \beta_{CA} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \Big|_{V_{CE}=cte} = \frac{3mA}{10\mu A} = 300$$

$$r_d = \frac{1}{h_{oe}} = \frac{\Delta v_{CE}}{\Delta I_C} \Big|_{I_b=cte} = \frac{40V}{2mA} = 20K\Omega$$

$BV_{CE0}, BV_{CES}, BV_{CER}$ = tensiones de ruptura



Trazador de curvas: componentes de tres terminales (dos puertos)

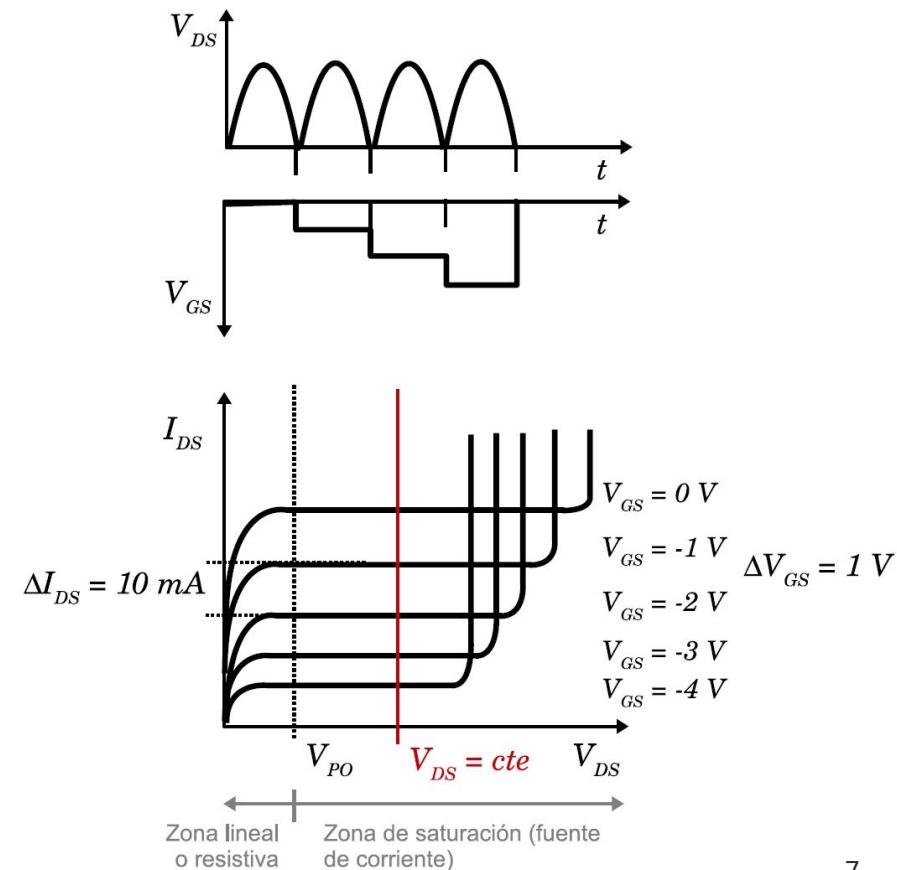


$$g_m = \frac{\Delta I_{DS}}{\Delta V_{GS}} \Big|_{V_{DS}=\text{cte}} = \frac{10mA}{1V} = 10mS$$

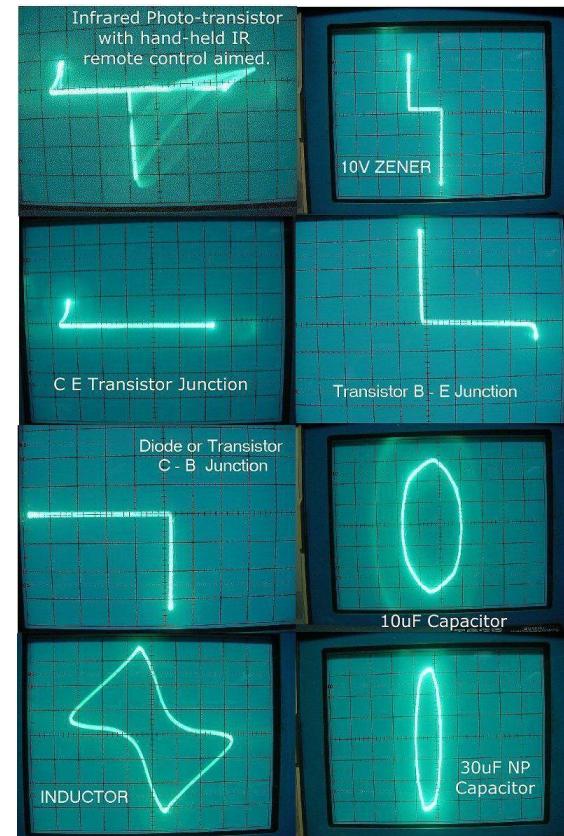
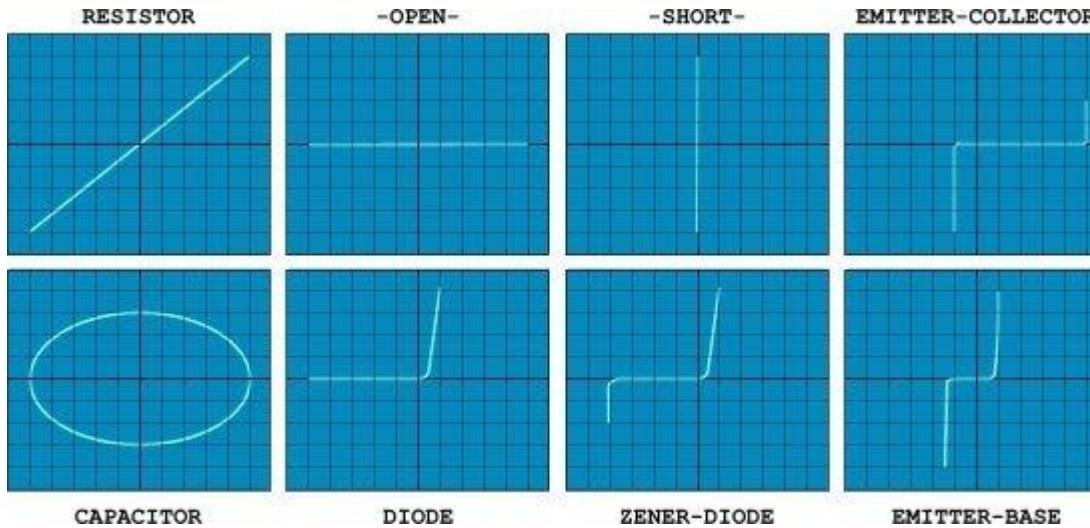
$$r_d = \frac{\Delta V_{DS}}{\Delta I_{DS}} \Big|_{V_{GS}=\text{cte}} = \frac{12V}{1mA} = 12K\Omega$$

$$\mu = g_m \cdot r_d = \frac{\Delta V_{DS}}{\Delta V_{GS}} \Big|_{I_{DS}=\text{cte}} = 1,2$$

$$BV_{DS0}, BV_{DSX} = BV_{DS0} + V_{GS}$$



Trazador de curvas: otras curvas típicas



Trazador de curvas: ejemplos comerciales



Tektronix 370B

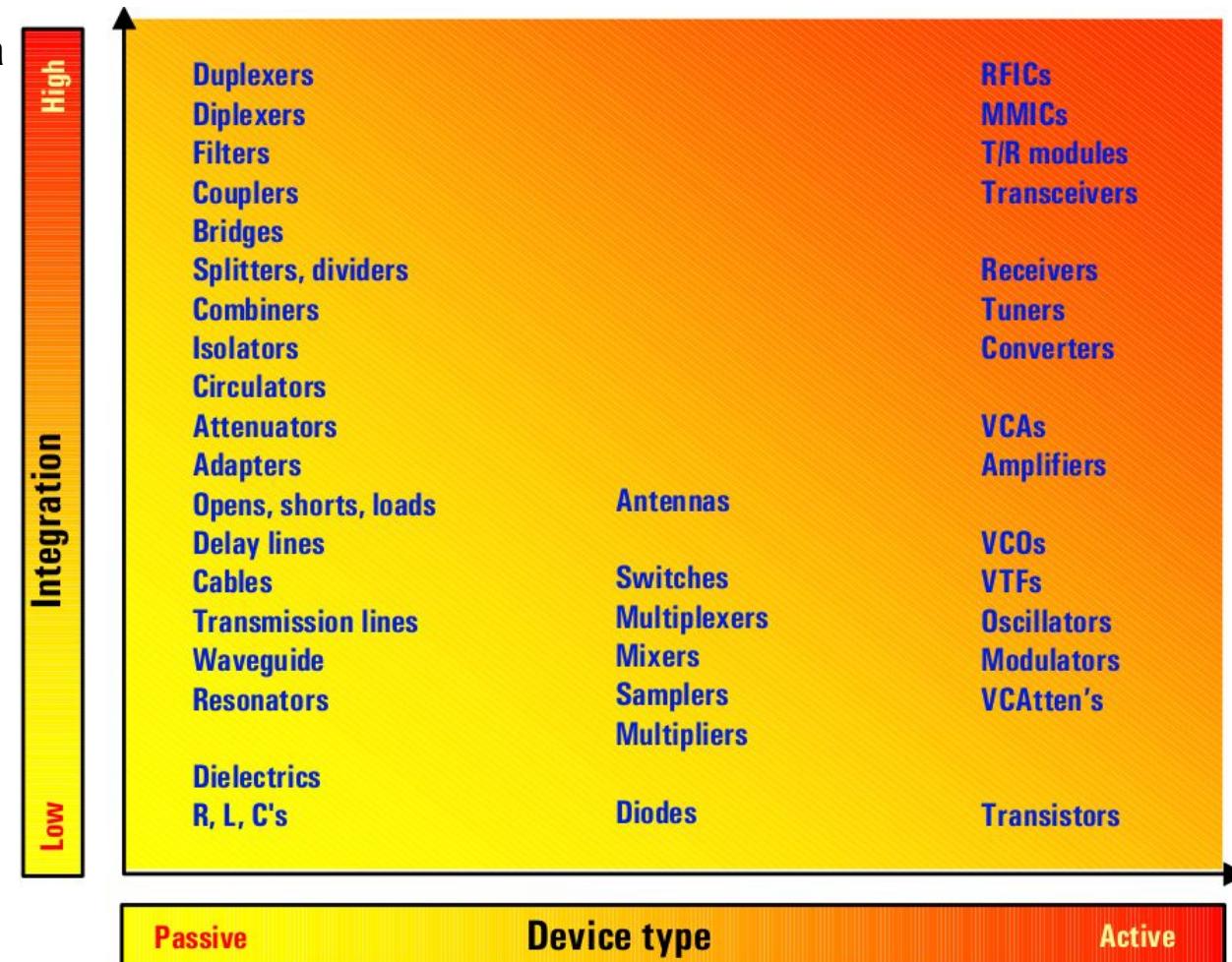


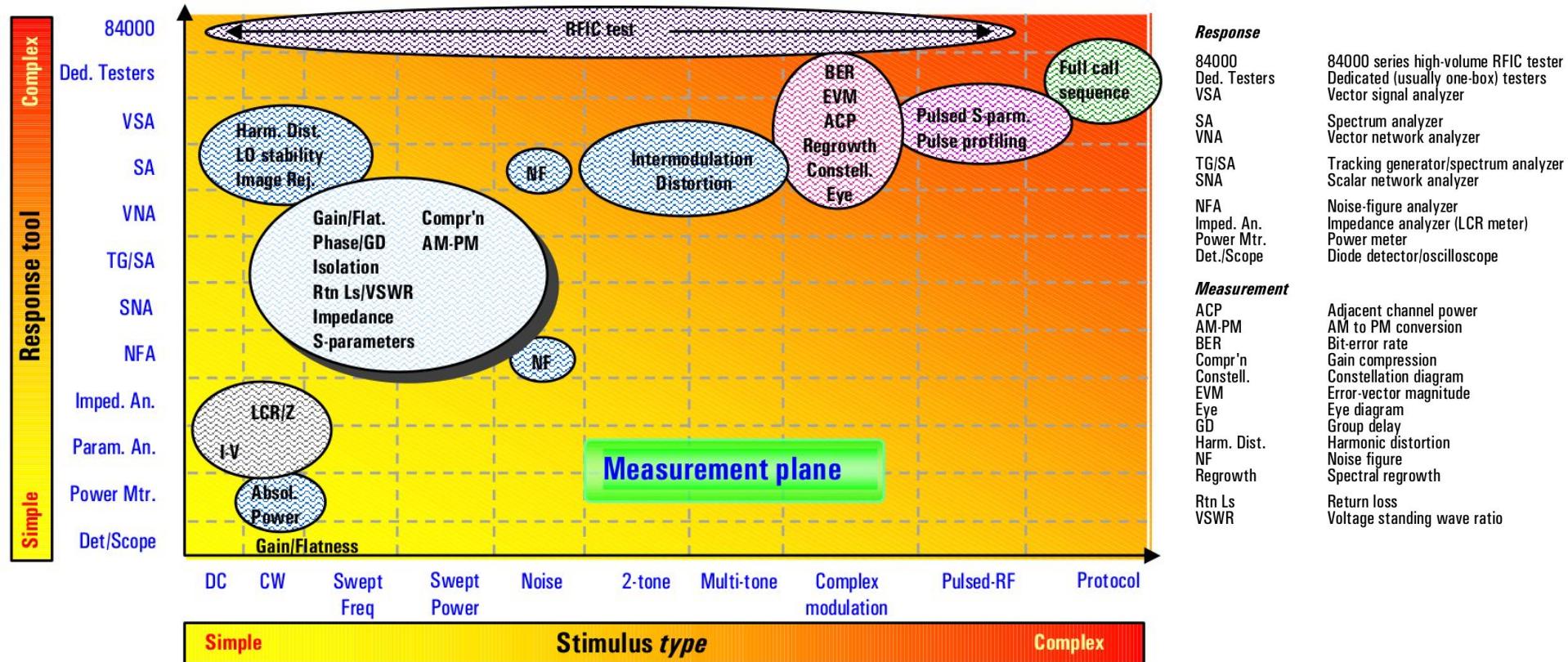
Plug-in para osciloscopio Tektronix

Agenda

- ❑ Mediciones en baja frecuencia
 - ❑ Trazadores de curvas
 - ❑ Parámetros del amplificador operacional (TP N° 1)
 - ❑ Parámetros de componentes digitales (TP N° 1)
- ❑ Mediciones en alta frecuencia
 - ❑ Conceptos importantes
 - ❑ Líneas de transmisión y ondas progresivas
 - ❑ Comportamientos lineal y no lineal
 - ❑ Parámetros S y diagrama de Smith
 - ❑ Voltímetro vectorial
 - ❑ Analizador vectorial de redes

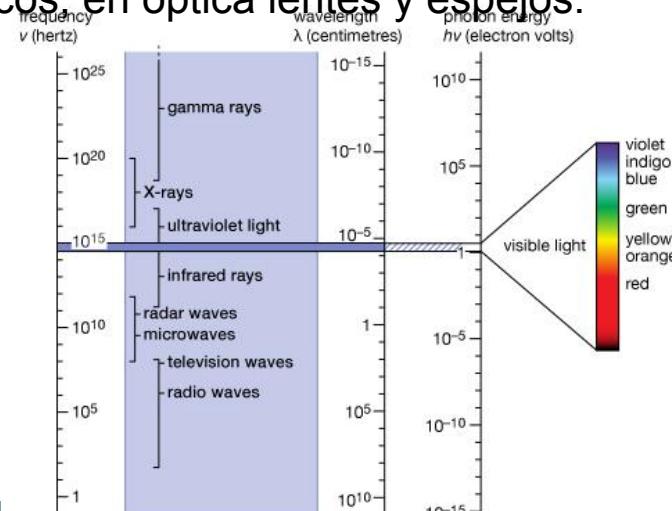
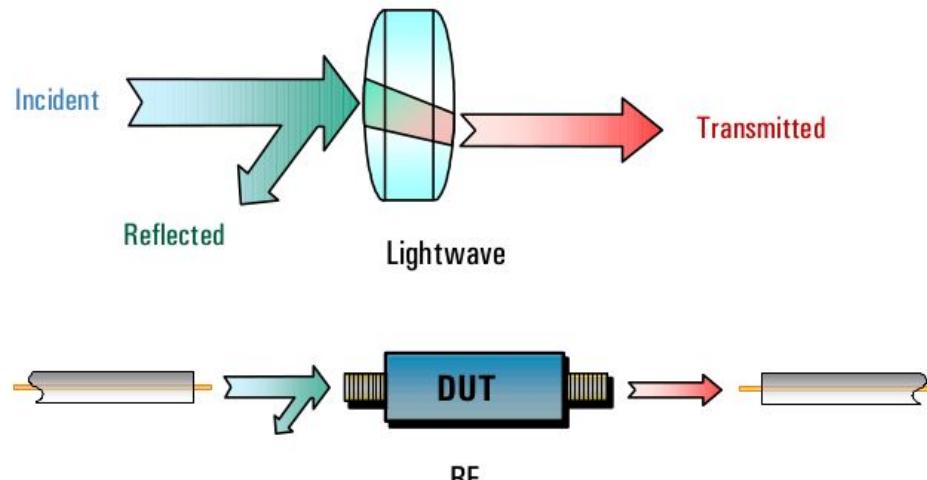
Mediciones en alta frecuencia





Mediciones en alta frecuencia

- Cuando se trabaja con longitudes de onda comparables con las dimensiones físicas de los componentes/conductores, resulta conveniente adoptar los conceptos de *ondas progresivas a lo largo de líneas de transmisión, reflexión y absorción*.
- Estos conceptos se asemejan a los utilizados en óptica
 - La energía de RF se encuentra en el rango de $\sim 10^3$ a 10^{-3} m, la energía óptica se encuentra en el rango de $\sim 10^{-3}$ a 10^{-8} m
 - En RF utilizamos componentes/circuitos electrónicos, en óptica lentes y espejos.



Mediciones en alta frecuencia

- Caracterización de componentes para definir valores de parámetros. Estos serán evaluados a la hora de utilizar estos componentes como bloques en sistemas más complejos (por ejemplo amplificar un LO antes de entrar a un mezclador, o filtrar una señal para limpiarla de armónicas).
- Comprobar que un componente o circuito no produzca **distorsión** en la señal. Esta distorsión puede ser **lineal (amplitud cte, fase lineal, retardo de grupo cte.)** o **no lineal (armónicas, inter-modulación, compresión, AM > PM)** (esto se verá más adelante).
- Definir **qué tan reflectivo** es un componente, es decir, **su aptitud para absorber la potencia que se le entrega** (por ejemplo una antena)

Importancia de **Magnitud y fase**

- En algunos casos puede ser suficiente contar con información de **magnitud** (ganancia de un amplificador, atenuación de un filtro, reflexión en una antena)
- Sin embargo, en muchos casos es necesario contar con información de **fase**:
 - Modelado de componentes para simulación
 - Caracterización en el dominio del tiempo mediante la DFT
 - Diseño de redes adaptadoras para asegurar máxima transferencia de potencia
 - **Corrección vectorial de errores** al realizar mediciones
 - Errores introducidos en sistemas de comunicaciones donde **la información se transporta en la fase de la señal (por ej. QPSK, 8/16/32/64 QAM)**: Error Vectorial Máximo (EVM)

Agenda

- ❑ Mediciones en baja frecuencia
 - ❑ Trazadores de curvas
 - ❑ Parámetros del amplificador operacional (TP N° 1)
 - ❑ Parámetros de componentes digitales (TP N° 1)
- ❑ Mediciones en alta frecuencia
 - ❑ Conceptos importantes
 - ❑ Líneas de transmisión y ondas progresivas
 - ❑ Comportamientos lineal y no lineal
 - ❑ Parámetros S y diagrama de Smith
 - ❑ Voltímetro vectorial
 - ❑ Analizador vectorial de redes

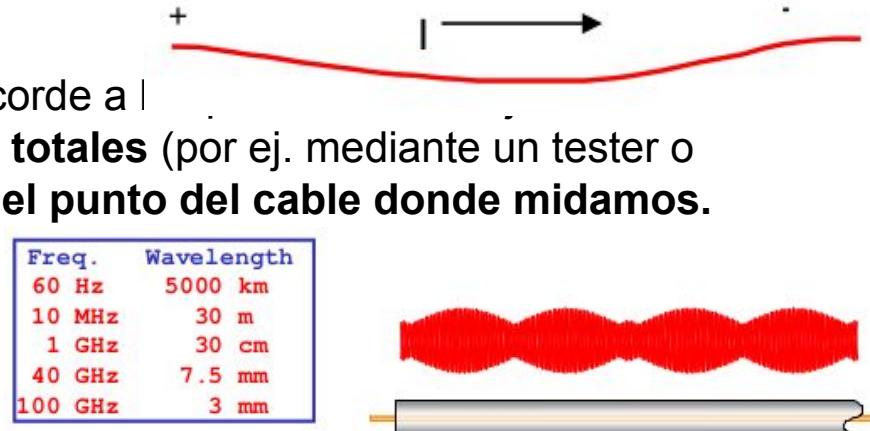
Líneas de transmisión y ondas progresivas

- **Bajas frecuencias: $\lambda \gg$ longitud física**

- Se utilizan cables comunes, de calibre acorde a λ
- Medimos valores de **corriente y tensión totales** (por ej. mediante un tester o trazador de curvas), que **no dependen del punto del cable donde midamos**.

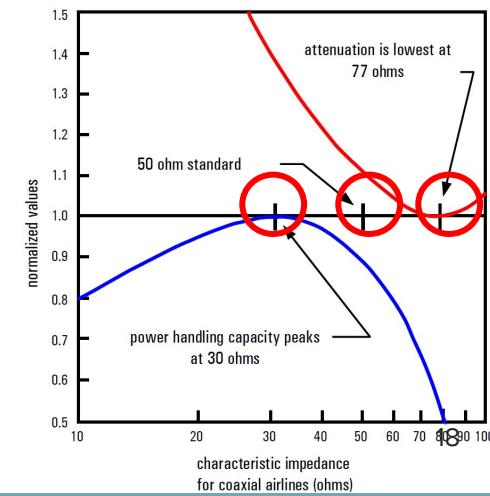
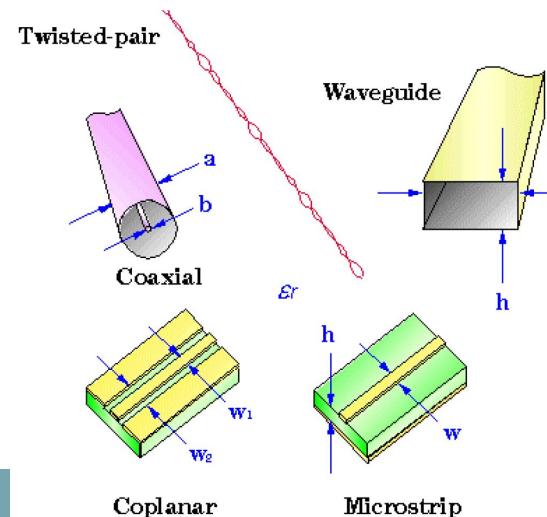
- **Alta frecuencia: $\lambda \leq$ longitud física**

- Los conductores se comportan **como líneas de transmisión**
- **Se utiliza el concepto de ondas progresivas**
- Es muy importante lograr **máxima transferencia de potencia** entre las etapas del circuito. Esto implica:
 - Conectar impedancias a sus valores conjugados (parte real igual, parte imaginaria opuesta) tanto en LDTs como entre componentes
 - Que la envolvente de voltaje a lo largo de una LDT es constante
 - Que la onda progresiva en dirección de señal es máxima
 - Que la onda progresiva en dirección opuesta (reflejada) es mínima



Impedancia característica de una LDT

- **Z_0** es el parámetro fundamental de una LDT y depende sólo de la LDT. Para lograr máxima transferencia de potencia, la carga conectada a una LDT debe ser Z_0^* .
- **Z_0 relaciona los valores de las ondas progresivas de tensión y corriente a lo largo de toda la línea**
- En general Z_0 es compleja. Para bajas pérdidas se suele asumir como real (50/75/300 Ω)
- **Z_0 depende de las características físicas de la línea**
 - coaxil, guia de onda, par trenzado, coplanar, stripline, microstrip.
 - Dimensiones físicas de conductores/dieléctrico, constante dieléctrica ϵ_r
- **Para baja potencia:**
se optimiza para **baja pérdida por atenuación (coaxial 75 Ω)**
- **Para alta potencia:**
se optimiza el **compromiso potencia/atenuación (coaxial 50 Ω)**



Impedancia característica de una LDT

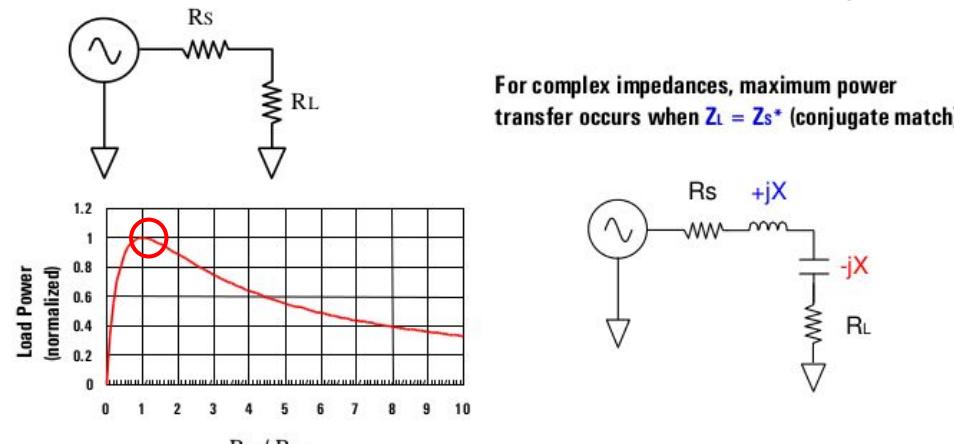
AGREGAR FILMINA SOBRE EL MODELADO DE l_{dt} CON COMPONENTES CONCENTRADOS (NOTAS MIAS)

Transferencia de potencia

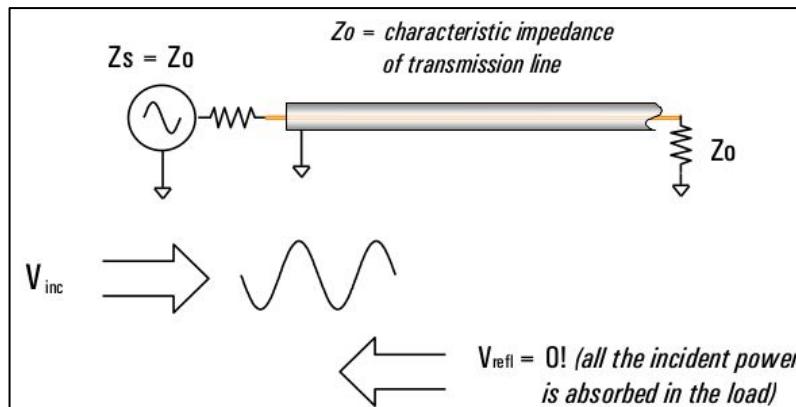
La máxima transferencia de potencia desde una fuente hacia una carga se produce cuando la impedancia de carga es la conjugada compleja de la impedancia de fuente ($Z_L = Z_S^*$). Esto se cumple tanto para fuentes de DC como de AC

En el caso de DC, la condición anterior se reduce a que sus partes reales sean iguales ($R_S = R_L$)

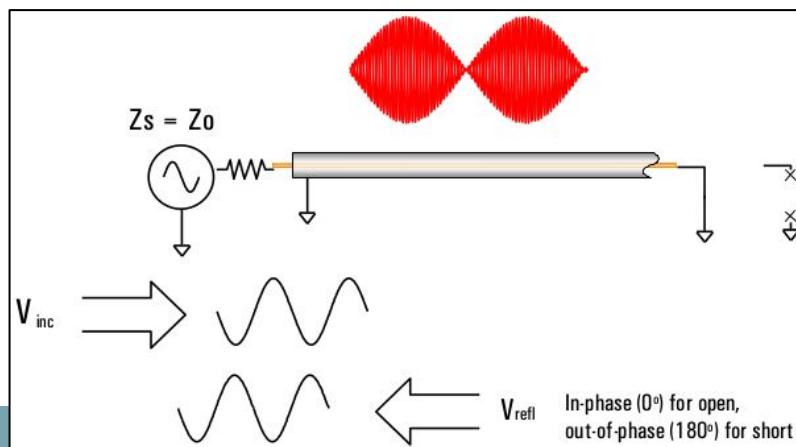
En general, la fuente puede ser un generador, un componente (transistor, filtro, etc) o una LDT. La carga puede ser otro componente, otra LDT, o un componente de interfaz tal como una resistencia (electricidad a calor), un motor (electricidad a movimiento) o una antena (electricidad a energía electromagnética)



Ondas progresivas en una LDT



Carga adaptada, la línea se comporta como de longitud infinita.

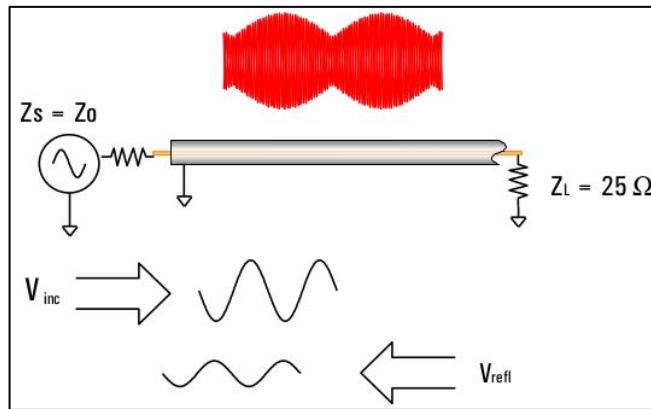


Circuito abierto: En el extremo de carga, $E_L = E_i + E_r = 2E_i$ e $I_L = (E_i - E_r)/Z_L = 0$. Se refleja toda la potencia en fase con la onda incidente (0°). **Las ondas en la carga son idénticas en magnitud, defasadas 0° , y viajan en sentidos opuestos**.

Cortocircuito: En el extremo de carga, $E_L = E_i + E_r = 0$ V e $I_L = (E_i - E_r)/Z_L = 2E_i / Z_L$. Se refleja toda la potencia en fase con la onda incidente (0°). Se refleja toda la potencia en contrafase con la onda incidente (180°). **Las ondas en la carga son idénticas en magnitud, defasadas 180° , y viajan en sentidos opuestos**.

Picos de tensión $2E_i$, valles de tensión $0V$

Ondas progresivas en una LDT



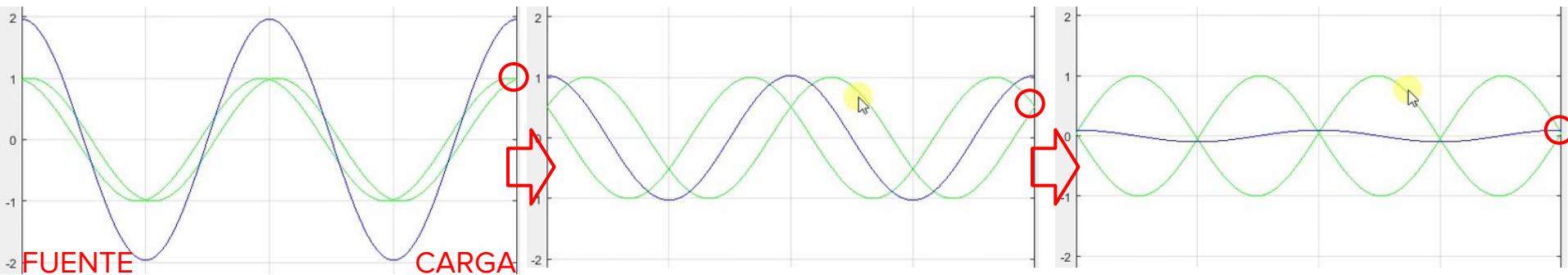
Cargas puramente **resistivas**:

$Z_L < Z_0$ (i.e., $R_L < R_0$) => **se refleja parte de la potencia, a 180° de la incidente**

$Z_L > Z_0$ (i.e., $R_L > R_0$) => **se refleja parte de la potencia, a 0° de la incidente**

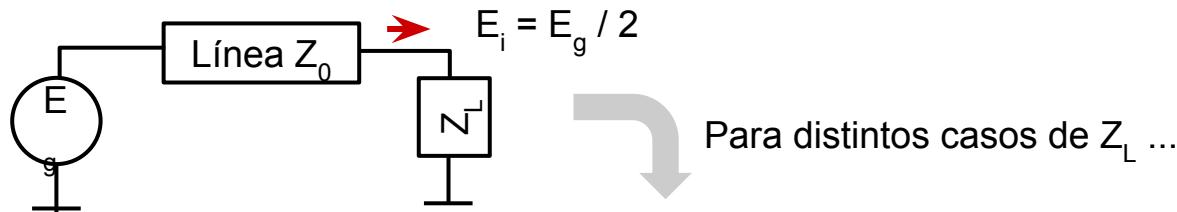
Los valles de la onda estacionaria no son cero, y los picos son menores a $2E_i$

Ejemplo: circuito abierto



Observaciones sobre las ondas progresivas y estacionarias

- 1) La suma de las ondas incidentes y reflejada en la carga debe satisfacer la ley de Ohm:



$$E_i + E_r = 0$$

$$\Rightarrow E_r = -E_i$$

$$E_i + E_r = 2 E_i / 3$$

$$\Rightarrow E_r = -E_i / 3$$

$$E_i + E_r = E_i$$

$$\Rightarrow E_r = 0$$

$$E_i + E_r = 4 E_i / 3$$

$$\Rightarrow E_r = +E_i / 3$$

$$E_i + E_r = 2 E_i$$

$$\Rightarrow E_r = +E_i$$

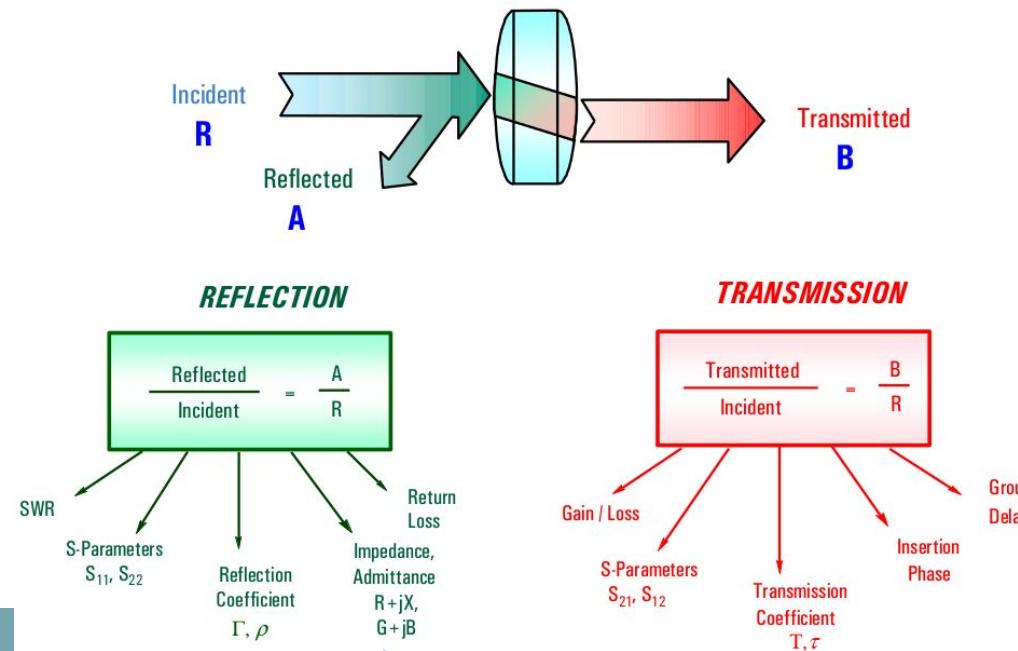
- 2) Al movernos por la línea hacia la fuente, la **fase entre incidente y reflejada varía**. La suma de ambas también varía, **produciendo la onda estacionaria**.

- 3) La **impedancia varía a lo largo de la línea**, ya que está determinada por la **tensión total y corriente totales (ondas estacionarias de V e I)**.

- Por ejemplo, a $\frac{1}{4}$ de onda de una carga de 25Ω , la impedancia aparente es 100Ω .
- El valor de onda estacionaria se **repite cada media longitud de onda, al igual que la impedancia aparente**.

Caracterización de componentes en RF

- Cuando se trabaja con dimensiones **físicas comparables a las longitudes de onda utilizadas**, se utilizan como variables las **ondas progresivas**.
- En particular, se usan las **ondas progresivas de potencia** ya que son **constantes a lo largo de la línea**
- Según el caso, puede interesar la relación de **módulo, fase, o ambas**.

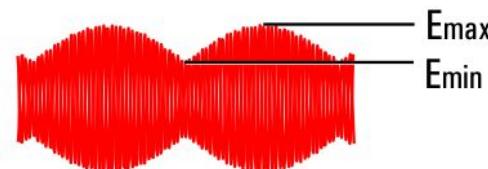


A) Parámetros de REFLEXIÓN (UN PUERTO)

Reflection
Coefficient

$$\Gamma = \frac{V_{\text{reflected}}}{V_{\text{incident}}} = \rho \angle \Phi = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$

Return loss = $-20 \log(\rho)$, $\rho = |\Gamma|$



Voltage Standing Wave Ratio

$$\text{VSWR} = \frac{E_{\text{max}}}{E_{\text{min}}} = \frac{1 + \rho}{1 - \rho}$$

No reflection
($Z_L = Z_0$)



0

 ρ

1

 ∞ dB

RL

0 dB

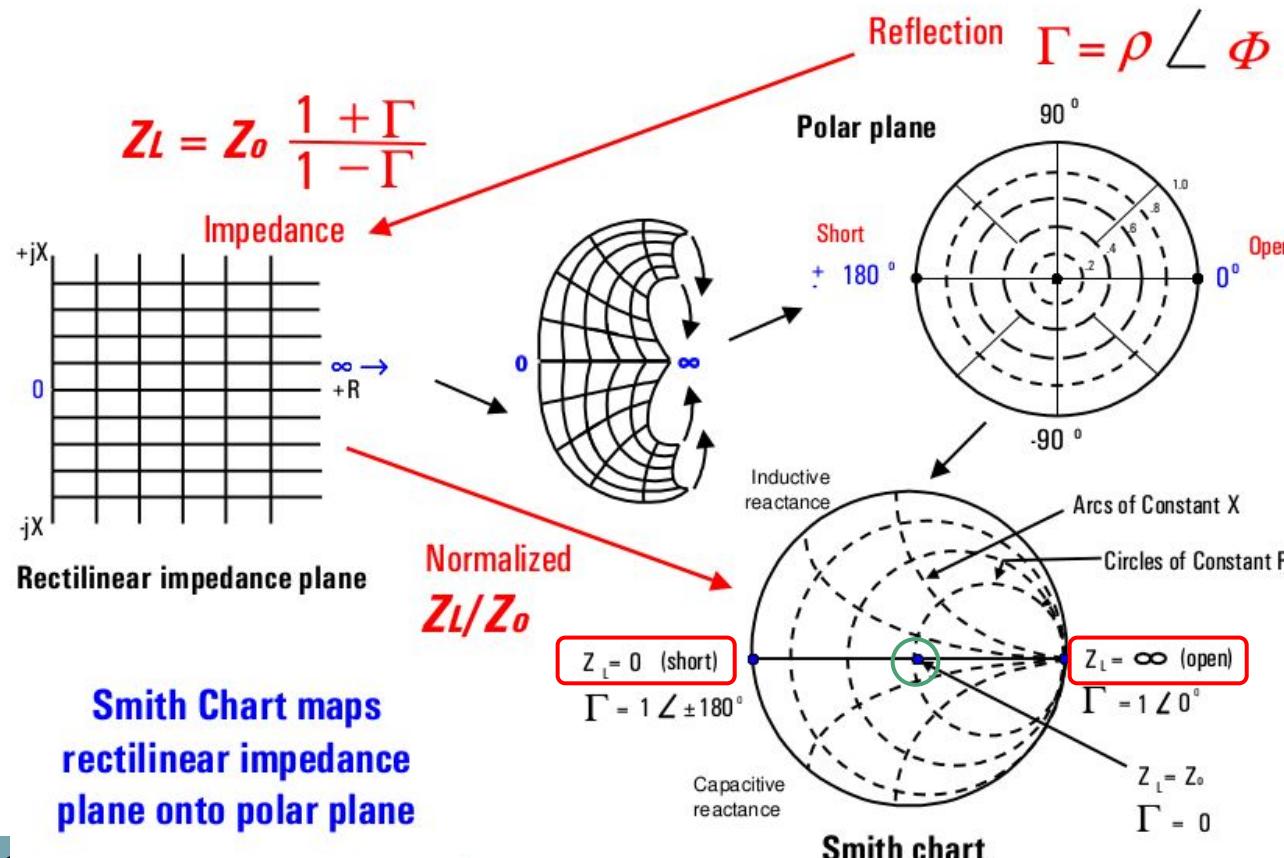
1

VSWR

 ∞

Full reflection
($Z_L = \text{open, short}$)

A) Parámetros de REFLEXIÓN (UN PUERTO): Diagrama de Smith



B) Parámetros de TRANSMISIÓN (DOS PUERTOS)



Transmission Coefficient = $T = \frac{V_{Transmitted}}{V_{Incident}} = \tau \angle \phi$

Insertion Loss (dB) = $-20 \log \left| \frac{V_{Trans}}{V_{Inc}} \right| = -20 \log \tau$

Gain (dB) = $20 \log \left| \frac{V_{Trans}}{V_{Inc}} \right| = 20 \log \tau$

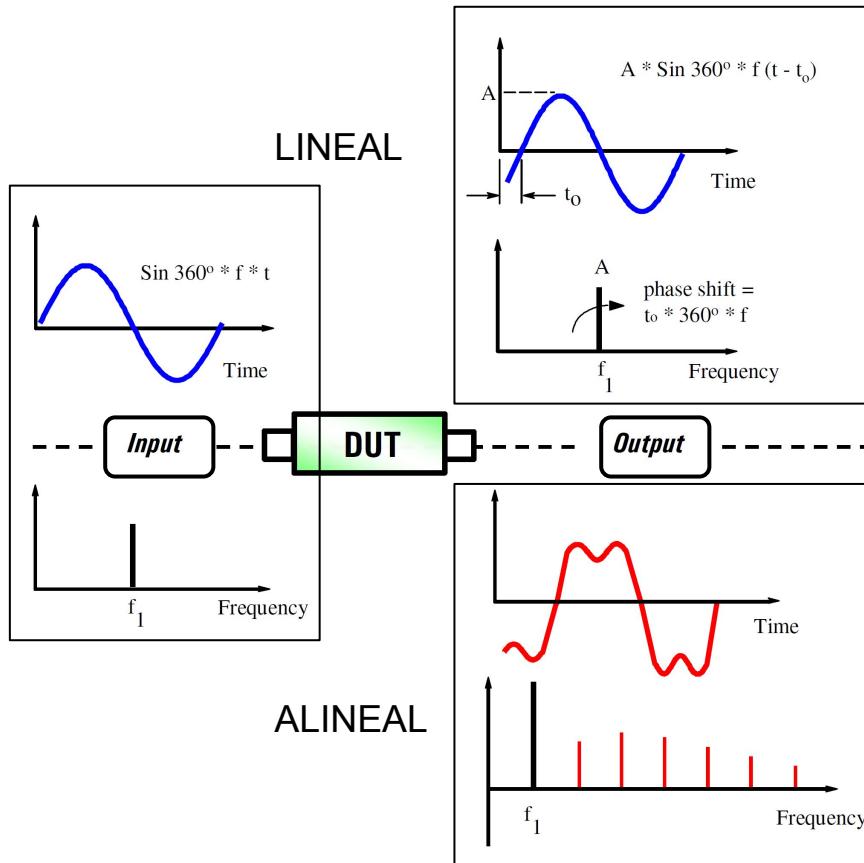
*En los sistemas de comunicaciones, las señales constan de una serie de componentes en frecuencia que ocupan un determinado **ancho de banda**. Es importante conocer cómo los componentes del sistema afectan cada una de estas componentes en **magnitud y en fase**, causando **distorsión**.*

*Tanto las redes **lineales** como las redes **alineales** pueden causar distorsión de distintos tipos. Esto se analizará a continuación.*

Agenda

- ❑ Mediciones en baja frecuencia
 - ❑ Trazadores de curvas
 - ❑ Parámetros del amplificador operacional (TP N° 1)
 - ❑ Parámetros de componentes digitales (TP N° 1)
- ❑ Mediciones en alta frecuencia
 - ❑ Conceptos importantes
 - ❑ Líneas de transmisión y ondas progresivas
 - ❑ Comportamientos lineal y no lineal
 - ❑ Parámetros S y diagrama de Smith
 - ❑ Voltímetro vectorial
 - ❑ Analizador vectorial de redes

Redes Lineales vs. redes Alineales



Redes lineales:

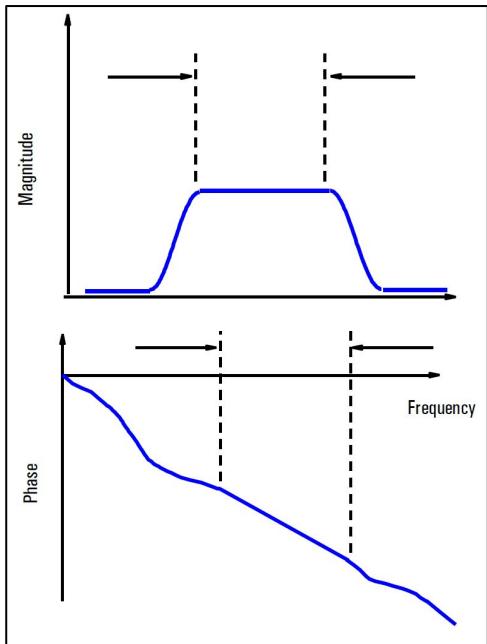
- **El DUT no genera nuevas componentes en frecuencia.**
- **Pueden presentar distorsión en frecuencia.** Las componentes en frecuencia sufren cambios en su **amplitud y en su fase relativas**.

Redes no-lineales o alineales:

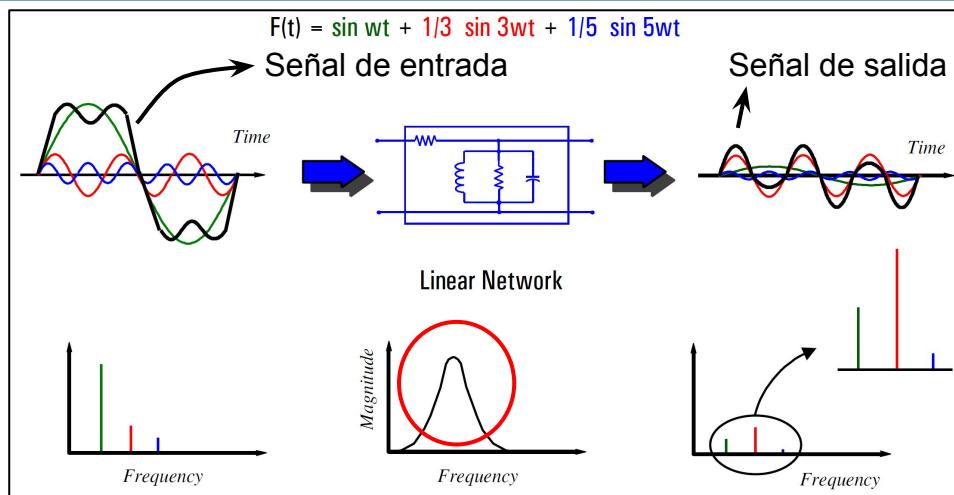
- **El DUT crea nuevas componentes en frecuencia:** armónicas, componentes de inter-modulación. Estas se deben a **distorsión en amplitud o no-lineal:** saturación, cross-over, etc..
- **El DUT también puede introducir desplazamientos en frecuencia:** mezcladores

Un componente puede variar su comportamiento de lineal a alineal según las condiciones de trabajo

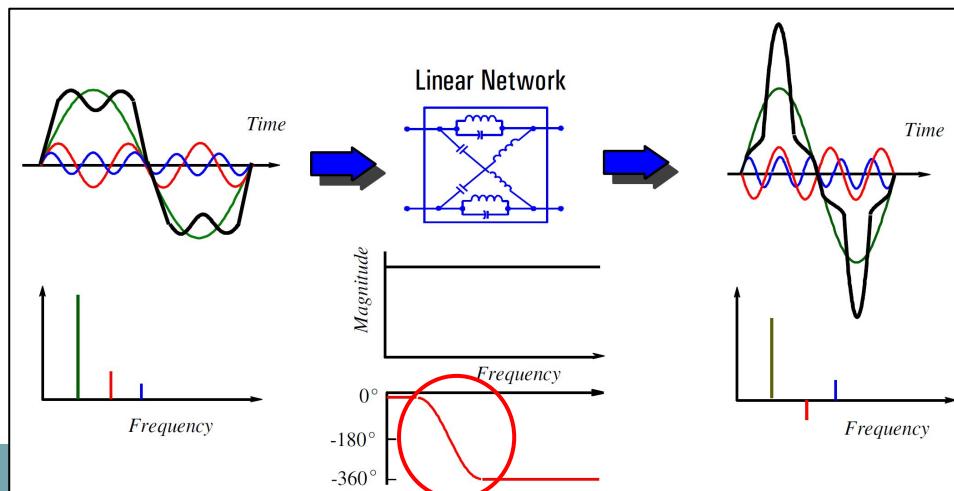
Distorsión en redes lineales



Distorsión lineal de magnitud

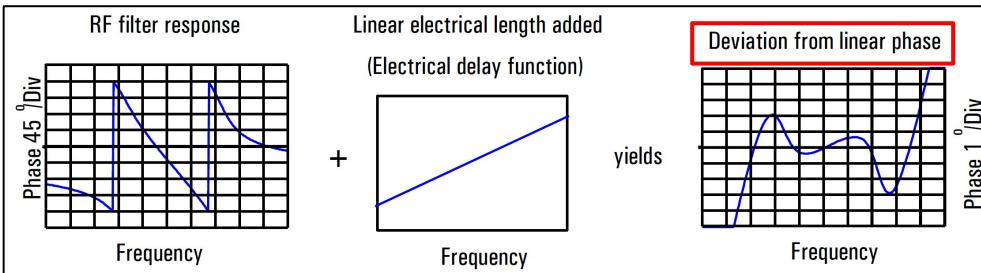


Distorsión lineal de fase

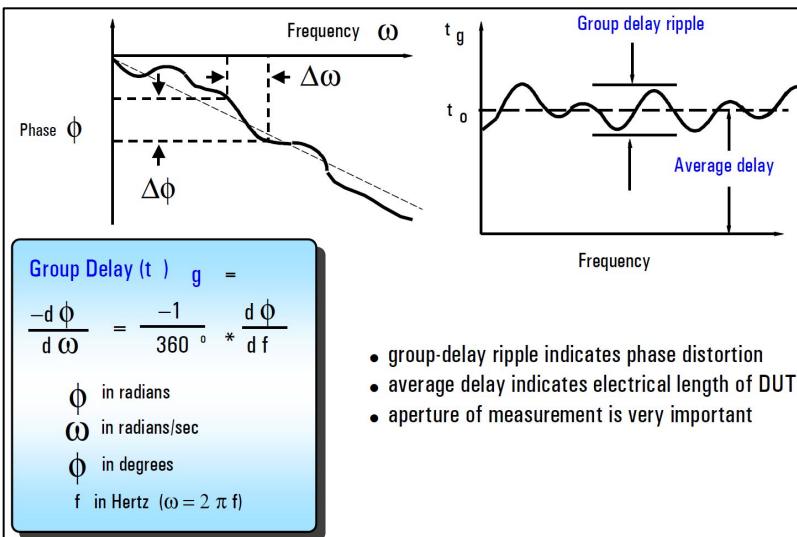


Transferencia lineal *sin distorsión*:

- **Amplitud plana** en la banda de interés
- **Fase lineal** en la banda de interés
- **Fase mínima**: en DC el defasaje es $0 \pm n \cdot 180^\circ$

Distorsión en redes **lineales**: distorsión de fase y retardo de grupo

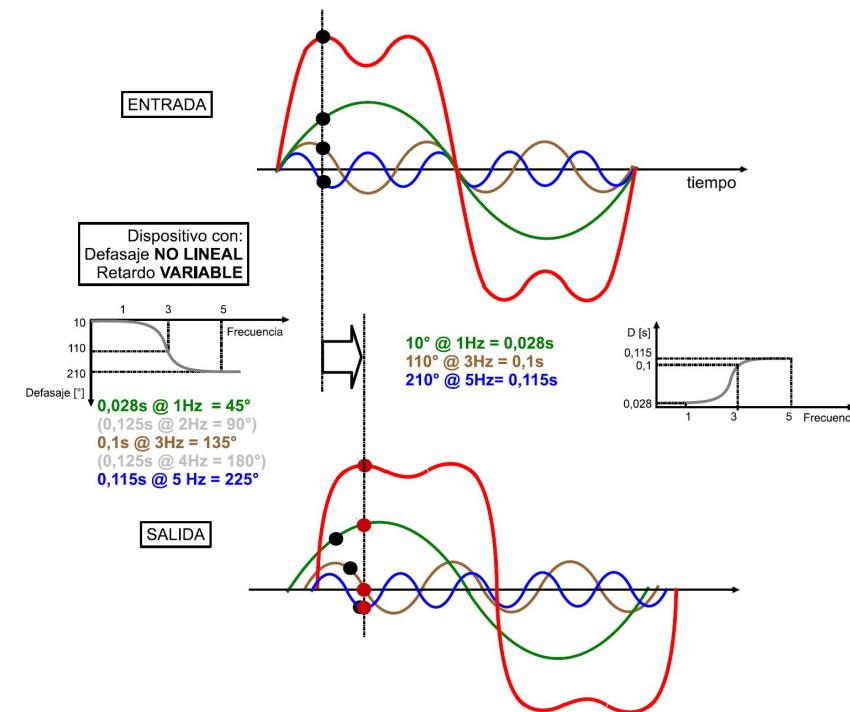
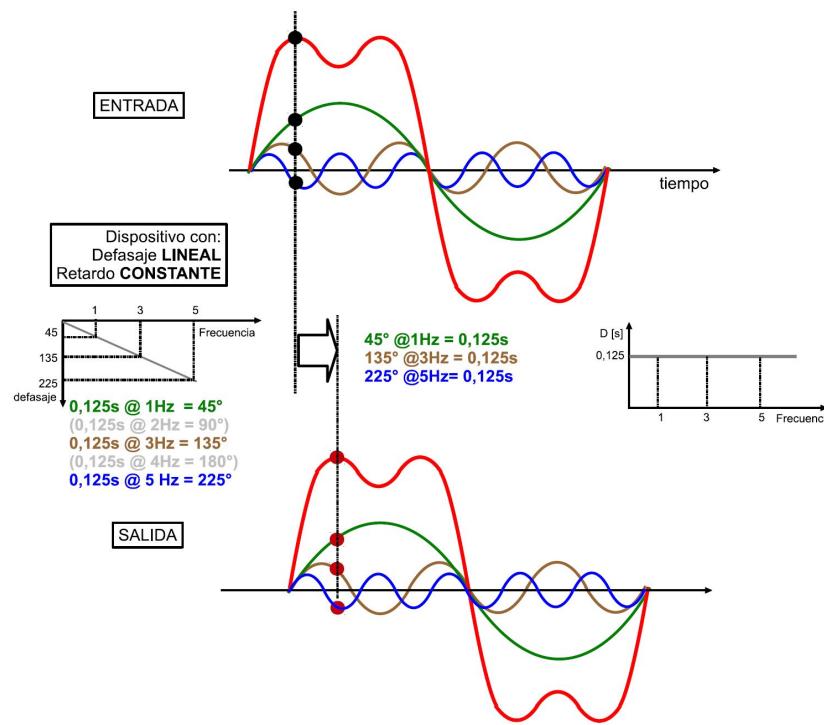
1) Para destacar la **parte de fase lineal**, se suele introducir un **retardo constante** (defasaje lineal)

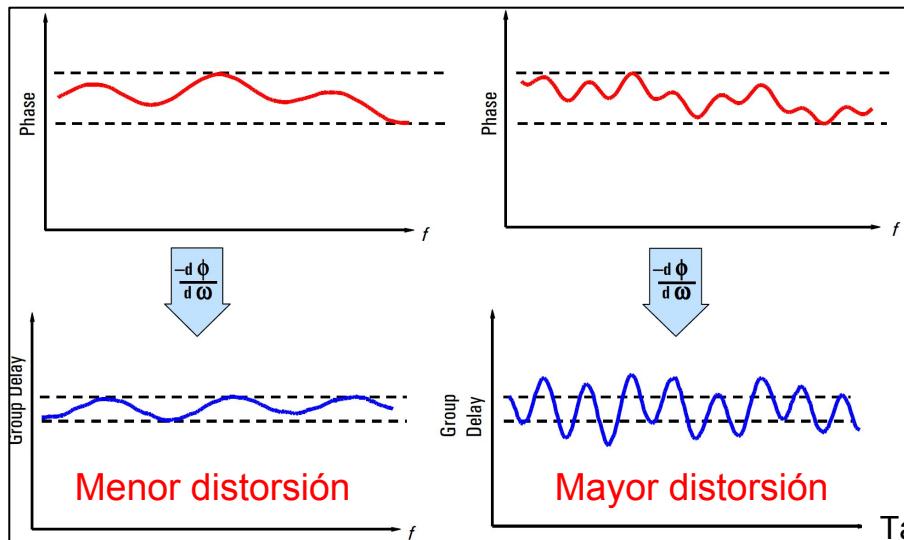


2) Se obtiene el parámetro **retardo de grupo (D)**, el cual **da una mejor idea de qué tan alineal es la fase**.

El retardo de grupo de la **derivada de la fase con la frecuencia**. También se interpreta como la **pendiente de la respuesta en fase del componente**.

La parte **lineal** es donde **D es constante**. Las **desviaciones de la fase lineal** se transforman en **desviaciones desde el valor D=cte**.

Distorsión en redes **lineales**: interpretación física del retardo de grupo

Distorsión en redes **lineales**: utilidad del retardo de grupo

Dos casos con el mismo ripple PAP de fase pero distinto ripple PAP de delay

Tanto la fase como el retardo de grupo D son útiles, pero D es más directo para evaluar la distorsión de fase.

El **ripple PAP de fase** no es una medida directa de la distorsión ya que depende del **número de ripples en el rango de frecuencias**.

El **ripple PAP de delay D** es una medida directa de la distorsión de fase, ya que la parte de pendiente de fase cte ya está eliminada.

Agenda

- ❑ Mediciones en baja frecuencia
 - ❑ Trazadores de curvas
 - ❑ Parámetros del amplificador operacional (TP N° 1)
 - ❑ Parámetros de componentes digitales (TP N° 1)
- ❑ Mediciones en alta frecuencia
 - ❑ Conceptos importantes
 - ❑ Líneas de transmisión y ondas progresivas
 - ❑ Comportamientos lineal y no lineal
- ❑ Parámetros S y diagrama de Smith
- ❑ Voltímetro vectorial
- ❑ Analizador vectorial de redes

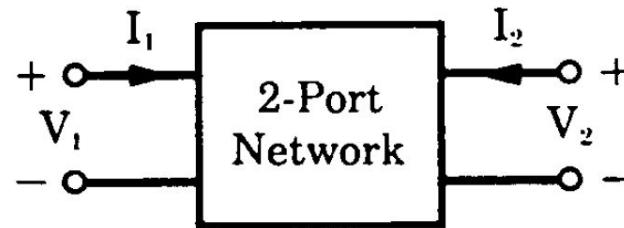
Conjuntos de parámetros

- El comportamiento eléctrico de una red o un componente **lineal** se puede representar mediante un conjunto de **parámetros** medidos bajo ciertas **condiciones de fuente/carga**.
- Estos parámetros permiten predecir el comportamiento eléctrico del componente **incluso en condiciones de fuente y carga distintas a aquéllas utilizadas en la medición de los parámetros**.
- Para bajas frecuencias, los tres conjuntos de parámetros más utilizados son los **z (impedancia), y (admitancia) y h (híbridos)**. Estos relacionan variables **independientes (estímulos)** con variables **dependientes (respuestas del componente)**.
- Todos estos parámetros requieren:
 - Medición de **tensiones y corrientes totales** en todos los puertos, en función de la frecuencia
 - Anular **tensiones (cortocircuito) o corrientes (circuito abierto)** en los puertos
 - Comportamiento **lineal e invariante en el tiempo/posición**

Lograr condiciones de cortocircuito o circuito abierto en los bornes del componente es difícil para altas frecuencias, ya que los conductores se comportan como líneas de transmisión. Esto se realiza mediante stubs que deben sintonizarse según la frecuencia medida.

Además, un elemento activo podría ser inestable en condiciones de corto o circuito abierto.

Conjuntos de parámetros

**H-parameters**

$$\begin{aligned} V_1 &= h_{11}I_1 + h_{12}V_2 \\ I_2 &= h_{21}I_1 + h_{22}V_2 \end{aligned}$$

**Y-parameters**

$$\begin{aligned} I_1 &= y_{11}V_1 + y_{12}V_2 \\ I_2 &= y_{21}V_1 + y_{22}V_2 \end{aligned}$$

Z-parameters

$$\begin{aligned} V_1 &= z_{11}I_1 + z_{12}I_2 \\ V_2 &= z_{21}I_1 + z_{22}I_2 \end{aligned}$$

$$h_{11} = \left. \frac{V_1}{I_1} \right|_{V_2=0} \quad (\text{requires short circuit})$$

$$h_{12} = \left. \frac{V_1}{V_2} \right|_{I_1=0} \quad (\text{requires open circuit})$$

Z

$$\begin{aligned} V_1 &= z_{11}I_1 + z_{12}I_2 \\ V_2 &= z_{21}I_1 + z_{22}I_2 \end{aligned}$$

Y

$$\begin{aligned} I_1 &= y_{11}V_1 + y_{12}V_2 \\ I_2 &= y_{21}V_1 + y_{22}V_2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_1 &= h_{11}I_1 + h_{12}V_2 \\ I_2 &= h_{21}I_1 + h_{22}V_2 \end{aligned}$$

h

$$\begin{aligned} V_1 &= AV_2 - BI_2 \\ I_1 &= CV_2 - DI_2 \end{aligned}$$

T (transfer)

Parámetros de dispersión o *Scattering (S)*

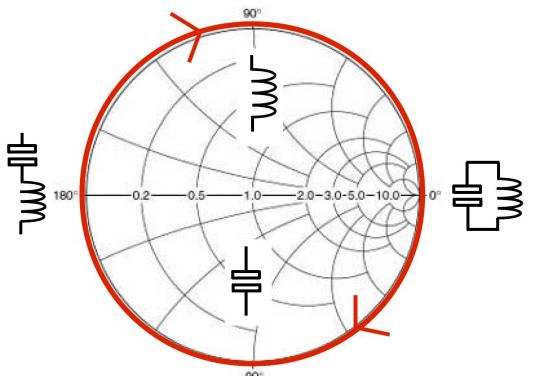
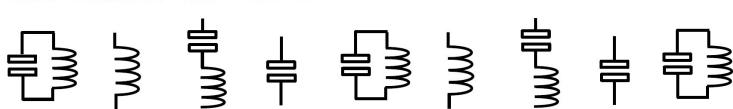
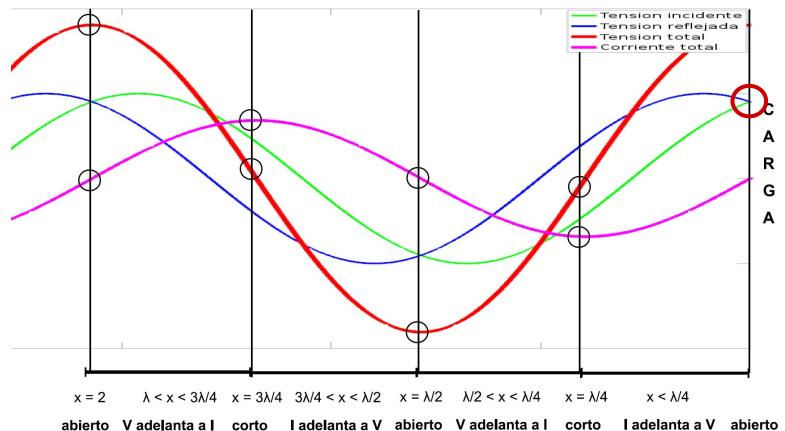
Resumen de lo visto hasta ahora:

- Suponemos comportamiento **lineal e invariante en el tiempo/posición**
 - En RF, un cable se comporta como una **línea de transmisión**.
 - Las señales $f(t)$ son ahora realidad **ondas progresivas $f(t, x)$** .
- Los parámetros z , y , o h requieren mediciones **a circuito abierto o cortocircuito**
 - “Cargar a circuito abierto” = en RF, se ve como **carga reactiva capacitiva (slide sig.)**
 - “Cargar en cortocircuito” = en RF, se ve como **carga reactiva inductiva (slide sig.)**
 - Medición de **tensiones y corrientes**: al existir **ondas viajeras** de V y I , incidentes y reflejadas, los valores de **V e I totales varían permanentemente a lo largo de la línea y se dificulta su medición.**

Parámetros de dispersión o Scattering (S)



Longitud de la linea	Con terminación en circuito abierto	Con terminación en cortocircuito	Resistencia de terminación menor de Z_0	Resistencia de terminación mayor que Z_0	Resistencia de terminación igual a Z_0
Menos de $\frac{1}{4} \lambda$					
Exactamente $\frac{1}{4} \lambda$					
De $\frac{1}{4}$ a $\frac{1}{2} \lambda$					
Exactamente $\frac{1}{2} \lambda$					



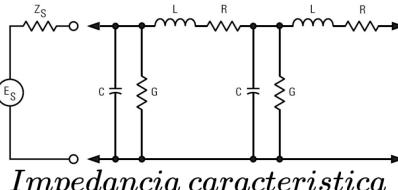
Parámetros de dispersión o *scattering* (S)

Los parámetros S se basan en la medición de **ondas progresivas, incidente y reflejada en los puertos del componente**, en lugar de **corrientes y tensiones totales**.

La amplitud pico de las ondas progresivas **no varía a lo largo de una línea sin pérdidas, mientras que la tensión/corriente totales sí lo hacen (onda estacionaria)**. Esto permite que **los parámetros S se puedan medir a cualquier distancia del componente, siempre que**:

- **La línea sea de bajas pérdidas** (=> las ondas progresivas no varían en la línea)
- Las mediciones se realicen en el mismo **plano de referencia** (distancia eléctrica desde el componente, ver slide siguiente)
- **El sistema esté adaptado**, de modo que las ondas reflejadas provengan sólo del componente

K. Kurokawa (1965): introduce el concepto de “ondas complejas normalizadas de tensión en el puerto *i*” para solucionar los problemas de medición en altas frecuencias.

Parámetros de dispersión o *Scattering (S)*: razonamiento

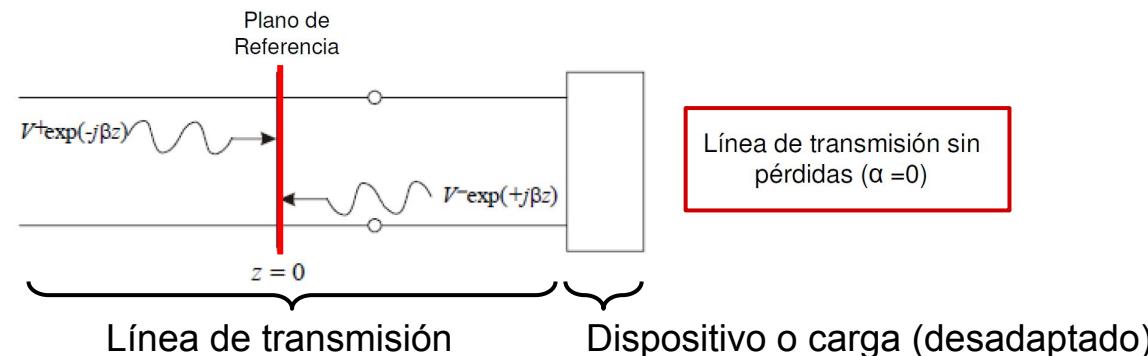
Impedancia característica :

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R+jwL}{G+jwC}} \approx \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Constante de propagación :

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + jwL)(G + jwC)}$$

$\alpha = \text{dB/metro}$; $\beta = \text{fase/metro}$



a) a lo largo de la línea (posición z arbitraria):

$$\text{Coeficiente de reflexión } \Gamma(z) = \frac{V^-}{V^+} \cdot e^{+j2\beta z}$$

$$\text{Impedancia en la linea } Z(z) = \frac{V(z)}{I(z)} = Z_0 \cdot \frac{V^+ e^{-j\beta z} + V^- e^{+j\beta z}}{V^+ e^{-j\beta z} - V^- e^{+j\beta z}}$$

$$\text{Tensión en la linea } V(z) = V^+ e^{-j\beta z} + V^- e^{+j\beta z}$$

$$\text{Corriente en la linea } I(z) = V^+ e^{-j\beta z} - V^- e^{+j\beta z}$$

b) En el **plano de referencia ($z = 0$)**:

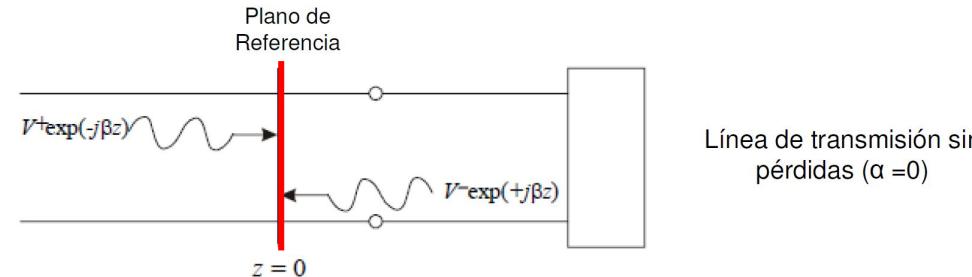
$$\text{Coef. reflexión } \Gamma = \frac{V^-}{V^+}$$

$$\text{Impedancia } Z = Z_0 \frac{V^+ + V^-}{V^+ - V^-} = Z_0 \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma}; \quad \Gamma = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0}$$

$$\text{Potencia incidente } P_i = \frac{|V^+|^2}{Z_0}$$

$$\text{Potencia reflejada } P_r = \frac{|V^-|^2}{Z_0}$$

$$\text{Potencia total } P = \text{Re}\{V \cdot I^*\} = \frac{|V^+|^2}{Z_0} - \frac{|V^-|^2}{Z_0}$$

Parámetros de dispersión o *Scattering (S)*: razonamiento

K. Kurokawa (1965): “ondas complejas normalizadas de tensión **en el puerto *i***”

$$a_{(x)} = \frac{V_i \cdot e^{-\gamma x}}{\sqrt{\operatorname{Re}\{Z_o\}}} \quad b_{(x)} = \frac{V_r \cdot e^{\gamma x}}{\sqrt{\operatorname{Re}\{Z_o\}}} \quad \gamma = \alpha + \beta$$

A lo largo de la línea

Potencia Incidente

$$|a|^2 = \frac{V_i^2}{Z_o}$$

$$|b|^2 = \frac{V_r^2}{Z_o}$$

Potencia reflejada

En el plano de referencia

Parámetros de dispersión o *scattering* (*S*): razonamiento

$$a_i = \frac{V_i + Z_i I_i}{2\sqrt{|\operatorname{Re} Z_i|}} \quad (4)$$

$$b_i = \frac{V_i - Z_i^* I_i}{2\sqrt{|\operatorname{Re} Z_i|}} \quad (5)$$

$$a_1 = \frac{V_1 + I_1 Z_0}{2\sqrt{Z_0}} = \frac{\text{voltage wave incident on port 1}}{\sqrt{Z_0}} = \frac{V_{i1}}{\sqrt{Z_0}}$$

$$a_2 = \frac{V_2 + I_2 Z_0}{2\sqrt{Z_0}} = \frac{\text{voltage wave incident on port 2}}{\sqrt{Z_0}} = \frac{V_{i2}}{\sqrt{Z_0}}$$

$$b_1 = \frac{V_1 - I_1 Z_0}{2\sqrt{Z_0}} = \frac{\text{voltage wave reflected from port 1}}{\sqrt{Z_0}} = \frac{V_{r1}}{\sqrt{Z_0}}$$

$$b_2 = \frac{V_2 - I_2 Z_0}{2\sqrt{Z_0}} = \frac{\text{voltage wave reflected from port 2}}{\sqrt{Z_0}} = \frac{V_{r2}}{\sqrt{Z_0}}$$

Los parámetros *a* y *b* se pueden expresar también en función de las **tensiones y corrientes totales en el puerto *i*** (V_i, I_i)

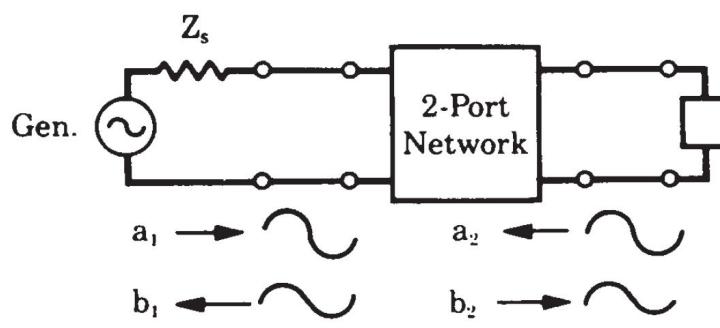
V_i = tensión **total** en el puerto *i*

I_i = corriente **total** en el puerto *i*

Z_i = impedancia de referencia, se suele tomar como **real y positiva** (“ Z_0 ”)

Variables “INDEPENDIENTES” a_i
(Ondas ENTRANTES O INCIDENTES)

Variables “DEPENDIENTES” b_i
(Ondas SALIENTES: REFLEJADAS O TRANSMITIDAS según el parámetro)

Parámetros de dispersión o *scattering* (S): concepto

$$b_1 = s_{11} a_1 + s_{12} a_2$$

$$b_2 = s_{21} a_1 + s_{22} a_2$$

$$s_{11} = \left. \frac{b_1}{a_1} \right|_{a_2=0}$$

= Coeficiente de reflexión de entrada, con **la salida terminada en carga adaptada** ($Z_L = Z_0$, $a_2 = 0$)

$$s_{22} = \left. \frac{b_2}{a_2} \right|_{a_1=0}$$

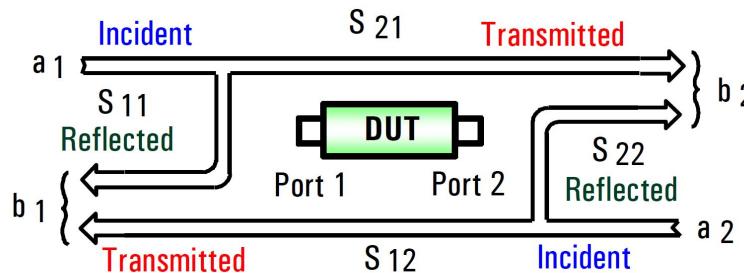
= Coeficiente de reflexión de salida, con **la entrada terminada en carga adaptada** ($Z_S = Z_0$, $a_1 = 0$)

$$s_{21} = \left. \frac{b_2}{a_1} \right|_{a_2=0}$$

= Ganancia (o pérdida) de transmisión (inserción) directa, con **la salida adaptada** ($a_2 = 0$).

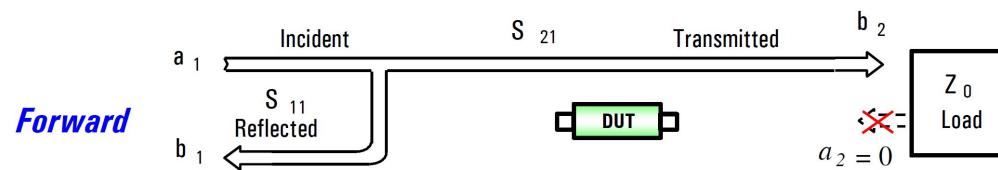
$$s_{12} = \left. \frac{b_1}{a_2} \right|_{a_1=0}$$

= Ganancia (o pérdida) de transmisión (inserción) reversa, con **la entrada adaptada** ($a_1 = 0$).

Parámetros de dispersión o *scattering* (*S*): concepto

$$b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2$$

$$b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2$$

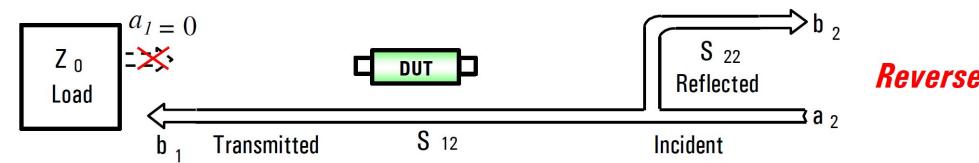


$$S_{11} = \frac{\text{Reflected}}{\text{Incident}} = \frac{b_1}{a_1} \Big| a_2 = 0$$

$$S_{21} = \frac{\text{Transmitted}}{\text{Incident}} = \frac{b_2}{a_1} \Big| a_2 = 0$$

$$S_{22} = \frac{\text{Reflected}}{\text{Incident}} = \frac{b_2}{a_2} \Big| a_1 = 0$$

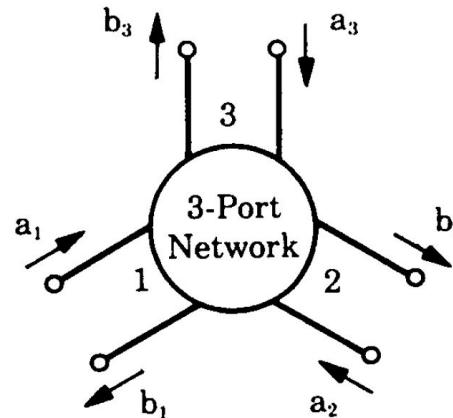
$$S_{12} = \frac{\text{Transmitted}}{\text{Incident}} = \frac{b_1}{a_2} \Big| a_1 = 0$$



Parámetros de dispersión o *scattering* (*S*)

Los parámetros *S* se pueden utilizar para caracterizar redes activas o pasivas de *n* puertos en general.

La matriz de *n* x *n* parámetros *S* crece con el **cuadrado del número de puertos**.



$$S_{11} = \left. \frac{b_1}{a_1} \right|_{a_2 = a_3 = 0}$$

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ b_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \dots & S_{1N} \\ S_{21} & S_{22} & \dots & S_{2N} \\ \cdot & \cdot & \ddots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ S_{N1} & S_{N2} & \dots & S_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ a_N \end{bmatrix}$$

Parámetros S y Diagrama de Smith

Los parámetros **de reflexión** se relacionan directamente con sus **impedancias de puerto**

El diagrama de Smith permite ver este mapeo en forma directa.

Si divido MAM por I_1 :

$$s_{11} = \frac{b_1}{a_1} = \frac{\frac{V_1}{I_1} - Z_0}{\frac{V_1}{I_1} + Z_0} = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0}$$

$$Z_1 = Z_0 \frac{(1 + s_{11})}{(1 - s_{11})}$$

$\therefore Z_1 = \frac{V_1}{I_1}$ is the input impedance at port 1.

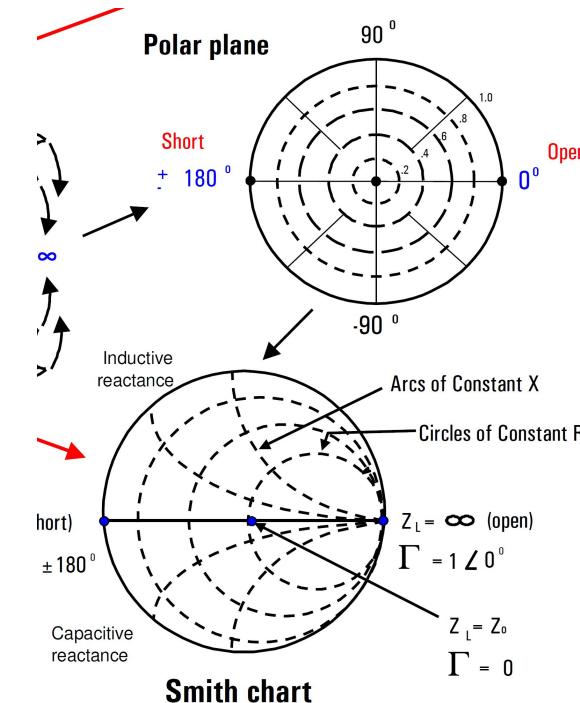
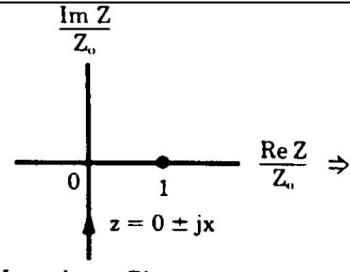
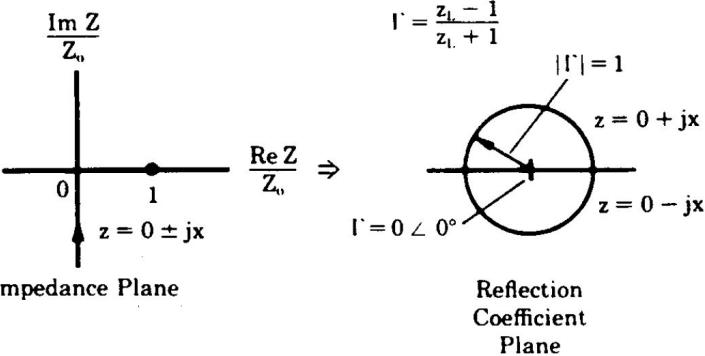


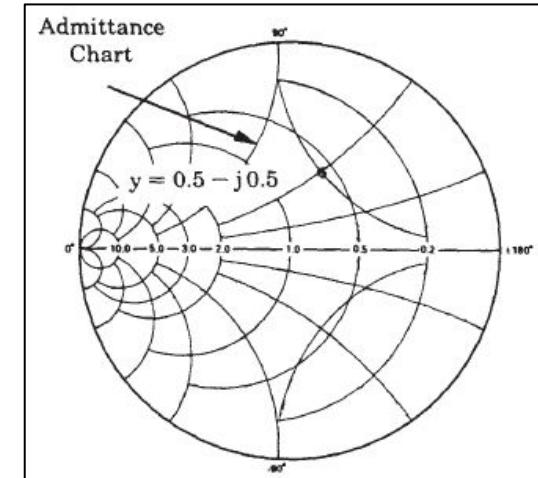
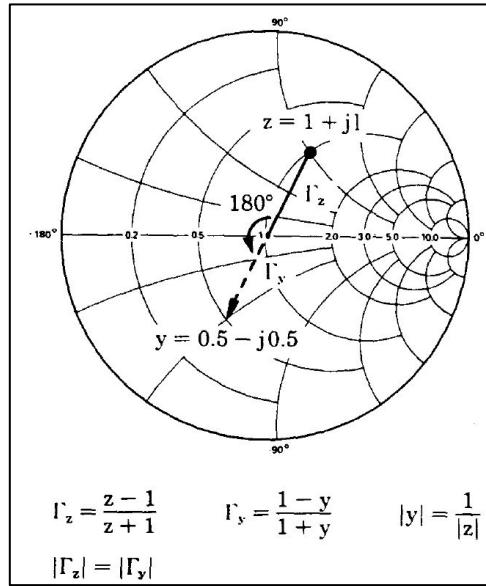
Diagrama de Smith: repaso



Impedance Plane



Mapeo planos de impedancia y coeficiente de reflexión



Conversión impedancia - admitancia

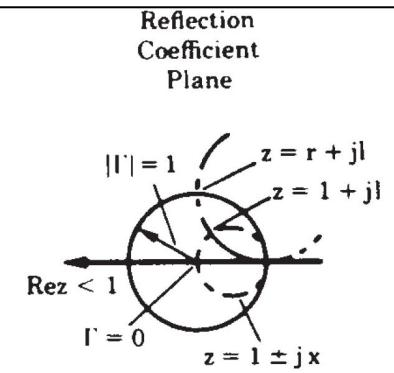
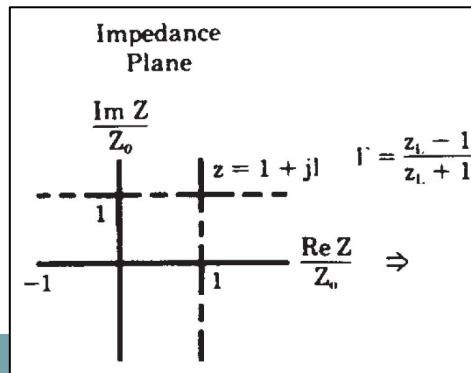
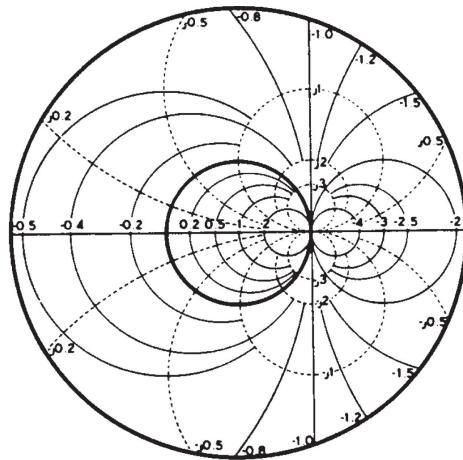
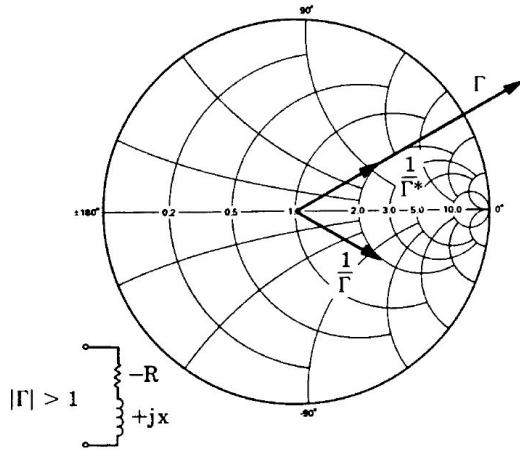
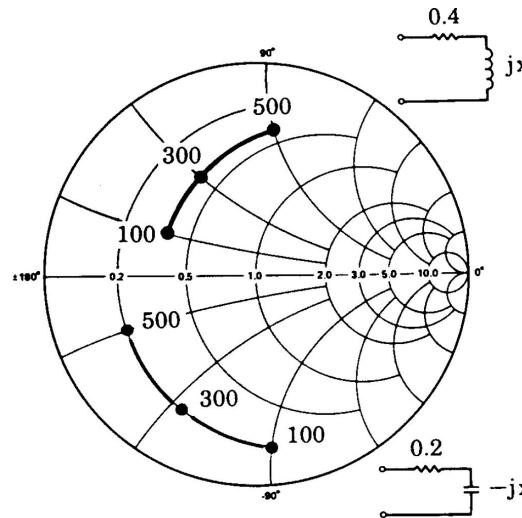


Diagrama de Smith: repaso [an154]

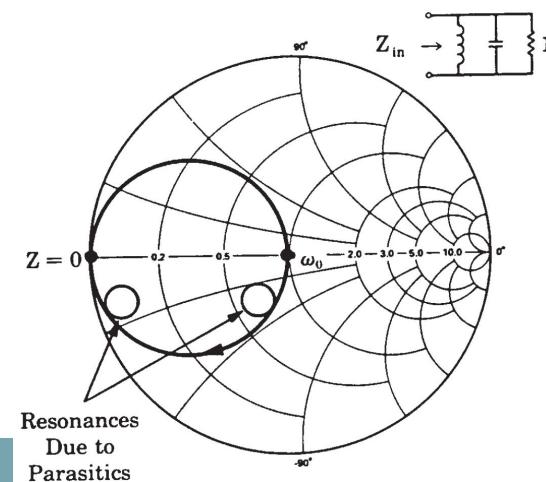


Puntos de parte real negativa



Variación de impedancias con la frecuencia

Efectos de resonancias parásitas



Resonances Due to Parasitics

Bibliografía

S-Parameter Techniques, HP Application Note 95-1, 1997

S-parameter design, Agilent application Note 154, 2000

Understanding the fundamental principles of vector network analysis, Agilent AN 1287-1, 2012

Network Analyzer Basics, Agilent Back to Basics Seminar, 2005

Vector Network analyzer Primer, Anritsu AN for MS4640A and 37000D VNAs, 2009

Antenas para radioaficionados, Harry D. Hooton W6TYO. Ed. Arbó, 1967