

RUIDO E INTERFERENCIAS

Referencias bibliográficas

Instrumentación electrónica, M.A. Pérez García y otros, Ed. Thomson

Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits,
S. Franco, Ed. McGraw Hill

RUIDO E INTERFERENCIAS

- Señal indeseada que perturba la señal de interés.
 - Interferencias electromagnéticas externas
 - Ruido interno o inherente a los componentes
 - No idealidades de los componentes (offset, etc)
 - Sensibilidad cruzada (a otras magnitudes)
- Sistemas de instrumentación son muy susceptibles
 - Presencia de señales débiles
 - Cableados complejos
- Para disminuir su efecto hay que determinar:
 - Las fuentes de interferencia
 - Las partes del sistema susceptibles de actuar como receptores o emisores de interferencias
 - Los mecanismos de acoplamiento (vías por las que llegan al sistema)

INTERFERENCIAS ELECTROMAGNÉTICAS

- Deterioro de la señal producido por el efecto de la radiación electromagnética.
- **Compatibilidad electromagnética (EMC):** capacidad de un sistema para funcionar en un entorno de campos electromagnéticos y sin influir en él.

FUENTES DE INTERFERENCIAS

	Tipo	Ejemplo
Fuentes naturales de EMI	Terrestre	Rayos Relámpagos Descargas electrostáticas
	Extraterrestre	Energía solar Rayos cósmicos Ruido estelar
Fuentes artificiales de EMI	Sistemas eléctricos	Motores y generadores Líneas de distribución y transporte Aparallaje eléctrico Hornos de arco Equipos de soldadura Iluminación
	Sistemas electrónicos	Equipos de comunicación Radar Computadores y sistemas de control Fuentes de alimentación y accionadores Sistemas industriales
	Otros sistemas	Sistemas de encendido Sistemas de ultrasonidos Pulso nuclear

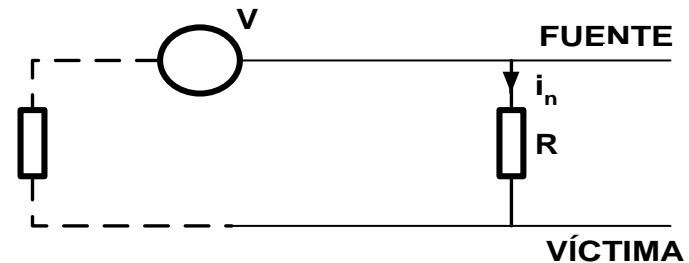
MECANISMOS DE ACOPLAMIENTO

- **CONDUCTIVO**
 - Entre la fuente y el receptor existe algún camino (explícito o no) de circulación de corriente.
- **CAPACITIVO**
 - Entre dos conductores (fuente y receptor) se genera un campo eléctrico
- **INDUCTIVO**
 - Un campo magnético variable producido por las corrientes de un circuito fuente genera tensiones en el circuito receptor
- **RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA**
 - El comportamiento entre fuente y receptor se asemeja a antenas de emisión y recepción.

ACOPLAMIENTO CONDUCTIVO

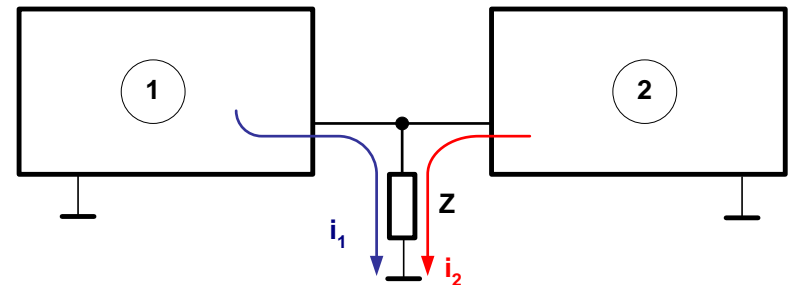
- **IMPEDANCIA ENTRE LÍNEAS**

Los aislantes que separan los conductores no son perfectos. Tienen poca influencia (solo cuando hay líneas de alta tensión cercanas al circuito)



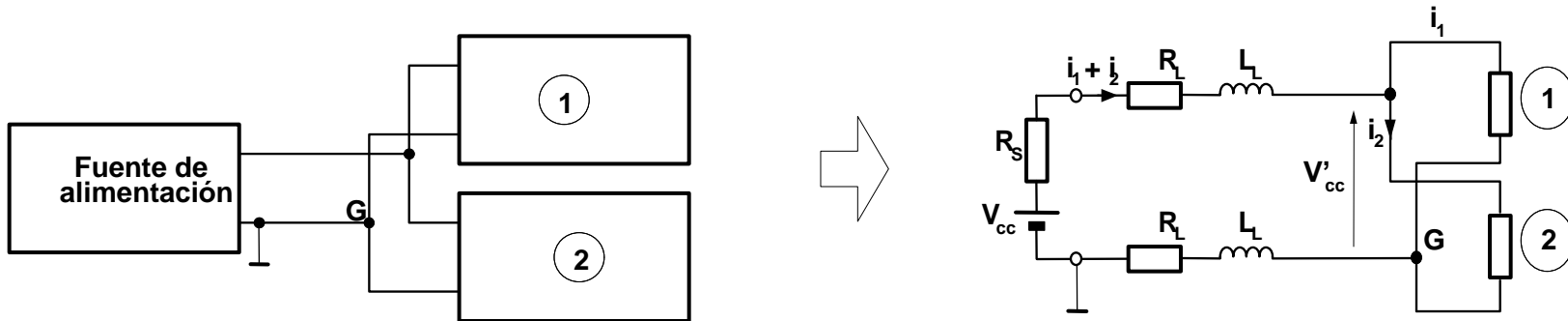
- **IMPEDANCIA COMÚN**

Frecuente en sistemas con bloques diferenciados pero conectados entre sí a la misma fuente de alimentación



$$V_Z = Z(i_1 + i_2)$$

Impedancia común



$$V_C = V_{CC} - (2R_L + R_S)(i_1 + i_2) - 2L_L \left(\frac{di_1}{dt} + \frac{di_2}{dt} \right)$$

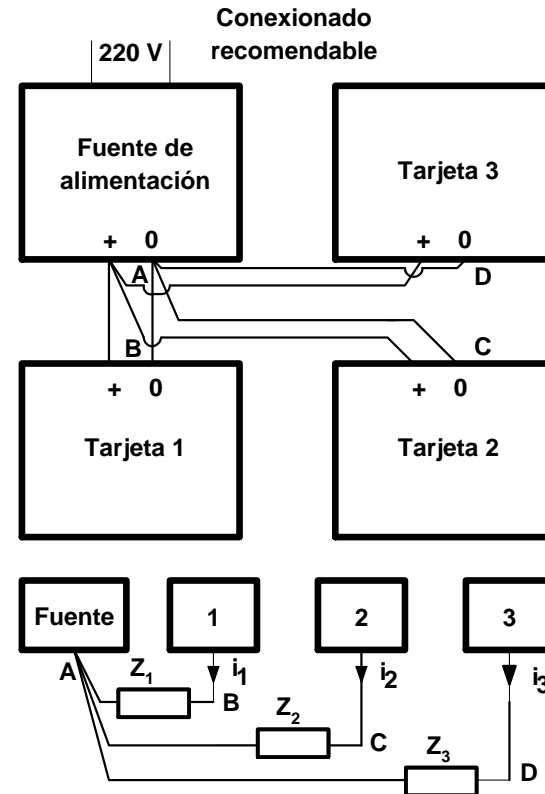
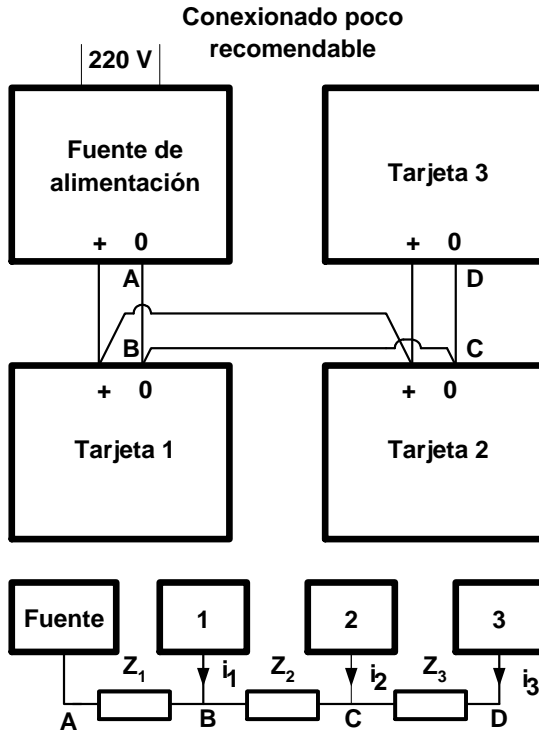
Hay que cuidar que:

- Las etapas de potencia no perturben a los bloques analógicos y digitales.
- Los bloques digitales (pulsantes) no perturben las señales analógicas.

Reducción de interferencias:

- Reducir la distancia entre la fuente y el circuito (menor R_L , L_L)
- Aumentar la sección del cableado (menor R_L)
- Usar condensadores de desacoplo entre alimentación y tierra para reducir los picos de corriente y las fluctuaciones de la alimentación.
- Conexiones en estrella en vez de en serie.

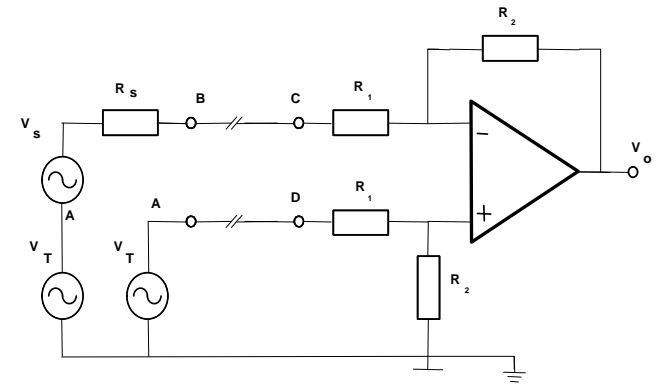
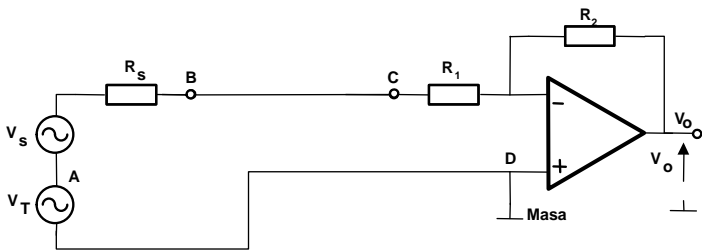
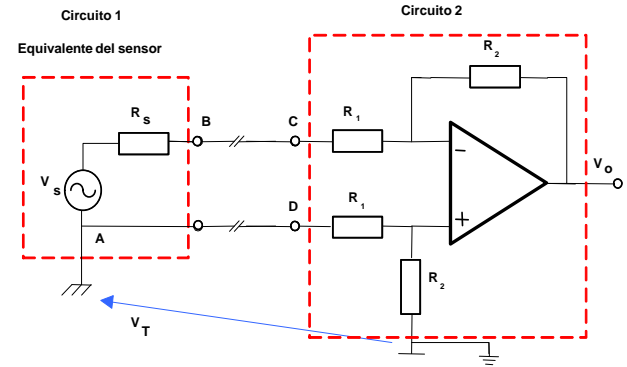
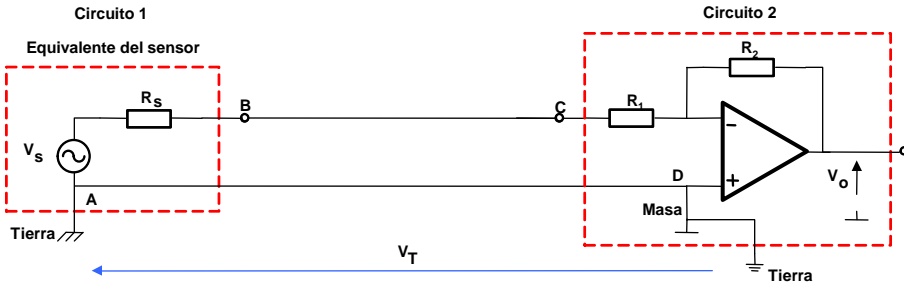
Conexión en serie y paralelo



Bucles de tierra

Tierras con una diferencia de tensión en la referencia (V_T)

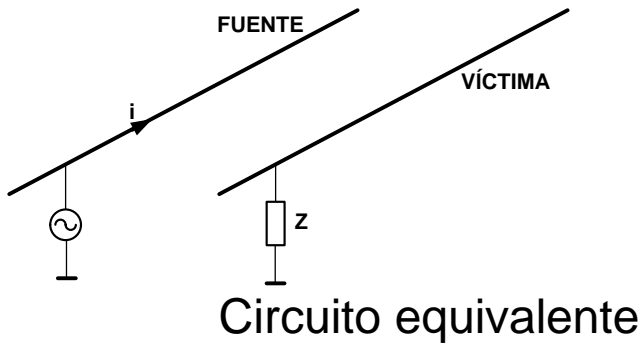
Solución: uso de amplificadores diferenciales (de instrumentación o de aislamiento)



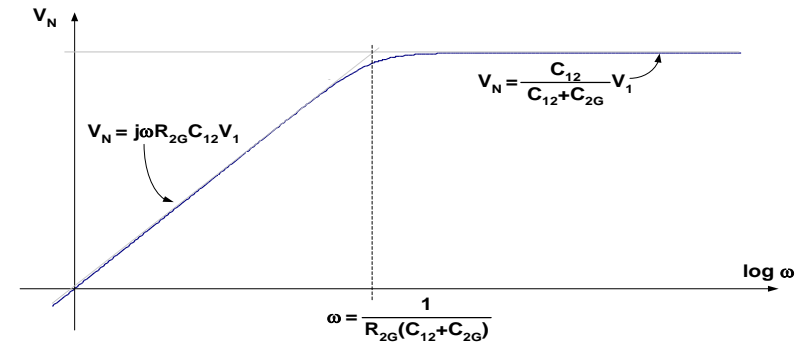
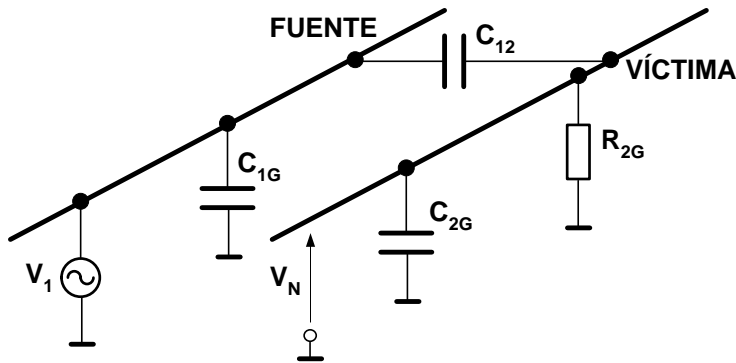
$$V_o = -(V_s + V_T) \frac{R_2}{R_1}$$

$$V_o = -[(V_s + V_T) - V_T] \frac{R_2}{R_1} = -V_s \frac{R_2}{R_1}$$

ACOPLAMIENTO CAPACITIVO



$$V_N = \frac{j\omega R_{2G} C_{12}}{1 + j\omega R_{2G} (C_{12} + C_{2G})} V_1$$

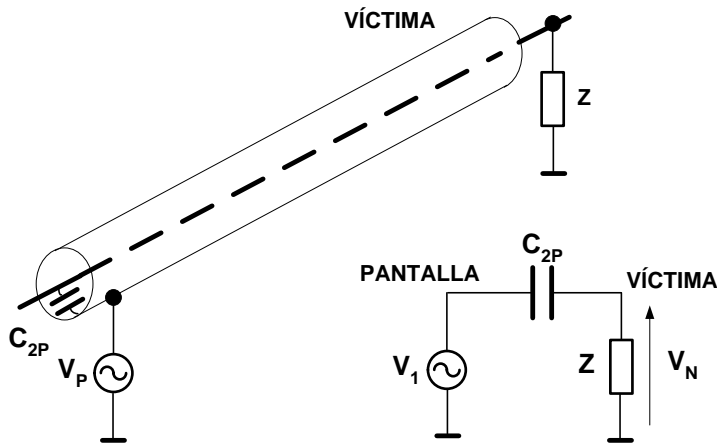
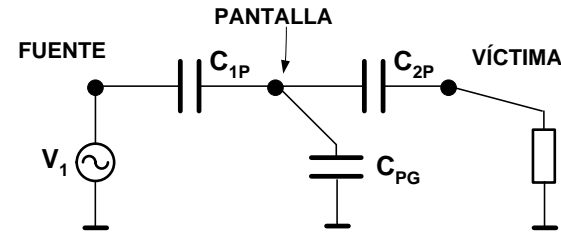
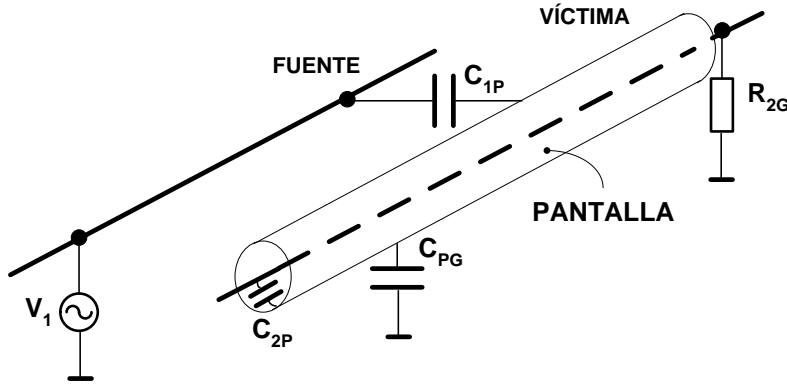


Reducción de interferencias capacitivas:

- Reducir C_{12} : Aumentar la distancia entre conductores
- Pantallas o blindajes del receptor
- Guardas activas

Apantallamiento

Pantalla: malla metálica que rodea a un conductor o circuito



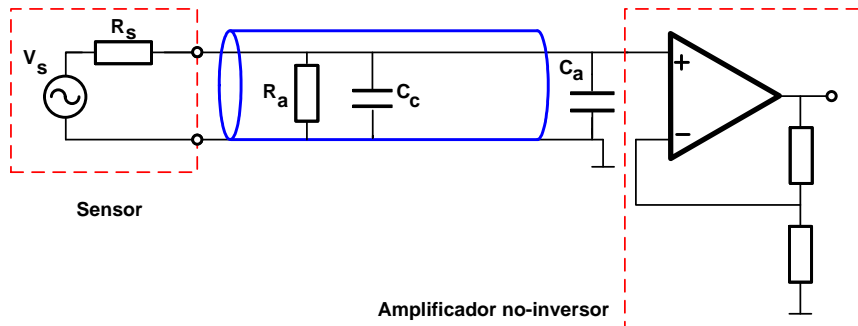
$$V_N = \frac{j\omega C_{2P} Z}{1 + j\omega C_{2P} Z} V_P$$

Para que el apantallamiento sea efectivo la pantalla debe estar conectada a una tensión constante o tierra ($\omega=0$).

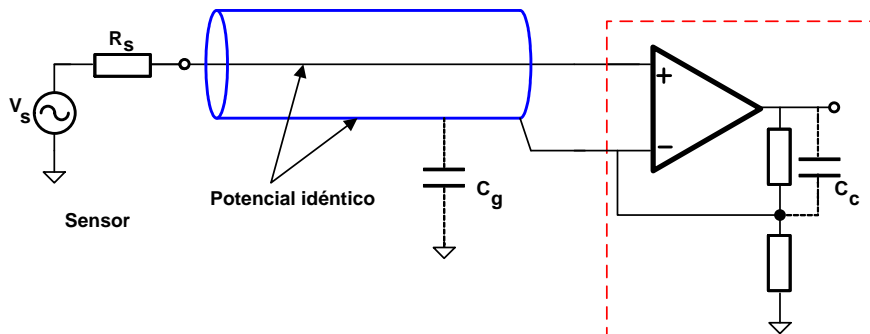
Guardas activas

Conductor que rodea al de la señal y que está conectado al mismo potencial de la señal.

Interesantes cuando se mide señales procedentes de sensores con impedancias de salida muy elevadas (p.ej. piezoeléctricos).



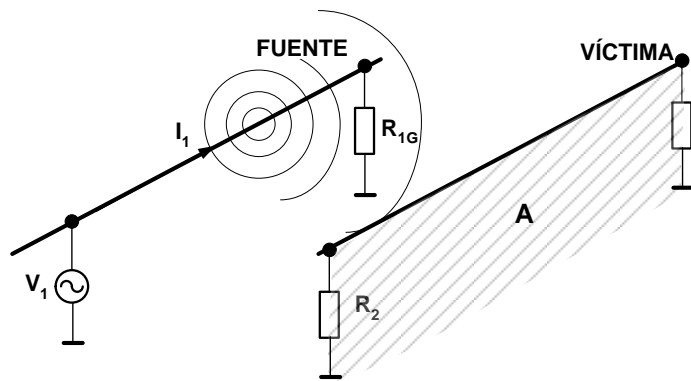
- La resistencia del sensor y las capacidades (del cableado y de entrada del amplificador) forman un filtro paso-bajo de ancho de banda muy reducido.
- Existen fugas de corriente a través del aislante del cable (R_a) y reduce la tensión que llega al amplificador.



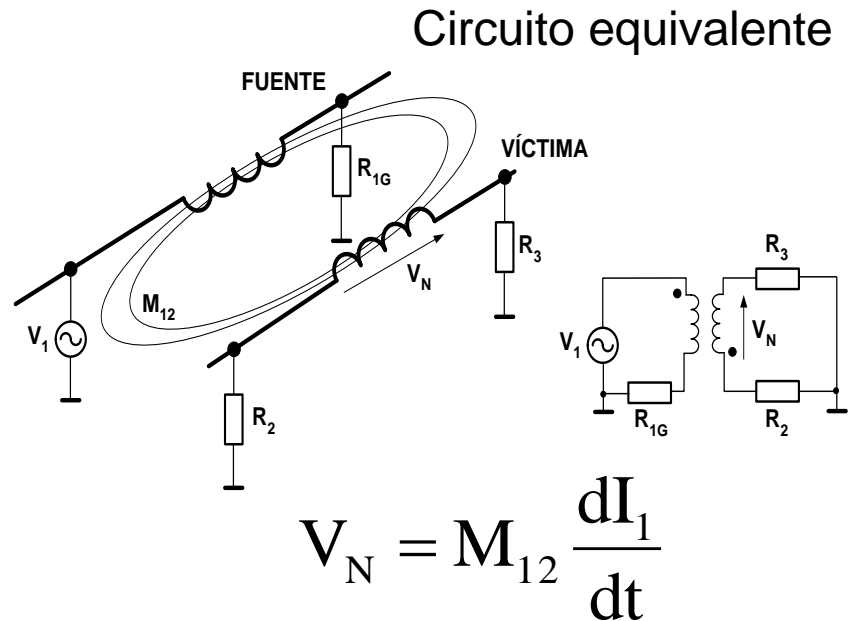
Al estar al mismo potencial el conductor y la guarda, no hay corrientes de fugas ni las capacidades se cargan y descargan

ACOPLAMIENTO INDUCTIVO

En el receptor se induce una tensión cuando hay una variación de flujo atravesando el área que define el circuito.



$$V_N = - \frac{d(\oint \vec{B} \cdot d\vec{S})}{dt}$$

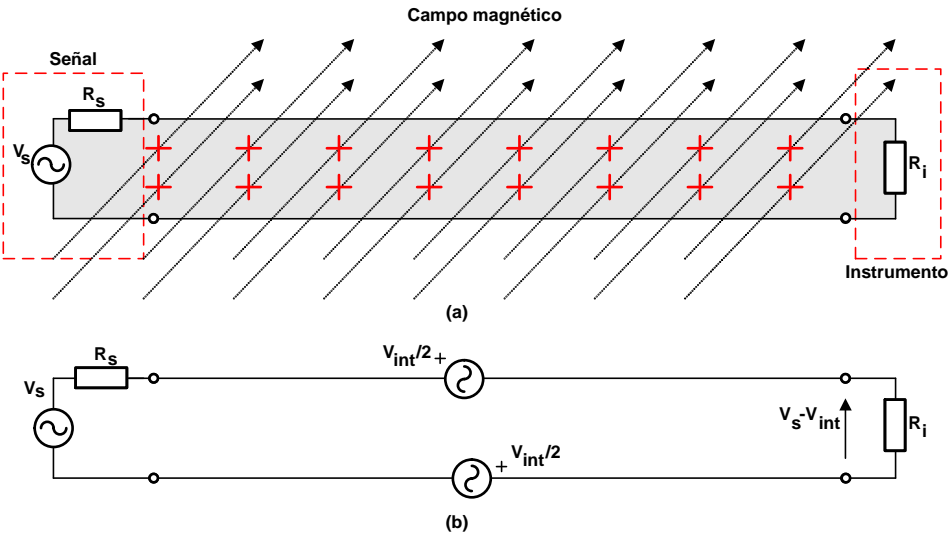


Reducción de interferencias:

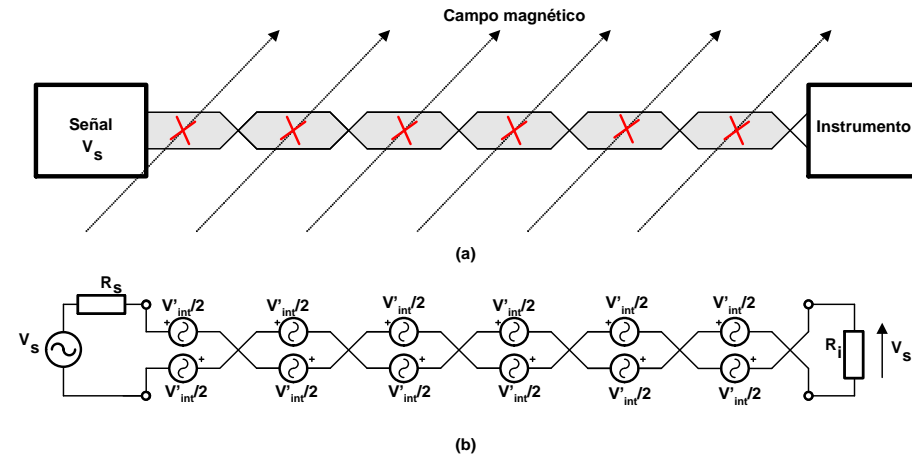
- Separar los circuitos (B disminuye con la distancia)
- Disminuir el área del receptor: cables trenzados o adecuado diseño de pistas
- Reorientar los circuitos para que $\cos\theta=0$
- Evitar vibraciones o movimientos para que las variaciones sean nulas si B y S ctes

Cables trenzados

Conductor paralelo sometido a un campo magnético



Conductor trenzado sometido a un campo magnético



RUIDO INTRÍNSECO

Ruido intrínseco: Fluctuaciones aleatorias de carga en un conductor

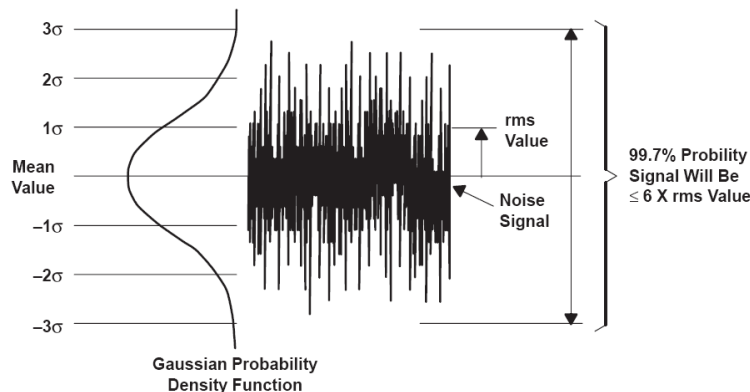
Debido a su naturaleza aleatoria, sus propiedades se definen estadísticamente

Root-mean-square value (valor rms) X_n de una magnitud $x_n(t)$ $X_n = \left(\frac{1}{T} \int_0^T x_n^2(t) dt \right)^{1/2}$

T: intervalo de tiempo de promediado

Mean square value: X_n^2 representa la potencia media disipada por $x_n(t)$ en una resistencia de 1Ω

Muchas formas de ruido tienen distribuciones Gaussianas o normales



El valor instantáneo de la amplitud de la señal de ruido puede tener cualquier valor pero la mayoría del tiempo su valor está en torno al valor medio $\pm 3\sigma$ (varianza)

Suma de varias fuentes de ruido

$$X_n^2 = \left(\frac{1}{T} \int_0^T [x_{n1}(t) + x_{n2}(t)]^2 dt \right) = X_{n1}^2 + X_{n2}^2 + \frac{2}{T} \int_0^T x_{n1}(t)x_{n2}(t)dt$$

Señales no correlacionadas

$$X_n = \sqrt{X_{n1}^2 + X_{n2}^2}$$

RUIDO INTRÍNSECO

Noise power density: $e_n^2(f) = \frac{dE_n^2}{df}$ $i_n^2(f) = \frac{dI_n^2}{df}$ E_n^2, I_n^2 : valores cuadráticos medios de la tensión o corriente de ruido

Spectral noise density: $e_n(f)$ (V/√Hz) $i_n(f)$ (A/√Hz)

$$E_n = \left(\int_{f_L}^{f_H} e_n^2(f) df \right)^{1/2} \quad I_n = \left(\int_{f_L}^{f_H} i_n^2(f) df \right)^{1/2}$$

E_n, I_n : valores rms de la tensión o corriente de ruido

Tipos de ruido según su espectro en frecuencia:

-Ruido blanco: densidad espectral uniforme

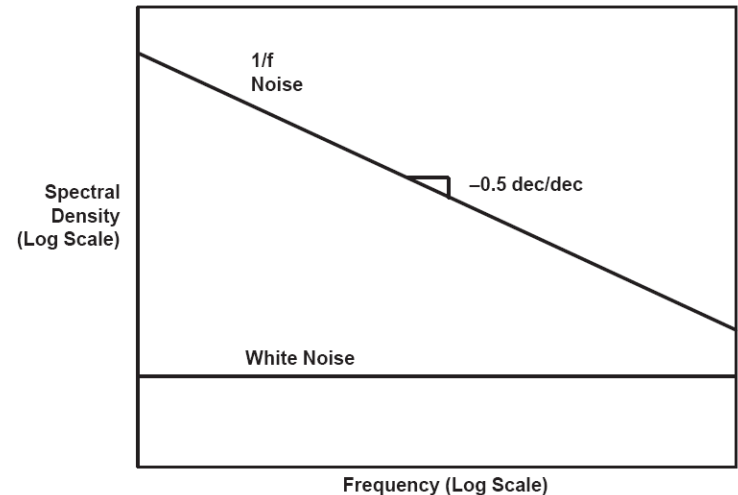
$$e_n(f) = e_{nw} \quad i_n(f) = i_{nw}$$

$$E_n = e_{nw} \sqrt{f_H - f_L} \quad I_n = i_{nw} \sqrt{f_H - f_L}$$

-Ruido 1/f: densidad de potencia

$$e_n^2(f) = \frac{K_v^2}{f} \quad i_n^2(f) = \frac{K_i^2}{f}$$

$$E_n = K_v \sqrt{\ln(f_H / f_L)} \quad I_n = K_i \sqrt{\ln(f_H / f_L)}$$



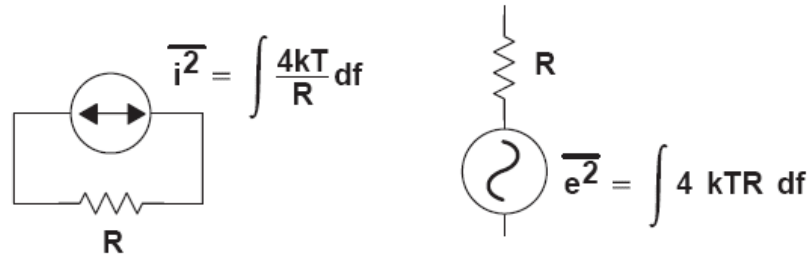
Tipos (o fuentes) de ruido

Ruido térmico o ruido Johnson: causado por la agitación térmica de los portadores de carga en un conductor o semiconductor.

Está presente en todos los elementos resistivos.

Es un ruido blanco (densidad espectral uniforme)

Se modela como una tensión de ruido en serie con una resistencia o como una corriente de ruido en paralelo con una resistencia.



$$e_R(f) = \sqrt{4k_B T R}$$

$$E^2(f) = \int (4k_B T R) df = (4k_B T R) B$$

$$i_R(f) = \sqrt{4k_B T / R}$$

$$I^2(f) = \int (4k_B T / R) df = (4k_B T / R) B$$

k_B : constante de Boltzmann (1.38×10^{-23} J/K)
 T: temperatura absoluta (K)
 R: resistencia en ohms
 B: ancho de banda (Hz)

Tipos (o fuentes) de ruido

Ruido shot: asociado con la corriente que fluye a través de una barrera de potencial. Es debido a la fluctuación de corriente en torno a un valor medio que resulta de la emisión aleatoria de electrones (o huecos).

Está presente en tubos de vacío y dispositivos como diodos o transistores.

Es un ruido blanco (densidad espectral uniforme)

Se modela como una corriente de ruido.

$$i_{sh}(f) = \sqrt{2qI_{dc}}$$

$$I^2(f) = \int 2qI_{dc}df = 2qI_{dc}B$$

q: carga del electrón (1.6×10^{-19} C)

I: corriente dc media (A)

B: ancho de banda (Hz)

Ruido de contacto, ruido Flicker o ruido 1/f: causado por la conductividad fluctuante debido al contacto imperfecto entre dos materiales o a la presencia de trampas que capturan y liberan portadores aleatoriamente.

Está presente en interruptores, dispositivos activos (transistores)

Es un ruido con densidad espectral 1/f

Se modela como una corriente de ruido.

$$i_F^2(f) = K \frac{I^a}{f}$$

$$I^2(f) = \int K \frac{I^a}{f} df = KI^a \ln(f_H / f_L)$$

K: constante que depende del material y geometría

I: corriente dc media (A)

a: constante entre $\frac{1}{2}$ y 2

f: frecuencia (Hz)

Tipos (o fuentes) de ruido

Ruido “popcorn” o ruido burst (descarga): debido a defectos en la fabricación. Puede ser eliminado o reducido optimizando el proceso de fabricación. Frecuentemente está causado por defectos (generalmente impurezas metálicas) en las uniones de los dispositivos.

Está presente en dispositivos (diodos) y circuitos integrados.

Es un ruido con característica $1/f^n$, con n generalmente 2

Se modela como una tensión de ruido.

Ruido de avalancha: debido a la aleatoriedad de los choques y picos de corriente por avalancha: los electrones, bajo la influencia de un campo eléctrico intenso adquieren suficiente energía potencial para crear pares e-h adicionales, que a su vez crean otros en un proceso de avalancha.

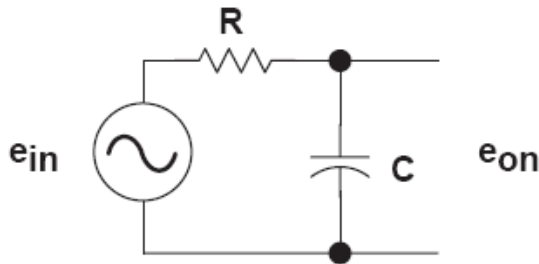
Está presente en diodos Zener (muy ruidosos).

Se modela como una corriente de ruido.

Ruido de salida y ENB

Equivalent Noise Bandwidth (ENB)

Filtro de primer orden

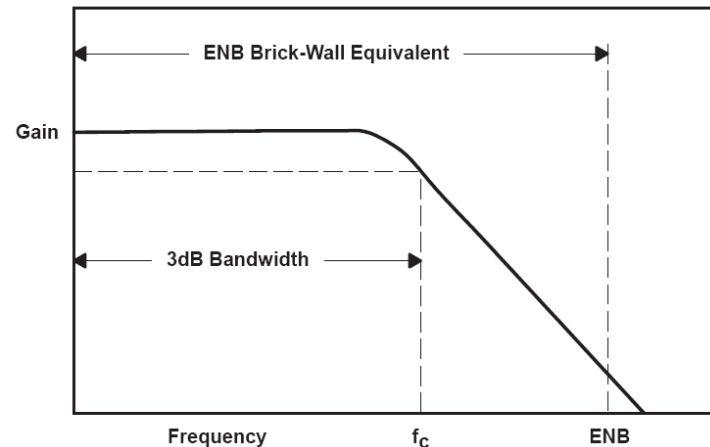


$$e_{on} = \sqrt{\int_0^{\infty} |A_{n(f)}|^2 e_{in}^2 df}$$

$$A_{n(f)} = \frac{1}{1 + j2\pi fRC} \Rightarrow |A_{n(f)}|^2 = \frac{1}{1 + (2\pi fRC)^2}$$

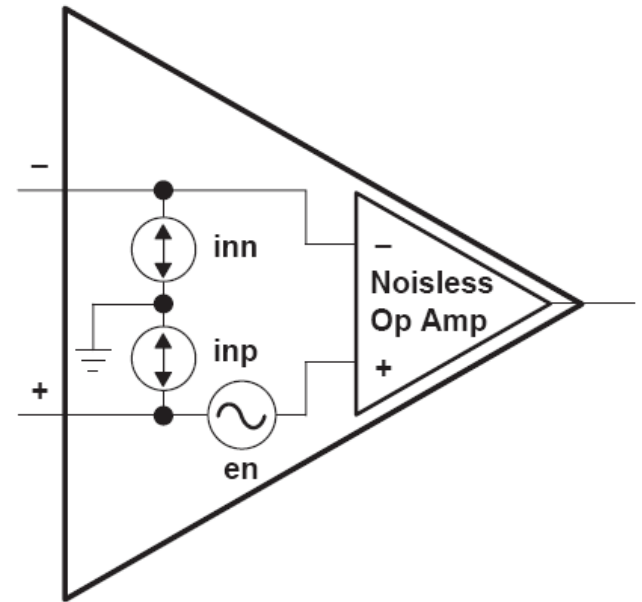
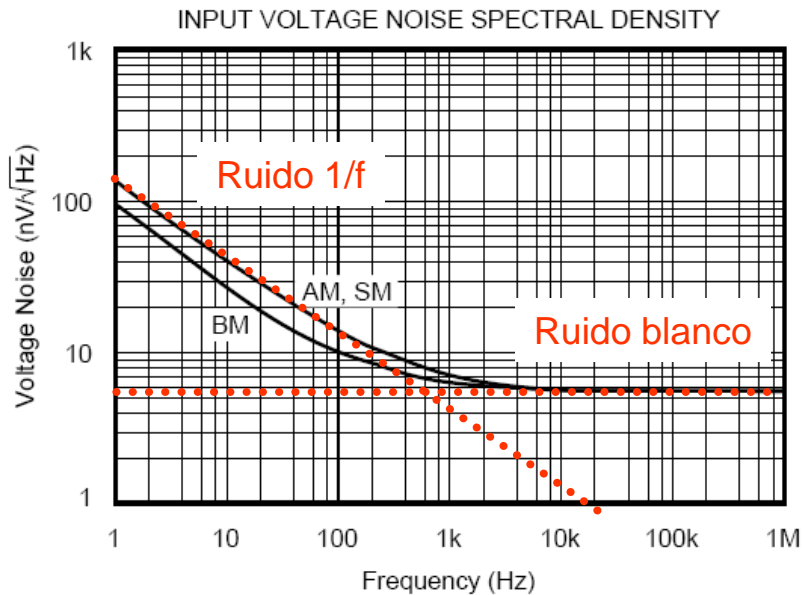
$$e_{on} = e_{in} \sqrt{\int_0^{\infty} \frac{1}{1 + (2\pi fRC)^2} df} = e_{in} \sqrt{\frac{1}{2\pi RC} \int_0^{\infty} \frac{1}{1 + (2\pi fRC)^2} df} = e_{in} \sqrt{\frac{1}{2\pi RC} \frac{\pi}{2}}$$

FILTER ORDER	ENB
1	1.57 x f_c
2	1.11 x f_c
3	1.05 x f_c
4	1.025 x f_c



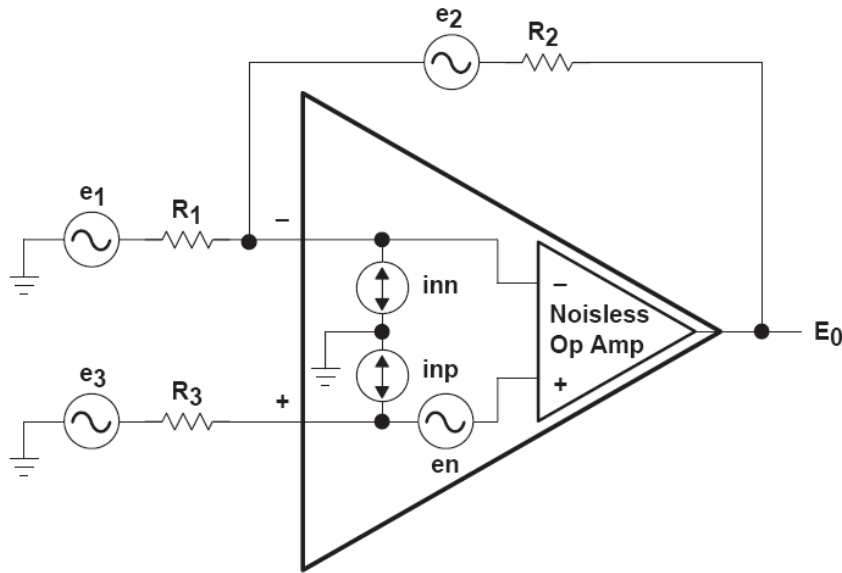
Ruido en dispositivos y C.I.

Generalmente se modela como una tensión y una corriente de ruido con componentes de ruido blanco y 1/f

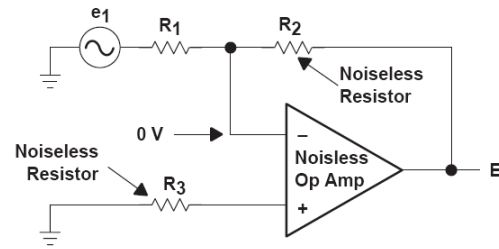


$$e_n^2 = e_{nw}^2 + \frac{K}{f}$$

Cálculo de ruido en un amplificador



Ruido para cada fuente:



$$\overline{E_1} = e_1 \frac{R_2}{R_1}$$

$$\overline{E_1}^2 = e_1^2 \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^2$$

$$\overline{e_1}^2 = \int 4kTR_1 df$$

$$\overline{E_2}^2 = \overline{e_2}^2$$

$$\overline{e_2}^2 = \int 4kTR_2 df$$

$$\overline{E_2}^2 = \overline{e_3}^2 \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right)^2$$

$$\overline{e_3}^2 = \int 4kTR_3 df$$

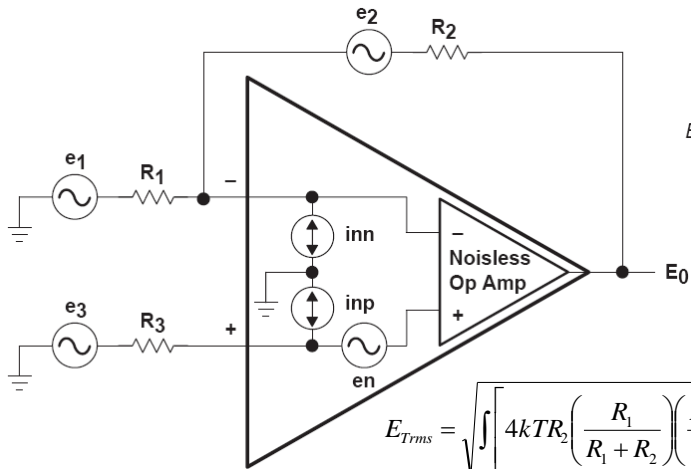
$$\overline{E_n}^2 = \int \left[(e_n) \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right) \right]^2 df$$

$$\overline{E_{np}}^2 = \int \left[(i_{np})(R_3) \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right) \right]^2 df$$

$$\overline{E_{nn}}^2 = \int [(i_{nn})(R_2)]^2 df$$

$$E_{Trms} = \sqrt{\int \left[4kTR_2 \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right)^2 + 4kTR_3 \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right)^2 + ((i_{np})R_2)^2 + \left((i_{np})R_3 \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right) \right)^2 + \left(e_n \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right) \right)^2 \right] df}$$

Cálculo de ruido en un amplificador

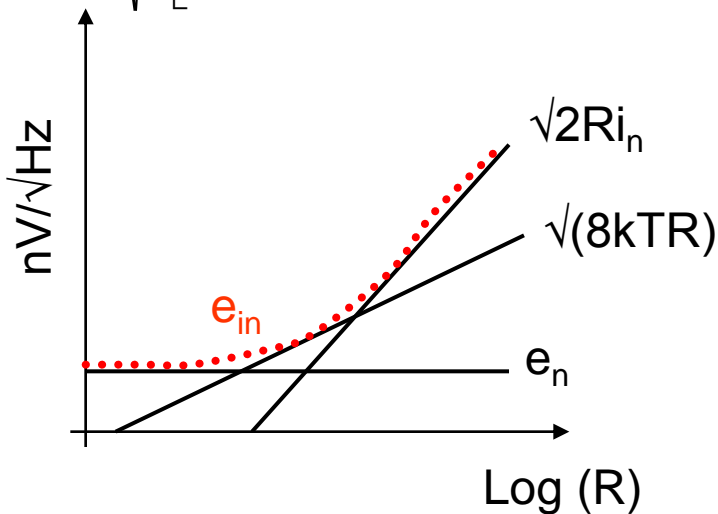


$$E_{Trms} = \sqrt{\int \left[4kTR_2 \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right) + 4kTR_3 \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right)^2 + (i_{np}R_2)^2 + (i_{np}R_3 \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right))^2 + \left(e_n \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right) \right)^2 \right] df}$$

Si se toma $R=R_3=R_1 \parallel R_2$ (minimiza el efecto de la bias and offset currents)

$$E_{Trms} = \sqrt{\int \left[4kTR_2 \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right)^2 + 4kT \left(\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right) \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right)^2 + i_{nn}^2 R_2^2 \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right)^2 \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right)^2 + i_{np}^2 \left(\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right)^2 \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right)^2 + e_n^2 \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right)^2 \right] df}$$

$$E_{Trms} = \sqrt{\int \left[(4kTR + 4kTR + i_{nn}^2 R^2 + i_{np}^2 R^2 + e_n^2) \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right)^2 \right] df} \longrightarrow E_{Trms} = \sqrt{\int e_{in}^2 |A_{no}|^2 df}$$



$R \rightarrow 0$: $e_{in} \rightarrow e_n$ (e_n short-circuit noise)

$R \rightarrow \infty$: $e_{in} \rightarrow \sqrt{2Ri_n}$ (i_n open-circuit noise)

Para valores intermedios de R puede dominar el ruido térmico

Menor ruido si $R_3=0$ (pero menor compensación de las corrientes bias y offset)

Señales y ruido

Figura de mérito para determinar la calidad de una señal en presencia de ruido

Signal-to-noise-ratio (SNR):

$$SNR = 10 \log \frac{X_s^2}{X_n^2} = 20 \log \frac{X_s}{X_n}$$

X_s : valor rms de la señal
 X_n : valor rms del ruido

Figura de mérito para determinar la calidad (frente al ruido) de un circuito

Noise factor

Input Signal-to-Noise power Ratio/output signal-to-noise power ratio

$$F = \frac{S_i / N_i}{S_o / N_o}$$

$$F = \frac{V_{on}^2}{(AV_{in})^2}$$

V_{on} : total output noise voltage
 V_{in} : input noise voltage
A: voltage gain