

# Potencia en RF

---

Carlos A. Zerbini

Cátedra Medidas Electrónicas 2

Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Córdoba

Año lectivo 2019

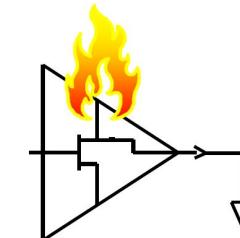
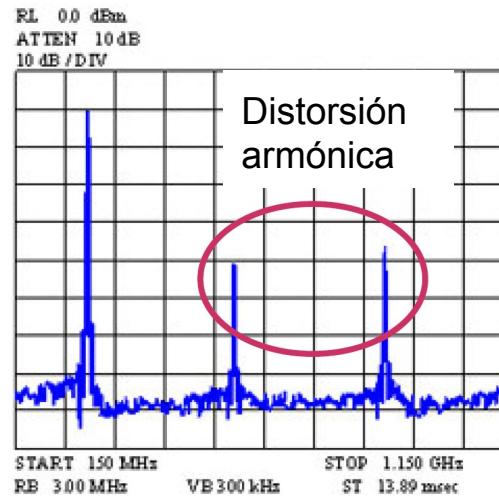
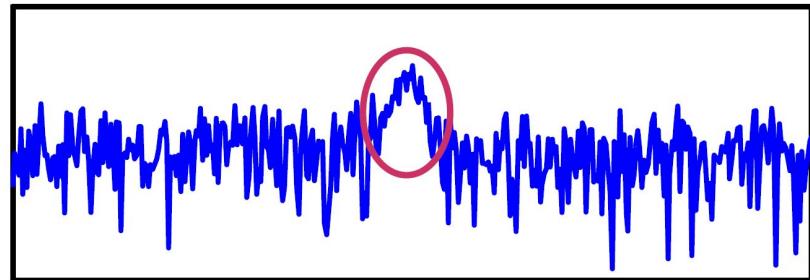
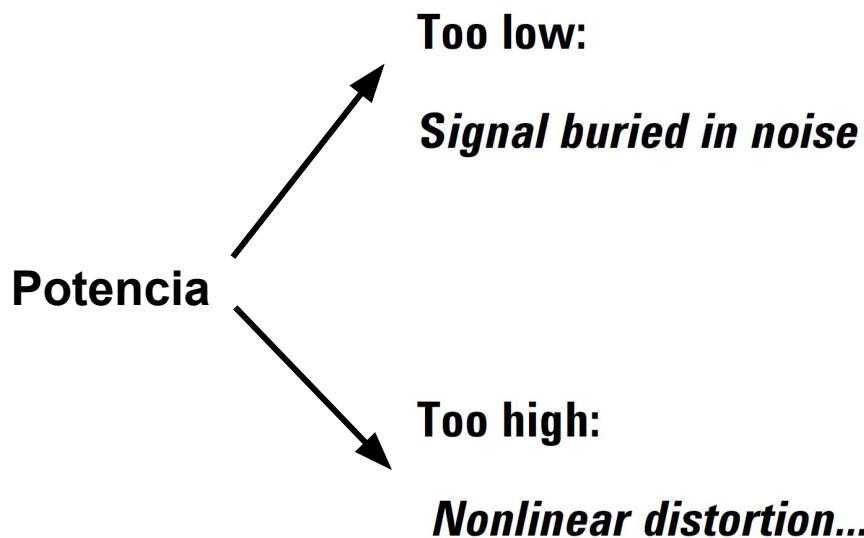
# Agenda

1. Conceptos de potencia en RF
2. Errores en la medición de potencia
3. Métodos de sensado
  - ❑ Sensores a termistores
  - ❑ Sensores a termocupla
  - ❑ Sensores a diodo
4. Tendencias actuales
5. Muestreo de potencia

# Agenda

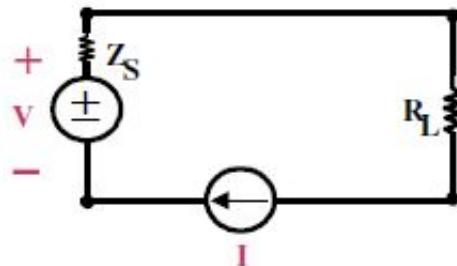
1. Conceptos de potencia en RF
2. Errores en la medición de potencia
3. Métodos de sensado
  - ❑ Sensores a termistores
  - ❑ Sensores a termocupla
  - ❑ Sensores a diodo
4. Tendencias actuales
5. Muestreo de potencia

## Importancia de la potencia

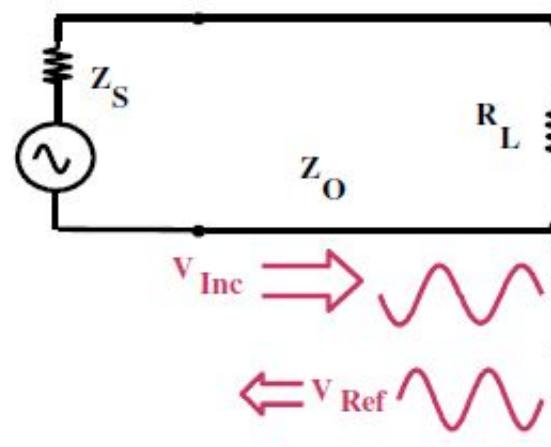
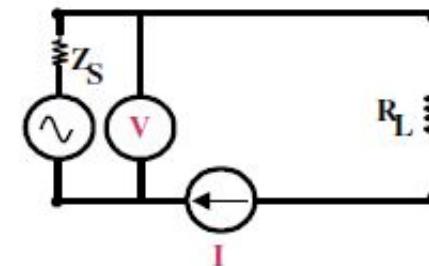


*...Or even worse!*

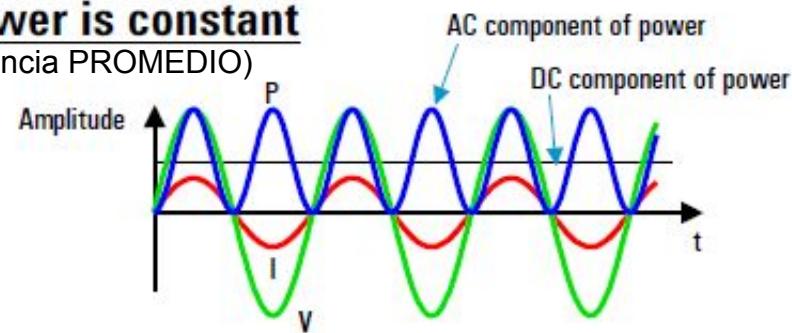
## Potencia en DC, AF y en RF

**DC**

$$P = IV = V^2/R$$

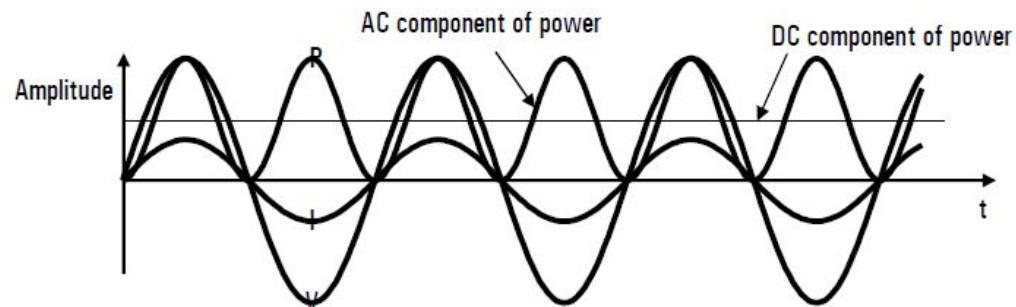
**Low Frequency****High Frequency**

- **I and V vary with position**
- **Power is constant**  
(potencia PROMEDIO)



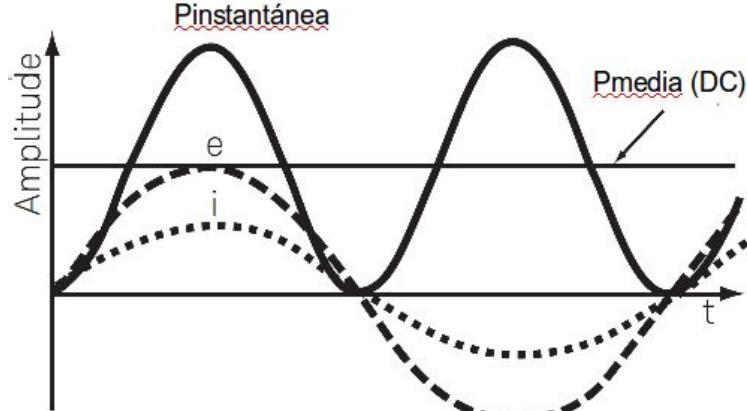
## Unidades de potencia

$$\text{Power: } P = (I)(V)$$



- Unit of power is the watt (W):  $1W = 1 \text{ joule/sec}$
- Some electrical units are derived from the watt:  
 $1 \text{ volt} = 1 \text{ watt/ampere}$
- Relative power measurements are expressed in dB:  
 $P(\text{dB}) = 10 \log(P/\text{Pref})$
- Absolute power measurements are expressed in dBm:  
 $P(\text{dBm}) = 10 \log(P/1 \text{ mW})$

## Unidades de potencia



La potencia se define como el flujo de energía [Joules] por unidad de tiempo [seg].

En general, la potencia varía si nos desplazamos a lo largo del tiempo. Por lo tanto, el problema consiste en determinar durante **qué intervalo de tiempo** se realizó la medición.

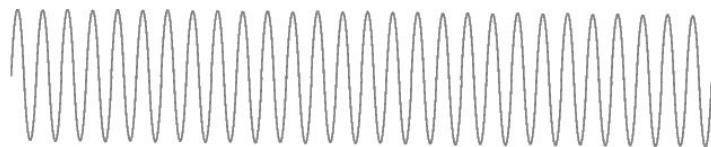
Para nuestros fines, definiremos a la **potencia media de una señal arbitraria** como la transferencia de energía por unidad de tiempo promediada sobre varios períodos de su componente de más baja frecuencia.

$$\begin{aligned}
 P_{avg} &= \frac{1}{nT_0} \int_0^{nT_0} e(t)i(t) dt \\
 &= \frac{1}{nT_0} \int_0^{nT_0} e_p \operatorname{sen} \left( \frac{2\pi}{T_0} t \right) i_p \operatorname{sen} \left( \frac{2\pi}{T_0} t + \theta \right) dt \\
 P_{avg} &= \frac{e_p \cdot i_p}{2} \cos \theta
 \end{aligned}$$

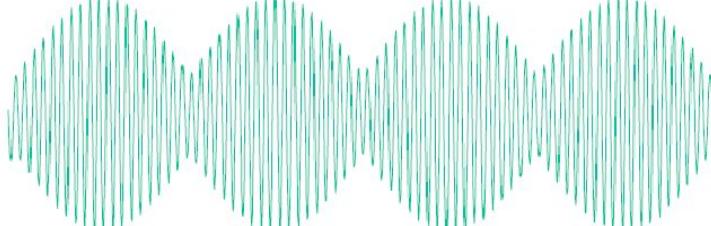
$$\text{Senoidal} \rightarrow e_p = \sqrt{2}E_{rms}; i_p = \sqrt{2}I_{rms} \rightarrow P_{avg} = E_{rms} \cdot I_{rms} \cos \theta$$

## Tipos de especificación de potencia

CW

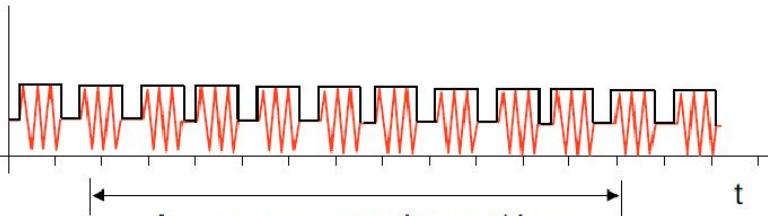


AM



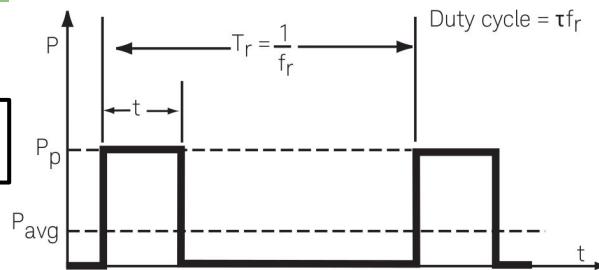
Average over many modulation cycles

Pulsed



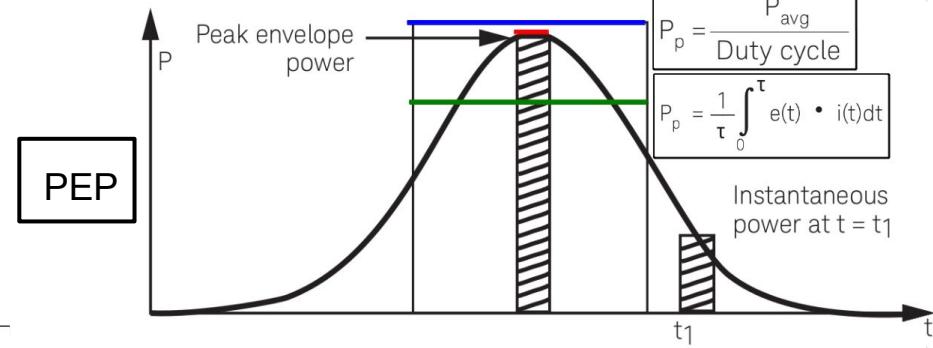
Average over many pulse repetitions

Pulsed



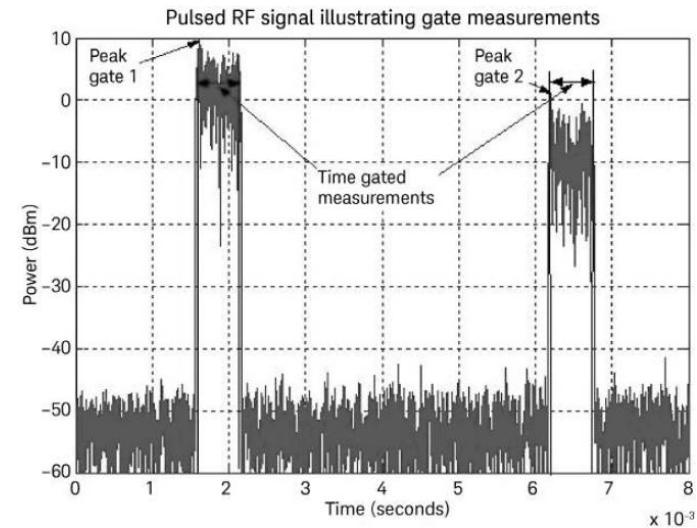
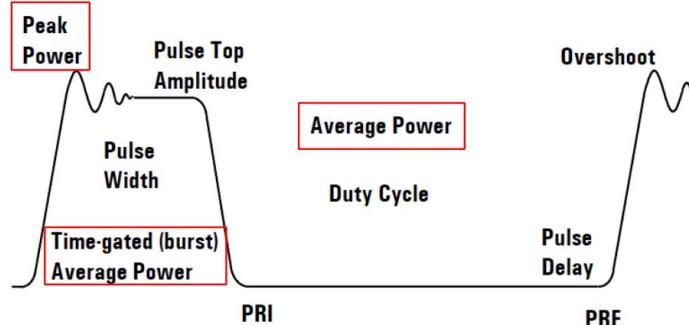
$$P_{avg} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} e(t) i(t) dt$$

$$P_{pulso} = \frac{P_{avg}}{\text{Ciclo trabajo}} = \frac{P_{avg}}{\tau/T_r}$$



Tiempo para PEP → grande respecto a  $T_c$   
 → chico respecto a  $T_r$

## Tipos de especificación de potencia



## Instrumentos para medición de potencia

Power Meter and Sensor



- $\pm 0.0X$  dB
- $\geq -70$  dBm

Network Analyzer

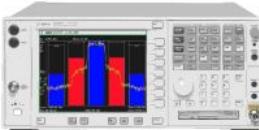


- $\pm 0. X$  dB or greater
- Frequency selective

Vector Signal Analyzer



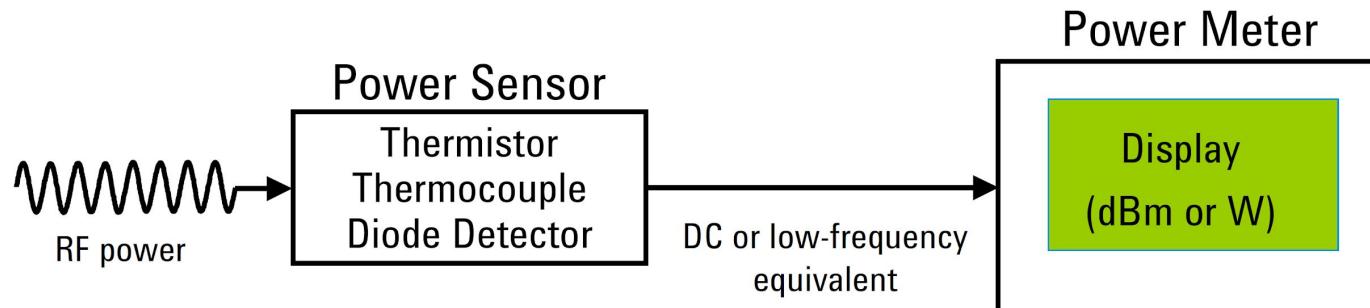
Spectrum Analyzer



- La incertidumbre de los analizadores está en el rango de las **décimas** de dBs o mayores, mientras que las incertidumbres de los sensores/medidores de potencia están en el orden de las **centésimas de dBs**
- Los analizadores son **selectivos en frecuencia**, los sensores no
- **Si la aplicación es medición de potencia total de una fuente de RF, la medición directa de potencia es la mejor alternativa por su menor costo e incertidumbre mucho mejor**

## Métodos para medir potencia de RF

- Se utiliza un *sensor de potencia*, conectado a su correspondiente *Instrumento de medición*. En general, *no se pueden combinar indistintamente*.
- Dispositivos:
  - Bolómetros → termistor: coeficiente de temperatura (-)  
→ barreter: coeficiente de temperatura (+)
  - Termocuplas
  - Diodos
- **Técnica general:** se conecta el sensor a la salida de la línea (o mediante un acoplador). Se conecta el sensor al medidor. Se lleva a cero el medidor para  $P_{RF}=0$ . Se aplica RF y se realiza la medición.

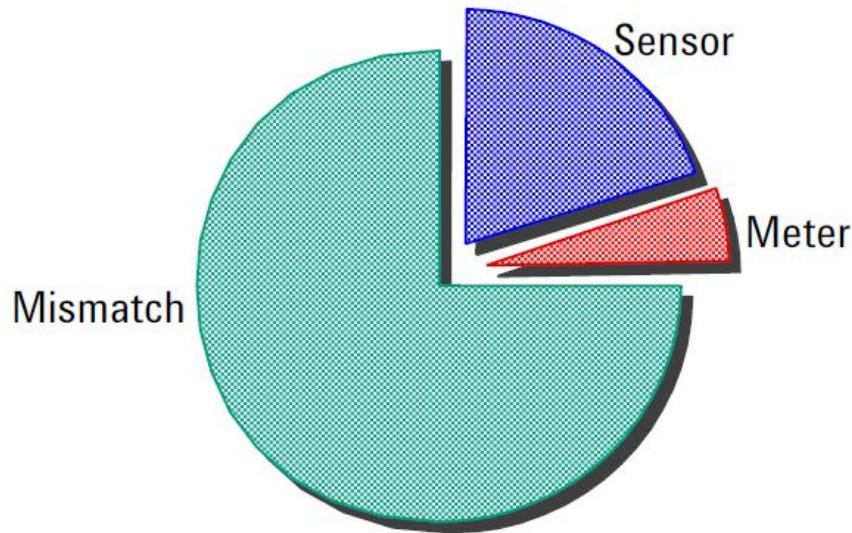


# Agenda

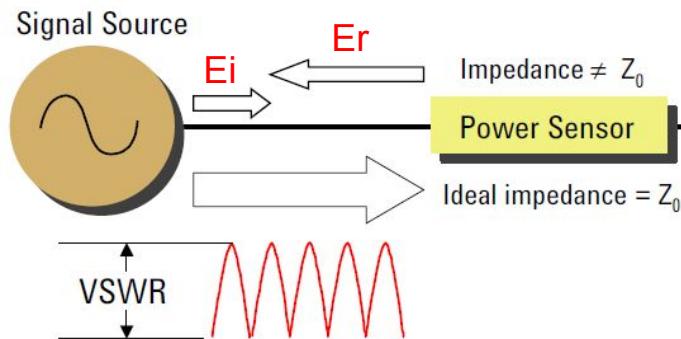
1. Conceptos de potencia en RF
2. Errores en la medición de potencia
3. Métodos de sensado
  - ❑ Sensores a termistores
  - ❑ Sensores a termocupla
  - ❑ Sensores a diodo
4. Tendencias actuales
5. Muestreo de potencia

## Errores en la medición de potencia

- Errores de **desadaptación** en la conexión a la fuente (reflexiones que **no ingresan al montaje**)
- Errores **dentro del montaje del sensor**
  - Potencia disipada en **otros elementos**
  - (Potencia proveniente de **otras fuentes** que producen calentamiento del sensor)
- Errores del **instrumento de medición**



## Errores por desadaptación en la fuente y en la entrada al montaje



Signal Source  
(2 GHz, 0 dBm)



$$\text{VSWR} = 2.0$$

$$\rho_{\text{SOURCE}} = 0.33$$

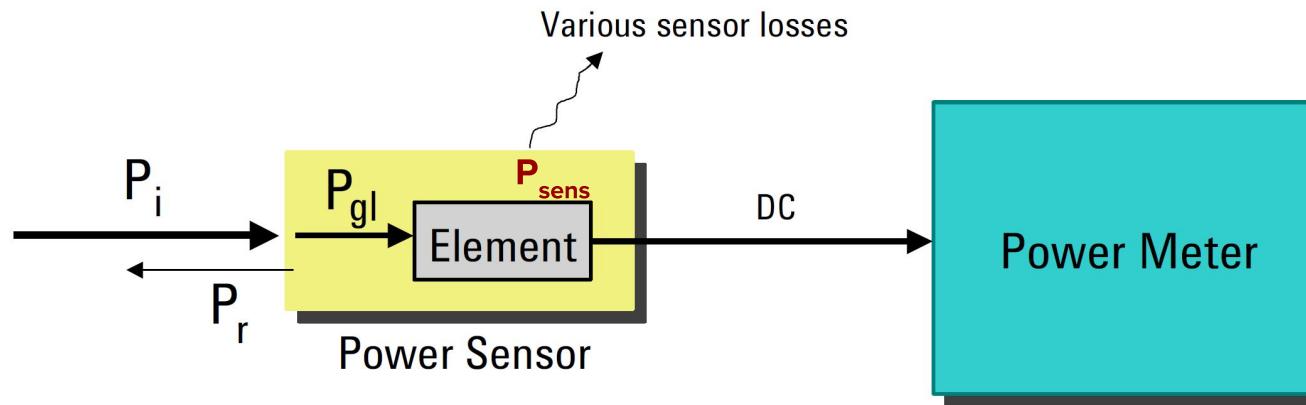
$$\rho_{\text{SENSOR}} = 0.06$$

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

$$\text{Mismatch Uncertainty} = \pm 2 \times \rho_{\text{SOURCE}} \times \rho_{\text{SENSOR}} \times 100\%$$

$$= \pm 2 \times 0.33 \times 0.06 \times 100\% = \boxed{\pm 3.96\%}$$

## Errores por pérdidas en el montaje del sensor



Cal Factor :  $K_b = \eta_e \frac{P_{gl}}{P_i}$       ( $\eta_e$  = Effective Efficiency)

$$= \eta_e (1 - \rho^2)$$

- Printed on sensor label (8480 series)
- Stored in EEPROM (E-series and P-series)

a)  $P_{gl} = P_i - P_r = (1 - \rho^2) P_i$   
 b)  $P_{sens} = \eta_e \cdot P_{gl}$   
 $= \eta_e \cdot (1 - \rho^2) \cdot P_i$

$\Rightarrow K_b = P_{sens} / P_i = \eta_e \cdot (1 - \rho^2)$

## Errores en el instrumento



Power Reference  
Uncertainty  
 $\pm 0.6\%$

Zero Set

Instrumentation Uncertainty

$\pm 0.5\%$

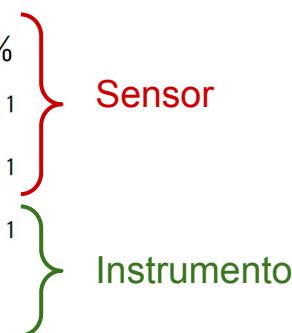
- Which is the smaller error:  $\pm 1.0\text{ dB}$  ... or  $\pm 20\%$  ?  
→ Answer:  $\pm 20\%$  !  
( $\pm 1.0\text{ dB}$  is  $+26\%$ ,  $-21\%$ )
- Sensor and meter uncertainties are specified in percentage (linear) and dB (log)
- Marketing Manager's Law of Small Numbers:  
*"A small-numbered uncertainty specification sounds better than a large-numbered one."*

## Evaluación de incertidumbre

### 1) Procedimiento general

#### 1. Identify significant uncertainties

- Mismatch uncertainty:  $\pm 3.96\%$
- Power linearity:  $\pm 2.0\%{ }^1$
- Cal factor uncertainty:  $\pm 1.8\%{ }^1$
- Power reference uncertainty:  $\pm 0.6\%{ }^1$
- Instrumentation uncertainty:  $\pm 0.5\%$



<sup>1</sup> Specifications apply for an E9301A sensor and Agilent power meter over a temperature range of 25  $\pm 10$  degrees C.

#### 2. Combine uncertainties

- Worst-case or Root Sum of the Squares (RSS) method

### 2) Evaluación por peor caso

#### • Worst-case situation is assumed

- All sources of error at their extreme values
- Errors add constructively

#### • In our example measurement:

$$3.96\% + 2.0\% + 1.8\% + 0.6\% + 0.5\% = \pm 8.86\%$$

Or, in log terms:

$$+ 8.86\% = 10 \log (1 + 0.089) = + 0.37 \text{ dB}$$

$$- 8.86\% = 10 \log (1 - 0.089) = - 0.40 \text{ dB}$$

#### • Extremely conservative

## Evaluación de incertidumbre

3) Evaluación por **raíz de la suma de los cuadrados** (Root Sum of Squares, RSS)

Source of Uncertainty	Value ( $\pm \%$ )	Probability Distribution	Divisor	Standard Uncertainty $u_i$ ( $k=1$ )
Source/Sensor Mismatch at 2 GHz	3.96	U-shaped	1.414	2.8
Calibration Factor Uncertainty at 2 GHz	2.0	Normal	2	1.0
Linearity at 0 dBm	1.8	Normal	2	0.9
Power Reference Uncertainty	0.6	Normal	2	0.3
Instrumentation Uncertainty	0.5	Normal	2	0.25

Combined Standard Uncertainty =  $u_c = \text{RSS of } u_i$

The table summarizes the statistical characteristics of each source of uncertainty. Each uncertainty percentage is normalized to a one sigma value by dividing it with a divisor that is determined by the probability distribution of the uncertainty. The divisor is 2 for a normal distribution, the square root of 3 for a rectangular distribution, and the square root of 2 for the unusual U-shaped distribution of source/sensor mismatch. The one sigma value is called the standard uncertainty,  $u_i$

- In our example:

$$u_c = \sqrt{(2.8)^2 + (1.0)^2 + (0.9)^2 + (0.3)^2 + (0.25)^2}$$

$$= \pm 3.13\%$$

- Expanded uncertainty ( $k = 2$ )

$$= k \times u_c = \pm 6.26\%$$

$$= 10 \log (1 + 0.063) = + 0.27 \text{ dB}$$

$$10 \log (1 - 0.063) = - 0.28 \text{ dB}$$

Worst-case  
+ 0.37 dB

- 0.37 dB

- Agilent AN 1449-3 covers uncertainty calculations

# Agenda

1. Conceptos de potencia en RF
2. Errores en la medición de potencia
3. Métodos de sensado
  - ❑ Sensores a termistores
  - ❑ Sensores a termocupla
  - ❑ Sensores a diodo
4. Tendencias actuales
5. Muestreo de potencia

## Bolómetros

- Fueron los primeros sensores aplicables para RF. Actualmente los termistores y diodos los superan en cuanto a **sensibilidad, rango dinámico y alcance en potencia**. Se utilizan actualmente como **patrones de transferencia**
- **Pueden medir** → CW, AM, pulsos (a través de tau)
- **Varían su resistencia como consecuencia de la potencia de RF aplicada (calor). La curva es muy alineal!**
- **Barreter: alambre fino metálico.** Llega a bajas potencias (~10 mW, quemado del alambre), baja inercia térmica. Poco utilizado, sólo en aplicaciones caseras.
- **Termistores: semiconductores.** Cuentas de óxidos metálicos de ~0,4 mm. **R vs. P muy alineal y no repetible** → se utilizan en conjunto con puentes.

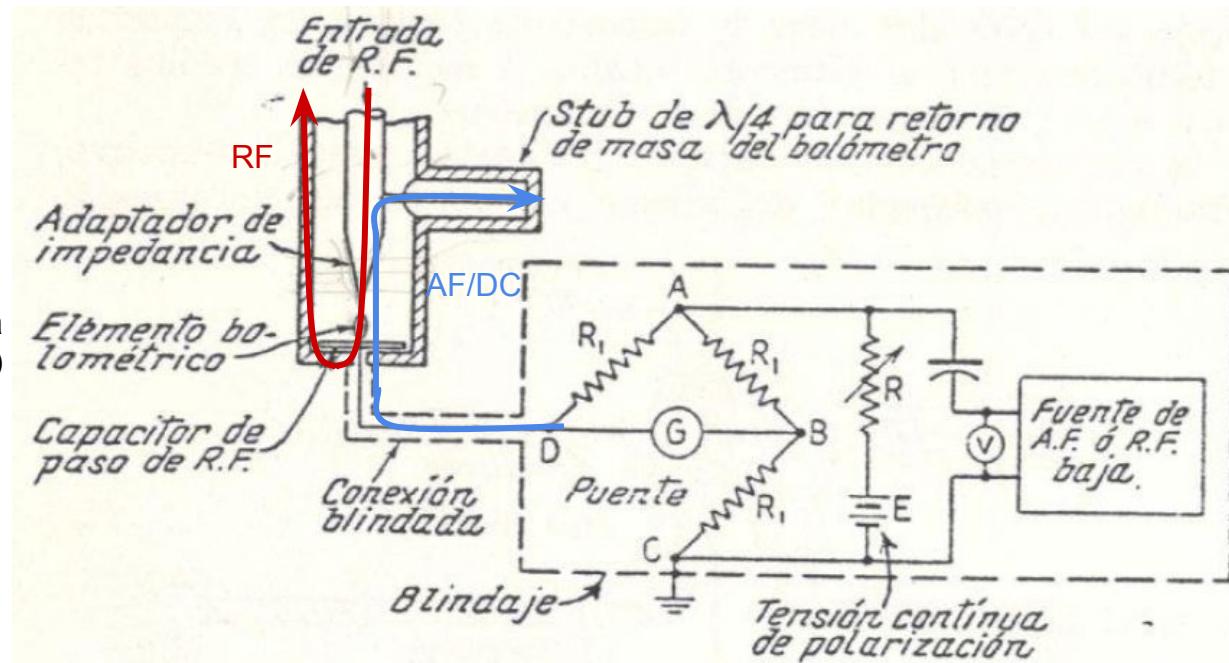
## Tecnica de sustitucion

Primero se balancea el puente con una fuente de continua o baja frecuencia. Luego, se aplica RF y el termistor disminuye su R desbalanceando el puente. Finalmente, se baja la fuente auxiliar hasta balancear nuevamente el puente.

**NO se mide la variación de R con la potencia ya que la curva R(P) es muy alineal, sino la potencia de AF/DC requerida para COMPENSAR la potencia de RF! ("sustitución de potencia").**

## Método bolométrico básico

(Actúa como cuarta rama del puente)



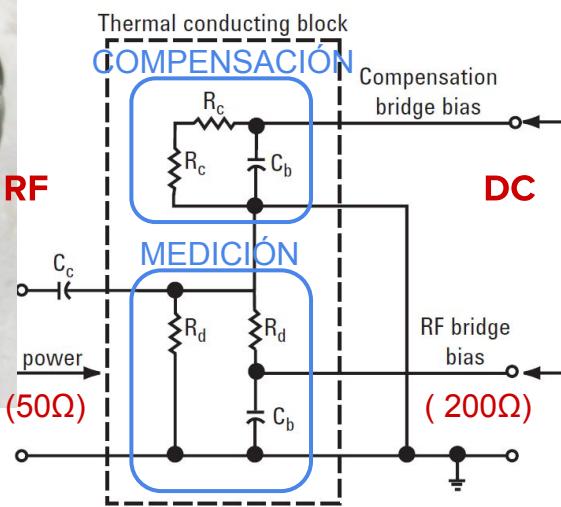
- Se utiliza actualmente para **mediciones comparativas (patrón)**.
- **Su problema es que es muy dependiente de la temperatura ambiente**
- Utiliza un capacitor y un stub para generar dos circuitos separados de DC y de RF
- La línea a medir se conecta a una sección de línea terminada en forma cónica a fin de adaptar su impedancia (50 o 75 ohms) a la del termistor (~200 ohms)

## Montajes basados en termistores

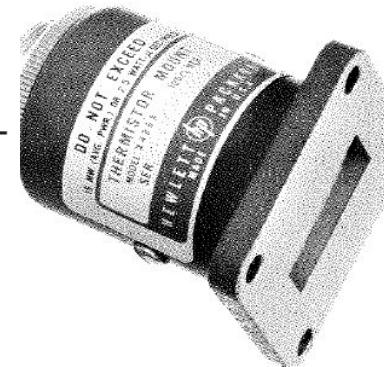
- Coaxiles o guías de onda. En el extremo opuesto, conectores de BF. **Incluye dos sensores, ambos a la misma temp ambiente pero aislados respecto a la RF:**
  - **Sensor para medición:** conectado a la potencia de RF + temp. ambiente
  - **Sensor compensación con temp.:** apareado en su curva R-T, sensible **sólo a Tamb.**
- Buena adaptación en el rango de frecuencias, bajas pérdidas resistivas y dieléctricas del montaje, aislamiento térmico y mecánico, baja pérdida de RF, blindaje para inmunidad a RF externa.



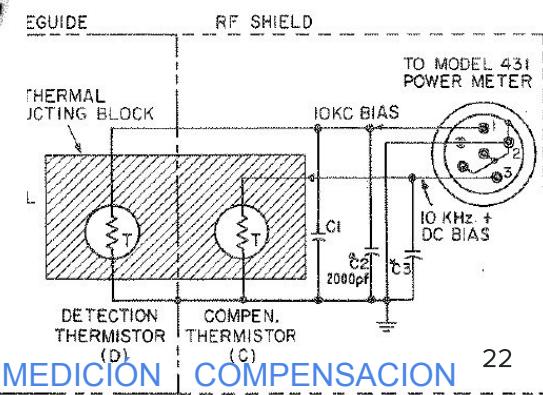
HP478A  
(coaxil, 10M a 18 GHz)



UTN - FRC



HP486A  
(WG, 8 a 40 GHz)

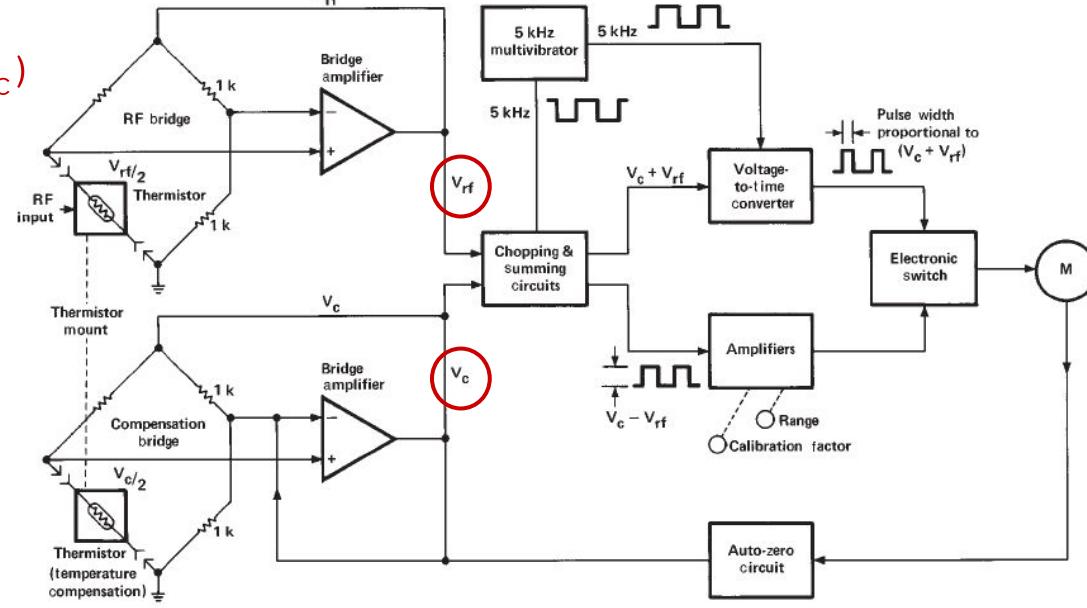


MEDICIÓN COMPENSACIÓN

## Instrumentos con puentes auto-balanceados y auto-compensados

- Primero se pone en cero mediante el botón de auto-cero. Luego, cualquier variación de Tamb afecta a ambos puentes por igual por lo que se auto-compensa. Luego, cuando se aplica RF, se tiene:

$$P_{rf} = \frac{V_{rf}^2}{4R} - \frac{V_{rf}^2}{4R} = \frac{1}{4R} (V_c^2 - V_{rf}^2) = \frac{1}{4R} (V_c - V_{rf})(V_c + V_{rf})$$

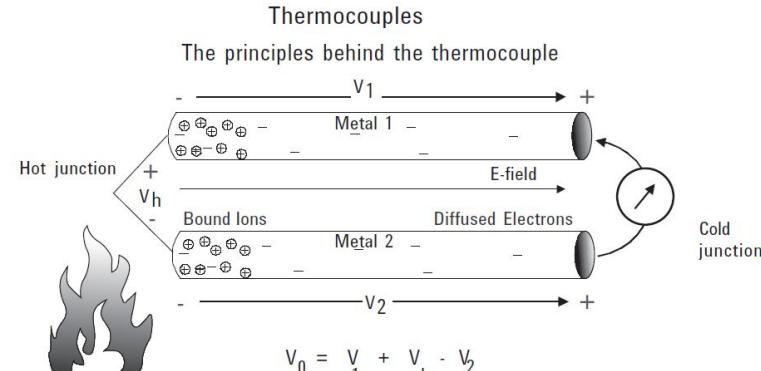
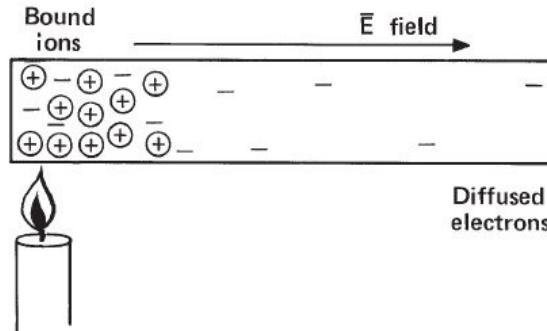


# Agenda

1. Conceptos de potencia en RF
2. Errores en la medición de potencia
3. Métodos de sensado
  - ❑ Sensores a termistores
  - ❑ Sensores a termocupla
  - ❑ Sensores a diodo
4. Tendencias actuales
5. Muestreo de potencia

## Termo-cuplas

- Mejor **sensibilidad** ( $\mu\text{V}/\text{mW}$ , -30 dBm a fondo de escala) y **velocidad de respuesta** (BW)
- Son detectores de **valor verdadero cuadrático** (tensión salida prop. a POTENCIA de RF)
- Más robustos y mejor ROE en todo el rango de potencias
- Más estables con respecto a la temperatura ambiente
- **Limitado rango dinámico** (~50 dB, desde -30 dBm hasta +20 dBm)
- **Requieren circuitos de medición especiales para manejar las bajas tensiones de salida**
- **Metálicas**: efectos reactivos en ondas => deben ser **muy grandes** para mantener ROE aceptable
- **Semiconductores**: muy buena ROE, rango 100 KHz - 50 GHz. **Sensibilidad ~160  $\mu\text{V}/\text{mW}$**

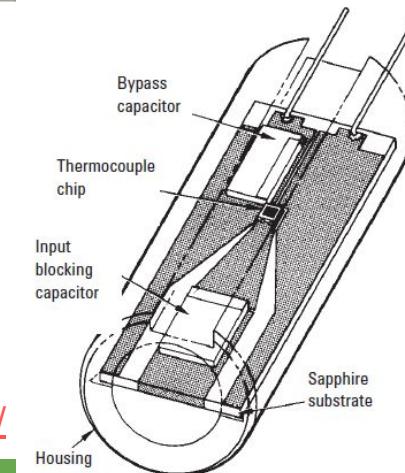
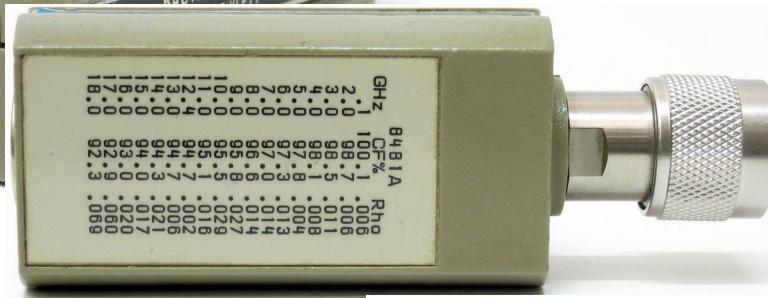
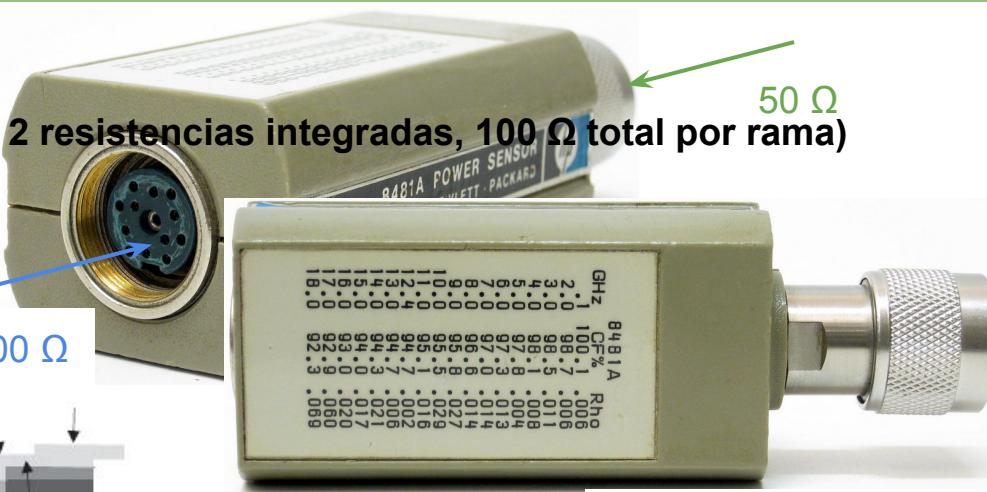
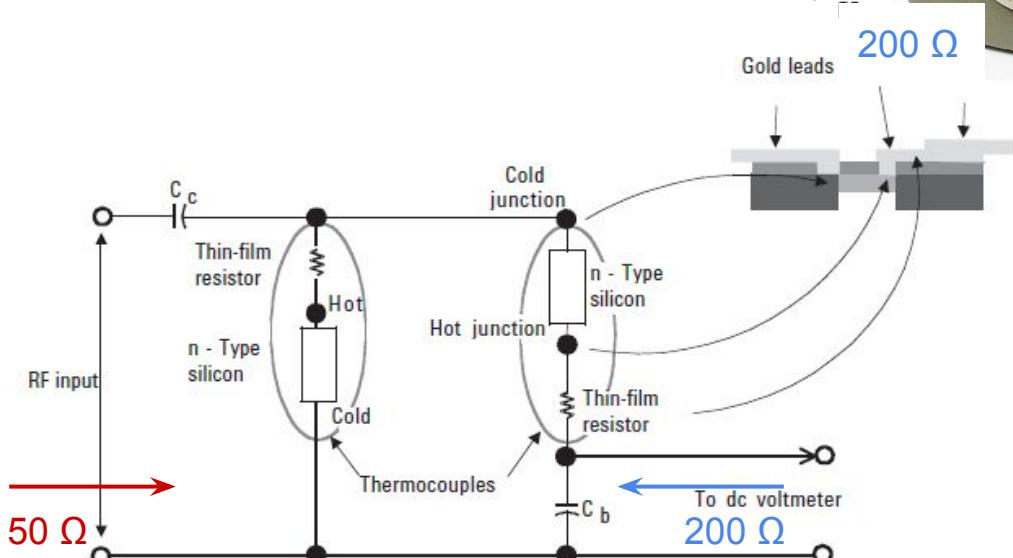


## Montajes para Termo-cuplas

**Ejemplo: HP 8481A (2 termocuplas idénticas + 2 resistencias integradas, 100 Ω total por rama)**

RF → ramas en paralelo → se ven 50 Ω

Voltímetro DC → ramas en serie → se ven 200 Ω

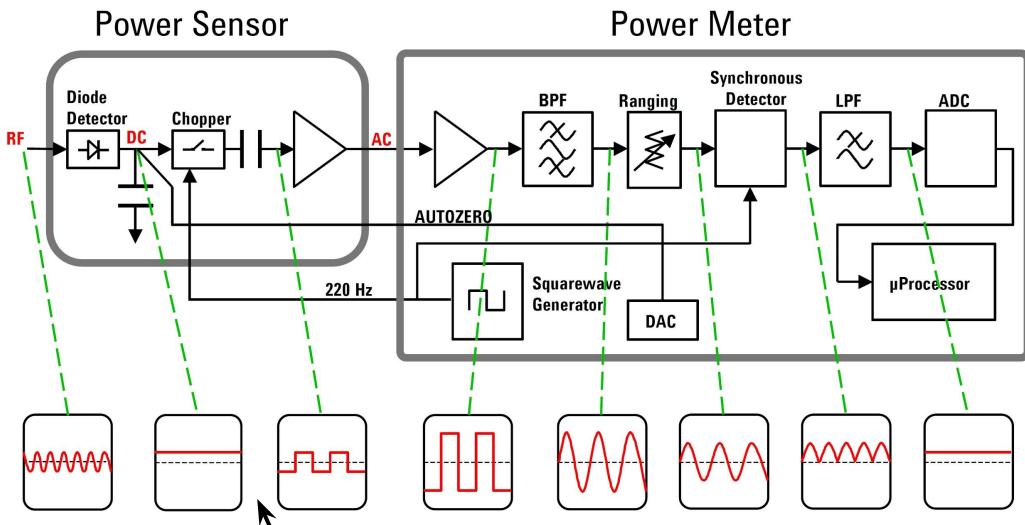


<http://www.simonsdialogs.com/2015/11/hp-8481a-power-sensor-why-are-they-all-blown/>

## Instrumentos para Termo-cuplas

- **NO** utilizan puentes ya que el sensor me entrega **directamente** una tensión DC proporc. a la  $P_{RF}$ !
  - **Problema:** las tensiones son muy pequeñas, por lo que se aplican dos técnicas principales:
    - Se aplica amplificación **en el montaje del sensor (antes de salir)**, Y luego **en el instrumento**
    - Troceado de la señal de DC a fin de hacerla más robusta frente al ruido en el cable

**Ejemplos: HP 435A, 437B (dig.) - Actuales (AN1449-2): EPM series E4418B (single) y E4419B (doble)  
E4416/17A, N1911/12A (peak/average/gated)**

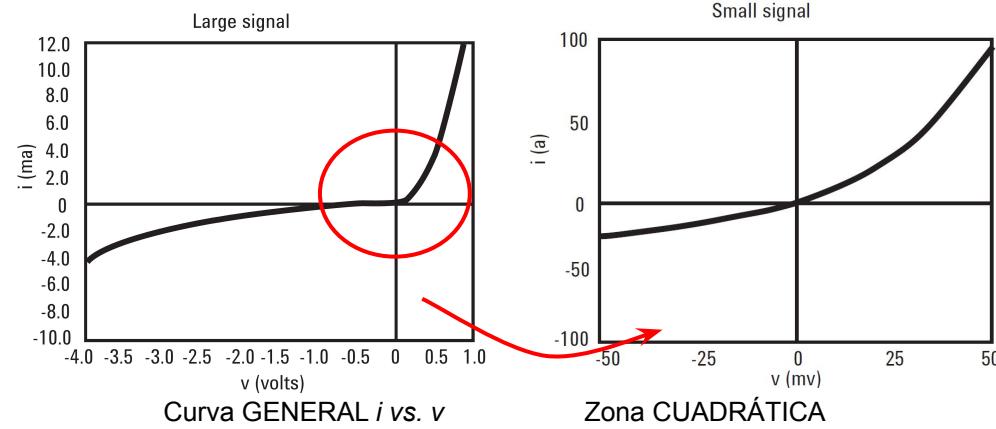
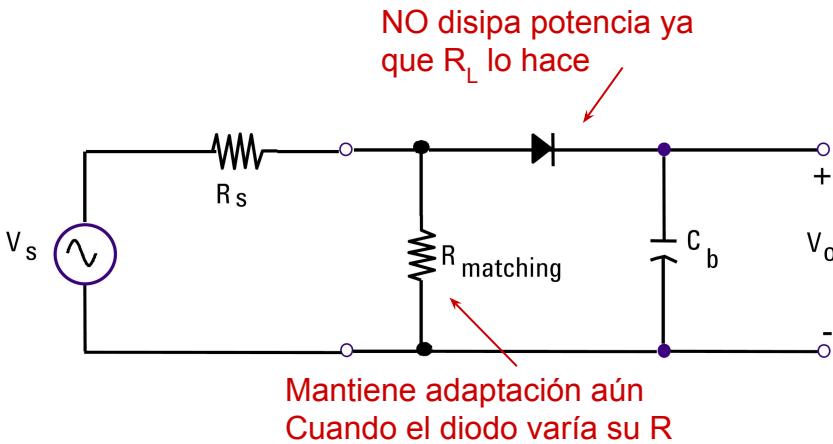


# Agenda

1. Conceptos de potencia en RF
2. Errores en la medición de potencia
3. Métodos de sensado
  - ❑ Sensores a termistores
  - ❑ Sensores a termocupla
  - ❑ Sensores a diodo
4. Tendencias actuales
5. Muestreo de potencia

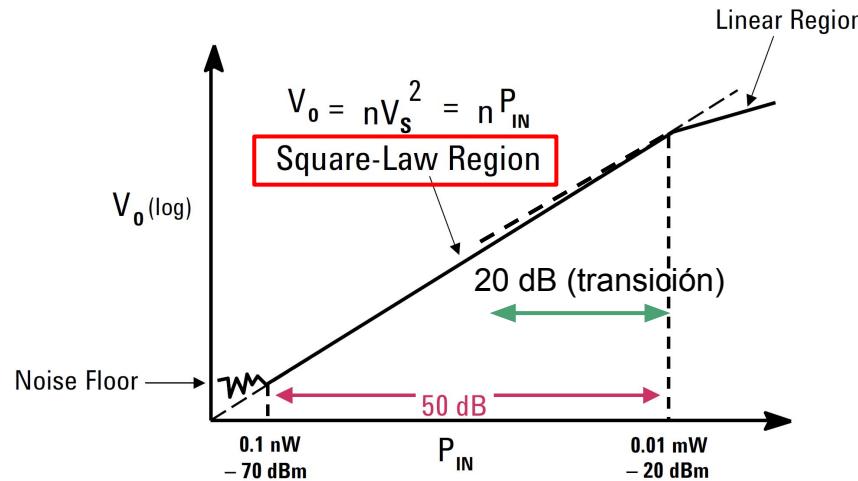
## Sensores a diodo

- **Se utilizan en la zona cuadrática de su curva Pin cs. Vout. La tensión de salida (DC, AF) es linealmente proporcional a la POTENCIA DE ENTRADA**
- **Silicio** → no es práctico. Alta tensión umbral (0,7 V), bajo BW
- **Metal-semiconductor de contacto puntual**
  - Hasta 1980 Low-Barrier Schottky (LBS, 8484A):  $V_{TH} = 0,3 \text{ V}$ , -70 dBm a -20 dBm@10 MHz-18 GHz
  - Desde 1980, Arseniuro de Galio (GaAs)
  - **Actualidad: Planar-Dopped Barrier (PDB) (1987: 8480D series, dos diodos en config. balanceada):**  $T_{TH} \sim 0 \text{ V}$ , baja tensión termoeléctrica, suprime armónicas pares, mayor SNR, MUY ROBUSTOS ante descargas electrostáticas



## Sensores a diodo

- **RANGO DE TRABAJO: -70 dBm (mejor que termocupla) hasta -20 dBm (peor que termocupla).**  
**No es suficiente para modulaciones digitales de alta PAPR (Peak-Average Power Ratio)!**
- **Para extender el rango existen diversas opciones:**
  - **Combinación diodo/termocupla** → son bastante lentos
  - **Factores de corrección derivados de una fuente CW** que compensan la desviación en la región de transición y en la lineal → problema con modulaciones complejas
  - **Serie E** → DUAL-PATH Diodo-attenuador-diodo. Los diodos permanecen en su región cuadrática, llegando a rangos **-60 a +20 dBm (80 dB)**

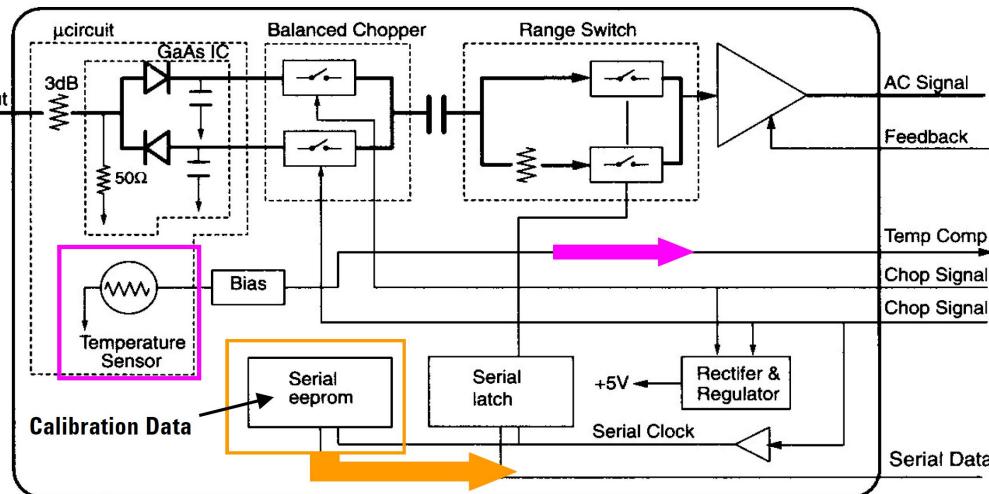


# Agenda

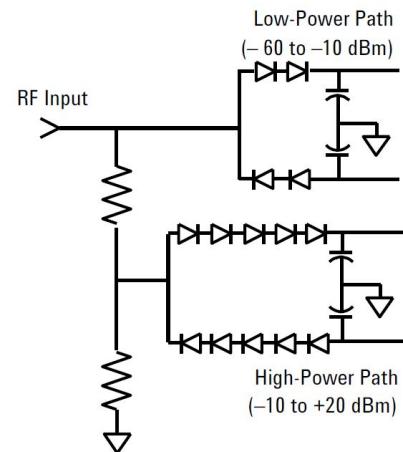
1. Conceptos de potencia en RF
2. Errores en la medición de potencia
3. Métodos de sensado
  - ❑ Sensores a termistores
  - ❑ Sensores a termocupla
  - ❑ Sensores a diodo
4. Tendencias actuales
5. Muestreo de potencia

## Tendencias actuales

– 70 to + 20 dBm = 90 dB Dynamic Range



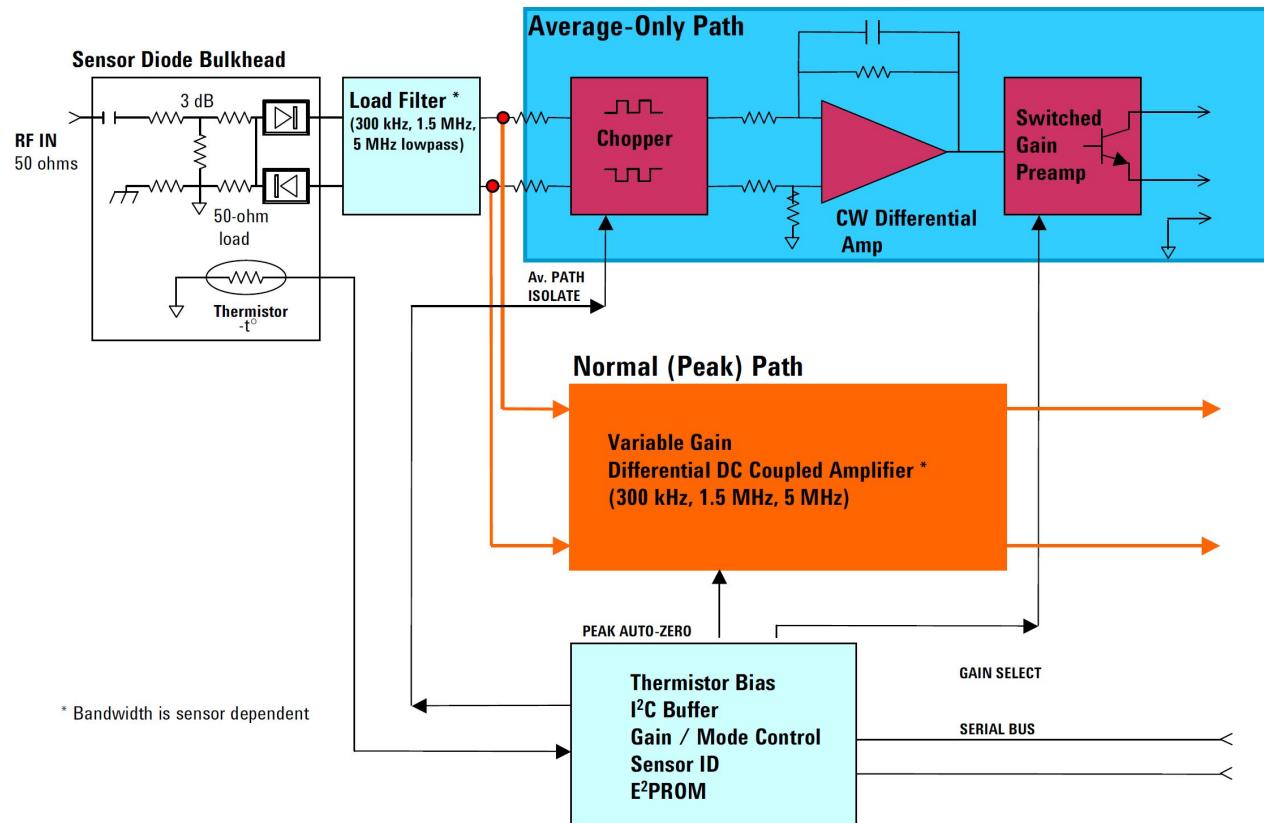
**E4412/13A:** sensor con compensación mediante valores en EEPROM (Sólo para uso en CW, no mods complejas)



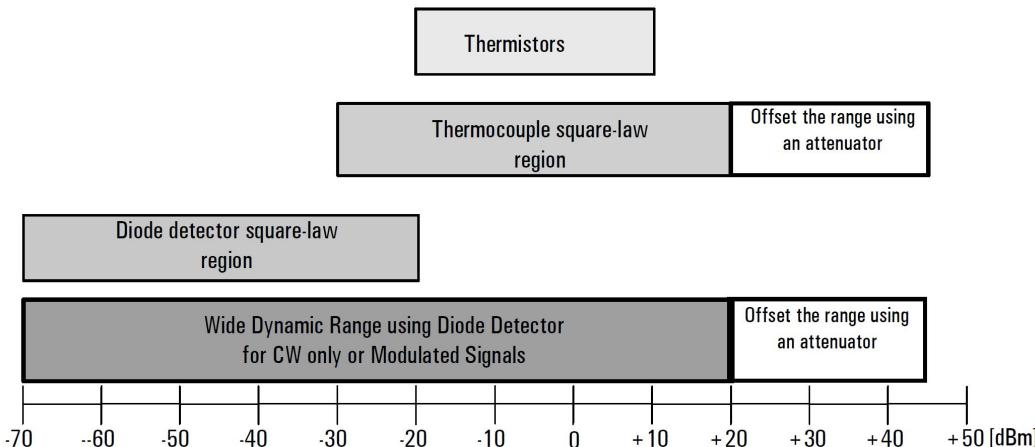
- 80 dB dynamic range with any signal type
- Two-path design
- Diode stack/attenuator/diode stack topology
- Automatic path switching

Keysight **E-Series E9300** power sensors are implemented as a modified barrier integrated diode (MBID) with a two diode stack pair for the low power path (-60 to -10 dBm), a resistive divider attenuator and a five diode stack pair for the high power path (-10 to +20 dBm), as shown in Figures 4-7(a) and 4-7(b). Additionally, series FET switches are used off-chip to allow the low path diodes to self-bias off when not in use.

## Sensores de potencias pico + promedio



## Consideraciones de medición



Thermistors offer high accuracy, but have a more limited operating range than a thermocouple or diode detector sensor. Thermistor mount specifications are for the range from -20 dBm to +10 dBm.

Thermocouples cover a very large range of powers. Their true square-law region is from -30 dBm to +20 dBm, and with an attenuator can operate up to +44 dBm. Three families of thermocouple sensors cover the complete -30 to +44 dBm range. The A-Series covers -30 to +20 dBm, the H-Series covers from -10 to +35 dBm, and the B-Series covers from 0 to +44 dBm.

Diode detectors (D-Series) have the best sensitivity, allowing them to work well below -20 dBm (stated range is -70 to -20 dBm), but above -20 dBm they begin to deviate substantially from the square-law detection region.

The wide dynamic range power sensors are diode sensors and can provide up to 90dB dynamic range. They either work by correcting for the deviation (CW Power Sensors) or by using the two path technique to allow modulated measurements. Wide dynamic range measurements can be made up to a maximum power of +44dBm.

## Consideraciones de medición

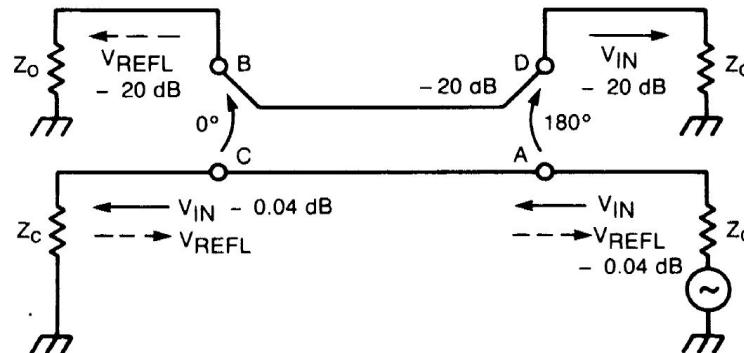
- La tecnología de diodo es la **solución ideal para caracterizar envolventes de modulación pulsantes de alta velocidad o formatos digitales complejos**. Ya que los diodos responden rápidamente a modulaciones de gran ancho de banda de vídeo, proveen fácilmente señales detectadas de vídeo para medición de sus parámetros.
- Los sensores de **potencia pico y promedio** están diseñados específicamente para **anchos de banda de vídeo en el orden de 30 MHz**. Además de su uso en formatos de modulación digital compleja, este ancho de banda los hace apropiados para aplicaciones adicionales, tales como **tests de dos tonos (si su distancia es menor al ancho de banda)**, o señales con **picos estadísticos** que un sensor de valor promedio no puede integrar correctamente.
- A fin de realizar mediciones de potencia **time-gated** en pulsos TDMA, el sistema de medición debe tener **tiempos de subida/bajada suficientes**. Para **caracterizar overshoot**, las especificaciones de tiempos subida/bajada deben ser suficientes para **seguir los flancos del periodo activo de la señal**. En general, se recomienda que **el sensor tenga tiempos de subida/bajada no mayores a  $\frac{1}{8}$  de los tiempos de señal**.
- Al igual que en el ruido blanco, **la potencia promedio de una señal transmitida es sólo uno de los parámetros de interés**. A causa de la forma estadística en que se suman las tensiones de múltiples portadoras aleatoriamente, **las tensiones pico instantáneas pueden llegar a relaciones de 10 a 30 veces la tensión RMS de portadora**, dependiendo de los formatos y filtrado. Esta relación, calculada sobre valores de tensión, se llama comúnmente **factor de cresta**, y es funcionalmente similar a la **relación potencia pico a promedio**.

# Agenda

1. Conceptos de potencia en RF
2. Errores en la medición de potencia
3. Métodos de sensado
  - ❑ Sensores a termistores
  - ❑ Sensores a termocupla
  - ❑ Sensores a diodo
4. Tendencias actuales
5. Muestreo de potencia

## Acopladores direccionales

- Se intercala en una LDT o GO. Posee un circuito primario donde circulan las  $P_i$  y  $P_r$ , y un circuito secundario donde se toman muestras atenuadas. *Idealmente, el AD responde sólo de la potencia en un sentido y no es afectado por la potencia en sentido contrario.*
- **PRINCIPIO:** para  $Z_o$  resistiva y pérdidas no excesivamente grandes, la potencia de una onda progresiva *no es afectada por la potencia en la dirección opuesta* => la potencia NETA transmitida a la carga es la DIFERENCIA entre incidente y reflejada
- **Un AD sensa en UNA DIRECCIÓN** => para sensar ambas a la vez se deben usar 2 ACOPLADORES SIMPLES (o uno doble)

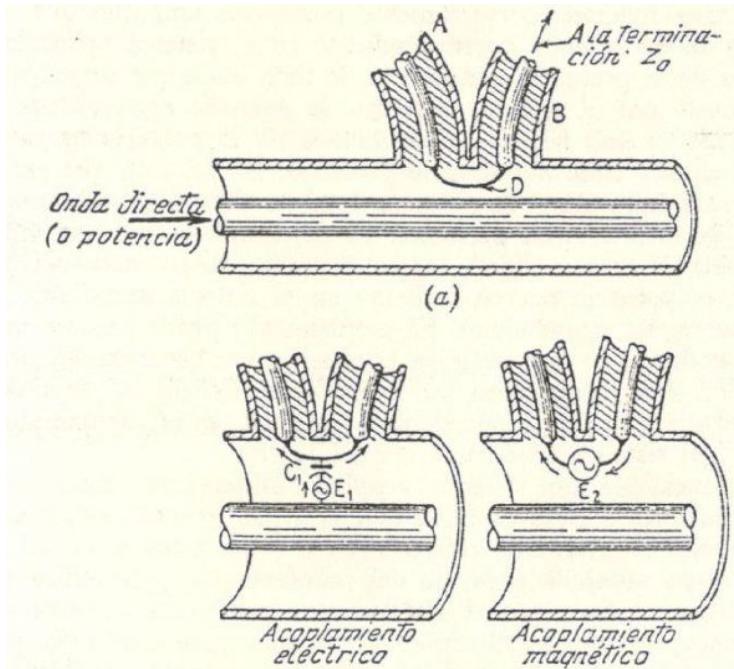


$$\rho_p = \frac{P_r}{P_i}$$

$$\rho_e = \sqrt{\rho_p} = \frac{Z_L - Z_o}{Z_L + Z_o}$$

$$VSWR = ROE = \frac{1 + |\rho_e|}{1 - |\rho_e|}$$

## Ejemplo conceptual: acoplador de Bruene



(Generador equivalente EN SERIE)

(Generador equivalente EN PARALELO)

Las magnitudes relativas de **E** y **H** dependen del diseño del lazo **D**.

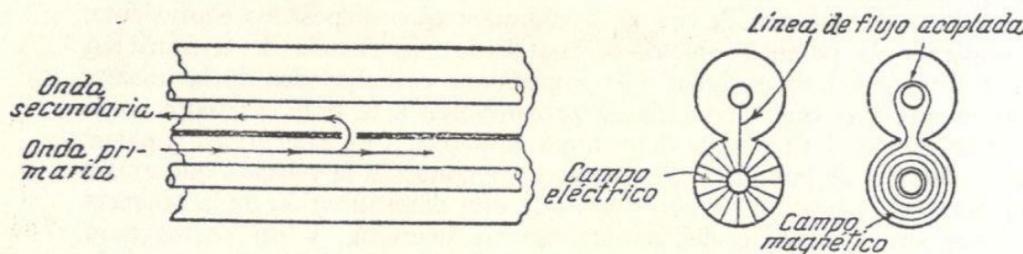
- **Acoplamiento eléctrico**
  - # líneas en el lazo
  - **LARGO DEL LAZO** y diámetro del conductor
- **Acoplamiento magnético**
  - # líneas concatenadas por el lazo
  - **AREA lazo-cond. externo** y **ORIENTACION lazo**

*Las corrientes inducidas pro E y H se cancelan de un lado, y se refuerzan del otro.*

Es IMPRESCINDIBLE que ambos puertos secundarios se terminen an  $Z_0$ , de lo contrario la reflejada en el secundario introduce error.

La medición se realiza **sin alterar el sistema primario** excepto por la absorción de una mínima fracción de potencia (representado por la pérdida de inserción).

## Acopladores de un orificio (Bethe) y de dos orificios (Guías de onda)

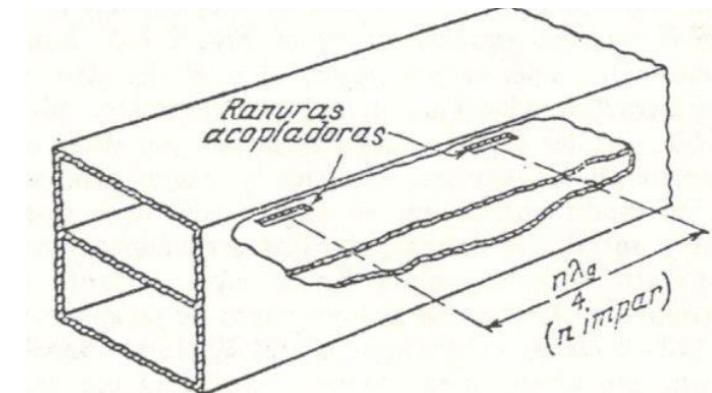


**Acoplador de Bethe** → Muy parecido al Bruene, pero utiliza un orificio en lugar de un lazo.

Los Poynting son opuestos en los conductores ya que el E es saliente abajo y entrante arriba, mientras que el H tiene igual dirección en ambos.

**Relación E / H** → ORIENTACION del orificio  
→ FORMA del orificio  
→ ANGULO entre conductores

**Directividad** → depende de  $f$ , según el espesor de pared

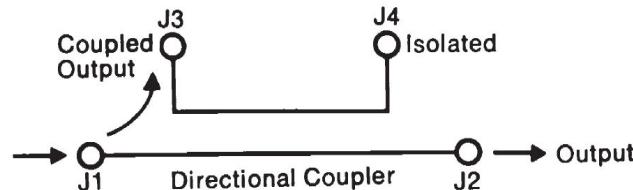


**Acoplador de dos orificios** → logra el efecto direccional por refuerzo o cancelación de las ondas que se propagan en las guías primaria y secundaria

El **ancho de las ranuras** determina esencialmente su ancho de banda

## Especificaciones de los acopladores direccionales

**Factor de acoplamiento (6- 60 dB):** potencia en el puerto ACOPLADO respecto a potencia incidente en la ENTRADA, *cuando todos los puertos están adaptados*. Debe proveer un nivel suficiente al sensor sin sobrecargarlo. Cuanto más acopla, más afecta al primario (por ej. Si C=20dB, reduce TX en 1 %)



$$C_{3,1} = -10 \log \frac{P_3}{P_1}$$

**Directividad (~ 30 dB):** nivel en el puerto AISLADO respecto al puerto ACOPLADO

**Aislación:** potencia en el puerto AISLADO respecto al puerto de ENTRADA

$$\begin{aligned} D_{3,4} &= -10 \log \frac{P_4}{P_3} \\ &= -10 \log \frac{P_4}{P_1} + 10 \log \frac{P_3}{P_1} \end{aligned}$$

$$A_{4,1} = -10 \log \frac{P_4}{P_1} = D_{4,3} + C_{3,1}$$

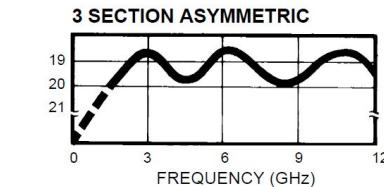
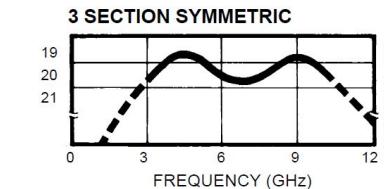
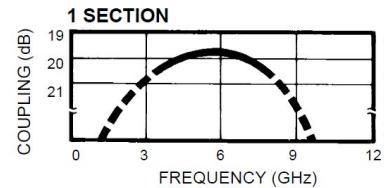
## Especificaciones de los acopladores direccionales

**Pérdida de inserción (~0,2 dB):** atenuación de señal al pasar por el primario. Puede considerar ó no las pérdidas del conductor

$$\text{Ins. Loss} = -10 \log \frac{P_2}{P_1} \approx -10 \log \left( 1 - \frac{P_3}{P_1} \right)$$

**Ripple de acoplamiento (freq. Sensitivity o flatness):**

$\Delta C$  en el rango de frecuencias del A.D.



## Bibliografía

### **Conceptos generales, sensores e instrumentos:**

*Power measurement basics*, Agilent Back to Basics Seminar, 2005

*Fundamentals of RF and Microwave Power Measurements (Part 3)*, Keysight AN1449-1 (Derivada de la AN64-1C original de HP), 2014

*Choosing the right power meter and sensor*, Agilent Product Note, 2009

### **Acopladores direccionales:**

Terman & Pettit, *Mediciones Electrónicas (Cap. 2 - Potencia)*, McGraw-Hill

*RF Directional Couplers and 3dB Hybrids Overview*, MACOM (a division of Amphenol) Application Note M850

## Bibliografía

### **Ejemplos de sensores/instrumentos, montajes y especificaciones:**

*Thermistor mounts model 486A operation note, Hewlett-Packard, Dec. 1966*

*HP 478A thermistor mount operating and service manual, Hewlett-Packard, 1985*

*Agilent 8480 Series Coaxial Power Sensors Operating & Service Manual, Agilent, 2014*

*EPM Series Power Meters E-Series and 8480 Series Power Sensors Data Sheet, Agilent, 2004*

*HP432A Power Meter Operating and Service Manual, Hewlett-Packard, 2004*

*HP/Agilent/Keysight E4418B + ECP-E18A:*

<https://www.sglabs.it/en/product.php?s=hp-agilent-keysight-e4418b-ecp-e18a&id=1848>

*Anritsu ML2400A Series Power Meters:* [https://www.sglabs.it/public/SgLabs\\_ml2430a.pdf](https://www.sglabs.it/public/SgLabs_ml2430a.pdf)