

Teoría de la Comunicación

Grado en Ingeniería Electrónica de Comunicaciones
Grado en Ingeniería de Sistemas de Telecomunicación
Grado en Ingeniería de Sonido e Imagen
Grado en Ingeniería Telemática

Tema 3

Ruido térmico



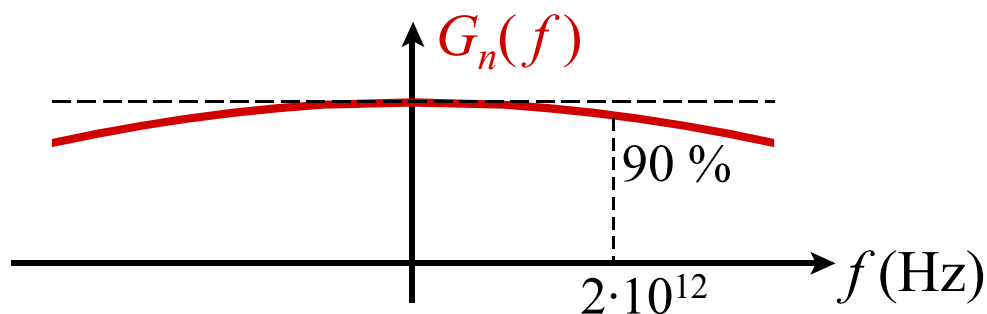
Tema 3. Ruido térmico

CARACTERIZACIÓN DEL RUIDO TÉRMICO



Modelo

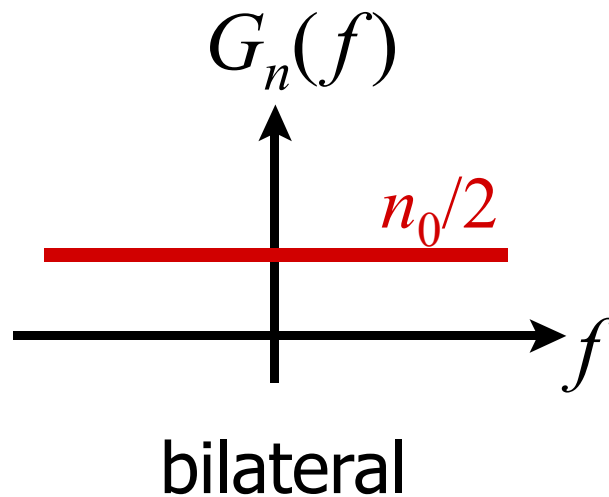
- Aplicable a medios pasivos lineales. Ej. una resistencia
 - ✓ A temperatura física T (K)
- Origen: movimiento aleatorio de partículas cargadas
- La densidad espectral de ruido, $G_n(f)$, transmitida al circuito – con adaptación de impedancias – puede considerarse plana hasta frecuencias de THz:
 - **RUIDO BLANCO (AWGN: ADDITIVE WHITE GAUSSIAN NOISE)**
 - media nula
 - función densidad de probabilidad gaussiana



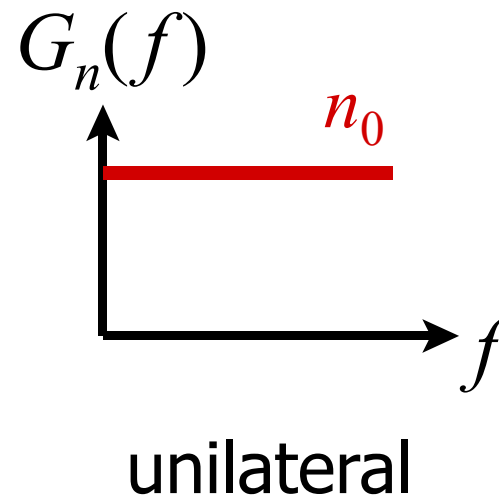
Independiente del valor de R
Solo depende de la temperatura T

Ruido blanco

- Distribución uniforme de potencia en frecuencias



$$G_n(f) = \frac{n_0}{2} = \frac{k \cdot T}{2} \quad [\text{W/Hz}]$$



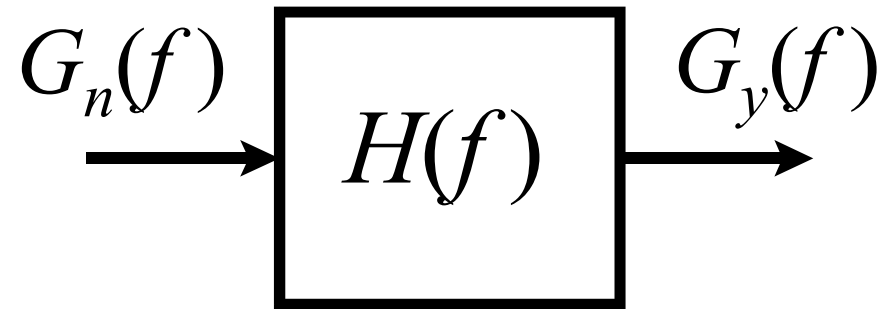
$$G_n(f) = n_0 = k \cdot T \quad [\text{W/Hz}]$$

T en kelvin (K)

$k = 1,3806 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$: constante de Boltzmann



Respuesta a sistema LTI



Definición de ancho de banda equivalente:

$$B_{eq} = \frac{\int_0^{\infty} |H(f)|^2 df}{|H(f)|_{\text{máx}}^2}$$

$$G_n(f) = \frac{n_0}{2} \quad \text{blanco bilateral}$$

$$G_y(f) = G_n(f) |H(f)|^2 \quad \text{'coloreado'}$$

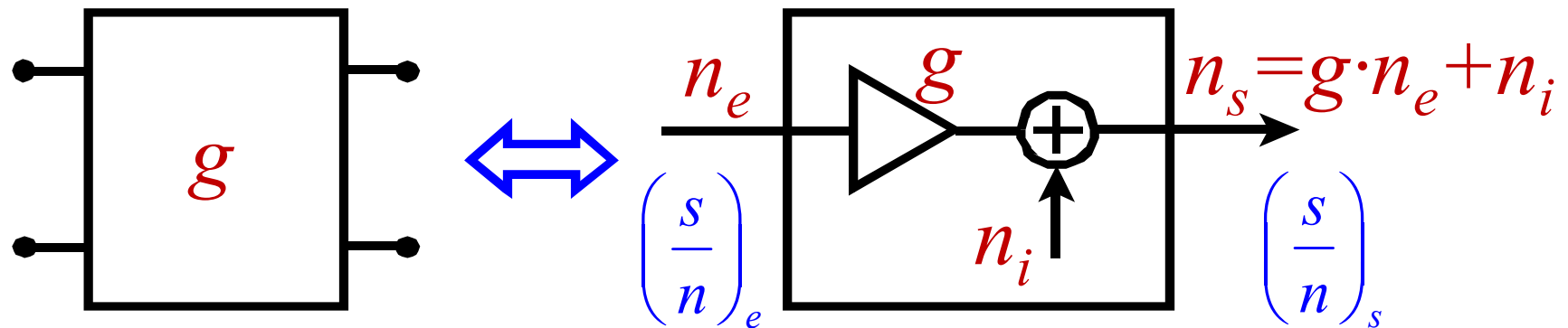
$$p_y = \int_{-\infty}^{\infty} G_y(f) df = \frac{n_0}{2} \int_{-\infty}^{\infty} |H(f)|^2 df = n_0 |H(f)|_{\text{máx}}^2 B_{eq}$$

$$\text{Si } |H(f)|_{\text{máx}} = 1: \quad p_y = k \cdot T \cdot B_{eq}$$

Tema 3. Ruido térmico

CARACTERIZACIÓN DEL RUIDO EN CUADRIPOLOS Y DIPOLOS

Modelo de cuadripolo ruidoso



- Potencia de ruido disponible a la salida, n_s , mayor que $g \cdot n_e$
 - ✓ El dispositivo genera en su interior ruido térmico de potencia n_i

- La relación (s/n) se deteriora:

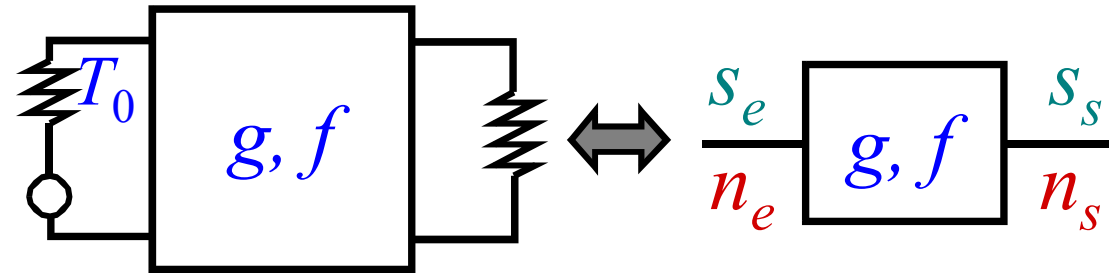
$$\left(\frac{s}{n}\right)_s = \frac{s_e \cdot g}{n_e \cdot g + n_i} = \frac{s_e}{n_e + n_i / g} \leq \frac{s_e}{n_e} = \left(\frac{s}{n}\right)_e$$

- El ruido interno se caracteriza con los parámetros:
 - ✓ Factor de ruido
 - ✓ Temperatura equivalente de ruido

Factor de ruido, f

Cuadripolos adaptados en entrada y salida

Se mide con fuente de ruido a la entrada a $T_0 = 300$ K



Definición I

$$f = \frac{n_s}{n_e \cdot g} \bigg|_{\text{entrada a } T_0} = \frac{\text{Pot. ruido a la salida real}}{\text{Pot. ruido a la salida si cuadripolo no generara ruido}} = \frac{n_e \cdot g + n_i}{n_e \cdot g} > 1$$

$$n_s = n_e \cdot g \cdot f = k \cdot T_0 \cdot B \cdot g \cdot f$$

$$n_i = k \cdot T_0 \cdot B \cdot g \cdot (f - 1)$$

Definición II

$$f = \frac{(s/n)_e}{(s/n)_s} \bigg|_{\text{entrada a } T_0}$$

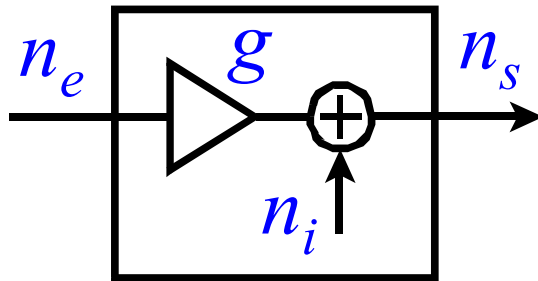
La **figura de ruido**, F , es el valor del **factor de ruido**, f , expresado en dB:

$$F = 10 \log(f) \quad [\text{dB}]$$

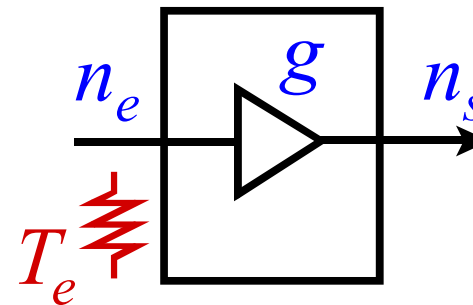
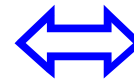


Temperatura equivalente de ruido, T_e

Cuadripolo ruidoso



Cuadripolo no ruidoso

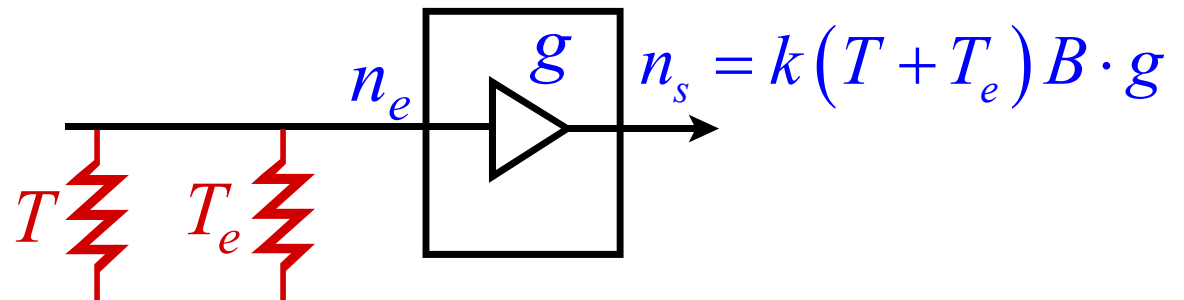


Sustituimos el cuadripolo ruidoso por:

- ✓ Cuadripolo ideal que no genera ruido
- ✓ Una resistencia ficticia a la entrada que estuviera a una temperatura física T_e : equivale al ruido interno generado por el dipolo

Pot. ruido a la salida debida a cuadripolo ruidoso: $n_i = k \cdot T_e \cdot B \cdot g$

Generalizando, cuando se conecta a la entrada una fuente ruidosa T (no necesariamente T_0):



Relación $f \Leftrightarrow T_e$

- Fijando la temperatura de fuente a T_0 :

$$\begin{cases} n_s = k \cdot T_0 \cdot B \cdot g \cdot f \\ n_s = k (T_0 + T_e) B \cdot g \end{cases} \Rightarrow T_e = T_0 (f - 1) \Leftrightarrow f = 1 + \frac{T_e}{T_0}$$

- Ejemplos:

f	T_e
1,1	30 K
2	300 K
3	600 K
10	2700 K

Atenuadores pasivos

○ Atenuador a temperatura física T con ganancia $g = 1/a$

✓ Temperatura equivalente de ruido $T_e = T(a - 1)$

✓ Factor de ruido ($T = T_0$) $f = a$

Ejemplo. Cable de 100 m de atenuación específica $\alpha = 0,2$ dB/m a temperatura física $T_0 = 300$ K

Atenuación total: $A = \alpha \cdot L = 20$ dB

$$a = 10^{A/10} = 100$$

Factor de ruido: $f = a = 100$

Temperatura equivalente: $T_e = T_0(a - 1) = 300 \cdot 99 = 29700$ K



Dipolos

○ Ejemplos:

- ✓ Ruido captado por una antena
- ✓ Ruido generado por una fuente de ruido

○ El ruido a la salida es:

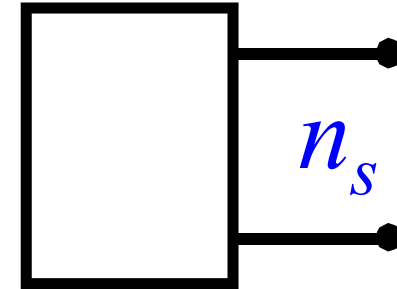
$$n_s = k \cdot T_0 \cdot B \cdot f$$

o bien:

$$n_s = k \cdot T_e \cdot B$$

○ En este caso la relación entre factor de ruido y temperatura equivalente es:

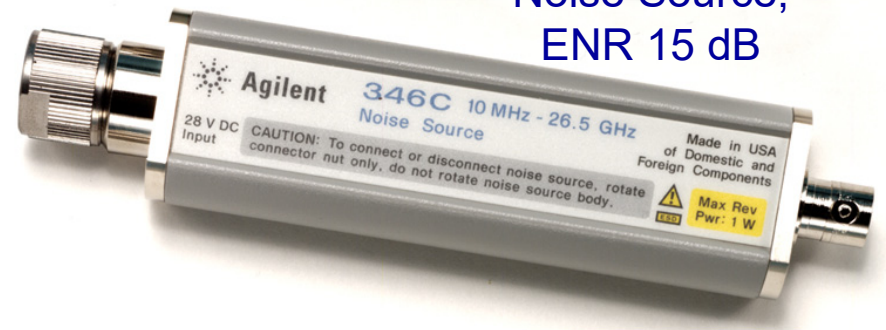
$$T_e = f \cdot T_0$$



Equivalent Noise Ratio:

$$ENR = 10 \log(T_e/T_0)$$

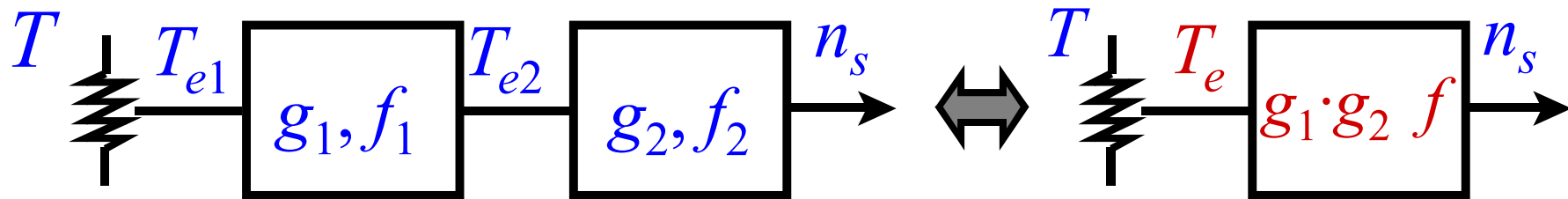
Noise Source,
ENR 15 dB



Tema 3. Ruido térmico

RUIDO EN CADENA DE CUADRIPOLOS. FÓRMULA DE FRIIS

2 cuadripolos en cascada



$$n_s = \underbrace{kTBg_1g_2}_{\text{fuente}} + \underbrace{kT_{e1}Bg_1g_2}_{\text{interno 1}^{\text{er}} \text{ cuadripolo}} + \underbrace{kT_{e2}Bg_2}_{\text{interno 2}^{\text{o}} \text{ cuadripolo}} \Leftrightarrow n_s = \underbrace{kTBg_1g_2}_{\text{fuente}} + \underbrace{kT_eBg_1g_2}_{\text{interno cuadripolo}}$$

$$T_e = T_{e1} + \frac{T_{e2}}{g_1} \quad \xleftrightarrow{T_e = T_0(f-1)} \quad f = f_1 + \frac{f_2 - 1}{g_1}$$

¡terminaciones a T_0 !

N cuadripolos en cascada

○ Fórmula de Friis

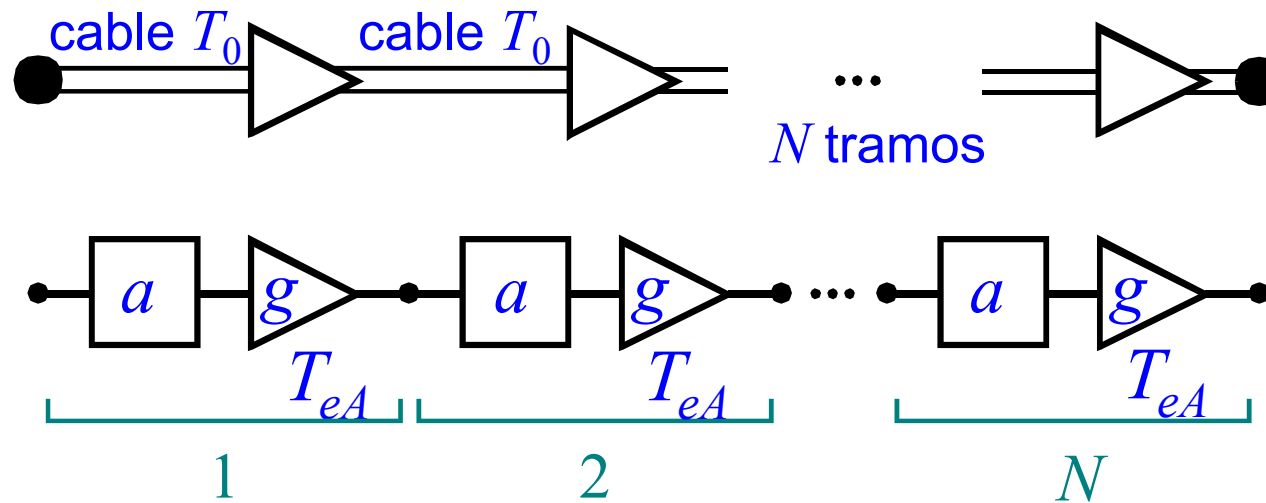
$$T_e = T_{e1} + \frac{T_{e2}}{g_1} + \frac{T_{e3}}{g_1 g_2} + \dots + \frac{T_{en}}{g_1 g_2 \dots g_{n-1}}$$

$$f = f_1 + \frac{f_2 - 1}{g_1} + \frac{f_3 - 1}{g_1 g_2} + \dots + \frac{f_n - 1}{g_1 g_2 \dots g_{n-1}}$$

f sólo sirve para calcular el ruido a la salida si las terminaciones están a T_0

El primer elemento de una cadena de cuadripolos es crítico: suele diseñarse como amplificador de bajo nivel de ruido (LNA)

Ejemplo. Sistema de repetidores



T_{eA} : equivalente del amplificador

$$g = a$$

La temperatura equivalente de cada sección es (para este ejemplo concreto):

$$T_{ei} = T_0 (a - 1) + T_{eA} \cdot a$$

y la equivalente del conjunto:

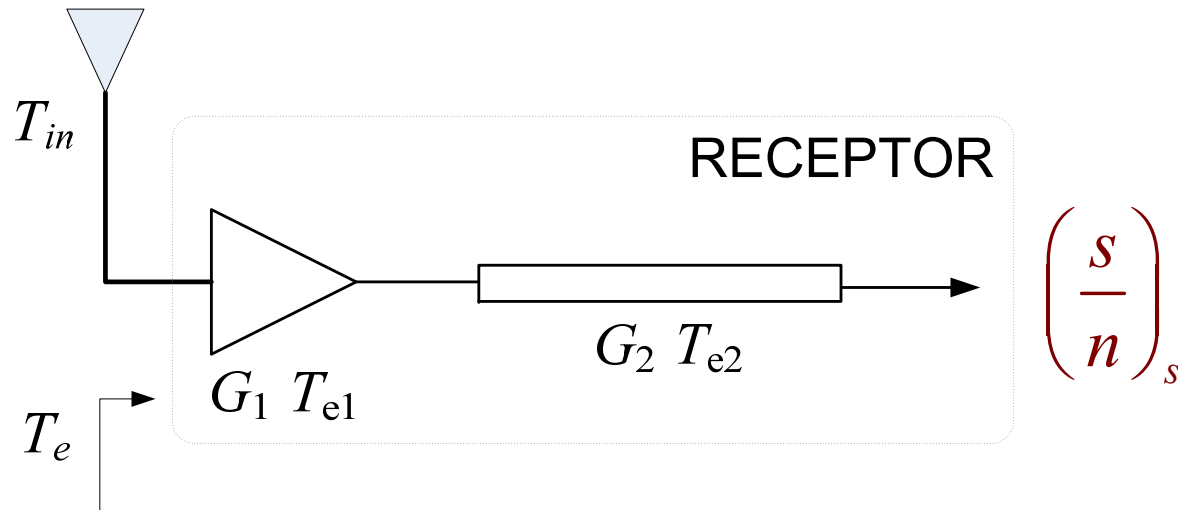
$$T_{e(Msecciones)} = T_{e1} + \frac{T_{e2}}{\left(g \frac{1}{a}\right)} + \frac{T_{e3}}{\left(g \frac{1}{a}\right)^2} + \dots = N \cdot T_{ei}$$

Hay otras configuraciones posibles. Lo importante es que, en un sistema de repetidores, que la temperatura equivalente del conjunto de N secciones es N veces la temperatura equivalente de una sección

Ruido total equivalente a la entrada

$$T_{eT} = T_{in} + T_e$$

Temperatura equivalente total de ruido: suma de la temperatura de ruido disponible a la entrada, T_{in} , y la temperatura equivalente del receptor, T_e



Si se asocia todo el ruido a la entrada

- ✓ La cadena de elementos no cambia la (s/n)
- ✓ $(s/n)_s$ puede calcularse a la entrada del receptor

$$\left(\frac{s}{n}\right)_s = \frac{s_e}{k (T_{in} + T_e) B}$$

Notas:

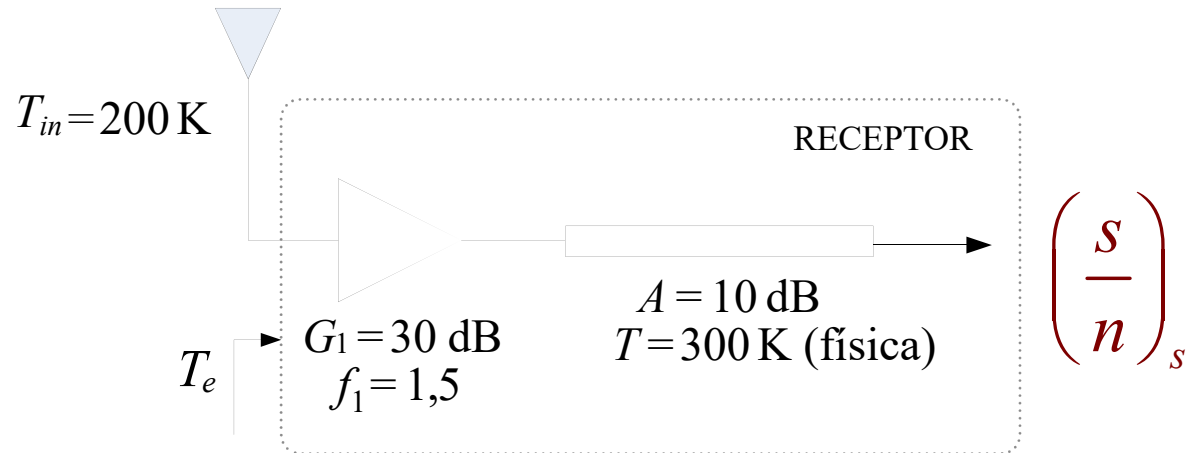
- T_{in} existe y se puede medir a la entrada; el resto de las temperaturas se mueven a la entrada por conveniencia, pero sus ruidos térmicos no existen, ni se pueden medir, a la entrada
- Diferenciar el ruido (que realmente existe) a la entrada, T_{in} , del ruido interno de la cascada de cuadripolos llevado a la entrada de forma artificial, T_e



Ejemplo

$$s_e = 1 \text{ nW}$$

$$B = 1 \text{ MHz}$$



$$T_{e1} = T_0 (f_1 - 1) = 300(1,5 - 1) = 150 \text{ K}$$

$$T_{e2} = T_0 (a - 1) = 300(10 - 1) = 2700 \text{ K}$$

$$T_e = T_{e1} + \frac{T_{e2}}{g_1} = 150 + \frac{2700}{1000} = 152,7 \text{ K}$$

$$T_{eT} = T_{in} + T_e = 352,7 \text{ K}$$

$$\left(\frac{s}{n}\right)_s = \frac{10^{-9}}{k T_{eT} B} = 205454 \rightarrow 53 \text{ dB}$$

$$s_s = s_e g_1 \frac{1}{a} = 10^{-7} \text{ W}$$

$$n_s = k T_{in} B g_1 \frac{1}{a} +$$

$$+ k T_{e1} B g_1 \frac{1}{a} +$$

$$+ k T_{e2} B \frac{1}{a} = 4,86 \cdot 10^{-13} \text{ W}$$

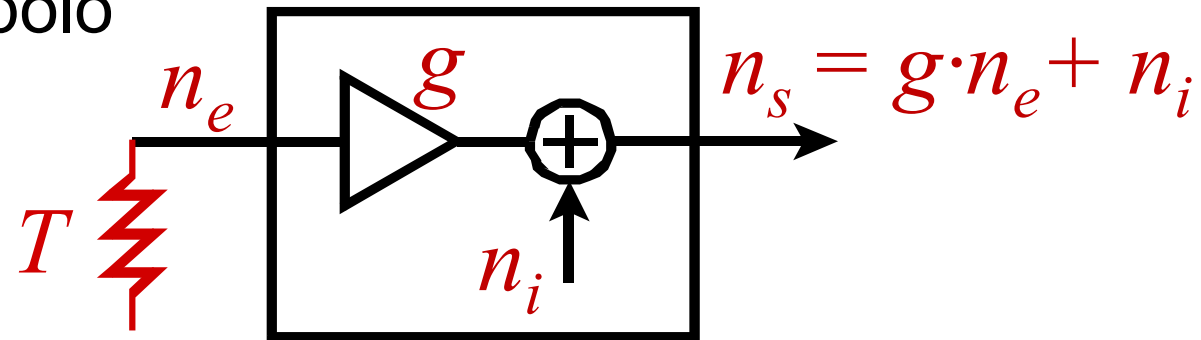
$$\left(\frac{s}{n}\right)_s = 205454 \rightarrow 53 \text{ dB}$$



Resumen

Potencia de ruido en bornas de una resistencia: $k \cdot T \cdot B$

○ En un cuadripolo



Factor de ruido

$$T = T_0$$

$$n_s = k \cdot T_0 \cdot B \cdot g \cdot f$$

Temperatura equivalente

$$n_s = k \cdot (T + T_e) \cdot B \cdot g$$

$$T_e = T_{e1} + \frac{T_{e2}}{g_1} + \frac{T_{e3}}{g_1 g_2} + \dots + \frac{T_{en}}{g_1 g_2 \dots g_{n-1}}$$





Tema 3. Ruido térmico

ANALIZADOR DE ESPECTROS

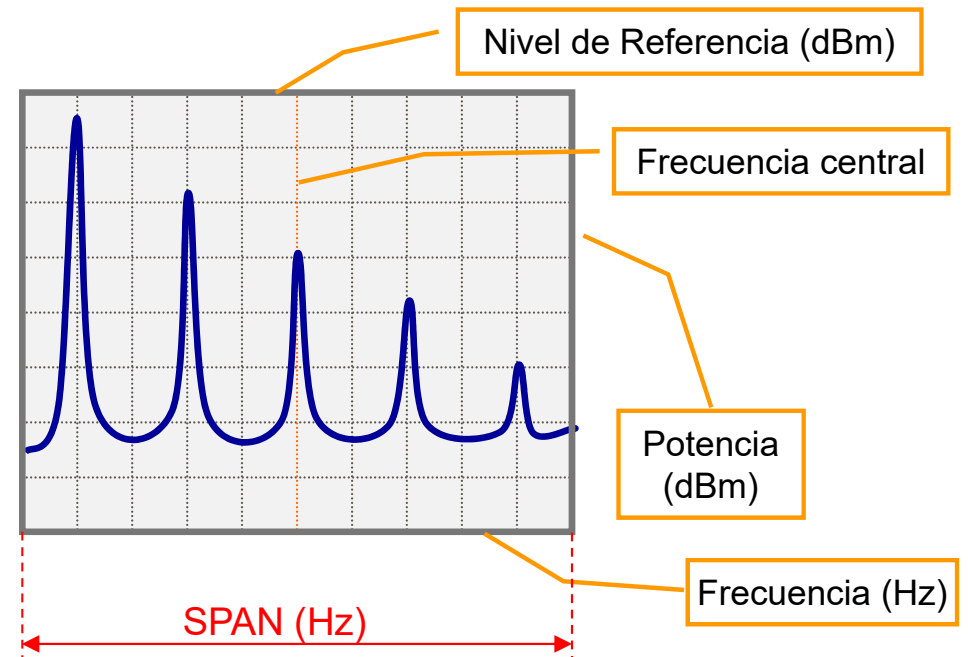
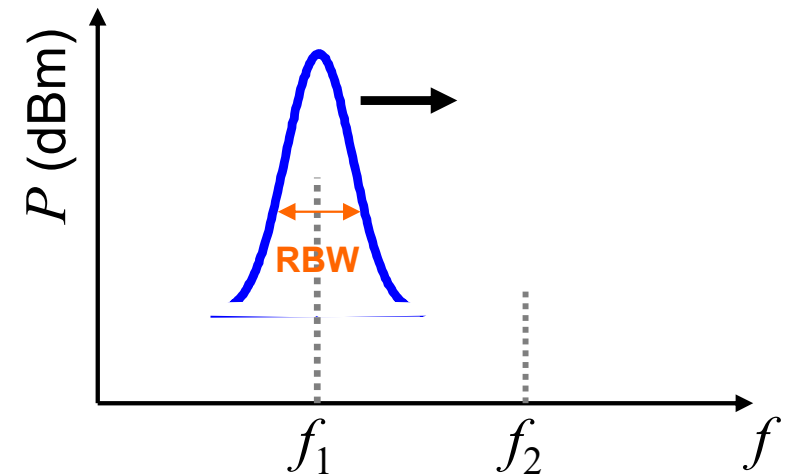
Funcionamiento básico

1. Un filtro estrecho barre el rango de frecuencias del analizador
2. Para cada frecuencia se calcula la potencia* (unilateral) dentro del ancho de banda de resolución del filtro (RBW)

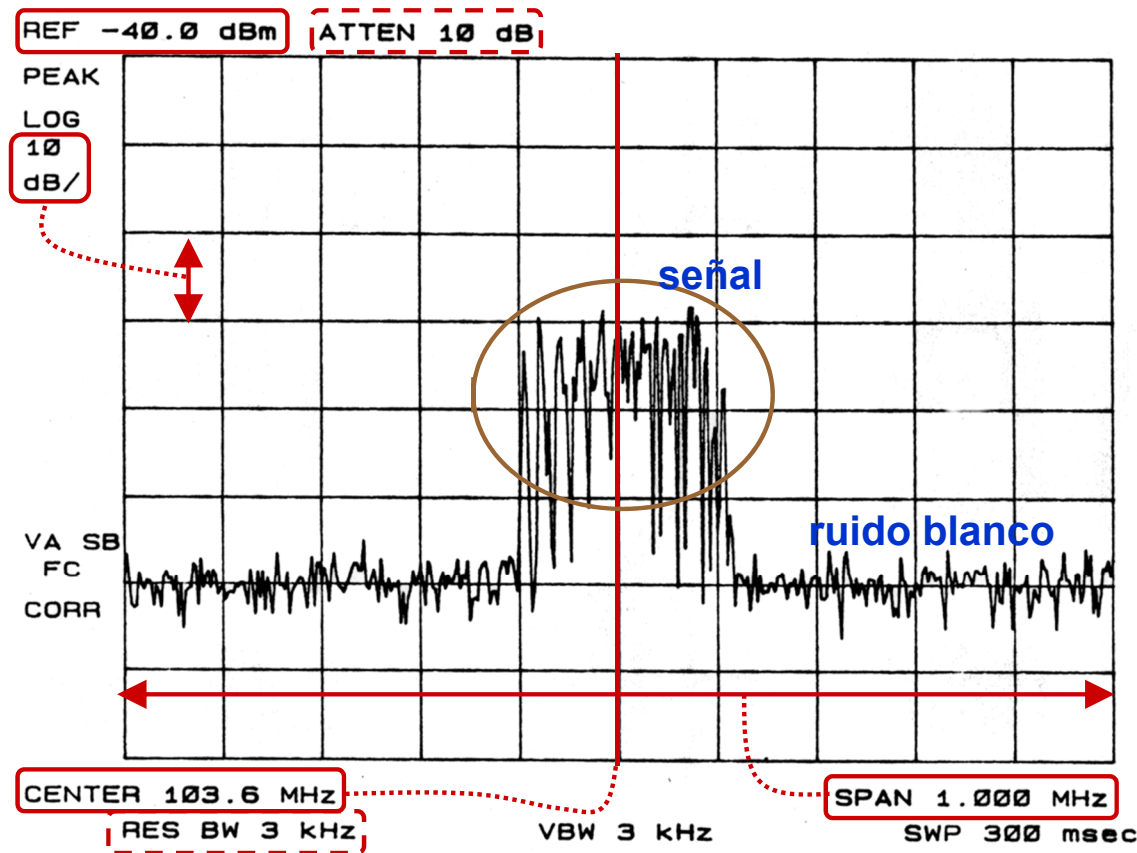
Parámetros:

- Frecuencia central (CENTER)
- SPAN
- Nivel de referencia (REF)
- Escala vertical (dB/)
- AB de resolución (RES BW, RBW)
- Atenuación de entrada (ATTEN)
 - ✓ Protege contra señales muy potentes
 - ✓ Aumenta el suelo de ruido
 - ✓ NO modifica las medidas

* Los analizadores convencionales miden potencia (dBm), no densidad espectral de potencia (dBm/Hz)



Parámetros



Impedancia de entrada
típica: $Z = 50 \Omega$

El nivel de ruido leído, N [dBm], es la potencia unilateral de ruido que entra en el RBW:

$$n[\text{mW}] = n_0[\text{mW/Hz}] \cdot \text{RBW}[\text{Hz}]$$

$$N[\text{dBm}] = N_0[\text{dBm/Hz}] + 10 \log(\text{RBW}[\text{Hz}])$$