

# Instrumentación Inteligente

Belén Calvo

becalvo@unizar.es

Nicolás Medrano

nmedrano@unizar.es

Grupo de Electrónica de Potencia y Microelectrónica (GEPM)  
Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón - I3A  
Universidad de Zaragoza

GEPM



Grupo de Electrónica de Potencia y Microelectrónica

Instituto Universitario de Investigación  
en Ingeniería de Aragón  
Universidad Zaragoza



Facultad de Ciencias  
Universidad Zaragoza

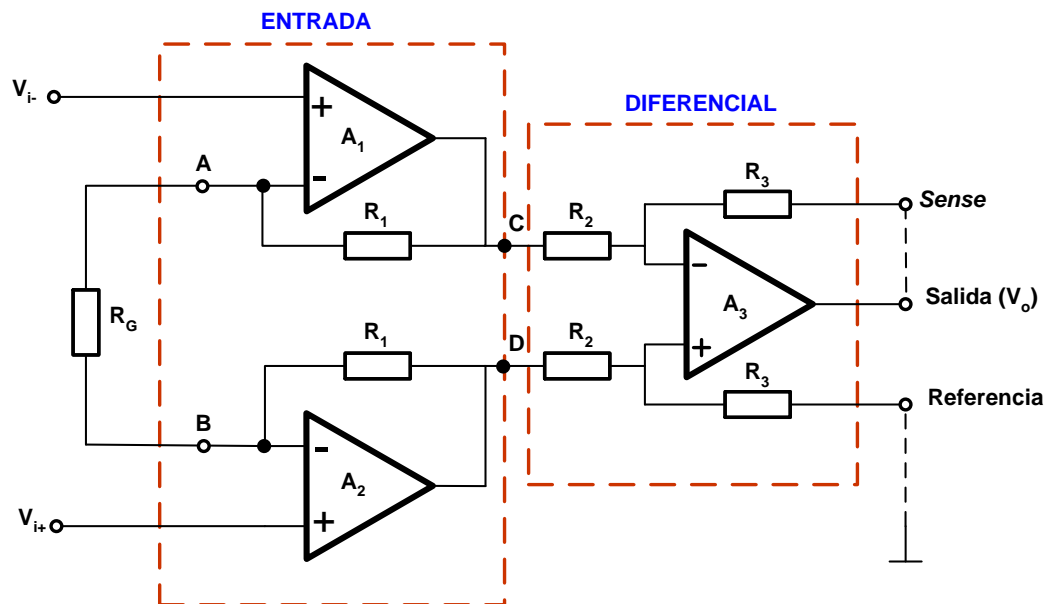
# Ampl. de Instrumentación

## Amplificador de Instrumentación

- Amplificador diferencial con una ganancia diferencial precisa y variable ( $1 \div 1000$ ) y con un factor de rechazo al modo común ( $CMRR = 20 \log(A_d/A_{cm})$ ) elevado en todo el rango de frecuencias de operación (es decir,  $A_{cm} \ll A_d$ ).
- Se caracterizan también por tener una impedancia de entrada muy elevada e impedancia de salida muy baja.
- Su ganancia es fácil de ajustar.
- Presenta voltajes de *offset* pequeños y baja deriva en el tiempo y con la temperatura, así como una razón de rechazo al rizado de la fuente de alimentación (PSRR) muy elevada.

# Ampl. de Instrumentación

## Amplificador de instrumentación



$$v_o = \frac{R_3}{R_2} \cdot \left( 1 + \frac{2R_1}{R_G} \right) (v_{i+} - v_{i-})$$



$$A_d = 1 + \frac{2R_1}{R_G}$$

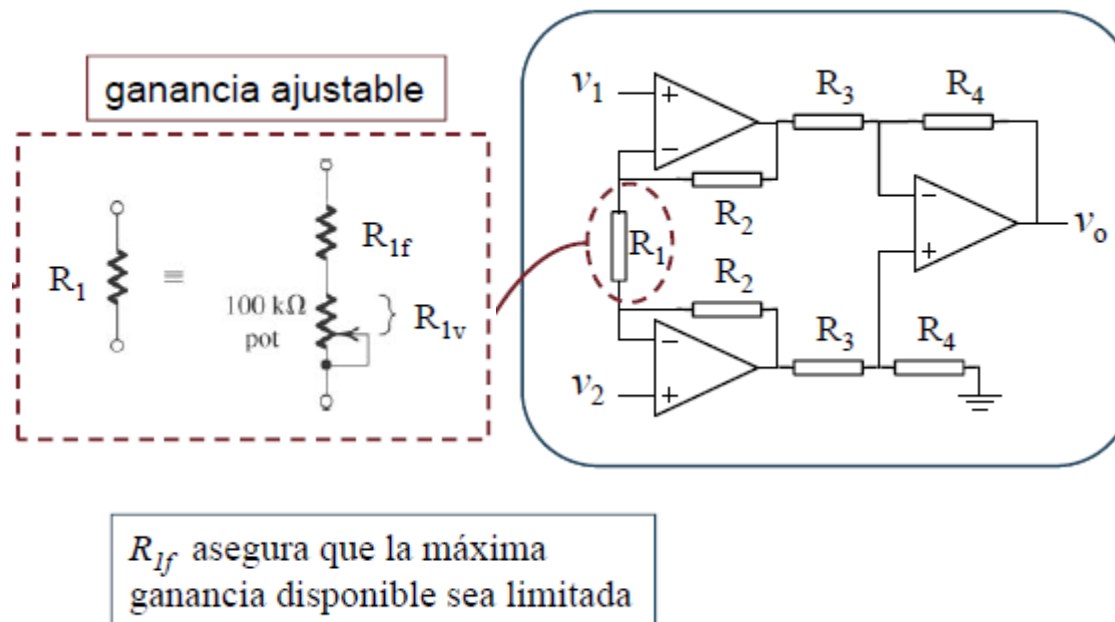
$$A_{cm} = 0$$

$R_{in} = \infty$  independiente de  $R_{S1,2}$  no despreciables y/o desequilibradas

Ganancia ajustable mediante única resistencia  $R_G$

# Ampl. de Instrumentación

## Ajuste de ganancia



➤ **Amplificador de instrumentación programables**

## Ampl. de Instrumentación

### ❑ Programabilidad

- Compensación de errores de los componentes discretos (tolerancias) e integrados (variaciones de proceso)
- Mayor flexibilidad

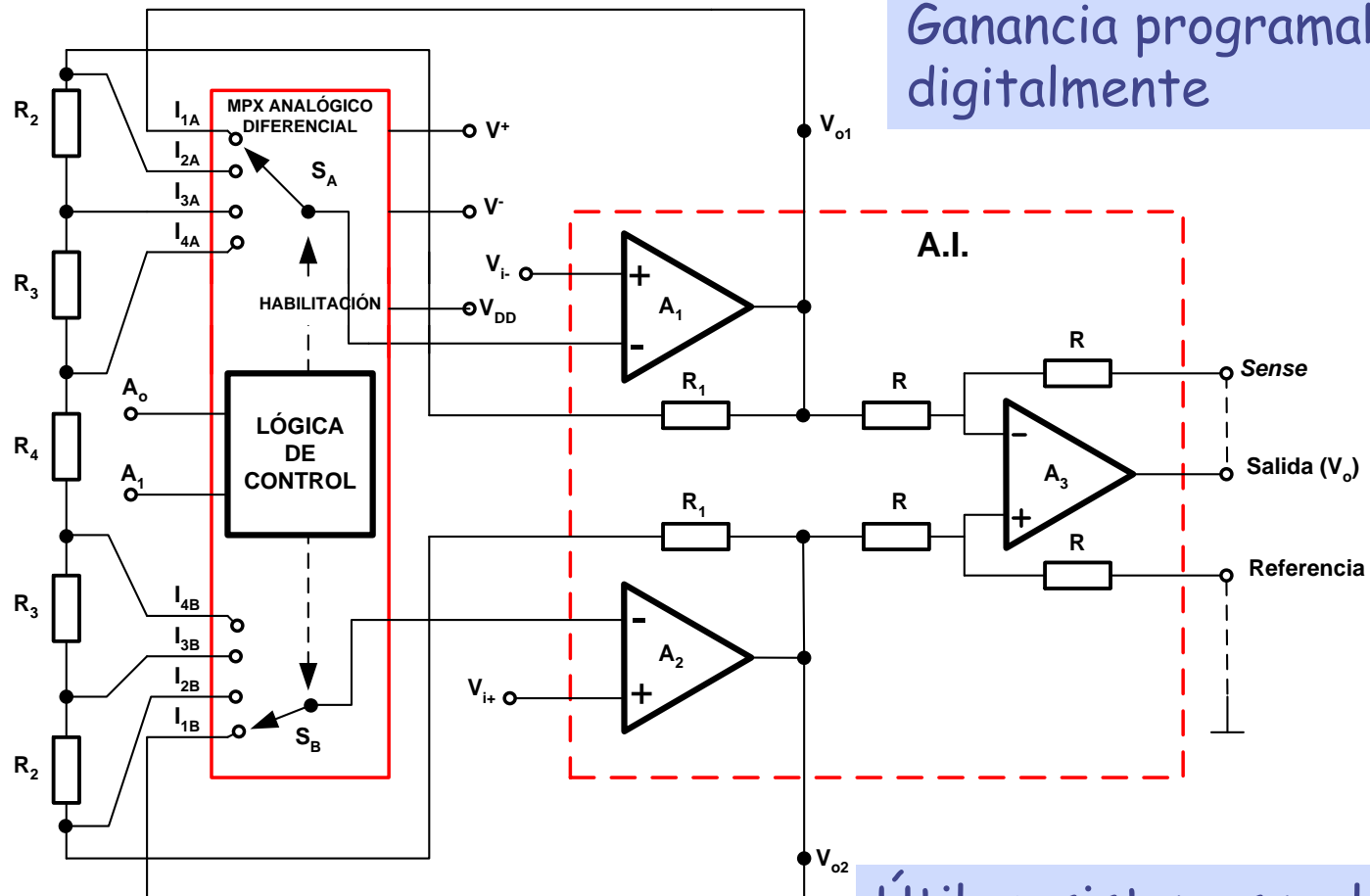
Adecuación al tipo de sensor

- Optimización de la señal de salida
- Reducción de consumo

Activación/desactivación de componentes

# Ampl. de Instrumentación

## ➤ Amplificador de instrumentación programables



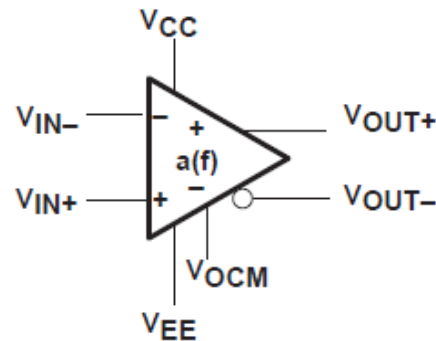
## Ampl. de Instrumentación

### ❑ Caracterización:

- CMOS process
- Vdd nominal y rango
- Rango de Temperatura
- Consumo de potencia, area
- Ganancia: rango y error
- BW
- CMRR
- PSRR
- Rango de entrada, rango de salida
- $Z_{in}$ ,  $Z_{out}$
- Ruido (en banda)
- Tensión de Offset, Corrientes de offset, derivas con T
- Setting time (to 0.1% @ gain)
- Slew-rate
- Linealidad: THD

# Amp. Fully-Differential

## FULLY-DIFFERENTIAL AMPLIFIER



Input voltage definition

$$V_{id} = (V_{in+}) - (V_{in-}) \quad V_{ic} = \frac{(V_{in+}) + (V_{in-})}{2}$$

Output voltage definition

$$V_{od} = (V_{out+}) - (V_{out-}) \quad V_{oc} = \frac{(V_{out+}) + (V_{out-})}{2}$$

Transfer function

$$V_{od} = V_{id} \times a(f)$$

Output common-mode voltage

$$V_{oc} = V_{ocm}$$

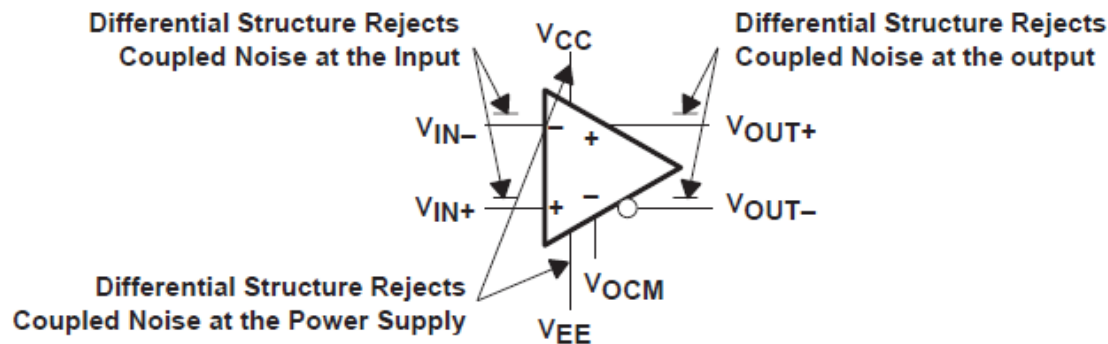
Why use integrated fully-differential amplifiers?

- Increased immunity to external noise
- Increased output voltage swing for a given voltage rail
- Ideal for low-voltage systems
- Integrated circuit is easier to use
- Reduced even-order harmonics

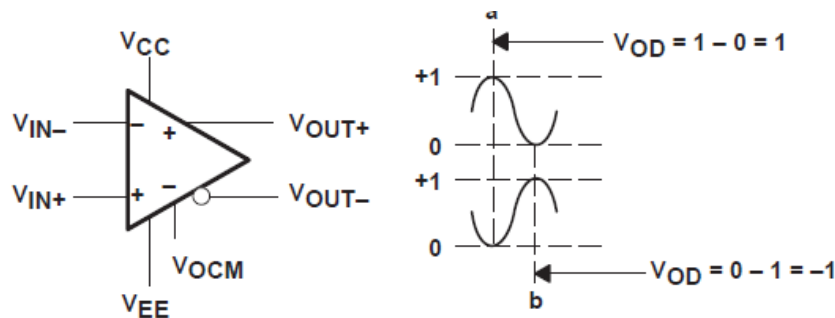


# Amp. Fully-Differential

## Noise Immunity



## Differential Output Voltage Swing



Differential Output Results in  $V_{OD} \text{ p-p} = 1 - (-1) = 2 \times \text{SE Output}$



Integrated Circuits  
Low-voltage

# Amp. Fully-Differential

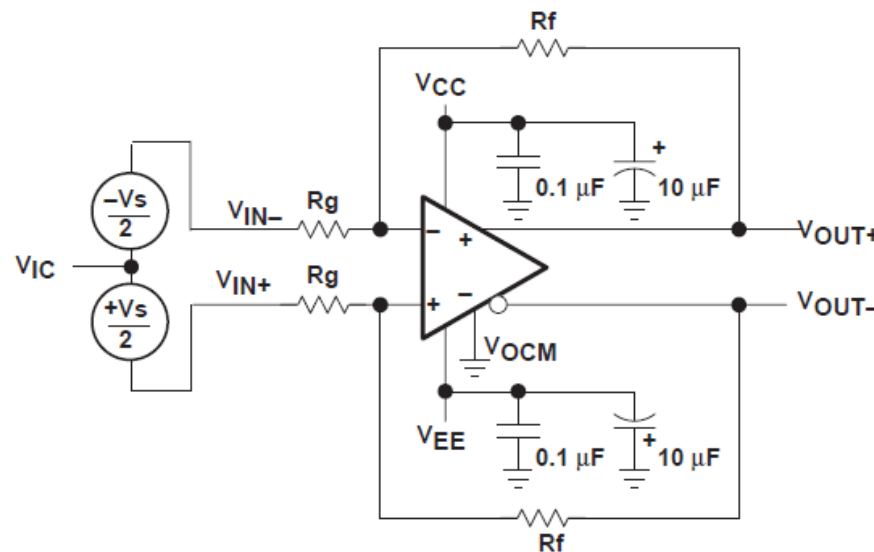
## Reduced Even-Order Harmonic Distortion

$$V_{out+} = k_1 V_{in} + k_2 V_{in}^2 + k_3 V_{in}^3 + \dots, \text{ and}$$

$$V_{out-} = k_1(-V_{in}) + k_2(-V_{in})^2 + k_3(-V_{in})^3 + \dots \text{ Taking the differential output}$$

$$V_{od} = 2k_1 V_{in} + 2k_3 V_{in}^3 + \dots, \text{ where } k_1, k_2 \text{ and } k_3 \text{ are constants.}$$

## Basic Circuits



simetría!

$$V_{OD} = A \times V_s$$

$$V_{OC} = 0$$

$$A = \frac{R_f}{R_g}$$

# Amp. Fully-Differential

## A Differential-Output, Differential-Input Amplifier

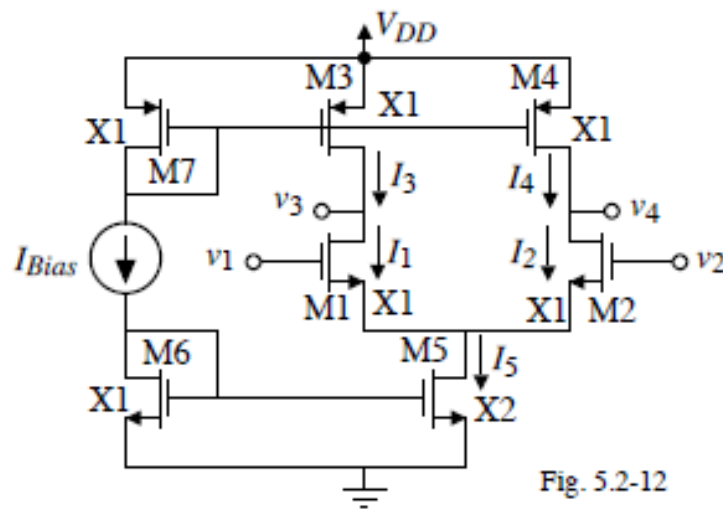


Fig. 5.2-12

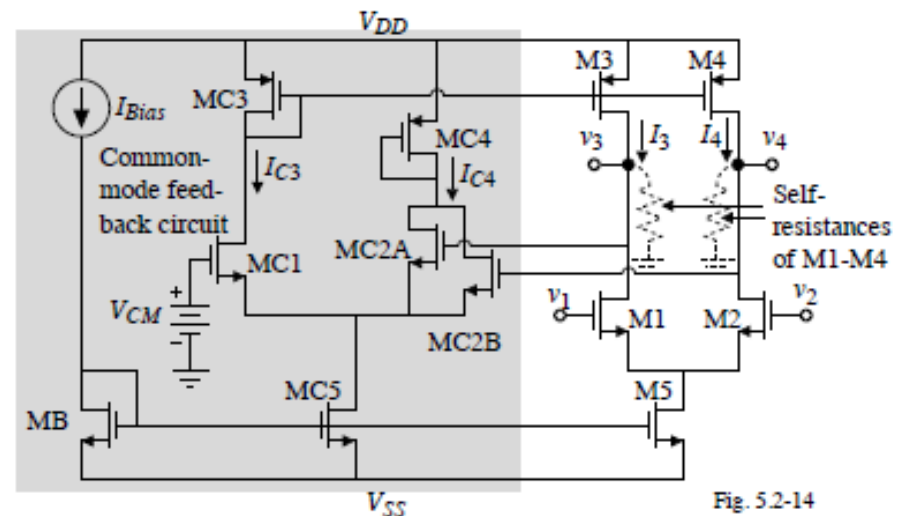


Fig. 5.2-14

a problem occurs if  $I_1 \neq I_3$  or if  $I_2 \neq I_4$ .

Current

current mismatch problem



common-mode feedback

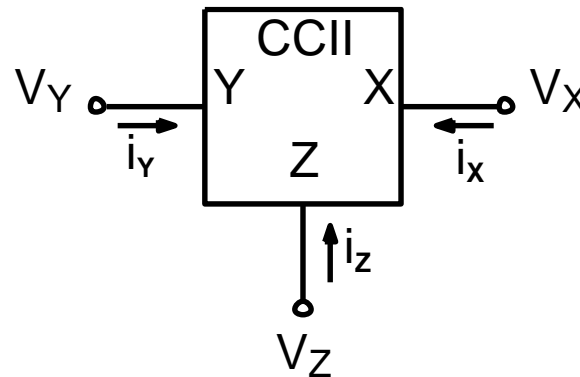
Operation:

- Common mode output voltages are sensed at the gates of MC2A and MC2B and compared to  $V_{CM}$ .
- The current in MC3 provides the negative feedback to drive the common mode output voltage to the desired level.

## Otros Bloques Activos

### ❑ **Convectores de Corriente** de segunda generación (CCII)

Elemento híbrido  
tensión-intensidad



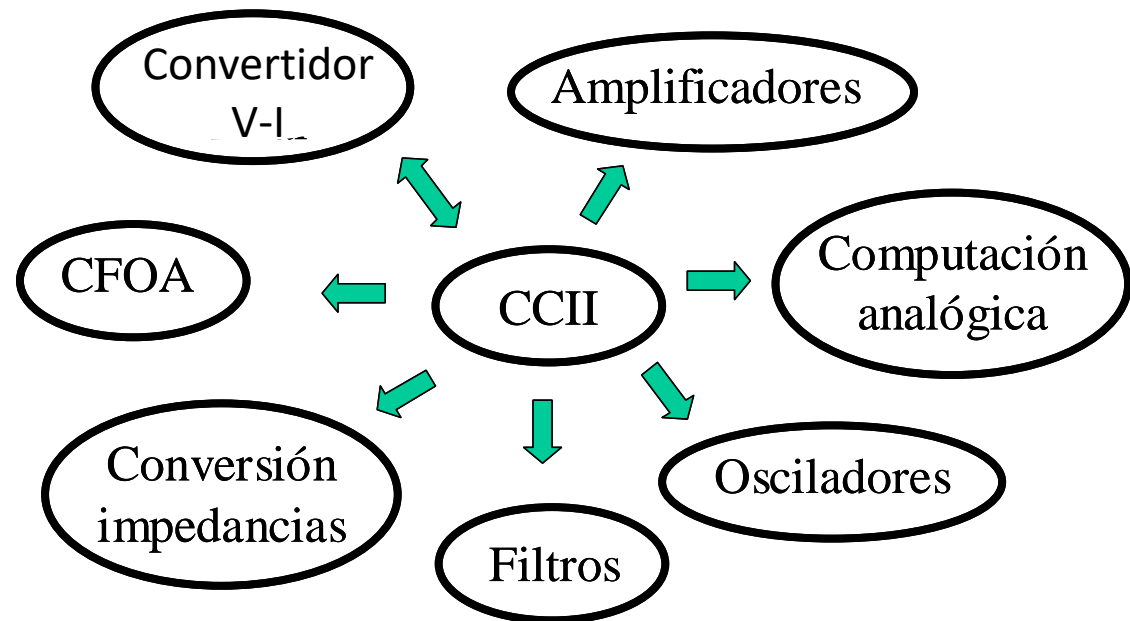
$$\begin{array}{rcl}
 V_X & = & V_Y \\
 i_Z & = & \pm i_X \\
 i_Y & = & 0
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 \nearrow \\
 \searrow
 \end{array}
 \begin{array}{ll}
 i_Z = + i_X & \text{CCII+} \\
 i_Z = - i_X & \text{CCII-}
 \end{array}$$

## Otros Bloques Activos

### ❑ **Convectores de Corriente** de segunda generación (**CCII**)

- ✓ gran versatilidad como celda activa básica

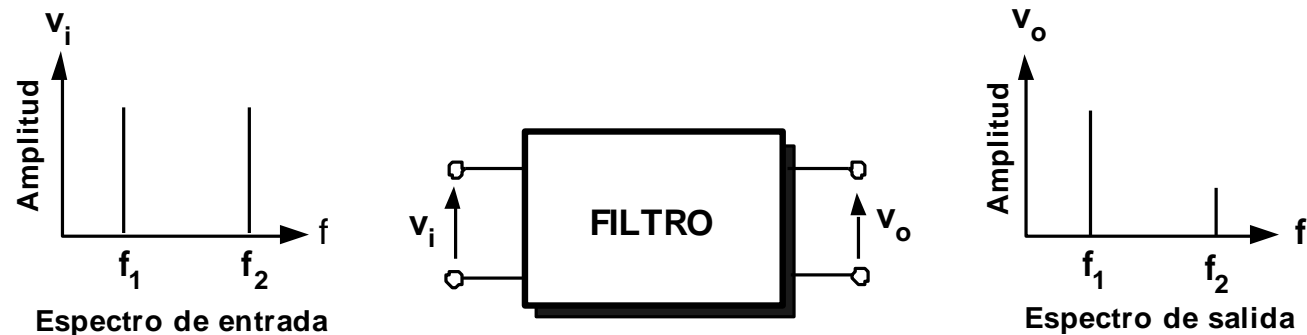
Áreas de aplicación:



✗ no implementaciones robustas IC

# Filtros

*Un filtro eléctrico es un sistema entrada-salida con una respuesta frecuencial selectiva*



$$H(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} \quad s = j\omega \quad \Rightarrow \quad H(j\omega) = |H(j\omega)| \angle \phi(\omega)$$

$$H(s) = \frac{a_m \cdot s^m + a_{m-1} \cdot s^{m-1} + \dots + a_1 \cdot s + a_0}{s^n + b_{n-1} \cdot s^{n-1} + \dots + b_1 \cdot s + b_0}$$

**polos:** raíces del denominador

**ceros:** raíces del numerador

**Orden del Filtro:**  $n$

$n \geq m$

# Filtros: clasificación

## Según el tipo de señal procesada

### a.-Filtros Analógicos

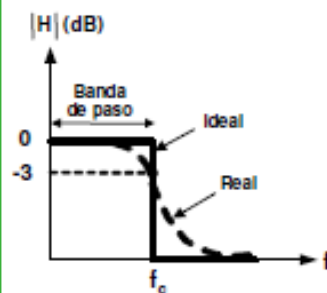
- Filtros pasivos
- Filtros activos
- Filtros de Capacidad Conmutada

### b.-Filtros Digitales

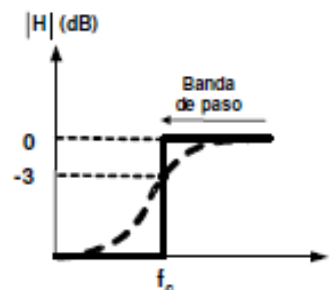
## Según la aproximación matemática

- 1.- Filtros de Butterworth
- 2.- Filtros de Chebyshev
- 3.- Filtros de Bessel

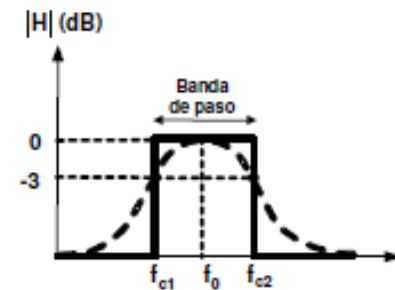
## Según la función que lleve a cabo



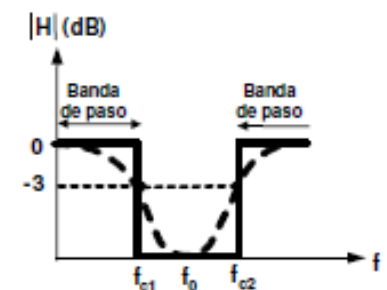
(a) Filtro paso bajo



(b) Filtro paso alto



(c) Filtro paso banda



(d) Filtro rechazo de banda

# Filtros: clasificación

## según la señal procesada

### 1. Filtros analógicos: Procesan señales analógicas

**Filtros pasivos:** solo elementos pasivos RLC. Aplicaciones en muy baja ( $<1\text{Hz}$ )-muy alta frecuencia ( $>1\text{ GHz}$ ) y/o muy alta linealidad. Procesado en tiempo continuo.

**Filtros activos:** RC y AO. Aplicaciones BF y AF. Procesado en tiempo continuo.

**Filtros de capacidad conmutada:** C y AO. Se muestrea la señal de entrada y se procesa en tiempo discreto. Solo para BF. Alta Programabilidad.

### 2. Filtros digitales: Procesan señales digitales

La señal analógica es muestreada y cuantificada por un convertidor analógico-digital y posteriormente es procesada por algoritmos. Solo para BF. Elevada configurabilidad.



## Filtros: clasificación

### Funciones de aproximación matemática

#### 1. Filtros de Butterworth:

Respuesta de ganancia plana en la banda pasante. Transición suave y fase no lineal en torno a frecuencia de corte.

#### 2. Filtros de Chebyshev:

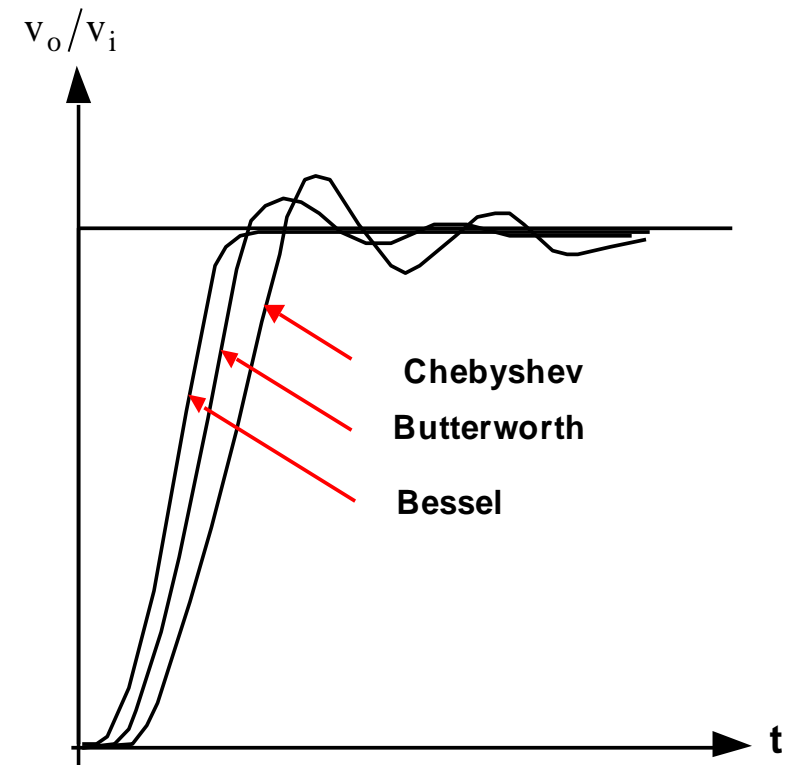
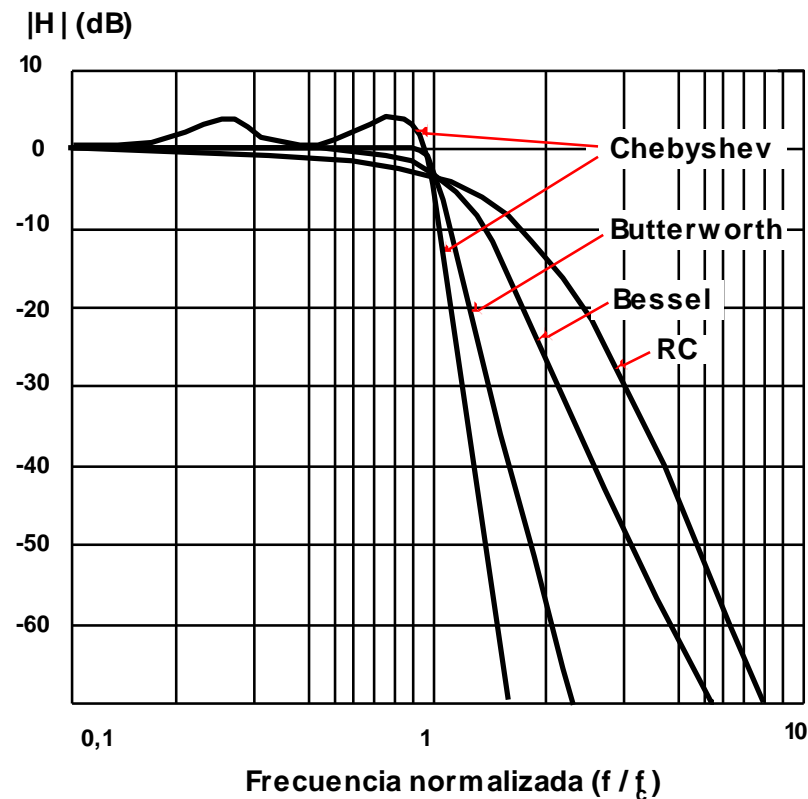
Respuesta con máxima pendiente de transición. Rizado en la banda de paso y/o rechazada y fase no lineal.

#### 3. Filtros de Bessel:

Respuesta de fase lineal en torno a la frecuencia de corte. Rizado y transición moderados

# Filtros: clasificación

## Funciones de aproximación matemática



## Filtros Activos

### Instrumentación electrónica: Filtros activos

#### Ventajas:

Utilizan sólo  $R$ ,  $C$  y  $AO$

Sencillez de diseño: El  $AO$  facilita la realización de filtros de orden elevado mediante conexión en cascada.

Flexibilidad de diseño: permiten la realización de cualquier aproximación matemática para el filtro.

#### Desventajas:

Necesidad de fuentes de alimentación (consumo)

BW limitado por el  $AO$

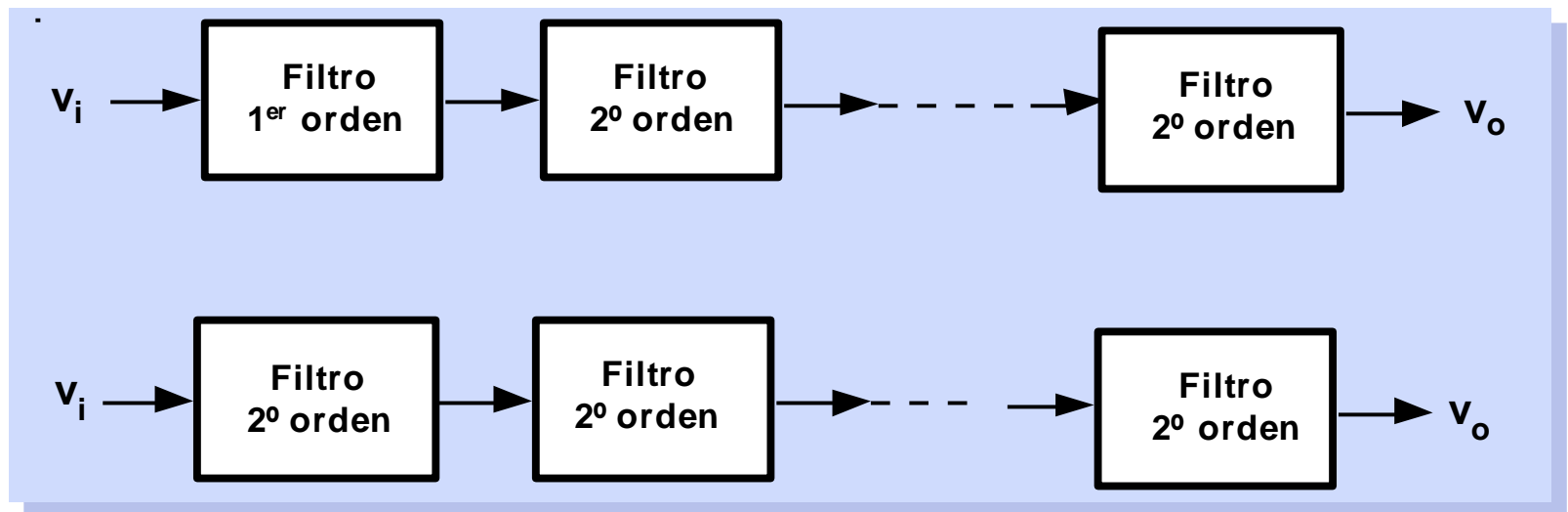
Limitación de los valores de  $C$  y  $R$  por el  $AO$

Ruido y distorsión generado por el  $AO$

## Filtros Activos

### Filtros de orden superior

$n$ : orden impar



$n$ : orden par

➤ Acoplo directo

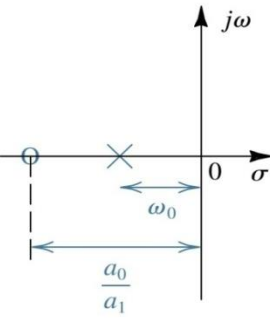
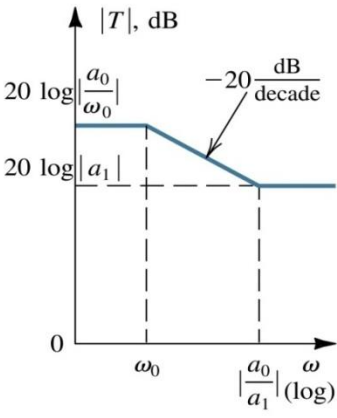
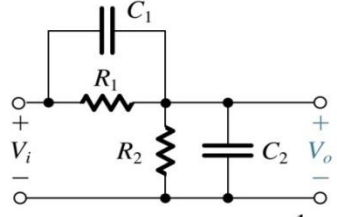
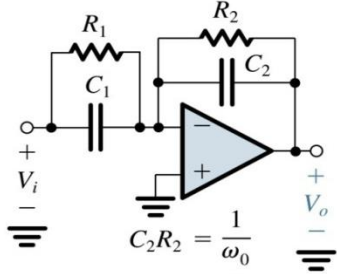
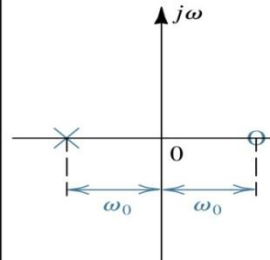
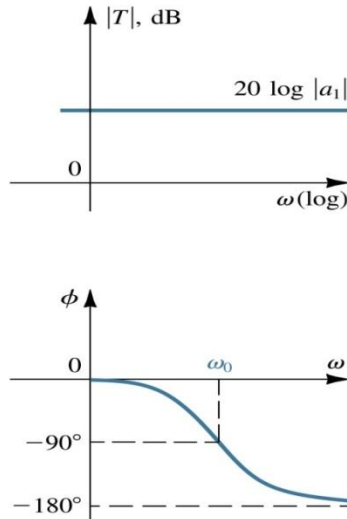
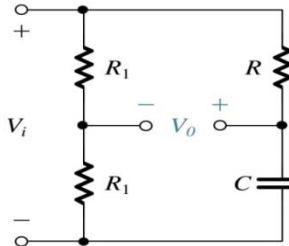
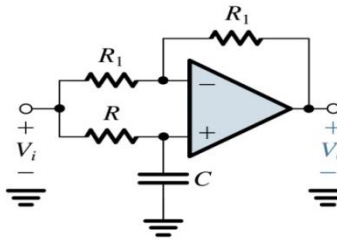
➤ Acoplo capacitivo

# Filtros Activos

## Topologías de filtros RC-Activos (orden 1)

Filter Type and $T(s)$	$s$ -Plane Singularities	Bode Plot for $ T $	Passive Realization	Op Amp-RC Realization
<p>(a) Low-Pass (LP)</p> $T(s) = \frac{a_0}{s + \omega_0}$			<p><math>CR = \frac{1}{\omega_0}</math> dc gain = 1</p>	<p><math>CR_2 = \frac{1}{\omega_0}</math> dc gain = <math>-\frac{R_2}{R_1}</math></p>
<p>(b) High-Pass (HP)</p> $T(s) = \frac{a_1 s}{s + \omega_0}$			<p><math>CR = \frac{1}{\omega_0}</math> High-frequency gain = 1</p>	<p><math>CR_1 = \frac{1}{\omega_0}</math> High-frequency gain = <math>-\frac{R_2}{R_1}</math></p>

# Filtros Activos

<p>(c) General</p> $T(s) = \frac{a_1 s + a_0}{s + \omega_0}$			 $(C_1 + C_2) (R_1 // R_2) = \frac{1}{\omega_0}$ $C_1 R_1 = \frac{a_0}{a_1}$ $\text{dc gain} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$ $\text{HF gain} = \frac{C_1}{C_1 + C_2}$	 $C_2 R_2 = \frac{1}{\omega_0}$ $C_1 R_1 = \frac{a_1}{a_0}$ $\text{dc gain} = -\frac{R_2}{R_1}$ $\text{HF gain} = -\frac{C_1}{C_2}$
$T(s) = -a_1 \frac{s - \omega_0}{s + \omega_0}$ <p><math>a_1 &gt; 0</math></p>			 $CR = 1/\omega_0$ $\text{Flat gain } (a_1) = 0.5$	 $CR = 1/\omega_0$ $\text{Flat gain } (a_1) = 1$

# Filtros Activos

## Second-order filtering functions.

Filter Type and $T(s)$	s-Plane Singularities	$ T $
<p>(a) Low pass (LP)</p> $T(s) = \frac{a_0}{s^2 + s\frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2}$ <p>DC gain = <math>\frac{a_0}{\omega_0^2}</math></p>		
<p>(b) High pass (HP)</p> $T(s) = \frac{a_2 s^2}{s^2 + s\frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2}$ <p>High-frequency gain = <math>a_2</math></p>		
<p>(c) Bandpass (BP)</p> $T(s) = \frac{a_1 s}{s^2 + s\frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2}$ <p>Center-frequency gain = <math>\frac{a_1 Q}{\omega_0}</math></p>		

# Filtros Activos

Filter Type and $T(s)$	s-Plane Singularities	$ T $
<p>(d) Notch</p> $T(s) = a_2 \frac{s^2 + \omega_0^2}{s^2 + s \frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2}$ <p>DC gain = High-frequency gain = <math>a_2</math></p>		<p><math>\omega_1 \omega_2 = \omega_0^2</math></p>
<p>(e) Low-pass notch (LPN)</p> $T(s) = a_2 \frac{s^2 + \omega_n^2}{s^2 + s \frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2}$ <p><math>\omega_n \geq \omega_0</math> DC gain = <math>a_2 \frac{\omega_n^2}{\omega_0^2}</math> High-frequency gain = <math>a_2</math></p>		<p><math>\omega_{\max} = \omega_0 \sqrt{\frac{(\frac{\omega_n^2}{\omega_0^2})(1 - \frac{1}{2Q^2}) - 1}{\frac{\omega_n^2}{\omega_0^2} + \frac{1}{2Q^2} - 1}}</math></p>
<p>(f) High-pass notch (HPN)</p> $T(s) = a_2 \frac{s^2 + \omega_n^2}{s^2 + s \frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2}$ <p><math>\omega_n \leq \omega_0</math> DC gain = <math>a_2 \frac{\omega_n^2}{\omega_0^2}</math> High-frequency gain = <math>a_2</math></p>		<p><math>T_{\max} = \frac{ a_2 }{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega_{\max}^2)^2 + (\frac{\omega_0}{Q})^2 \omega_{\max}^2}}</math></p>

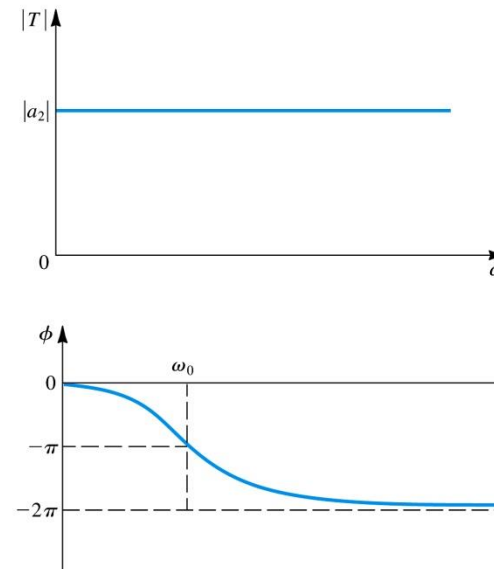
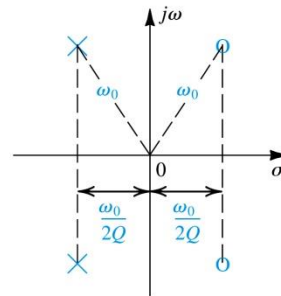


# Filtros Activos

(g) All pass (AP)

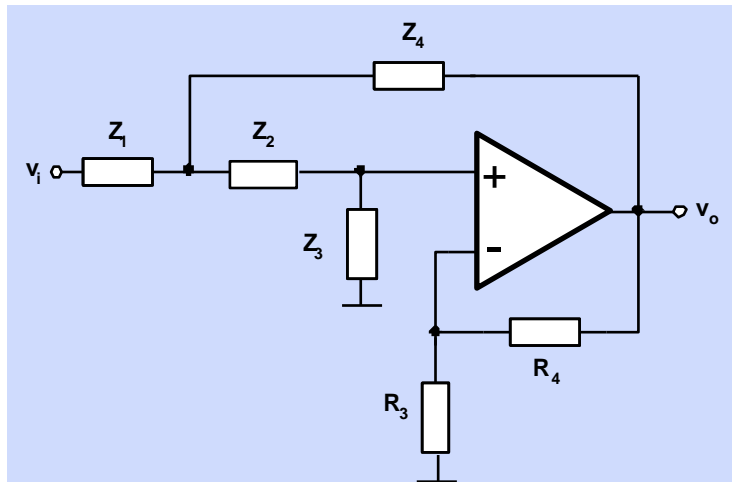
$$T(s) = a_2 \frac{s^2 - s\frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2}{s^2 + s\frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2}$$

Flat gain =  $a_2$



## Filtros Activos

### Topologías de filtros RC-Activos (orden 2)



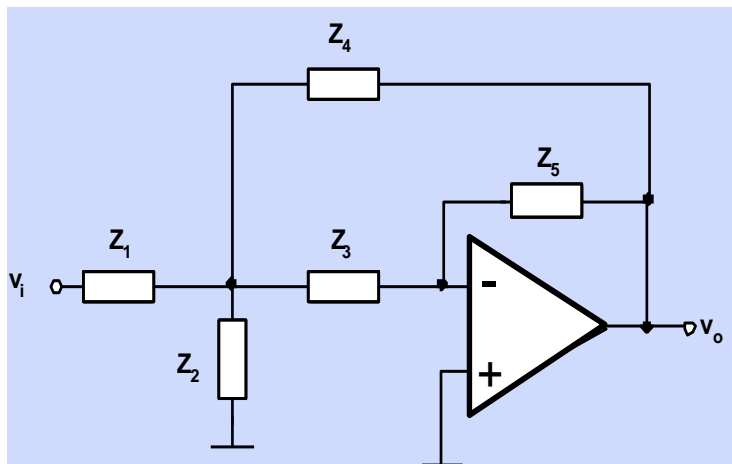
#### Filtro Sallen-Key

No invierte la fase

LPF:  $Z_1=R_1$ ,  $Z_2=R_2$ ,  $Z_3=C_3$ ,  $Z_4=C_4$

HPF:  $Z_1=C_1$ ,  $Z_2=C_2$ ,  $Z_3=R_5$ ,  $Z_4=R_6$

Ajuste de ganancia



#### Filtro de realimentación múltiple (MFB)

Invierte la fase

LPF:  $Z_1=R_1$ ,  $Z_3=R_3$ ,  $Z_4=R_4$ ,  $Z_2=C_2$ ,  $Z_5=C_5$

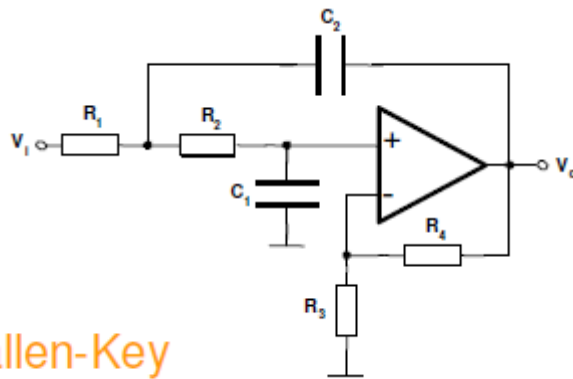
HPF:  $Z_1=C_1$ ,  $Z_3=C_2$ ,  $Z_4=C_5$ ,  $Z_2=R_2$ ,  $Z_5=R_5$

No ajuste de ganancia

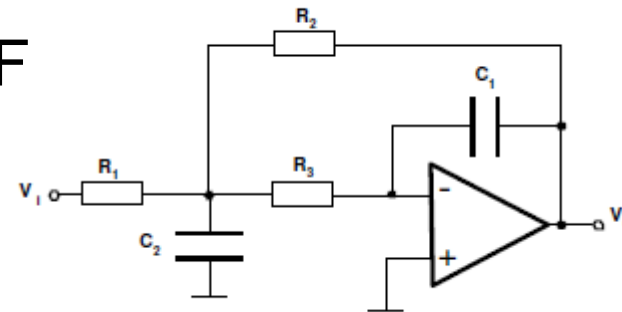
# Filtros Activos

## Ejemplos

Sallen-Key

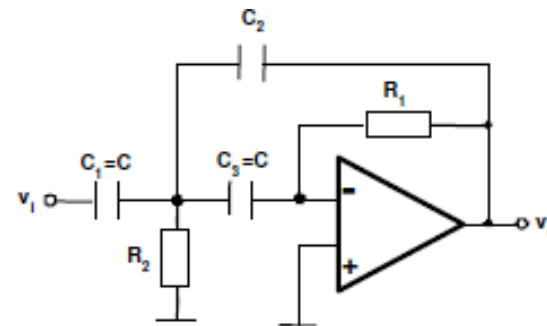
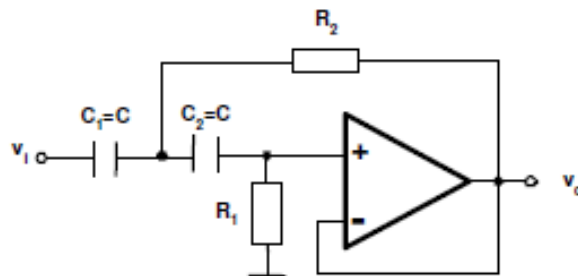


LPF

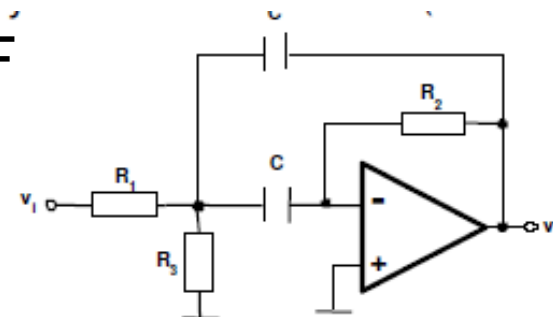
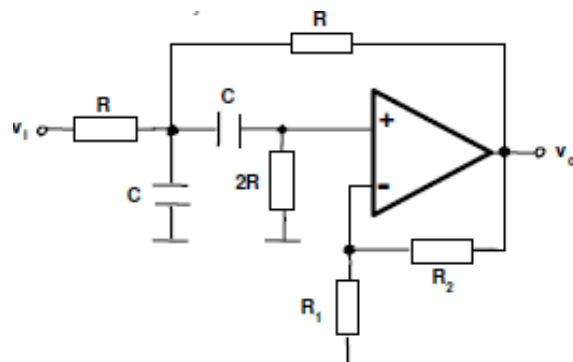


MFB

HPF



BPF



# Filtros Activos

## Estructuras Sallen-Key y MFB

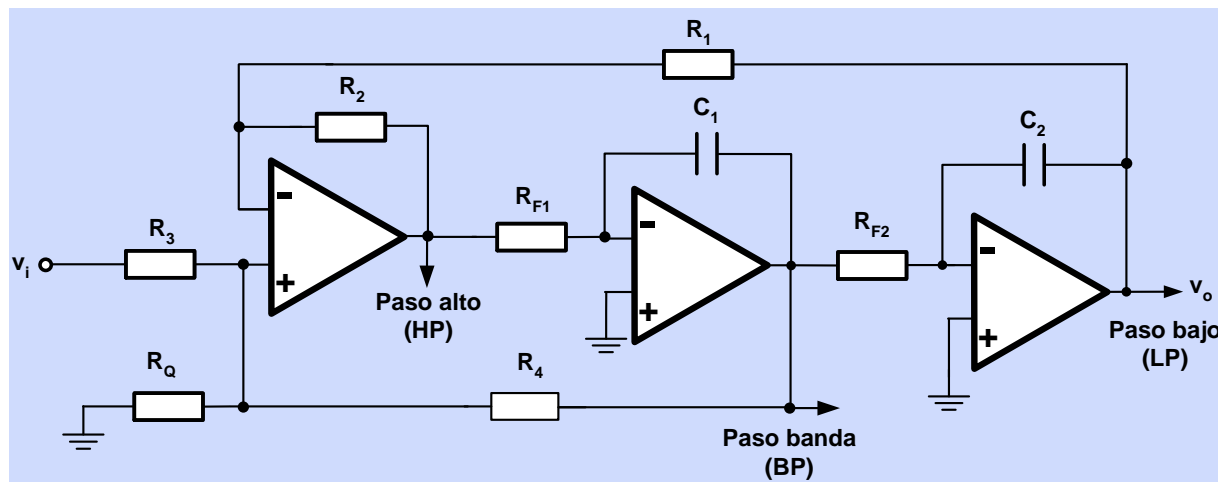
- ✗ Sensibles a las tolerancias de los componentes y de la temperatura
- ✗ NO permiten valores de  $Q$  elevados
- ✗ En general No permiten ajustes independientes de la ganancia y del factor de calidad

## Filtro de variables de estado

Mayor precisión con mayor número de componentes

Ajuste independiente de los parámetros del filtro

Funciones LP, BP y HP simultáneas, Diseño para  $Q > 10$



## Filtros Activos

Diseño asistido por computador:

FilterPro ([www.ti.com/tool/filterpro](http://www.ti.com/tool/filterpro))

Simulación ICs comerciales:

TINA TI

# Filtros Activos CMOS

Filtros integrados continuos en el tiempo: MOSFET-C y Gm-C

## Técnica MOSFET-C

sustituyendo la resistencia de un filtro activo RC por un MOSFET en zona lineal,

$$R_{on} = \frac{V_{DS}}{I_D} = \frac{1}{\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})}$$

Resistencia controlada  
por tensión

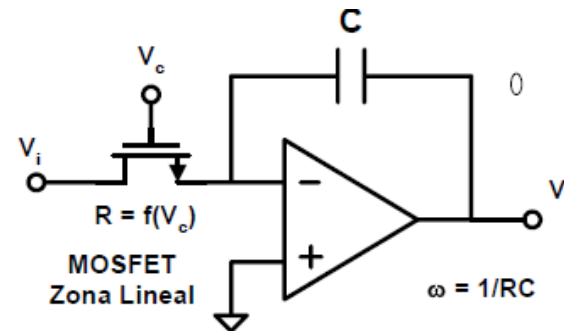
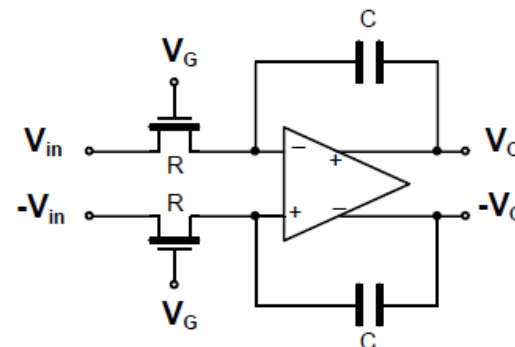


Figura 1. Integrador MOSFET-C



$$H(s) = -\frac{1}{sRC}$$

# Filtros Activos CMOS

## Técnica MOSFET-C

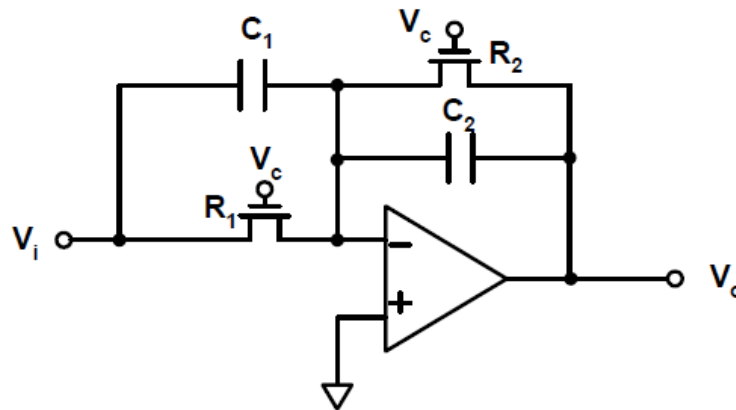
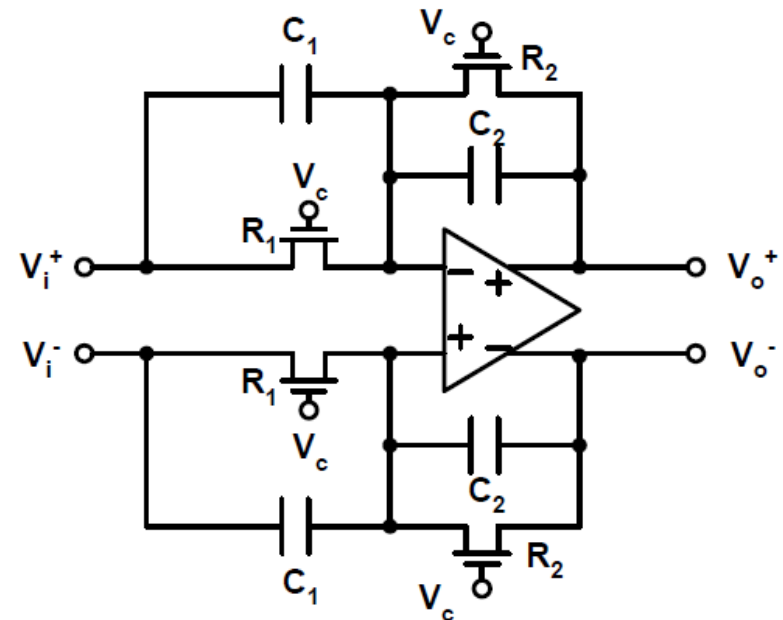


Figura 1. Sección genérica de primer orden *MOSFET-C*, versión unipolar.

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = -\frac{sC_1 + 1/R_1}{sC_2 + 1/R_2}$$



# Filtros Activos CMOS

## Resistencias MOS

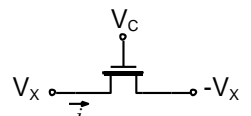
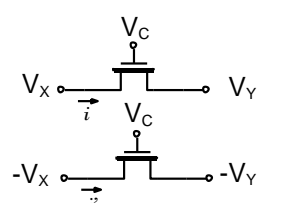
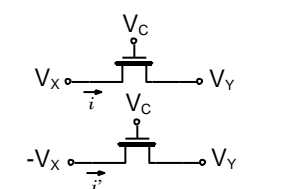
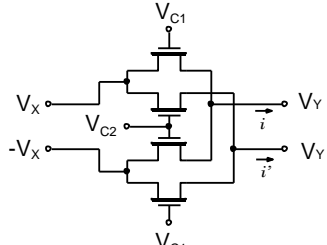
Configuración	Esquema	Característica
1-MOSFET		$i = \frac{2V_X}{R}$
2-MOSFET		$i - i' = \frac{2(V_X - V_Y)}{R}$
		$i - i' = \frac{2V_X}{R}$
-MRC- <i>MOS Resistive Circuit</i>		$i - i' = 2V_X \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$

Tabla 1.1 Resumen de técnicas de linealización de resistencias activas MOS para señales balanceadas

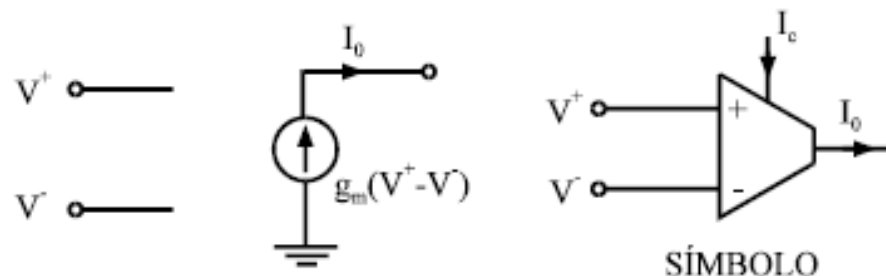


# Filtros Activos CMOS

Aunque la mayoría de los filtros activos están contruidos en base a fuentes de tensión controladas por tensión (A.O.), su uso está restringido a determinadas aplicaciones debido sobre todo a su ganancia dependiente de la frecuencia (hasta audio-frecuencia).

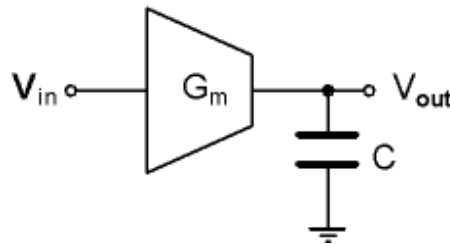


**Trabajo a alta frecuencia: HF/VHF**  
**Bloque activo: amplificador de transconductancia**

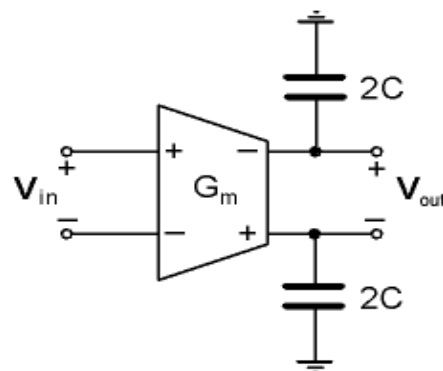


## Filtros Activos CMOS

### Técnica gm-C



$$H(s) = \frac{G_m}{sC}$$



- ✓ simplicidad
- ✓ lazo abierto
- ✓ condensadores MOS a tierra
- ✓ sintonizabilidad →  $G_m$  variable
- ✗ linealidad

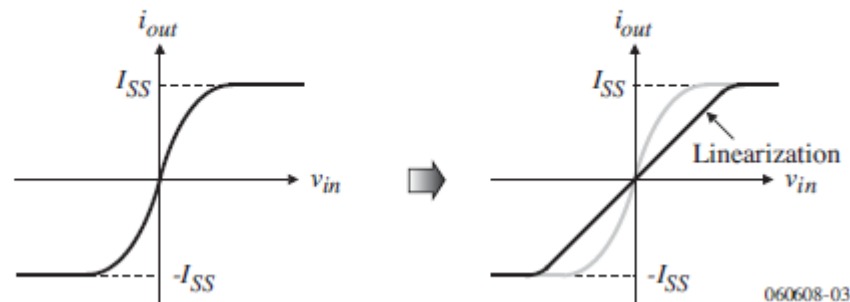
**Transconductor  
CMOS básico:  
par diferencial**

# Filtros Activos CMOS

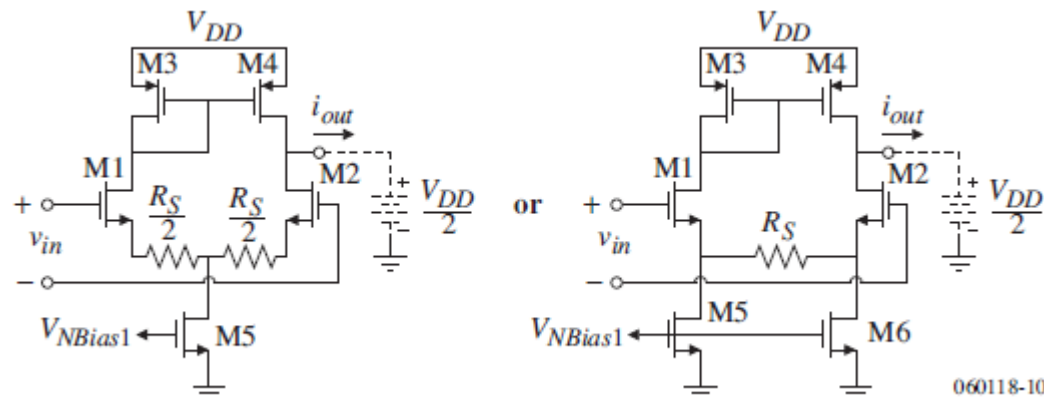
## Técnica gm-C: técnicas de linealización

### Linearization of the Transconductance

Goal:



- degeneración de fuente



- polarización adaptativa, ...

# Filtros Activos CMOS

## Técnica gm-C

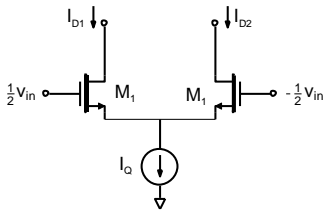
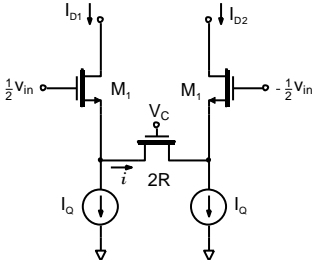
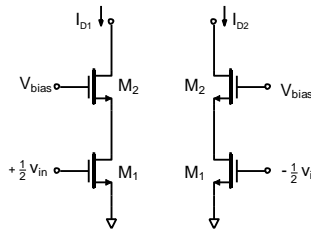
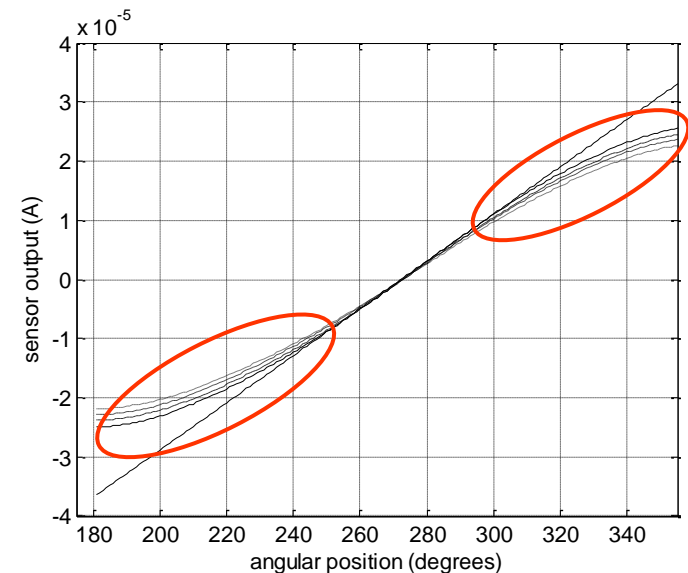
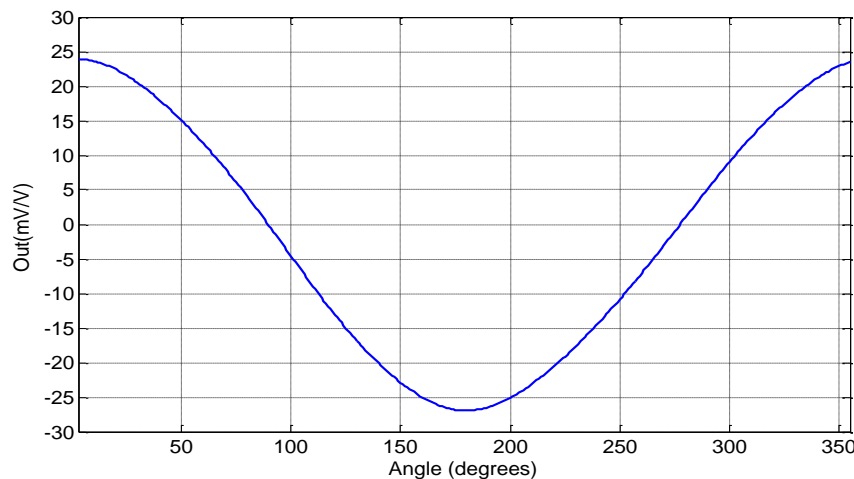
<i>Tipo</i>	<i>Transconductor en saturación</i>	<i>Par diferencial degenerado</i>	<i>Transconductor en triodo</i>
<b>Esquema representativo</b>			
<b>Característica</b>	$G_m \approx \sqrt{KI_Q}$	$G_m \approx \frac{g_m}{1 + g_m R}$	$G_m \approx KV_{ds}$
<b>Rango frecuencial</b>	Bueno	Moderado	Moderado
<b>Linealidad</b>	Moderada	Buena	Buena
<b>Sintonizabilidad</b>	Moderada	Buena	Moderada

Tabla 1.2 Resumen de las estrategias principales en la implementación de transconductores

## Linealizadores

### Sensor de Magnetorresistencia Gigante

- resistors whose resistive value varies depending on their angular position inside a magnetic field
- allowable error: 1 degree in the estimation of the angular pos.



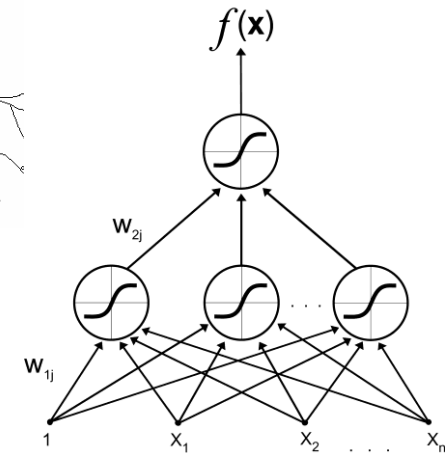
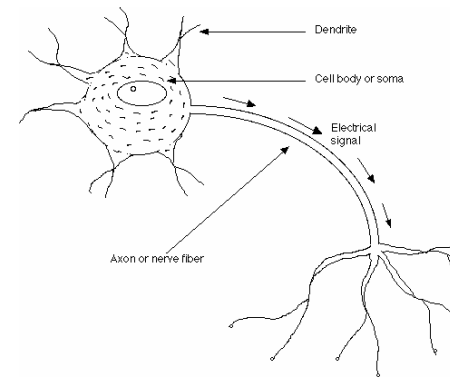
## Linealizadores: GMR

### Prolongación del rango lineal con Red Neuronal Artificial (ANN)

Una ANN es un sistema de procesamiento inspirado en el modo en que el cerebro realiza el aprendizaje de tareas

#### Componentes básicos

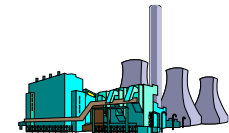
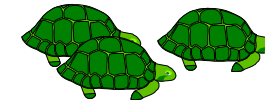
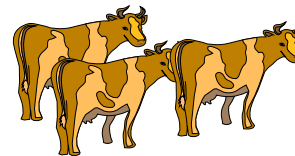
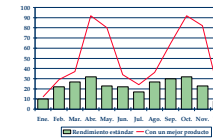
- Procesador elemental (neurona)
- Patrón de conexiones
  - Unidireccional/realimentado
  - Capas
- Tipo de aprendizaje
  - Conocimiento del problema a partir de ejemplos
  - El proceso de aprendizaje modifica la información de la red de forma que ésta pueda modelar el problema adecuadamente



## Linealizadores: GMR

### Aplicaciones ANNs

- Modelización/Predicción
- Clasificación
- Control industrial
- Reconocimiento de habla/OCR
- Compresión de datos
- Implementaciones biológicas
- . . . . .



## Linealizadores: GMR

### Implementaciones

- Simulación
- FPGAs
- ASICs



Linealización de sensores:

- ✓ Número relativamente pequeño de unidades de proceso o neuronas
- ✓ Solución flexible con bajo coste en términos de area, consumo y complejidad computacional

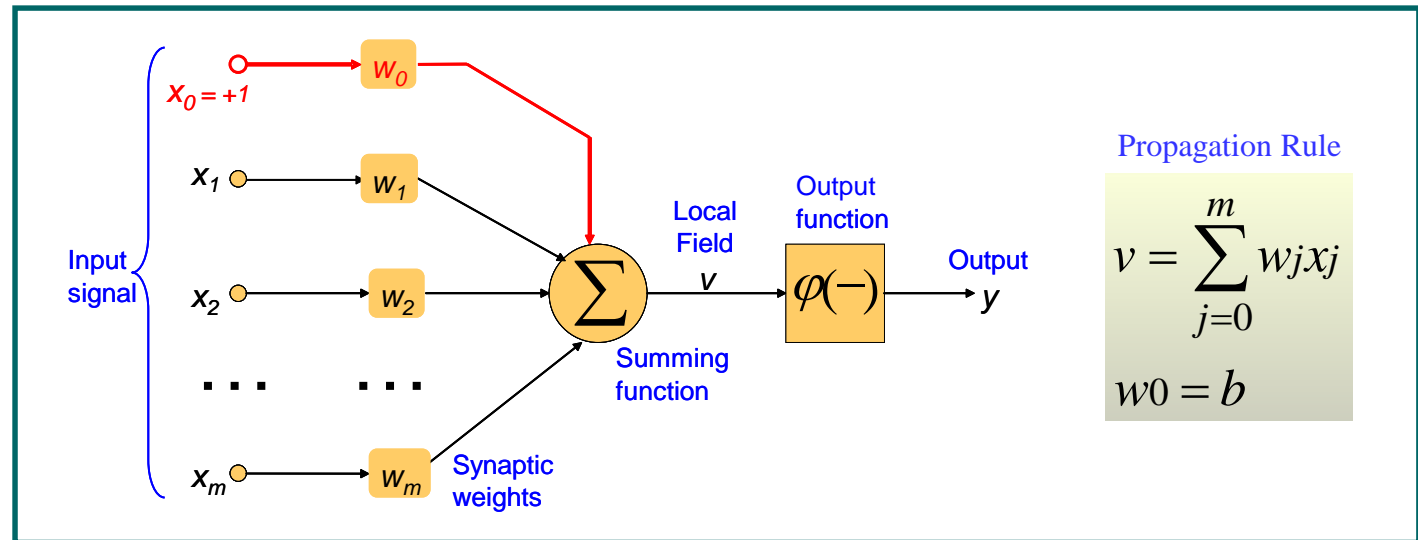
Sensor GMR de bajo coste y altas prestaciones en aplicaciones embebidas



# Linealizadores: GMR

¿Qué hay que implementar?

Unidad de  
proceso



Bloques aritméticos:

- Multiplicador
- Sumador
- Función de salida

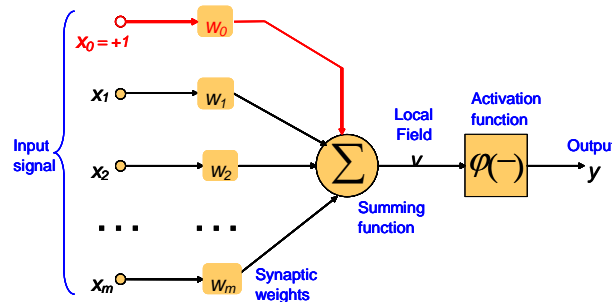
Unidad almacenamiento:

- Pesos
- Valores intermedios
- Errores

## Linealizadores: GMR

### Consideraciones de diseño

- ¿Tecnología? CMOS → bajo coste, alta densidad de integración



compatibilidad LV

- ¿Analógico vs. digital?

Bloques aritméticos

$X, \Sigma, \phi$

Unidad almacenamiento

Pesos, val, inter., errores

Analógico

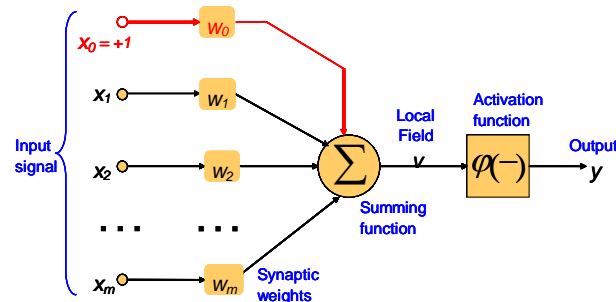
Registros digitales

con programabilidad digital

## Linealizadores: GMR

### Consideraciones de diseño

- Unidad de procesamiento: CMOS analógico con programabilidad digital



↓ area, ↓ consumo, ↑ velocidad

pesos programables en registros digitales

↓  
↑ flexibilidad, ↑ robustez

💣 mismatching

- ¿Modo tensión o modo corriente?

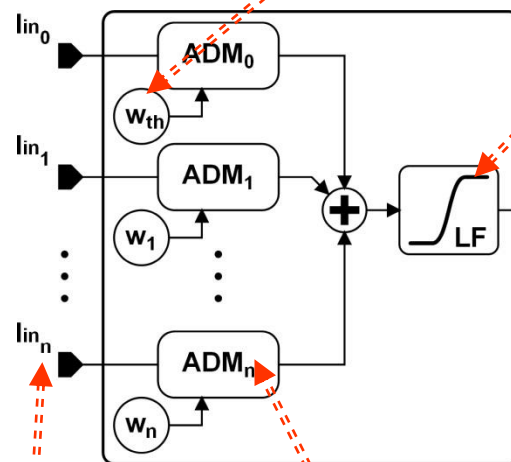
↓  
optimización diseño LV

## Linealizadores: GMR

### ANN: Perceptrón multicapa

- Arquitectura del procesador

Parámetros digitales (8 bits)



Función no lineal: sigmoide

estructura más común

✓ flexibilidad ajuste funcional

8 bits

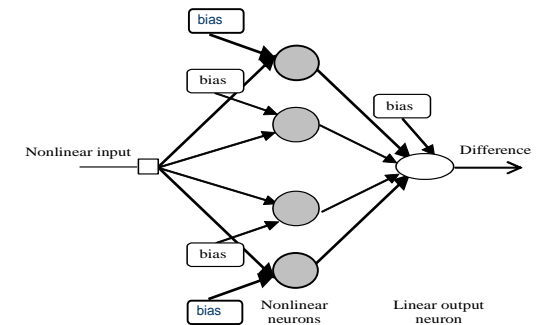
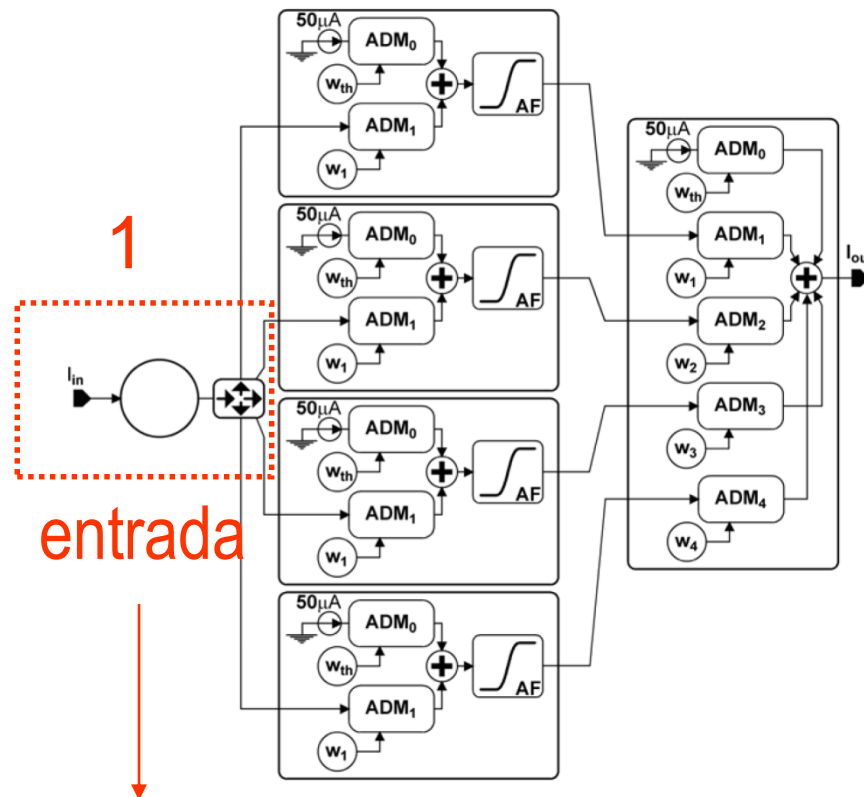
✓ compromiso tamaño-precisión

Multiplicador A/D

Entradas y salidas analógicas

## Linealizadores: GMR

### MLP: Arquitectura 1:4:1



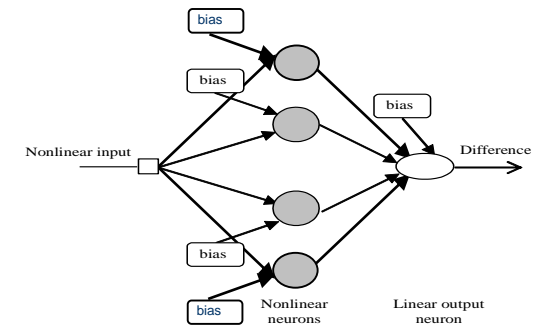
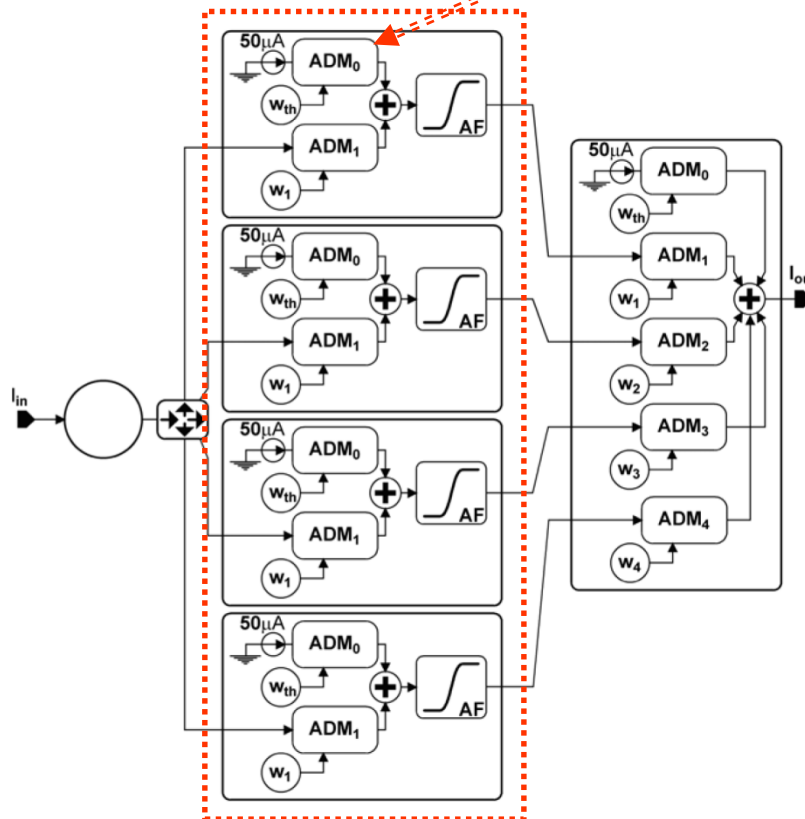
1 dato de entrada: señal en corriente

# Linealizadores: GMR

## MLP: Arquitectura 1:4:1

4

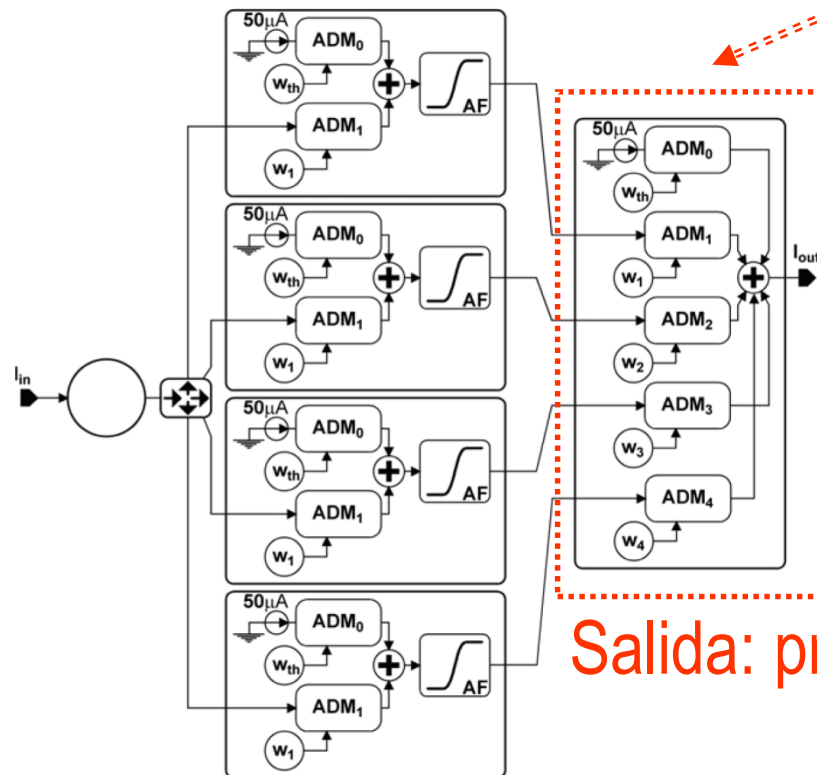
Umbral: entrada  $I_{bias}$  fija,  
peso programable



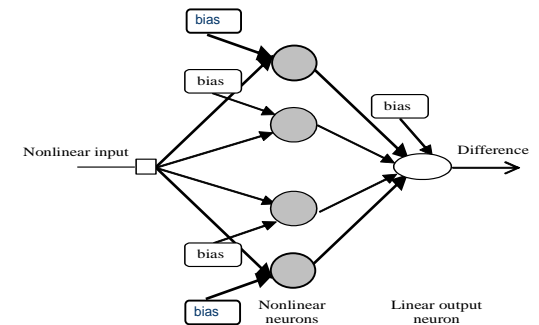
capa oculta: procesado no lineal

# Linealizadores: GMR

## MLP: Arquitectura 1:4:1



Umbral

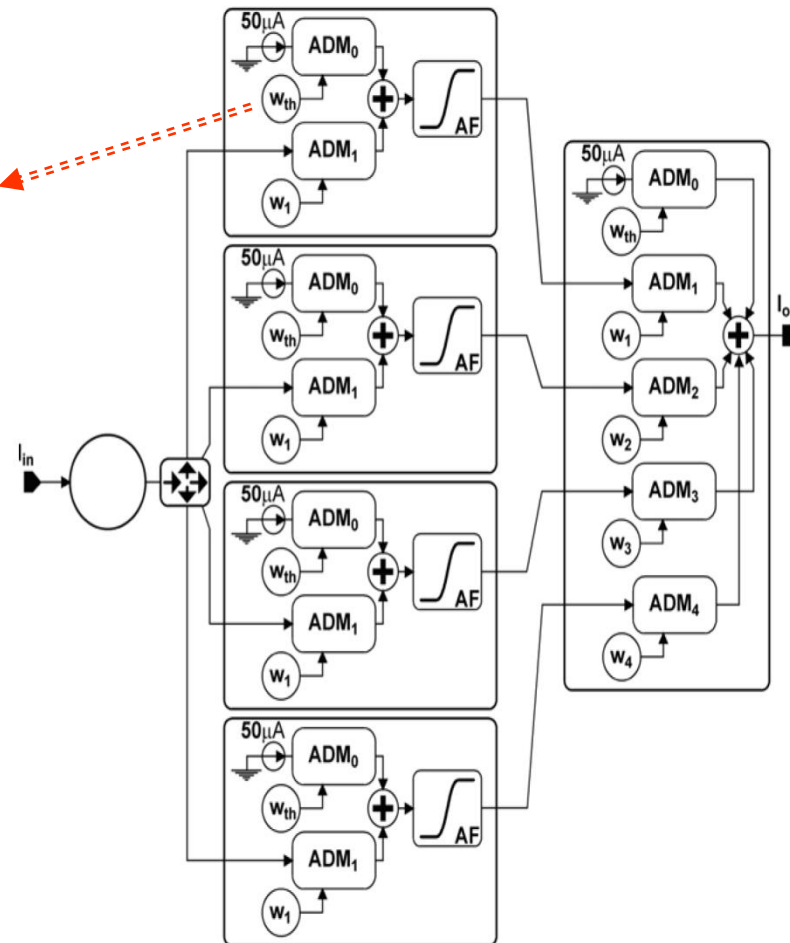


Salida: procesado lineal

# Linealizadores: GMR

## Unidad de almacenamiento

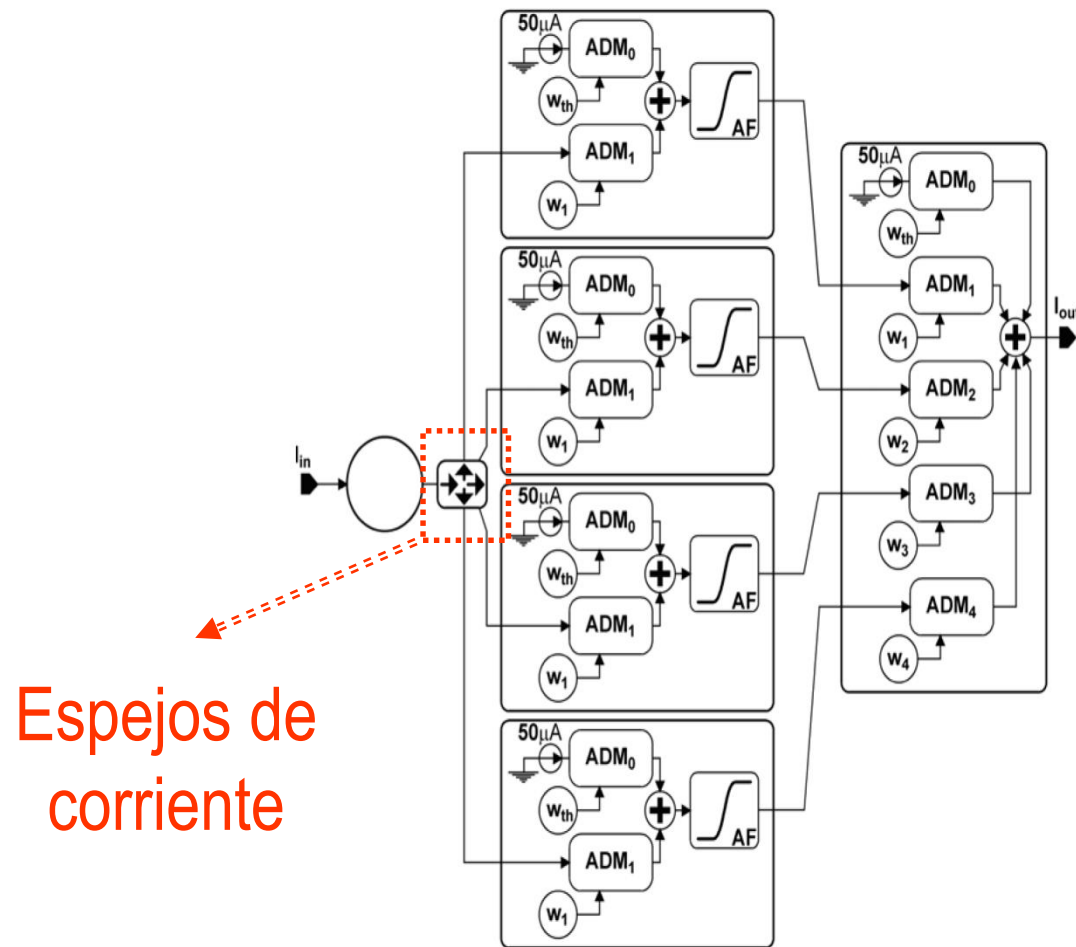
Pesos:  
registros 8 bits  
tipo D





# Linealizadores: GMR

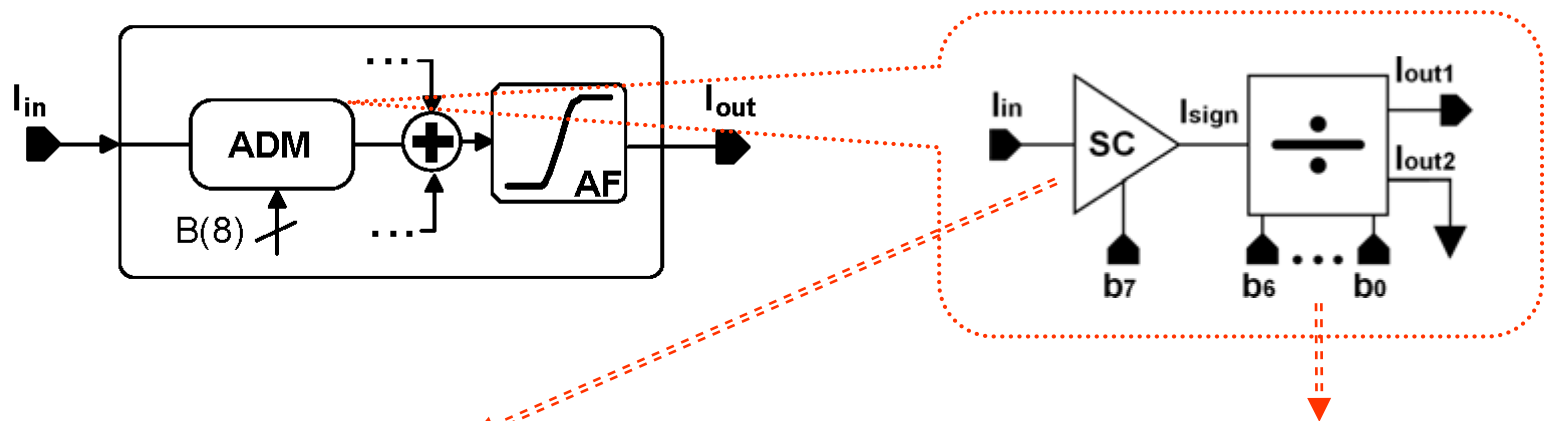
## Bloques aritméticos



## Linealizadores: GMR

### Bloques aritméticos

- Multiplicador analógico-digital (ADM) de 8 bits



#### Sign Circuit (SC)

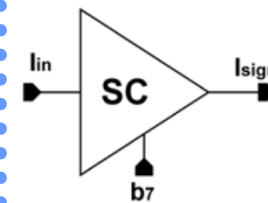
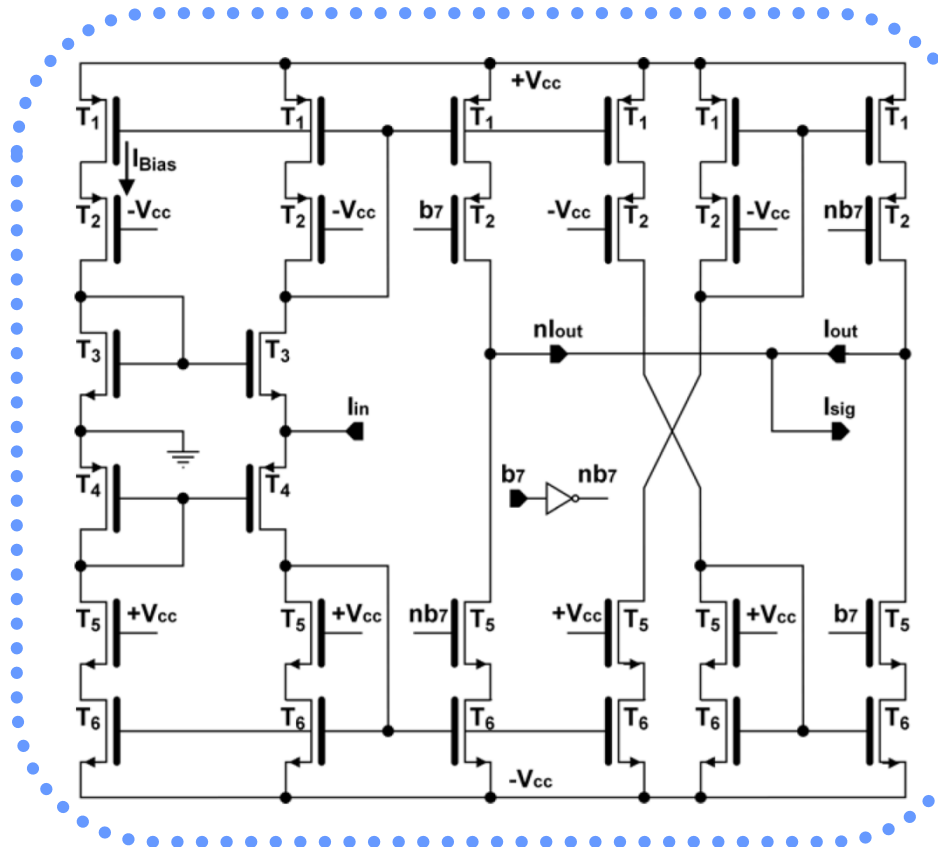
Selecciona el signo de la operación en función de  $b_7$

#### Multiplicador 7 bits

Multiplica la corriente de entrada por un factor 0-1

# Linealizadores: GMR

## ADM (8)



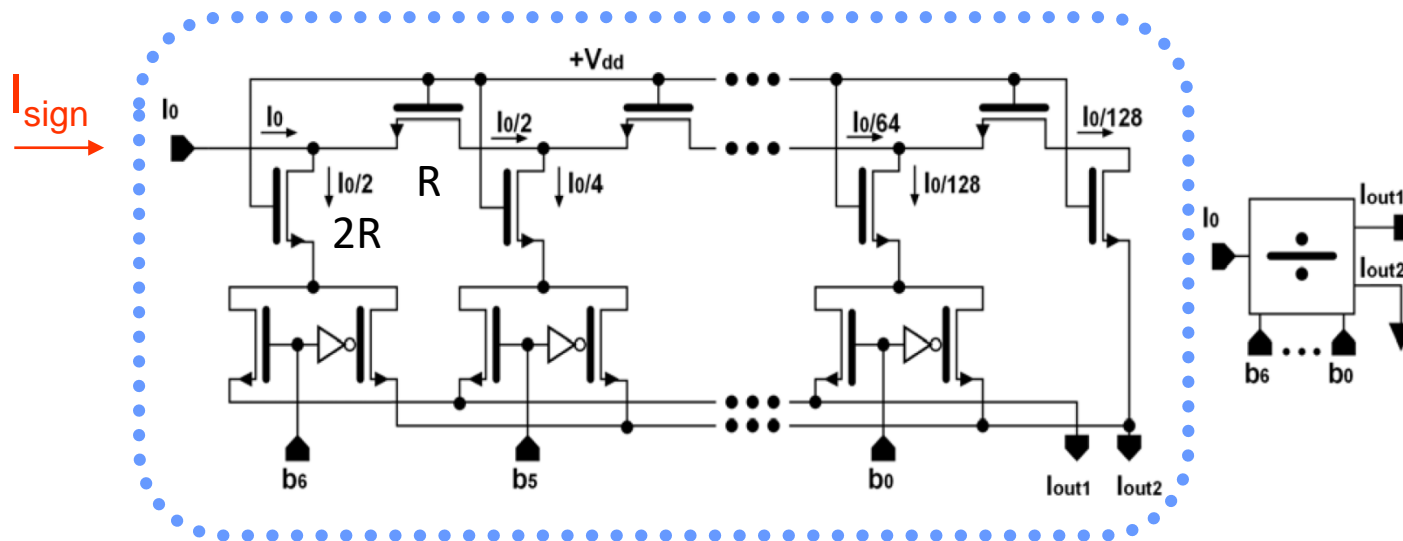
$$b_7 = 1 \Rightarrow I_{sig} = I_{out} = I_{in}$$

$$b_7 = 0 \Rightarrow I_{sig} = I_{nout} = -I_{in}$$

# Linealizadores: GMR

## ADM (8)

7-bit programmable MOS-based R-2R current ladder



$$I_{out1} = \Delta I_o$$

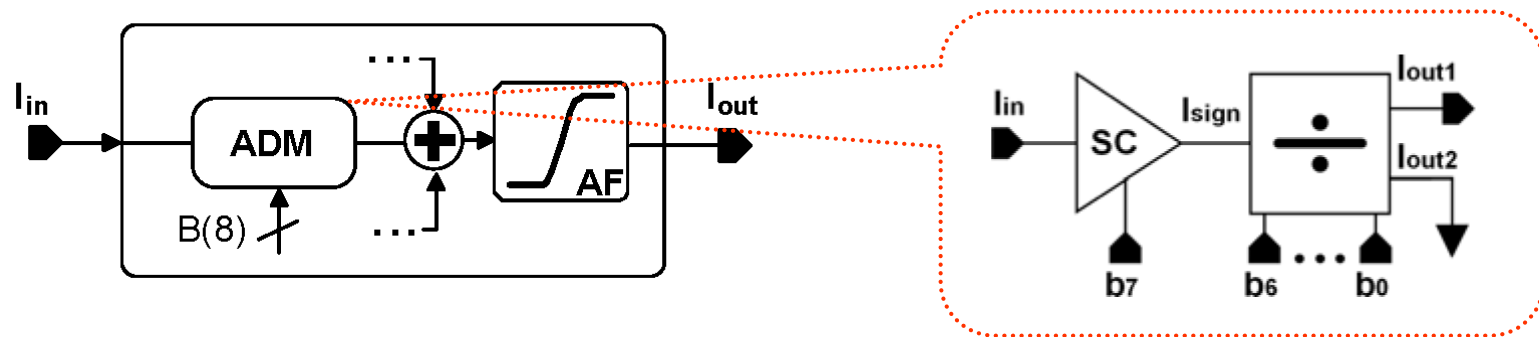
$$I_{out2} = (1 - \Delta) I_o$$

$$\Delta = \frac{1}{2^n} \left( \sum_{j=0}^{n-1} b_j 2^j \right) \quad \text{with } n = 7$$

## Linealizadores: GMR

### ADM(8)

- Multiplicador analógico-digital (ADM) de 8 bits

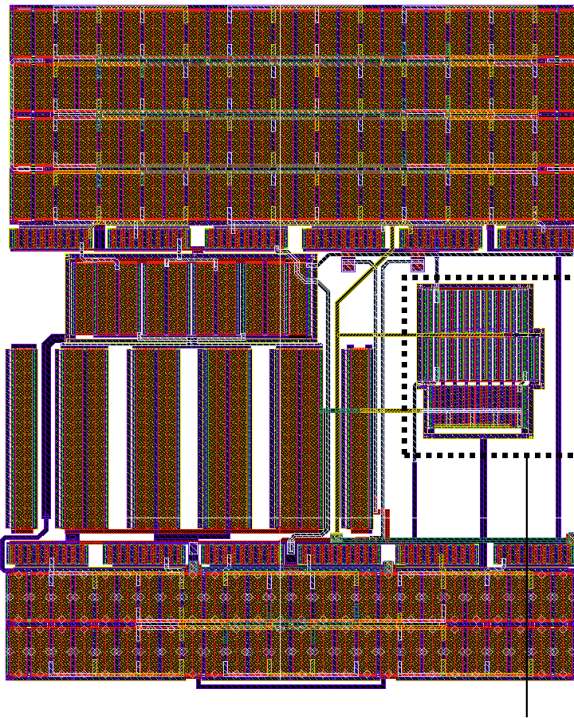


$$I_{out1} = w I_{in} \quad \wedge \quad w = (-1)^{b_7} \frac{1}{2^7} \left( \sum_{j=0}^6 b_j 2^j \right)$$

# Linealizadores: GMR

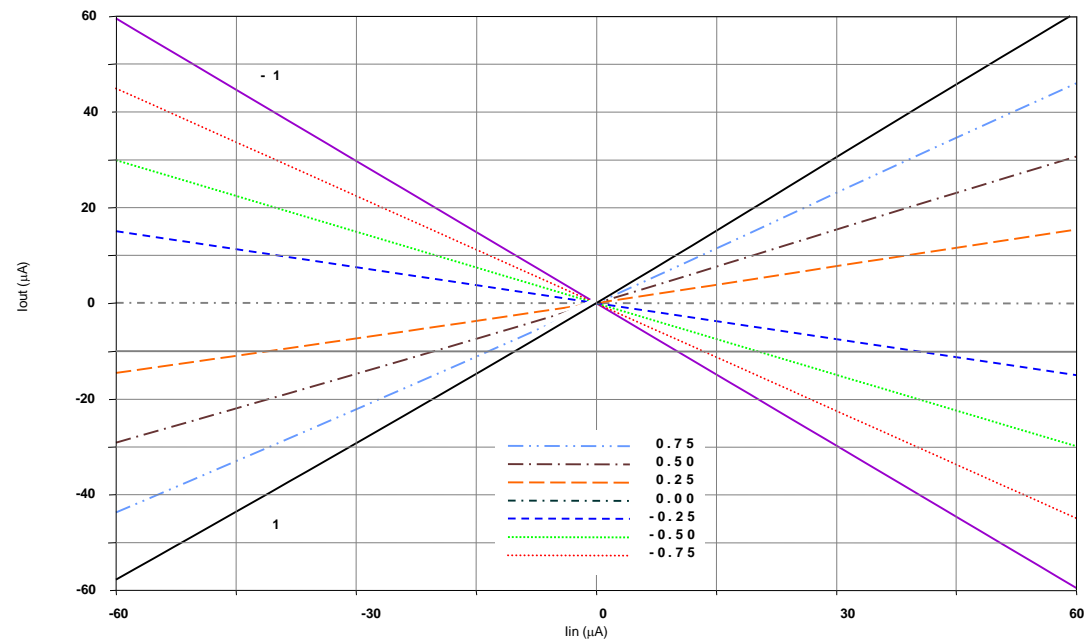
Layout AMS

3.3 V- 0.35  $\mu\text{m}$



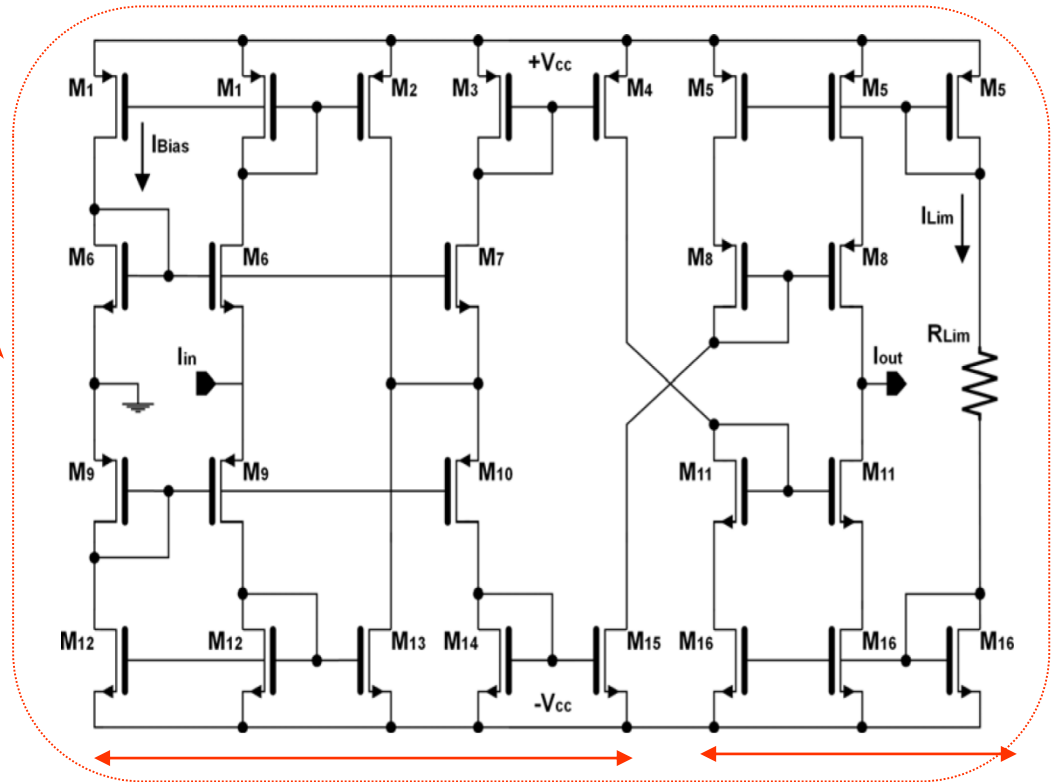
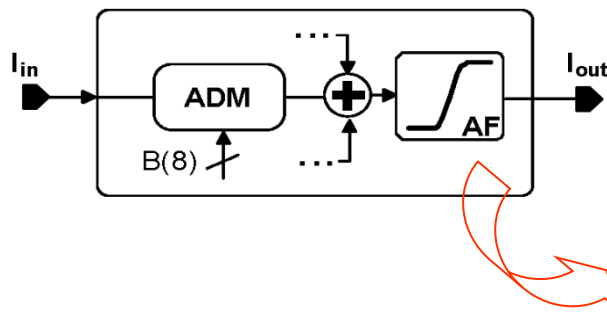
MOS R-2R

## Resultados



## Linealizadores: GMR

### Función Sigmoide



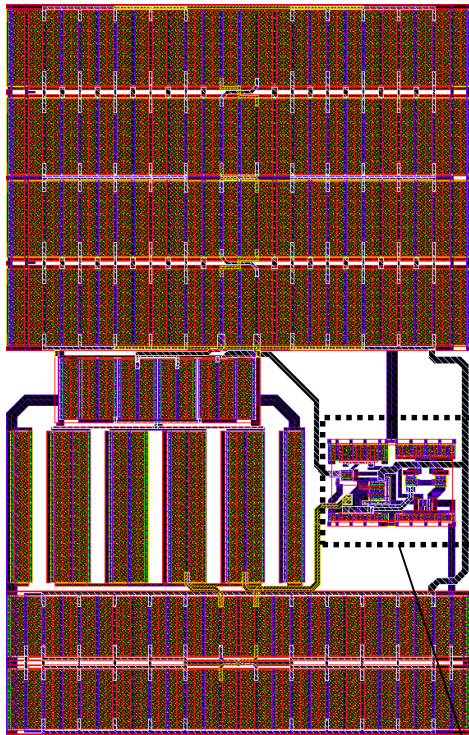
amplificador de  
corriente

limitador  
 $\pm 50\mu A$

## Linealizadores: GMR

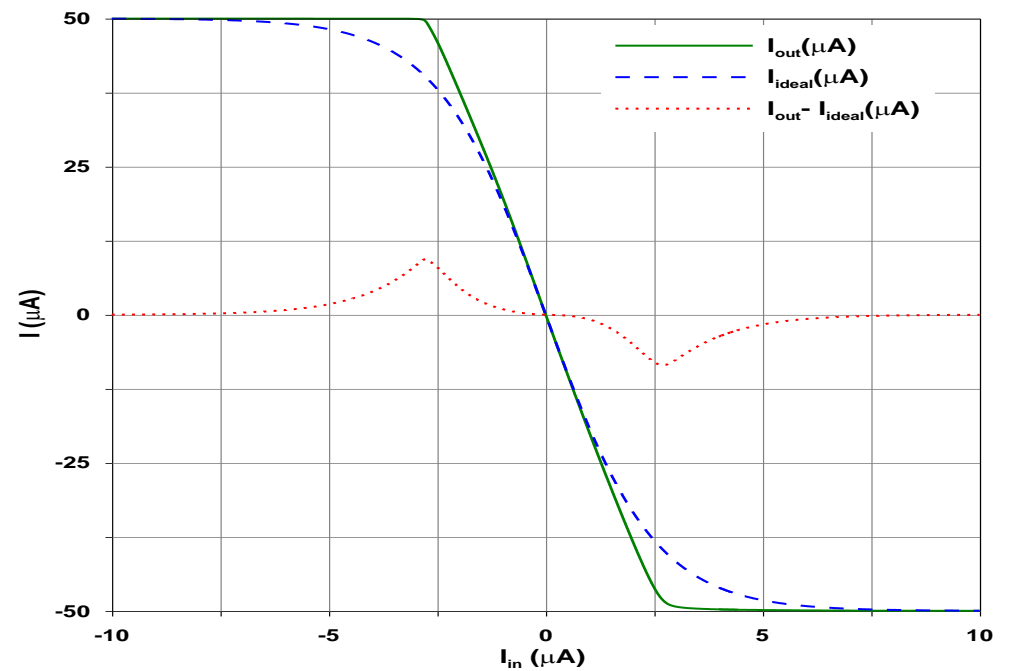
Layout AMS

3.3 V- 0.35  $\mu\text{m}$



limitador

## Resultados

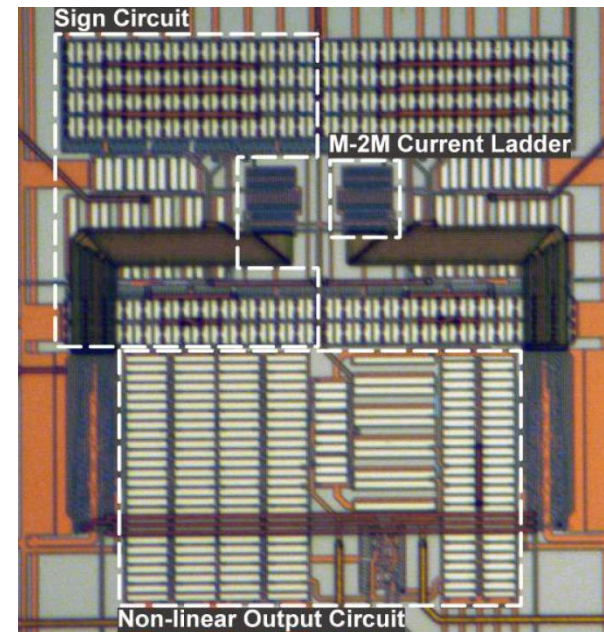




# Linealizadores: GMR

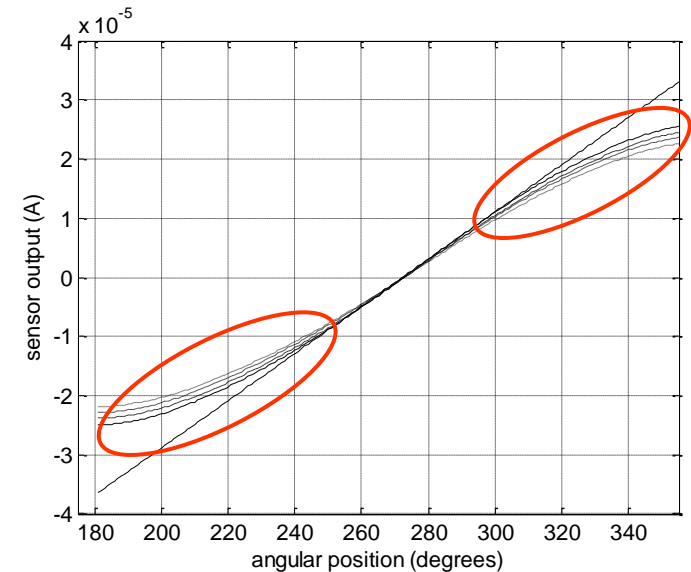
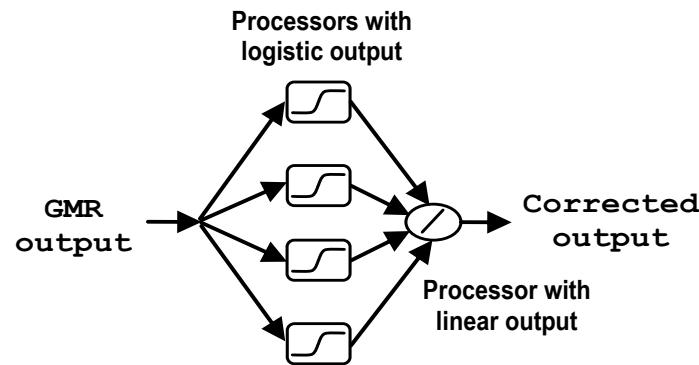
Sign Circuit	
Active area	$13 \times 10^{-3} \text{ mm}^2$
Max. input resistance	$13 \Omega$
Mean input resistance	$9 \Omega$
Min. output resistance	$31 \text{ k}\Omega$
Mean output resistance	$149 \text{ k}\Omega$
Maximum power	$541 \mu\text{W}$
Mean power	$457 \mu\text{W}$
$\pm V_{cc}$	$\pm 1.65 \text{ V}$
$b_7, nb_7$	$\pm 1.65 \text{ V}$
$I_{Bias} (I_{in}=0)$	$30 \mu\text{A}$
M-2M ladder	
Active area	$165.4 \mu\text{m}^2$
Input resistance	$325 \Omega$
Min. output resistance	$410 \Omega$
Mean output resistance	$615 \Omega$
Quiescent power	$79 \text{ pW}$
$+V_{dd}$	$1.65 \text{ V}$
$b_n$	$\pm 1.65 \text{ V}$
Non-linear circuit	
Active area	$4.73 \times 10^{-3} \text{ mm}^2$
Max. input resistance	$13 \Omega$
Mean input resistance	$9 \Omega$
Min. output resistance	$12 \text{ k}\Omega$
Mean output resistance	$15 \text{ k}\Omega$
Maximum power	$2.0 \text{ mW}$
Mean power	$1.8 \text{ mW}$

**MLP 1:4:1**



## Linealizadores: GMR

- Estructura: MPL 1:4:1



- Aplicación: **linealización de un sensor GMR**

allowable error: 1 degree in the estimation of the angular pos.

Programabilidad: **procesado adaptativo**



compensar errores reajustando pesos

## Linealizadores: GMR

### Aprendizaje: perturbativo

#### ❖ Ajuste de los pesos:

- ✓ Robusto ante variaciones en el comportamiento de los circuitos (hasta 30%)

- ✓ Rápido

1 .  $W' = W + [pert_{ij}]$

2 .  $E = rms(\sum_k (o_k - f(W')))$

Disminuye el error → Actualiza pesos

## Linealizadores: GMR

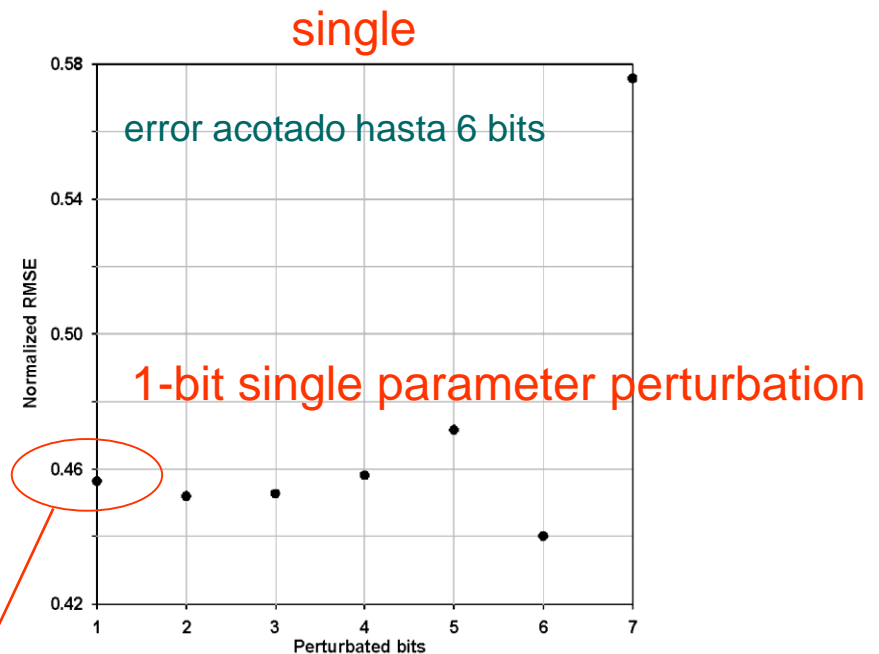
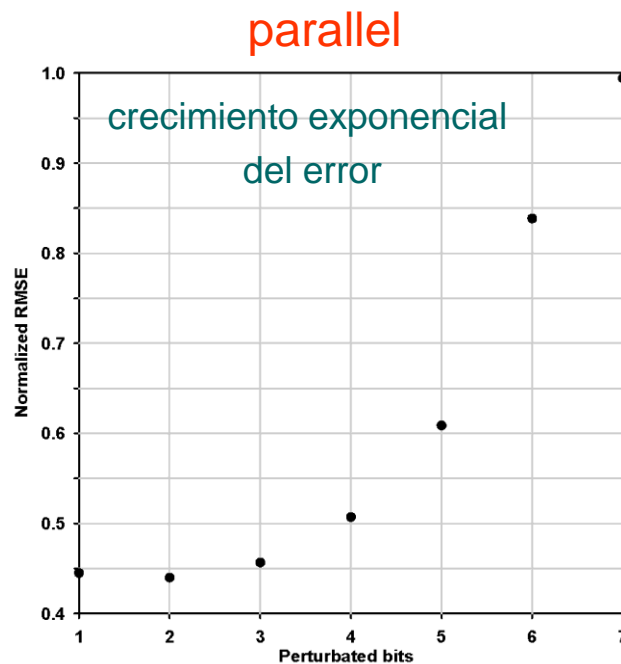
### Aprendizaje perturbativo

- Dos métodos
  - Parallel perturbation: modificación de todos los pesos en la red, cada uno con una perturbación aleatoria
  - Single parameter perturbation: modificación de un solo peso en la red, con una perturbación aleatoria
- Condiciones de test:
  - 10 entrenamientos, limitados a 400 iteraciones
  - Calculamos el error promedio RMS de estos 10 entrenamientos

## Linealizadores: GMR

### Aprendizaje perturbativo

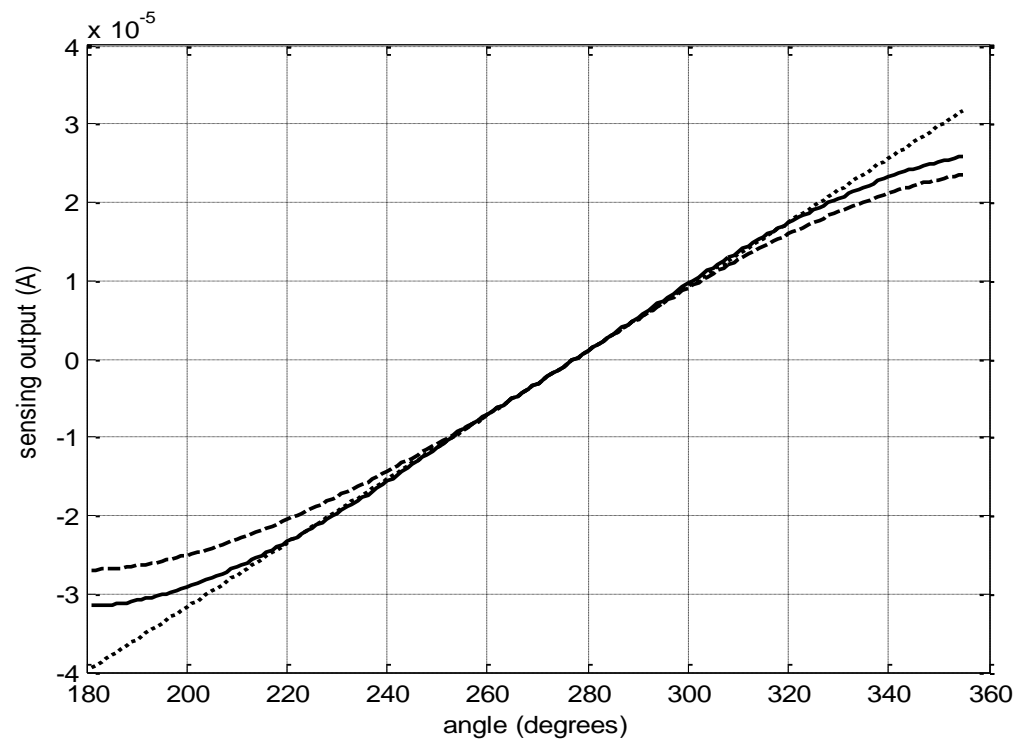
- Resultados



Solución más sencilla cumpliendo especificaciones

## Linealizadores: GMR

### Resultado



Incremento global  
del rango  
en un 125%

## Linealizadores: GMR

### Efectos de mismatch

*Linearization results for a GMR sensor for the complete conditioning circuit affected by mismatching*

Simulation #	Angle (min)	Angle (max)	Improvement
Basic sensor	252	305	-----
Mismatch Case #1	215	331	119%
Mismatch Case #2	215	331	119%
Mismatch Case #3	216	323	102%
Mismatch Case #4	214	323	106%
Mismatch Case #5	214	329	117%
Mismatch Case #6	214	323	106%
Mismatch Case #7	211	323	111%
Mismatch Case #8	206	324	122%
Mismatch Case #9	214	323	106%
Mismatch Case #10	214	322	104%
Mean Results	216	322	100%



Incremento global  
del rango  
en un 100% incluso  
con mismatch



El procesador adaptativo  
trabaja adecuadamente  
compensando los efectos  
de mismatch

## Linealizadores: GMR

### ¿Siguiente paso?

Compensación en Temperatura

+

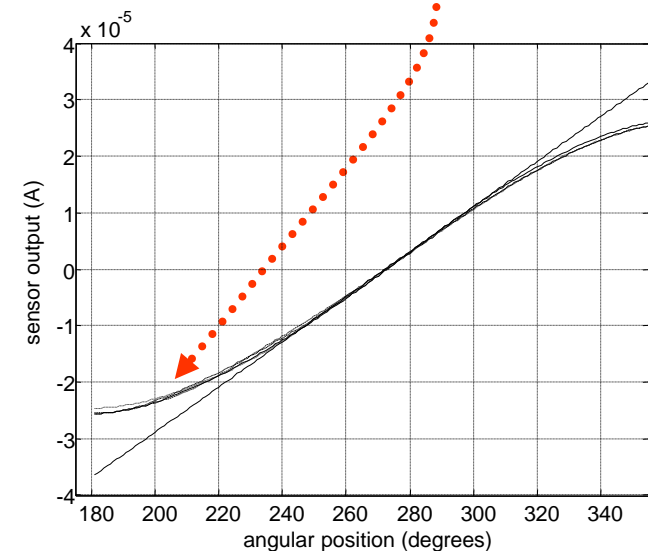
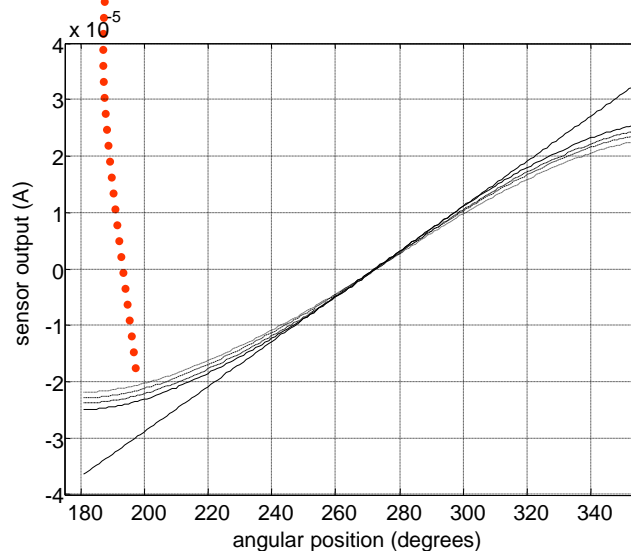
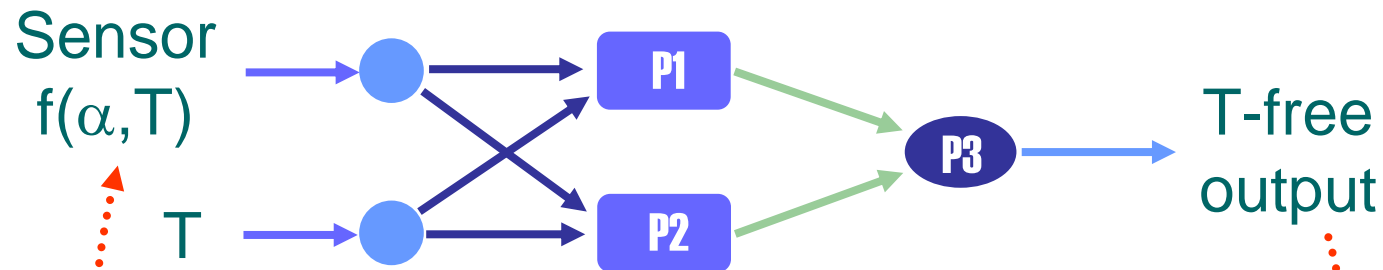
Linealización de la salida del GMR



# Linealizadores: GMR

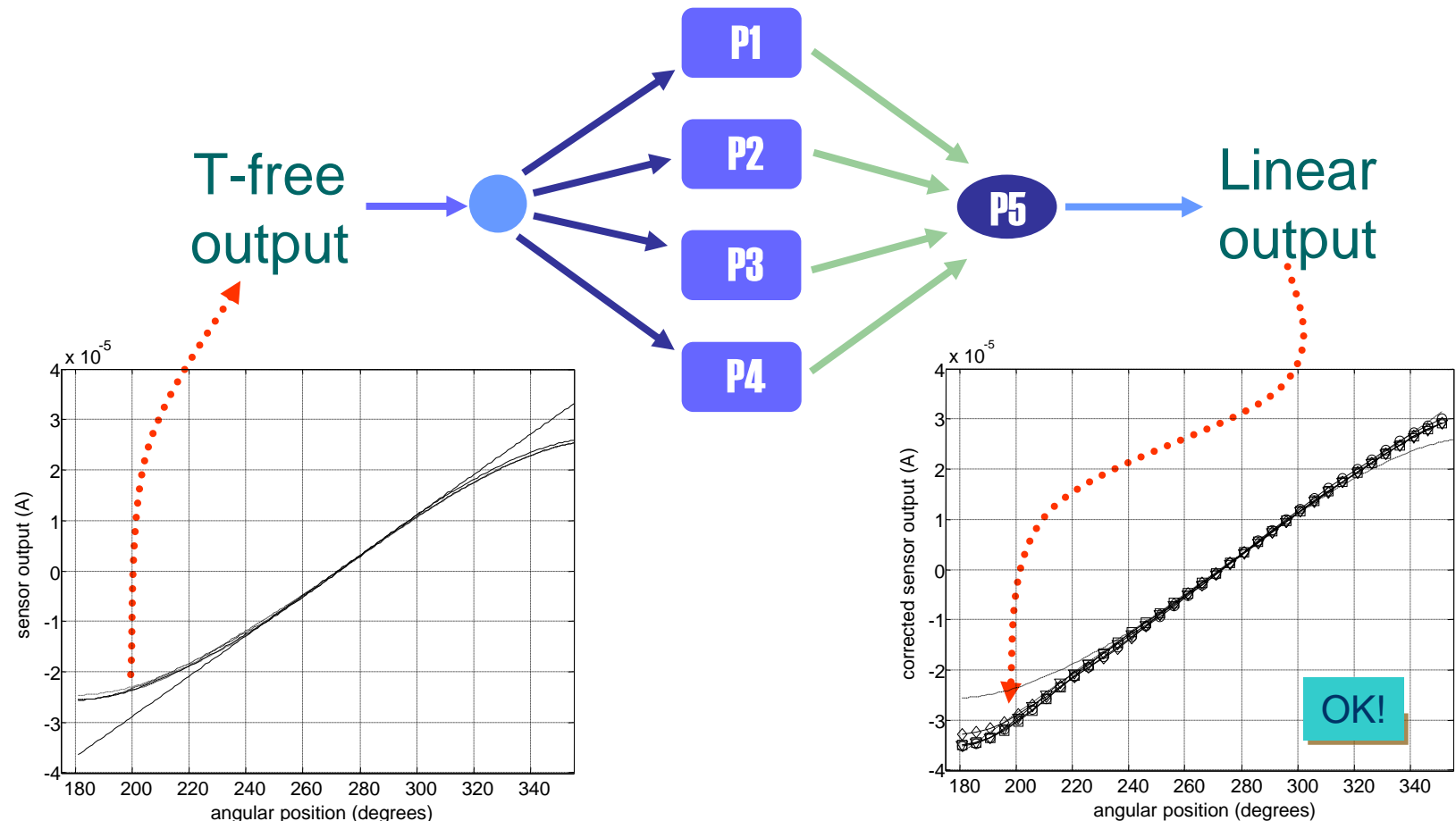
## Primer paso: compensación de T

MPL 2:2:1



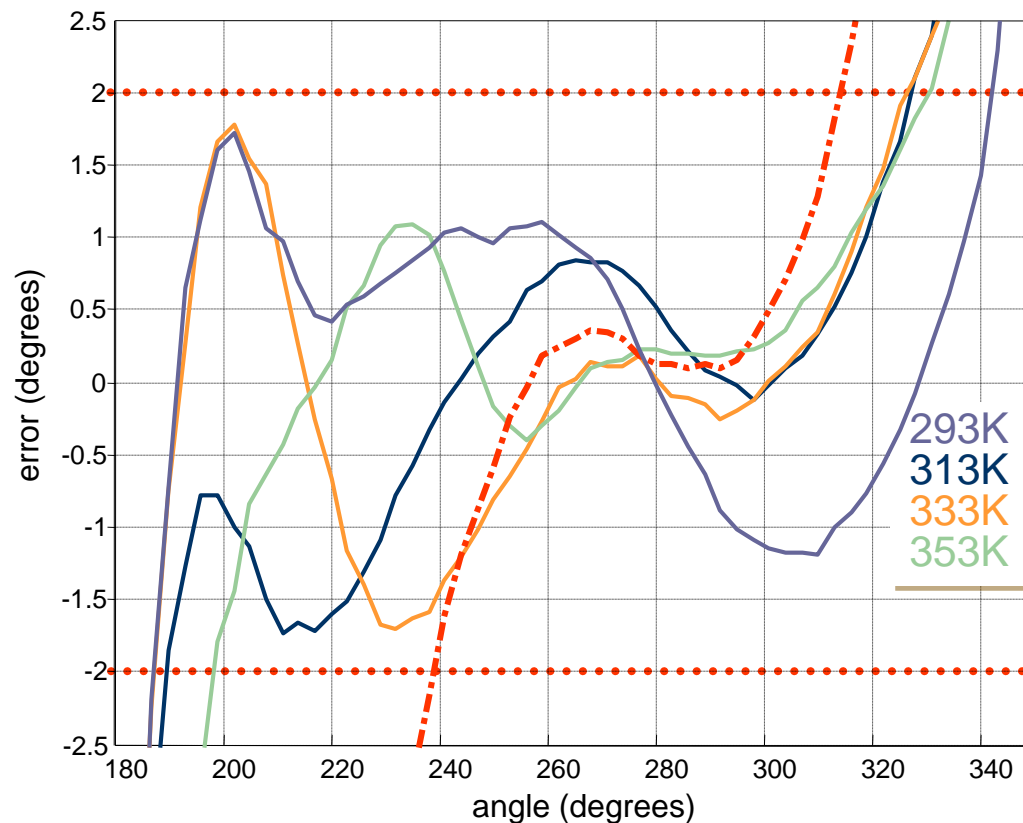
## Linealizadores: GMR

### Segundo paso: linealizar la salida



## Linealizadores: GMR

### Resultados



- Incremento global del rango en un 72%
- Sistema robusto ante efectos no deseados