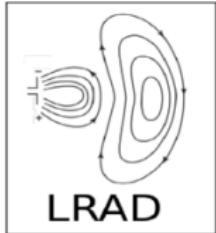


MEDICIÓN DE IMPEDANCIAS

Walter Gustavo Fano

Laboratorio de Radiación Electromagnética
Facultad de Ingeniería. Universidad de Buenos Aires
Argentina

gfano@fi.uba.ar



ÍNDICE DE LA PRESENTACIÓN

- Introducción
- Medición de impedancias en bajas frecuencias (LCR)
- Medición de impedancias en altas frecuencias:
Analizador vectorial de redes (VNA).
- Resultados y errores en la medición
- Referencias bibliográficas

IMPEDANCIA. FUNDAMENTOS

La impedancia habitualmente se expresa como:

$$Z = R + jX$$

donde:

R es la Resistencia
X es la reactancia

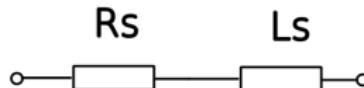
También se puede escribir Z en forma fasorial

$$Z = |Z| e^{j\phi}$$

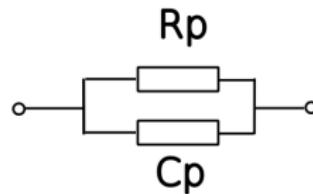
Se usa habitualmente

El modelo paralelo para medir capacidad

El modelo serie para medir inductancia



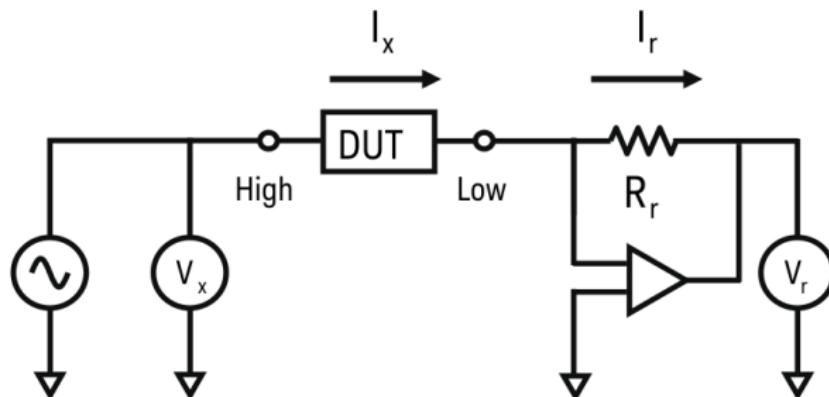
Modelo serie



Modelo paralelo

MEDICIÓN DE IMPEDANCIAS CON LCR

Método autobalance



$$V_r = I_r R_r$$

$$I_x = \frac{V_x}{Z_x}$$

Como $I_x = I_r$,

$$V_r = \frac{V_x}{Z_x} R_r$$

Entonces:

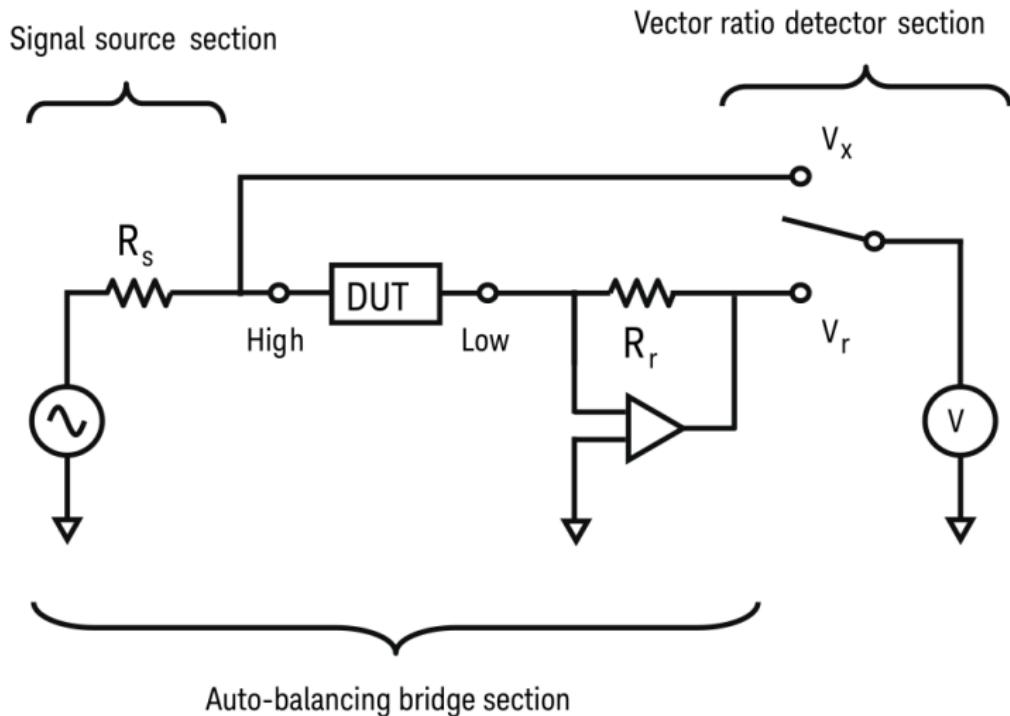
$$Z_x = \frac{V_x}{V_r} R_r$$

Error relativo Z_x

$$\epsilon_r V_x + \epsilon_r V_r + \epsilon_r R_r$$

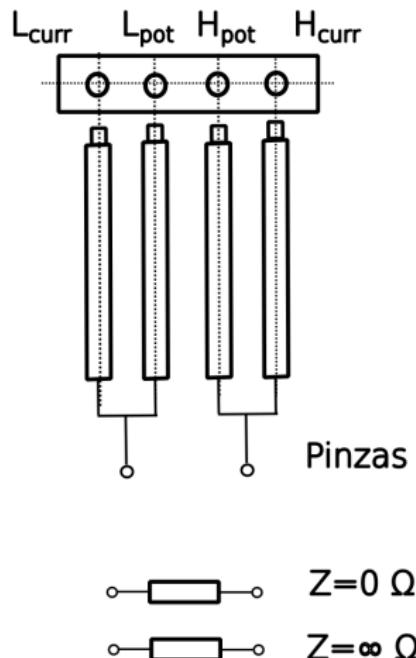
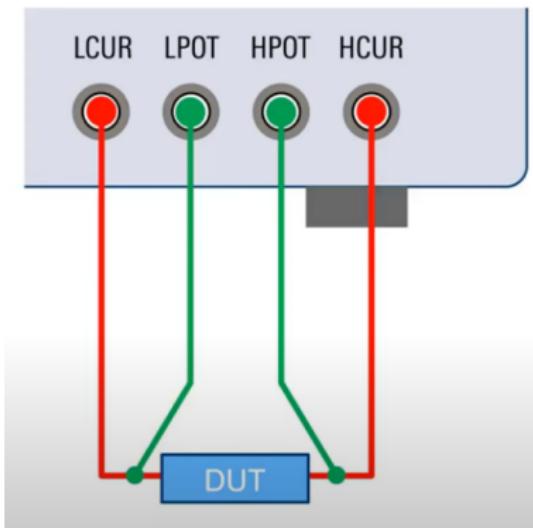
MEDICIÓN DE IMPEDANCIAS CON LCR

Método autobalance



MEDICIÓN DE IMPEDANCIAS CON LCR

Método de medición de 4 terminales



Cargas de
calibración

MEDICIÓN DE IMPEDANCIAS CON LCR

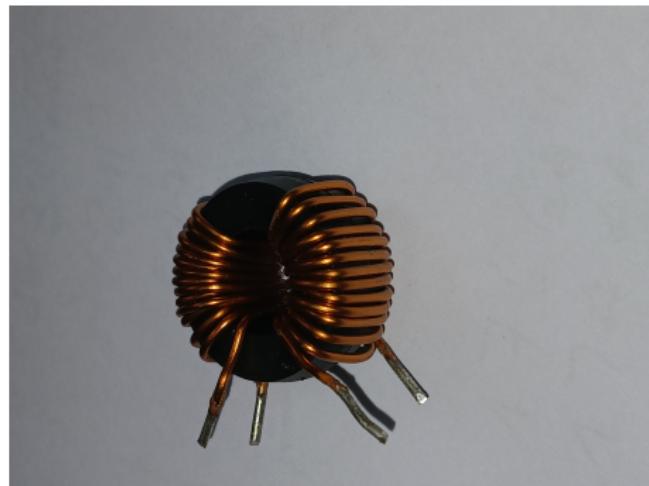
(Keysight)

- Generalmente un LCR tiene un rango de frecuencias de hasta 100 kHz
- Emplea Amp. operacionales para la conversión I-V
- En altas frecuencias la desventaja es que los amp. operacionales no funcionan bien
- Hay LCRs y analizadores de Z que emplean sofisticados detectores de cero, detectores de fase, integradores (filtros) y un modulador vectorial para asegurar la exactitud en su funcionamiento de hasta frecuencias de 120MHz.

EJEMPLO MEDICIÓN DE IMPEDANCIAS CON LCR

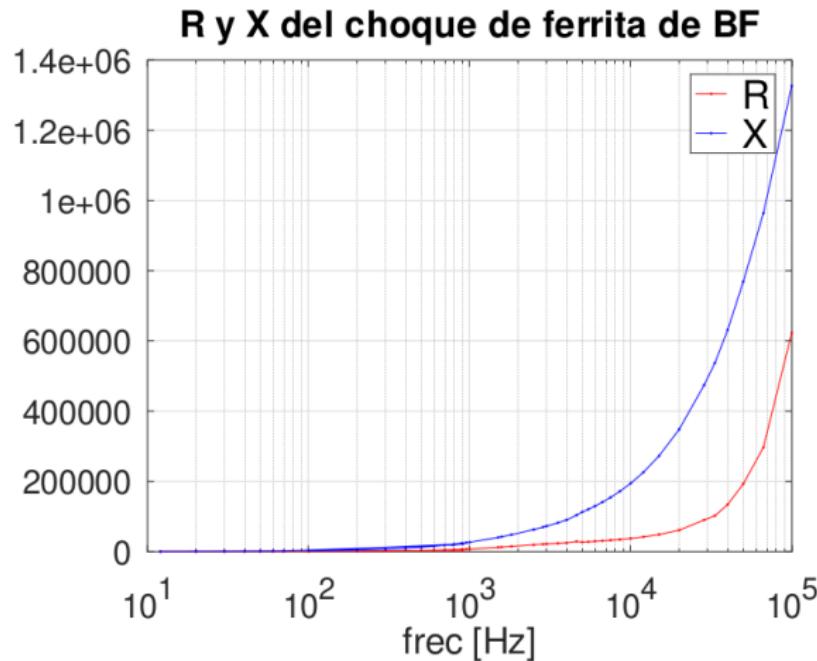


$f = 100\text{kHz}$, $L = 2.11\text{mH}$, $Q = 2.128$
modo L/Q circuito serie



Choque de un filtro de Modo Común

EJEMPLO MEDICIÓN DE IMPEDANCIAS CON LCR



$$R = \frac{\omega L}{Q}$$
$$X = \omega L$$

GWInstek modelo 819
precisión básica 0.1%

EJEMPLO MEDICIÓN DE IMPEDANCIAS CON LCR

frec(Hz)	L(mH)	Q
0.012	3.841	5.601
0.020	3.829	5.911
0.030	3.822	6.015
0.040	3.817	6.019
0.050	3.813	5.985
0.060	3.810	5.935
0.0697	3.810	5.878
0.789	3.814	5.816
0.909	3.826	5.723
0.100	3.827	5.666
0.200	3.839	5.103
0.300	3.883	4.730
0.400	3.945	4.427
0.500	4.008	4.229
0.600	4.057	4.069
0.697	4.110	3.936
0.800	4.167	3.810
0.895	4.214	3.707
0.952	4.271	3.698
1.000	4.236	3.615
1.500	4.271	3.318
1.579	4.255	3.300
1.818	4.203	3.247

frec(Hz)	L(mH)	Q
2.500	3.996	3.258
2.857	3.883	3.323
3.000	3.840	3.352
3.529	3.697	3.477
4.000	3.585	3.595
4.615	3.583	3.598
5.000	3.589	4.175
5.454	3.515	4.294
6.000	3.437	4.447
6.666	3.360	4.598
7.500	3.277	4.778
8.571	3.189	4.966
10.000	3.098	5.188
12.000	2.997	5.400
15.000	2.893	5.614
20.000	2.770	5.710
28.572	2.642	5.264
33.333	2.565	5.260
40.000	2.512	4.711
50.000	2.447	3.987
66.666	2.301	3.250
100.000	2.111	2.128

ANALIZADOR DE REDES. HISTORIA

Hasta 1950 se midió la onda estacionaria en forma manual

En 1950s, Rohde & Schwarz logró el primer VNA hasta 2.4GHz con parámetros S

En 1965 creó el primer Analizador de impedancias

En 1967 Hewlett Packard introdujo el VNA HP 8410 con la pantalla en diagrama de Smith

En 1985 se crea el HP8510 VNA automático

En 1990 crece la demanda de VNA's

En 2000 el VNA mide no linealidad de dispositivos

En 2010 aparecen los VNAs portátiles logrando muchas mejoras en ancho de banda y precio.

MEDICIÓN DEL COEFICIENTE DE REFLEXIÓN Y Z

Definiciones:

$$\Gamma = \frac{V_r}{V_i} = |\Gamma| \angle \phi$$

Este coeficiente de reflexión se relaciona con la impedancia de carga unívocamente en la línea de transmisión.

La impedancia del dispositivo bajo prueba se relaciona con el coeficiente de reflexión

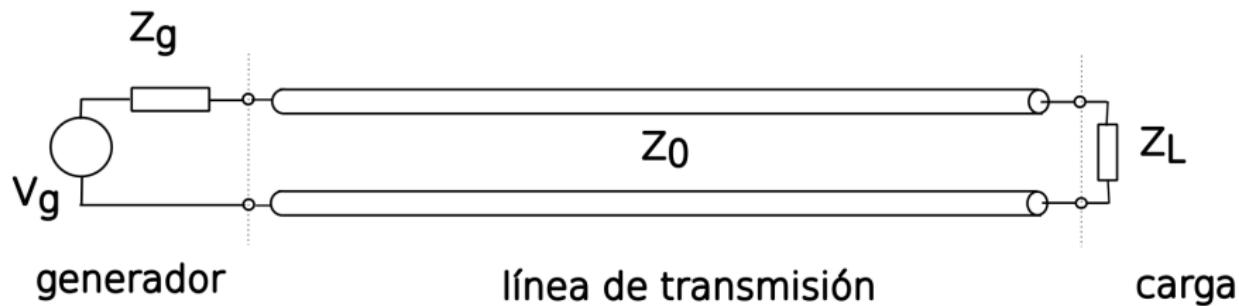
$$Z_{in} = Z_0 \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma}$$

La ROE se puede obtener a partir de $|\Gamma|$:

$$ROE = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}$$

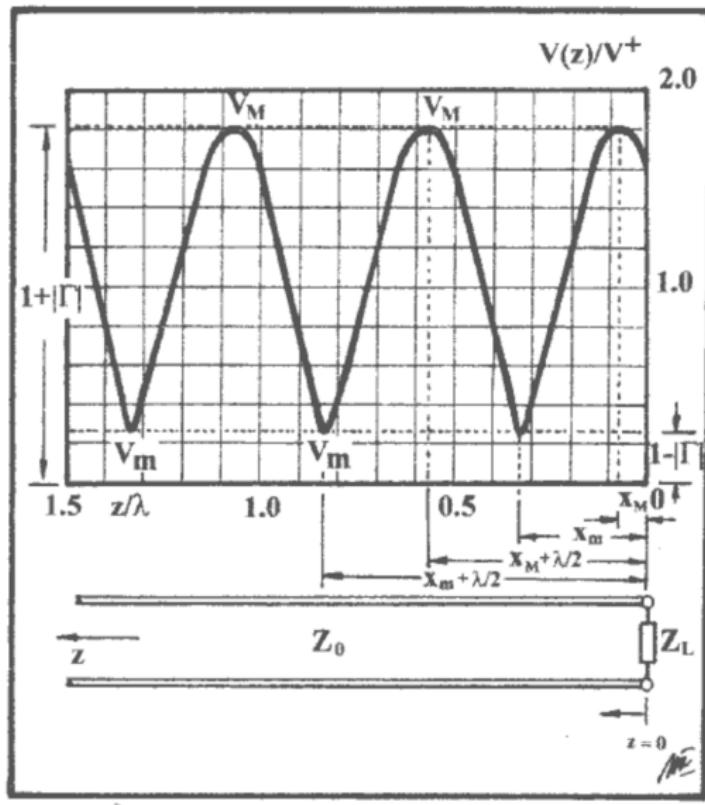
MEDICIÓN DEL COEFICIENTE DE REFLEXIÓN Y Z

La obtención de Γ_L y Z_L se hizo estudiando la onda estacionaria en una línea de transmisión en forma manual hasta el año 1960 aproximadamente, y en la actualidad se usa para educación y difusión.

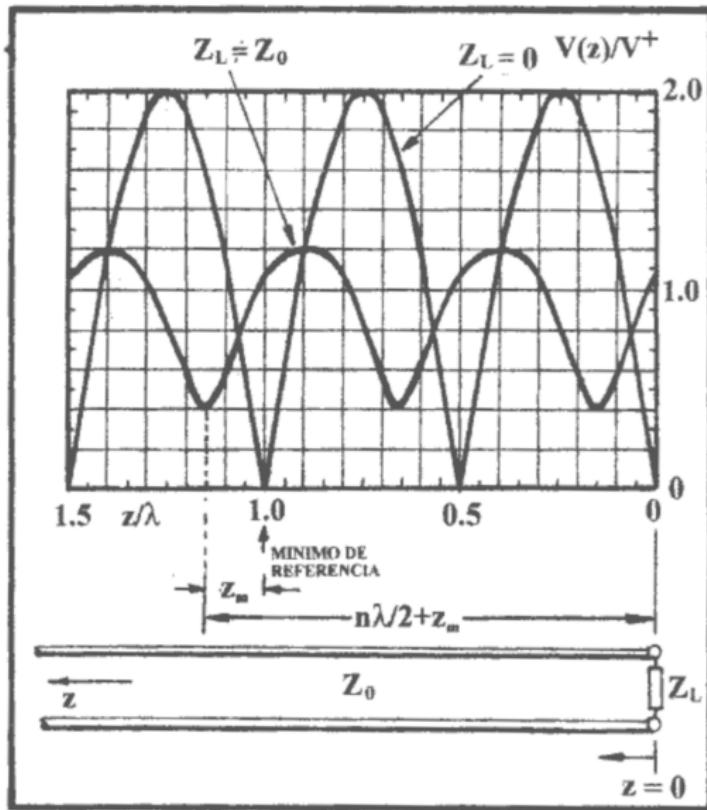


Si $Z_L \neq Z_0$ se tiene una "onda estacionaria"

MEDICIÓN DEL COEFICIENTE DE REFLEXIÓN Y Z



MEDICIÓN DEL COEFICIENTE DE REFLEXIÓN Y Z



MEDICIÓN DEL COEFICIENTE DE REFLEXIÓN Y Z

Considerando la impedancia de entrada a una línea de transmisión

$$Z_e = Z_0 \frac{Z_L + jZ_0 \operatorname{tg} \beta z}{Z_0 + jZ_L \operatorname{tg} \beta z} \quad (1)$$

La onda estacionaria presenta impedancias máxima y mínima conocidas:

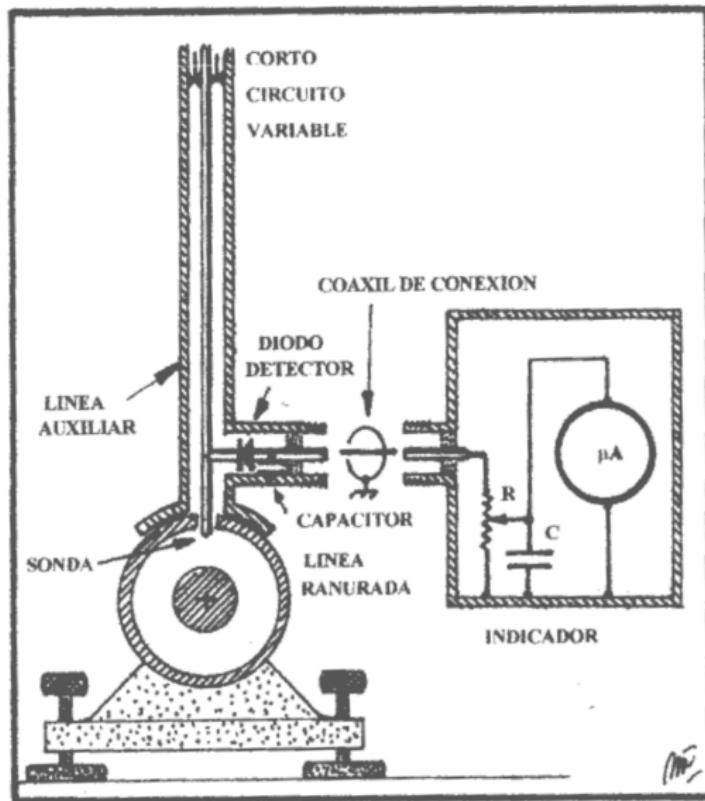
$$Z_{Max} = Z_0 ROE = Z_0 \frac{Z_L + jZ_0 \operatorname{tg} \beta z_M}{Z_0 + jZ_L \operatorname{tg} \beta z_M} \quad (2)$$

$$Z_{min} = \frac{Z_0}{ROE} = Z_0 \frac{Z_L + jZ_0 \operatorname{tg} \beta z_m}{Z_0 + jZ_L \operatorname{tg} \beta z_m} \quad (3)$$

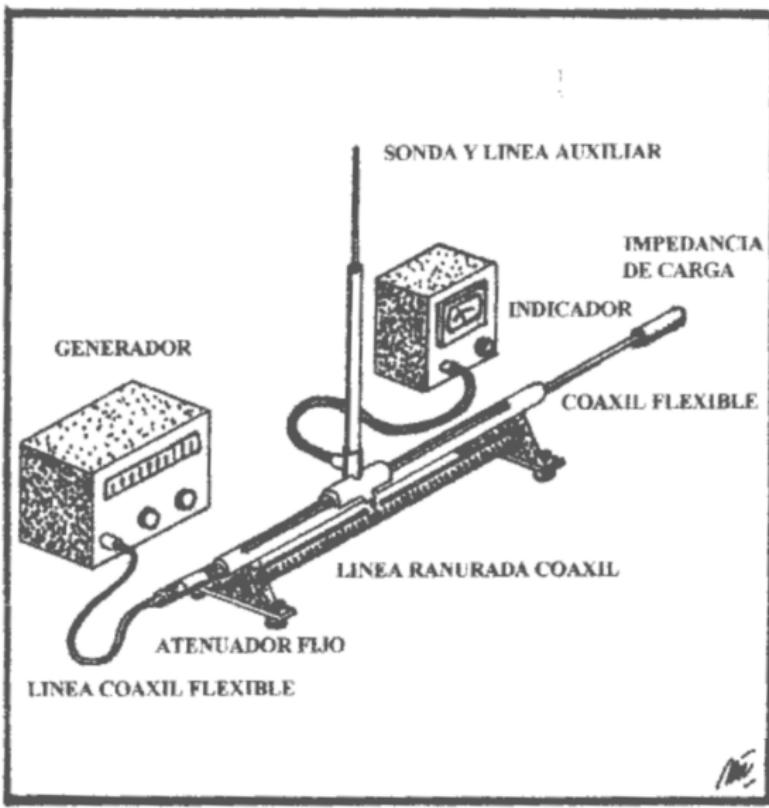
En el mínimo de tensión $z = z_m$ se obtiene:

$$Z_L = Z_0 \frac{1 - jROE \operatorname{tg} \beta z_m}{ROE - j \operatorname{tg} \beta z_m} \quad (4)$$

MEDICIÓN DEL COEFICIENTE DE REFLEXIÓN Y Z



MEDICIÓN DEL COEFICIENTE DE REFLEXIÓN Y Z



MEDICIÓN DEL COEFICIENTE DE REFLEXIÓN Y Z

Erores

Para calcular el error en el módulo y la fase de $\Gamma = |\Gamma| e^{j\phi}$ para $f = 1GHz$ $\lambda = c/f = 0,30m$ con la escala a $0,1mm$ se tiene:

Para la Longitud de onda Se mide los mínimos a 10cm y 40cm, entonces el error en la posición:

$$0,10m \pm 0,0001m$$

$$0,40m \pm 0,0001m$$

$$\lambda = ((0,40 - 0,10) \pm 2 \cdot 0,001)m = (0,3 \pm 0,002)m$$

$$\epsilon_{rel\%} = 100\% \frac{0,002}{0,3} \cong 0,7\%$$

MEDICIÓN DEL COEFICIENTE DE REFLEXIÓN Y Z

Para la $ROE = \frac{V_{max}}{V_{min}}$

Valores medidos $V_{max} = 5V$ $V_{min} = 1V$ Instrumento Fluke 17B

Para $V_{max} = 5V$ Resolución $0,01V$ rango $40V$

Error = $\pm(0,5\% \text{ lectura} + \text{Número de dígitos menores significativos})$

Error = $0,005 \cdot 5V + 3 \cdot 0,01V = 0,025V + 0,03V = 0,055V$

Error relativo % $\epsilon_r = 100\% \frac{0,055V}{5V} = 1,1\%$

Para $V_{min} = 1V$ Resolución $0,001V$ rango $4V$

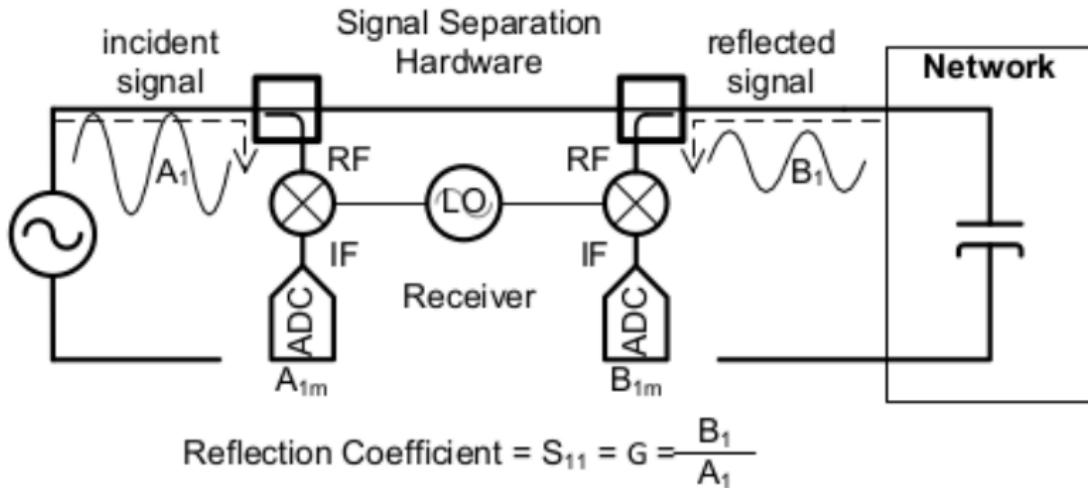
Error = $\pm(0,5\% \text{ lectura} + \text{Número de dígitos menores significativos})$

Error = $0,005 \cdot 1V + 3 \cdot 0,001V = 0,005V + 0,003V = 0,008V$

Error relativo % $\epsilon_r = 100\% \frac{0,008V}{1V} = 0,8\%$

Error relativo % ROE $\cong 2\%$

ANALIZADOR DE REDES



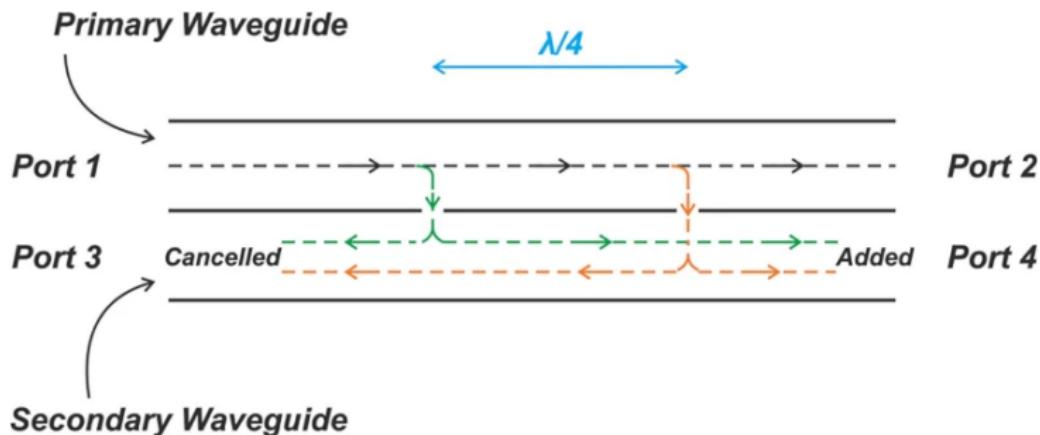
National Semiconductors

ANALIZADOR DE REDES

- Se obtiene el coeficiente de reflexión midiendo la relación la señal reflejada y la señal incidente de un dispositivo bajo prueba.
- Un acoplador direccional o un puente se usa para detectar la señal reflejada.
- El analizador de redes se usa para alimentar y medir señales en altas frecuencias. Actualmente cubre desde algunos Hz a THz
- Un dispositivo de microondas se caracteriza mediante la reflexión y transmisión en amplitud y fase.

ACOPLADOR DIRECCIONAL. FUNCIONAMIENTO

Acoplador direccional en guía de ondas de dos aberturas



Puerto 1: puerto de entrada

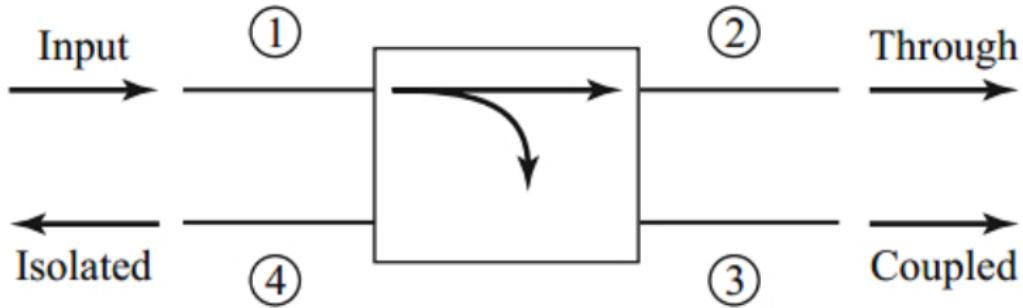
Puerto 2: puerto de salida

Puerto 3: puerto aislado

Puerto 4: puerto acoplado

ACOPLADOR DIRECCIONAL. FUNCIONAMIENTO

Acoplador direccional



ACOPLADOR DIRECCIONAL. DEFINICIONES

Acoplamiento

$$C = 10 \log_{10} \frac{P_1}{P_3}$$

Aislación

$$I = 10 \log_{10} \frac{P_1}{P_4}$$

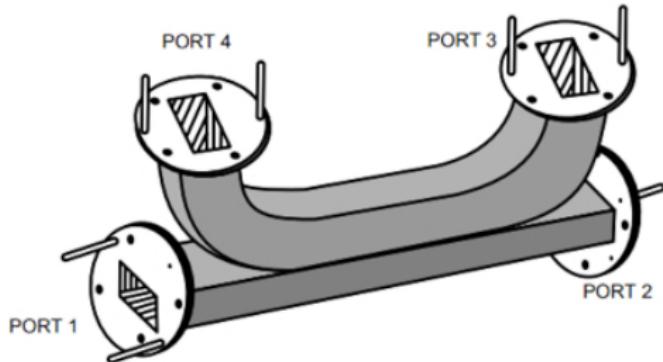
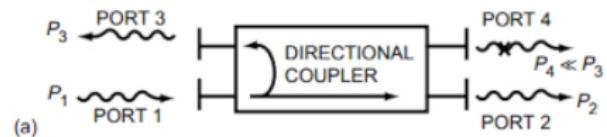
Directividad

$$D = 10 \log_{10} \frac{P_3}{P_4}$$

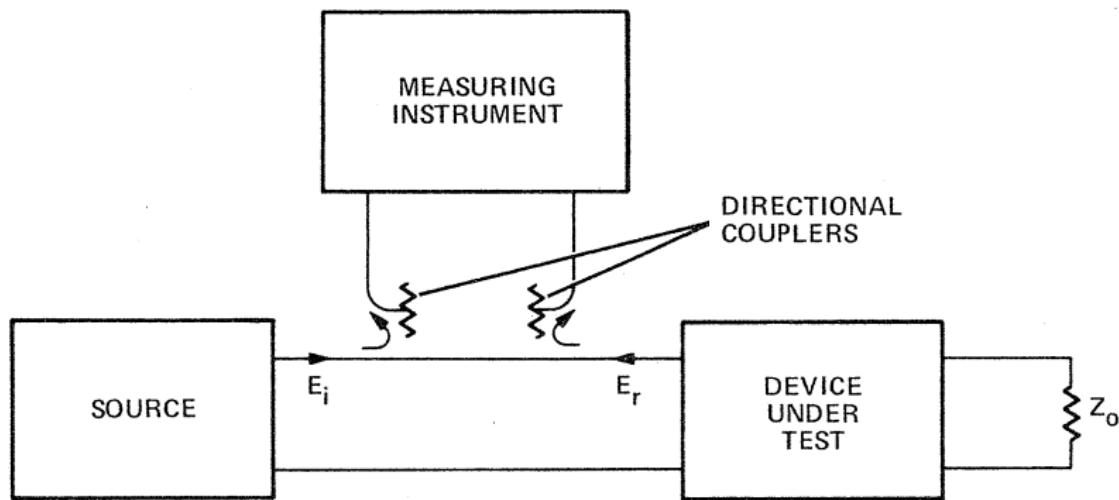
Se puede obtener la relación:

$$I = C + D$$

FUNCIONAMIENTO DE UN ACOPLADOR DIRECCIONAL



ANALIZADOR DE REDES. MEDICIÓN DE REFLEXIÓN

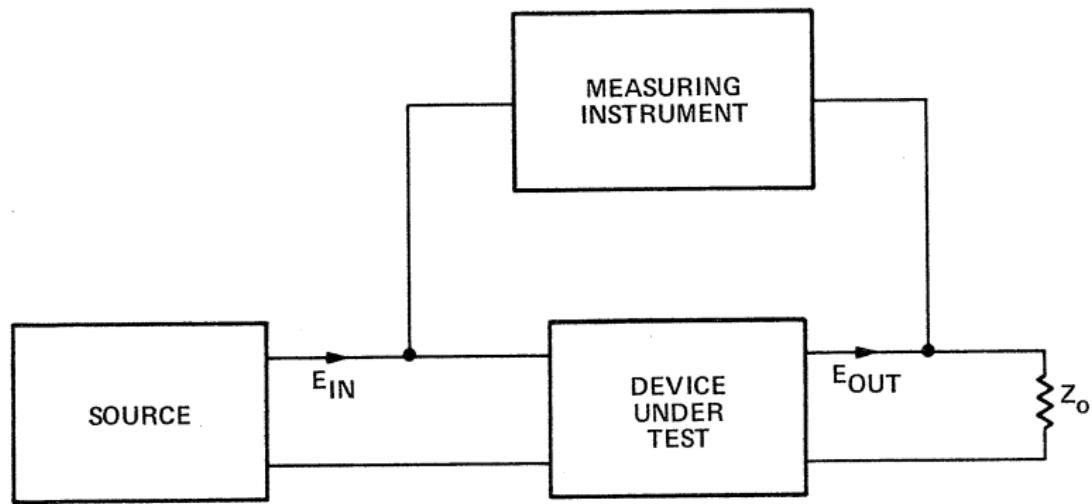


Note 117-1 Hewlett Packard. Microwave Network Analyzer Application.
Agilent Technologies. Network Analyzers Basics

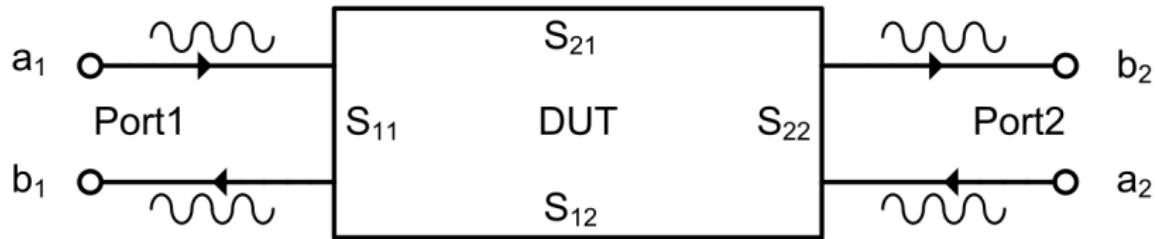
ANALIZADOR DE REDES. MEDICIÓN DE TRANSMISIÓN

Se hace mediciones de inserción, mediciones incrementales y comparativas
La transmisión se obtiene

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{|V_{out}|}{|V_{in}|} \angle(\phi_{out} - \phi_{in})$$



ANALIZADOR DE REDES. PARAMETROS S



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

$$b_1 = S_{22}a_1 + S_{21}a_2$$

a_1 y a_2 ondas incidentes a 1 y 2

b_1 y b_2 ondas reflejadas a 1 y 2

$$\mathbf{b} = \mathbf{S} \cdot \mathbf{a}$$

ANALIZADOR DE REDES. PARAMETROS S

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix}$$

donde:

a_1 : tensión de la onda incidente en 1 / $\sqrt{Z_0}$

a_2 : tensión de la onda incidente en 2 / $\sqrt{Z_0}$

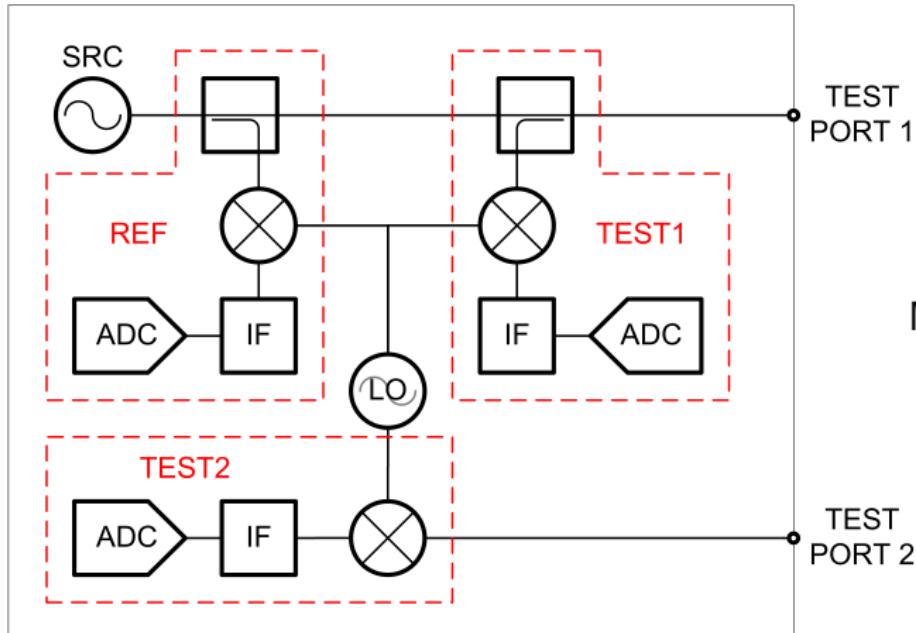
b_1 : tensión de la onda reflejada en 1 / $\sqrt{Z_0}$

b_2 : tensión de la onda reflejada en 2 / $\sqrt{Z_0}$

$$Z_{in} = Z_0 \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} = Z_0 \frac{1 + S_{11}}{1 - S_{11}}$$

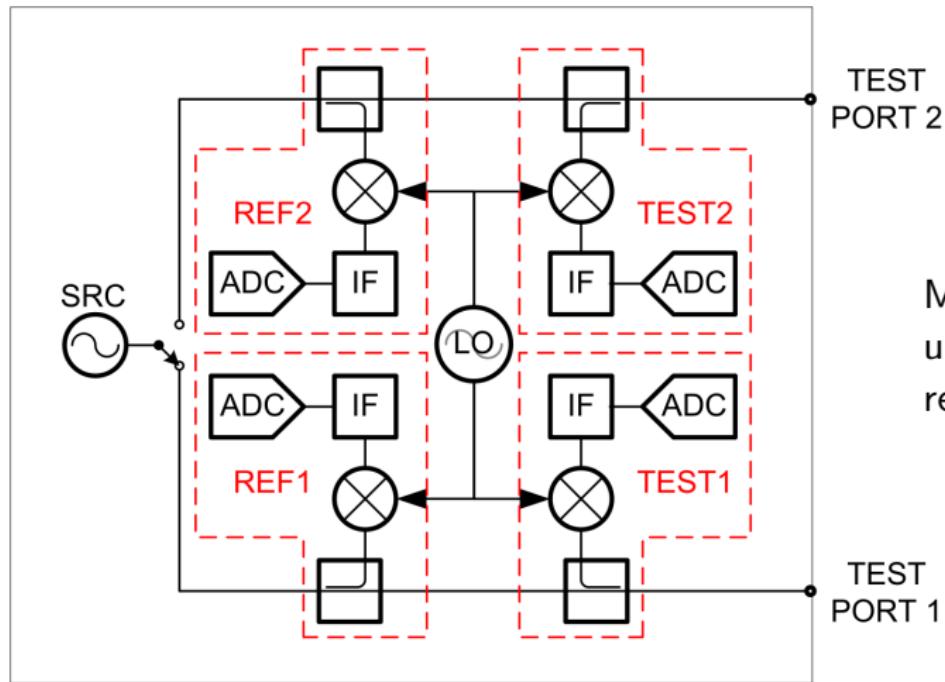
Por lo tanto conociendo el coeficiente S_{11} se obtiene Z_{in}

ANALIZADOR DE REDES. DIAGRAMA DE BLOQUES



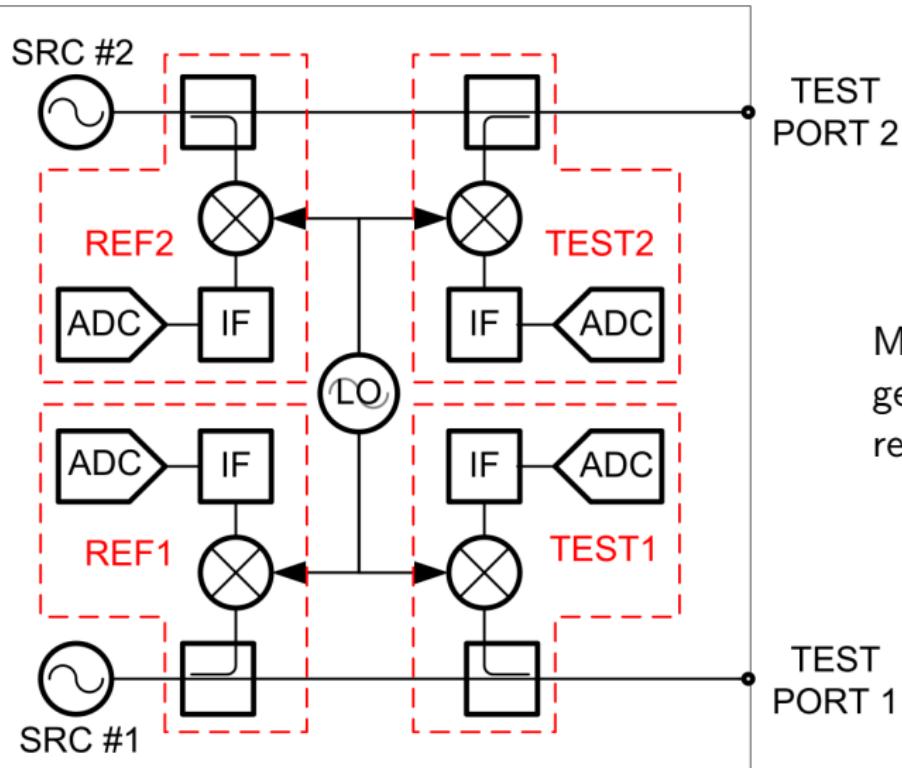
Modelo de VNA T/R

ANALIZADOR DE REDES. DIAGRAMA DE BLOQUES



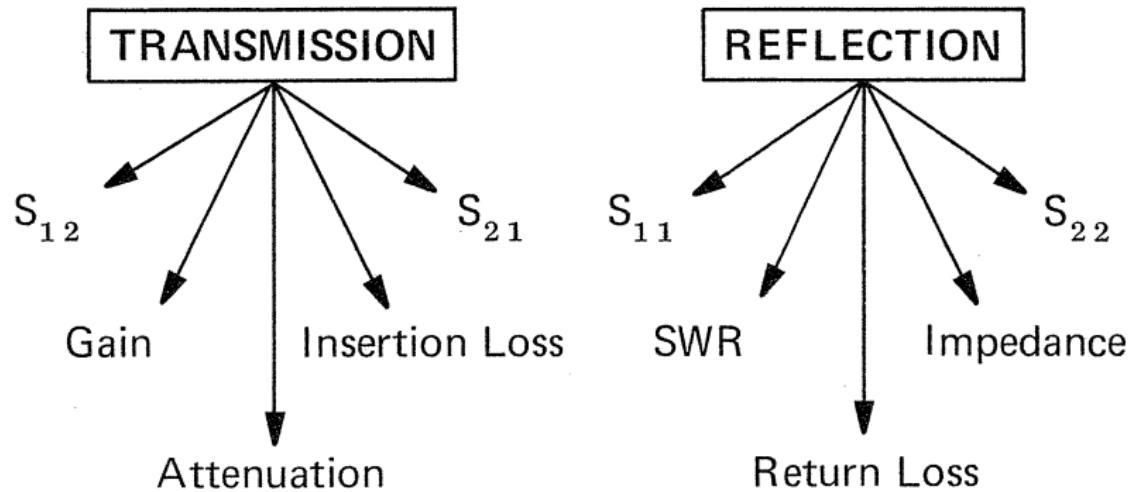
Modelo de VNA con
un generador y 4
receptores

ANALIZADOR DE REDES. DIAGRAMA DE BLOQUES



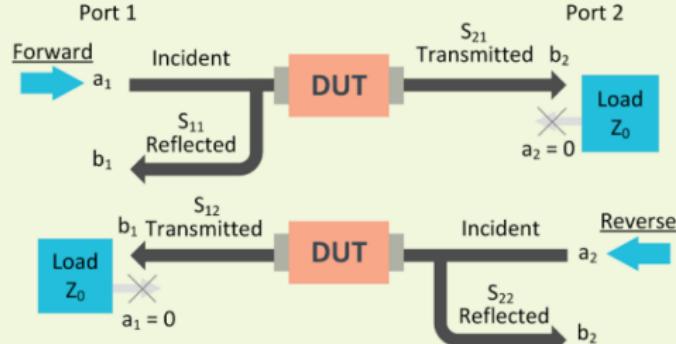
Modelo de VNA con 2 generadores y 4 receptores

ANALIZADOR DE REDES. PARÁMETROS S



ANALIZADOR DE REDES. PARÁMETROS S

S-Parameter Theory View



Forward:

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

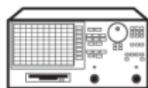
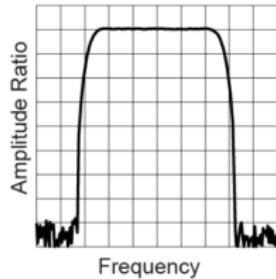
Reverse:
$$S_{22} = \frac{\text{Reflected}}{\text{Incident}} = \frac{b_2}{a_2} \Big|_{a_1=0}$$

Transmission:

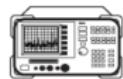
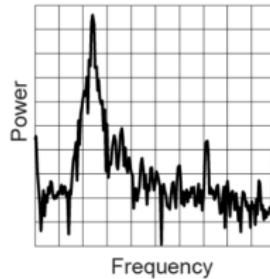
$$S_{21} = \frac{\text{Transmitted}}{\text{Incident}} = \frac{b_2}{a_1} \Big|_{a_2=0}$$

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

COMPARACION ENTRE ANALIZADOR DE REDES(VNA) Y ANALIZADOR DE ESPECTRO(AE)



Measures
known
signal



Measures
unknown
signals

Network analyzers:

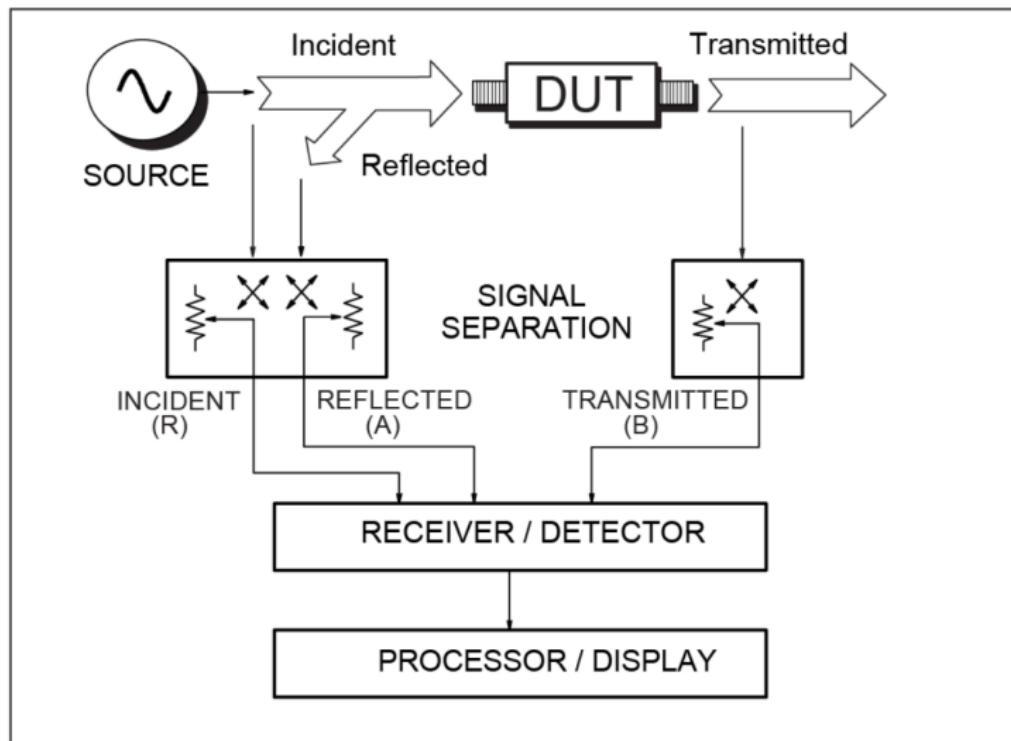
- measure components, devices, circuits, sub-assemblies
- contain source and receiver
- display ratioed amplitude and phase (frequency or power sweeps)
- offer advanced error correction

Spectrum analyzers:

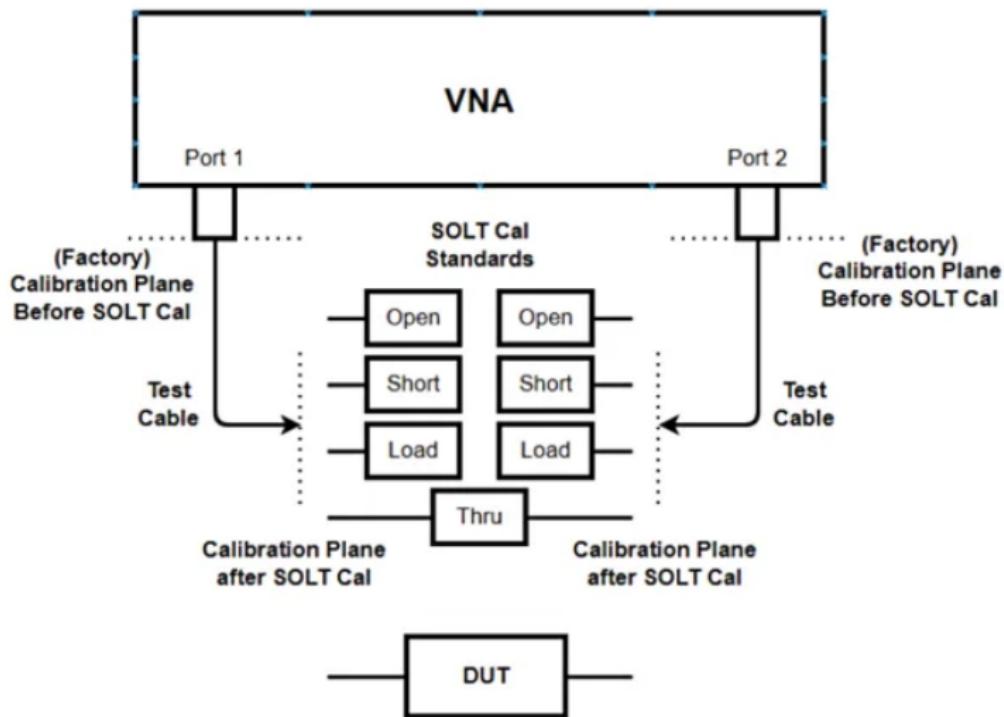
- measure signal amplitude characteristics (carrier level, sidebands, harmonics, etc.)
- can demodulate (& measure) complex signals
- are receivers only (single channel)
- can be used for scalar component test (no phase) with tracking gen. or ext. source(s)

FUNCIONAMIENTO DE UN VNA

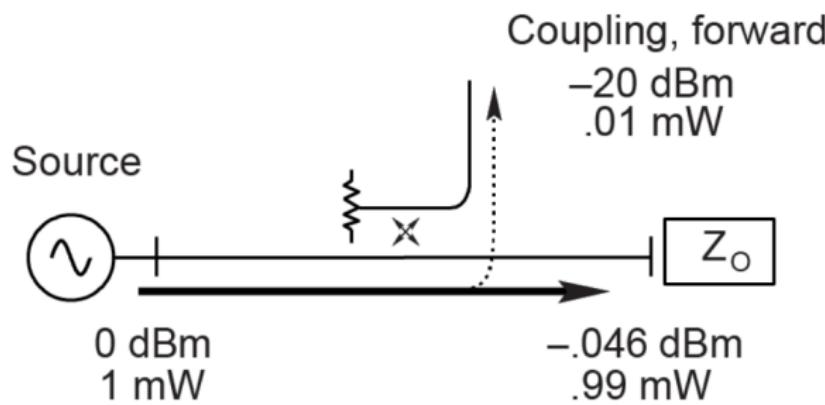
Diagrama en bloques del funcionamiento de un VNA (Keysight)



CALIBRACIÓN DE UN VNA



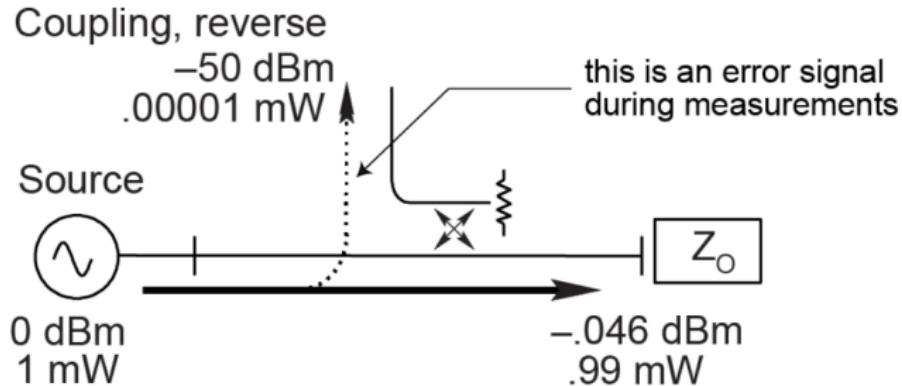
FUNCIONAMIENTO DE UN VNA



Example of 20 dB Coupler

$$\text{Coupling Factor (dB)} = -10 \log \frac{P_{\text{coupling forward}}}{P_{\text{incident}}}$$

FUNCIONAMIENTO DE UN VNA

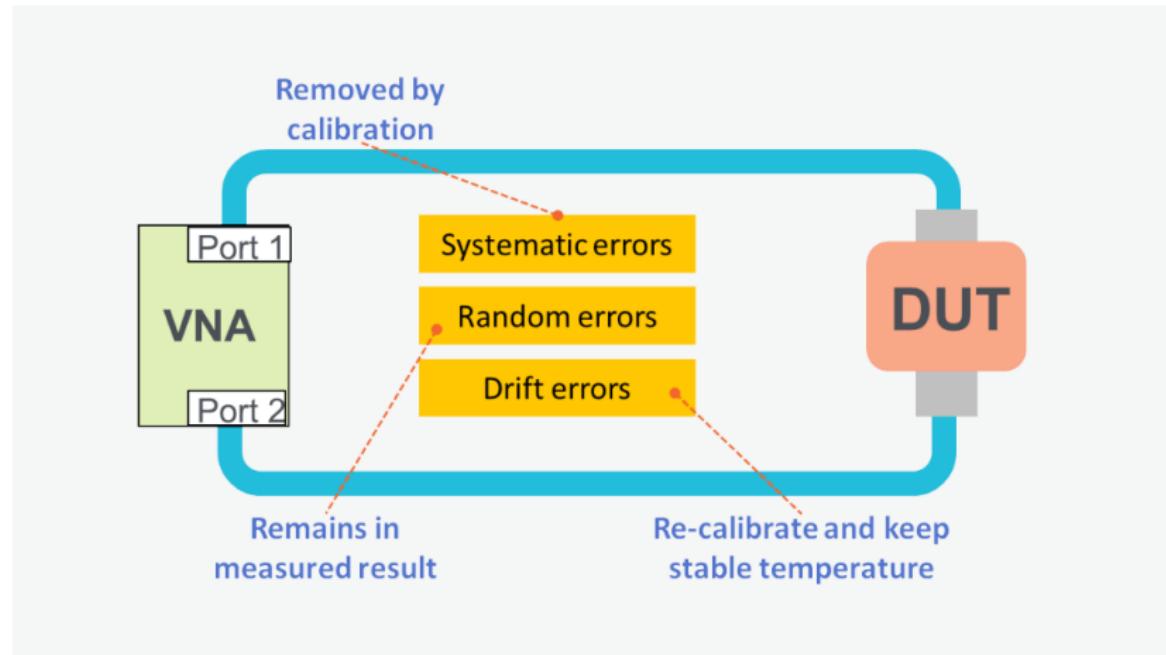


Example of 20 dB Coupler "turned around"

$$\text{Isolation Factor (dB)} = -10 \log \frac{P_{\text{coupled reverse}}}{P_{\text{incident}}}$$

ERRORES DE UN VNA

Errores en el Analizador de red



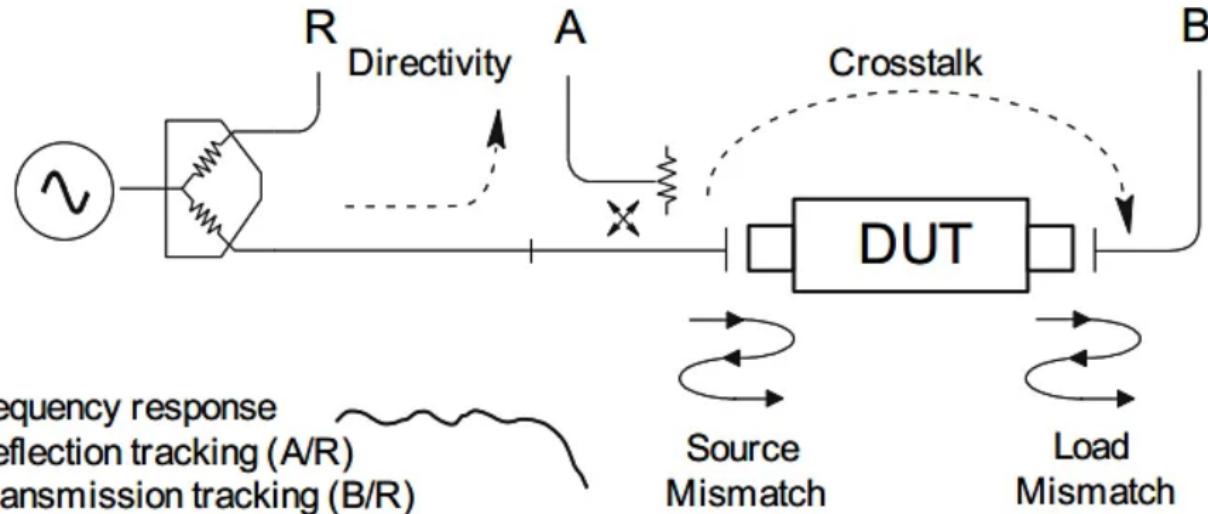
ERRORES SISTEMÁTICOS DE UN VNA

Son producidos por componentes no ideales del VNA (imperfecciones)

- Pérdidas de señal Error por Directividad Error por aislación (crosstalk).
- Reflexión de la señal Error en la adaptación del generador Error de adaptación en la carga
- Respuesta en frecuencia (tracking). Error de Tracking de Reflexión Error de tracking de Transmisión
- Error por el plano de conexión del DUT

Estos errores pueden ser totalmente eliminados por la calibración, son predecibles y no varían con el tiempo.

ERRORES SISTEMÁTICOS DE UN VNA



ERRORES ALEATORIOS DE UN VNA

Errores aleatorios (Random errors) son causados por:

- ruido del instrumento
- práctica en la medición
- cables, conectores, etc.

Pueden ser minimizados pero van a seguir estando presentes

ERRORES DE DERIVA DE UN VNA

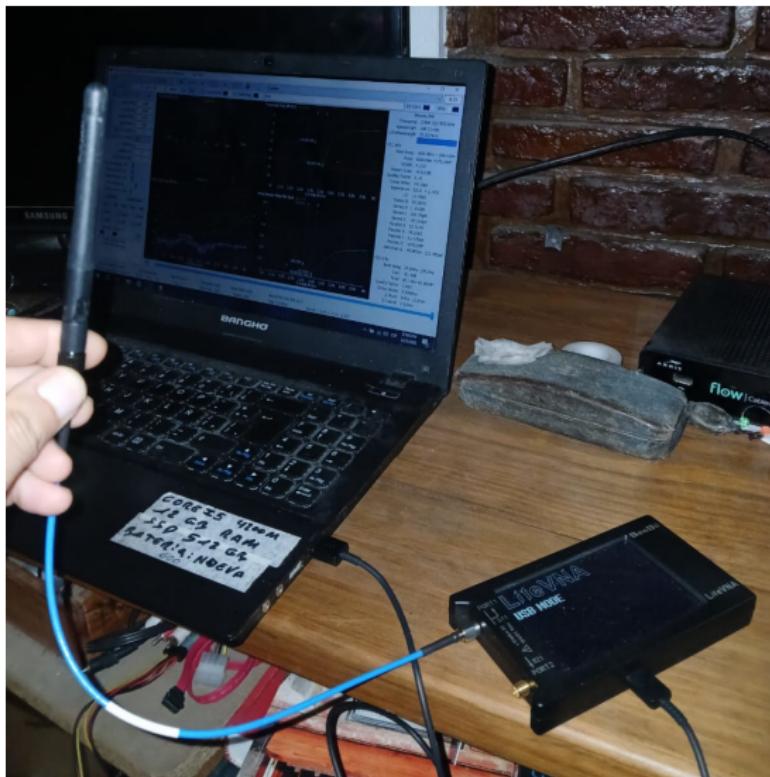
Errores de deriva son causados por:

- cambios de temperatura despues de la calibración

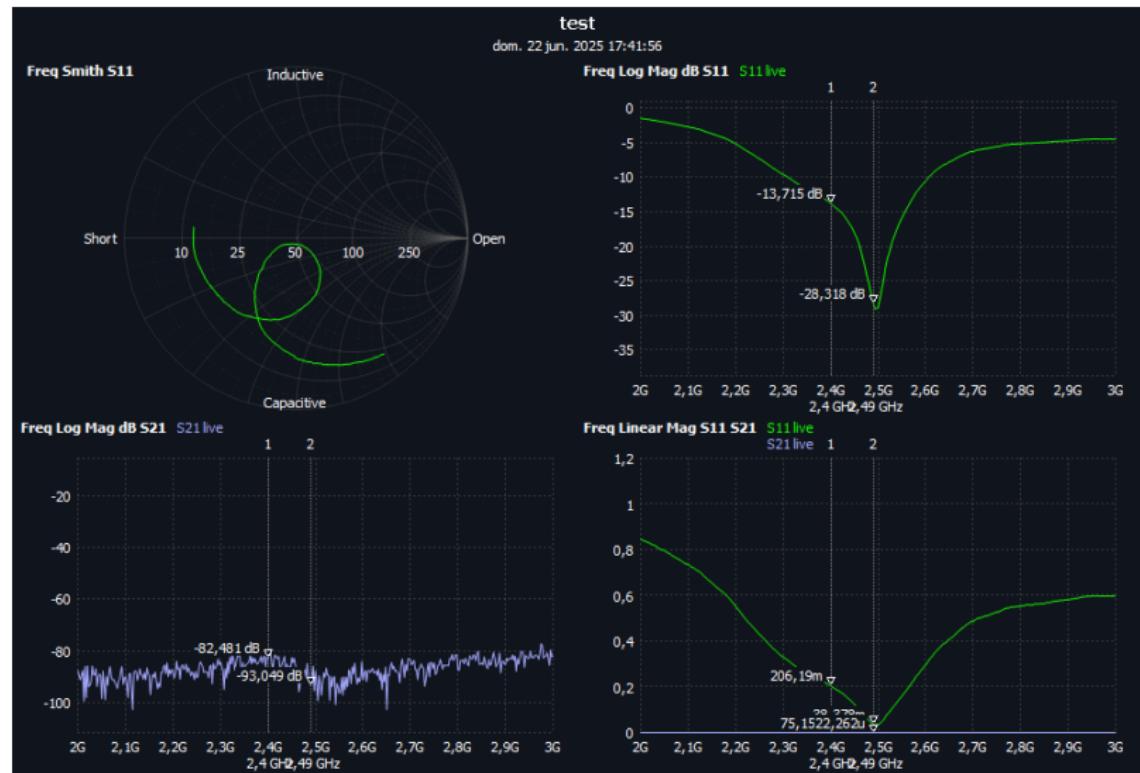
Pueden ser minimizados controlando la temperatura ambiente, medir con el instrumento en regimen de temperatura , y repitiendo la calibración.

Estos errores pueden minimizarse pero seguirán presentes.

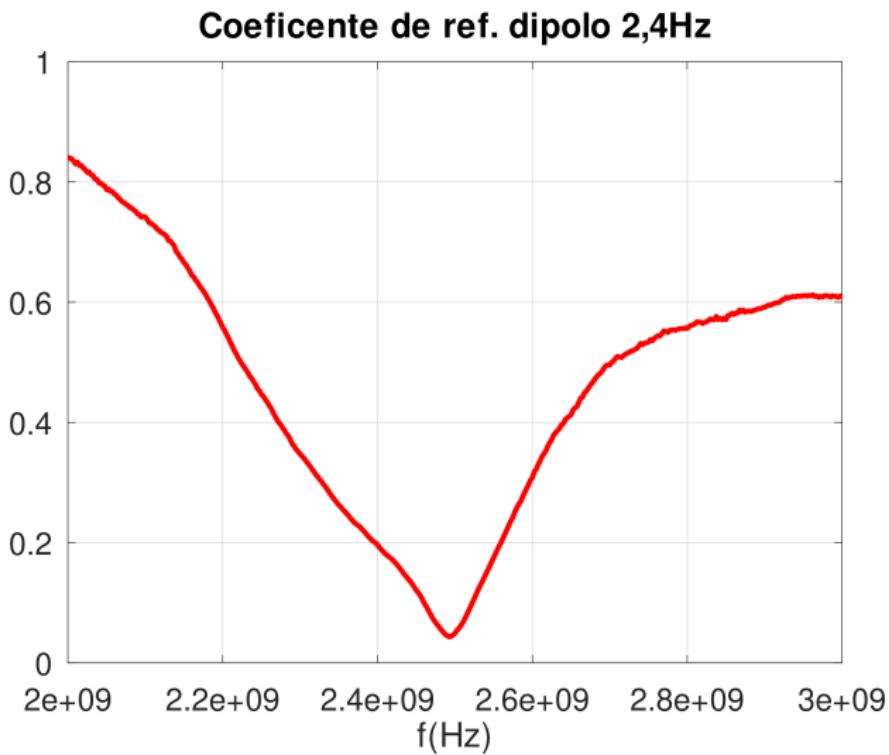
EJEMPLO DE MEDICIÓN DE UNA ANTENA DIPOLO 2,4GHz



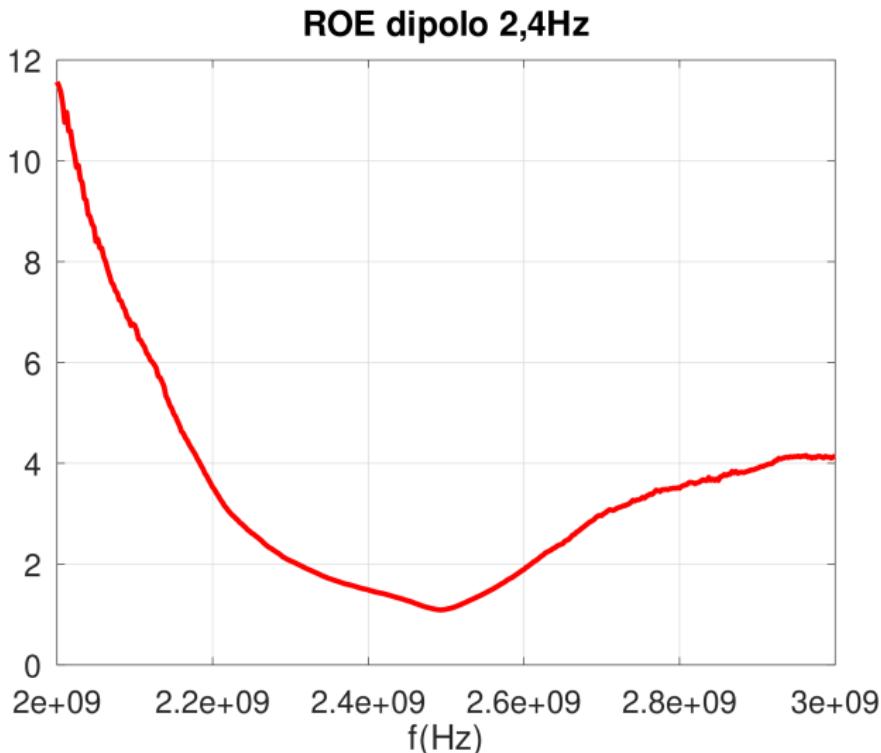
EJEMPLO DE MEDICIÓN DE UNA ANTENA DIPOLO 2,4GHz



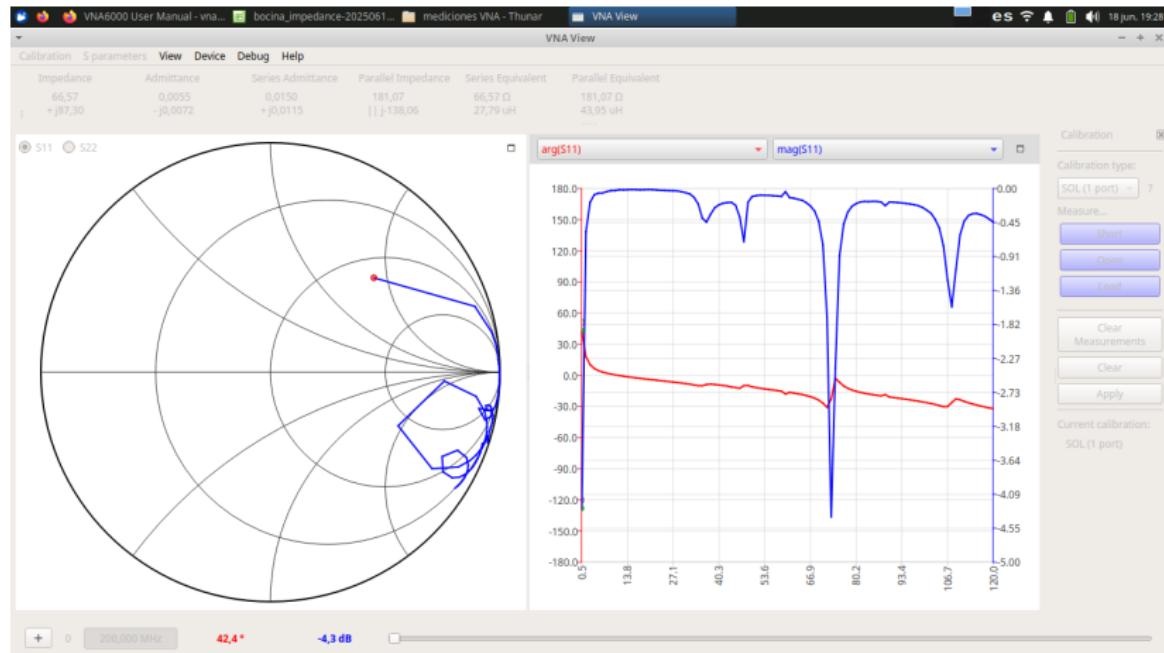
EJEMPLO DE MEDICIÓN DE UNA ANTENA DIPOLO 2,4GHz



EJEMPLO DE MEDICIÓN DE UNA ANTENA DIPOLO 2,4GHz

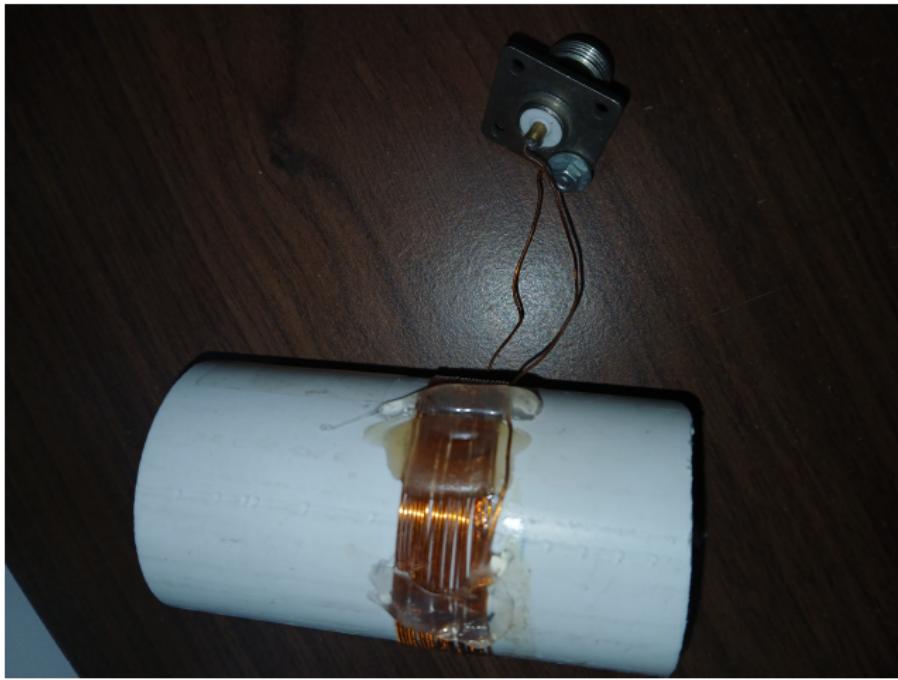


ANALIZADOR DE REDES. PARÁMETROS S



Captura de pantalla Lazo de aire de 5cm hasta 120MHz

EJEMPLO DE MEDICIÓN DE UN LAZO DE 5CM DE DIÁMETRO CON ANALIZADOR DE REDES



Gracias por su atención.

Preguntas?

BIBLIOGRAFÍA

- Libro Ingeniería Electromagnética Vol.3, Trainotti y Fano. Ed. Nueva Librería.
- National Instruments. Introduction to Network Analyzer Measurements, Fundamentals and Background.
- Exploring the Architectures of Network Analyzers, Keysight Application Note.
- Understanding the Fundamental Principles of Vector Network Analysis, Keysight Application Note 1287-1.
- Applying Error Correction to Network Analyzer Measurements, Keysight Application Note 1287-3.
- Network Analyzer Measurements: Filter and Amplifier Examples, Keysight Application Note 1287-4.

BIBLIOGRAFÍA

- Agilent Technologies. Network Analyzers Basics
- Note 117-1 Hewlett Packard. Microwave Network Analyzer Application.
- Steve Arar, Introduction to the Directional Coupler for RF Applications 2024. All about circuits.
<https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/an-introduction-to-directional-couplers-and-their-application-in-vector-network-analyzers/>