

Modelo y métodos de análisis del ruido intrínseco de los componentes

Julián Oreggioni y Fernando Silveira.

Instituto de Ingeniería Eléctrica.

Versión 1.2

Octubre 2014

Agenda

- ◆ Objetivos
- ◆ Definiciones básicas
 - ◆ Ruido RMS, PSD, Voltaje de ruido
- ◆ Fuentes de ruido
 - ◆ Térmico (Blanco): Resistencias
 - ◆ Flicker (1/f)
 - ◆ Shot
- ◆ Operaciones
 - ◆ Adición
 - ◆ Filtrado, ancho de banda equivalente de ruido, ruido kT/C

Agenda

- ◆ Ruido de amplificadores operacionales
 - ◆ Modelado, ruido equivalente a la entrada
- ◆ Índices de ruido
 - ◆ SNR, F, NF
- ◆ Ruido en circuitos
- ◆ Límites teóricos al consumo de potencia

Bibliografía

- ◆ Low Noise Electronic System Design.
 - ◆ C. D. Motchenbacher, J. A. Connelly.
 - ◆ Wiley, 1993.
- ◆ Noise Reduction Techniques in Electronic Systems.
 - ◆ Henry W. Ott.
 - ◆ Wiley, 1988.
- ◆ Analysis and Design of Analog Integrated Circuits.
 - ◆ P. Gray, R. Meyer.
 - ◆ Wiley, 1993.

Objetivos

- ◆ Análisis del efecto en circuitos del ruido intrínseco de los componentes
- ◆ Ruido = señal con amplitud aleatoria respecto al tiempo
- ◆ Ruido intrínseco: se origina en que la carga no es continua, asociado con la fluctuación de portadores discretos de carga (electrones, huecos).
- ◆ Ruido \Leftrightarrow EMI (ElectroMagnetical Interference)

Objetivos

- ◆ Análisis del efecto en circuitos del ruido intrínseco de los componentes **nos da un límite para:**
 - ◆ las señales que podemos procesar
 - ◆ la potencia mínima que es necesario consumir
 - ◆ Dado S/N y $N \Rightarrow S$ queda dado $\Rightarrow P$ está dado
- ◆ Aplicaciones
 - ◆ Señales provenientes de sensores (mV o uV)
 - ◆ Señales biomédicas o biológicas
 - ◆ Señales provenientes de antenas (mucho ancho de banda)

Definiciones básicas

- ◆ Ruido RMS:

$$v_n^{rms} = \sqrt{v_n^2} = \left[\frac{1}{T} \int_0^T v_n(t)^2 dt \right]^{1/2}$$

- ◆ Densidad Espectral de Potencia (PSD)

$$S_n(f) = |\mathfrak{F}\{R_n(\tau)\}|$$

- ◆ Voltaje de ruido es la raíz cuadrada de la PSD (tensión)

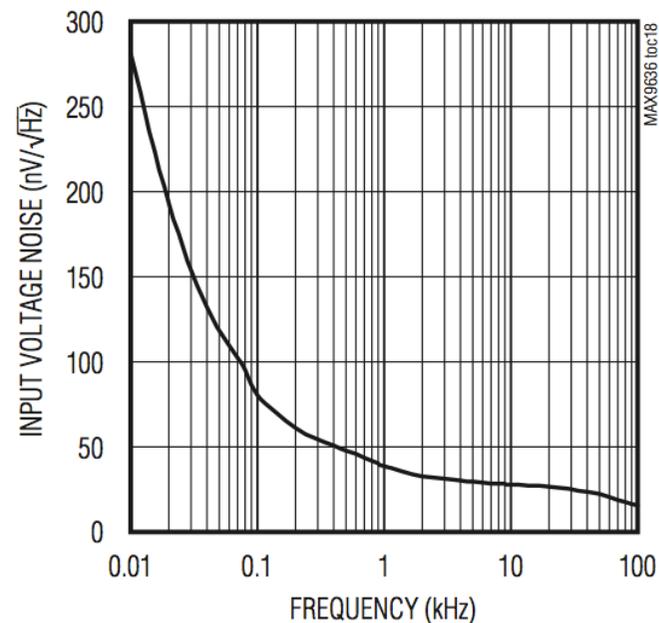
$$V_n(f) = \sqrt{S_n(f)}$$

- ◆ Corriente de ruido es la raíz cuadrada de la PSD (corriente)

$$I_n(f) = \sqrt{S_n(f)}$$

Definiciones básicas

- ◆ Unidades de la PSD: V^2/Hz ó A^2/Hz
- ◆ Unidades Voltaje de ruido: $V/\sqrt{\text{Hz}}$
- ◆ Unidades Corriente de ruido: $A/\sqrt{\text{Hz}}$



Fuente: Hoja de datos MAX9636/9637/963 de MAXIM

Definiciones básicas

◆ Teorema:

$$\left(v_n^{rms}\right)^2 = \overline{v_n^2} = \int_0^{\infty} S_n(f) \cdot df = \int_0^{\infty} [V_n(f)]^2 \cdot df$$

Fuentes de ruido

- ◆ Ruido térmico o blanco.
- ◆ Ruido $1/f$ o Flicker o rosado.
- ◆ Ruido Shot.

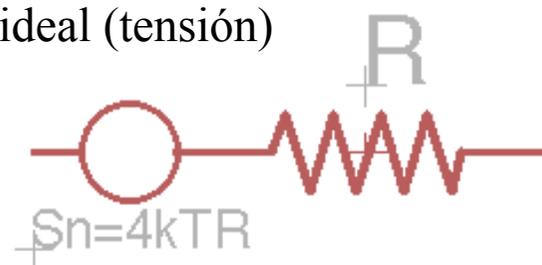
Ruido Blanco

- ◆ También llamado Térmico
 - ◆ Johnson, Nyquist, Bell Labs, 1928.
 - ◆ Debido a movimiento térmico aleatorio de portadores en un conductor.
 - ◆ Existe en todo medio con portadores libres
- ◆ Modelo para una resistencia:
 - ◆ $k = \text{cte. de Boltzmann} = 1.38 \times 10^{-23} \text{ W.s/K}$

R: Ruidosa



R: ideal (tensión)



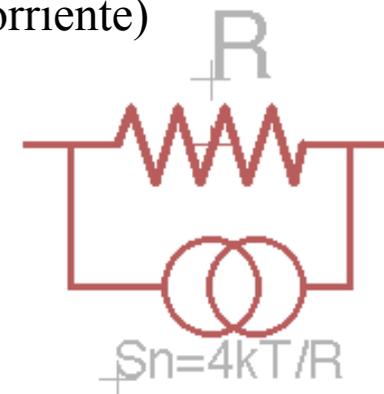
Ruido Blanco

- ◆ También llamado Térmico
 - ◆ Johnson, Nyquist, Bell Labs, 1928.
 - ◆ Debido a movimiento térmico aleatorio de portadores en un conductor.
 - ◆ Existe en todo medio con portadores libres
- ◆ Modelo para una resistencia:
 - ◆ $k = \text{cte. de Boltzmann} = 1.38 \times 10^{-23} \text{ W.s/K}$

R: Ruidosa

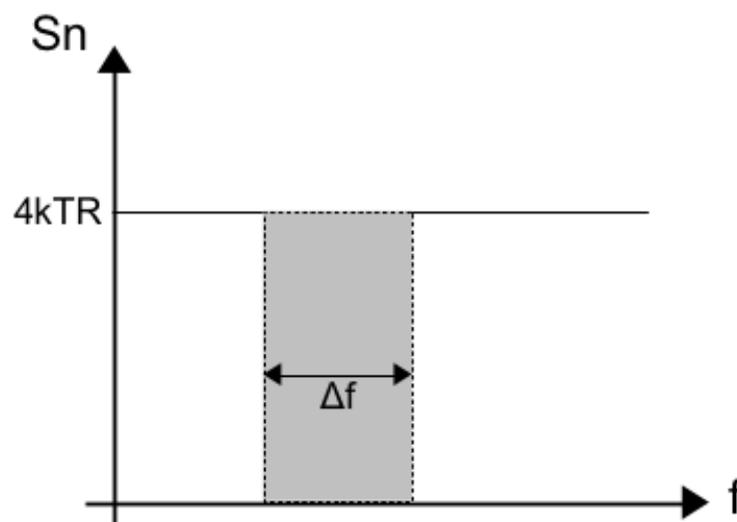


R: ideal (corriente)



Ruido Blanco

- ◆ Consistente frente a la asociación serie y paralelo
- ◆ PSD resistencia en tensión: $S_{vn}=4kTR$



$$v_n^{rms} = \sqrt{\int_0^{\infty} S_{vn}(f) \cdot df} = \sqrt{\int_{\Delta f} 4 \cdot k \cdot T \cdot R \cdot df} \Rightarrow v_n^{rms} = \sqrt{4 \cdot k \cdot T \cdot R \cdot \Delta f}$$

Ruido Blanco

◆ $4kT_{@290K} = 16 \cdot 10^{-21} \text{ W}\cdot\text{s}$

$$v_n^{rms} = \sqrt{4 \cdot k \cdot T \cdot R \cdot \Delta f}$$

R (Ω)	Δf (Hz)	v_n^{rms} (Vrms)
1k	100	40n
100k	1k	1.3 μ
1M	100k	40 μ

- ◆ Amplitudes del orden los microvoltios
- ◆ Comparable a señales de biológicas, antenas, etc.

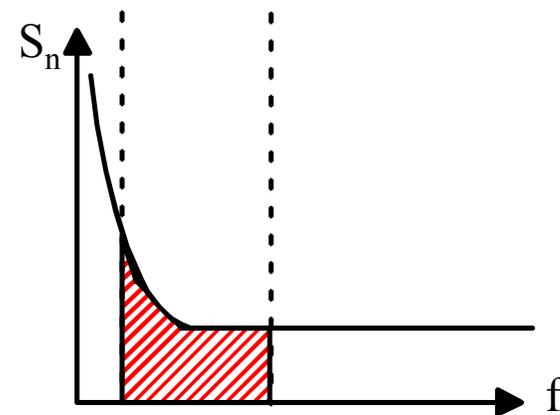
Ruido de Flicker

- ◆ También llamado ruido 1/f o rosado
 - ◆ Debido a aspectos tecnológicos/constructivos de los dispositivos.
 - ◆ En el transistor MOS, debido a imperfecciones en la interfaz óxido / semiconductor

- ◆ PSD:

$$S_n = \frac{K}{f^\alpha}$$

$$\alpha = [0.8 - 1.3] , \quad \alpha \approx 1$$



- ◆ Toma un papel importante en sensores y aplicaciones biomédicas, pero también hay casos de RF donde importa (porque se modula a alta frecuencia, por ej. ruido de fase en osciladores).

Ruido de Flicker

$$v_n^{rms} = \sqrt{\int_0^{\infty} S_n(f) df} = \sqrt{\int_{f_1}^{f_2} \frac{K}{f} df} = \sqrt{K \cdot \ln \frac{f_2}{f_1}}$$

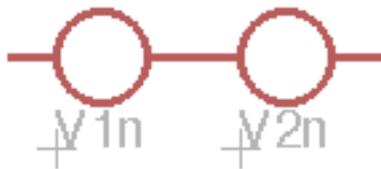
- ◆ Si $f_1=0$ (Continua) \Rightarrow DIVERGE!?
 - ◆ t infinito es una abstracción matemática
 - ◆ El limite inferior vendrá dado por el tiempo que está prendido el equipo o ajustes periódicos (1 vez por año? 10 veces por año?).
 - ◆ Si $f_1=1$ ciclo por día ó $f_1=1$ ciclo por 10 años, con $f_2=1$ kHz, la diferencia es solo un 20%.

Ruido Shot

- ◆ Ruido Shot
 - ◆ Asociado a portadores que cruzan una barrera de potencial (ejemplo: en la juntura pn)
- ◆ PSD: $S_n = 2qI_{DC}$
 - ◆ q carga del electrón, $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$

Operaciones: adición

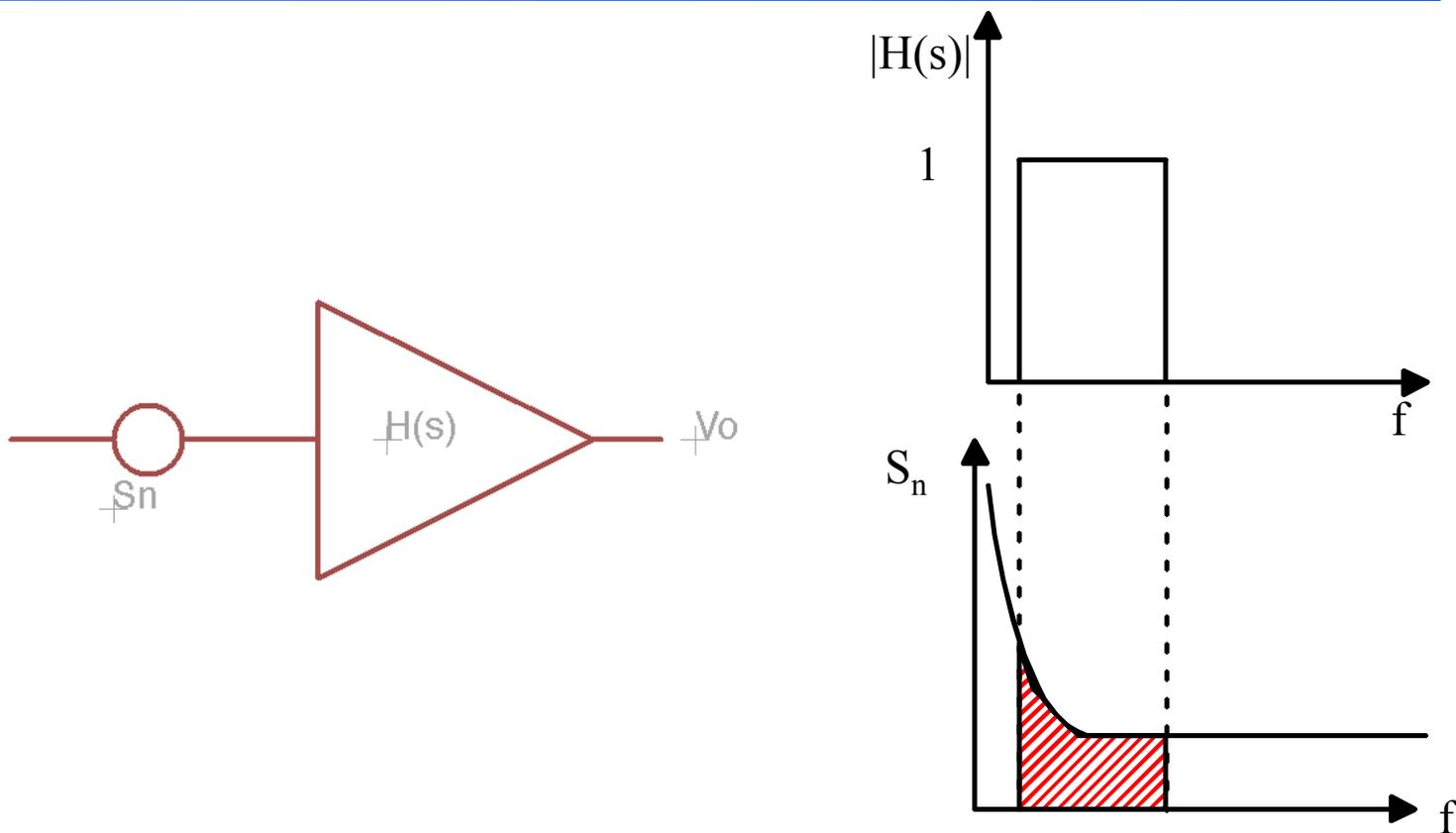
- ◆ Adición de señales de ruido
 - ◆ Señales NO correlacionadas
 - ◆ Se suman potencias, NO se suman tensiones



$$\overline{v_{total}^2} = \overline{v_{1n}^2} + \overline{v_{2n}^2} \Rightarrow v_{total}^{rms} = \sqrt{\overline{v_{1n}^2} + \overline{v_{2n}^2}}$$

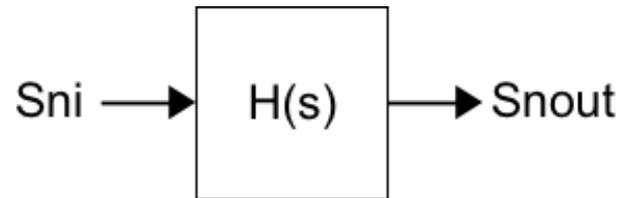


Operaciones: filtrado



- ◆ Para minimizar ruido \Rightarrow Minimizar ancho de banda

Operaciones: filtrado



- ◆ Filtrado de señales de ruido: $S_{nout}(f) = S_{ni}(f)|H(f)|^2$

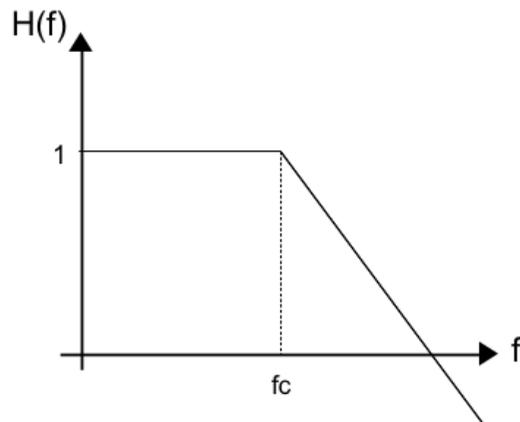
$$\overline{v_{nout}^2} = \int_0^{\infty} S_{nout}(f) \cdot df = \int_0^{\infty} S_{ni}(f) |H(f)|^2 df$$

- ◆ Para ruido blanco, donde $S_{ni} = S_1 = \text{cte}$, queda:

$$\left(v_n^{rms}\right)^2 = S_1 \int_0^{\infty} |H(f)|^2 df$$

Operaciones: filtrado

- ◆ Ejemplo: $S_{ni} = S_1 = \text{cte}$ y filtro pasabajos de 1er. orden

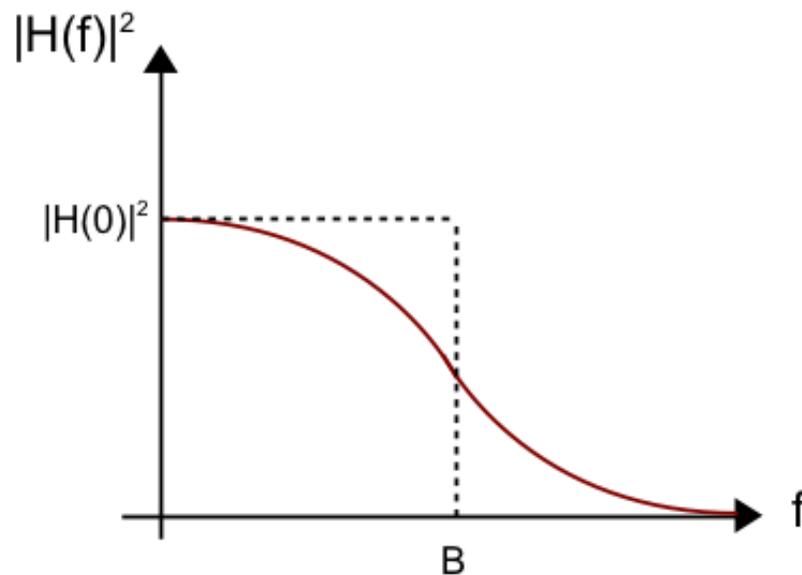


$$H(f) = \frac{1}{1 + jf / f_c}$$

$$\left(v_n^{rms}\right)^2 = S_1 \cdot \int_0^{\infty} \left| \frac{1}{1 + jf / f_c} \right|^2 df = S_1 \cdot \int_0^{\infty} \frac{1}{1 + (f / f_c)^2} df = S_1 \cdot \frac{\pi}{2} \cdot f_c$$

Operaciones: filtrado

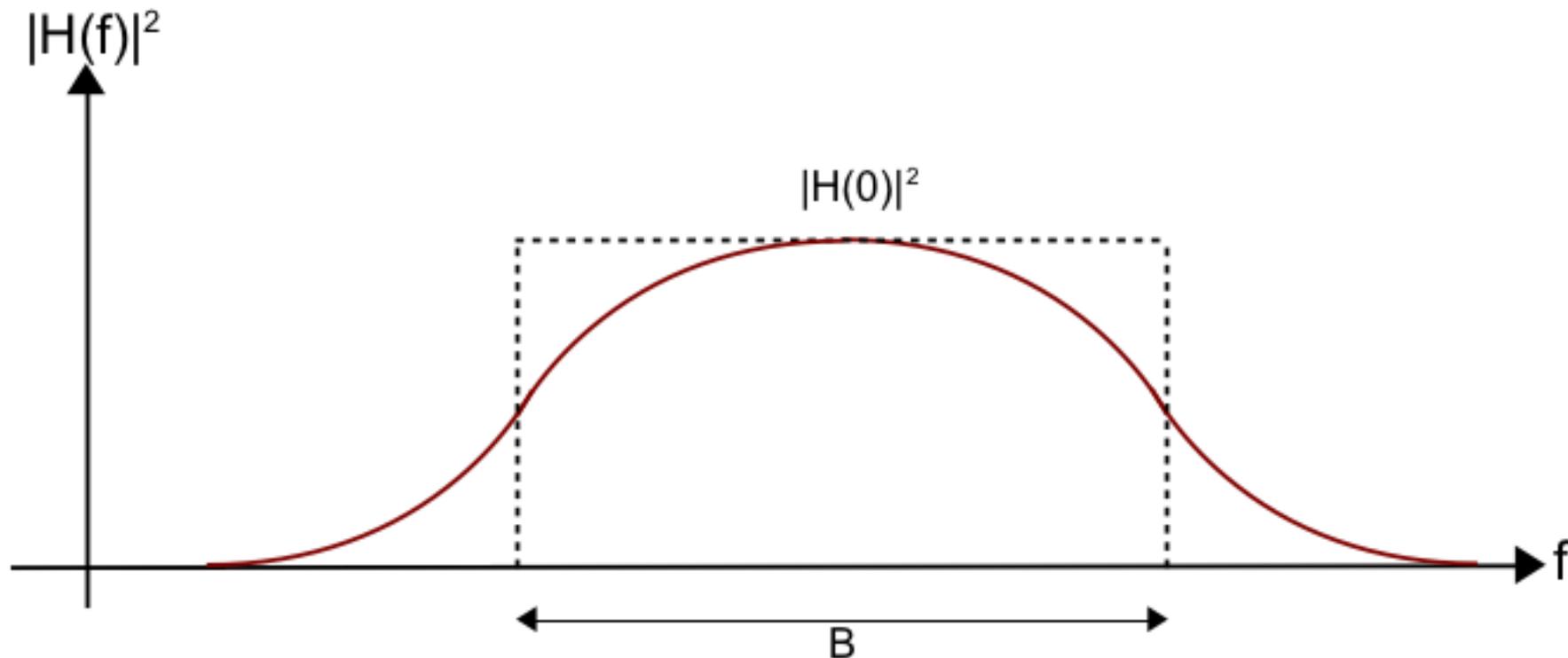
- ◆ $B =$ Ancho de banda equivalente de ruido:
 - ◆ El ancho de banda equivalente de ruido de $H(s)$ es: el ancho de banda de un filtro ideal que da la misma potencia de ruido a salida que $H(s)$.



$$B \cdot |H(0)|^2 = \int_0^{\infty} |H(f)|^2 df$$

Operaciones: filtrado

- ◆ Ancho de banda equivalente de ruido (cont.):
 - ◆ En la práctica trabajo con B como el ancho de banda y no calculo la integral

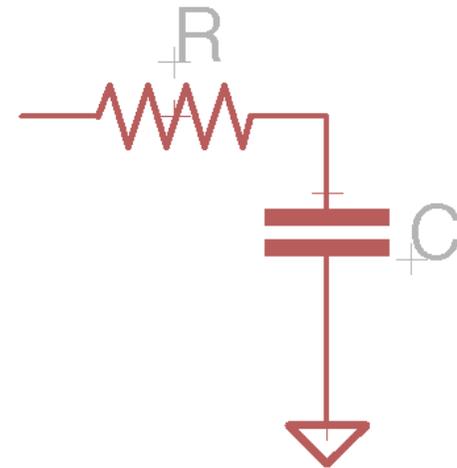


Operaciones: filtrado

- ◆ Ejemplo: Análisis circuito RC

$$H(f) = \frac{1}{1 + j \cdot f / f_c}$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$



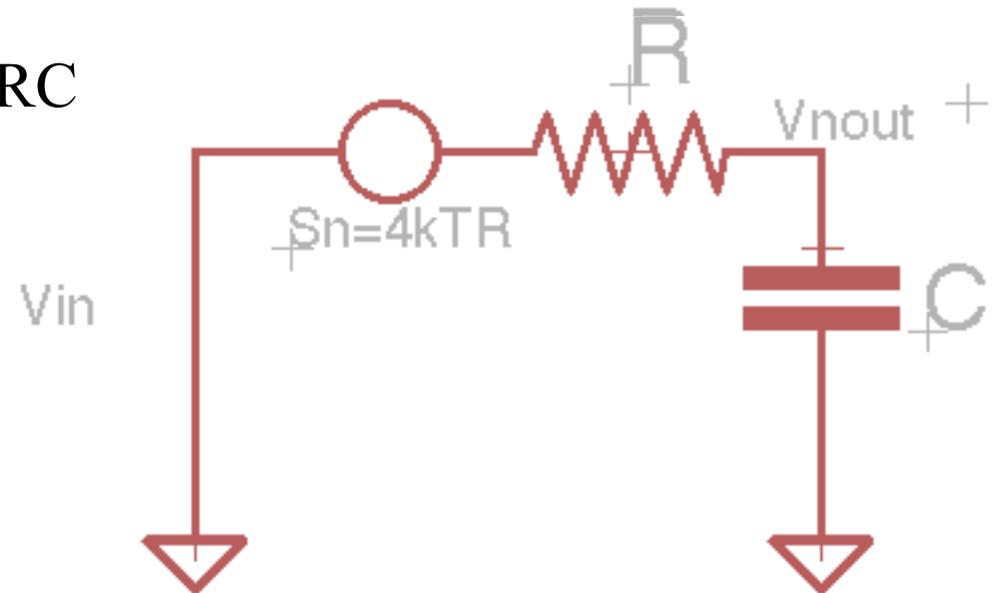
- ◆ Ancho de banda equivalente de ruido:

$$B \cdot |H(0)|^2 = \int_0^{\infty} |H(f)|^2 df \Rightarrow B = \int_0^{\infty} \frac{1}{1 + (f / f_c)^2} df \Rightarrow B = \frac{\pi}{2} \cdot f_c$$

Operaciones: filtrado

- ◆ Ejemplo: Análisis circuito RC

$$B = \frac{\pi}{2} \cdot f_c = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{4RC}$$

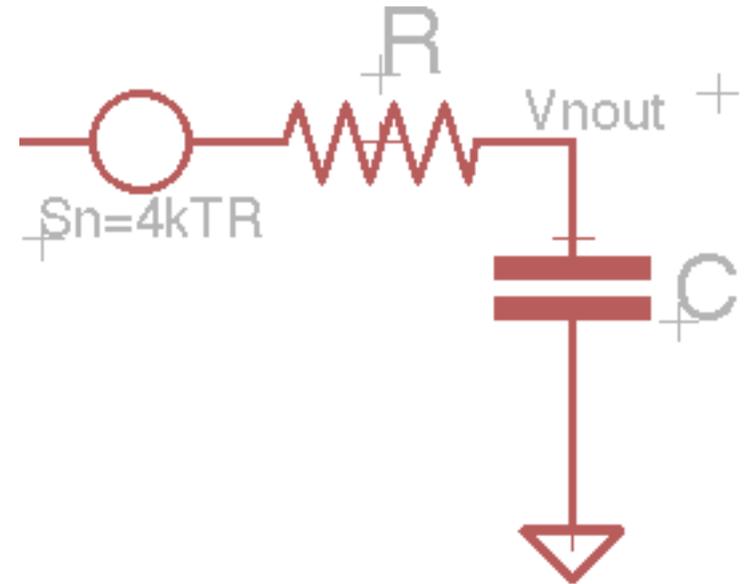


$$v_{nout}^{rms} = \sqrt{\int_0^{\infty} S_{nout}(f) \cdot df} = \sqrt{\int_0^{\infty} |H(f)|^2 S_n \cdot df} = \sqrt{4kTR \int_0^{\infty} |H(f)|^2 \cdot df} = \sqrt{4kTR \cdot B}$$

$$v_{nout}^{rms} = \sqrt{4kTR \cdot \frac{1}{4RC}} \Rightarrow v_{nout}^{rms} = \sqrt{kT/C}$$

Ruido kT/C

- ◆ ¡ V_{nout} independiente de R !
- ◆ Pues si $R \uparrow \Rightarrow$
 $S_n \uparrow$ pero el ancho de banda \downarrow
- ◆ Fija valor mínimo de C en sistemas muestreados para cierta precisión



Ruido kT/C

C	sqrt(kT/C)
0.1 pF	202μVrms
1 pF	64μVrms
10 pF	20μVrms
100 pF	6.4μVrms

$$\frac{1}{2} LSB = \frac{1}{2} \frac{3}{2^{Nro\ Bits} - 1}$$

Nro de Bits	0.5LSB de ADC @3V
8	5.9mV
10	1.5mV
12	366μV
14	92μV
16	23μV

- ◆ Si quiero precisión (14 bits o más) debo aumentar el capacitor (aumentando el consumo)

Recapitulando...

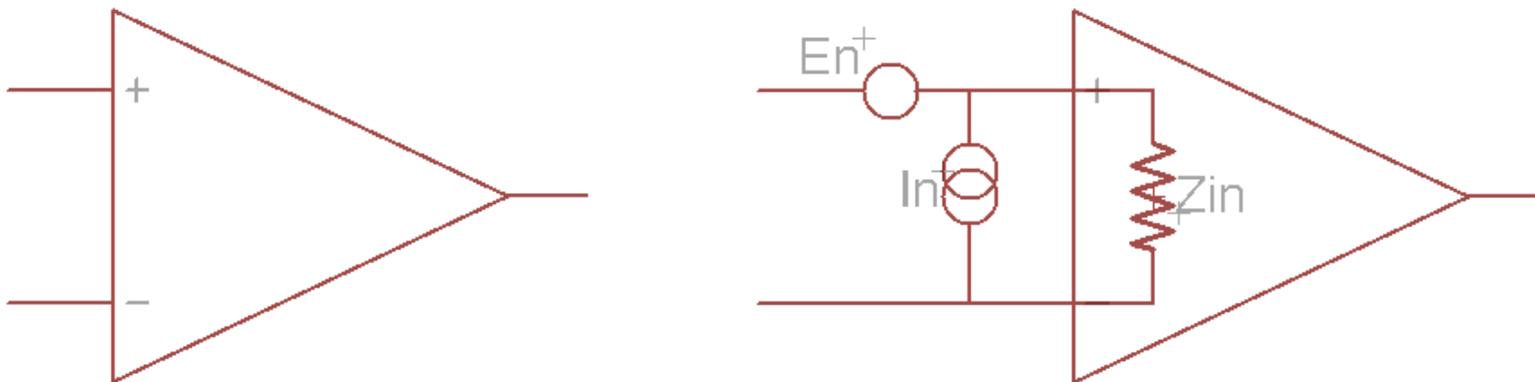
- ◆ Objetivos
- ◆ Definiciones básicas
 - ◆ Ruido RMS, **PSD, Voltaje de ruido**
- ◆ Fuentes de ruido
 - ◆ Térmico (Blanco): **Resistencias**
 - ◆ Flicker (1/f)
 - ◆ Shot
- ◆ Operaciones
 - ◆ Adición: **se suman potencias**
 - ◆ Filtrado, ancho de banda equivalente de ruido, ruido kT/C
 - ◆ **Minimizar el ancho de banda**

Próxima clase

- ◆ Ruido de amplificadores operacionales
 - ◆ Modelado, ruido equivalente a la entrada
- ◆ Índices de ruido
 - ◆ SNR, F, NF
- ◆ Ruido en circuitos
- ◆ Límites teóricos al consumo de potencia

Ruido de Amplificadores Operacionales

- ◆ Modelo:



- ◆ E_n , I_n son datos del fabricante.
- ◆ Modelan todo el ruido que genera el amplificador.
- ◆ Se refieren a la entrada.

Ruido de Amplificadores Operacionales

3V/5V Low-Power, Low-Noise, CMOS, Rail-to-Rail I/O Op Amps

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (continued)

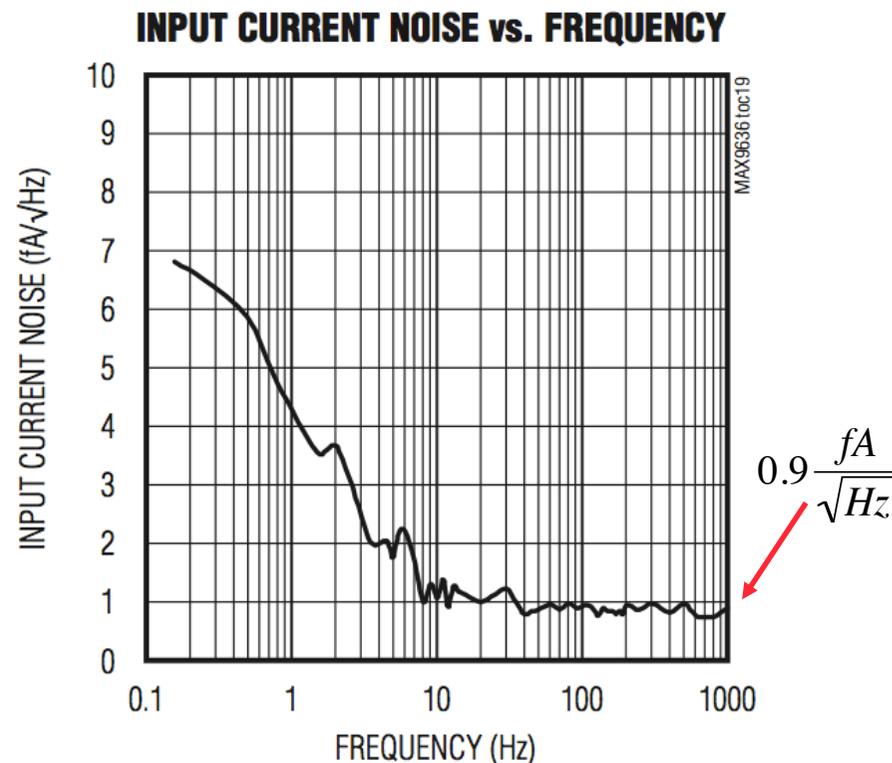
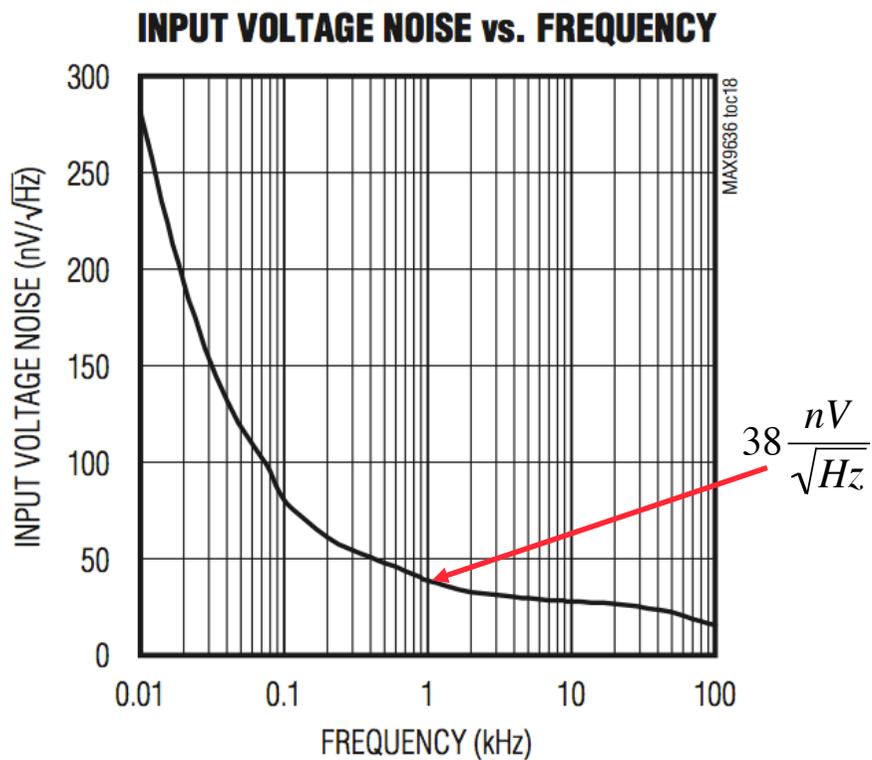
($V_{DD} = 3.3V$, $V_{SS} = 0V$, $V_{IN+} = V_{IN-} = V_{CM} = V_{DD}/2$, $R_L = 10k\Omega$ to $V_{DD}/2$, $\overline{SHDN} = V_{DD}$, $T_A = -40^\circ C$ to $+125^\circ C$. Typical values are at $T_A = +25^\circ C$, unless otherwise noted.) (Note 2)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
AC CHARACTERISTICS						
Input Voltage Noise Density	e_N	$f = 1kHz$		38		nV/\sqrt{Hz}
Input Voltage Noise		$0.1Hz \leq f \leq 10Hz$		5		μV_{P-P}
Input Current Noise Density	I_N	$f = 1kHz$		0.9		fA/\sqrt{Hz}
Input Capacitance	C_{IN}			2		pF
Gain Bandwidth	GBW			1.5		MHz
Slew Rate	SR			0.9		$V/\mu s$
Capacitive Loading	CLOAD	No sustained oscillations		300		pF
Distortion	THD	$f = 10kHz$, $V_O = 2V_{P-P}$, $A_V = 1V/V$		-68		dB
		$f = 10kHz$, $V_O = 2V_{P-P}$, $A_V = 1V/V$, $V_{DD} = 5.5V$		-74		
Settling Time		To 0.1%, $V_{OUT} = 2V$ step, $A_V = 1V/V$		11.5		μs
Crosstalk		$f = 1kHz$ (MAX9637, MAX9638)		100		dB
		$f = 10kHz$ (MAX9637, MAX9638)		80		
POWER-SUPPLY CHARACTERISTICS						
Power-Supply Range	V_{DD}	Guaranteed by PSRR	2.1		5.5	V
Power-Supply Rejection Ratio	PSRR	$V_{IN+} = V_{IN-} = V_{SS}$, $V_{DD} - V_{SS} = 2.1V$ to $5.5V$	$T_A = +25^\circ C$	72	100	dB
			$T_A = -40^\circ C$ to $+125^\circ C$	69		
Quiescent Current	I_{DD}	Per amplifier	$T_A = +25^\circ C$	36	55	μA
			$T_A = -40^\circ C$ to $+125^\circ C$		60	

MAX9636/MAX9637/MAX9638

- ◆ Fuente: Hoja de datos MAX9636/9637/963 de MAXIM

Ruido de Amplificadores Operacionales



- ◆ Fuente: Hoja de datos MAX9636/9637/963 de MAXIM

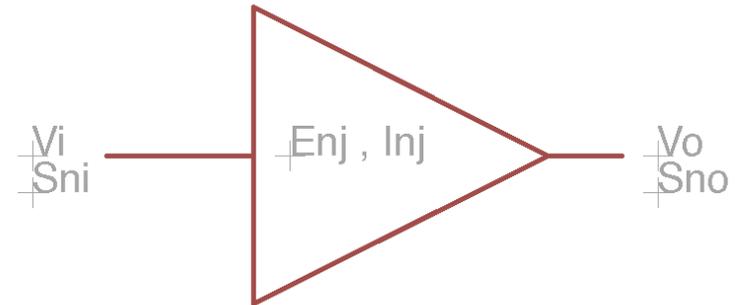
Ruido de Amplificadores Operacionales

- ◆ En general vamos a referir el ruido a la entrada:
 - ◆ Para compararlo con el nivel de la señal de interés (la entrada o una etapa anterior).
 - ◆ También puede interesar referirlo a la salida para compararlo con etapas posteriores.

Ruido de Amplificadores Operacionales

- ◆ Ruido equivalente a la entrada: S_{ni}

- ◆ Es la fuente de ruido que colocada a la entrada del amplificador, da el mismo ruido a la salida.



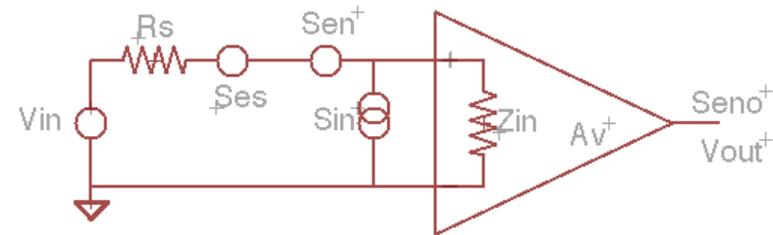
- ◆ m fuentes de ruido, $j = 1:m$, genéricamente se llaman S_{nj} o V_{nj}

$$\frac{v_o}{V_{nj}} = H_j \quad \frac{v_o}{v_i} = H_0$$

$$\left. \begin{aligned} S_{no} &= |H_0|^2 S_{ni} \\ S_{no} &= \sum_{j=1}^m |H_j|^2 S_{nj} \end{aligned} \right\} \Rightarrow S_{ni} = \frac{\sum_{j=1}^m |H_j|^2 S_{nj}}{|H_0|^2}$$

Ruido de Amplificadores Operacionales

◆ Ejemplo:



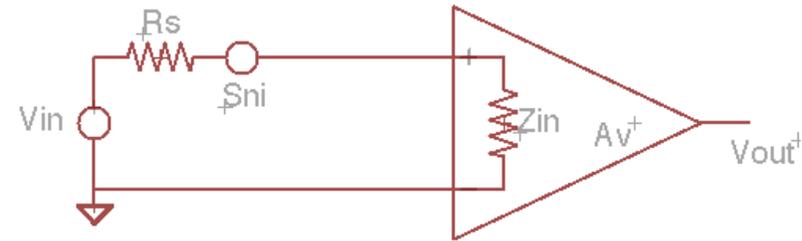
$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = H_0 \Rightarrow |H_0|^2 = \left| \frac{Z_{in}}{R_s + Z_{in}} A_v \right|^2$$

$$S_{ni} = \frac{S_{eno}}{|H_0|^2} = \frac{\sum_{j=1}^m |H_j|^2 S_{nj}}{|H_0|^2} = \frac{|H_0|^2 S_{es} + |H_0|^2 S_{en} + |Z_{in} // R_s|^2 |A_v|^2 S_{in}}{|H_0|^2} =$$

$$= S_{es} + S_{en} + \frac{|Z_{in} // R_s|^2 |A_v|^2 S_{in}}{\left| \frac{Z_{in}}{R_s + Z_{in}} A_v \right|^2} \Rightarrow S_{ni} = S_{es} + S_{en} + R_s^2 S_{in}$$

Ruido de Amplificadores Operacionales

- ◆ Ejemplo (cont.):
 - ◆ Ahora trabajamos con S_{ni} :



$$S_{ni} = S_{es} + S_{en} + R_s^2 S_{in}$$

- ◆ Integrando en un Δf obtenemos el valor RMS:

$$v_{ni}^{rms} = \sqrt{\int_{\Delta f} (S_{es} + S_{en} + R_s^2 S_{in}) df} = \sqrt{\int_{\Delta f} S_{es} df + \int_{\Delta f} S_{en} df + R_s^2 \int_{\Delta f} S_{in} df} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow v_{ni}^{rms} = \sqrt{(E_s^{rms})^2 + (E_n^{rms})^2 + R_s^2 (I_n^{rms})^2}$$

Índices de ruido

- ◆ SNR: Relación señal a ruido
 - ◆ $SNR = S / N = \text{Potencia de la señal} / \text{Potencia del ruido}$
- ◆ Noise Factor:

$$F = \frac{SNR_{in}}{SNR_{out}} = \frac{S_{in}/N_{in}}{S_{out}/N_{out}} = \frac{N_{out}}{S_{out} / \cancel{S_{in}} \cdot N_{in}} = \frac{N_{out}}{|H(s)|^2 \cdot N_{in}}$$

- ◆ Potencia de ruido en la salida / Potencia del ruido a la salida debido al ruido en la entrada.

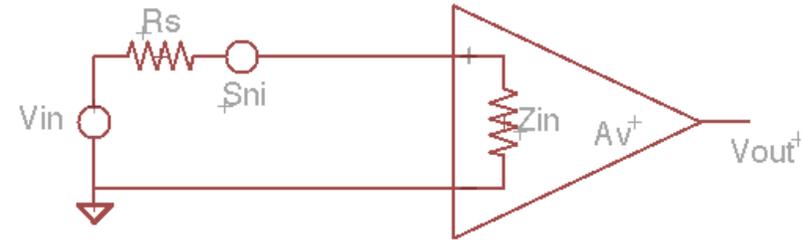
$$F = \frac{N_{out}}{|H(s)|^2} \cdot \frac{1}{N_{in}} = \frac{S_{ni}}{N_{in}}$$

- ◆ Potencia del ruido equivalente a la entrada / potencia del ruido a la entrada

Índices de ruido

- ◆ Volviendo al ejemplo anterior:

$$S_{ni} = S_{es} + S_{en} + R_s^2 S_{in}$$



- ◆ Potencia del ruido a la entrada (V_{in}, R_s): $N_{in} = S_{es}$

$$F = \frac{S_{ni}}{N_{in}} = \frac{S_{es} + S_{en} + R_s^2 S_{in}}{S_{es}} \Rightarrow F = 1 + \frac{S_{en} + R_s^2 S_{in}}{S_{es}}$$

- ◆ Noise Figure: $NF = 10 \cdot \log_{10}(F)$

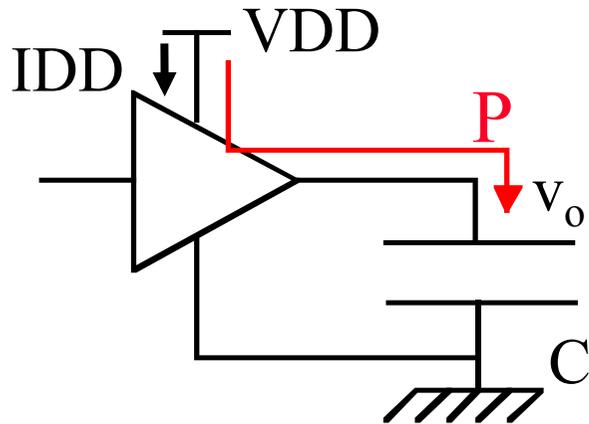
Índices de ruido

- ◆ Noise Resistance: R_n
 - ◆ Valor de la resistencia cuyo ruido térmico sería igual al ruido equivalente de entrada del amplificador.
 - ◆ $R_n / 4kTR_n\Delta f = E_n^2 + R_s \cdot I_n^2$
- ◆ Temperatura de Ruido: T_s
 - ◆ Temperatura a la que tendría que estar la resistencia de la fuente de señal (R_s) para que su ruido térmico sea igual al ruido equivalente de entrada del amplificador
 - ◆ $T_s / 4kT_sR_s\Delta f = E_n^2 + R_s \cdot I_n^2$

Análisis de ruido en circuitos

- ◆ Análisis de un sistema lineal, tiempo continuo y pequeña señal.
- ◆ Procedimiento
 - ◆ Identificación de fuentes de ruido (resistencias y opamps)
 - ◆ Mediante **superposición** cálculo el aporte de cada fuente a la salida o la entrada.
- ◆ Ejemplo

Límites teóricos de consumo (E. Vittoz)



- ◆ v_o sinusoidal con amplitud pico a pico V_{pp}
- ◆ Potencia de la fuente:

$$P = V_{DD} \cdot I_{DD} = V_{DD} \cdot Q/T = V_{DD} \cdot V_{pp} \cdot C \cdot f \quad (\text{Ec. 1})$$
- ◆ Potencia de señal en v_o : $S = V_{pp}^2/8 \quad (\text{Ec. 2})$
- ◆ Potencia de ruido en v_o : $N = k \cdot T/C \quad (\text{Ec. 3})$

- ◆ Combinando Ecs. 1, 2 y 3:

$$P = \frac{V_{DD}}{V_{pp}} f 8kT \frac{S}{N}$$

- ◆ Si el circuito tiene una ganancia A_V :

$$P = \frac{V_{DD}}{V_{pp}} f 8kT \frac{S}{N} \cdot A_V$$

E. Vittoz, Low-Power Design: Ways to Approach the Limits, ISSCC 94

Límites teóricos de consumo (E. Vittoz)

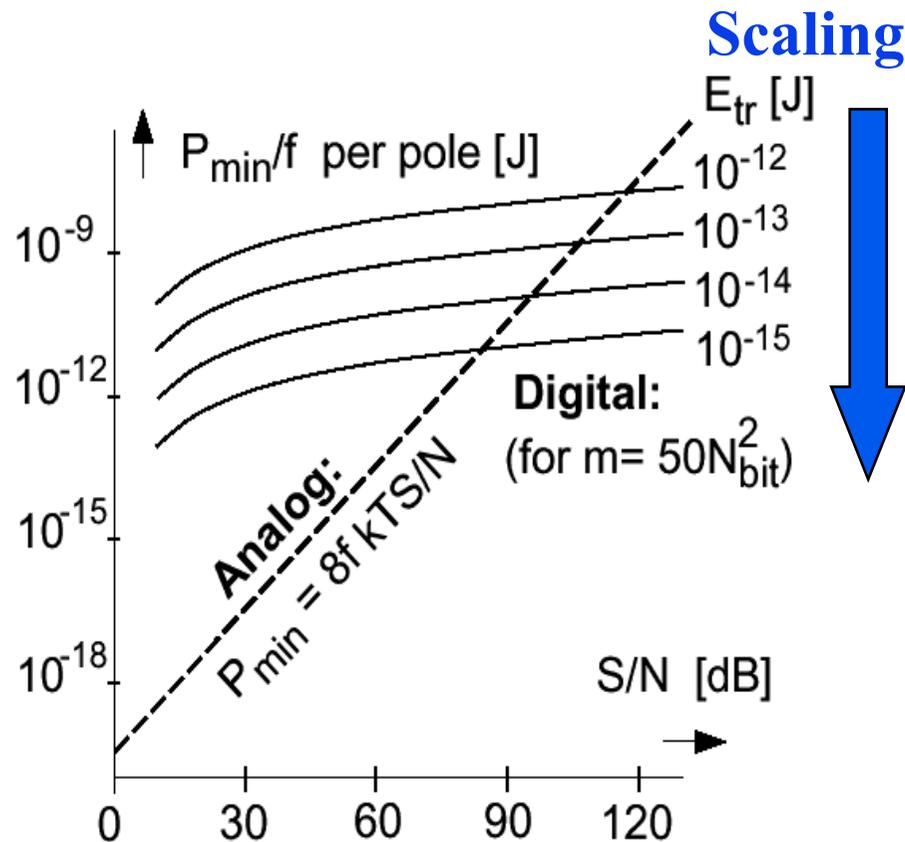
$$P = \frac{V_{DD}}{V_{pp}} f 8kT \frac{S}{N} \cdot A_V$$

- ◆ Factores:

- ◆ $V_{DD}/V_{pp} \Rightarrow$ trabajar Rail-to-Rail
- ◆ $f \Rightarrow$ compromiso velocidad consumo
- ◆ $S/N \Rightarrow$ compromiso precisión consumo
- ◆ $A_V \Rightarrow$ compromiso ganancia consumo

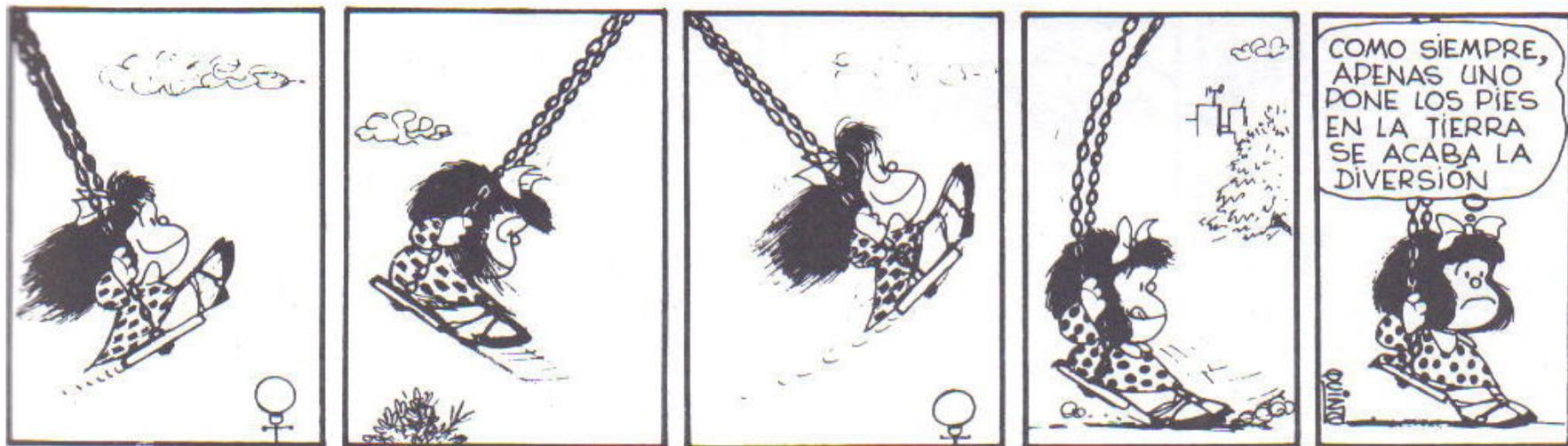
$$P_{MIN} = f 8kT \frac{S}{N}$$

Límites consumo: Digital vs. Analógico



- ◆ Límites **teóricos** de consumo para procesamiento **Analógico y Digital**.
- ◆ Analógico es mejor para relaciones S/N bajas, pero la frontera se está moviendo.
- ◆ Implementaciones reales aún dos o tres órdenes de magnitud por arriba.

Límites prácticos



Límites prácticos

- ◆ Eficiencia amplificadores
- ◆ Trabajar con amplitud menor a V_{DD}
- ◆ Capacidades parásitas:
 - ◆ Según posición agregan consumo y no reducen ruido
 - ◆ Necesidad de capacitor de compensación
- ◆ Necesidad de precisión (matching) => mayor tamaño y mayores capacidades parásitas
- ◆ Fuentes de ruido adicionales: $1/f$
- ◆ Bibliotecas de celdas no pensadas para bajo consumo
- ◆ Decisiones erróneas a nivel arquitectura
- ◆ Trabajar con requerimientos innecesarios (de por ej. S/N).
- ◆ Corrientes muy bajas descartadas por falta de datos, modelo o desconocimiento

Acercándose a los límites

- ◆ IEEE Journal of Solid-State Circuits, Agosto 2003,
- ◆ B. Linares-Barranco, T. Serrano-Gotarredona, “On the design and characterization of femtoampere current-mode circuits.
- ◆ Ej. Filtro pasabajos de primer orden con $C = 100\text{fF}$ e $I_{\text{bias}} = 3.5\text{ fA} !!$

Recapitulando...

- ◆ Objetivos
- ◆ Definiciones básicas
 - ◆ Ruido RMS, **PSD, Voltaje de ruido**
- ◆ Fuentes de ruido
 - ◆ Térmico (Blanco): **Resistencias**
 - ◆ Flicker (1/f)
 - ◆ Shot
- ◆ Operaciones
 - ◆ Adición: **se suman potencias**
 - ◆ Filtrado, ancho de banda equivalente de ruido, ruido kT/C
 - ◆ **Minimizar el ancho de banda**

Recapitulando...

- ◆ Ruido de amplificadores operacionales
 - ◆ Modelado, ruido equivalente a la entrada
- ◆ Índices de ruido
 - ◆ SNR, F, NF
- ◆ Ruido en circuitos
- ◆ Límites teóricos al consumo de potencia

Fin

Muchas Gracias