

EL AMPLIFICADOR OPERACIONAL

Universidad de Oviedo

CONTENIDO

1º AMPLIFICADORES

2º AMPLIFICADOR OPERACIONAL

3º CIRCUITOS BÁSICOS

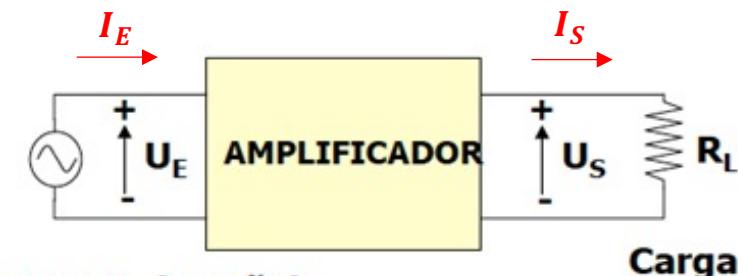
Universidad de Oviedo

Amplificación

¿Qué es un amplificador?

Dispositivo capaz de elevar el nivel de potencia de una señal.

(En nuestro caso eléctrica: V o I)



Fuente de señal
(Información)

Objetivo ideal

$$P_E = 0$$

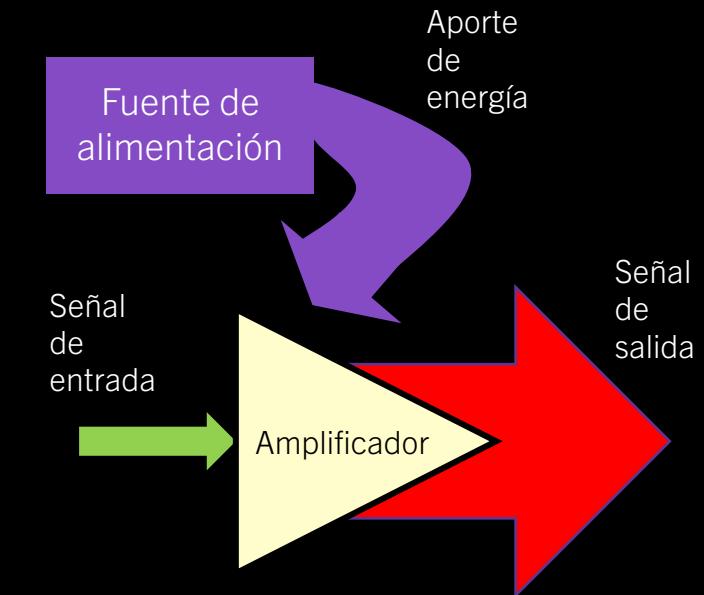
$$P_S = \infty$$

(Entiendase, la que se quiera)

La información en la fuente de señal puede estar presente en forma de tensión (V_E) o en forma de corriente (I_E).

A la salida (en la carga), la información se puede entregar (con mayor potencia) pero en forma de tensión (V_S) o de corriente (I_S).

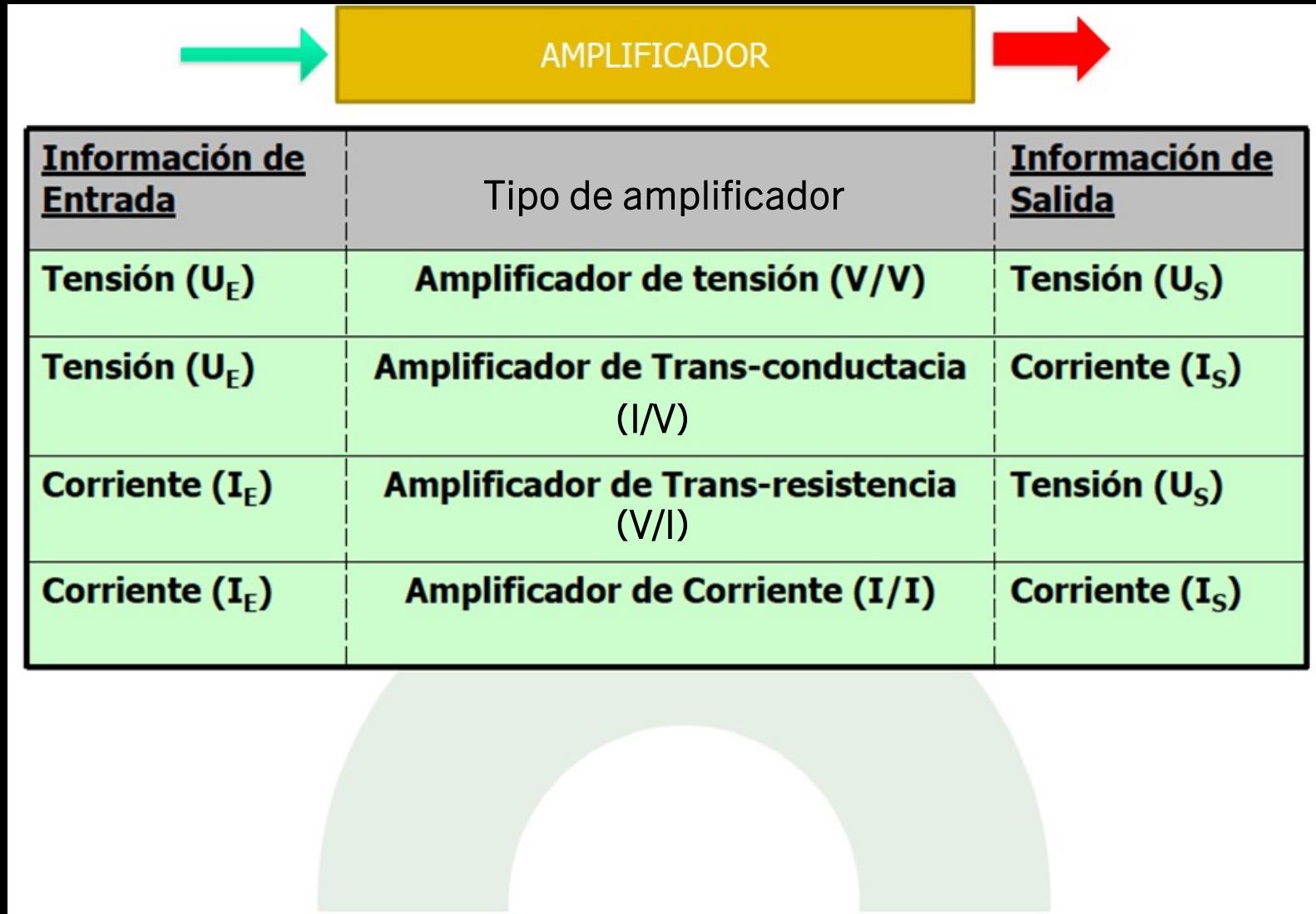
Las combinaciones se recogen en la siguiente tabla:



$$A_P = \frac{P_S}{P_E} = \frac{U_S I_S}{U_E I_E}$$

Amplificación

Tipos de Amplificadores



Ganancia (gain)

Relación entre la variable de interés en la salida y la variable de interés en la entrada.

Indica cuando aumenta la señal gracias al amplificador.

$$G = \frac{\text{señal en la salida}}{\text{señal en la entrada}}$$

Cuatro tipos de ganancia.

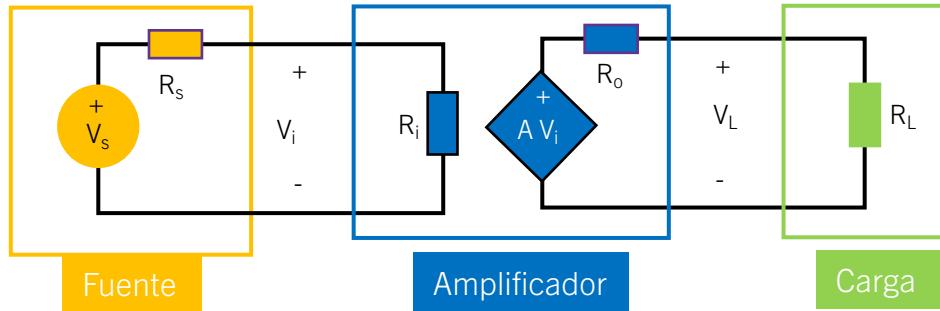
Los amplificadores reciben el mismo nombre que la ganancia que los caracteriza

En la mayoría de los casos las señales de entrada y salida son tensiones.

La **ganancia de tensión** es adimensional:

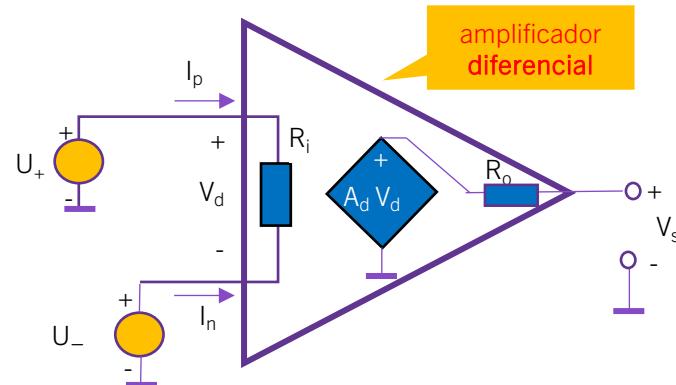
$$A_V = \frac{U_S}{U_E}$$

Modelo de amplificador

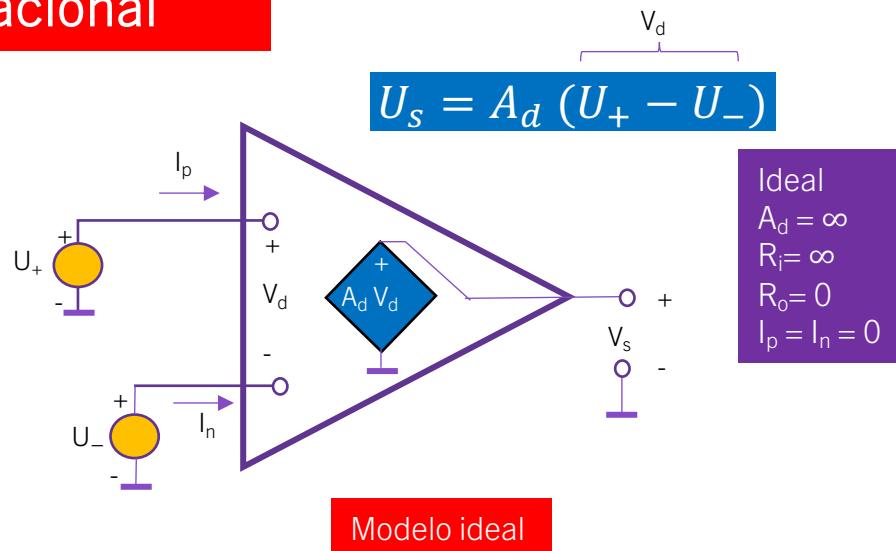


A : ganancia
 R_i : impedancia de entrada
 R_o : impedancia de salida

Modelo de amplificador operacional



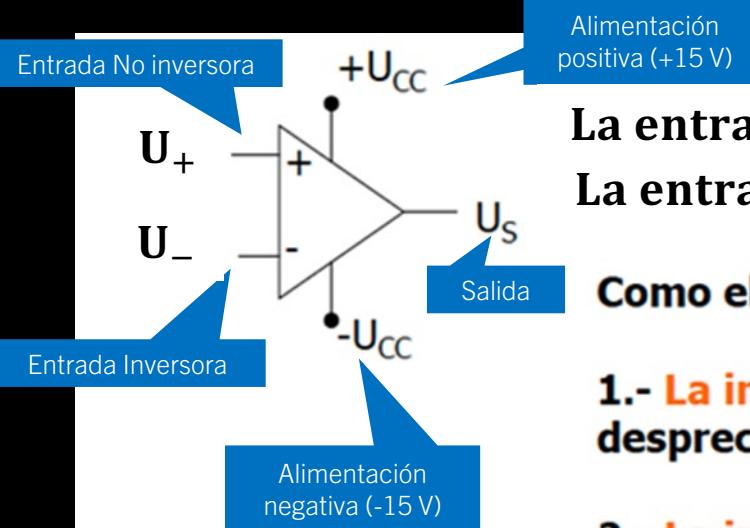
Modelo de un amplificador operacional
(amplifica la diferencia de tensión)



Ideal
 $A_d = \infty$
 $R_i = \infty$
 $R_o = 0$
 $I_p = I_n = 0$

Amplificador operacional

Esquema eléctrico



La entrada U_+ la denominamos **entrada no inversora**
La entrada U_- la denominamos **entrada inversora**

Como elemento ideal consideraremos:

- 1.- **La impedancia de entrada es ∞ . Es decir despreciaremos las corrientes por las entradas.**
- 2.- **La impedancia de salida es cero. Es decir teóricamente puede aportar toda la corriente que haga falta.**
- 3.- **La ganancia diferencial es ∞ .**

$$U_s = A_d (U_+ - U_-)$$

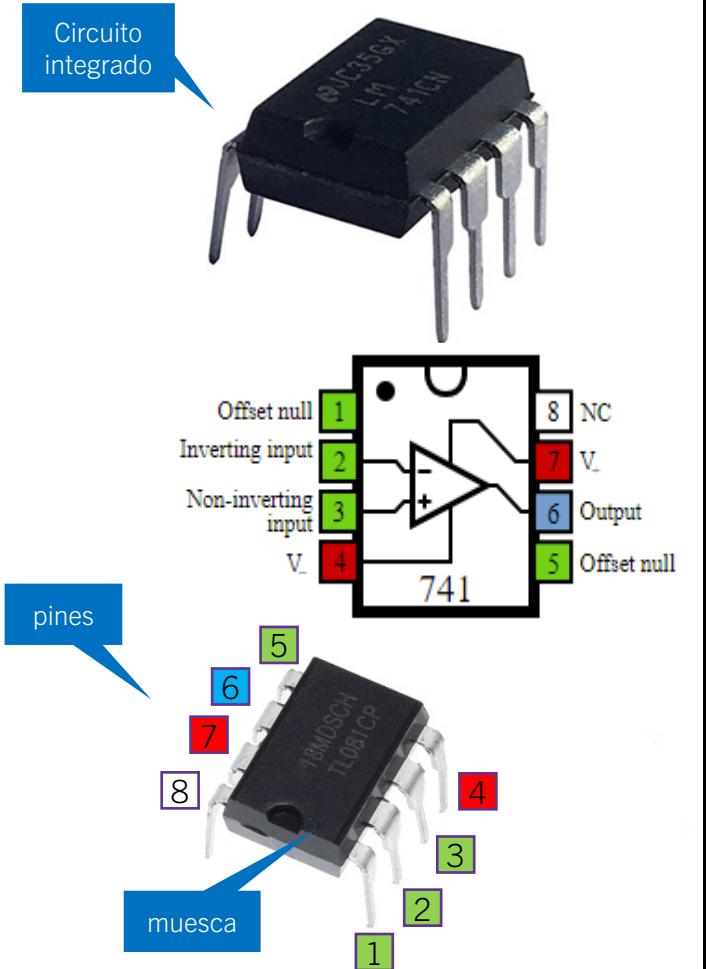
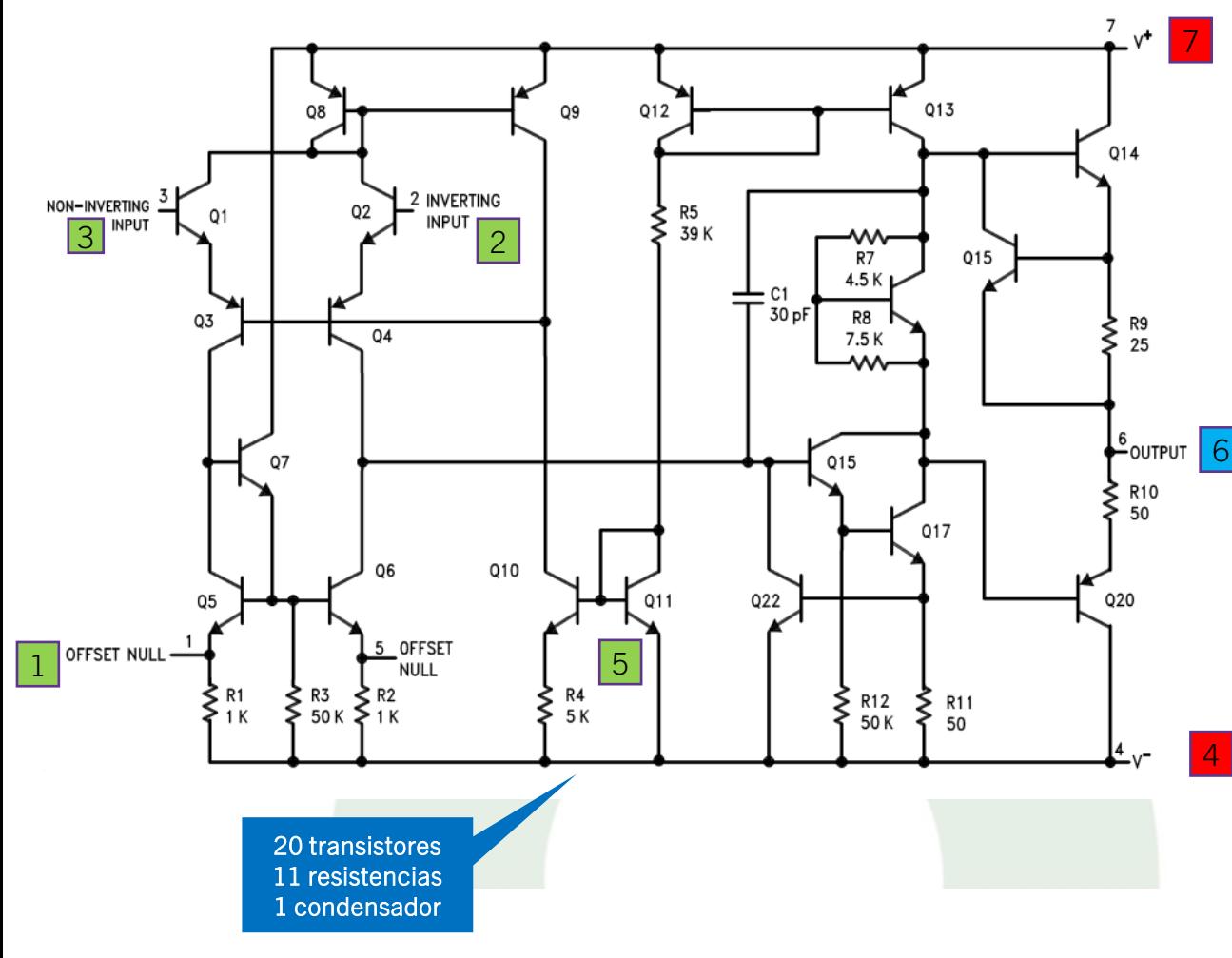
$$A_d \rightarrow \infty$$

Modelo ideal

Ideal
 $A_d = \infty$
 $R_i = \infty$
 $R_o = 0$
 $I_p = I_n = 0$

Amplificador operacional

Diagrama de bloques funcional



Amplificador operacional

Aplicaciones

No lineales

$$A_d \rightarrow \infty$$

$$U_s = A_d (U_+ - U_-)$$

Fijarse que al ser la ganancia A_d muy elevada si:

$U_+ > U_-$ entonces $U_s = +\infty$ (a efectos prácticos $U_s = +U_{cc}$)

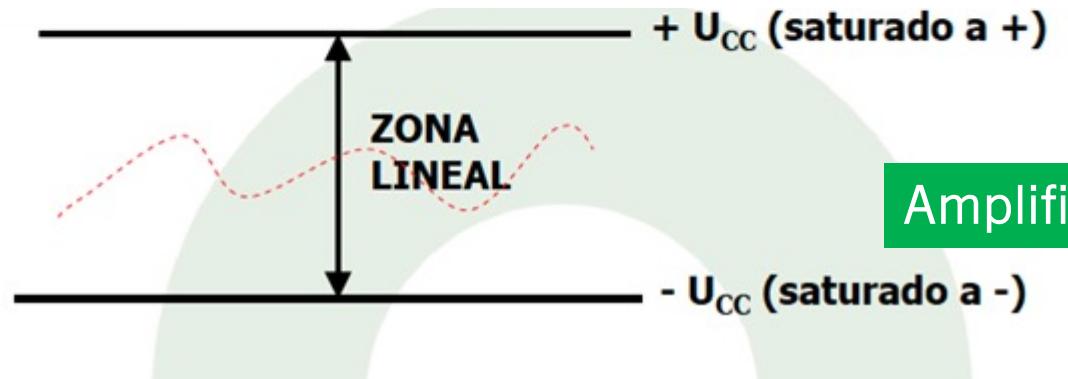
$U_+ < U_-$ entonces $U_s = -\infty$ (a efectos prácticos $U_s = -U_{cc}$)

Se dice que el amplificador trabaja a saturación.

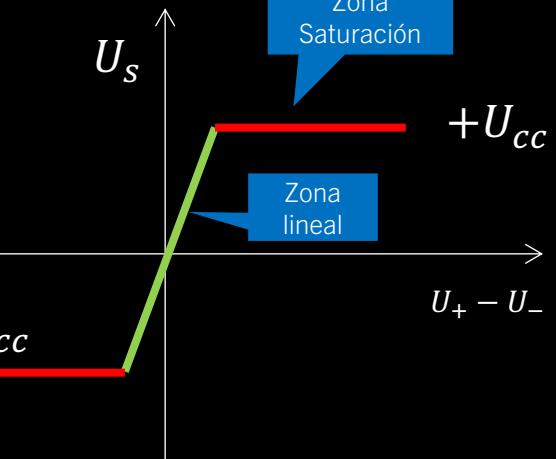
Comparadores

Lineales

Solamente si conseguimos que $U_+ = U_-$ podremos obtener tensiones de salida comprendidas entre las alimentaciones



Amplificadores



Sin realimentación

Realimentación positiva

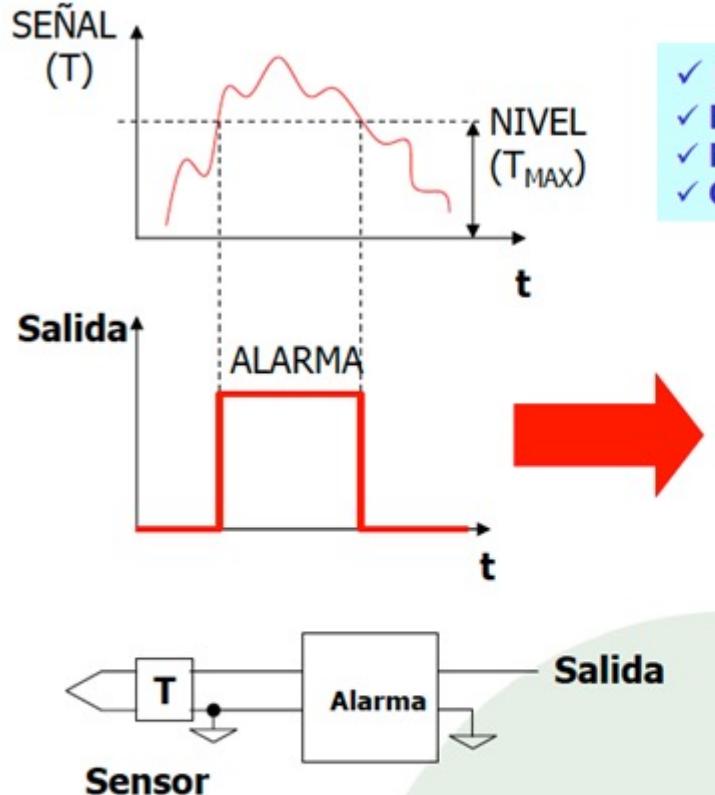
Realimentación

Una parte de la señal de salida se lleva a la entrada

Realimentación negativa

Amplificador operacional

Aplicaciones no lineales



Comparadores

Sin realimentación

- ✓ El AO trabaja en saturación.
- ✓ No precisa realimentación.
- ✓ No precisa alimentación simétrica.
- ✓ Conocer la tensión de alimentación es relevante.

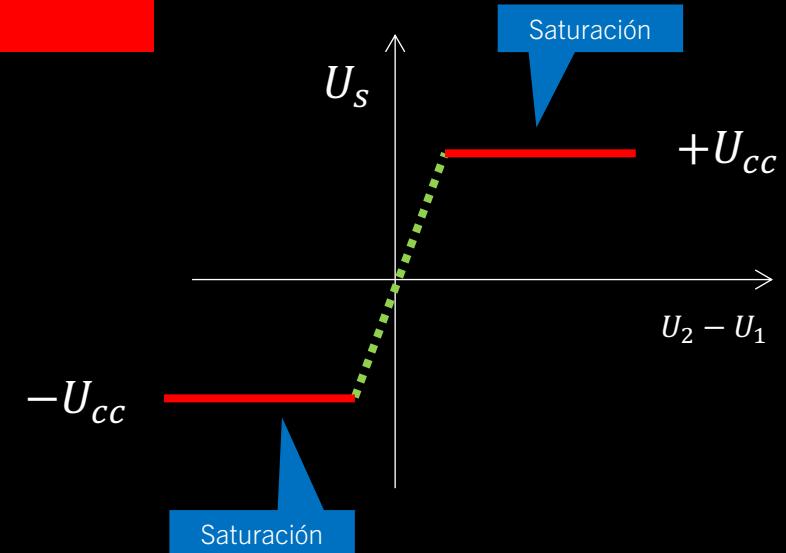
INTERFACE DE ALARMAS:

Pilotos avisadores

Bocinas

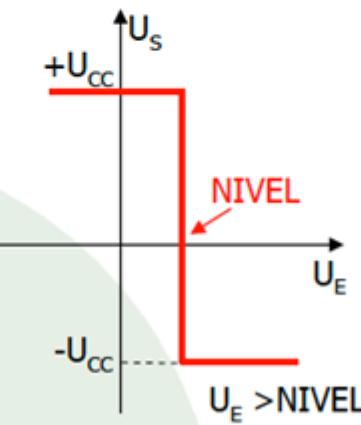
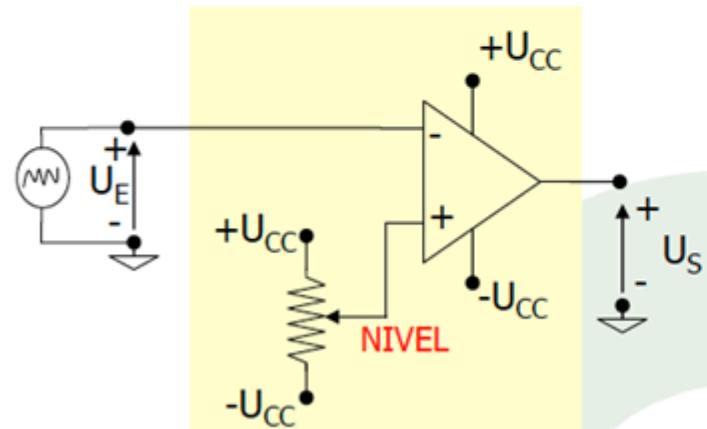
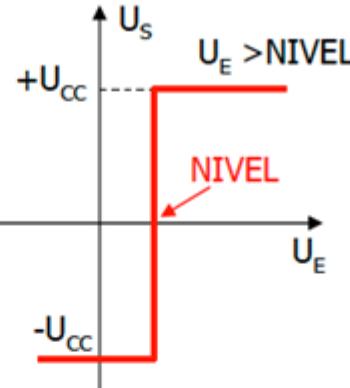
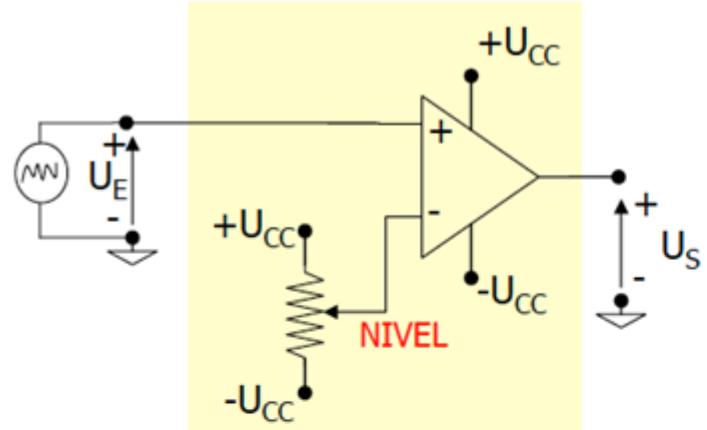
Relés

Salida digital



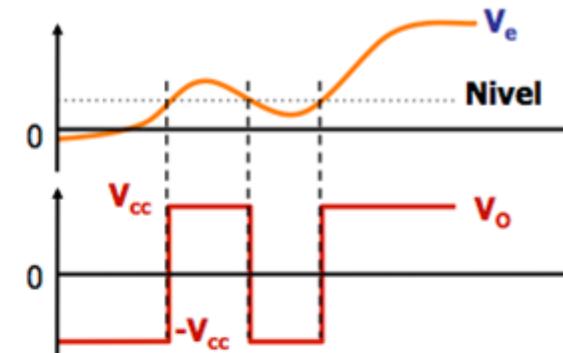
Amplificador operacional

Aplicaciones no lineales



Comparadores

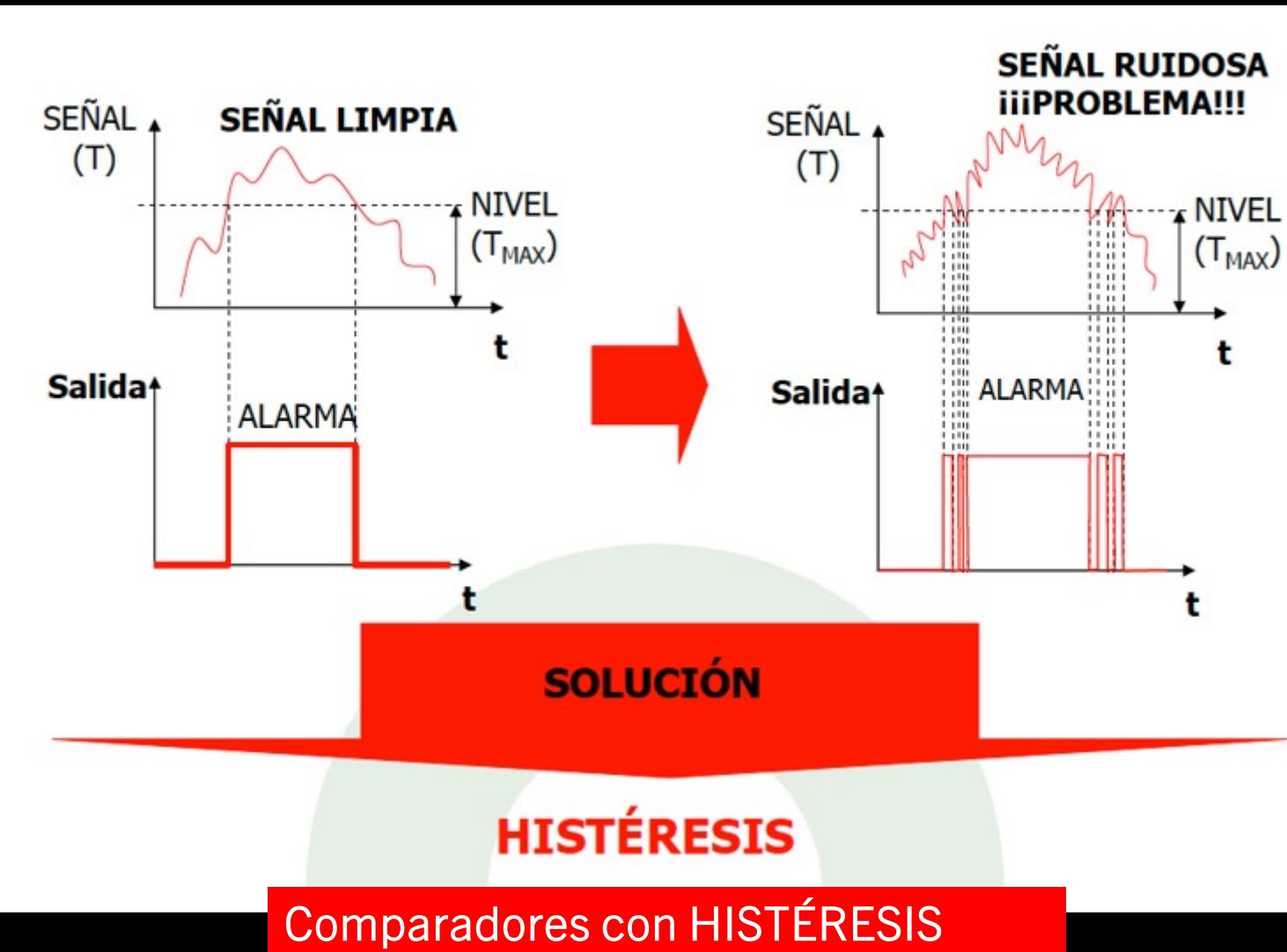
Sin realimentación



$$A_d \rightarrow \infty$$

$$U_S = A_d(U_+ - U_-)$$

Aplicaciones no lineales



Amplificador operacional

Aplicaciones no lineales

Se utilizan dos niveles de comparación. La señal debe ser mayor que un nivel o menor que otro para conmutar la salida

Nivel superior

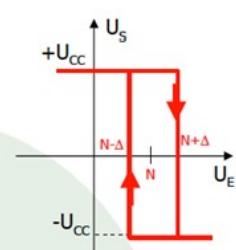
SEÑAL (T)

Nivel inferior

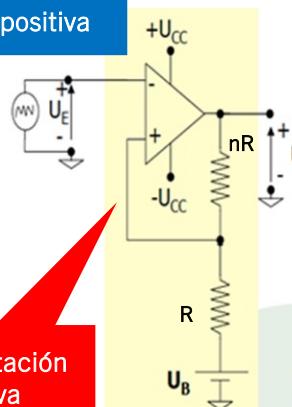
Eliminación de ruidos mediante un comparador con histéresis

Ancho de histéresis

Comparadores con HISTÉRESIS



Realimentación Positiva



$$N(\text{nivel}) = U_B \frac{n}{n+1}$$

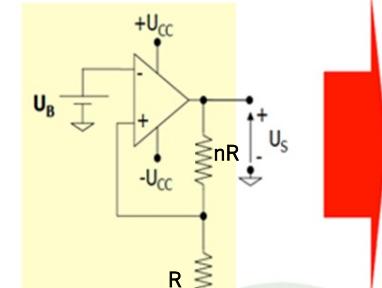
$$\Delta = \frac{U_{cc}}{n+1}$$

Fórmulas para calcular el ciclo de histéresis

Realimentación positiva

Comparadores

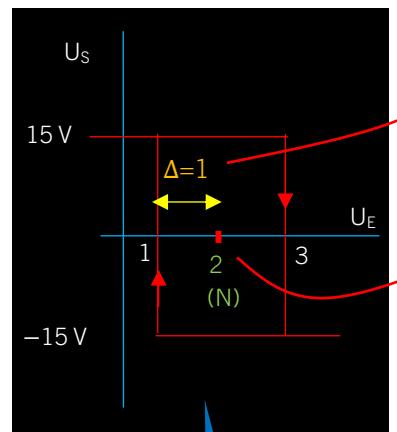
con realimentación positiva



$$N(\text{nivel}) = U_B \frac{n+1}{n}$$

$$\Delta = \frac{U_{cc}}{n}$$

Amplificador operacional



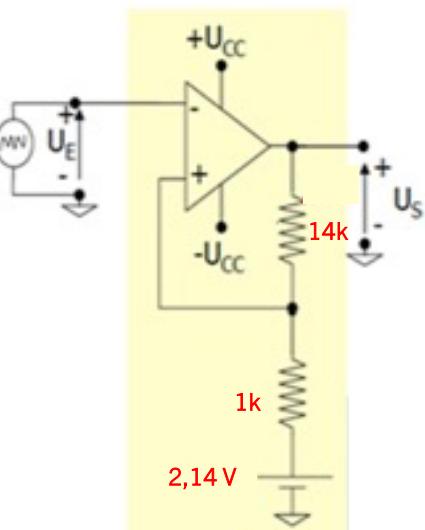
Diseño

1 Calculo n de $\Delta = \frac{U_{cc}}{n + 1}$

$$1 = \frac{U_{cc}}{n + 1} \rightarrow n = U_{cc} - 1 = 14$$

2 Calculo U_B de $N(nivel) = U_B \frac{n}{n + 1}$

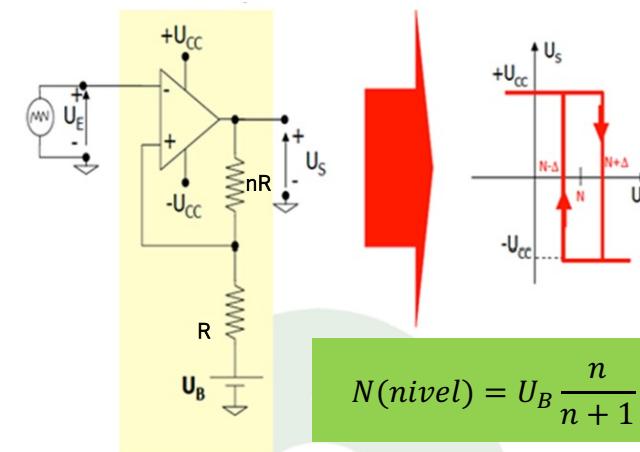
$$2 = U_B \frac{14}{15} \rightarrow U_B = \frac{30}{14} = 2,14 V$$



Ciclo de histéresis

Comparadores con HISTÉRESIS

realimentación positiva

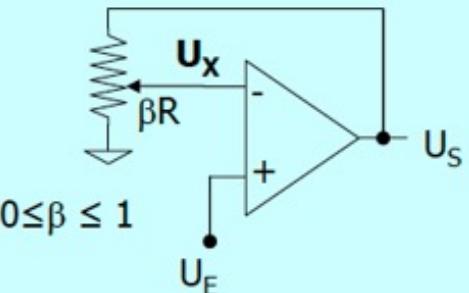


$$N(nivel) = U_B \frac{n}{n + 1}$$

$$\Delta = \frac{U_{cc}}{n + 1}$$

Fórmulas para calcular el ciclo de histéresis

Negativa



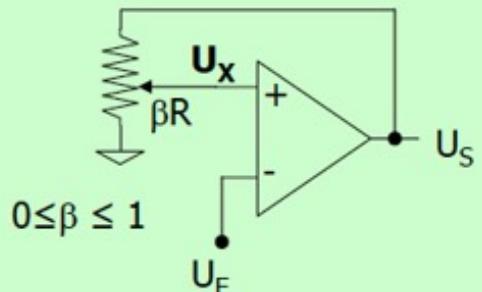
NEGATIVA
Operación estable.

Si
 U_S aumenta
entonces
 U_X aumenta
entonces
 U_S disminuye

EQUILIBRIO



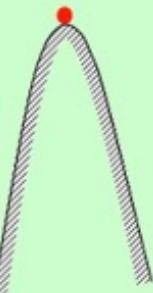
Positiva



POSITIVA
Operación inestable.

Si
 U_S aumenta
entonces
 U_X aumenta
entonces
 U_S aumenta

ACABA SATURÁNDOSE



¡¡ CUIDADO!!
Fijarse en la
realimentación
¡La aplicación es
muy distinta!

Amplificadores

Comparadores

Amplificador operacional

Aplicaciones lineales

Realimentación negativa

$$U_s = A U_d = A (U_E - U_r)$$
$$U_r = U_s \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

Ganancia en bucle abierto

$$U_s = A(U_E - U_s\beta)$$

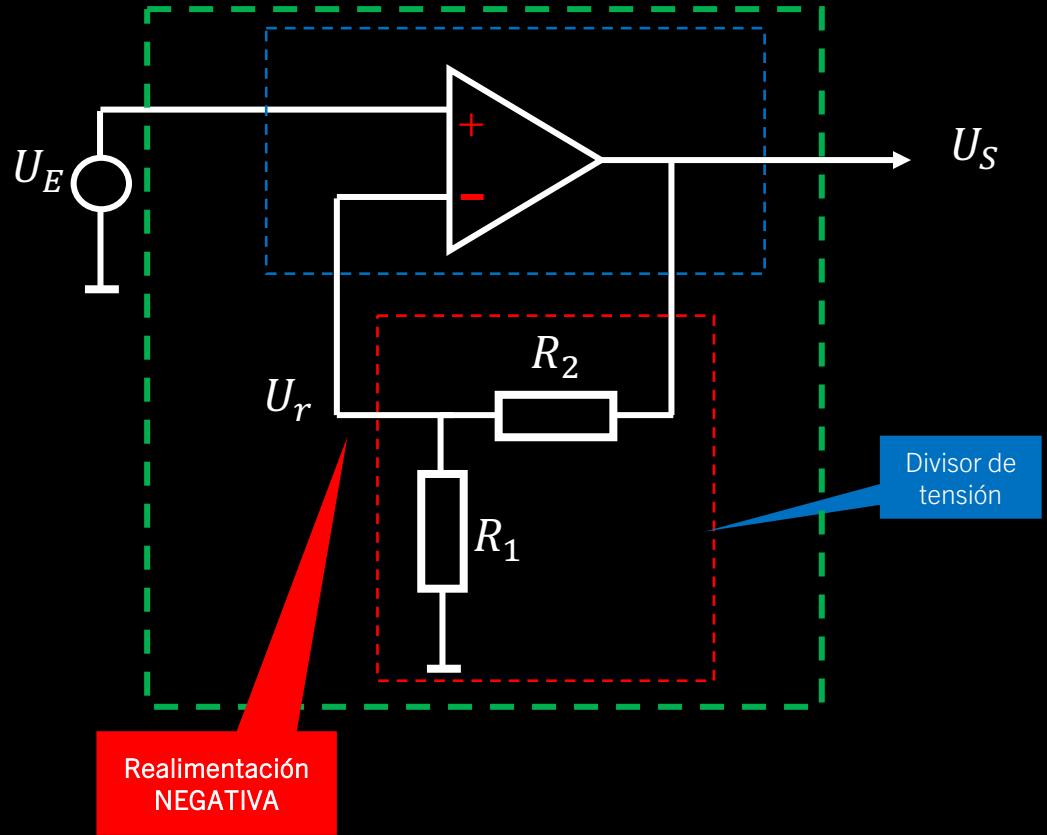
$$U_s(1 + A\beta) = A U_E$$

$$\frac{U_s}{U_E} = \frac{A}{1 + A\beta} \quad \text{si } A\beta \gg 1$$

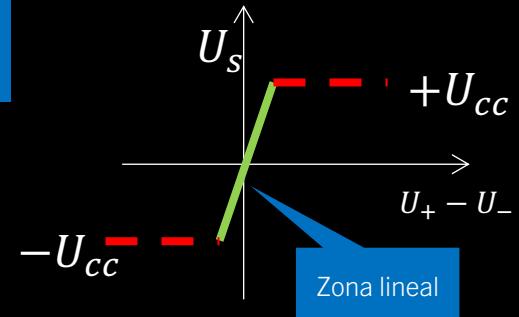
Ganancia en bucle cerrado

$$\frac{U_s}{U_E} = \frac{1}{\beta} = \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$

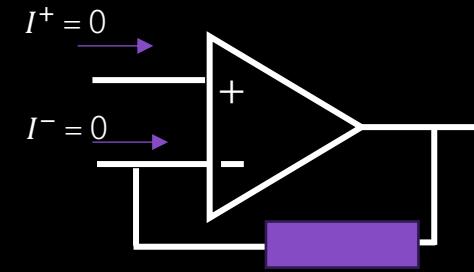
La ganancia depende de la red de realimentación



$$U_S = U_E \frac{R_1 + R_2}{R_1} = U_E \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$



Amplificador operacional



Análisis de circuitos con el amplificador operacional en zona lineal

- Comprobar que la realimentación es negativa.
- Considerar que las corrientes de entrada al operacional son nulas:
 $I^+ = I^- = 0$
- Considerar que la tensión en la entrada inversora es igual a la tensión de la entrada no inversora: $V^+ = V^-$, es decir, hay un cortocircuito “virtual” entre los terminales del amplificador.
- Plantear la ecuación que iguala estas tensiones y despejar la salida

$Z_i = \infty$

$A_d = \infty$

Amplificación

Aplicaciones lineales

1º comprobamos que la realimentación es negativa

2º consideramos que $I^+ = I^- = 0$

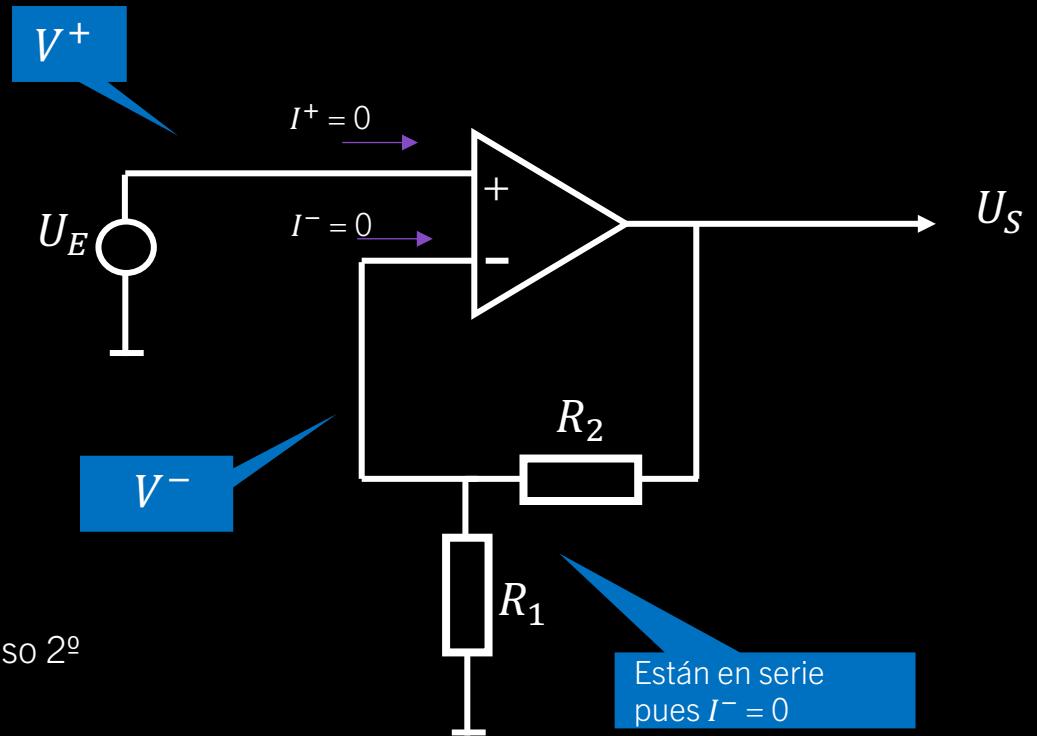
3º aplicamos el principio de cortocircuito virtual

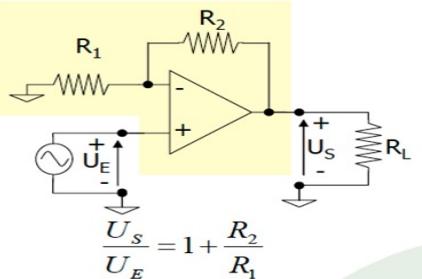
$$V^+ = V^- \quad \text{Divisor de tensión}$$

$$U_E = U_S \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad \text{pues } I^- = 0 \text{ por paso 2º}$$

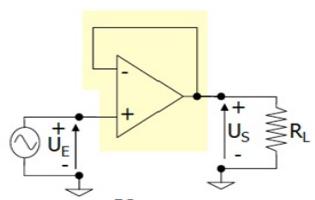
despejamos U_S

$$U_S = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) U_E$$

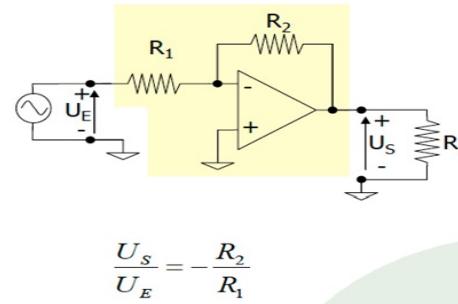




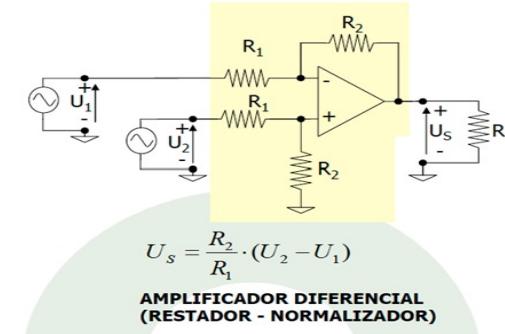
AMPLIFICADOR DE GANANCIA POSITIVA



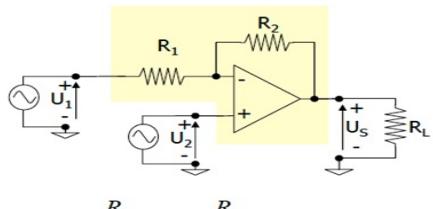
AMPLIFICADOR DE GANANCIA UNIDAD (SEGUIDOR DE EMISOR)



AMPLIFICADOR DE GANANCIA NEGATIVA

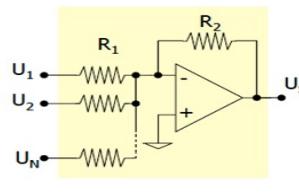


AMPLIFICADOR DIFERENCIAL (RESTADOR - NORMALIZADOR)

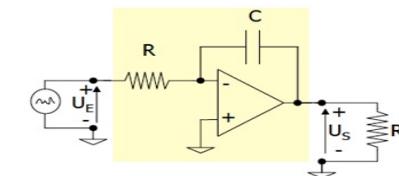


AMPLIFICADOR NORMALIZADOR

NOTA:
Este circuito y el anterior son especialmente interesantes para la función de normalizar rangos de tensiones



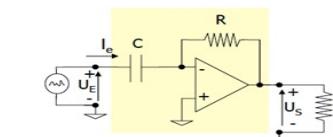
SUMADOR ANALÓGICO



$$U_S(t) = U_S(0) - \frac{1}{RC} \cdot \int_{t=0}^{t=t} U_E(t) \cdot dt$$

Notar que: $U_S(0) = -U_C(0)$

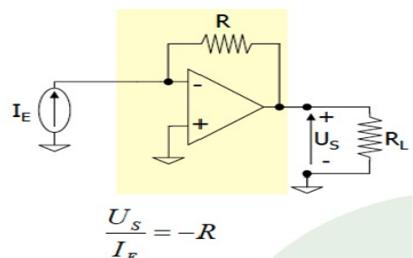
INTEGRADOR ANALÓGICO



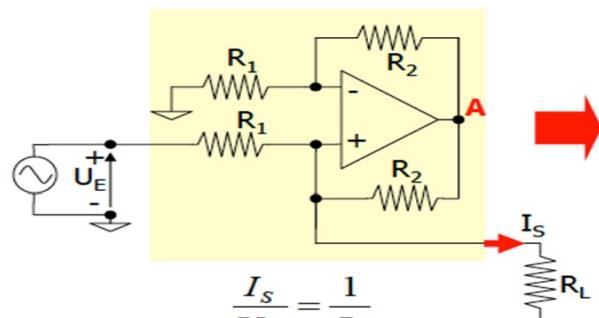
$$i_e(t) = C \frac{dU_e}{dt}$$

$$U_S = -R \cdot C \frac{dU_e}{dt}$$

DERIVADOR ANALÓGICO



CONVERSIÓN I/V

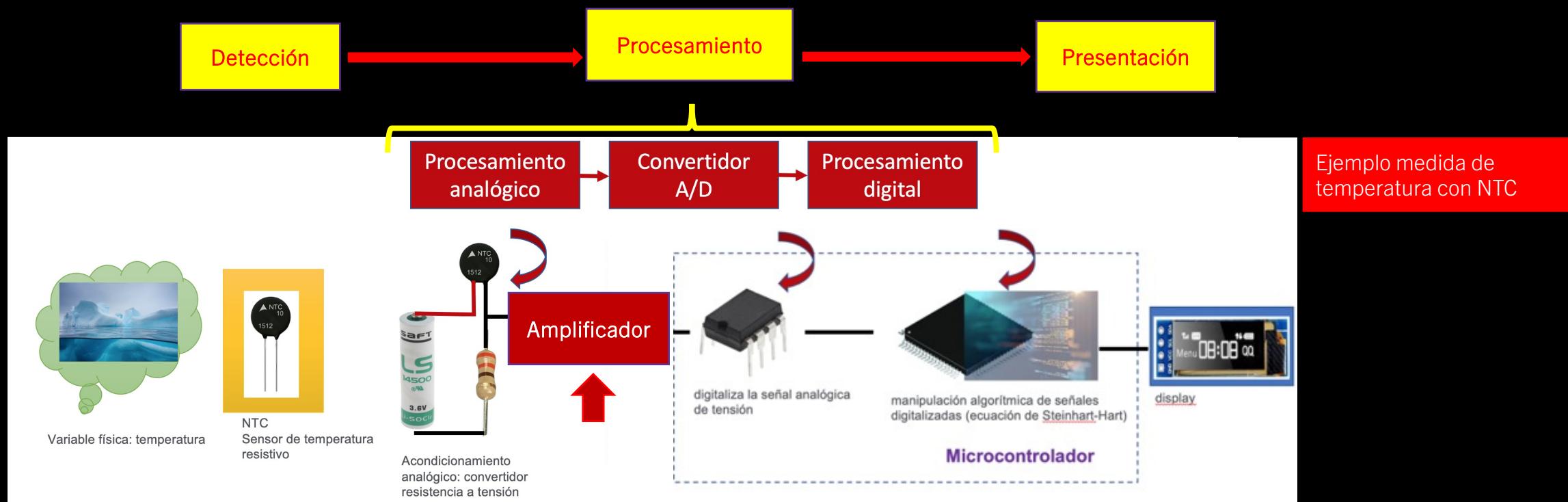


Conversor V/I

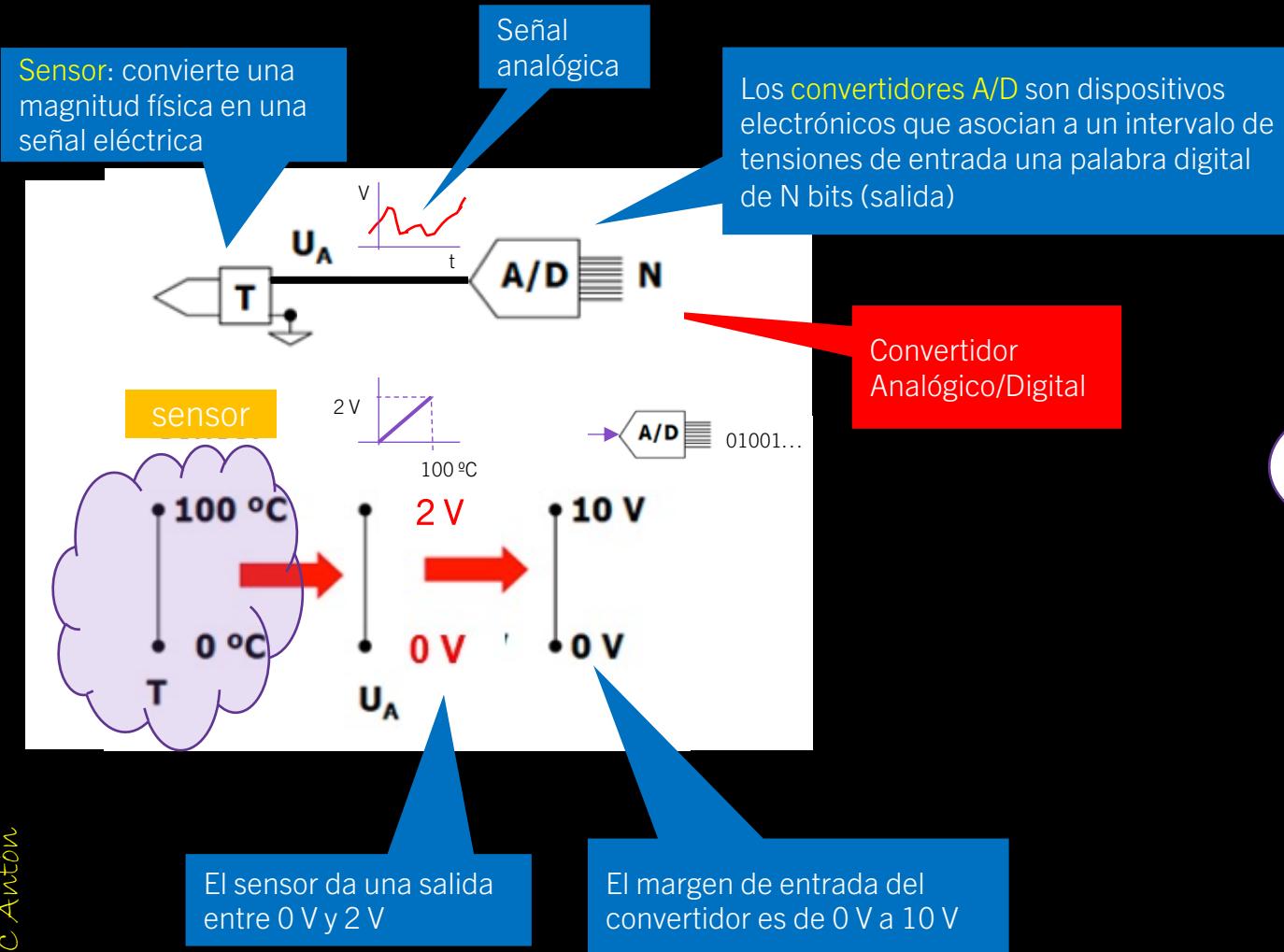
TOPOLOGÍAS BÁSICAS

Aplicaciones lineales

¿Para qué sirve el Amplificador Operacional (AO)?

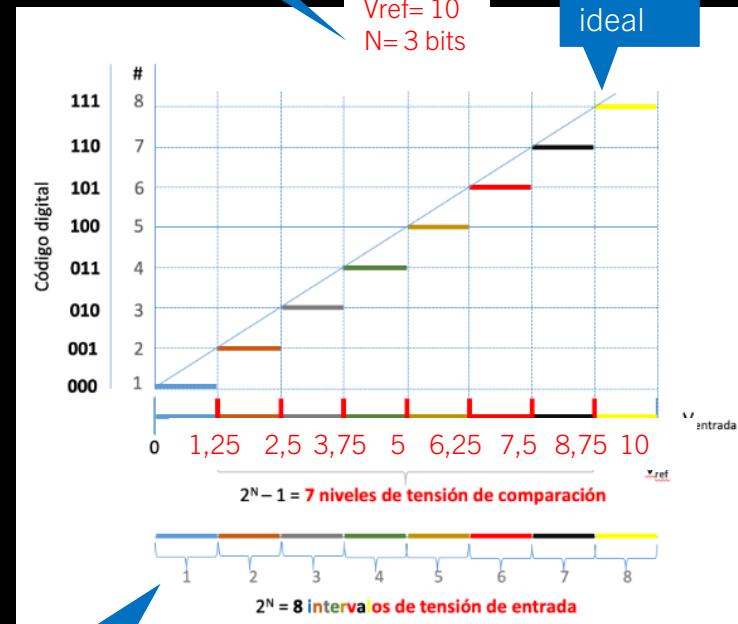


Conexión de un sensor a un convertidor A/D (analógico/digital)



Funcionamiento del convertidor A/D

La resolución de un A/D se expresa por el número de bits

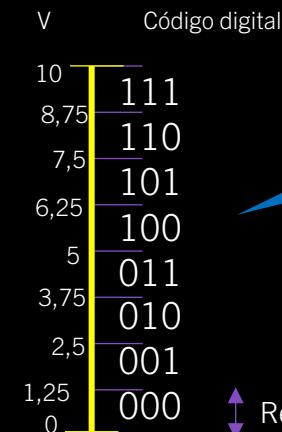
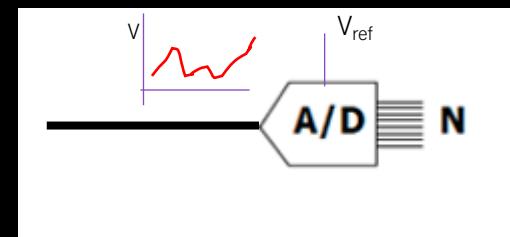


Margen de entrada del convertidor A/D (0 V-10 V)

10 V
0 V

Se “trocea” el margen de entrada y a cada trozo le asigna un código digital

Ancho del “trozo”



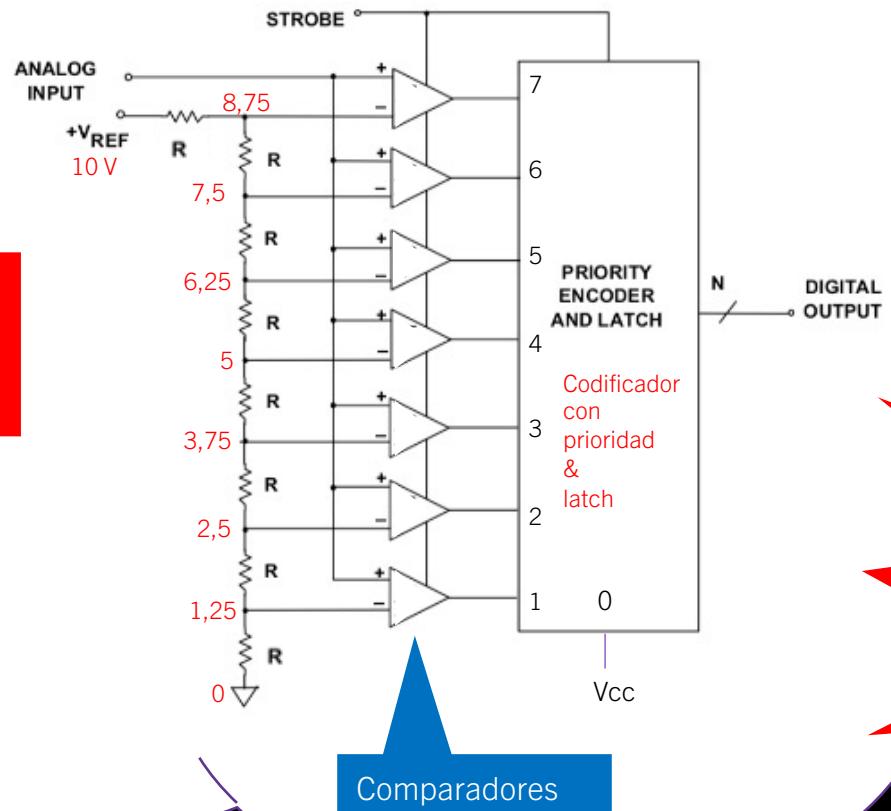
Margen de entrada

$$\text{Resolución de tensión} = \frac{10 \text{ V}}{2^N} = 1.25 \text{ V}$$

N: número de bits

Ejemplo de convertidor A/D

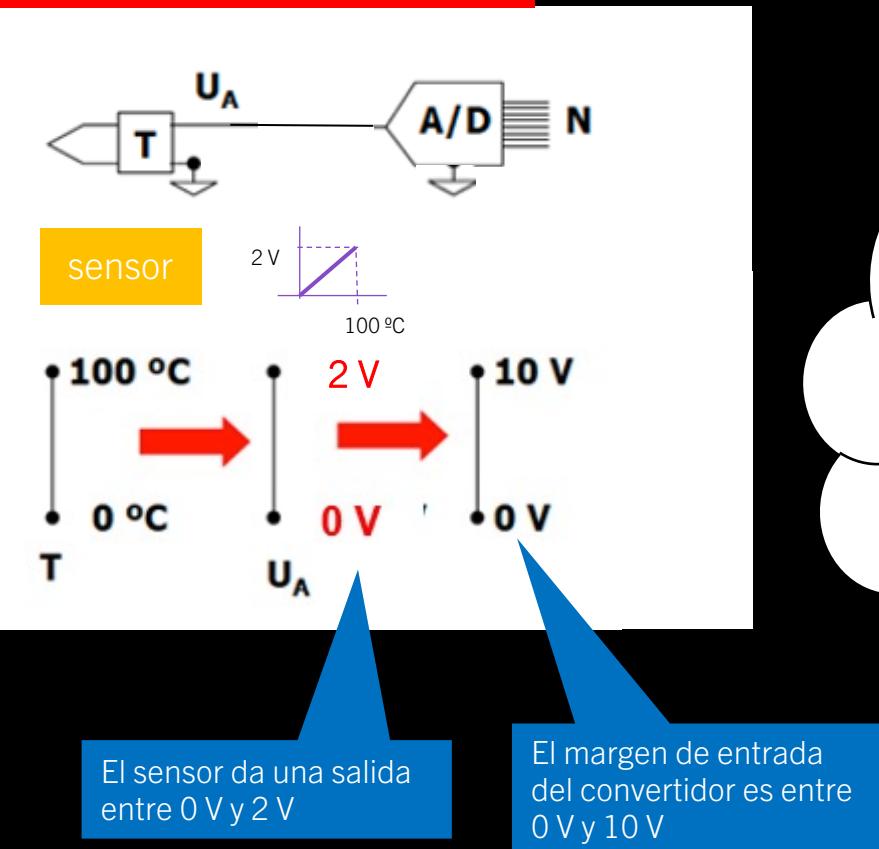
Convertidor FLASH



El Arduino Nano dispone de un convertidor A/D que utiliza otra técnica de conversión !!
Consulta la introducción a los µC del Campus Virtual

Aplicaciones lineales

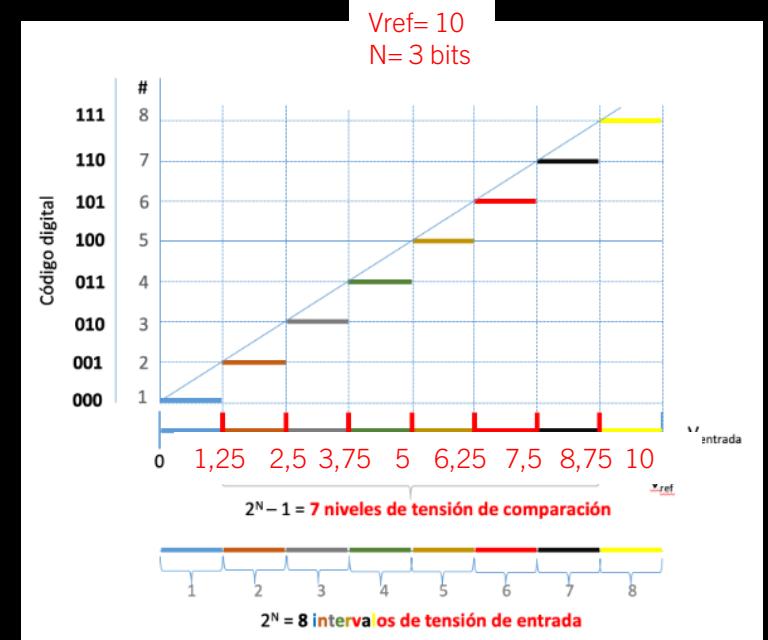
Sistema de medida



Margen de entrada del convertidor A/D
(0 V-10 V)



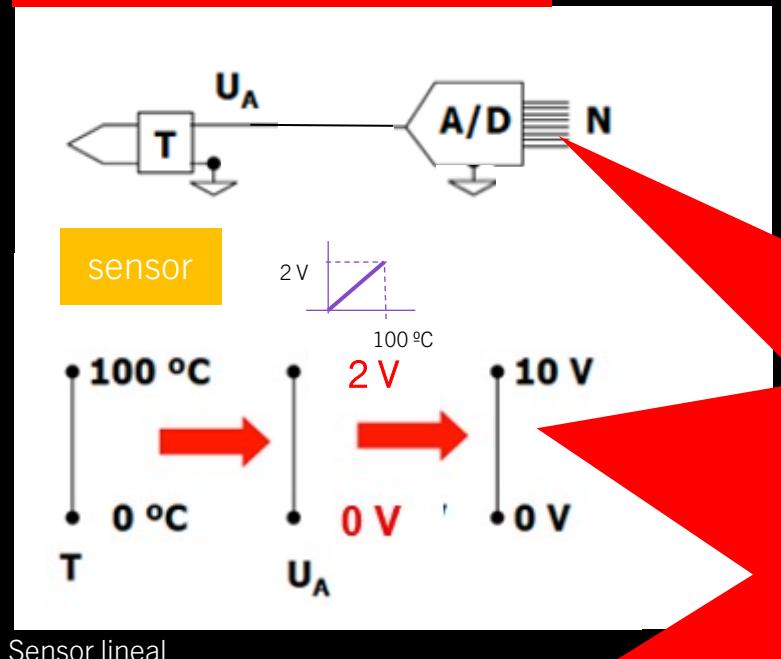
¿Qué ocurre si no adapto la salida del sensor a la entrada del convertidor?



Aplicaciones lineales

Estos códigos nunca se asignan!!

Sistema de medida



Sensor lineal

Resolución de la medida es el incremento más pequeño de temperatura que puedo detectar, ($12,5^{\circ}\text{C}$ con un A/D de 3 bits)

... pero se reduce a $62,5^{\circ}\text{C}$ por no utilizar todos los códigos disponibles

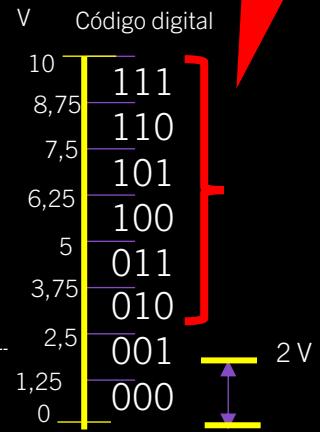
Pierdo resolución en la medida al no utilizar todos los códigos disponibles del A/D !

dispongo de 8 códigos (3 bits) y
podría distinguir entre ΔT de
 $100^{\circ}\text{C} / 8 = 12,5^{\circ}\text{C}$ pero ...

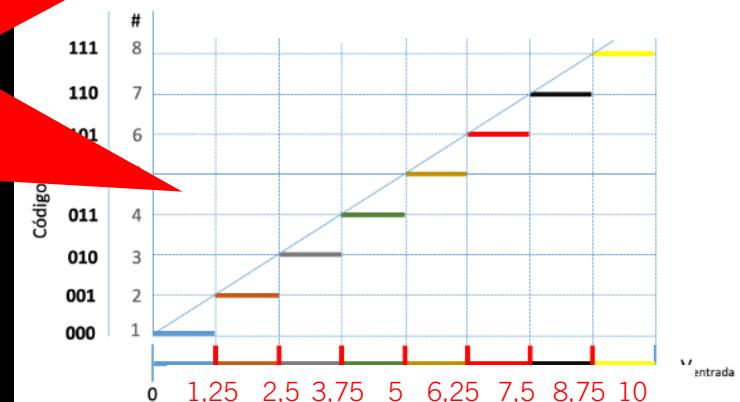
solo utilizo dos códigos del convertidor (1 bit) :

$0^{\circ}\text{C} (0 \text{ V})$ a $62,5^{\circ}\text{C} (1,25 \text{ V}) \rightarrow 000$
 $62,5^{\circ}\text{C} (1,25 \text{ V})$ a $100^{\circ}\text{C} (2 \text{ V}) \rightarrow 001$

El sensor solo llega hasta aquí !!



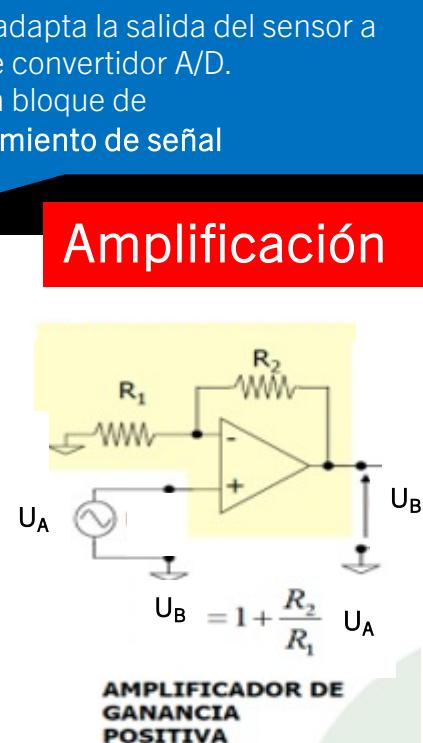
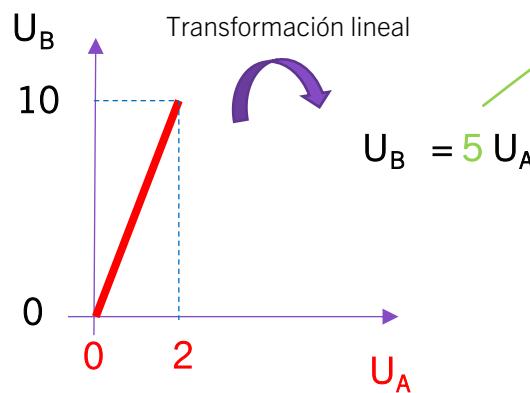
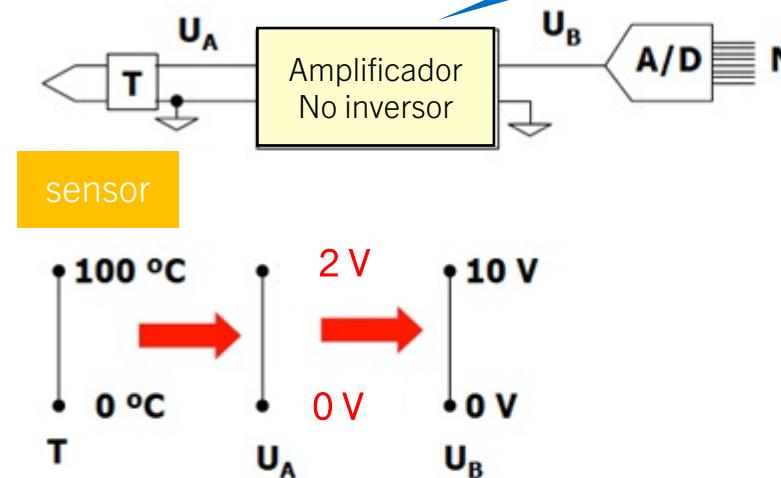
$V_{ref} = 10$
 $N = 3 \text{ bits}$



Uso 1 bit del convertidor,
 pierdo 2 bits, no utilizo toda la
 resolución del A/D

Aplicaciones lineales

Sistema de medida

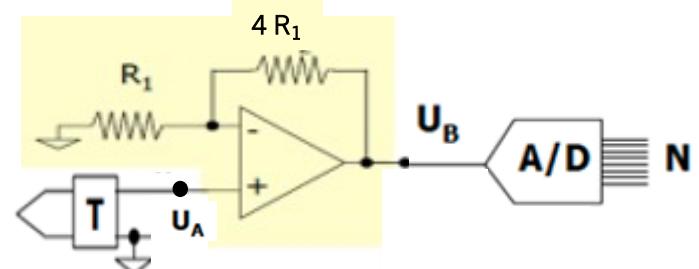


$$R_2 = 4 R_1$$

$$R_2 = 4k$$

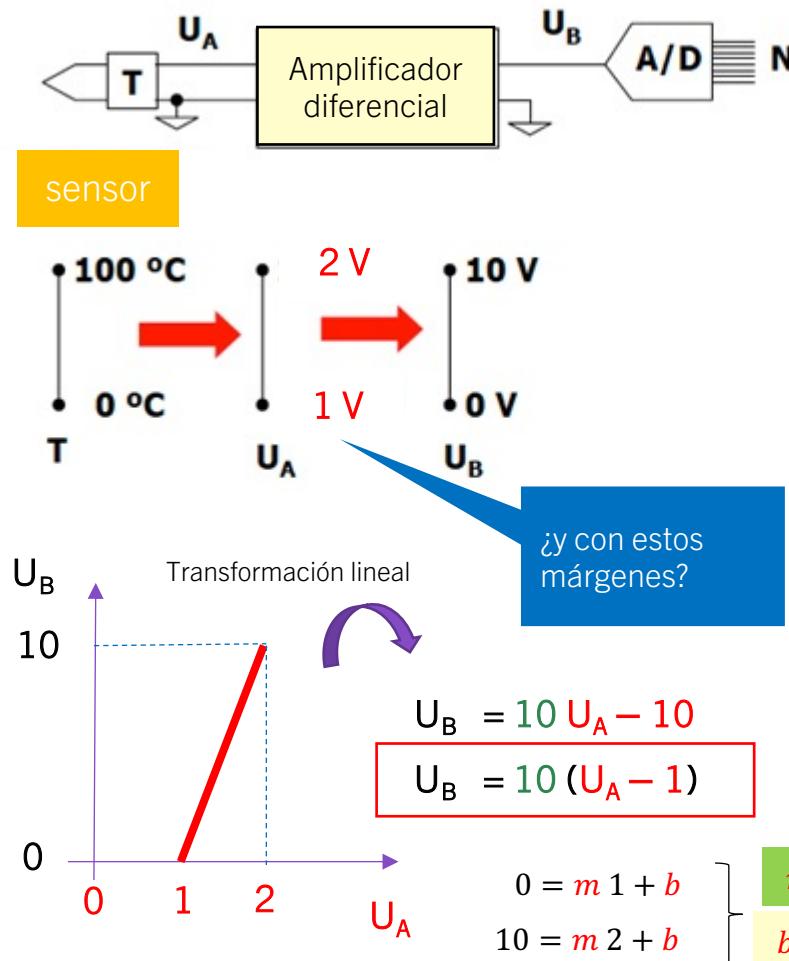
$$R_1 = 1k$$

Solución:
Acondicionar la señal

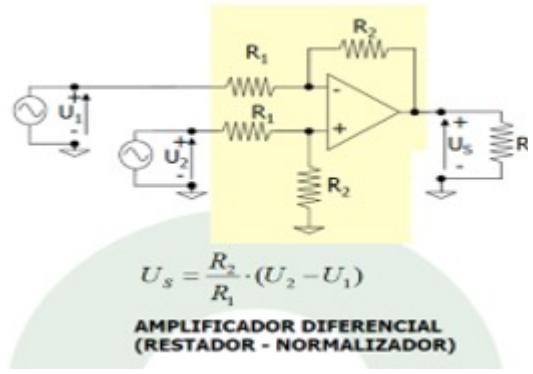


Aplicaciones lineales

Sistema de medida



Amplificación

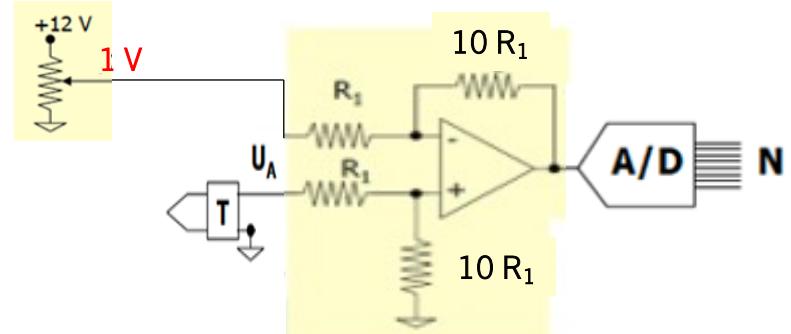


U_A 1 V

$$U_B = (R_2/R_1)(U_2 - U_1)$$

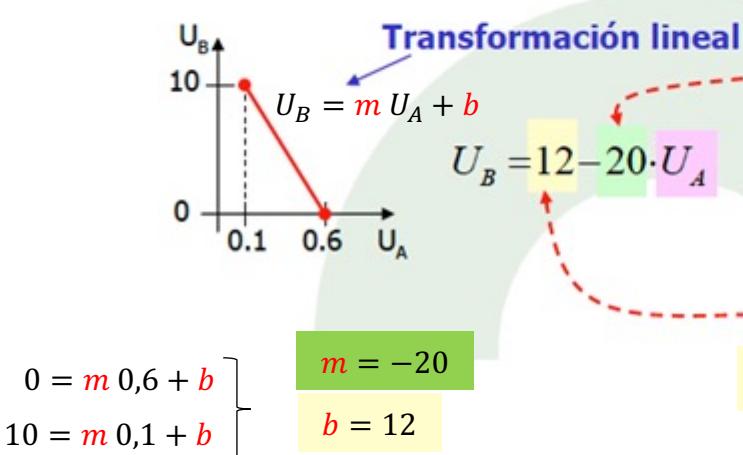
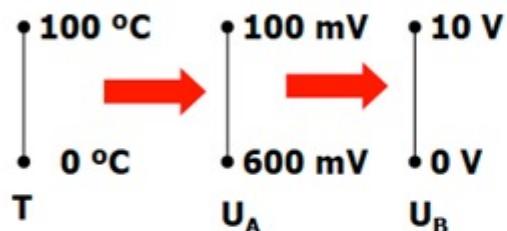
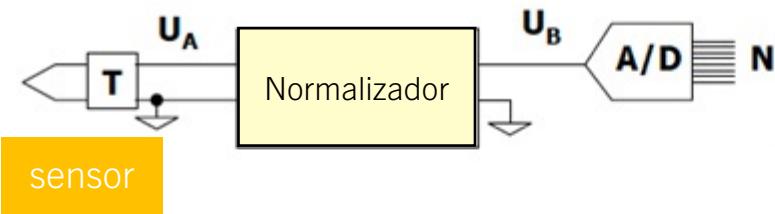
$$\frac{R_2}{R_1} = 10 \quad \left\{ \begin{array}{l} R_2 = 10k \\ R_1 = 1k \end{array} \right.$$

Implementación Práctica



Aplicaciones lineales

Sistema de medida



Circuito normalizador

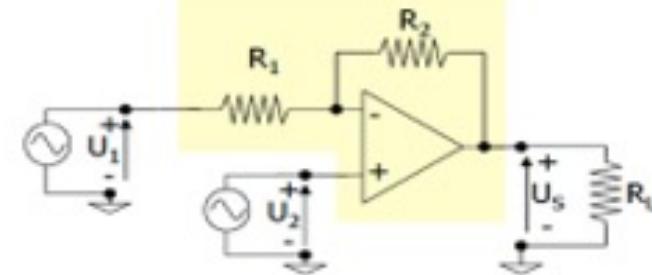
$$U_s = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot U_2 - \frac{R_2}{R_1} \cdot U_1$$

$$\frac{R_2}{R_1} = 20$$

$$(1+20) U_2 = 12$$

$$U_2 = 4/7 \text{ V}$$

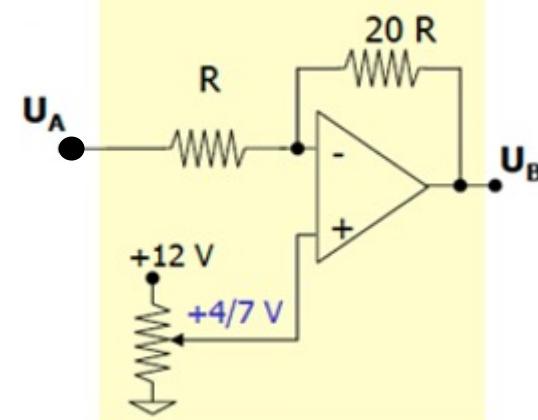
Amplificación



$$U_s = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot U_2 - \frac{R_2}{R_1} \cdot U_1$$

AMPLIFICADOR
NORMALIZADOR

Realización práctica



Problema 1.



Se desea digitalizar la señal de un sensor que varía entre 2 V y 3 V con un conversor A/D de N=10 bits de resolución y un margen de entrada entre 0 V y 5 V. ¿Cuál es la resolución “real” del convertidor, es decir, cuantos bits utilizo realmente del A/D si no adapto la señal?

Solución

La resolución de tensión del convertidor la expresamos como:

$$\text{Resolución} = 5 \text{ V} / 2^N = 4,8 \text{ mV}$$

El número de escalones o códigos que se utilizan para el intervalo de entrada de la señal a digitalizar será:

$$\#\text{Códigos} = (3 \text{ V} - 2 \text{ V}) / 4,8 \text{ mV} \approx 209 \text{ códigos}$$

¿cuántos bits se necesitan para representar 209 códigos?:

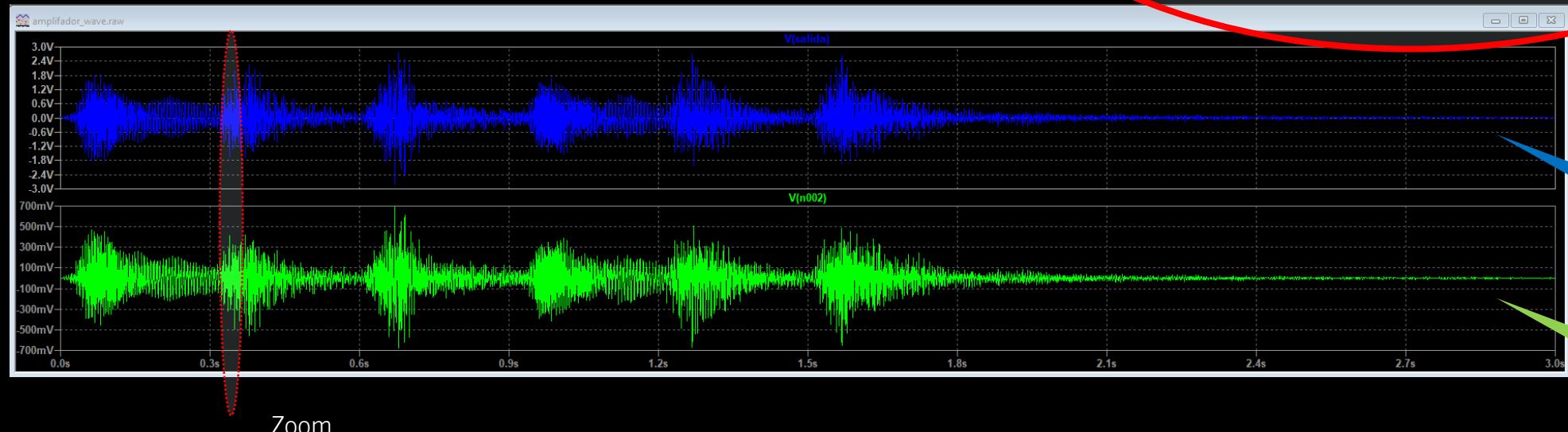
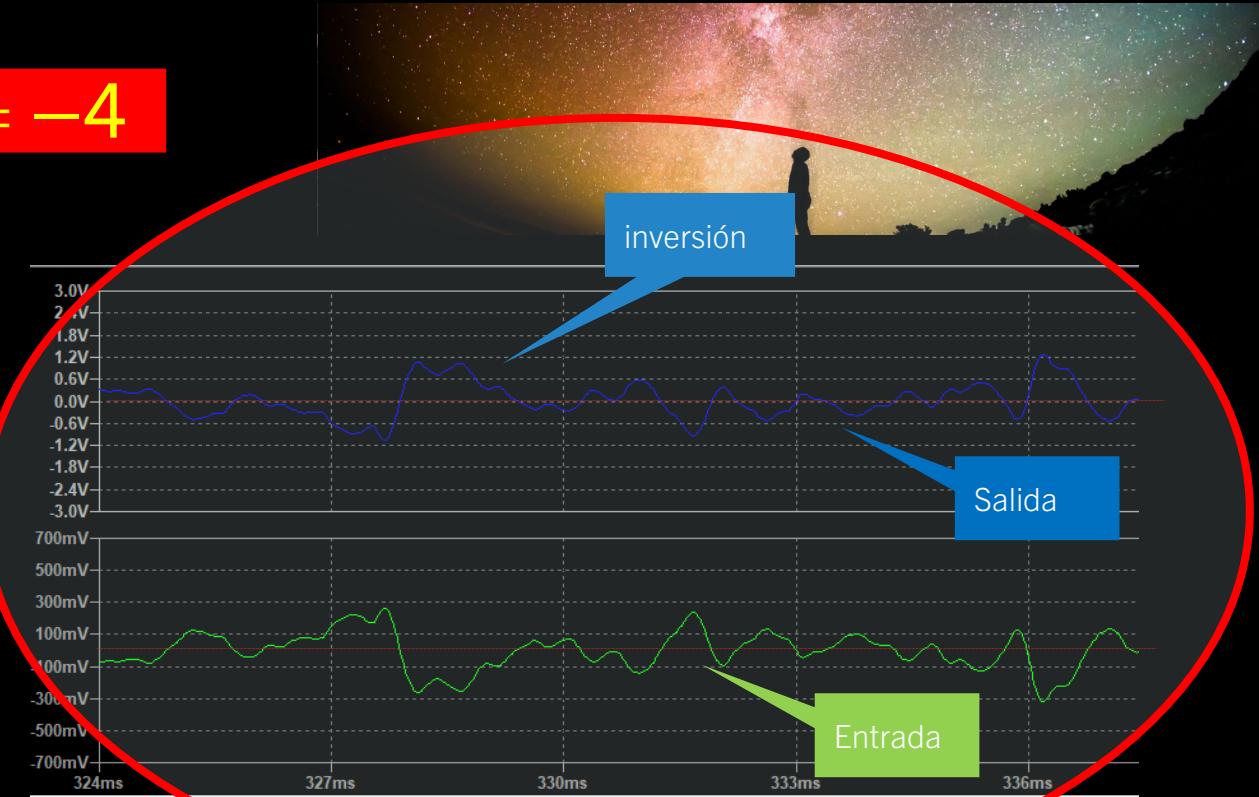
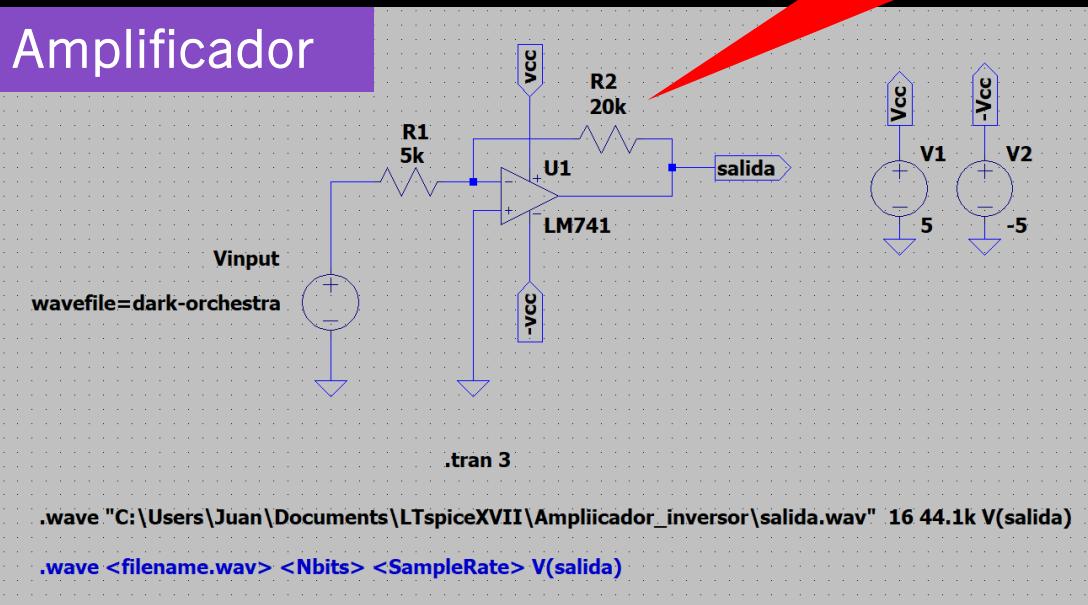
$$\log_2 209 = 7,7 \text{ bits}$$

la resolución “real”, la que utilizo del A/D, equivale a 7,7 bits, habríamos perdido más de 2 bits de resolución del A/D por no adaptar la señal de entrada al margen 0 V-5 V del convertidor A/D.

Operacionales en LTSPICE

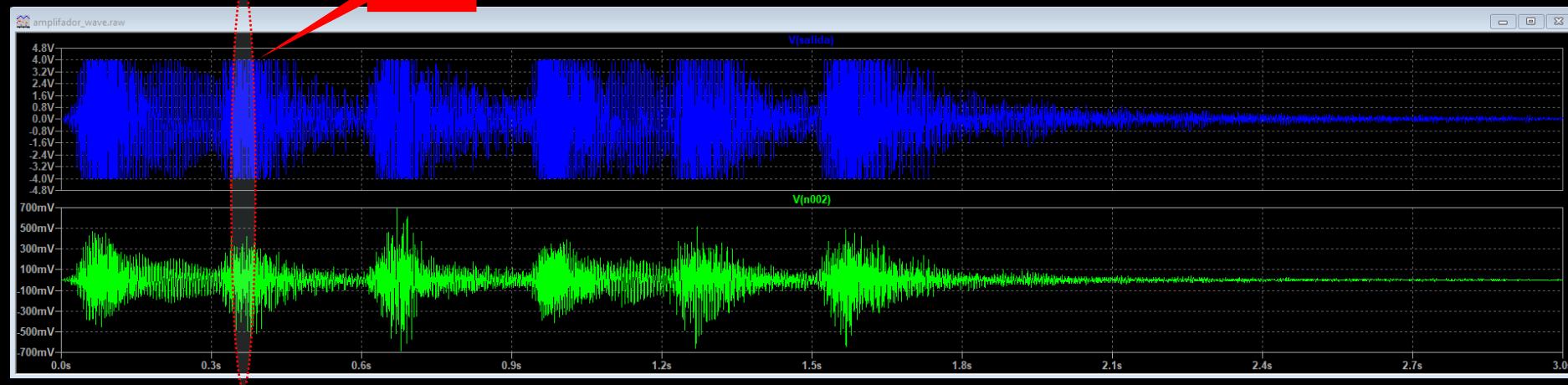
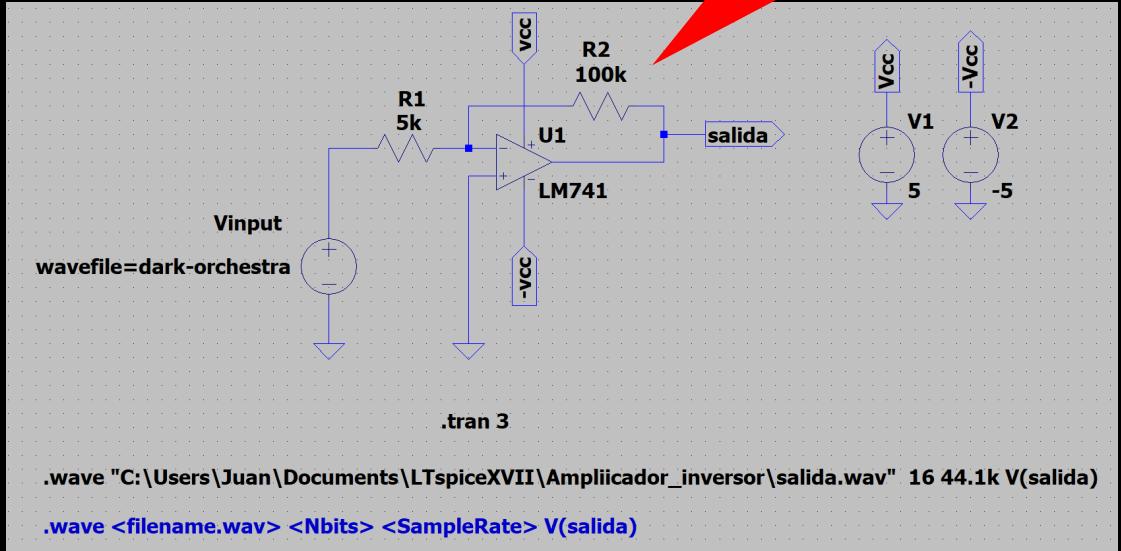
Ganancia = -4

Amplificador



Operacionales en LTSPICE

Ganancia = -20



Operacionales en LTSPICE

Amplificador

.wav de entrada

Vinput

wavefile=dark-orchestra

Ctrl+clic derecho

.tran 3

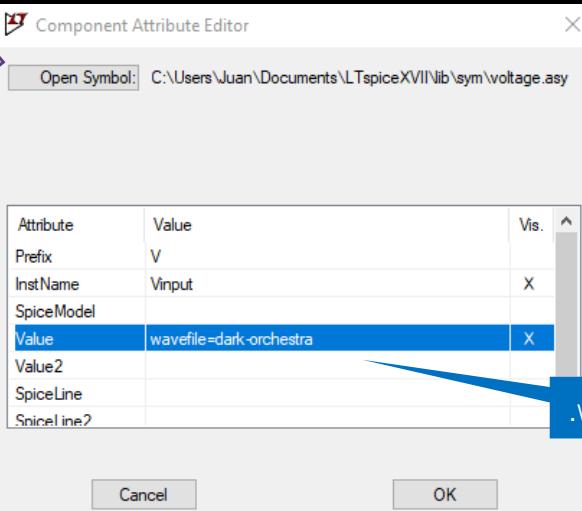
.wave "C:\Users\Juan\Documents\LTspiceXVII\Amplificador_inversor\salida.wav" 16 44.1k V(salida)
.wave <filename.wav> <Nbits> <SampleRate> V(salida)

Número de bits

Frecuencia de muestreo

Tensión a digitalizar

.wav de entrada



OK

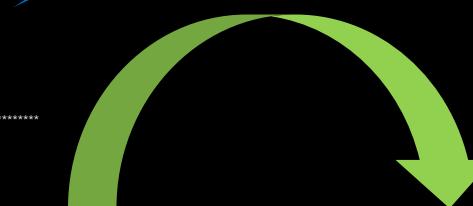
Cancel



SUBCKT LM741 1 2 99 50 28

*Features:
*Improved performance over industry standards.
*Plug-in replacement for LM709, LM201, MC1439,748
*Input and output overload protection
*****INPUT STAGE*****
*
IOS 2 1 20N
*^Input offset current
R1 1 3 250K
R2 3 2 250K
I1 4 50 100U
R3 5 99 517
R4 6 99 517
Q1 5 2 4 QX
Q2 6 7 4 QX
*Fp2=2.55 MHz
C4 5 6 60.3614P
*
*****COMMON MODE EFFECT*****
*
I2 99 50 1.6MA
*^Quiescent supply current
EOS 7 1 POLY(1) 16 49 1E-3 1
*Input offset voltage.^
R8 99 49 40K
R9 49 50 40K
*
*****OUTPUT VOLTAGE LIMITING*****
V2 99 8 1.63
D1 9.8 DX
D2 10 9 DX
V3 10 50 1.63
*
*****SECOND STAGE*****
*
EH 99 98 99 49 1
G1 98 9 5 6 2.1E-3
*Fp1=5 Hz
R5 98 9 95.493MEG
C3 98 9 33.33P
*
*****POLE STAGE*****
*
*Fp=30 MHz
G3 98 15 9 49 1E-6
R12 98 15 1 MEG
C5 98 15 5.3052E-15
*
*****COMMON-MODE ZERO STAGE*****
*
*Fpcm=300 Hz
G4 98 16 3 49 3.1623E-8
L2 98 17 530.5M
R13 17 16 1K
*****OUTPUT STAGE*****
*
F6 50 99 49(POLY(1)) 6 450U 1
E1 99 23 99 15 1
R16 24 23 25
D5 26 24 DX
V6 26 22 0.65V
R17 23 25 25
D6 25 27 DX
V7 22 27 0.65V
V5 22 21 0.18V
D4 21 15 DX
V4 20 22 0.18V
D3 15 20 DX
L3 22 28 100P
RL3 22 28 100K
*
*****MODELS USED*****
*.MODEL DX D(S=1E-15)
.MODEL QX NPN(BF=625)
.ENDS
\$

Modelo del LM741



Edit Text on the Schematic:

How to netlist this text
 Comment
 SPICE directive
Justification Left
 Vertical Text

Font Size

1.5(default)

OK

Cancel

SUBCKT LM741 1 2 99 50 28

*Features:
*Improved performance over industry standards.
*Plug-in replacement for LM709, LM201, MC1439,748
*Input and output overload protection
*****INPUT STAGE*****
*
IOS 2 1 20N
*^Input offset current
R1 1 3 250K
R2 3 2 250K
I1 4 50 100U
R3 5 99 517
R4 6 99 517
Q1 5 2 4 QX
Q2 6 7 4 QX
*Fp2=2.55 MHz
C4 5 6 60.3614P
*
*****COMMON MODE EFFECT*****
*
I2 99 50 1.6MA
*^Quiescent supply current
EOS 7 1 POLY(1) 16 49 1E-3 1
Type Ctrl-M to start a new line.

Cancel

OK

Cancel

OK