

Amplificatore Operazionale

L'amplificatore operazionale è un componente elettronico analogico la cui denominazione deriva dal fatto che questo dispositivo è stato ampiamente usato per effettuare operazioni matematiche su segnali elettrici. l'alimentazione è in genere duale con le due tensioni di alimentazione $V_{cc} = \pm 15V$.

- *Simbolo circuitale, guadagno, resistenze di ingresso e di uscita, utilizzo come comparatore*

Nella Figura 1 è illustrato il simbolo circuitale dell'A.O. Si nota subito la presenza di due ingressi v^+ e v^- detti rispettivamente, ingresso non invertente ed ingresso invertente. Il dispositivo è dotato di un'unica uscita v_o (caso dell'amplificatore single-ended).

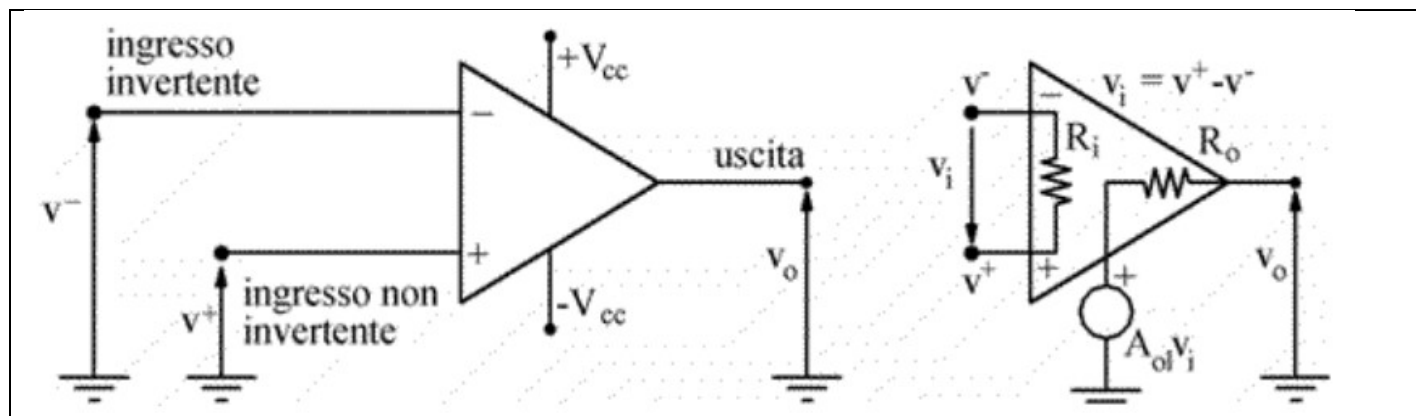


Figura 1: simbolo circuitale dell'Amplificatore Operazionale

Il legame fra ingresso e uscita è espresso dalla seguente relazione:

$$v_o = A_{OL} \cdot (v^+ - v^-) \quad [1]$$

Dove A_{OL} è il guadagno ad anello aperto dell'operazionale, cioè è il guadagno di tensione del dispositivo senza che vi sia un collegamento circuitale fra uscita ed ingressi del dispositivo (anello di reazione). Viene illustrata anche la costituzione interna dell'A.O. dove si evidenzia la resistenza di ingresso R_i e il generatore equivalente di uscita $A_{OL} v_i$; dove $v_i = v^+ - v^-$.

La tabella di Figura 2 mostra i parametri principali di un A.O. nel caso ideale e in un caso reale.

Parametro	Simbolo	Ideale	Reale
Guadagno	A_{OL}	∞	$\approx 10^6$ circa
Resistenza di uscita	R_o	0	75Ω
Resistenza di ingresso	R_i	∞	$2M\Omega$
Larghezza di banda	BW	∞	1MHz

Figura 2: parametri principali di un Amplificatore Operazionale, caso reale e caso ideale

In Figura 3 è mostrata la caratteristica grafica che lega fra di loro l'ingresso e l'uscita di un A.O. reale ad anello aperto (trascaratteristica). L'A.O. risponde come un 'comparatore': Se $v^+ > v^-$ l'A.O. con una tensione di saturazione superiore $+V_{SAT} \approx +V_{CC}$; altrimenti se $v^+ < v^-$ l'A.O. presenta in uscita un valore $-V_{SAT} \approx -V_{CC}$. Nei casi reali esiste una ristretta gamma di valori della tensione di ingresso v_i , solitamente dell'ordine di pochi μV , detta zona di funzionamento lineare o zona attiva, dove viene rispettata la relazione [1].

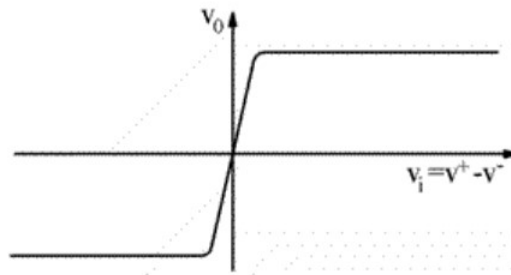


Figura 3: caratteristica ingresso-uscita (transcaratteristica)

L'A.O. ad anello aperto può essere usato solo per applicazioni non lineari come, ad esempio, comparatore di tensione. Un'applicazione già da subito realizzabile è il rivelatore di passaggio per lo zero il cui funzionamento è illustrato in Figura 4.

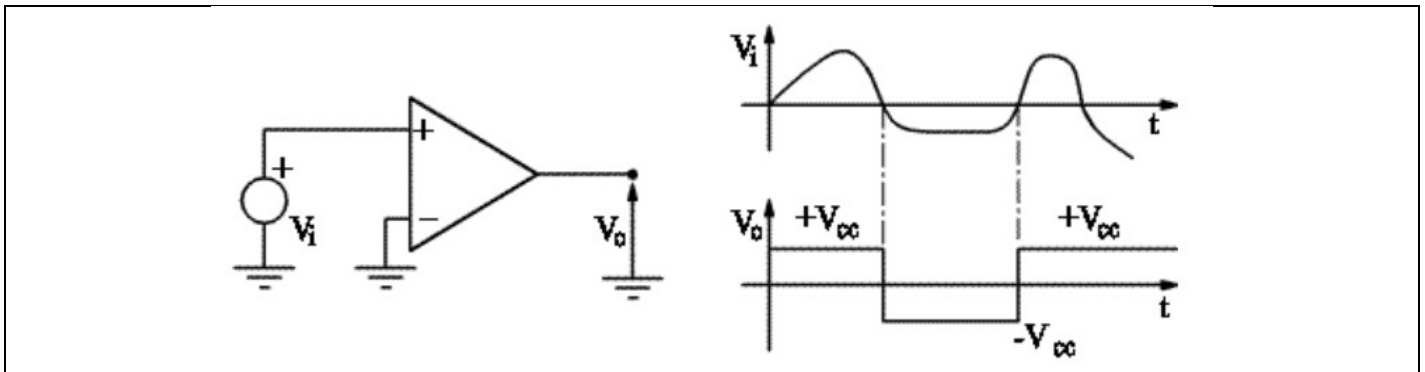


Figura 4: rivelatore di passaggio per zero

- *La massa virtuale, la reazione negativa*

Grazie all'anello di reazione, presente nelle applicazioni ad anello chiuso, è possibile utilizzare l'amplificatore operazionale nella zona di funzionamento lineare, nella quale l'uscita v_o non è in saturazione ma assume un valore compreso tra $-V_{cc}$ e $+V_{cc}$.

Essendo il guadagno dell'amplificatore molto alto, nel caso ideale infinito, al fine di avere un'uscita 'finita', $v^+ - v^-$ deve essere molto piccolo, zero nel caso ideale. Questo significa che se uno dei due morsetti (invertente o non invertente) viene messo a massa, anche l'altro risulta essere a potenziale zero pur non essendo fisicamente collegato a massa, ed è detto per questo 'massa virtuale'.

Consideriamo l'esempio chiarificatore di un amplificatore operazionale ideale connesso come in Figura 5: sapendo che la tensione su v^- è 0V, in quanto massa virtuale, è possibile calcolare v_o , applicando la legge di Ohm e sapendo che le due resistenze risultano percorse dalla stessa corrente (l'impedenza di ingresso è infinita, quindi la corrente entrante nel morsetto invertente è nulla):

$$I = 2V / 1K\Omega = 2mA$$

(legge di Ohm applicata alla resistenza di 1KOhm)

$$v^- - v_o = I \cdot 3K\Omega = 6V$$

(legge di Ohm applicata alla resistenza di 3KOhm)

$$v_o = v^- - 6V = -6V$$

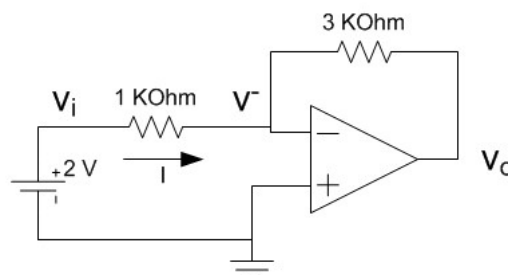


Figura 5: esempio di Amplificatore con rete di reazione resistiva

E' opportuno osservare come l'effetto della reazione sia tale da garantire che v^- sia a 0V. Infatti, supponendo che accada una perturbazione che porti v^- a un valore maggiore di 0V, si avrebbe che $v^+ - v^-$ risulterebbe $< 0V$ il che porterebbe v_o a $-V_{sat}$, il che, a causa della reazione, tenderebbe a far scendere v^- ottenendo infine un riequilibrio della situazione che si concretizza con $v^- = 0V$.

Con simile ragionamento si evince come, scambiando i collegamenti ai terminali v^+ e v^- , la reazione risulterebbe invece di tipo divergente (reazione positiva) portando il sistema con l'uscita in saturazione.

• **Amplificatore operazionale ad anello chiuso**

L'introduzione di una rete di reazione negativa ci consente di far funzionare il dispositivo come amplificatore. In tal caso il punto di funzionamento del dispositivo è dato dal punto P: intersezione fra la transcaratteristica dell'A.O. e la retta di carico attribuibile alla rete di reazione.

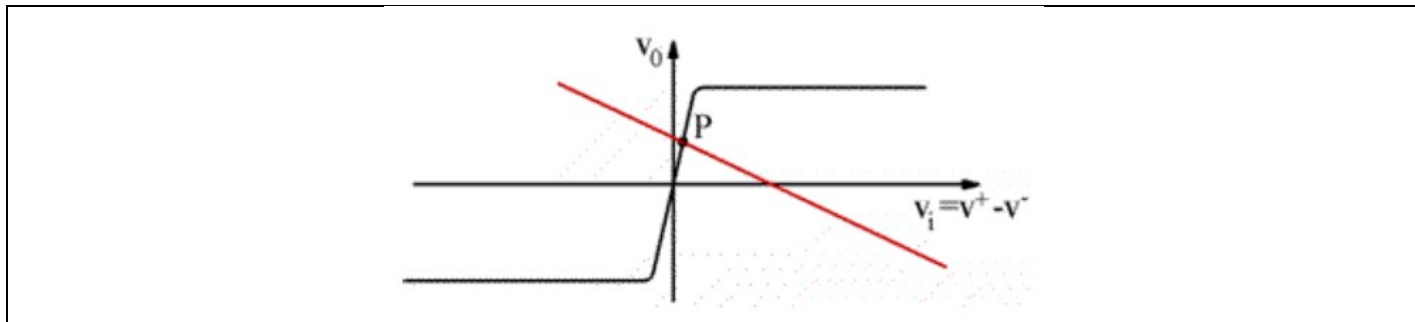


Figura 6: intersezione tra la transcaratteristica e la retta di carico

In questa circostanza la risposta del circuito può essere resa lineare per escursioni relativamente ampie del segnale di ingresso. La funzione di trasferimento di un sistema reazionato negativamente è ottenibile tramite le osservazioni riportate in Figura 7, valide, in generale, per i sistemi retroazionati. Nella maggior parte dei casi di utilizzo dell'amplificatore operazionale si ricorre all'analisi circuitale considerando la massa virtuale, l'impedenza in ingresso all'amplificatore operazionale infinita e utilizzando la legge di Ohm e i principi di Kirchhoff.

	<p> $x_a = x_i - x_f$ segnale differenza in ingresso al blocco di andata A $x_f = Bx_o$ segnale di retroazione (feedback) $x_o = Ax_a$ segnale di uscita $x_o = Ax_a = A(x_i - x_f) = Ax_i - Ax_f = Ax_i - ABx_o$ avremo: $x_o + ABx_o = Ax_i$ \Rightarrow $x_o(1 + AB) = Ax_i$ quindi: </p> <div style="border: 1px solid red; padding: 5px; width: fit-content; margin: 10px auto;"> $\frac{x_o}{x_i} = \frac{A}{1 + AB} = G$ </div> <p>guadagno ad anello chiuso di un sistema a reazione negativa</p>
<p>Sia A la funzione di trasferimento del dispositivo ad anello aperto, mentre chiamiamo B la funzione di trasferimento della rete di reazione.</p>	

Figura 7: schema a blocchi di un sistema retroazionato

• *Inseguitore, Configurazioni invertente e non invertente, sommatore*

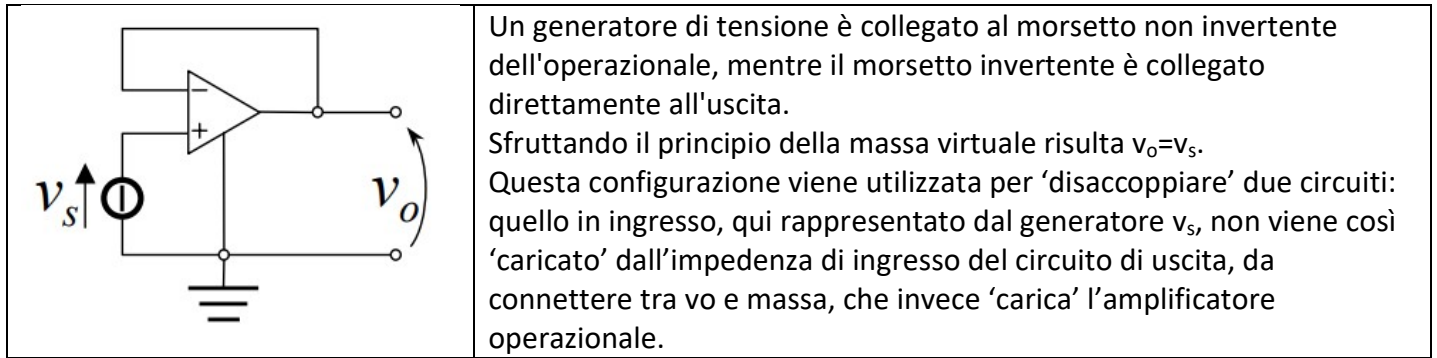


Figura 8: Inseguitore di tensione

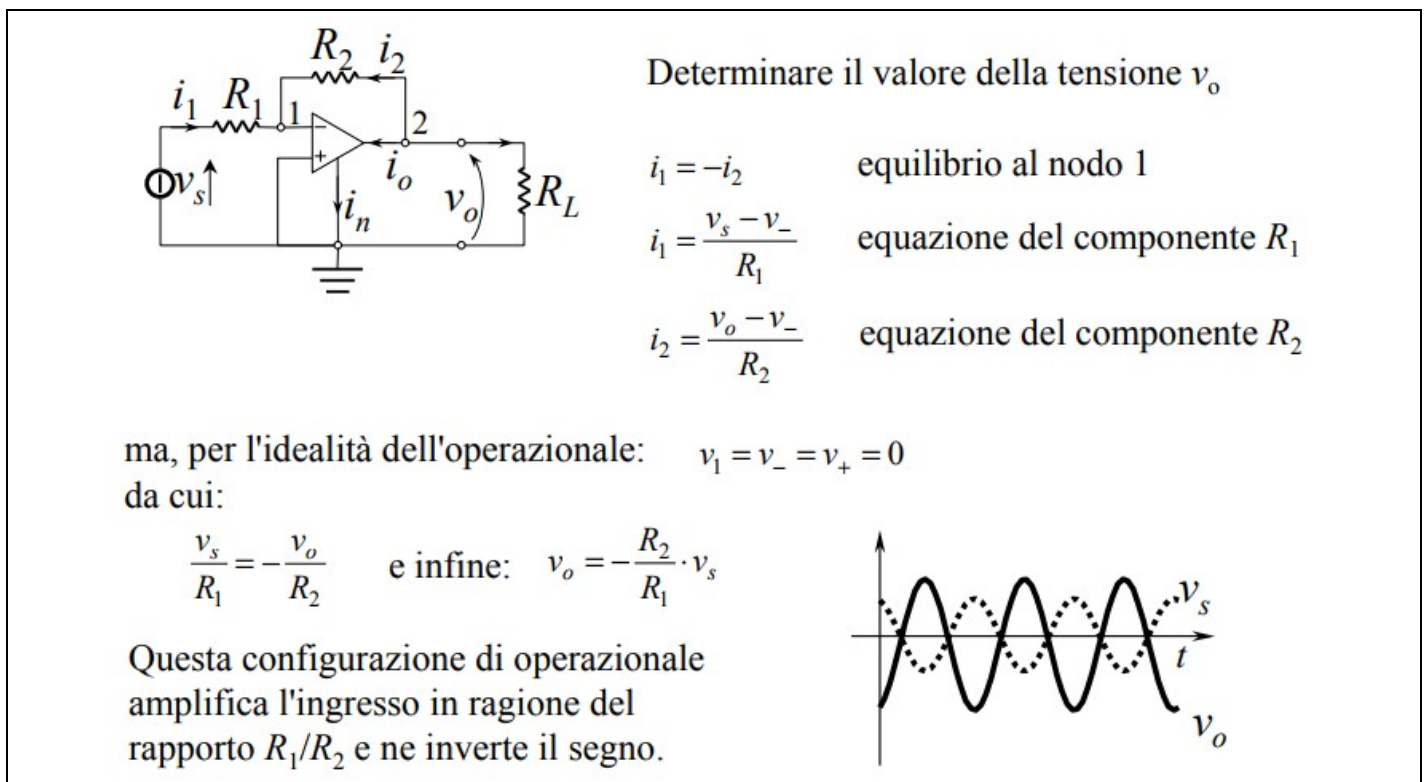
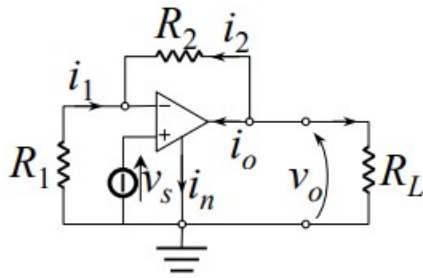


Figura 9: Amplificatore invertente



Determinare il valore della tensione v_o

$$i_1 = -i_2 \quad \text{equilibrio al nodo 1}$$

$$i_1 = -\frac{v_-}{R_1} \quad \text{equazione del componente } R_1$$

$$i_2 = \frac{v_o - v_-}{R_2} \quad \text{equazione del componente } R_2$$

ma, per l'idealità dell'operazionale: $v_- = v_+ = v_s$
da cui:

$$-\frac{v_s}{R_1} = -\frac{v_o - v_s}{R_2} \quad \text{e infine: } v_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot v_s$$

Questa configurazione di operazionale
amplifica l'ingresso della quantità
 $1 + R_2/R_1$ e non inverte il segno.

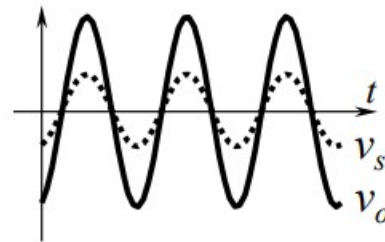
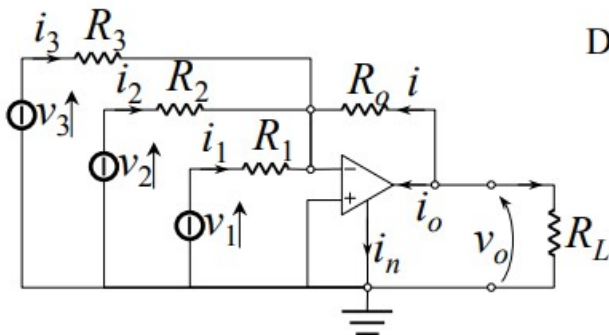


Figura 10: Amplificatore non invertente



Determinare il valore della tensione v_o

$$i + i_1 + i_2 + i_3 = 0$$

$$-\frac{v_o}{R_o} - \frac{v_1}{R_1} - \frac{v_2}{R_2} - \frac{v_3}{R_3} = 0 \quad \text{da cui, riordinando} \quad v_o = -R_o \left(\frac{v_1}{R_1} + \frac{v_2}{R_2} + \frac{v_3}{R_3} \right)$$

L'uscita è proporzionale alla somma pesata delle tensioni. Se $R_1 = R_2 = R_3 = R$:

$$v_o = -\frac{R_o}{R} (v_1 + v_2 + v_3)$$

Cioè l'uscita è proporzionale alla somma delle tensioni

Figura 11: Amplificatore sommatore