

Medición de parámetros de componentes

Parte 2: instrumentos en 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
 - Ejemplos de aplicación

Voltímetro vectorial

- Las variables teóricas a y b se pueden obtener a partir de la medición de tensiones **incidentes y reflejadas**. Estas tensiones se deben medir en el **mismo plano de referencia!** (*¿por qué?*)

$$E_{r1} = s_{11} E_{i1} + s_{12} E_{i2}$$

$$E_{r2} = s_{21} E_{i1} + s_{22} E_{i2}$$

$$s_{11} = \frac{E_{r1}}{E_{i1}} \quad E_{i2} = 0$$

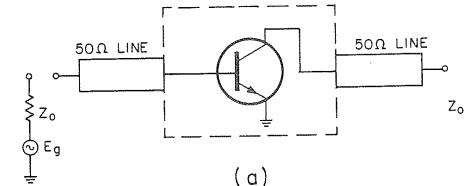
Achieved by connecting generator to port 1 and matching port 2 as shown in Figure 1(a)

$$s_{21} = \frac{E_{r2}}{E_{i1}} \quad E_{i2} = 0$$

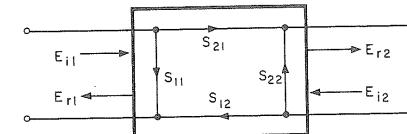
$$s_{22} = \frac{E_{r2}}{E_{i2}} \quad E_{i1} = 0$$

Achieved by connecting generator to port 2 and matching port 1.

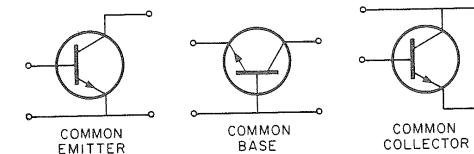
$$s_{12} = \frac{E_{r1}}{E_{i2}} \quad E_{i1} = 0$$



(a)



(b)

s₁₁ = s_{ie}s₂₁ = s_{fe}s₂₂ = s_{oe}s₁₂ = s_{re}s₁₁ = s_{ib}s₂₁ = s_{fb}s₂₂ = s_{ob}s₁₂ = s_{rb}s₁₁ = s_{ic}s₂₁ = s_{fc}s₂₂ = s_{oc}s₁₂ = s_{rc}

(c)

Voltímetro vectorial

- Las variables teóricas a y b se pueden obtener a partir de la medición de tensiones **incidentes** y **reflejadas**. Estas tensiones se deben medir en el **mismo plano de referencia!** (*¿por qué?*)
- El primer instrumento que posibilita estas mediciones es el **voltímetro vectorial**



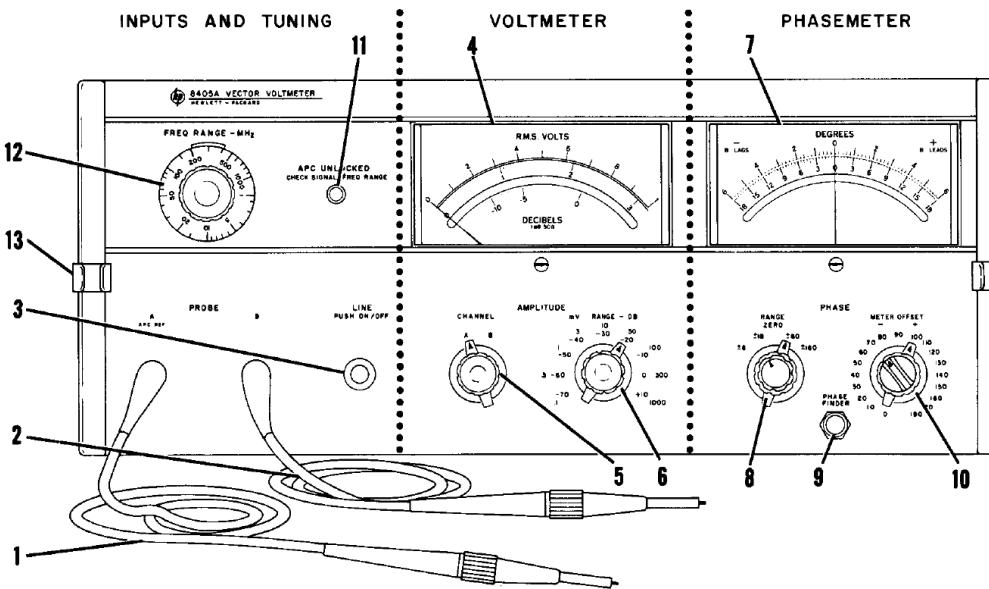
Voltímetro vectorial con punta de muestreo



Kit de accesorios

Voltímetro vectorial: características generales

- Milivoltímetro y fasímetro de dos canales (A y B). Mide:
 - Las tensiones en A y en B => ganancia o pérdida
 - La relación de fases entre A y B
- Rango de frecuencias 1 a 100 MHz (3 décadas) en 21 rangos solapados
- Voltímetro → 9 rangos (100uV a 1 V), 95 dB rango dinámico, divisor 10:1 para llegar a 10V
- Fasímetro → ángulos entre +180° a -180° en 4 rangos: ±180°, ±60°, ±18°, ±6°. Offset ±180° en pasos de 10° para llevar la escala de ±6° (precisión 0,1°) a cualquier posición del rango ±180°



1. Probe A. Input to channel A. The Voltmeter and Phasemeter tune to probe A input frequency.
2. Probe B. Input to channel B. A signal at probe A is required for phase measurement and for channel B amplitude measurement.
3. LINE. Depress to turn on 8405A; lamp lights. Pushbutton retainer unscrews for lamp replacement.
4. AMPLITUDE Meter. Reads amplitude of fundamental component of signal applied to probe A or probe B.
5. AMPLITUDE CHANNEL. Selects channel to be measured on voltmeter.
6. AMPLITUDE RANGE. Sets AMPLITUDE meter scale.
7. PHASE Meter. Reads phase angle between the fundamental components of signals applied to probes.
8. PHASE RANGE. Set phase meter scale. Red ZERO control has at least ±10° range.
9. PHASE FINDER. Overrides PHASE RANGE and PHASE METER OFFSET to select the ±180 phase range and zero offset. Used to find phase angle without changing settings of controls.
10. PHASE METER OFFSET. Used to reduce input phase angle and allow use of expanded PHASE RANGE scales. Not usable unless a definite input angle exists.
11. APC UNLOCKED. Lamp lights to indicate 8405A not tuned. Amplitude is too low and/or FREQ RANGE - MHZ selector is not set to the range which includes fundamental frequency of probe A input.
12. FREQ RANGE - MHZ. Coarse tuning control to put input signals within capture range of automatic fine tuning. Selected range must include fundamental frequency of signal applied to probe A.
13. Probe Holder.

Voltímetro vectorial: diagrama interno

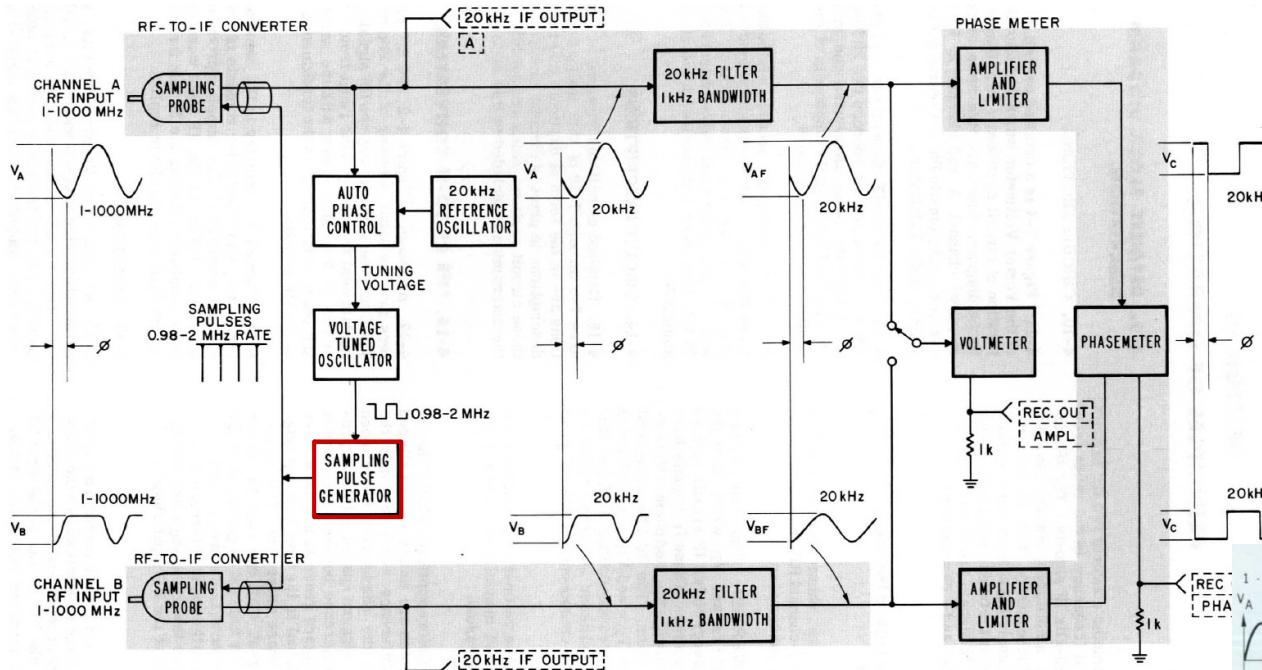
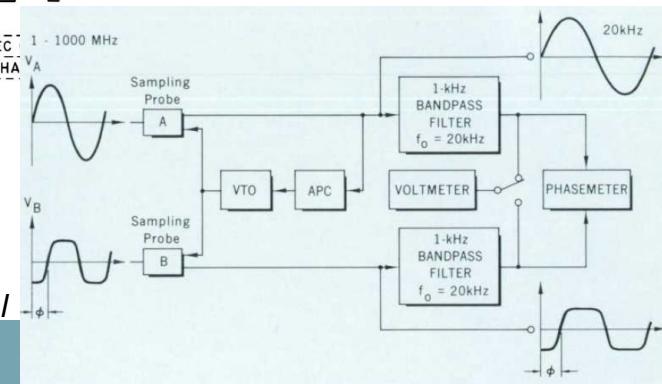


Diagrama según manual de usuario

4 etapas principales:

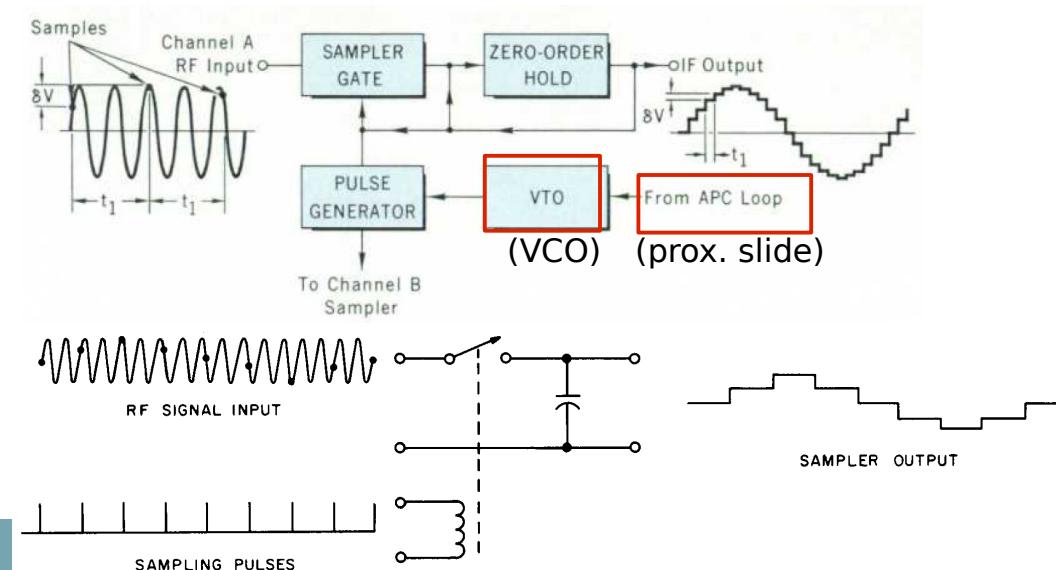
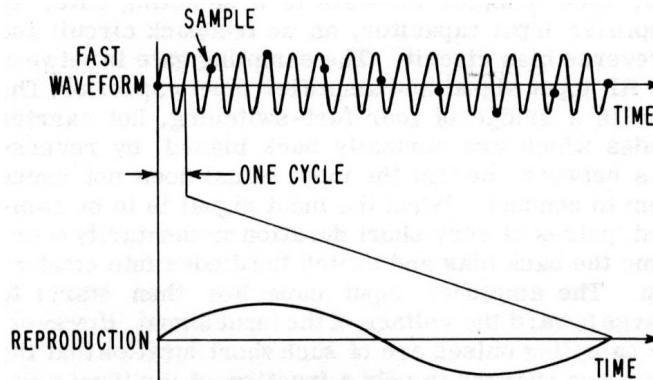
- Conversores por muestreo RF - IF en los canales A y B
- Control automático de fase (APC o PLL)
- Voltímetro
- Fasímetro

Diagrama simplificado, HP Journal



Conversores RF-IF (puntas de prueba muestreadoras)

- Los dos samplers reciben pulsos de la misma fuente sincronizada con A. Por lo tanto, las muestras se toman en ambos canales en los mismos instantes, preservando la relación de fase entre ambos canales.
- Utiliza “muestreo coherente” => las puntas de prueba son mezcladores por muestreo con LO enfasado con la señal A. Similar principio se utiliza en osciloscopios con “muestreo equivalente”.
- Las puntas utilizan sub-muestreo para convertir señales de RF en señales de IF=20 KHz y BW=1 KHz, donde se puede medir más fácilmente. El LO para ambos mixers proviene de una sola fuente, por lo que puedo medir Δ fase en IF.
- Los mezcladores son realimentados para alta Zin y pérdida de conversión ~ 0 dB.
- Las formas de onda se reproducen fielmente en la IF => las relaciones de amplitudes y frecuencias de sus componentes se mantienen.



Control automático de fase (APC aka PLL)

Sintoniza el instrumento a la frecuencia de la señal de entrada. (Qué sucede si tiene muchas componentes?)

- La **referencia** es el canal A. Un APC o PLL **sincroniza y engancha en fase el instrumento con la señal A**, en aprox. 10 ms. Si la señal tiene corrimientos moderados (≤ 15 MHz/sec) el PLL lo seguirá.
- El loop recibe señal desde el **ampli de entrada/limitador, que entrega amplitud cte.**
- Cuando aún no se sintonizó, la IF no es 20 KHz. El generador de búsqueda produce una rampa que ajusta la frecuencia del VCO, lo cual cambia el tiempo entre muestras y la IF producida. Cuando IF=20 KHz, el lazo se engancha; y a partir de allí el loop controla al VCO para adaptarse a eventuales cambios de f_{VCO} , $f_{señal}$, o modulaciones de fase en la entrada.

En estado de enganche, se cumple: $f_{señal} - n \cdot f_{VCO} = \pm 20$ KHz (modos invertido o no invertido). Un circuito de “sideband decision” se encarga de seleccionar **siempre la componente “no invertida” de + 20 KHz**.

- La **ganancia total del PLL** es función del **orden de la armónica (n) a la que se engancha**. Un **atenuador variable**, accesible desde el panel como “frequency range”, ajusta la ganancia para que sea **suficiente pero que no sea inestable**.

Control automático de fase (APC aka PLL)

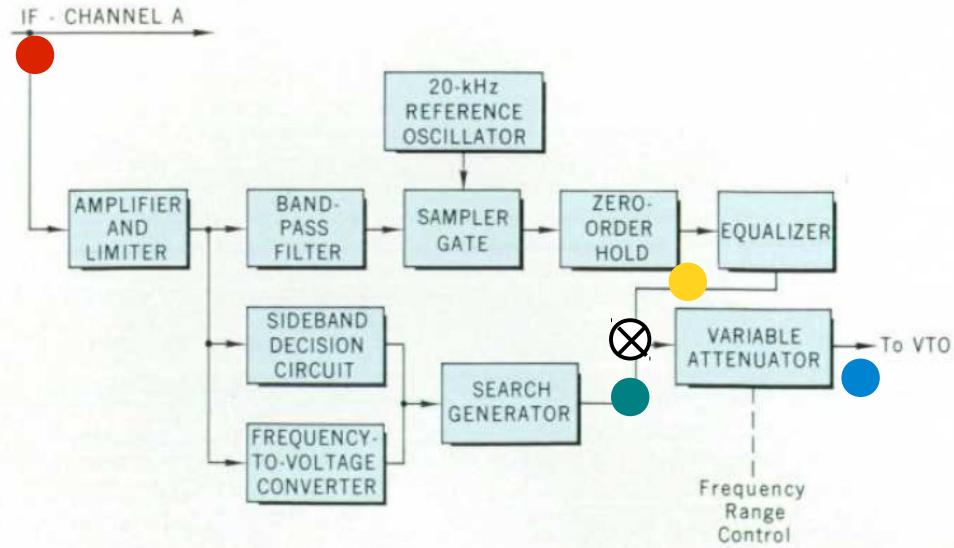
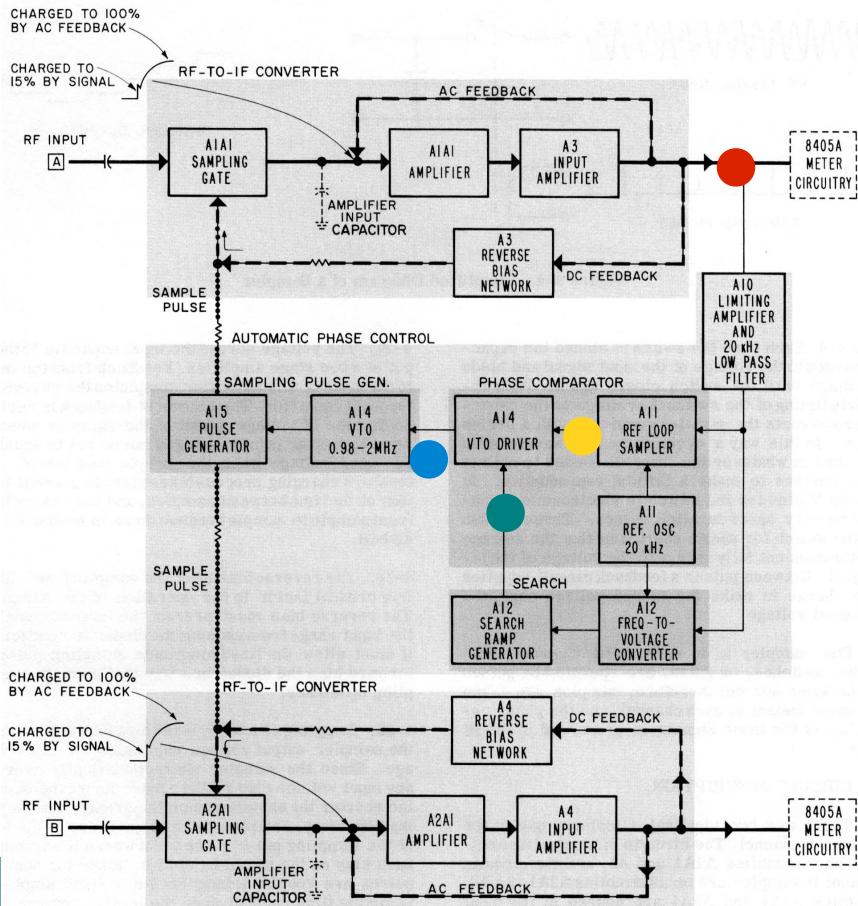
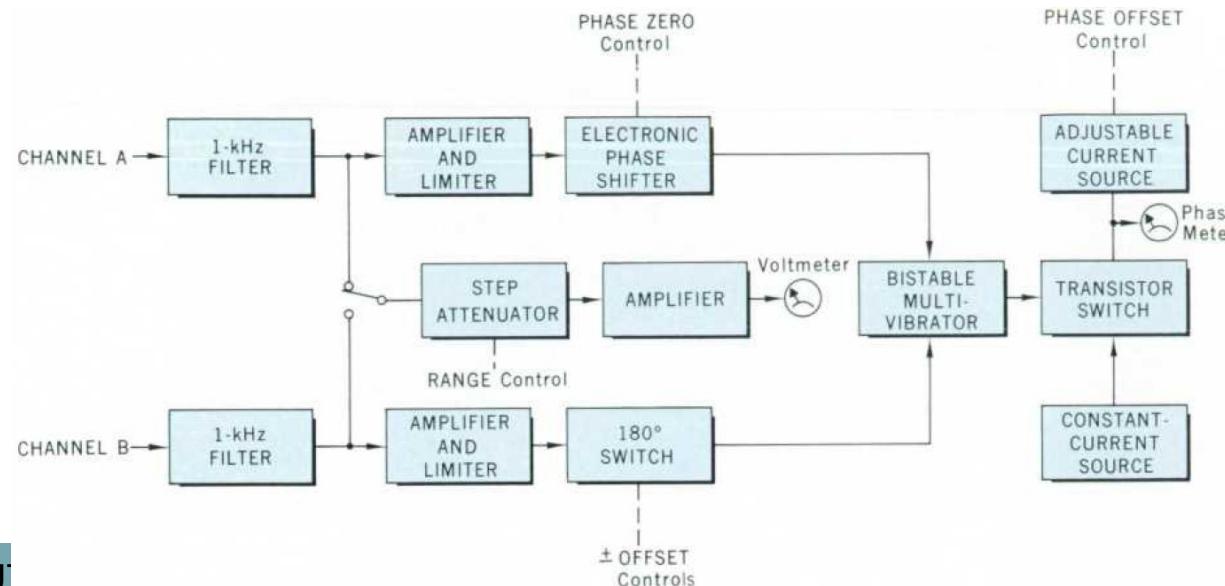


Diagrama simplificado, HP Journal

Diagrama según manual de usuario

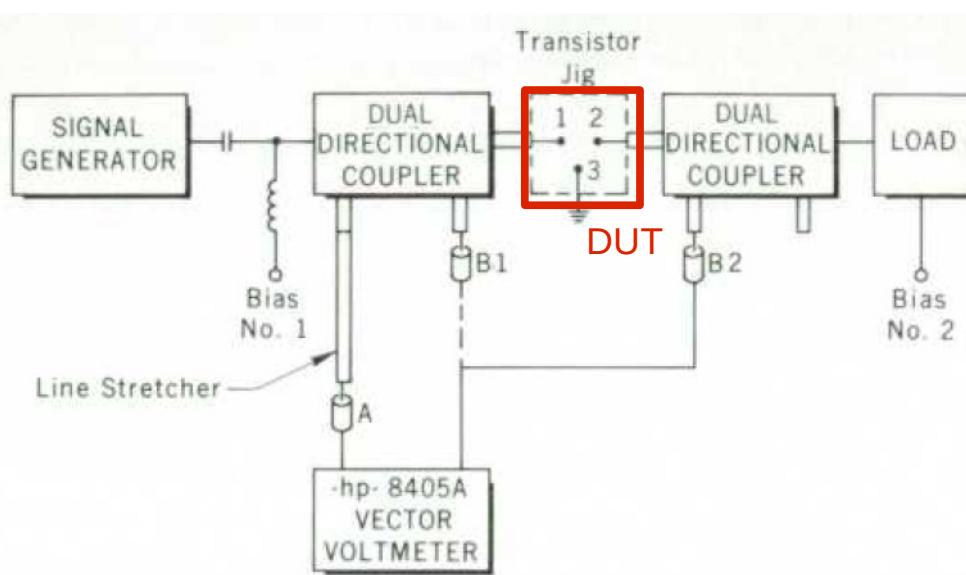
Voltímetro y fasímetro

- **Amplificadores y limitadores:** producen niveles idénticos en ambos canales, para que la lectura sea independiente de los niveles de entrada
- **Detector de fase:** Biestable, disparado a uno de sus estados por el canal A y al otro estado pro el canal B. Su salida va a un switch (transistor) que regula una fuente de corriente y entrega más o menos corriente al medidor.



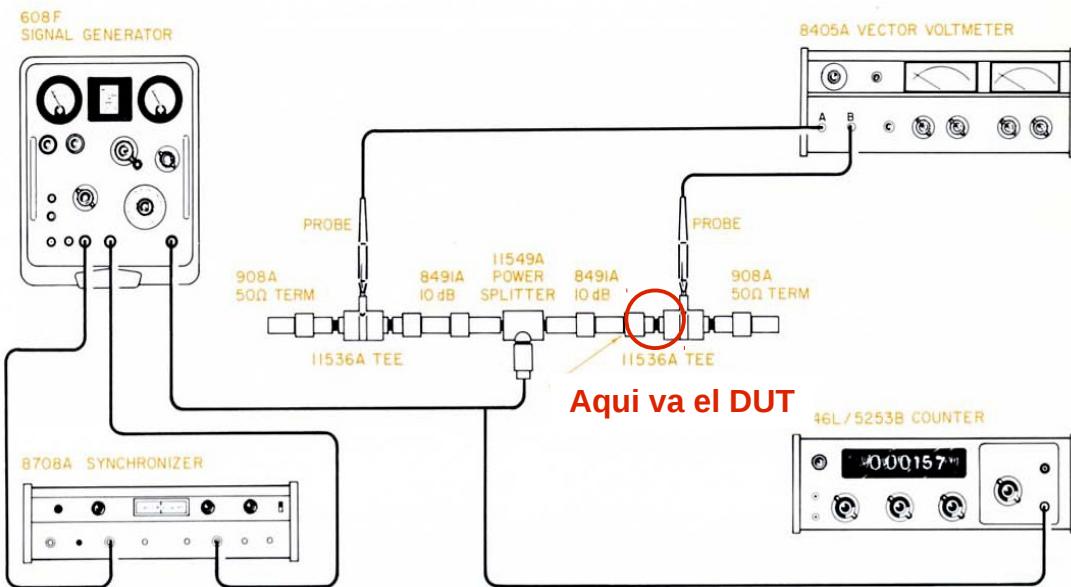
Uso del VVM

- Existen dos montajes para utilizar el instrumento:
 - Mediante dos acopladores direccional (permite **mediciones de reflexión y transmisión**, veremos ésta)



Uso del VVM

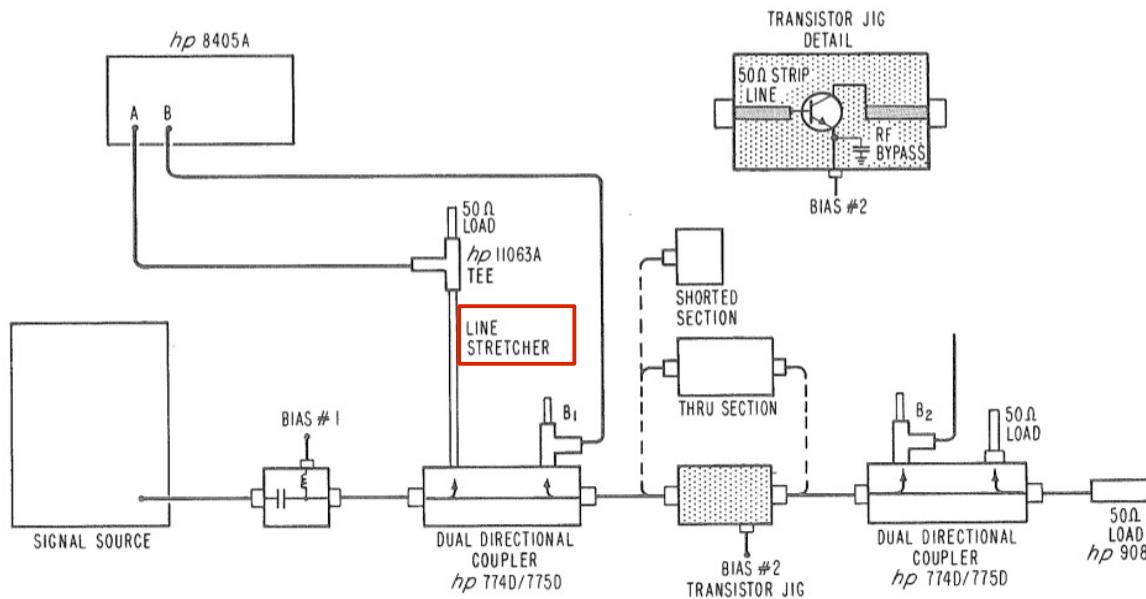
- Existen dos formas de utilizar el instrumento:
 - Mediante un divisor de potencia y dos TEs (sólo mediciones de transmisión, utilizado por su simplicidad si no se requieren medidas de reflexión)



https://www.youtube.com/watch?v=nypGmoJue_Q

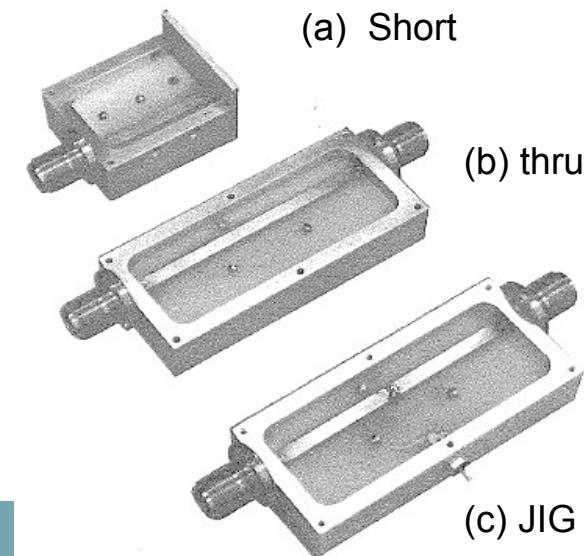
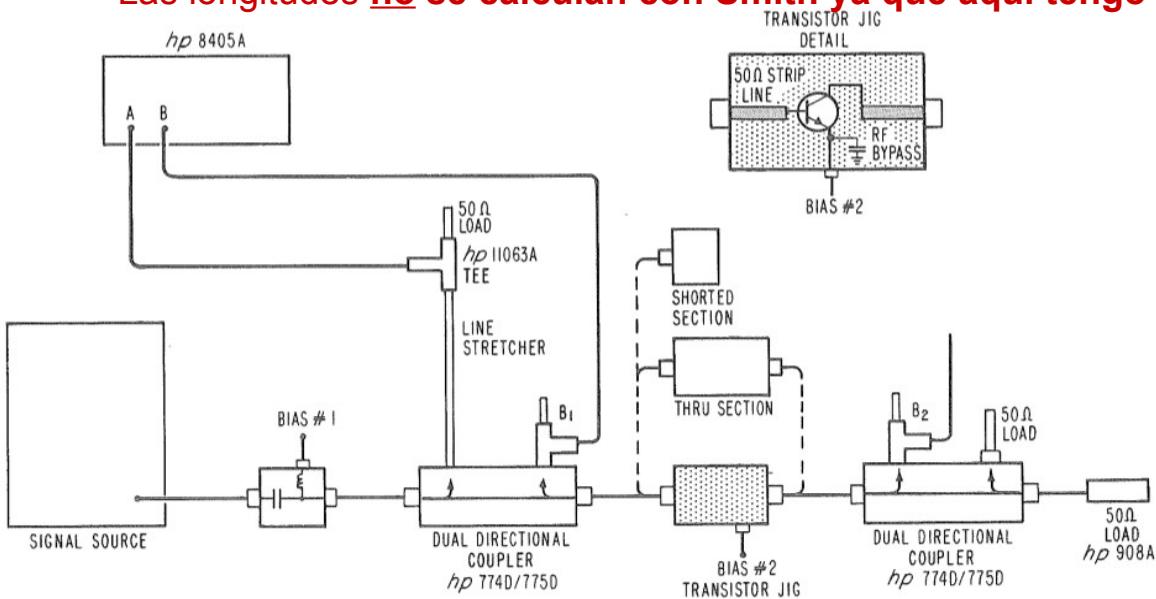
Uso del VVM

- El montaje que veremos permite medir parámetros de **un puerto o dos puertos**. Todo el sistema (fuera de nuestro componente) debe estar adaptado, según definición de params S.
- **Como primer paso, se deben igualar las longitudes eléctricas donde medimos, a fin de situar los canales A y B en el mismo plano de referencia (ver slides anteriores). Esto se realiza mediante dos tramos de línea variable llamados stretchers o phase shifters.**
 - Los stretchers tienen la particularidad de conservar su Z_0 al variar su longitud



Calibración del VVM

- Primero, se conecta un **cortocircuito standard** (a), se conectan A y B como en la figura, y se ajusta el stretcher a para lectura $1:1 \angle -180^\circ$. Esta calibración compensa errores en la medición de **un puerto (por ej. S_{11} o S_{22})**
- Luego, se conecta la **sección thru** (b) y se conecta B a B_2 . **Si $\text{long}_{\text{thru}} = 2 \cdot \text{long}_{\text{short}}$ y $\text{coupler1} = \text{coupler2}$, deberíamos obtener lectura $1:1 \angle 0^\circ$.** De lo contrario se coloca otro stretcher en B_2 y se re-calibra **sin tocar el stretcher anterior**. Con esto compensamos los errores para **dos puertos**.
- **Las longitudes no se calculan con Smith ya que aquí tengo ondas progresivas!**

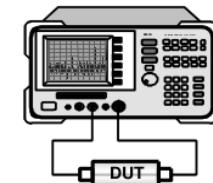
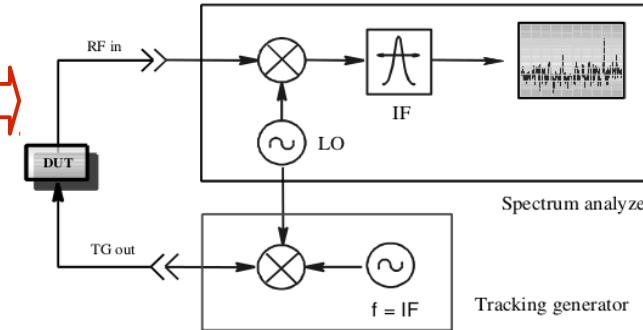


Agenda

- 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 (VVM)
 - Analizador vectorial de redes (VNA)**
 - Ejemplos de aplicación

Soluciones para análisis de redes (repaso)

- Analizador de espectro + generador de tracking
- Analizador escalar de redes (SNA)
- Analizador dinámico de señales (FFT)
- Analizador de antenas
- **Voltímetro vectorial (VVM)**
- **Analizador vectorial de redes (VNA)**

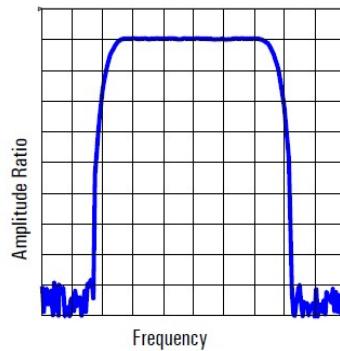


Key differences from network analyzer:

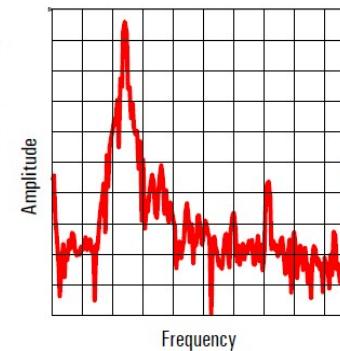
- one channel -- no ratioed or phase measurements
- More expensive than scalar NA
- Only error correction available is normalization (and possibly open-short averaging)
- Poorer accuracy
- Small incremental cost if SA is required for other measurements

Analizador vectorial de redes (VNA)

- Se genera un barrido de una fuente conocida, y se observa la respuesta del componente en **magnitud y fase**.
- Brinda **visualización directa de los resultados** (por ej. En diagrama de Smith, Bode, etc.) pero **su calibración y ajuste son críticos para obtener resultados correctos**.



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

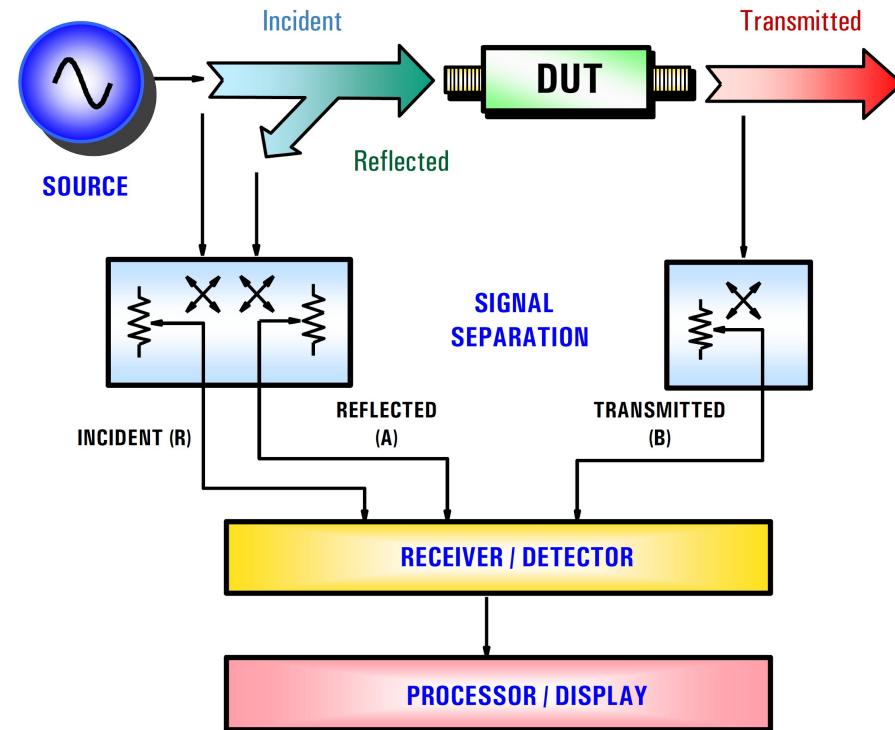
Spectrum analyzers:

- measure signal amplitude characteristics (carrier level, sidebands, harmonics...)
- 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)

Analizador vectorial de redes (VNA): bloques

Cuatro secciones principales:

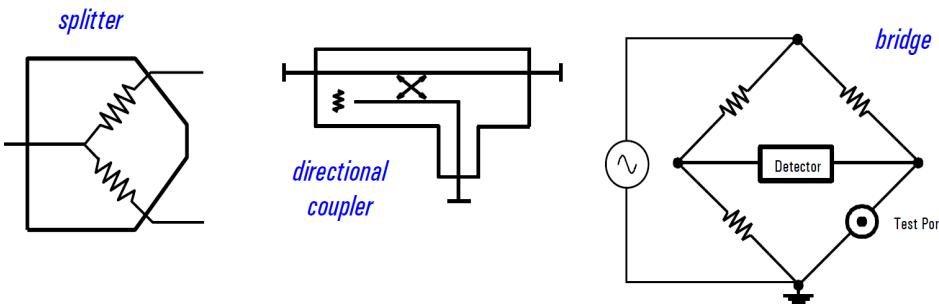
1. Fuente de estímulos
2. Dispositivos de **separación de señales**
3. Receptores para mezcla (down-conversion) y detección de señales
4. Procesador y display para cálculo y análisis de los resultados



VNA: bloques

1. Fuente de señal

- Provee un estímulo calibrado al sistema
- Puede barrer en **frecuencia o potencia**
- Tradicionalmente, era una fuente separada
- Actualmente es **integrada y sintetizada**

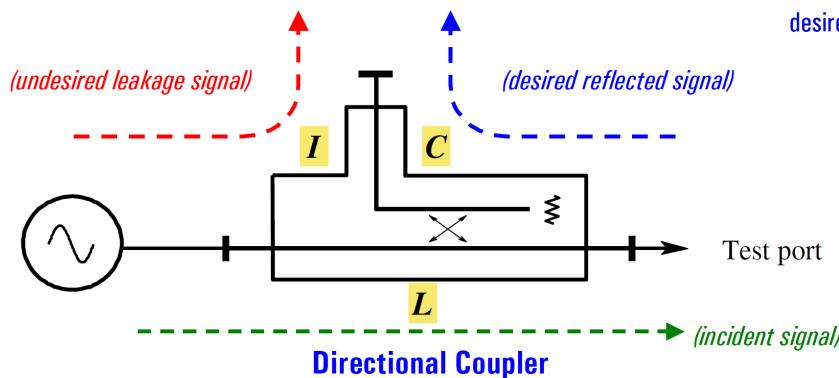


2. Separación de señales

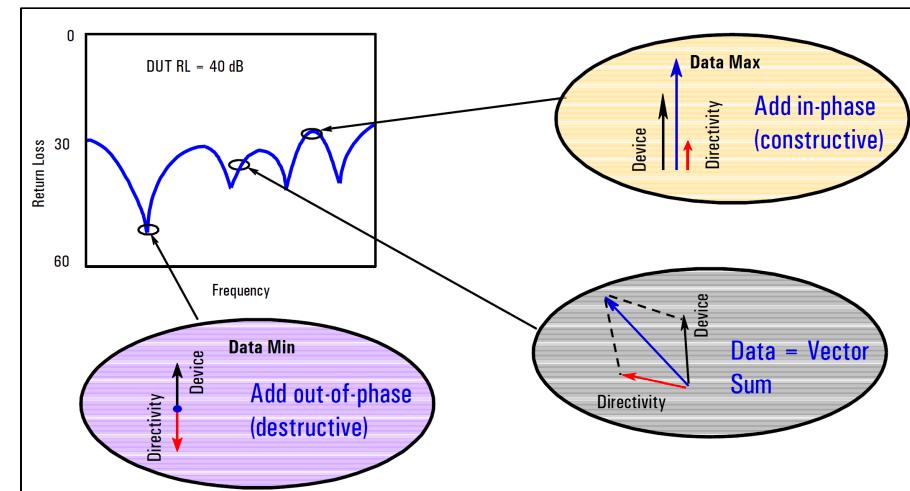
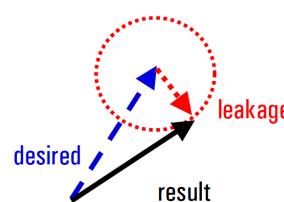
- Muestreo de la fuente para medirla como referencia: **Splitter (divisor)**
- Separación de ondas progresivas: **acoplador direccional ($>$ DC), puente de SWR (\geq DC)**
- **Splitters**: no-direccionales, banda ancha, resistivos, $IL=-6\text{dB}$ ($1/2$) en cada rama
- **Acoplador direccional**: baja IL , sensible sólo a la fuente. **No son prácticos debajo de 10MHz, se usan en microondas.**
- **Puentes de SWR**: son direccionales y funcionan hasta DC. Tienen mayor pérdida.

Directividad del acoplador

La directividad representa *cuánto puede separar el acoplador dos señales que se propagan en direcciones opuestas*



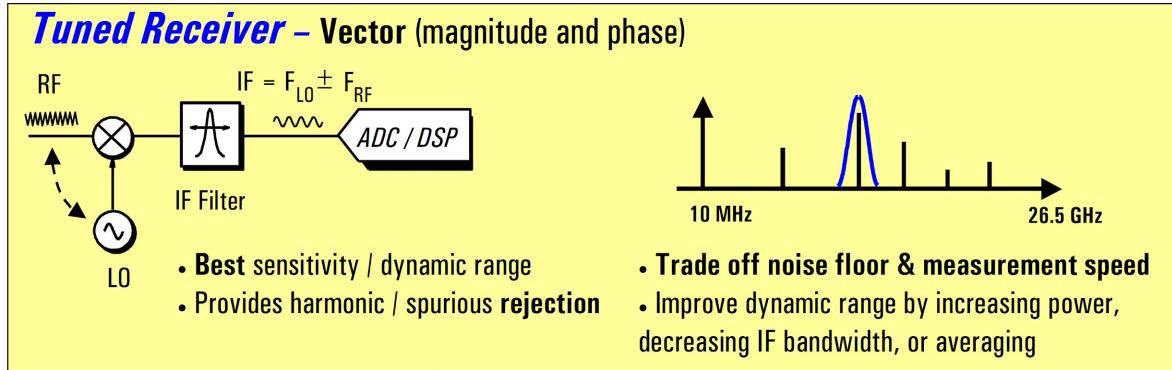
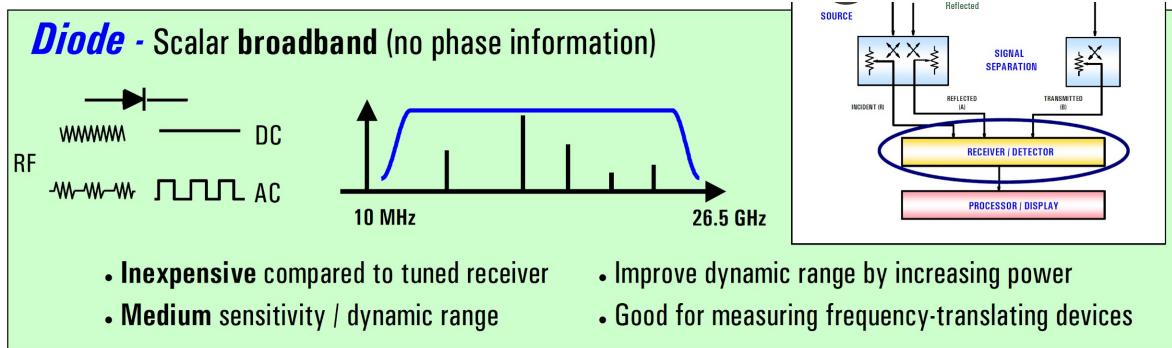
La directividad ocasiona un patrón de ripple en la medición de la pérdida de retorno (*i.e.*, $-20 \cdot \log|s_{11}|$), según las fases de las señales deseada (vector negro) y de fuga (vector rojo).



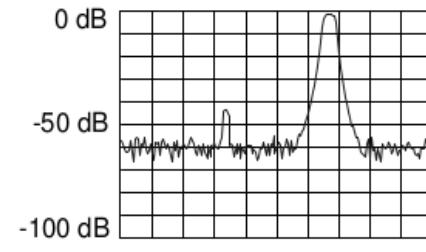
VNA: bloques

3. Mezcla / detección de la respuesta del DUT:

- la mezcla permite trabajar en frecuencias menores
- Medición mediante diodo (sin fase) o receptor sintonizado

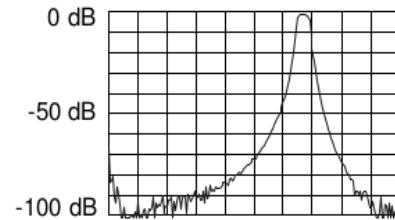


Broadband (diode) detection



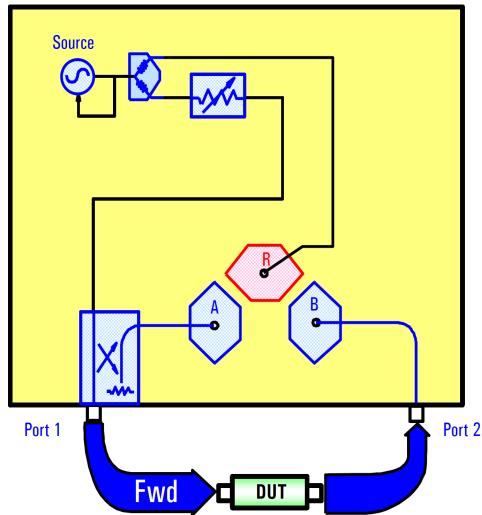
- higher noise floor
- false responses

Narrowband (tuned-receiver) detection



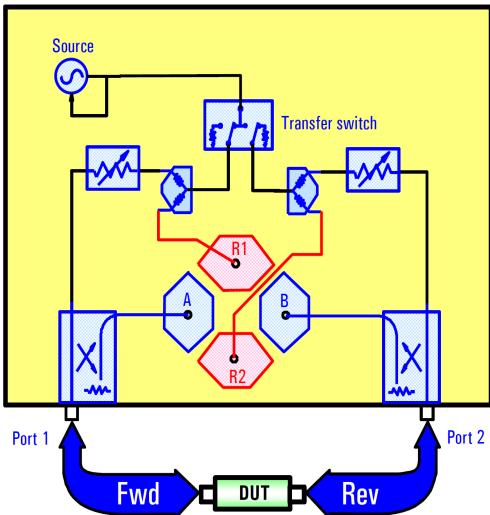
- high dynamic range
- harmonic immunity

VNA: montajes de test



Montaje de transmision/reflexion:

- Sólo el puerto 1 (A) genera señal
- El puerto 2 (B) siempre recibe
- Se **invierte manualmente** el DUT
- Calibracion de **1 puerto y respuesta**



Montaje de Parámetros S:

- El puerto 1 o el 2 pueden generar señal
- Mediciones en **directa e inversa automáticas**
- Se **adosa un dispositivo de switching**
- Calibración de **dos puertos full (12 términos)**



VNA: errores de medición

Son errores que se interponen entre el valor verdadero del parámetro y lo que se mide. Este es el factor crítico para medir con el VNA, como era el ajuste de stretchers en el VVM. Estos errores son propios del hardware, no importa qué tan bueno sea este hardware.

- **Errores sistemáticos (CALIBRABLES)**
- Debidos a **imperfecciones del analizador y el setup**
- Se asumen **invariantes en el tiempo (predecibles)**

Errores aleatorios (NO CALIBRABLES)

- Debidos a **ruido en el instrumento, y repetibilidad de switches/conectores**
- Varían en el tiempo en forma aleatoria (**no predecibles**)

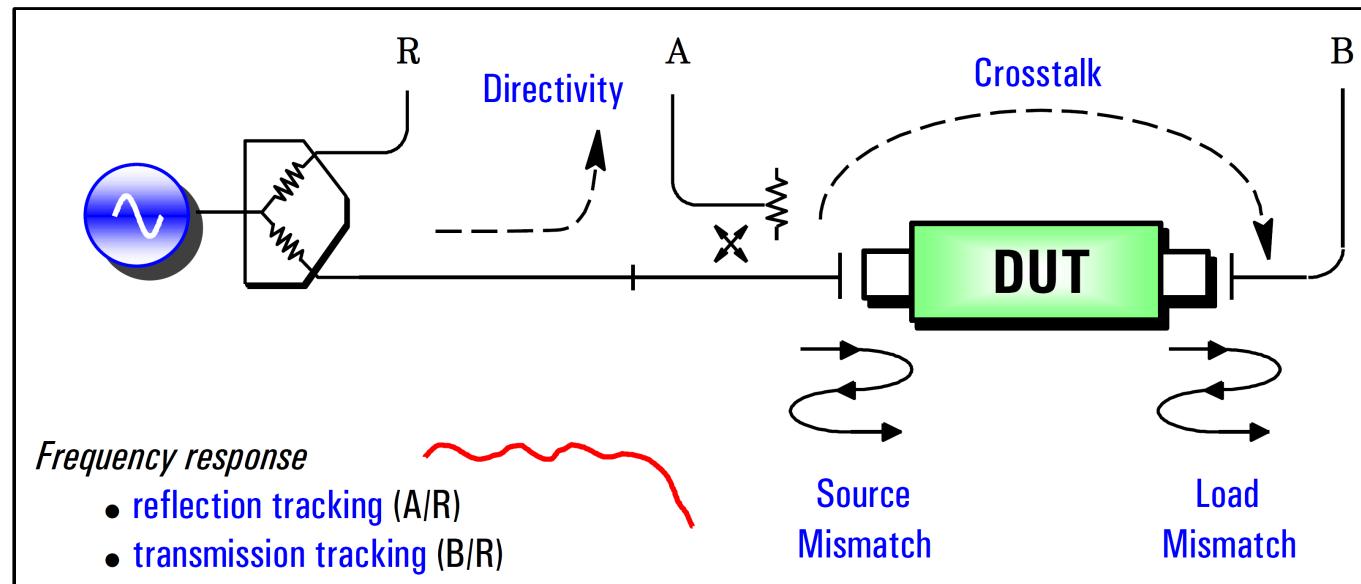
Errores de deriva o corrimiento (RE-CALIBRABLES)

- Debidos a cambios en el comportamiento **luego de que se lo calibró**
- Principalmente causados por **variación de temperatura**

VNA: errores sistemáticos

6 errores en directa + 6 errores en reversa =

12 fuentes de error sistemático para dispositivos de dos puertos



VNA: errores sistemáticos

Para compensar el efecto de los errores, se realiza una **calibración previa a la medición**. Existen dos **opciones de calibración**, según las mediciones a realizar y la precisión deseada:

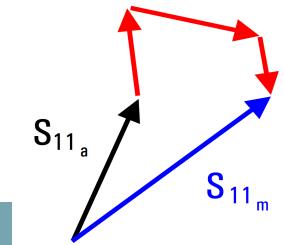
- **Corrección de respuesta (“normalización”)**

- Sólo corrige los errores de tracking
- Simple de realizar. Se utiliza en analizadores **escalares y vectoriales**.
- Almacena un *trazo de referencia* en memoria, que es el valor “1”. Luego, **divide los valores medidos por los valores de referencia**.



- **Corrección vectorial** de un puerto de dos puertos

- Tiene en cuenta todas las fuentes de error sistemático.
- Requiere cuatro tipos de dispositivos standard
- Se utiliza sólo en analizadores vectoriales (VNA)
- **TODAS las cargas se conectan en el PLANO DE REFERENCIA!**



VNA: corrección vectorial de errores sistemáticos

Se miden **dispositivos standard conocidos**, a fin de remover los efectos de error en las mediciones a realizar.

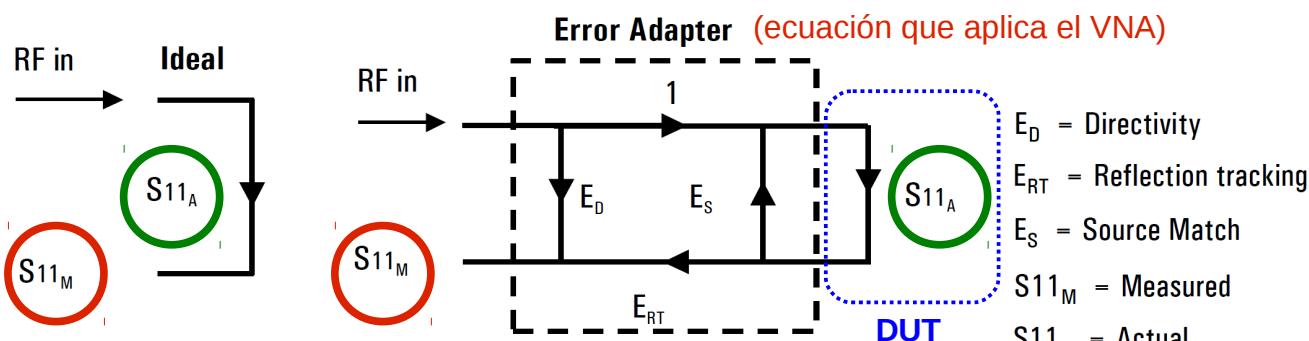
- **Calibración vectorial de un puerto (para mediciones de reflexión)**
 - Sólo se consideran 3 términos de error: directividad, source match, y reflection tracking
- **Calibración vectorial full de dos puertos (para mediciones de reflexion y transferencia)**
 - Se consideran los 12 términos de error sistemático
 - Requiere 12 mediciones utilizando 4 standards conocidos (“ShortOpenLoadThrough”)

Los standards se caracterizan y estas características se incluyen en un **archivo de definición de standards**.
Se debe elegir el archivo correspondiente a los standards utilizados.

Existen kits de elementos individuales, y otros que conmutan en forma automática.



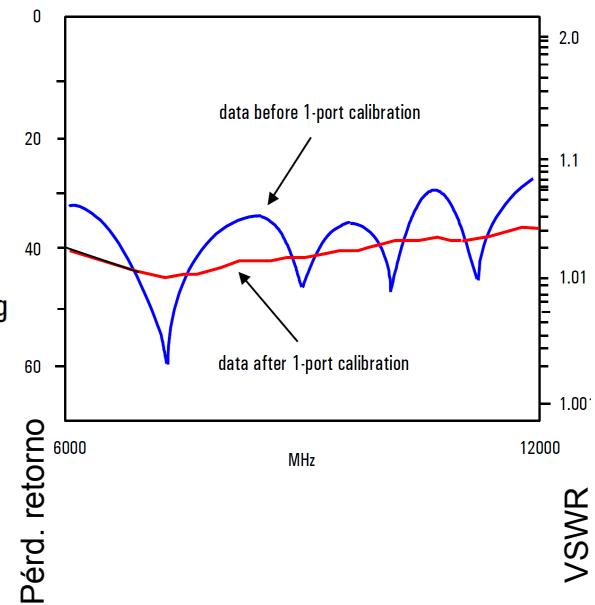
VNA: corrección vectorial de un puerto



To solve for error terms, we measure 3 standards to generate 3 equations and 3 unknowns

$$S_{11M} = E_D + E_{RT}$$

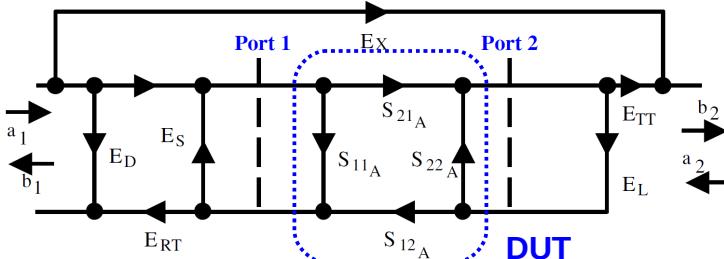
$$\begin{bmatrix} S_{11A} \\ \hline 1 - E_S & S_{11A} \end{bmatrix}$$



Si estamos midiendo un dispositivo de dos puertos, este modelo **asume que el puerto 2 está bien adaptado (i.e., $Z_{INB} \approx S_{22}$, entonces el puerto 2 no influencia al puerto 1)**. Sin embargo, **si la aislación inversa es baja (S_{12} alto, por ejemplo en filtros pasivos)**, pequeñas desadaptaciones de salida se hacen notar y se debería calibrar en dos puertos.

VNA: corrección vectorial de dos puertos

Forward model



E_D = fwd directivity

E_S = fwd source match

ERT = fwd reflection tracking

E_D' = rev directivity

E_S' = rev source match

ERT' = rev reflection tracking

E_L = fwd load match

ETT = fwd transmission tracking

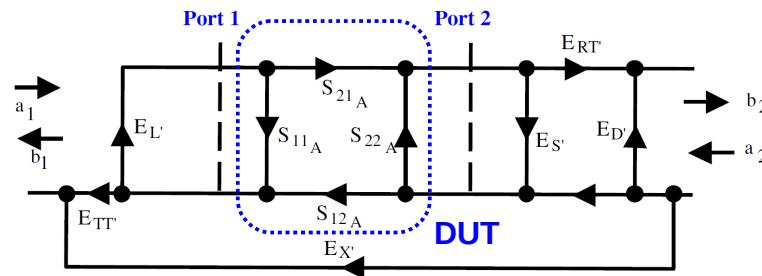
E_X = fwd isolation

E_L' = rev load match

ETT' = rev transmission tracking

$E_{X'}$ = rev isolation

Reverse model



$$S_{11a} = \frac{\left(\frac{S_{11m} - E_D}{ERT}\right)\left(1 + \frac{S_{22m} - E_{D'}}{ERT'}\right)E_S' - E_L\left(\frac{S_{21m} - E_X}{ETT}\right)\left(\frac{S_{12m} - E_{X'}}{ETT'}\right)}{\left(1 + \frac{S_{11m} - E_D}{ERT}\right)E_S\left(1 + \frac{S_{22m} - E_{D'}}{ERT'}\right)E_{S'} - E_L'E_L\left(\frac{S_{21m} - E_X}{ETT}\right)\left(\frac{S_{12m} - E_{X'}}{ETT'}\right)}$$

Ejemplo de cálculo del S_{11a} **real** en función de los parámetros medidos.

Similares ecuaciones se aplican para los demás tres parámetros S.

Cada parámetro S **real** ("a") es función de **todos** los parámetros S **medidos** ("m").

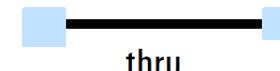
Para medir **cualquiera** de los parámetros, debería medir la influencia de **todos los demás**.

El VNA tiene en cuenta todos estos factores **automáticamente a través de la calibración completa de 12 términos**.

VNA: corrección de errores (resumen)

UNCORRECTED

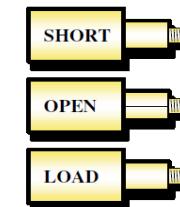
- Convenient
- Generally not accurate
- No errors removed

RESPONSE

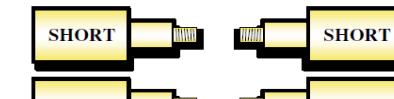
thru



- Easy to perform
- Use when highest accuracy is not required
- Removes frequency response error

1-PORT

- For reflection measurements
- Need good termination for high accuracy with two-port devices
- Removes these errors:
Directivity
Source match
Reflection tracking

FULL 2-PORT

thru



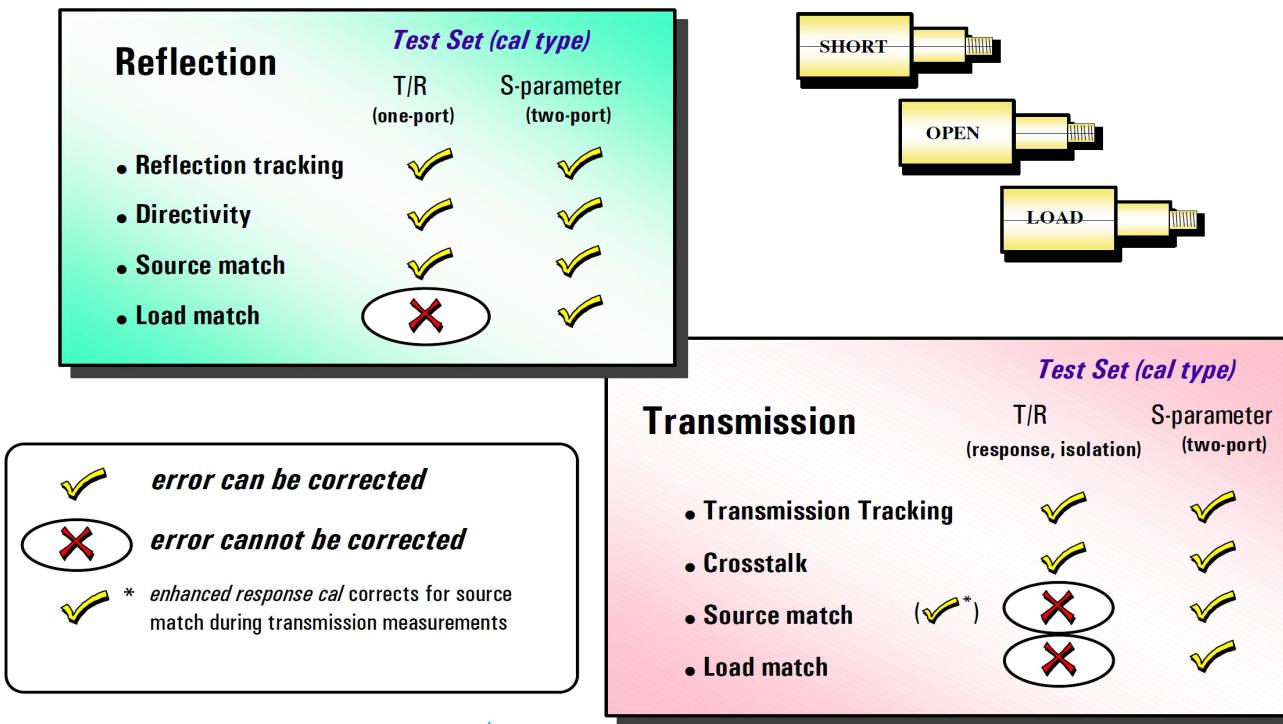
- Highest accuracy
- Removes these errors:
Directivity
Source, load match
Reflection tracking
Transmission tracking
Crosstalk

ENHANCED-RESPONSE

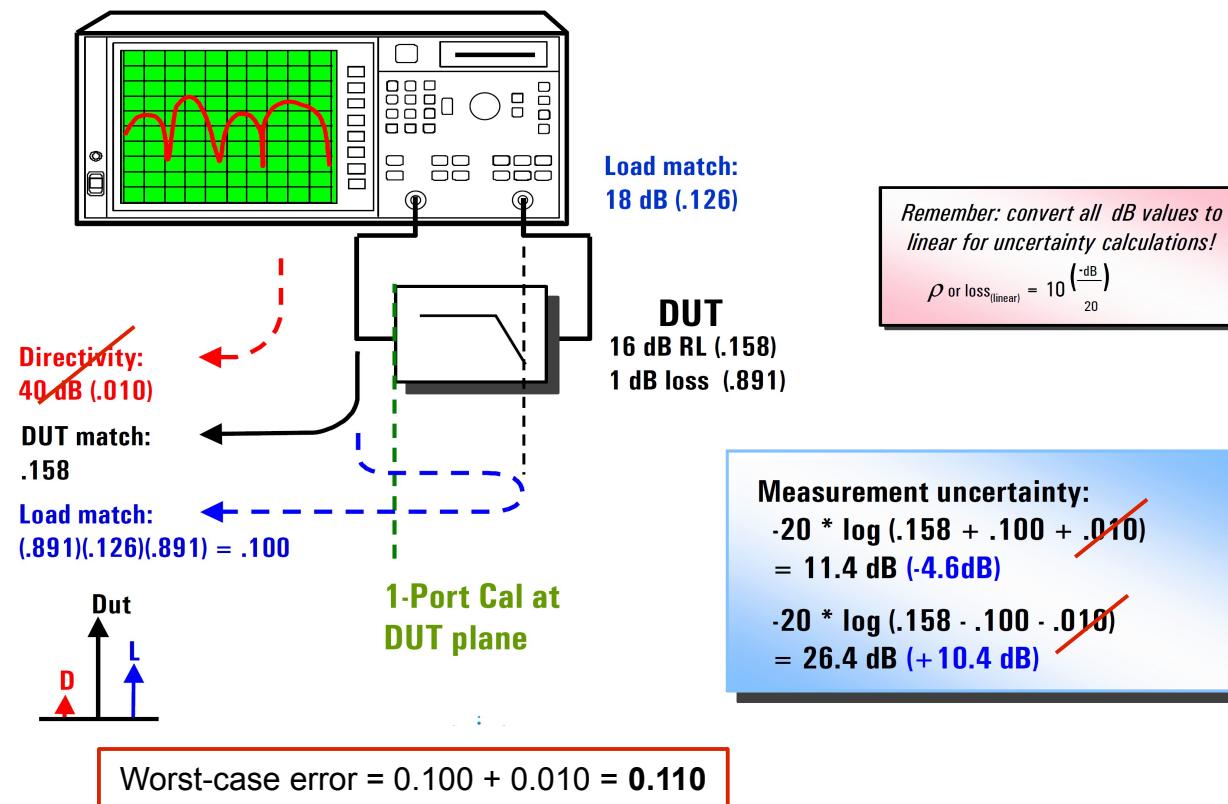
- Combines response and 1-port
- Corrects source match for transmission measurements

1-puerto

VNA: corrección de errores (resumen)



Ejemplos de error: medición de S_{11} con calibración de un puerto



En este caso, el DUT tiene **baja pérdida de inserción**, tanto en directa como en reversa => no podemos despreciar el efecto de **load match**.

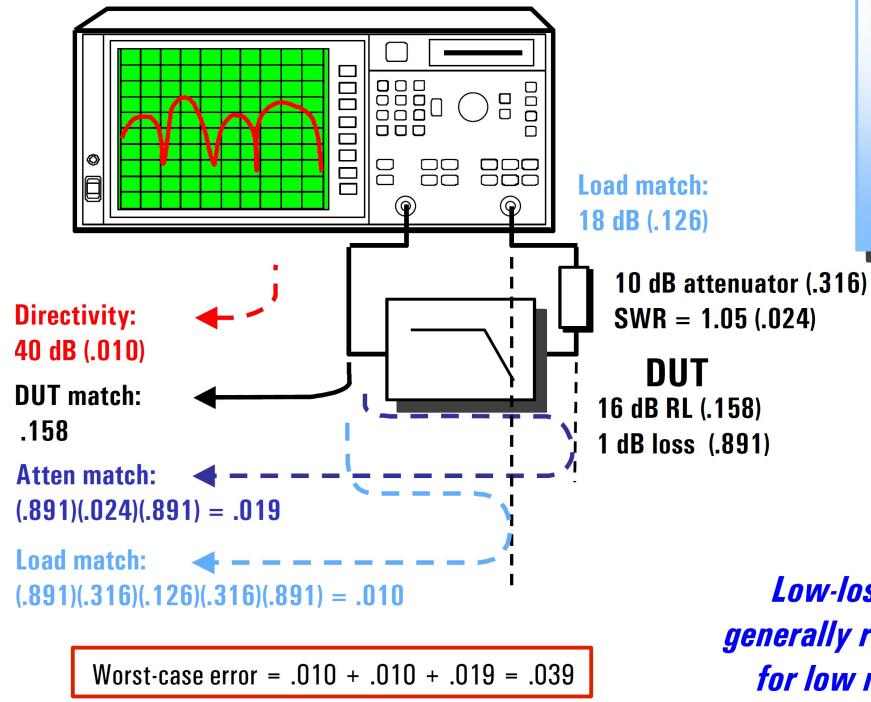
El error total está dado por:

- **Directividad** (podría descartarse si está calibrado)
- **Load match** (ya que la calibración no la considera)

El error es:

+10,4 / -4,6 dB en el peor caso
(considerando directividad, lo cual es *objetable*).

Ejemplos de error: medición de S_{11} con calibración de un puerto y atenuador



Measurement uncertainty:

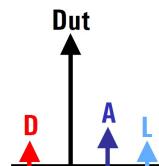
$$\begin{aligned} -20 * \log (.158 + .039) \\ = 14.1 \text{ dB } (-1.9 \text{ dB}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} -20 * \log (.158 \cdot .039) \\ = 18.5 \text{ dB } (+2.5 \text{ dB}) \end{aligned}$$

El agregado de un atenuador disminuye el efecto de la reflexión en la carga (load match).

Sin embargo, el atenuador tiene su propia VSWR, lo que suma un término extra al error (camino azul)

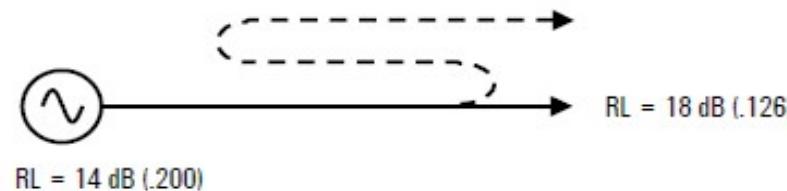
Aun así, el error de medición baja sustancialmente. El nuevo valor es +2,5 dB / -1,9 dB.



Low-loss bi-directional devices generally require two-port calibration for low measurement uncertainty

Para medir un DUT de dos puertos con calibración de un puerto, es conveniente usar un atenuador. De lo contrario, hay que utilizar calibración de dos puertos.

Ejemplos de error: medición de transferencia con calibración de respuesta (norm.)



Thru calibration (normalization) builds error into measurement due to source and load match interaction

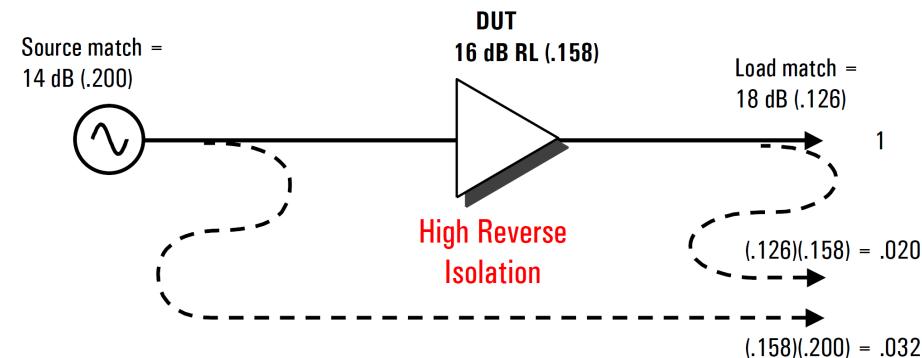
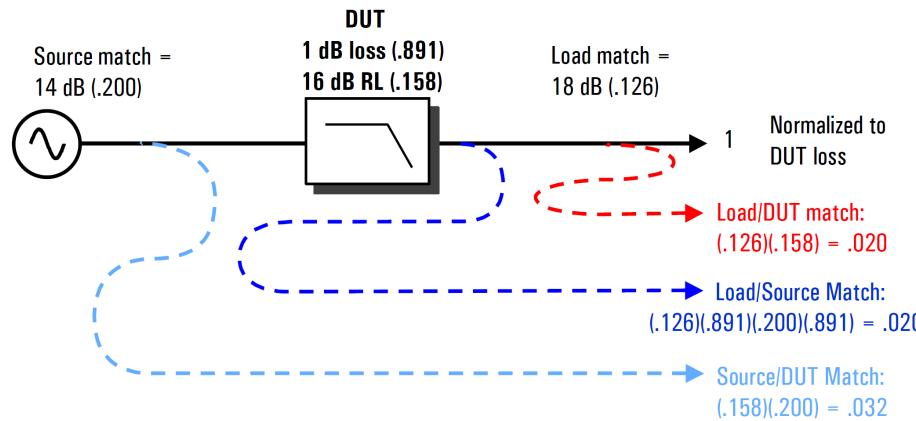
Calibration Uncertainty

$$\begin{aligned} &= (1 \pm \rho_s \rho_L) \\ &= (1 \pm (.200)(.126)) \\ &= \pm 0.22 \text{ dB} \end{aligned}$$

Mismatch error
due to source and
load matches
during calibration

- Si calibro solo en respuesta (normalización), el error estará dado por las desadaptaciones de fuente y de carga que no tiene en cuenta esta calibración.
- Veremos dos ejemplos, para un DUT con baja aislación (filtro) y otro con alta aislación (amplificador)

Ejemplos de error: medición de transferencia con calibración de respuesta (norm.)

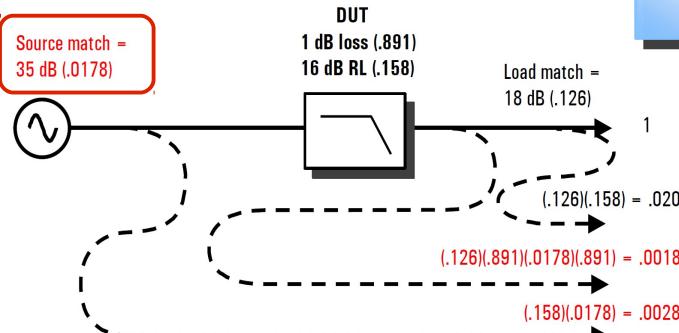
(a) DUT con poca aislación inversa (alto S_{12})(b) DUT con mucha aislación inversa (bajo S_{12})

- Para un dispositivo de **baja aislación (filtro)**, el término **load/source match (azul)** tiene mucha influencia.
- Para DUTs de **alta aislación (amplificador)**, este término se elimina y quedan sólo los errores **source/DUT match y load/DUT match (rojo y celeste)**, bajando el error.

Ejemplos de error: enhanced response (respuesta + one-port)

Effective source match = 35 dB!

(MEJORA porque hice ONE-PORT)



$$\begin{aligned} \text{Calibration Uncertainty} &= (1 \pm \rho_s \rho_L) \\ &= (1 \pm (.0178)(.126)) \\ &= \pm .02 \text{ dB} \end{aligned}$$

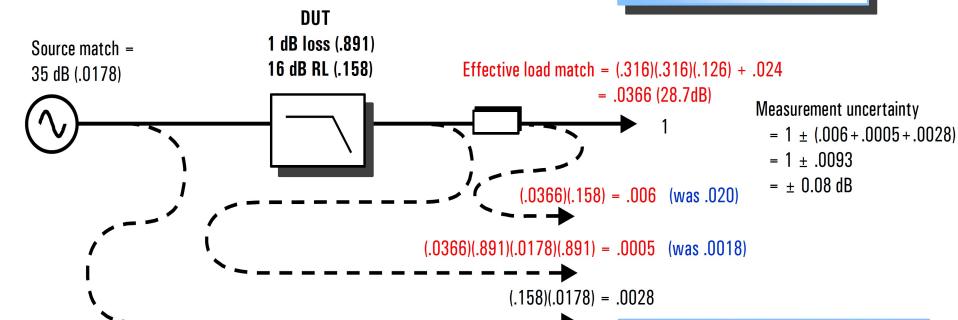
$$\begin{aligned} \text{Measurement uncertainty} &= 1 \pm (.020 + .0018 + .0028) \\ &= 1 \pm .0246 \\ &= +.0211 \text{ dB} \\ &\quad -.0216 \text{ dB} \end{aligned}$$

Total measurement uncertainty:
 $0.22 + .02 = \pm 0.24 \text{ dB}$

a) medición de un filtro, sin atenuador

10 dB attenuator (.316)
 SWR = 1.05 (.024 linear or 32.4 dB)
 Analyzer load match = 18 dB (.126)

$$\begin{aligned} \text{Calibration Uncertainty} &= (1 \pm \rho_s \rho_L) \\ &= (1 \pm (.0178)(.0366)) \\ &= \pm .01 \text{ dB} \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} \text{Measurement uncertainty} &= 1 \pm (.006 + .0005 + .0028) \\ &= 1 \pm .0093 \\ &= \pm .08 \text{ dB} \end{aligned}$$

Total measurement uncertainty:
 $0.01 + .08 = \pm 0.09 \text{ dB}$

b) medición de un filtro, con atenuador

- Mediante la calibración de un puerto, se disminuye mucho el efecto del **source match (35 dB contra 14 dB de antes)**, bajando la incertidumbre de calibración **de $\pm 0.22 \text{ dB}$ (slide anterior) a $\pm 0.02 \text{ dB}$**
- La incertidumbre total se ve asimismo reducida de **$\pm 0.85 \text{ dB}$ (slide anterior) a $\pm 0.24 \text{ dB}$**
- Además, si agregamos un atenuador mejora la adaptación en la carga**, bajando la incertidumbre total **de $\pm 0.24 \text{ dB}$ a $\pm 0.09 \text{ dB}$** , que es comparable al error con calibración de dos puertos.

Ejemplos de error: calibración de dos puertos completa (full 2-port)

Corrected error terms: <i>(8753ES 1.3-3 GHz Type-N)</i>	
Directivity	= 47 dB
Source match	= 36 dB
Load match	= 47 dB
Refl. tracking	= .019 dB
Trans. tracking	= .026 dB
Isolation	= 100 dB



DUT
1 dB loss (.891)
16 dB RL (.158)

Reflection uncertainty

$$\begin{aligned}
 S_{11m} &= S_{11a} \pm (E_D + S_{11a}^2 E_S + S_{21a} S_{12a} E_L + S_{11a} (1 - E_{RT})) \\
 &= 0.158 \pm (.0045 + 0.158^2 * 0.158 + 0.891^2 * 0.0045 + 0.158 * 0.0022) \\
 &= 0.158 \pm .0088 = 16 \text{ dB } \mathbf{+0.53 \text{ dB, -0.44 dB (worst-case)}}
 \end{aligned}$$

Transmission uncertainty

$$\begin{aligned}
 S_{21m} &= S_{21a} \pm S_{21a} (E_I / S_{21a} + S_{11a} E_S + S_{21a} S_{12a} E_S E_L + S_{22a} E_L + (1 - E_{TT})) \\
 &= 0.891 \pm 0.891(10^{-6} / 0.891 + 0.158 * 0.158 + 0.891^2 * 0.158 * 0.0045 + 0.158 * 0.0045 + 0.003) \\
 &= 0.891 \pm .0056 = 1 \text{ dB } \mathbf{\pm0.05 \text{ dB (worst-case)}}
 \end{aligned}$$

- Mediante esta calibración se logra la mejor precisión tanto en mediciones de reflexión como de transmisión, si bien es más compleja de realizar.

Ejemplos de error: comparación de técnicas

Reflection

Calibration type	Measurement uncertainty
One-port	-4.6/10.4 dB
One-port + attenuator	-1.9/2.5 dB
Two-port	-0.44/0.53 dB

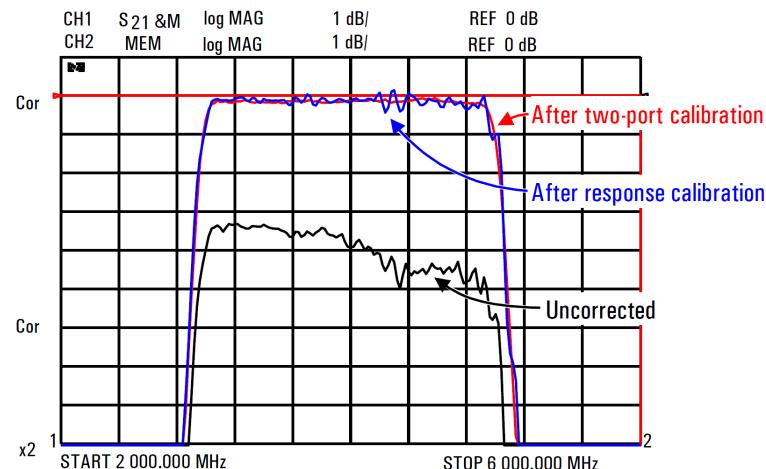
Transmission

Calibration type	Calibration uncertainty	Measurement uncertainty	Total uncertainty
Response	±0.22 dB	0.60/-0.65 dB	0.82/-0.87
Enhanced response	±0.02 dB	±0.22 dB	±0.24
Enh. response + attenuator	±0.01 dB	±0.08 dB	±0.09
Two port	-----		±0.05

En resumen:

- **Un puerto:** se puede utilizar **calibración de un puerto**. La **desadaptación de carga** introduce error, que se puede reducir mediante un atenuador.
- **Dos puertos:**
 - **Response calibration:** simple, pero no tiene en cuenta las desadaptaciones de fuente/carga ni xtalk
 - **Enhanced calibration (response+1-port):** mejora el error por **desadaptación de fuente**
 - **Full 2-port:** es la más precisa, en ambos sentidos, pero demanda más trabajo de calibración

Measuring filter insertion loss

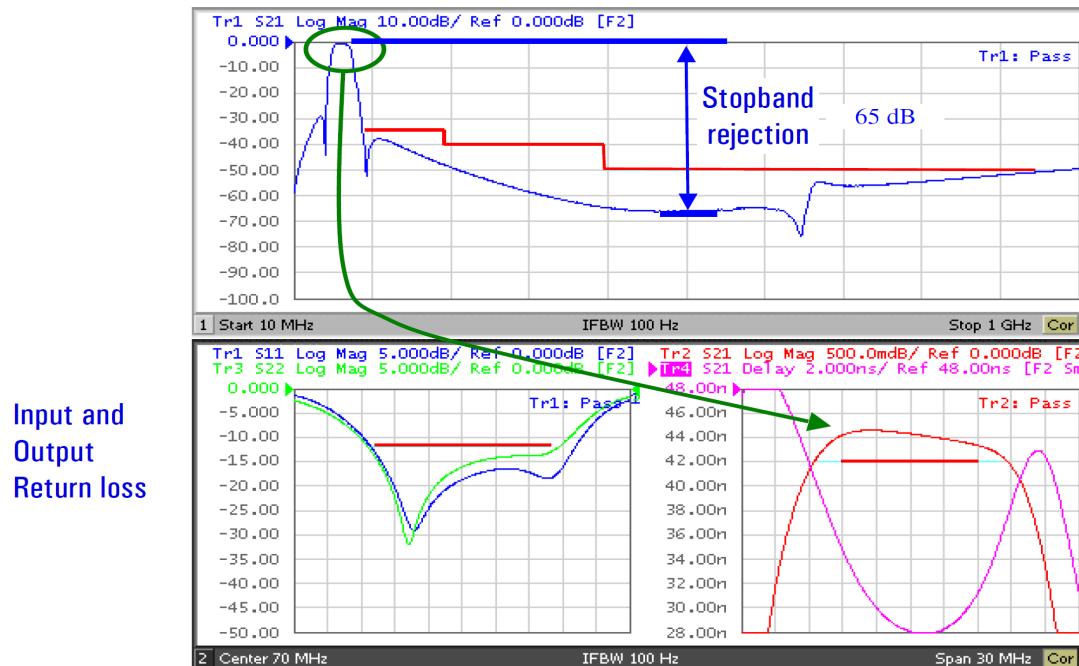


En general, los DUTs de baja aislación (p.e. filtros) son más sensibles a los errores que los DUTs de alta aislación (p.e. Amplificadores). La desadaptación de carga se *mitiga* mediante atenuador.

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 (VVM)
 - Analizador vectorial de redes (VNA)
 - Ejemplos de aplicación

Ejemplos de aplicación: medición de filtros



Input and
Output
Return loss

Out-of-Band
Isolation/
Rejection

Insertion loss,
flatness/ripple,
and
Group Delay

Para filtros muy angostos, se debe barrer lento para darle tiempo a estabilizarse. Lo mismo sucede en DUTs muy largos eléctricamente

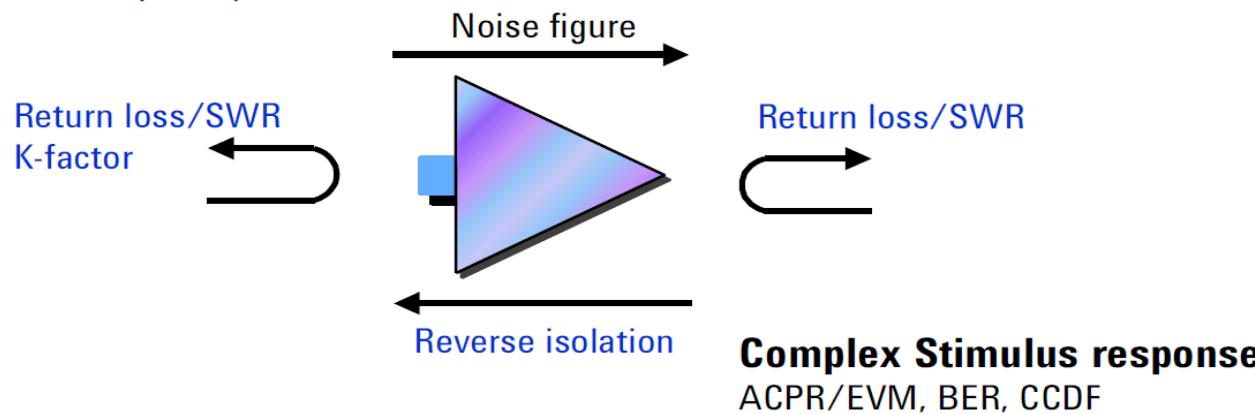
Ejemplos de aplicación: medición de amplificadores

Linear measurements

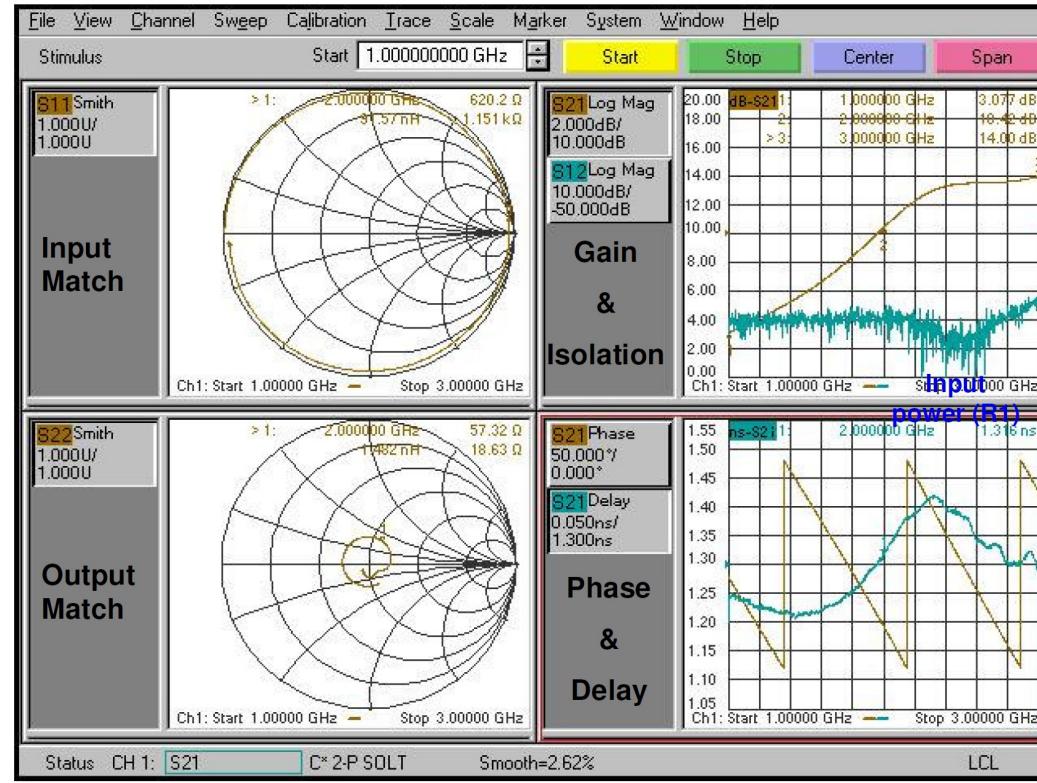
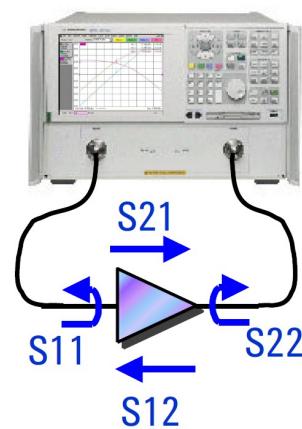
Gain, gain flatness
Deviation from linear phase
Group delay

Non-linear measurements

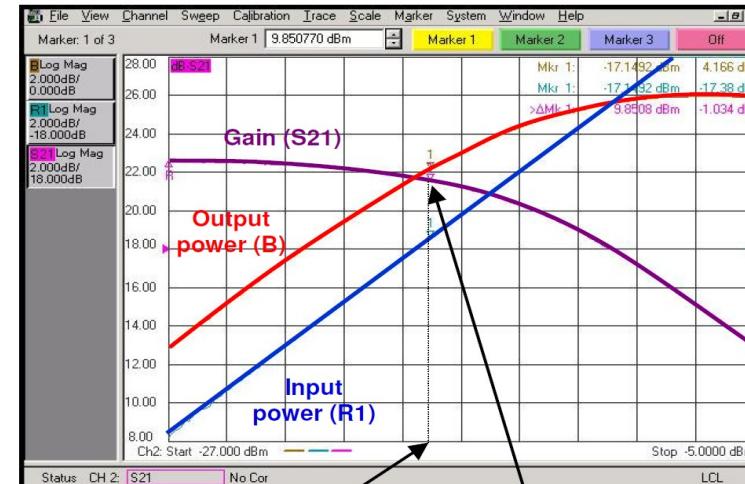
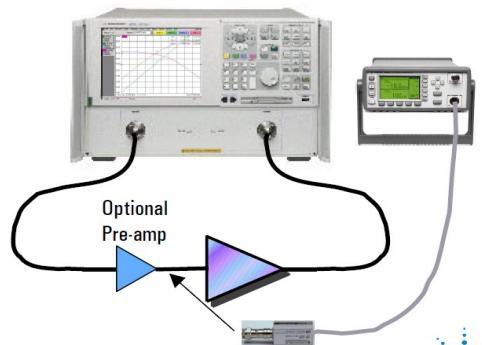
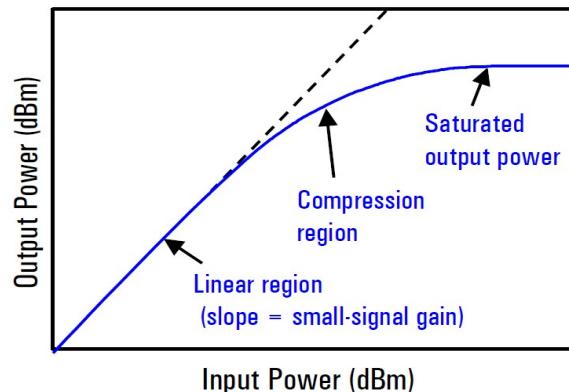
Compression, AM/PM ; AM/AM conversion, Harmonic distortion, Intermodulation distortion (TOI)



Ejemplos de aplicación: medición de amplificadores



Ejemplos de aplicación: medición de amplificadores

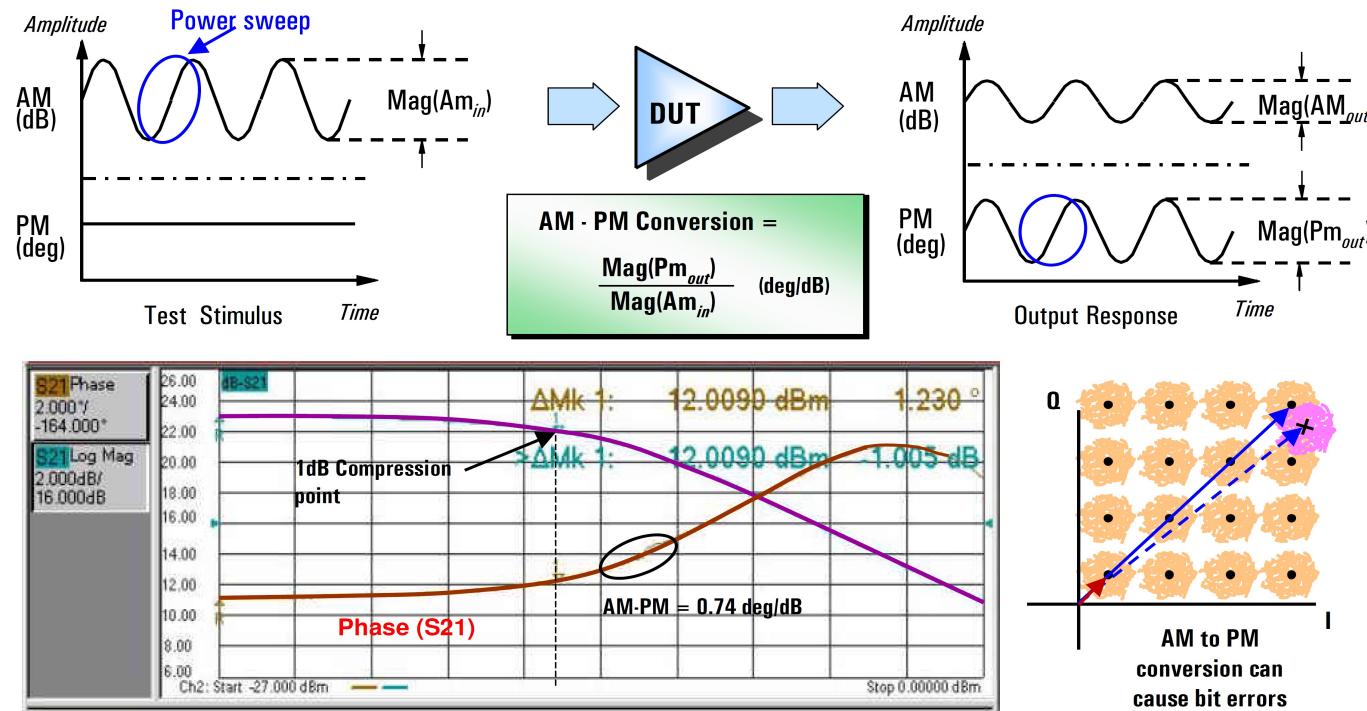


Input power at 1 dB compression point (-17.15 dBm)

1 dB compression:
input power resulting in
1 dB drop in gain

Barrido en potencia para observar alinealidades

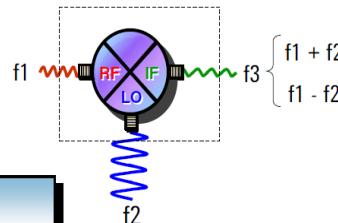
Ejemplos de aplicación: medición de amplificadores



Modulación residual de fase en una modulación AM

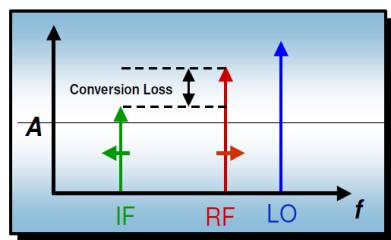
Ejemplos de aplicación: medición de mezcladores

Mixer Component Measuring Conversion Loss

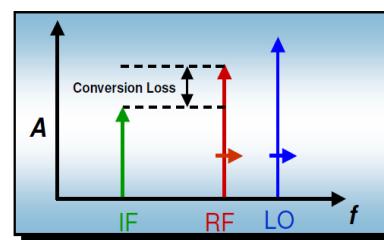


$$\text{Conversion loss}_{\text{dB}} = 10 \log \frac{\text{mag}(f_{\text{in}})_{\text{mW}}}{\text{mag}(f_{\text{out}})_{\text{mW}}}$$

Function of LO power

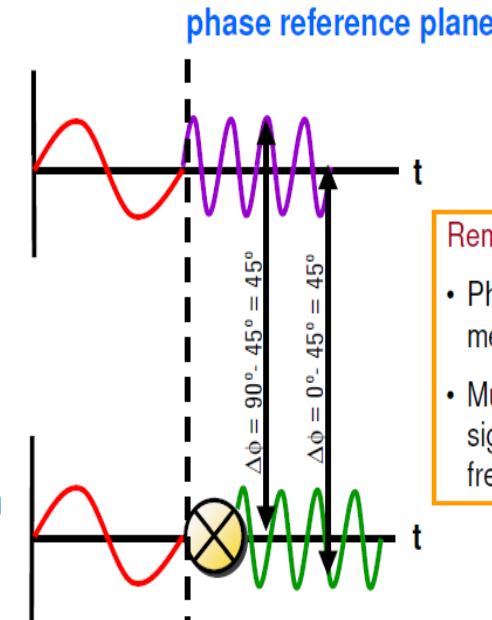


Swept IF



Fixed IF

Theoretical
reference signal



Remember:

- Phase is a relative measurement
- Must be made on two signals with the same frequency

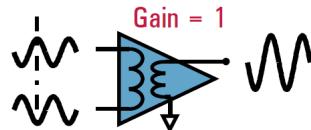
Pérdida de conversión: para IF fija, o barriendo la IF

Fase de conversión

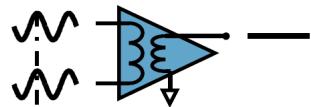
Ejemplos de aplicación: dispositivos balanceados

Ideally, respond to differential and reject common-mode signals

Differential-mode signal

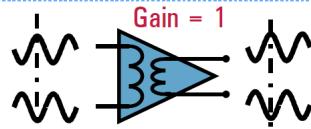


Common-mode signal
(EMI or ground noise)



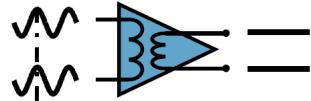
Balanced to single-ended

Differential-mode signal



Fully balanced

Common-mode signal
(EMI or ground noise)

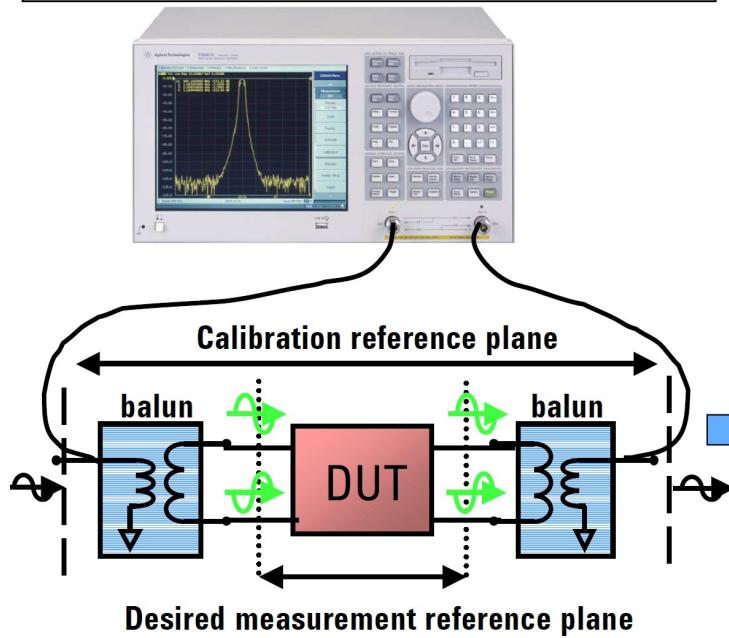


- Útil para rechazar señales de RF externas, que se acoplan en modo común. Muy utilizado en circuitos digitales de alta velocidad
- Estas señales pueden ser, por ej., armónicos de clocks digitales, o ruido que entra por masa
- En la realidad, una parte de la señal diferencial se convierte en salida de modo común, produciendo EMI
- Asimismo, una parte de la entrada de modo común se convierte en salida en modo diferencial, contaminando la señal deseada

Ejemplos de aplicación: dispositivos balanceados

- Difficult to make accurate calibration for balun
- Balun's freq. range is not wide
- Actual Balun has imbalance

- Mixed-mode S-parameters can be defined as follows:

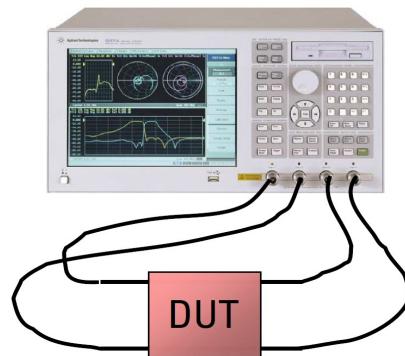


Stimulus			
Differential-Mode		Common-Mode	
Port 1	Port 2	Port 1	Port 2
SDD11	SDD12	SDC11	SDC12
SDD21	SDD22	SDC21	SDC22
Response		Differential-Mode	
Port 2	Port 1	Port 2	Port 1
SCD11	SCD12	SCC11	SCC12
SCD21	SCD22	SCC21	SCC22

w=Response mode
x=Stimulus mode
S_{wxyz}
z=Stimulus port
y=Response port

a) medición utilizando **BALUNs físicos**

Ejemplos de aplicación: dispositivos balanceados

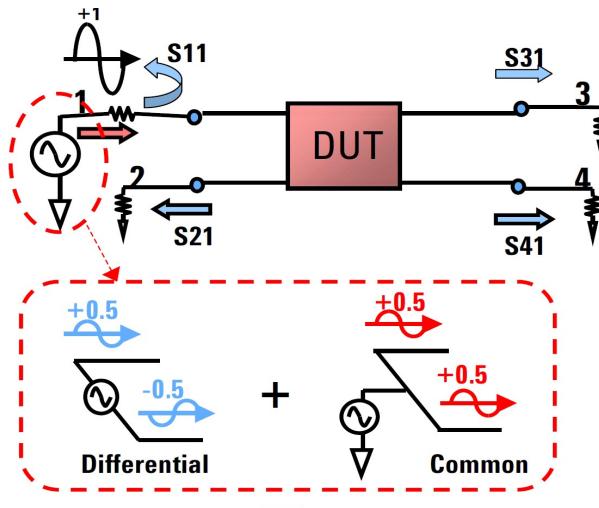


Connect balanced DUT directly to 4-port ENA without baluns.

Single-ended S-parameters

$$\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} \end{bmatrix}$$

b) medición utilizando **BALUNs matemáticos** (o mixed-mode)



- En algunos equipos existe un **fixture simulator**, que permite simular los BALUNs y evitar sus inconvenientes.
- El VNA mide al DUT como un dispositivo de **cuatro puertos**, usando señales **single-ended**.
- Esto es matemáticamente equivalente a aplicar señales de modo común y diferencial superpuestas a cada uno de los dos puertos diferenciales, **asumiendo que el DUT es lineal**.
- Conociendo V_1 , V_2 , y los parámetros medidos, se generan **cuatro variables [A, B, C, D]** para simular V_{diff} y V_{comm}

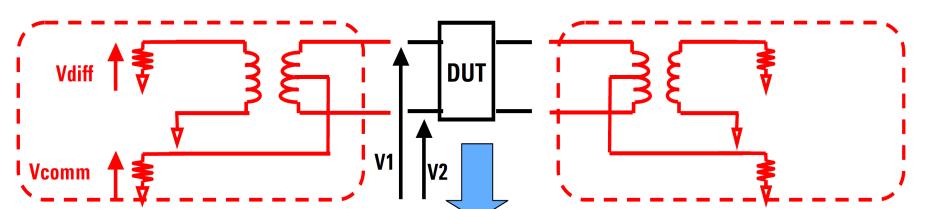
Ejemplos de aplicación: dispositivos balanceados

Measure
Single-ended S-parameters

$$\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} \end{bmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} V_{diff} \\ V_{comm} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A, B \\ C, D \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \end{pmatrix}$$

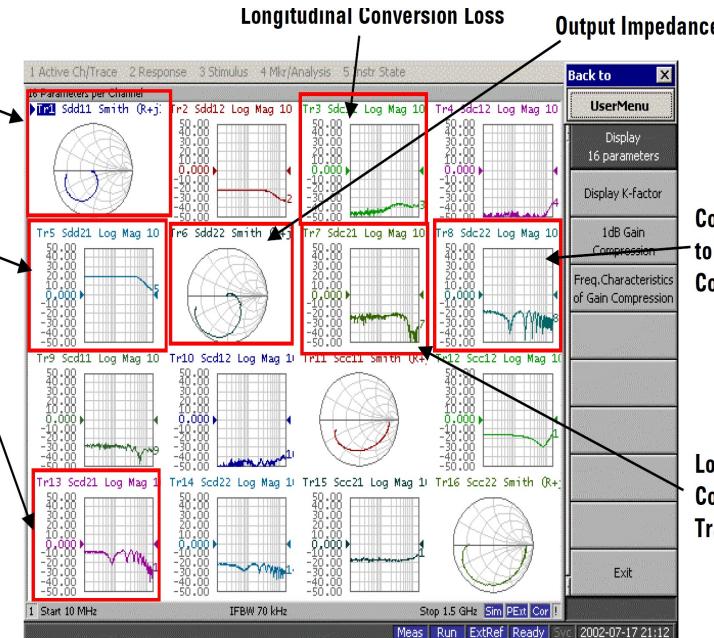
Mathematically simulate Hybrid Balun
to extract differential and common



Obtain
Mixed-mode S-parameters

SDD11	SDD12	SCD11	SCD12
SDD21	SDD22	SCD21	SCD22
SCD11	SCD12	SCC11	SCC12
SCD21	SCD22	SCC21	SCC22

**Input
Impedance**



**Differential
to
Common Mode
Conversion**

**Common Mode
to Differential
Conversion**

**Longitudinal
Conversion
Transfer Loss**

Ejemplos de aplicación: otros [HPJournal, AN91]

- **Generales:** Ganancia / pérdida de inserción compleja, coef de reflexión complejo, impedancia/admitancia compleja, parámetros de dos puertos
- **Dispositivos:** Ganancia y fase de amplificadores, retardo de grupo y distorsión de fase, coefs de transmisión complejos, ganancia de lazo abierto, márgenes de ganancia y fase. FdT de filtros. Atenuadores, circuladores, mezcladores, acopladores direccionales, divisores/combinadores de potencia (splitters)
- **Antenas:** impedancia / coef. reflexión, patrones de radiación en campo cercano
- **Ajuste de líneas enfasadas:** longitud eléctrica de líneas, ajuste de defasaje entre dos líneas

Bibliografía

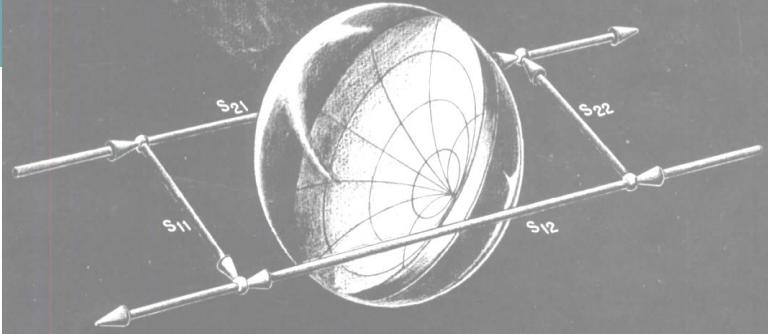
Voltímetro Vectorial:

How vector analysis expands design capabilities, HP AN 91, Jan. 1968

The RF Vector Voltmeter – and important new instrument for amplitude and phase measurements from 1 MHz to 1000 MHz, HP Journal, 1998

Transistor parameter measurement, HP AN 77-1

HP8405A Vector Voltmeter Operating and Service Manual, Hewlett-Packard



VNA:

Network Analyzer Basics, Agilent Back to Basics Seminar, 2005

Applying error correction to vector analyzer measurements, Keysight AN5965-7709E, 2018

Vector Network Analyzer Primer, Anritsu, 2009

Understanding Vector Network Analysis, Anritsu, 2013

Mediciones de componentes:

RF Component Measurements: Amplifier Measurements Using the Agilent 8753 Network Analyzer, Agilent PN 8753-1

RF Component Measurements - Mixer Measurements Using the 8753B Network Analyzer, Agilent PN 8753-2