

**BATXILLERAT**

---

*Unitat didàctica:* **Circuits integrats analògics. Els amplificadors operacionals**

*Autors:* Lluís Fernández Navarrete  
Jordi Regalés i Barta

---



Generalitat de Catalunya  
Departament d'Ensenyament  
**Direcció General d'Ordenació Educativa**

---

*Unitat didàctica:* **Circuits integrats analògics. Els amplificadors operacionals**

*Autors:* Lluís Fernández Navarrete  
Jordi Regalés i Barta

---



Generalitat de Catalunya  
Departament d'Ensenyament  
**Direcció General d'Ordenació Educativa**

Edició: **Servei d'Ordenació Curricular**  
**desembre de 1998**

# ÍNDIX

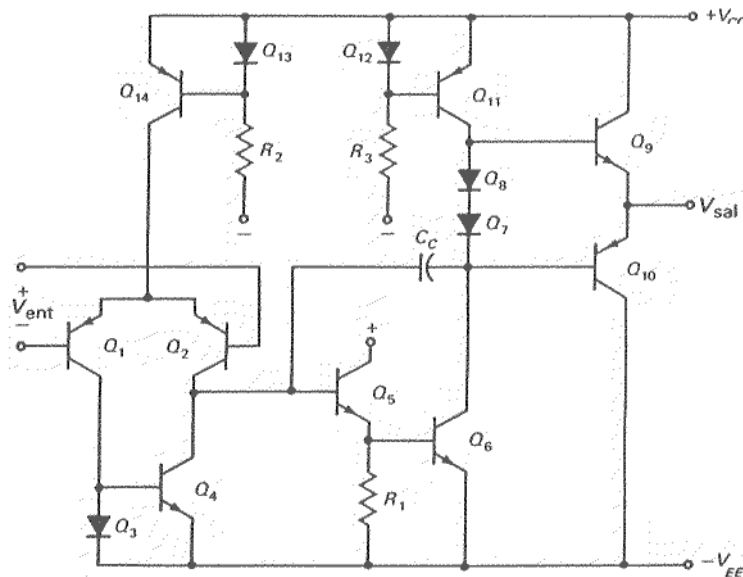
1. ESTRUCTURA I SIMBOLOGIA.....	5
2. CARACTERÍSTIQUES MÉS IMPORTANTS DE L'AMPLIFICADOR OPERACIONAL (AO) IDEAL.....	7
3. CARACTERÍSTIQUES DELS AMPLIFICADORS OPERACIONALS REALS. VALORS LÍMITS.....	8
<i>Activitat</i> .....	8
4. FUNCIÓ DE TRANSFERÈNCIA DE L'AMPLIFICADOR OPERACIONAL REAL.....	8
<i>Activitat experimental. Característica de transferència d'un amplificador operacional real</i> .....	9
5. FUNCIONAMENT DE L'AO.....	11
5.1 Com a comparador de senyals.....	11
5.2 Funcionament de l'AO com amplificador lineal.....	12
5.2.1 Funcionament.....	12
ACTIVITAT EXPERIMENTAL: ESTUDI DE L'AMPLIFICADOR NO INVERSOR.....	14
<i>Activitat experimental. Funcionament d'un amplificador seguidor de tensió</i> .....	16
<i>Activitat experimental. Circuit integrador</i> .....	22
6. ALGUNES APLICACIONS DE L'AO.....	22
6.1 Trigger o disparador de Schmitt.....	22
6.2 Multivibrador estable.....	23
6.3 Font d'intensitat constant.....	25
6.4 Convertidor d'intensitat en tensió. Construcció d'un Ohmímetre.....	25
6.5 Fonts de tensió regulades.....	25
6.6 Circuits integrats reguladors de tensió.....	27
ACTIVITATS FINALS.....	28

## L'AMPLIFICADOR OPERACIONAL. MODES DE FUNCIONAMENT I APLICACIONS

### 1. Estructura i simbologia

L'amplificador operacional (AO) és un circuit integrat (CI) que es va dissenyar i aplicar inicialment al desenvolupament de l'ordinador analògic. Va complir la funció d'operador matemàtic amb els senyals elèctriques. Les especials característiques de l'AO han permès trobar-li una gran diversitat d'aplicacions i, en conseqüència, se'l pot trobar en la major part de circuits electrònics. L'AO conserva la denominació d'origen malgrat que els ordinadors analògics van ser desplaçats pels digitals.

Els amplificadors operacionals són circuits que contenen components actius (díodes i transistors) i passius (resistències) integrats. Es comporten com a amplificadors del senyal diferencial de les entrades, amb un guany molt elevat.



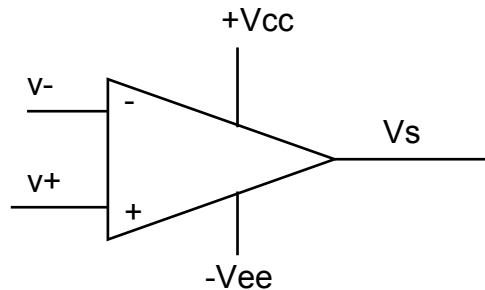
L'esquema de l'amplificador operacional té una primera etapa que és un amplificador diferencial, seguida d'altres etapes amplificadores. El funcionament del circuit demana una alimentació simètrica, és a dir, un voltatge positiu ( $+V_{cc}$ ) respecte a la referència o massa, i un voltatge negatiu ( $-V_{EE}$ ).

L'amplificador operacional es representa per un triangle amb una sèrie de terminals bàsics:

- Dos terminals destinats als senyals d'entrada:  $V^-$  (entrada inversora) i  $V^+$  (entrada no inversora).
- Dos terminals per a l'alimentació simètrica:  $+V_{cc}$  i  $-V_{EE}$ . Normalment, aquests terminals no es representen ja que l'alimentació es dona per suposada.

- Un terminal de sortida:  $V_s$ .

Tot els voltatges estan referits al mateix origen de potencial que és una massa o el terra.



L'amplificador operacional està dissenyat per donar un senyal de tensió de sortida que és l'amplificació lineal del diferencial de tensió que hi ha entre els dos senyals de les entrades:

$$V_s = A (V_+ - V_-)$$

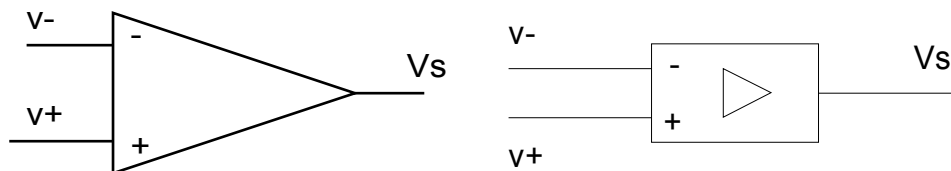
$V_s$ , Tensió de sortida.

$A$ , és el coeficient d'amplificació de la tensió diferencial.

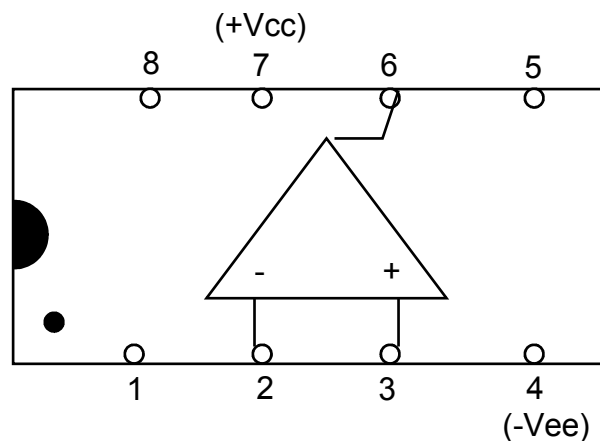
$V_+$ , Tensió del senyal aplicat a la entrada no inversora.

$V_-$ , Tensió del senyal aplicat a la entrada inversora.

Els símbols normalitzats de l'amplificador operacional són els dos següents:



Dins l'àmbit comercial, es pot trobar l'AO encapsulat en configuracions DIL (*Dual in Line*) de 8 i 14 terminals. A la figura següent s'hi mostra l'encapsulat DIL de 8 terminals amb la identificació de la funció de cadascun d'ells.



## 2. Característiques més importants de l'amplificador operacional (AO) ideal

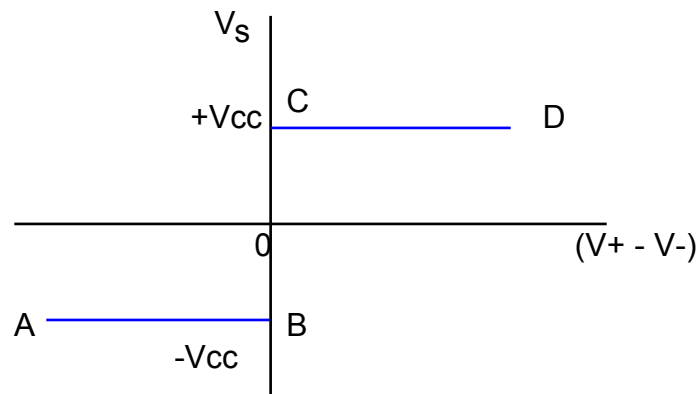
CARACTERÍSTIQUES	AMP. OPERACIONAL IDEAL
AMPLIFICACIÓ DE TENSIO (A)	INFINITA
RESISTÈNCIA D'ENTRADES	INFINITA
RESISTÈNCIA DE SORTIDA	NUL·LA

Implicacions que es deriven de les característiques:

a) Amplificació infinita.

$$V_s = A_d (V^+ - V^-)$$

Si anomenem  $\Delta V = (V^+ - V^-)$  a la diferència entre les tensions de entrada. Un valor de  $\Delta V < > 0$  i l'amplificació infinita ( $\infty$ ) de l'AO determina que la tensió de sortida tingui sempre el valor límit que determina la tensió d'alimentació positiva o negativa. Posat cas que  $\Delta V = 0$ , la tensió de sortida queda indeterminada entre els valors límits de l'alimentació. El gràfic següent mostra el comportament del senyal de sortida en funció del valor de  $\Delta V$ :



b) Resistència d'entrada infinita.

Les intensitats que es deriven per les entrades de senyals són nul·les:

$$I_+ = 0 \text{ i } I_- = 0.$$

c) Resistència de sortida nul·la.

Determina que la sortida de l'AO es comporti com un generador de tensió ideal.

### 3. Característiques dels amplificadors operacionals reals. Valors límits

La majoria de CI operacionals comercials es caracteritzen pels valors següents:

CARACTERÍSTIQUES	VALORS
AMPLIFICACIÓ DE TENSIÓ (A)	$A_d > 100.000$
RESISTÈNCIA D'ENTRADA	$> 1 \text{ M}\Omega$
RESISTÈNCIA DE SORTIDA	$50 \Omega < R_s < 200 \Omega$
TENSIÓ D'ALIMENTACIÓ MÀXIMA	$\pm 18 \text{ V}$

Límits de validesa:

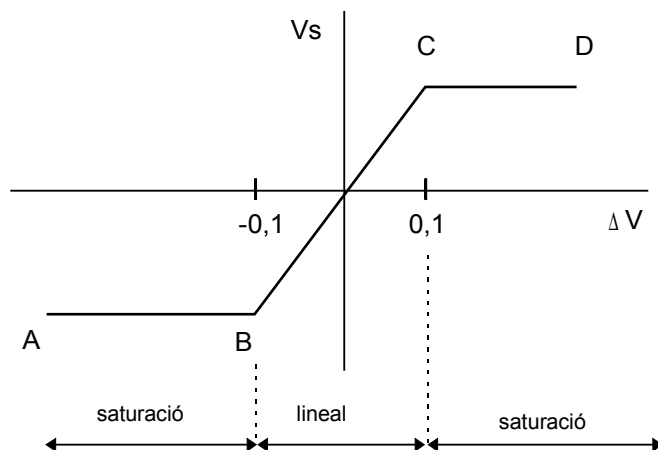
- La tensió de sortida límit, en estat de saturació de l'AO, adquireix un valor proper al de l'alimentació.
- Els amplificadors operacionals estan protegits contra curtcircuits del senyal de sortida.
- El corrent de sortida està limitat a un valor màxim de 20 a 30 mA.

#### Activitat

- A partir de la informació tècnica de CI operacionals que hi ha a l'annex, identifiqueu les característiques de alguns d'ells.
- Dibuixeu i identifiqueu la distribució de terminals de l'encapsulat DIL.

### 4. Funció de transferència de l'amplificador operacional real

És el senyal de sortida en funció de la diferència de les tensions de senyals d'entrades,  $\Delta V$ . La funció de transferència és representada pel gràfic següent,



En el gràfic, s'hi pot observar que l'AO pot funcionar de dues maneres:

a) **Funcionament lineal:** la tensió de sortida es proporcional a la tensió diferencial.

$$V_S = A_d (V^+ - V^-)$$

En aquestes condicions, a causa de l'elevadíssima amplificació, el seu valor és a  $\Delta V \cong 0$ .

Per a la realització de càlculs, podem considerar amb una prou bona aproximació que  $\Delta V = 0$  :

$$V^+ = V^-$$

b) **Funcionament en saturació**

La tensió de sortida té el valor límit superior o inferior i no és proporcional a la diferència de tensions de les entrades. El valor límit és proper al d'alimentació de l'AO i amb el mateix signe de  $\Delta V$ .

En la majoria d'aplicacions de l'AO una de les dues tensions d'entrada s'agafa com a potencial de referència.

## **Activitat experimental. Característica de transferència d'un amplificador operacional real**

### **Objectius**

- Comprovar experimentalment com varia la tensió de sortida de l'AO en funció de la diferència entre les tensions de les entrades.
- Observar que l'AO sempre està en estat de saturació. L'elevadíssima amplificació comporta que una petita diferència entre les tensions d'entrades:  $|\Delta V| > 0,0001 \text{ V}$ , saturi l'AO.
- Observar que la tensió de sortida té el mateix signe que  $\Delta V$ .

### **Material experimental**

*Components:*

- Dos LED de diferent color.
- CI operacional 741.
- Un potenciòmetre de 10 voltes, 10 k $\Omega$ , 1 W.
- 1 resistència d' 1 k $\Omega$ .
- 1 pila de 4,5 V.
- Una placa de muntatge de circuits sense soldadura.

*Instrumental*

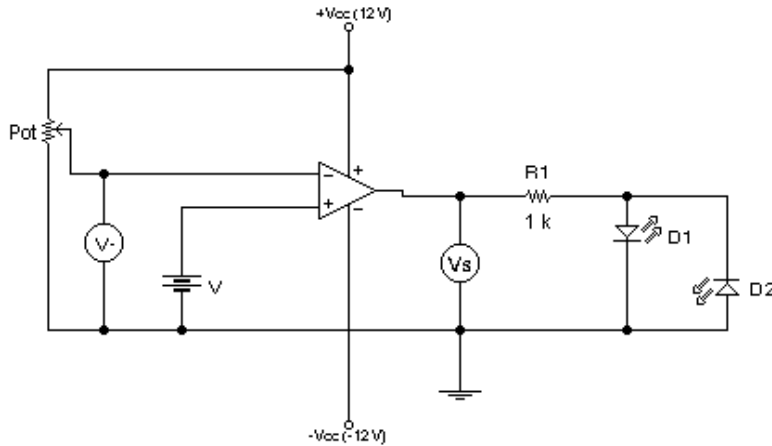
---



- Font d'alimentació simètrica:  $\pm 12\text{ V}$  o  $\pm 15\text{ V}$ .
- 1 o 2 Voltímetres

**Procediment**

1. Munteu el circuit següent en una placa de muntatge de circuits sense soldadura. La il·luminació del LED determinarà l'estat de saturació, positiu o negatiu, de l'AO.



2. Expliqueu perquè el potenciòmetre fa la funció de divisor de la tensió d'alimentació positiva.
3. Mesureu el voltatge exacte de referència de l'entrada no inversora i ompliu la taula de l'apartat 4.
4. Escriviu en la taula següent els resultats de les tensions d'entrada i sortida obtingudes en diferents posicions del potenciòmetre. Preneu més dades de  $\Delta V$  propers a 0 V (positius i negatius), i anoteu-los tots amb el signe resultant.

$V_+$ (V)	$V_-$	$\Delta V$	$V_s$	S'il·lumina el LED

5. Representeu la tensió de sortida,  $V_s$ , en funció de la  $\Delta V$  aplicada a les entrades.
6. Comenteu els resultats de l'experiència i indiqueu si l'AO, normalment, treballa com a amplificador lineal o bé ho fa en saturació.

Completeu les afirmacions següents:

- L'AO funciona en estat de saturació donant una tensió de sortida:
  - a) Proper al valor  $+V_{cc}$  si la comparació dels senyals d'entrada .....
  - b) Proper al valor  $-V_{cc}$  si la comparació dels senyals d'entrada .....

- Els corrents derivats per les entrades són aproximadament .....

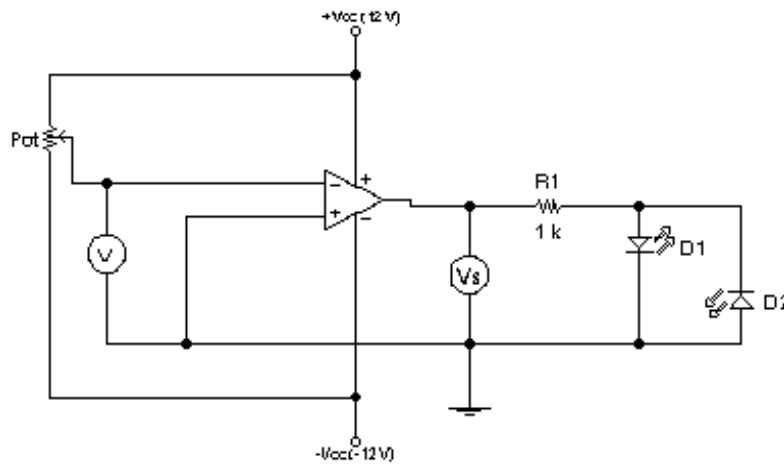
## 5. Funcionament de l'AO

### 5.1 Com a comparador de senyals

En aquesta aplicació l'AO funciona en estat de saturació, com s'ha pogut veure a l'apartat anterior.

#### Activitat experimental: Correlació entre el signe de la tensió de sortida i la d'entrada prenent com a referència de potencial el d'una entrada.

- a) Munteu el circuit següent, observeu com l'entrada no inversora està connectada a l'origen de potencial, 0 V. Per l'entrada inversora s'introdueix el senyal del potenciòmetre.



Observeu, amb l'ajuda dels díodes LED, si el senyal de sortida té el mateix signe que el senyal  $\Delta V$  de les entrades. Comenta el resultat.

- b) Canvia la referència de potencial, 0 V, a l'entrada inversora i el senyal del potenciòmetre a l'entrada no inversora. Observa si el signe del senyal de sortida coincideix o no amb el que té l'entrada no inversora.

Completeu les afirmacions següents:

Si s'agafa V+ com a referència de potencials, 0 V. El senyal de sortida té ..... signe senyal de l'entrada inversora.  
 Si s'agafa com a referència de potencials el senyal de l'entrada inversora, 0 V, el senyal de sortida té ..... signe que el de l'entrada no inversora.

### Activitat

A partir de l'anàlisi dels circuits de les experiències anteriors, dissenyeu un circuit que transformi un senyal de corrent altern sinusoidal de 5 o 6 V eficaços en un senyal de corrent altern d'ona rectangular. Dibuixeu les formes d'ona d'entrada - sortida.

Interpreteu la forma de l'ona de sortida en funció del valor de tensió de referència de comparació.

## 5.2 Funcionament de l'AO com amplificador lineal

### 5.2.1 Funcionament

L'amplificació de la tensió diferencial de l'AO és molt gran, superior a  $10^5$ , i en el cas que  $|\Delta V| > 0,0001 \text{ V}$  l'AO es satura positivament o negativament. Per tant, fer funcionar l'AO en la regió lineal, on el senyal de sortida ha de ser proporcional al senyal d'entrada, és difícil, ja que exigeix una tensió diferencial d'entrada pràcticament nul·la perquè no arribi a la saturació:

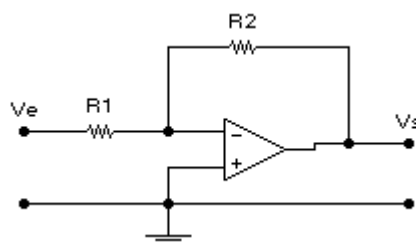
$$V_S = A_d (V^+ - V^-) = A_d \Delta V$$

El problema es resol portant, de retorn, una part del senyal de sortida cap a l'entrada inversora. Aquest senyal, anomenat realimentació negativa, s'oposa sempre a l'augment de  $\Delta V$  i estabilitza el seu valor a nivells inferiors a  $0,0001 \text{ V}$ .

La retroalimentació negativa va ser descoberta per J. M. Black (1928). Inicialment, els professionals contemporanis la van considerar com una idea poc important, si ve en el decurs del temps s'ha demostrat que tenia una gran potencialitat al servei del desenvolupament dels camps de l'electrònica.

D'amplificadors operacionals realimentats, n'hi ha de dos tipus: els inversors i els no inversors.

Els amplificadors realimentats s'anomenen de laç tancat per diferenciar-los dels no realimentats o laç obert. Una de les entrades d'aquest amplificadors sovint està connectada a un potencial de referència, i per l'altra s'introdueix el senyal a amplificar. La figura següent representa un exemple en el qual, per simplificar l'esquema, els terminals d'alimentació no s'hi representen.



Un dels avantatges de la realimentació és que pot fixar fàcilment i amb precisió el valor de l'amplificació del senyal d'entrada,  $A$ .

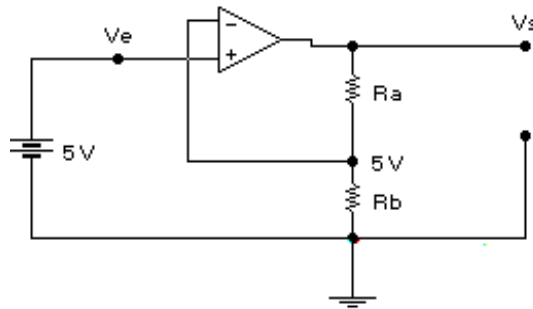
L'amplificació d'un senyal o guany de tensió,  $A$ , es defineix pel nombre de vegades que la tensió de sortida és superior a la de l'entrada, matemàticament per:

$$V_S$$

$$A = \frac{V_s}{V_e}$$

### 5.2.2 Amplificador lineal no inversor

El senyal de sortida es troba en fase amb el senyal d'entrada. En el cas que el senyal d'entrada sigui de corrent continu, l'AO fa un senyal de sortida del mateix signe i amplificat.



En la figura està representat l'esquema bàsic d'un amplificador realimentat no inversor. El senyal d'entrada s'aplica a l'entrada no inversora,  $V_+$ , la realimentació que controla el guany de l'AO es porta com a senyal de l'entrada no inversora.

La fracció del senyal de sortida que es porta a l'entrada inversora  $V_-$  donada per l'expressió:

$$V_- = \frac{R_b}{R_b + R_a} V_s$$

El funcionament de la realimentació negativa, podem explicar-lo a partir de l'observació de la figura anterior, on  $V_+$  s'ha posat a +5 V. Si en un instant  $V_- > +5$ , aleshores  $\Delta V$  té valor negatiu, fa baixar el tensió de sortida a:  $V_s = A_d \cdot \Delta V$ . En el moment que  $V_-$  cau per sota de +5 V  $\Rightarrow \Delta V$  torna a ser positiu ( $V_+ - V_- = 5 - 4,999\dots$ ) i amplificat fa que la tensió de sortida comenci a pujar novament, aleshores augmenta el valor de  $V_-$  per sobre de 5 V i torna a repetir-se el procés oscil·lant de  $V_-$  al voltant de 5 V, amb una rapidesa que depèn de la velocitat de resposta del CI operacional, que és de l'ordre dels  $\mu s$  (microsegons).

Si l'AO funciona en la regió lineal:  $V_- \approx V_+$

Aleshores l'amplificació o guany de tensió de l'AO no inversor és:

$$A = \frac{V_s}{V_e} = \frac{V_s}{V_-} = \frac{1}{R_b / (R_a + R_b)} = \frac{R_b + R_a}{R_b}$$

$$A = 1 + \frac{R_a}{R_b}$$

Mitjançant la realimentació negativa de l'AO s'aconsegueixen avantatges notables:

- Amplificar el senyal d'entrada amb un valor estable d'amplificació,  $A$ , que no depèn de la amplificació diferencial,  $A_d$ , i que és fàcil de fixar mitjançant amb la col·locació de dues resistències externes que controlen la retroalimentació del circuit integrat.
- L'amplificació,  $A$ , és independent dels efectes que una variació de la temperatura en l'operacional pugui tenir sobre l'amplificació diferencial,  $A_d$ .
- En el cas d'un senyal variable periòdic, el senyal de sortida té la mateixa fase que el senyal d'entrada.
- La impedància d'entrada és molt elevada, la de  $V_+$ ,  $> 1 \text{ M}\Omega$ , ja que està connectat directament a aquesta entrada.
- La impedància de sortida és baixa.

### **Activitat experimental: Estudi de l'amplificador no inversor**

#### **Objectius**

- Comprovar experimentalment que la amplificació,  $A$ , de l'amplificador realimentat està determinat pels valor de les resistències externes, d'acord amb la relació:

$$A = 1 + \frac{R_a}{R_b}$$

- Comprovar que el senyal de sortida es troba en fase amb el senyal d'entrada.
- Comprovar que l'amplificador operacional se satura si el voltatge d'entrada s'aproxima o surt a fora de l'interval de l'alimentació.
- Comprovar que la resistència d'entrada és de l'ordre dels  $\text{M}\Omega$ .

#### **Material necessari**

##### *Components*

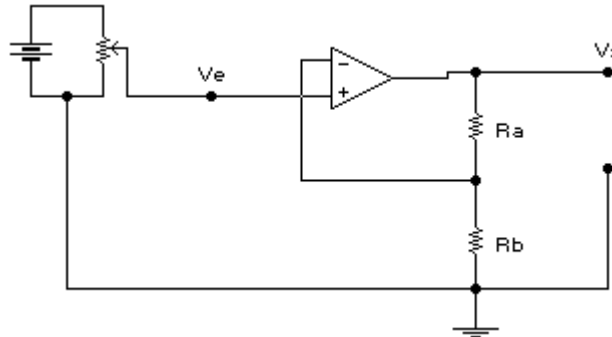
- CI operacional 741.
- Un potenciòmetre de 10 voltes,  $10 \text{ k}\Omega$ ,  $1/2 \text{ W}$ .
- Resistències: una d' $1 \text{ k}\Omega$  i dos de  $10 \text{ k}\Omega$ , i potències de  $1/4 \text{ W}$ .
- 1 pila de 4,5 V.
- Una placa de muntatge de circuits sense soldadura.

##### *Instrumental*

- Font d'alimentació simètrica:  $\pm 12 \text{ V}$  o  $\pm 15 \text{ V}$  o dues piles de 9 V.
  - 1 o 2 voltímetres.
  - Generador de funcions.
  - Oscil·loscopi.
-

**Procediment**

1. Munteu el circuit en la placa de muntatge amb els valors següents:  $R_a = 10 \text{ k}\Omega$  i  $R_b = 1 \text{ k}\Omega$ .



2. Amb les resistències donades per a cada parella  $R_a$  i  $R_b$ , determineu el valor teòric de l'amplificació. Realitzeu la comprovació experimental per a tres valors de la tensió d'entrada. Anoteu els resultats experimentals en la taula.
3. Completeu la taula.

$R_a$ ( $\text{k}\Omega$ )	$R_b$ ( $\text{k}\Omega$ )	A (teòrica)	$V_e$ (V)	$V_o$ (V)	$V_s$ (V)	$A=V_e/V_s$ (experimental)	
10	1						
	10						

4. Amplifiqueu un senyal d'entrada periòdic de freqüència baixa, per exemple una tensió sinusoidal del generador de funcions o bé d'un transformador. Observeu en l'oscil·loscopi el senyal d'entrada i de sortida i comproveu si estan en fase. Aneu amb compte respecte a l'amplitud del senyal d'entrada, ja que determina la saturació de la sortida de l'AO.
5. Anoteu les conclusions de les observacions:

**5.2.3 Amplificador operacional seguidor de tensió**

És un amplificador de guany unitat,  $A = 1$ .

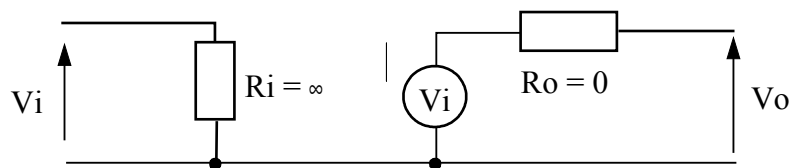
$$A = 1 + R_a / R_b = 1$$

quan s'acompleix alguna de les condicions següents:

- a)  $R_a$  nul·la o un valor no infinit i  $R_b$  infinita.

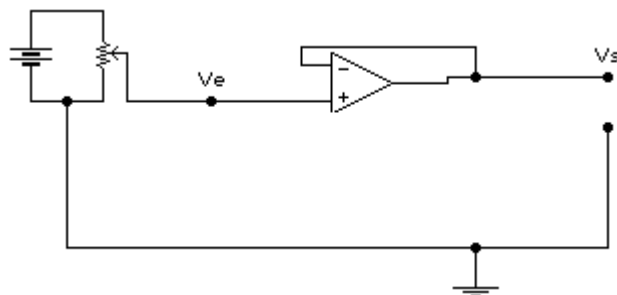
- b) Ra nul·la i qualsevol valor de  $R_b$  diferent de 0 i elevat. Això s'aconsegueix portant el senyal de sortida cap a l'entrada inversora. La tensió de sortida segueix la tensió d'entrada, amb el mateix valor.

La importància d'aquest amplificador rau en que al senyal d'entrada ofereix una gran resistència i genera un senyal de sortida del mateix valor de tensió que tenia el senyal d'entrada, però amb baixa resistència interna. És un circuit adaptador d'impedàncies.



### Activitat experimental. Funcionament d'un amplificador seguidor de tensió

Munta el circuit seguidor de tensió següent. Feu servir un potenciòmetre de 10 kΩ com a divisor de la tensió positiva d'alimentació per obtenir el senyal d'entrada.



Variu la tensió del senyal d'entrada i comproveu que el senyal de sortida té la mateixa tensió.

## 5.2.4 Amplificadors lineals inversors

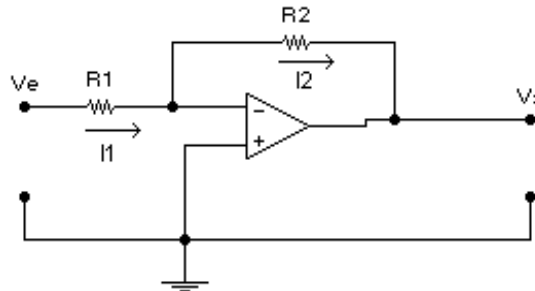
### 5.2.4.1 Funcionament

El senyal de sortida té signe oposat al senyal d'entrada. En el cas d'un senyal d'entrada sinusoidal periòdic, d'entrada, donarà un senyal sinusoidal de sortida però en oposició de fase.

$$V_s(t) = A V_e(t)$$

En l'esquema bàsic més utilitzat està representat per la figura següent i es pot observar tot això:

- L'entrada de senyal no inversora està connectada a massa.
- El senyal d'entrada a amplificar s'aplica a l'entrada no inversora amb la resistència d'entrada R1.
- La realimentació es fa a través de la resistència R2.



Determinació de l'amplificació,  $A$ , considerant que treballa en la regió lineal fent servir el model d'AO ideal:

- $V_- = V_+ = 0$  V. El punt A que està a 0 V de massa però amb una resistència  $\infty$ ,  $i_- = 0$  A, s'anomena massa virtual.
- En el punt A:

$$i_1 = i_2 + i_- = i_2 \quad \text{ja que} \quad i_- = 0$$

Els valors de les intensitats està determinat per:

$$I_1 = \frac{V_e - V_-}{R_1} \qquad I_2 = \frac{V_- - V_s}{R_2}$$

Igualant les dues equacions anteriors i fent  $V_- = 0$ , queda:

$$\frac{V_e}{R_1} = -\frac{V_s}{R_2}$$

L'amplificació del senyal d'entrada és:

$$A = \frac{V_s}{V_e} = -\frac{R_2}{R_1}$$

- El signe - de l'amplificació el determina l'amplificador com a inversor.
- Si la tensió de entrada és contínua,  $V_s$  té signe oposat.
- Si el senyal d'entrada és altern sinusoidal, el senyal de sortida també és altern pero desfasat  $\pi$  radians.
- La resistència del senyal d'entrada és R1.

### Activitat experimental: Anàlisi d'un amplificador inversor

#### Objectius



- Observar el funcionament d'un amplificador inversor i comprovar que l'amplificació del senyal d'entrada prové de la relació:  $A = -R2/R1$
- Comprovar que el senyal de sortida està en oposició de fase amb el senyal d'entrada.
- La resistència d'entrada de l'amplificador és  $R1$ .

### Material necessari

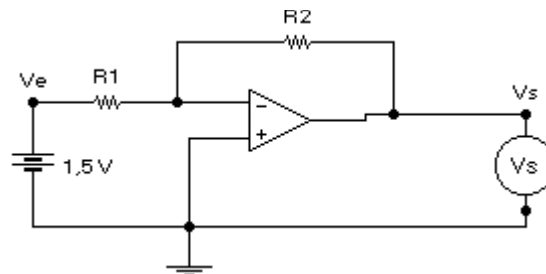
#### Components

- CI operacional 741.
- Un potenciòmetre de 10 volts, 10 k $\Omega$ , 1 W.
- Resistències de diferents valors, per exemple de: 1 k $\Omega$ , 33 k $\Omega$ , dos de 10 k $\Omega$  i una de 100 k $\Omega$ , amb potències màximes de 0,5 W.
- 1 pila d'1.5 V.
- Una placa de muntatge de circuits sense soldadura.

#### Instrumental

- Font d'alimentació simètrica:  $\pm 12$  V o  $\pm 15$  V o dues piles de 9 V.
- 1 o 2 voltímetres.
- Generador de funcions
- Oscil·loscopi.

### Procediment



1. Munteu el circuit en la placa de muntatge amb la resistència  $R1 = 10$  k $\Omega$  i per a cadascun dels valors de  $R2$ , els quals se indiquen a la taula següent:

R1 (k $\Omega$ )	R2 (k $\Omega$ )	A teòrica	$V_e$ (V)	$V_s$ (V)	$A=V_s/V_e$
10	1				
	10				
	33				
	100				

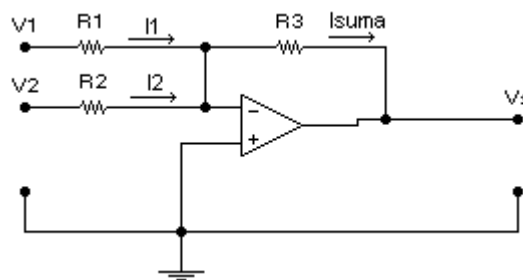
- 1.1 Calculeu l'amplificació en funció de les resistències.
- 1.2 Mesureu el valor del senyal d'entrada i sortida.
- 1.3 Calculeu el valor de l'amplificació real.

2. Analitzeu si l'amplificador ha entrat en saturació per algun dels valors de R2 en zona de saturació.
3. Repetiu l'apartat primer del procediment permutant les posicions dels terminals del generador d'1,5 V; veureu que s'aconsegueix un canvi en la polaritat del senyal d'entrada.
4. Anoteu les observacions experimentals.
5. Traieu el generador d'1,5 V i apliqueu com a senyal d'entrada una tensió sinusoïdal, del generador de funcions de BF, de valor eficaç 0,1 V i amplifiqueu-la -10 vegades. Observeu amb l'oscil·loscopi si el senyal de sortida es troba en fase o en oposició de fase amb el senyal d'entrada.

### 5.2.4.2 Algunes aplicacions dels AO inversors

#### Sumador inversor

Es fa servir quan interessa barrejar, sumar, dos o més senyals. L'esquema:



La càrrega en el nus A ni s'acumula, ni es genera ni es destrueix, per tant, la càrrega que entra ha de sortir:

$$I1 + I2 + I- = Isuma$$

ja que  $I$  és nul·la.

Els valors de les intensitats són:

$$I1 = V1/R1$$

$$I2 = V2/R2$$

$$Isuma = (V- - Vs)/R3 \cong -Vs/R3$$

Substituint els valors de les intensitats en l'equació primera queda:

$$-\frac{Vs}{R3} = \frac{V1}{R1} + \frac{V2}{R2} \quad \Rightarrow \quad Vs = -R3 \left( \frac{V1}{R1} + \frac{V2}{R2} \right)$$

Posat que:  $R1 = R2 = R$ , aleshores,

$$V_s = - \frac{R3}{R} \cdot (V_1 + V_2)$$

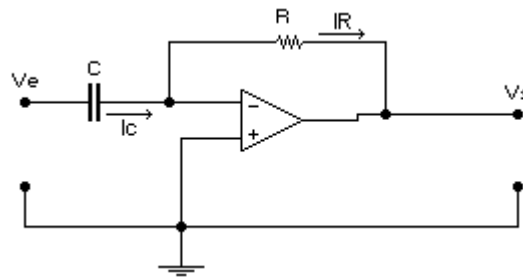
$$\text{Si } R3 = R \Rightarrow V_s = - (V_1 + V_2)$$

- La tensió de sortida és proporcional a la suma algebraica de les tensions de senyals d'entrada.
- La tensió de sortida té signe oposat al de la suma de les tensions d'entrada.

### Circuit diferenciador

Permet derivar la tensió del senyal d'entrada en funció del temps.

Esquema bàsic:



Observeu que el senyal d'entrada s'aplica a l'entrada no inversora a través d'un condensador de capacitat C.

En la zona de funcionament lineal, s'acompleix que  $V_c = V_e - V_- \approx V_e$

La intensitat de corrent que carrega el condensador és la d'entrada a través de la realimentació, IR:

$$I_c = I_R$$

Els valors de les intensitats són aquests:

$$I_c = dQ / dt$$

$$I_R = - V_s / R$$

Igalant les dues equacions anteriors i aïllant la tensió de sortida:

$$V_s = - I_R / R = - I_c / R = - R \cdot dQ / dt = - R \cdot d(C \cdot V_e) / dt$$

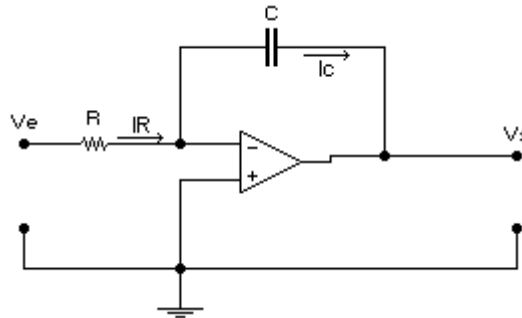
$$V_s = - R \cdot C \cdot dV_e / dt$$

- La tensió de sortida és proporcional a la derivada de la tensió d'entrada amb relació al temps.

### Circuit integrador

Permet integrar un senyal de tensió en funció del temps.

Esquema,



Observeu que el condensador i la resistència tenen les posicions permutades respecte del muntatge derivador.

Considerem que s'aplica a l'entrada un senyal  $V_e$  i que el condensador està descarregat. La intensitat d'entrada carrega el condensador, ja que no pot derivar-se intensitat per l'entrada de l'operacional,

$$IR = I_c$$

Les intensitats són determinades per:

$$I_e = IR = V_e / R$$

La càrrega que en un temps  $dt$  arriba al condensador, és aquesta:

$$dQ_c = I_c \cdot dt$$

La tensió en borns del condensador és :

$$V_c = V_- - V_s = - V_s$$

La variació de la tensió del condensador és conseqüència de la variació de la seva càrrega:

$$dV_c = dQ_c / C = (1/RC) I_c \cdot dt$$

La variació de la tensió de sortida és la següent:

$$dV_s = - dV_c = - dQ_c / C = - (1/C) I_e \cdot dt = - (1/RC) V_e \cdot dt$$

La tensió de sortida en un interval de temps s'obté mitjançant la integració de la funció anterior:

$$V = \int - (1/RC)V_e \cdot dt + ctant = - (1/RC) \int V_e \cdot dt + ctant$$

• La tensió de sortida és proporcional a l'integral de la tensió d'entrada, amb el coeficient  $- (1/RC)$ .

### Activitat experimental. Circuit integrador

Dissenyeu un circuit per carregar un condensador de  $100 \mu\text{F}$  a intensitat constant al ritme d'un volt per cada 30 s.

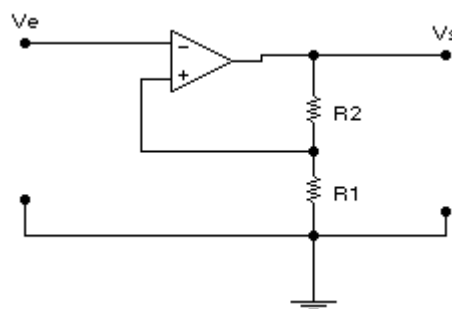
Munteu el circuit i feu-ne la comprovació experimental.

## 6. Algunes aplicacions de l'AO

### 6.1 Trigger o disparador de Schmitt

Quan el senyal d'entrada té un baix nivell de soroll i el seu valor està a prop del valor de la tensió de comparació, els circuits comparadors presenten un problema que consisteix a generar un senyal de sortida erràtic entre els dos nivells de saturació, la qual cosa provoca notables problemes en els circuits de potencia que controlen. Per evitar la basculació contínua del comparador i els seus efectes perjudicials Schmitt va idear un circuit, que rep el seu nom, que té com a funció canviar la polaritat del senyal de referència de comparació en cada basculació amb la mateixa polaritat que la tensió de sortida. La diferència entre els dos nivells de disparament s'anomena histèresi. Una realimentació positiva de l'AO aconsegueix l'efecte d'histèresi:

Circuit bàsic:



Quan la sortida se satura positivament, el nivell de tensió de referència és aquest:

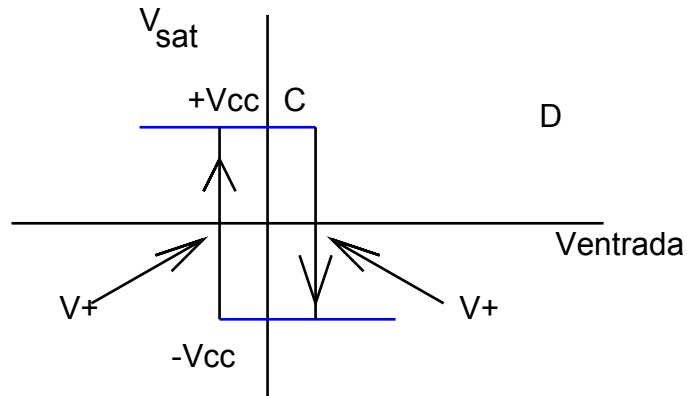
$$V_+ = (R1/(R1+R2)) V_{cc}$$

La sortida restarà amb polaritat positiva mentre el senyal de l'entrada no superi el valor de referència.

Quan la sortida se satura negativament,  $V_+$  passa a ser negativa amb aquest valor:

$$V_+ = (R1/(R1+R2)) V_{cc}$$

La sortida restarà amb polaritat negativa mentre el senyal de l'entrada inversora no estigui per sota del valor de referència.



Aquest és el cicle d'histèresi.

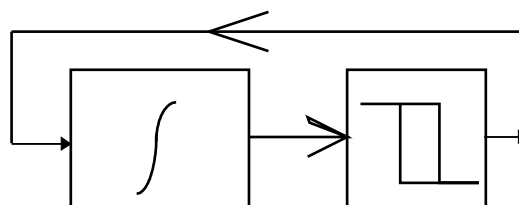
En la taula següent estan determinats els valors de disparament del cicle d'histèresi en funció dels valors de les resistències que determinen el nivell de realimentació positiva.

R1 (kΩ)	R2 (kΩ )	Vrefer màx.	Vrefer mín.
1	10	+0,099Vsat.	-0,099Vsat.
1	100		

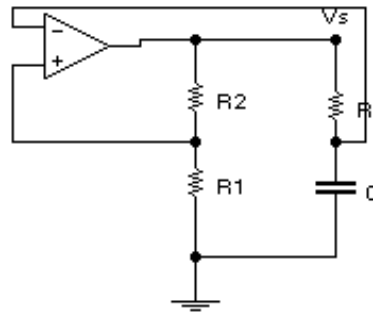
### 6.2 Multivibrador estable

Combina en un mateix circuit amplificador dues funcions: la de comparador amb histèresi i la d'integració, de manera que dona com a resultat una funció de sortida astable periòdica entre els dos nivells de tensió de saturació. La forma de l'ona del senyal de sortida és quadrada i es fa servir per construir bases de temps.

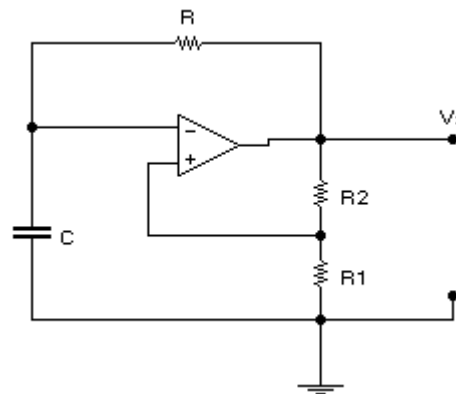
Diagrama de blocs:



Esquema del circuit:



L'esquema usual del circuit és:



En l'esquema es pot observar que els senyals que s'apliquen a les entrades provenen del circuit mateix. A l'entrada no inversora s'aplica com a realimentació positiva una part de la tensió de sortida i fa la funció de senyal de referència del comparador:  $V_+ = (R1/(R1+R2))V_s$ . A l'entrada inversora s'aplica la tensió del condensador,  $V_- = V_c$ .

Considerem que el condensador està descarregat,  $V_c = 0$  V, i l'AO està saturat al nivell positiu de la tensió.  $V_- < V_+$ , i el condensador es carrega a través de R fins que  $V_- > V_+$  i, en aquest instant, la tensió de sortida bascula al valor de saturació negatiu, proper al de  $-V_{cc}$ . El nivell de referència  $V_+$  passa a ser negatiu i el condensador es descarrega a través de R fins que la seva tensió és inferior a la de referència, en aquest instant l'operacional torna a bascular al nivell de saturació positiu i comença un nou cicle.

El senyal periòdic generat té un període:

$$T = 2,2 RC, \text{ sempre que } R1=R2=R$$

### Activitat

Disseny i construeix un generador de senyal d'ona quadrada que variï la freqüència en l'interval de 500 Hz fins a 5 kHz per al comandament d'un potenciòmetre que permeti la variació de R. Preneu  $R1=R2=10$  k $\Omega$  i un condensador de 0,1  $\mu$ F de capacitat i calculeu la resistència R que variï entre els valors que limiten les

frequències extremes. Per fer-ho, efectueu una associació sèrie d'una resistència fixa al potenciòmetre.

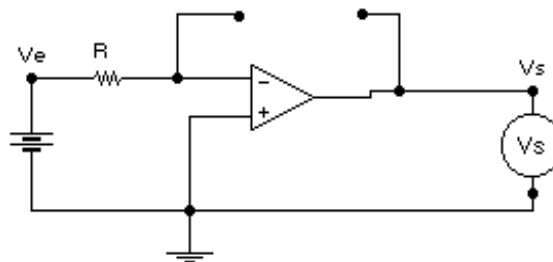
### 6.3 Font d'intensitat constant

La intensitat de corrent que hi passa per la branca de realimentació  $I$ , està determinada únicament pel circuit d'entrada ( $V_e$ ,  $R$ ).

$$I_e = I + I_- \cong I$$

$$I_e = V_e/R = I = \text{ctant.}$$

L'esquema és aquest:



### 6.4 Convertidor d'intensitat en tensió. Construcció d'un Ohmímetre

Si dissenyeu una font d'intensitat constant, com ara la del circuit anterior, i en el circuit de realimentació col·loqueu la resistència, la tensió en la resistència,

$$V_R = R \cdot I_e = -V_S$$

La tensió de sortida es pot mesurar com a positiva, sense afectar la realimentació, entre massa i el terminal de sortida. Hem fet un transformador de corrent en tensió, on:  $V_s \propto I_e$ .

Calibrat convenientment pot realitzar la funció d'òhmímetre.

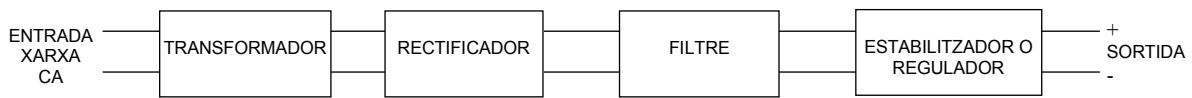
$I_e$ (mA)	Calibratge de l'ohmímetre en $\Omega$ per volt de sortida
10	100
1	1000
0,1	10.000
0,01	100.000

### 6.5 Fonts de tensió regulades

Una font d'alimentació de tensió, com s'ha vist anteriorment, és un circuit que converteix el senyal de la xarxa, que és de corrent altern, en un senyal de corrent continu estabilitzat a un nivell de tensió necessari per alimentar els circuits elèctrics o electrònics.



L'estructura per blocs d'una font és la següent:

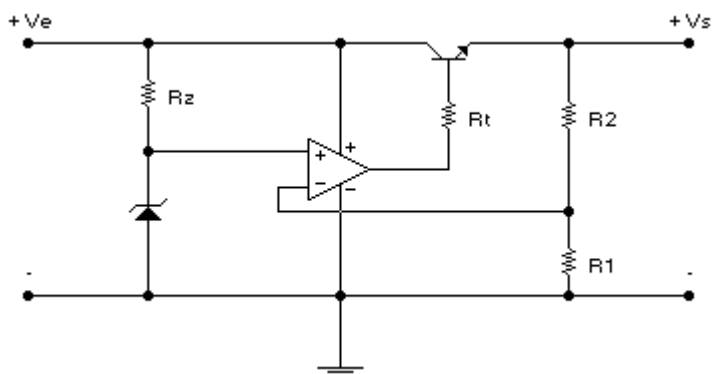


Amb els tres primers blocs es pot aconseguir una font d'alimentació de corrent continu (cc) amb una sortida de tensió no regulada. Quan, a la font, se li exigeix una gran estabilitat de tensió de sortida amb qualsevol variació de la càrrega, cal incorporar-li un quart bloc de regulació.

El regulador és un circuit que manté la tensió de sortida constant independentment de les variacions que es puguin produir en la tensió d'entrada i de les variacions en la càrrega.

Analitzarem aquest bloc, ja que l'AO exerceix la important funció de controlar l'estabilitat de la tensió de sortida.

Estructura bàsica d'un circuit regulador:



El circuit regulador amb AO consta de:

- Una tensió de referència que es la del díode zener,  $V_z$ , que s'aplica a l'entrada no inversora.

Per mantenir la polarització inversa del zener amb el mínim consum energètic te una resistència associada en sèrie inferior o igual al valor:

$$R_{zmax} = \frac{V_{emin} - V_z}{I_{zmin}}$$

- Una mostra de la tensió de sortida que s'aplica com a realimentació a l'entrada inversora. La mostra s'agafa del divisor de resistències de la tensió sortida. En el circuit de la figura és  $V_{R1} = V_s \cdot \frac{R1}{R1+R2}$ .

$$V_{R1} = V_s \cdot (R1 / (R1 + R2))$$

La tensió de sortida està determinada per l'expressió següent:

$$V_s = V_z \cdot ((R1+R2) / R1)$$

Si la resistència R2 és nul·la, la tensió de sortida és la mateixa del zener.

La tensió de sortida ha de ser sempre uns dos volts inferior a la mínima de l'entrada.

- La sortida de l'AO actua sobre la base del transistor que és l'element de pas d'intensitat de l'entrada a la sortida. El transistor pot ser un *darlington* i controlar una elevada intensitat, de l'ordre d'uns quants ampers.

El corrent en el transistor és, aproximadament, igual a la intensitat de sortida, ja que la intensitat de col·lector és, si fa igual a la de l'emissor.

L'operacional actua com a amplificador d'error diferencial existent entre la tensió de referència del zener i la mostra del senyal de sortida. En el cas d'una mínima diferència entre els valors dels senyals mencionats, actua d'una manera instantània sobre la conducció del transistor, que restableix el nivell correcte del voltatge de sortida.

Un inconvenient d'aquest regulador és que no està protegit contra curtcircuits a la sortida.

## 6.6 Circuits integrats reguladors de tensió

Les fonts d'alimentació són circuits habituals en la majoria de circuits electrònics alimentats amb energia elèctrica de la xarxa. Això fa que el bloc de regulació de les fonts sigui d'una gran aplicació -el podem trobar al mercat integrat en diferents variants que permeten satisfer necessitats usuls-.

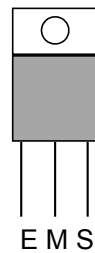
Actualment, podem trobar al mercat CI reguladors de tres o més terminals amb protecció tèrmica contra curtcircuits de la tensió de sortida. Hi ha algunes sèries més conegudes, per exemple:

- 78XX, on XX representa la tensió de sortida positiva respecte de la massa. Per exemple, el CI 7818 dona una sortida estable de +18 V.
- 79XX, on XX representa la tensió de sortida negativa respecte de la massa. Per exemple, el CI 7909 dona una sortida estable de -9 V.

La tensió d'entrada màxima sol ser d'uns 40 V.

SÈRIE	Vs(V)	SÈRIE	Vs(V)
7805	5	7905	-5
7812	12	7912	-12

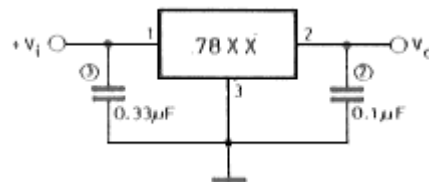
Encapsulat dels 78XX,



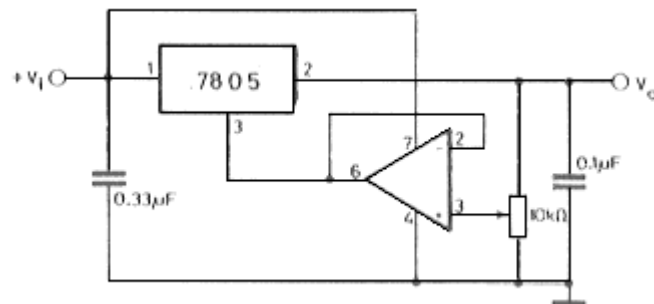
E: entrada; M: massa; i S: sortida.

Esquemes d'aplicació:

a) Circuit estabilitzador



b) Circuit de tensió de sortida regulable



La tensió de referència es manté constant entre la sortida del CI i el terminal de massa. La tensió de sortida varia entre la tensió de referència i el valor límit de la tensió d'entrada al CI estabilitzador.

$$V_s = V_{ref} (1 + R1/R2)$$

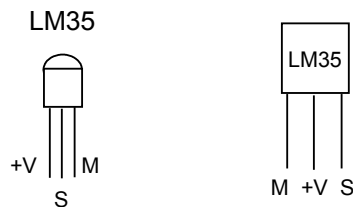
### Activitats finals

1. Amplificador no inversor.

a) Dibuixeu l'esquema d'un AO no inversor amb realimentació negativa amb els components externs següents:

$$R_a = 195 \text{ k}\Omega \text{ i } R_b = 5 \text{ k}\Omega .$$

- b) Determina el guany de tensió.
- c) Si a l'entrada no inversora de l'amplificador s'aplica un senyal sinusoidal de 100 mV de tensió eficaç. Quin valor eficaç té la tensió del senyal de sortida? Quin és el seu valor màxim?
2. Dissenyeu un generador d'ona quadrada amb AO de freqüència 1 kHz fixant la capacitat del condensador en 1  $\mu$ F.
3. La figura següent mostra una sonda termomètrica basada en el circuit integrat LM35. Aquest CI varia la tensió de sortida en 10 mV per cada grau de variació de temperatura en l'interval de 0 °C a 100° C. Està calibrat de fàbrica per donar una tensió de sortida de 247,8 mV a la temperatura de 24,7 °C. Funciona correctament si s'alimenta en l'interval de 4 V a 20 V.

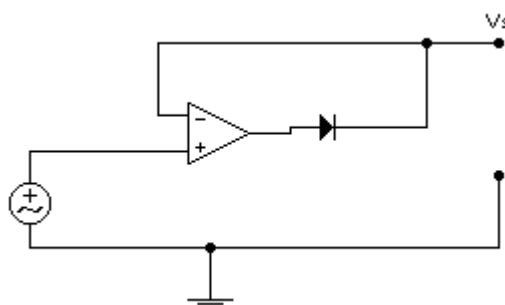


+ V: alimentació; M: massa; i S : sortida.

Dissenyeu un circuit amb AO que acondicioni la tensió de sortida de la sonda, que es l'entrada del circuit, de manera que l'amplifiqui -0.1 vegades y, per tant, es pugui mesurar la  $T^a$  amb un polímetre digital en l'escala de 100 mV.

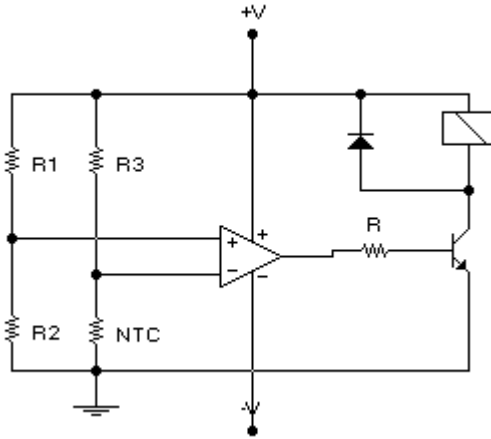
Escolliu una resistència d'entrada a l'AO de 10 k $\Omega$  a 100 k $\Omega$ .

4. El circuit de l'esquema és un rectificador de mitja ona.

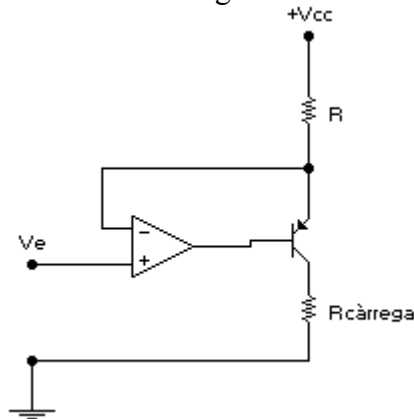


Expliqueu el funcionament del circuit i dibuixeu l'ona d'entrada i sortida del circuit.

5. Expliqueu el funcionament d'aquest circuit de ventilació forçada, que connecta un ventilador quan la temperatura és superior a 25 °C. Com a element sensor de temperatura s'ha col·locat una NTC de 2200  $\Omega$ .



- a) Aquest circuit té dues parts, una de control i l'altra de potència. Identifica-les.
  - b) Indiqueu si l'AO està realimentat y, en cas afirmatiu, responeu: quina és la xarxa de realimentació?
  - c) Quina funció fa l'associació sèrie de les resistències R1 i R2.
  - d) Quina funció fa l'associació sèrie de les resistències R3 i NTC.
  - e) De quina tensió ha de ser el relé.
  - f) Expliqueu el funcionament del circuit.
6. El circuit de la figura representa una font d'intensitat constant regulada per la tensió d'entrada i amb la càrrega connectada a terra.



- a) Expliqueu quina intensitat hi circula, per la càrrega, i el funcionament general del circuit.
- b) Si  $V_{cc} = 12 \text{ V}$ ,  $V_e = 5 \text{ V}$  i  $R = 100 \Omega$ , quin corrent hi haurà a la càrrega?
- c) Dissenyeu un circuit per mesurar resistències emprant un voltímetre com a visualitzador del valor de la resistència. A l'escala d'un volt s'ha de mesurar una resistència màxima de  $10 \text{ k}\Omega$ .

- d) Quina modificació cal realitzar al circuit de l'apartat anterior per disposar de diferents escales de resistències?
-