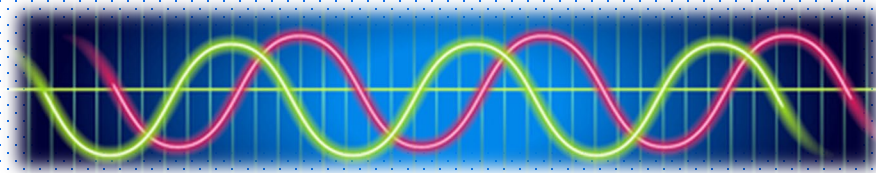


FONDAMENTI DI MISURE


- Richiami su Op-amp -



Corso di laurea triennale in
Ingegneria dell'Informazione
Prof. Andrea Cataldo



Outline

- INTRODUZIONE
 - RICHIAMI SUGLI OPAMP
 - Schema e pin di un op-amp
 - Legame ingresso-uscita
 - Amplificatore invertente e non invertente
 - Parametri principali di un op-amp
 - Gain BandWidth Product (GBWP)
 - Common Mode Rejection Ratio (CMRR)
 - Tensione di Offset
 - Buffer di tensione
 - Sommatore
 - Integratore
 - Derivatore
- 


Introduzione



Introduzione

- Un **amplificatore operazionale** (abbreviato spesso con Op-amp) è un componente elettronico analogico estremamente versatile, caratteristica che lo rende uno dei dispositivi più vastamente utilizzati.
- Alcune delle applicazioni più comuni sono: *inseguitore di tensione o buffer, convertitore da corrente a tensione, raddrizzatore attivo, integratore, possibilità di impiego in un'ampia varietà di filtri attivi, comparatore di tensione ecc...* e viene inoltre utilizzato nel **processo di conversione analogico-digitale**.

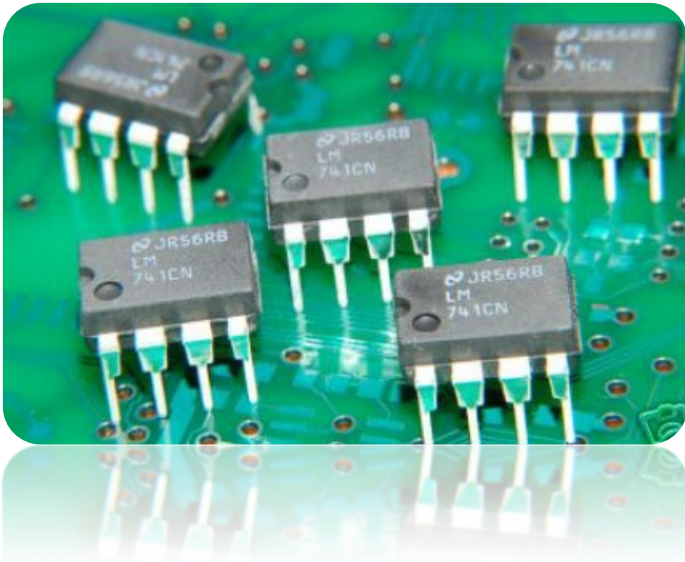
Per tutti questi motivi e per gli scopi del corso, in questo capitolo verranno effettuati i richiami teorici sugli amplificatori operazionali, ai fini di comprendere appieno concetti importanti che verranno affrontati in seguito, come il circuito Sample and Hold, l'implementazione pratica di convertitori A/D ed alcune esperienze di laboratorio con filtri attivi.



Richiami Opamp

Amplificatori operazionali

L'**amplificatore operazionale** (abbreviato spesso con Op-amp) è un componente elettronico analogico che fa parte dei circuiti integrati, la cui funzionalità principale è l'amplificazione dei segnali al suo ingresso.



- Il nome di questo dispositivo è dovuto al suo largo impiego in elettronica per implementare operazioni matematiche sui segnali elettrici come **addizioni**, **sottrazioni**, ma anche operazioni complesse come ad esempio **logaritmi**, **integrali** e **derivate**.

Amplificatori operazionali

L'amplificatore operazionale ha:

- due ingressi (uno invertente -, l'altro non invertente +);
- un'uscita a un solo terminale;
- due ingressi per l'alimentazione in continua;
- due terminali per eliminare l'offset.

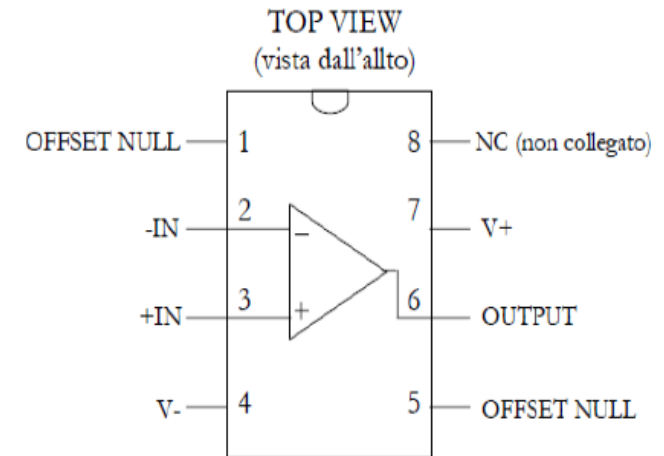
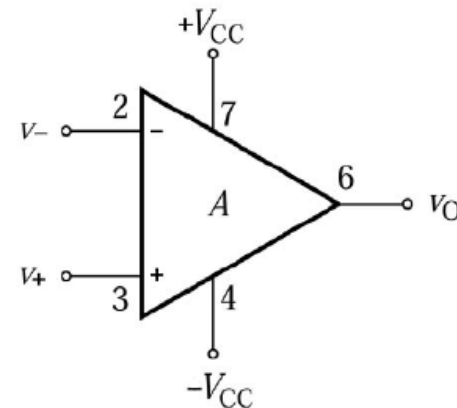


Diagramma delle connessioni per un LM741 (Dual-In-Line o S.O. Package)

Negli schemi elettrici, il simbolo di un amplificatore operazionale è un triangolo dove ai vertici della base sono posti gli ingressi e al vertice opposto l'uscita.



Amplificatori operazionali

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

$$V_o = A_{OL}(v^+ - v^-)$$

Dove la differenza di tensione esistente fra l'ingresso non invertente dell'operazionale e l'ingresso invertente ($v^+ - v^-$) viene indicata con V_i , l'uscita è V_o e A_{OL} è il guadagno ad anello aperto (**open loop**) 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), ed è quindi pari a:

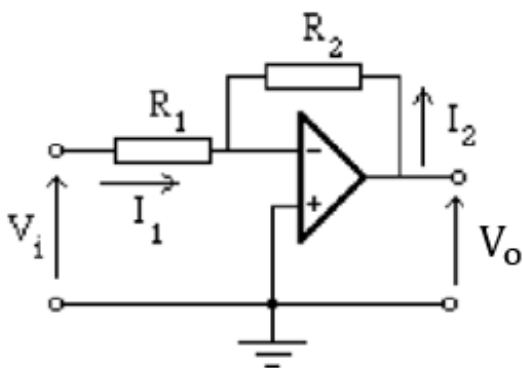
$$A_{OL} = \frac{V_o}{(v^+ - v^-)}$$

Gli opamp però sono molto utili quando una parte del segnale di uscita ritorna all'ingresso attraverso una rete di retroazione: in questo caso si dice che il circuito sta operando in condizioni di anello chiuso (**closed loop**).

Amplificatori operazionali

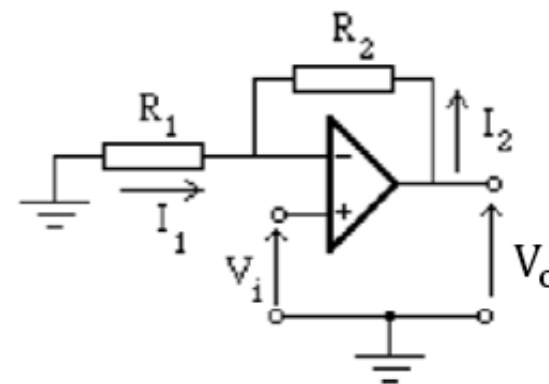
Infatti, l'elevato guadagno ad anello aperto fa sì che raramente l'op-pamp venga utilizzato in catena aperta, dove il funzionamento del dispositivo sarebbe instabile. Al contrario, si preferisce retroazionarlo negativamente (**closed loop**) per sfruttare i benefici di questo tipo di retroazione.

- Si ha l'**amplificatore invertente** quando il segnale d'ingresso viene portato all'ingresso invertente (-) e il segnale d'uscita è sfasato di 180°.
- Si ha l'**amplificatore non invertente** quando il segnale d'ingresso viene portato all'ingresso non invertente (+) e il segnale d'uscita è in fase con l'ingresso.



Configurazione invertente

$$A_{CL} = -\frac{R_2}{R_1}$$

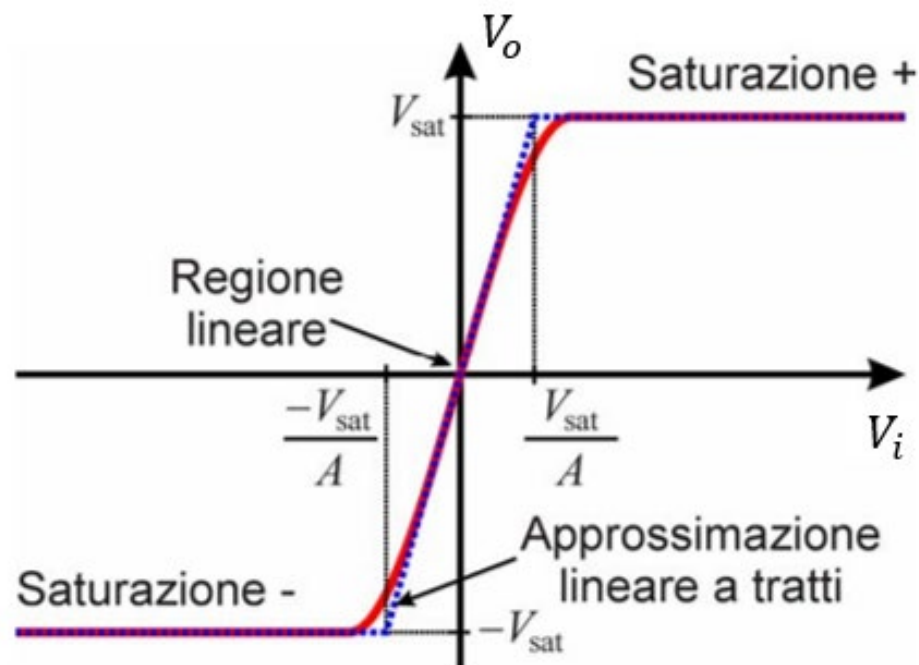


Configurazione non invertente

$$A_{CL} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Amplificatori operazionali

- La caratteristica di trasferimento di un amplificatore operazionale ha un andamento praticamente lineare nell'intorno dell'origine, con pendenza pari ad A .
- Al crescere della tensione differenziale di ingresso, **la tensione di uscita satura**
- Il valore della tensione di saturazione V_{SAT} è tipicamente inferiore di 1-2 V a quello della tensione di alimentazione



Amplificatori operazionali

Solo **idealmente**, un opamp presenta le seguenti caratteristiche:

- Guadagno A_{OL} ad anello aperto (open loop) **infinito** -> *dovrebbe amplificare senza limiti i segnali applicati*
- Impedenza di uscita **nulla** -> la V_o sarebbe indipendente dal carico
- Impedenza di ingresso **infinita** -> non assorbirebbe corrente in ingresso
- Larghezza di banda **infinita** -> potrebbe gestire, senza problemi, segnali ad alta frequenza

Amplificatori operazionali

Confronto con le caratteristiche di op-amp reali

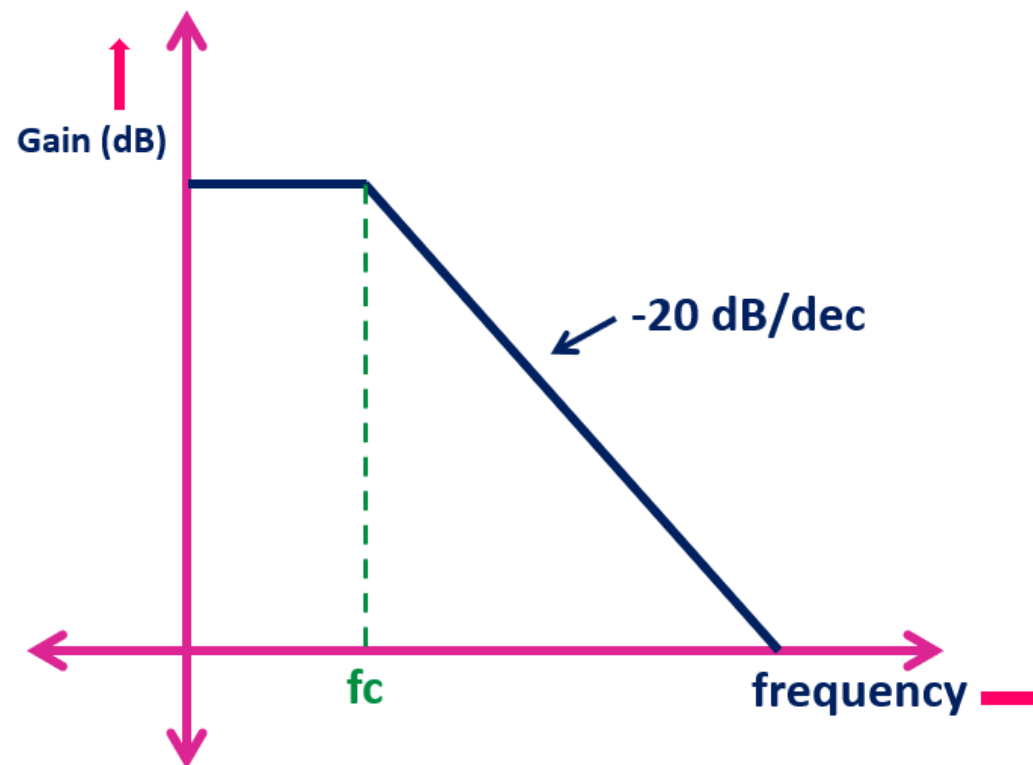
Parametro	Simbolo	Ideale	Reale (μ A741C)	Reale (LF157)
Guadagno	A_{OL}	∞	200.000	200.000
Impedenza di uscita	Z_O	0	75 Ω	0.1 – 10 Ω
Impedenza d'ingresso	Z_I	∞	2 M Ω	10 ¹² Ω
Larghezza di banda	BW	∞	1 MHz	20 MHz

Amplificatori operazionali

Abbiamo visto che per l'amplificatore operazionale ideale, il guadagno e la larghezza di banda sono infiniti. *Nella realtà si ha una larghezza di banda limitata e un guadagno finito.*

In particolare, possiamo analizzare la curva del guadagno rispetto alla frequenza. L'asse y sulla curva è il guadagno di tensione dell'amplificatore operazionale in dB, mentre l'asse x è la frequenza in scala logaritmica.

Il guadagno è quindi costante fino a una certa frequenza (chiamata **frequenza di taglio f_c** in corrispondenza di -3 dB rispetto al valore massimo) per poi ridursi con una pendenza di -20 dB/dec.



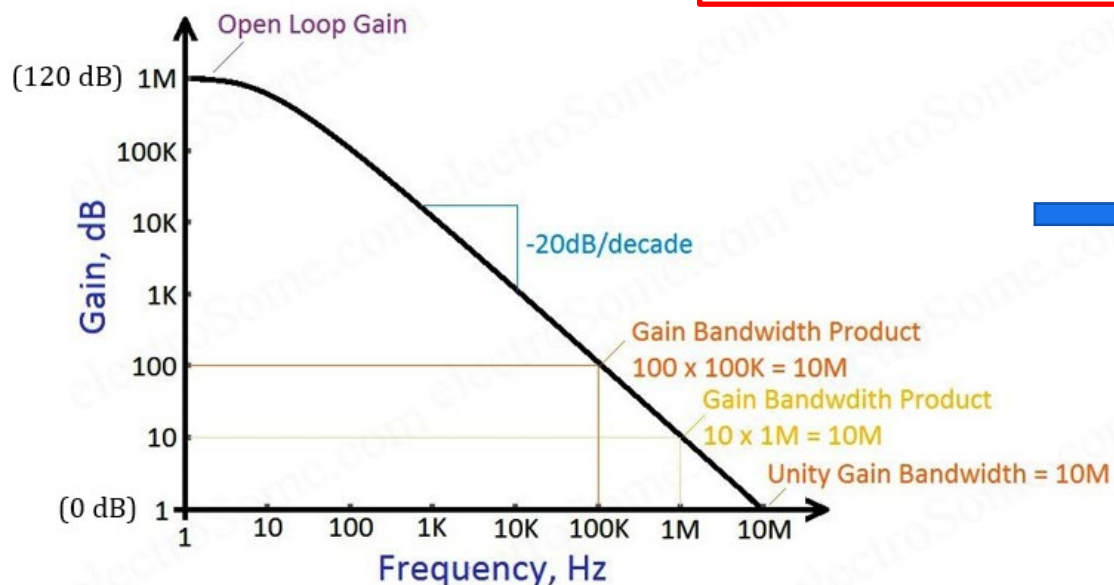
Amplificatori operazionali

Gain-Bandwidth Product

Il **GBWP** (Gain-Bandwidth Product) degli amplificatori operazionali è pari al prodotto tra il modulo del suo guadagno ad anello aperto e la frequenza di taglio a -3 dB.

$$GBWP = A_{OL} \cdot BW$$

Valore costante a qualsiasi frequenza



Inoltre, consideriamo il guadagno unitario 1 (= 0 dB), si ha:

$$GBWP = 1 \cdot BW = f_u$$

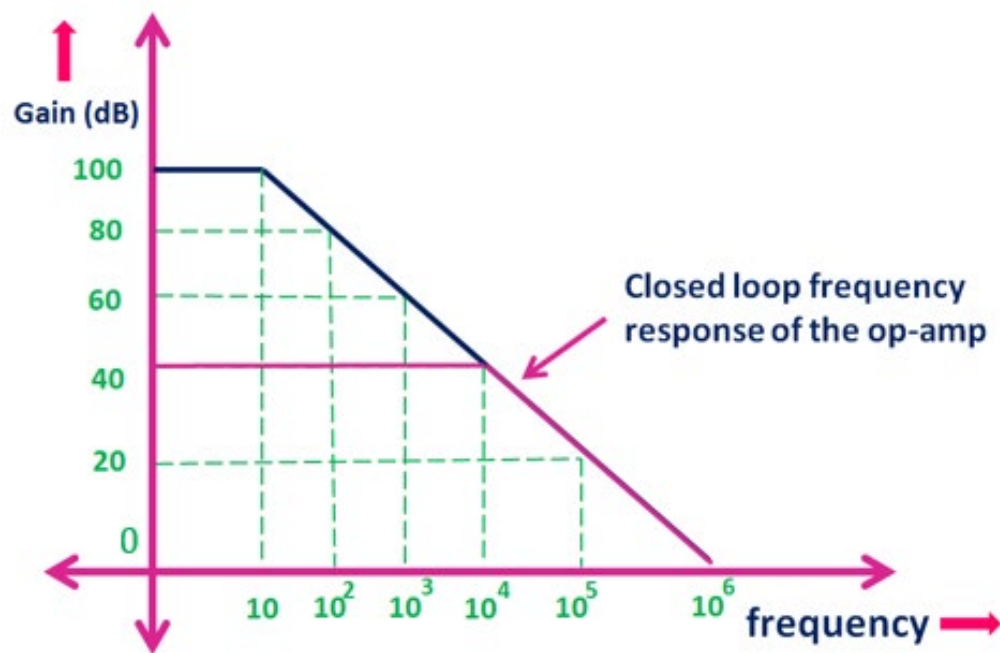
Ciò significa che **GBWP** **corrisponde proprio alla frequenza f_u a cui il guadagno di tensione ad anello aperto si riduce al valore unitario.**

Nell'esempio riportato possiamo notare come considerando un valore di guadagno e la relativa frequenza di taglio a -3 dB, il prodotto sia sempre 10 M (equivale all'area del rettangolo che si viene a formare)

Amplificatori operazionali

Nella configurazione ad **anello chiuso** invece, il guadagno diminuisce ma per mantenere un GBWP costante, aumenta la frequenza di taglio.

Utilizzando il GBWP inoltre, è facile identificare la frequenza di taglio dell'amplificatore operazionale nella configurazione ad *anello chiuso*



Esempio:

Guardando a 0 dB troviamo che la frequenza di guadagno unitario (e quindi il GBWP) è pari a 10⁶

$$A_{CL,dB} = 40 \rightarrow A_{CL} = 10^{\frac{40}{20}} = 100$$

$$BW = \frac{GBWP}{A_{CL}} = \frac{10^6}{10^2} = 10^4 = \mathbf{10\ kHz}$$

Fino alla frequenza di 10 kHz il guadagno dell'amplificatore operazionale rimarrà costante a 40 dB

Amplificatori operazionali

Common Mode Rejection Ratio (CMRR)

- E' il rapporto tra il guadagno differenziale ad anello aperto e quello di modo comune.
- Il rapporto di reiezione di modo comune indica la proprietà di un amplificatore differenziale di respingere il segnale che si presenta uguale ai due ingressi.
- Un qualsiasi amplificatore differenziale, oltre ad amplificare la tensione differenziale d'ingresso, amplifica anche in minima parte la media fra le due tensioni d'ingresso, cioè la tensione di modo-comune. In altre parole in uscita si ha sempre il segnale che ci necessita (pari alla tensione differenziale d'ingresso moltiplicata per il guadagno dell'amplificatore), più un piccolo segnale «spurio» dovuto appunto alla tensione di modo-comune in ingresso
- Idealmente un amplificatore ha un CMRR infinito ma nella realtà è in genere molto alto.

$$CMRR = \frac{A_{differenziale,OL}}{A_{modo\ comune}}$$


Spesso espresso in dB:

$$CMRR = 20 \log_{10} \left(\frac{A_{differenziale,OL}}{A_{modo\ comune}} \right)$$



Amplificatori operazionali

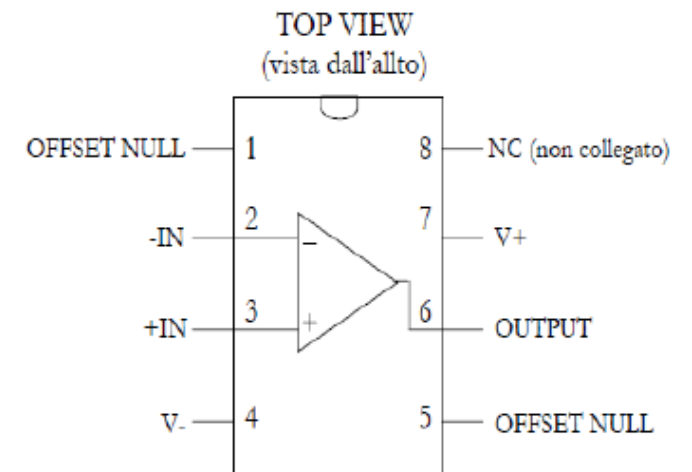
Tensione di Offset(CMRR)

- In teoria un amplificatore operazionale alimentato con una tensione duale e con ingressi collegati entrambi a massa dovrebbe fornire in uscita una tensione $V_{OFF} = 0$.
 - In realtà invece esistono sempre delle dissimetrie interne di funzionamento che danno origine ad una piccola tensione di uscita. Questa tensione viene detta «tensione di offset» e può essere annullata sia agendo sugli appositi terminali di cui quasi tutti gli operazionali dispongono, sia applicando una piccolissima tensione differenziale di segno opposto sull'ingresso invertente dell'amplificatore.
 - La tensione di offset indica quale tensione, in linea di massima, si deve applicare in ingresso per annullare l'offset in uscita. Se questa tensione è molto alta è ovvio che non potremo utilizzare l'amplificatore ad esempio in uno strumento di misura o in un calcolatore analogico dove si richiede un'elevata precisione.
- 

Amplificatori operazionali

Tensione di Offset(CMRR)

- Come abbiamo visto, su un integrato operazionale esistono quasi sempre altri due terminali di «**offset**».
- In effetti la funzione di questi terminali è proprio quella di consentire la messa a zero della tensione d'uscita quando la tensione differenziale d'ingresso è uguale a 0 V.
- Per correggere l'offset in modo da riportare a 0 la tensione in uscita, è necessario collegare fra i due piedini interessati (offset o bilance) un trimmer il cui cursore risulti collegato alla tensione di alimentazione oppure a massa e regolare quindi tale trimmer fino a rilevare in uscita una tensione nulla

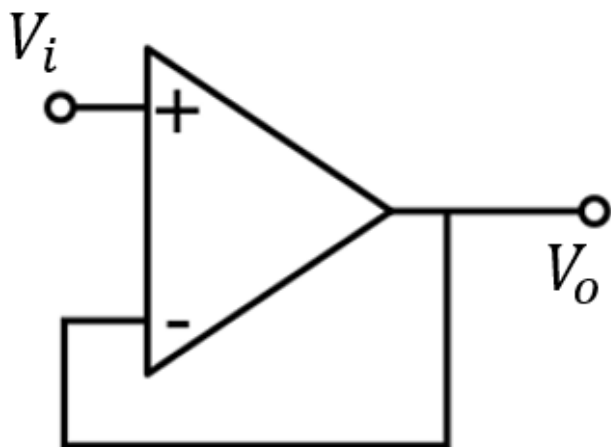


Ulteriori configurazioni

Amplificatori operazionali

Inseguitore di tensione (o buffer)

L'**inseguitore di tensione (o buffer)** è una variante particolare della configurazione non invertente di un amplificatore operazionale e fornisce in uscita lo stesso valore di tensione che riceve in ingresso: $V_i = V_o$ ovvero **il guadagno è pari a 1**.



Esso ha una elevata impedenza in ingresso, e questo vuol dire che assorbe poca corrente in ingresso; inoltre ha una bassa impedenza di uscita, e questo consente di erogare una elevata corrente di uscita e quindi di pilotare diversi carichi.

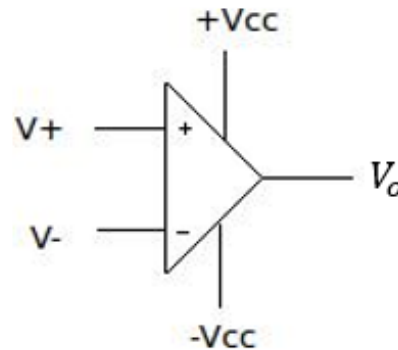


Lo scopo principale del buffer è quindi quello di separare o disaccoppiare la sorgente del segnale dal resto del circuito.

Amplificatori operazionali

Comparatore

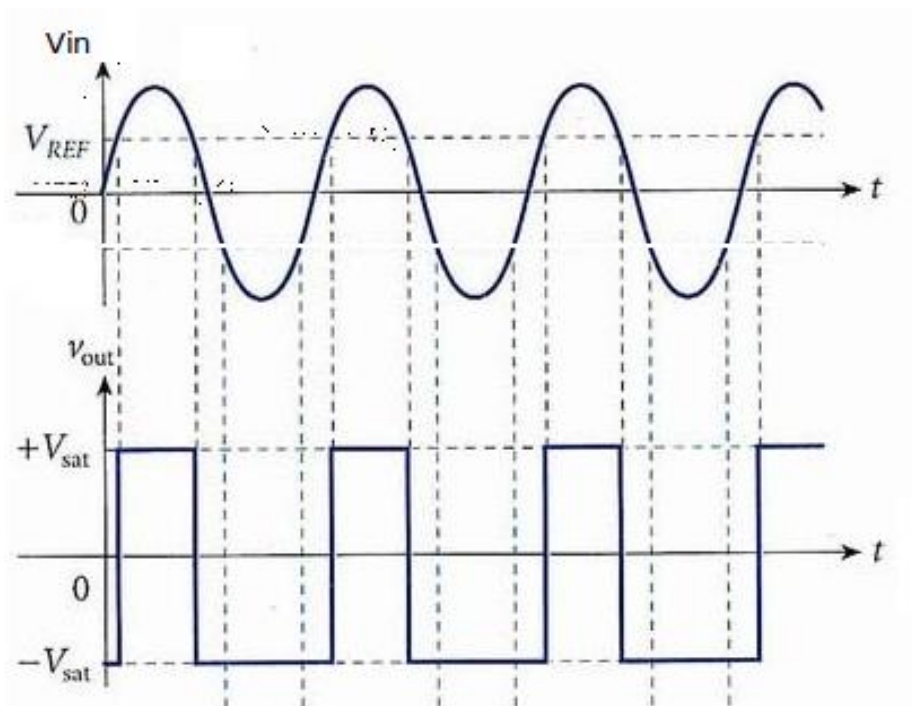
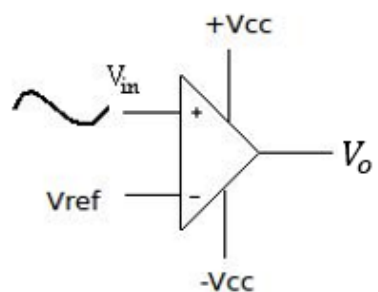
- Si dice **comparatore** un circuito in grado di confrontare fra loro due segnali di ingresso, fornendo in uscita un livello alto e basso a seconda di quale dei due segnali di ingresso è maggiore dell'altro.
- Il modo più semplice di realizzare un comparatore è utilizzare un **amplificatore operazionale ad anello aperto**, cioè senza collegamento di retroazione. I due segnali da confrontare vengono collegati con l'ingresso invertente e non invertente dell'operazionale. L'uscita dell'operazionale vale $+V_{SAT}$ (tensione di saturazione a livello alto) se il segnale applicato all'ingresso $+$ è maggiore di quello applicato all'ingresso $-$; viceversa l'uscita dell'operazionale vale $-V_{SAT}$ (tensione di saturazione a livello basso).



Amplificatori operazionali

Comparatore

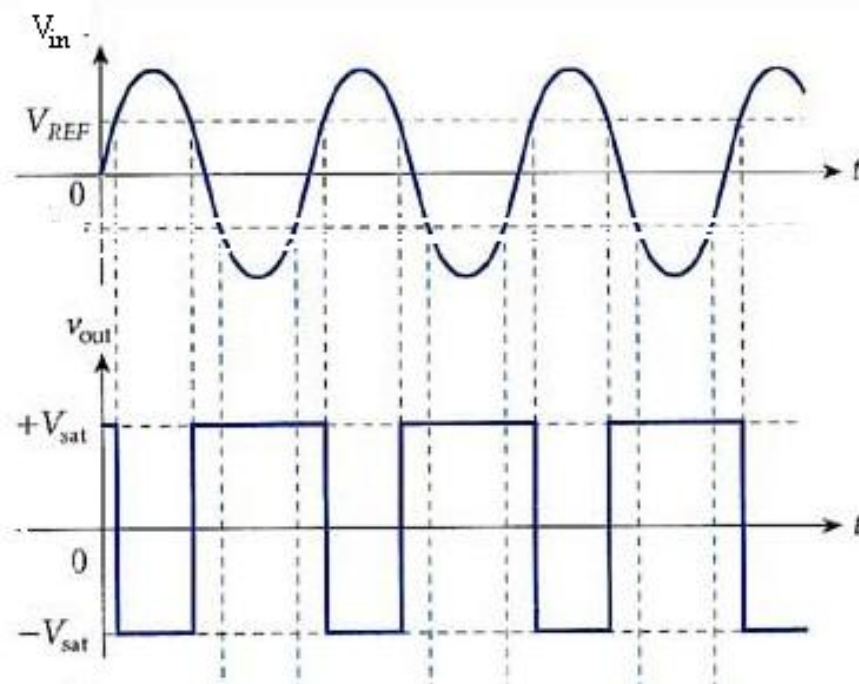
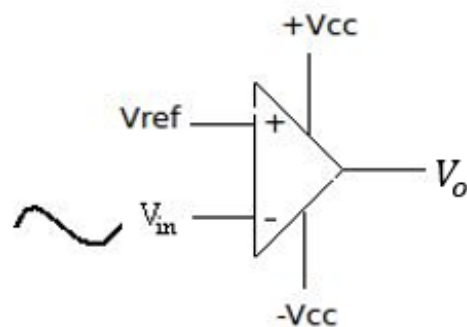
Solitamente il comparatore viene usato con uno dei due ingressi costante (tensione di soglia o di riferimento) e l'altro variabile. Se la tensione di riferimento viene applicata all'ingresso - si parla di **comparatore non invertente**: in questo caso la tensione di uscita dell'operazionale va a livello alto quando l'ingresso variabile (applicato sul +) supera la tensione di soglia:



Amplificatori operazionali

Comparatore

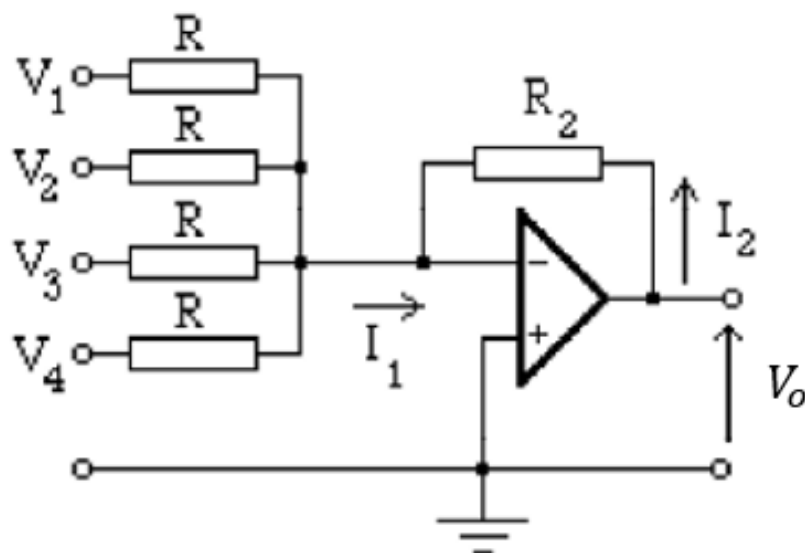
Quando invece la tensione di riferimento costante viene applicata all'ingresso +, il **comparatore** viene detto **invertente**: in questo caso la tensione di uscita dell'operazionale va a livello alto quando l'ingresso variabile (applicato sul -) scende sotto alla tensione di soglia.



Amplificatori operazionali

Sommatore

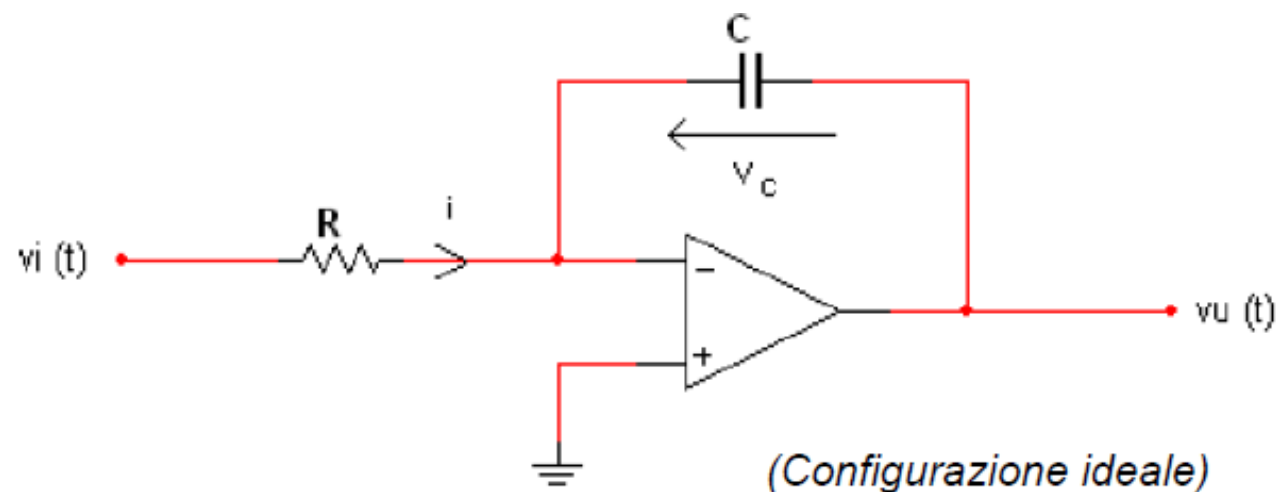
- I **sommatori** sono circuiti che realizzano una combinazione lineare di più ingressi.
- Il circuito sommatore indicato in figura è a quattro ingressi e si può verificare facilmente che sussiste la seguente relazione:



$$V_o = -\frac{R_2}{R} (V_1 + V_2 + V_3 + V_4)$$

Amplificatori operazionali

Integratore

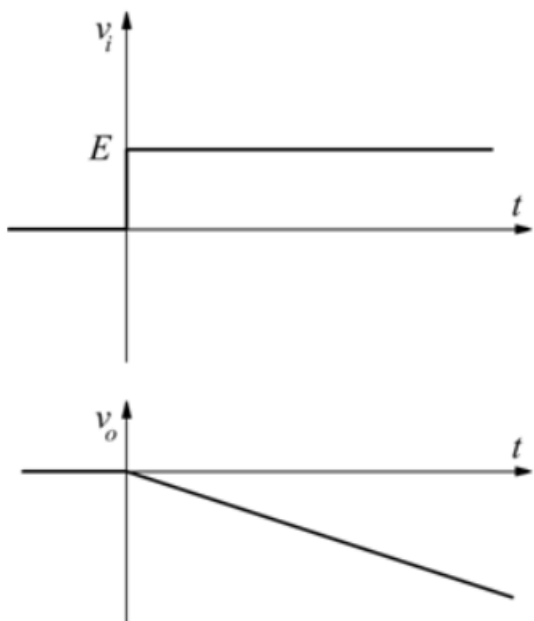


- L'integratore è un circuito che permette di ottenere in uscita l'integrale rispetto al tempo del segnale di ingresso.
- Nel caso in cui all'ingresso venga applicato un segnale sinusoidale, in uscita si avrà un segnale cosinusoidale. Se all'ingresso è applicata un'onda rettangolare, in uscita si otterrà un segnale di tipo triangolare. Se all'ingresso è applicata un'onda triangolare, in uscita si avrà un segnale costituito da rami di parabola.

Amplificatori operazionali

Integratore

- Esempio



Applicando in ingresso un segnale a gradino (positivo) $v_i = E$, si ottiene una rampa negativa.

$$v_o = -\frac{1}{RC} \int E dt = -\frac{E}{RC} t + K \quad \text{con } K \text{ costante arbitraria}$$

La v_o per $t > 0$ è assimilabile ad una retta passante per l'origine con coefficiente angolare negativo

$$v_o = -mt \rightarrow m = \frac{E}{RC}$$

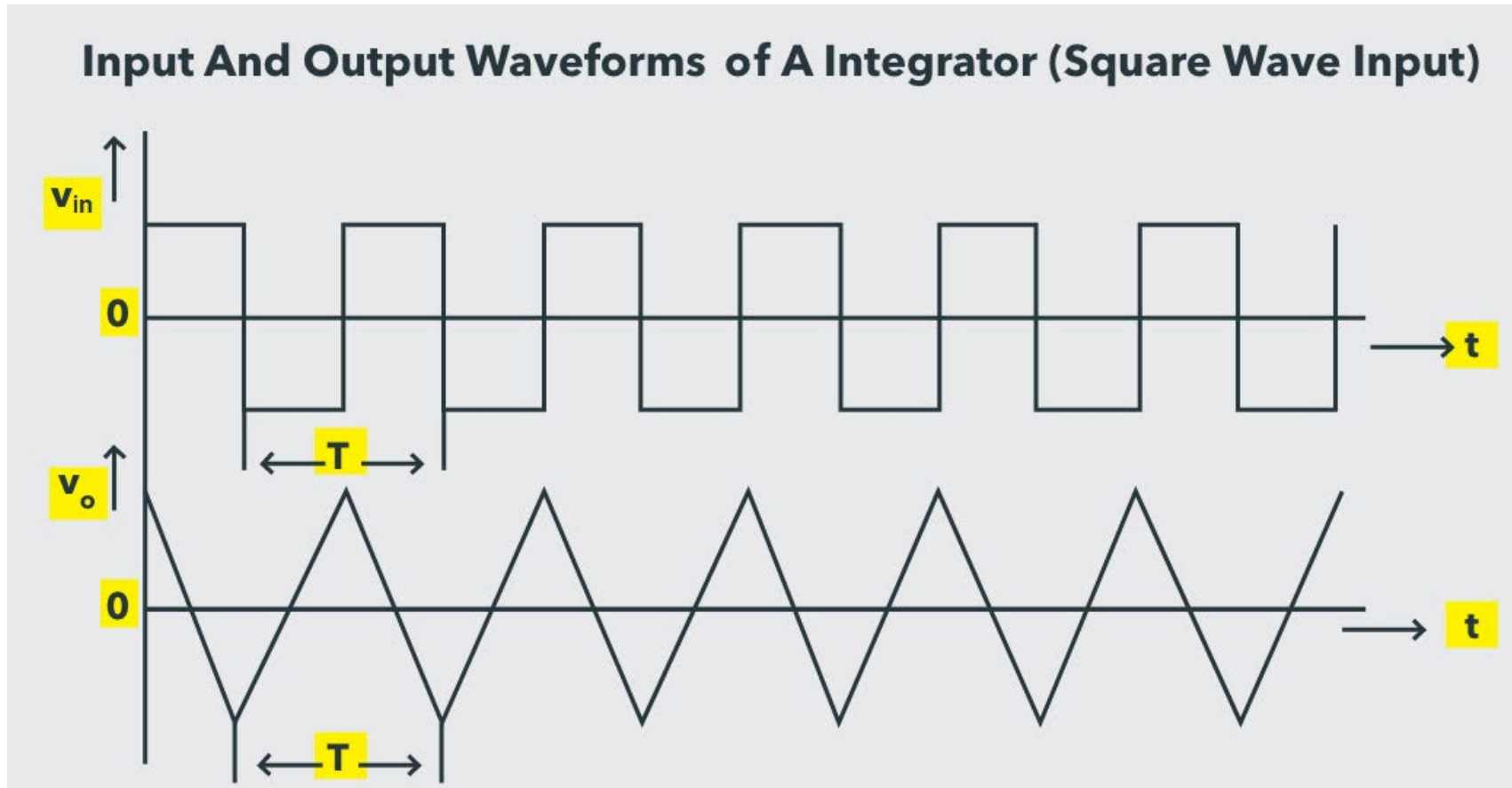
Considerando inizialmente il condensatore scarico $v_o(t = 0) = 0$ per cui $K=0$, quindi:

$$v_o = -\frac{E}{RC} t$$

Amplificatori operazionali

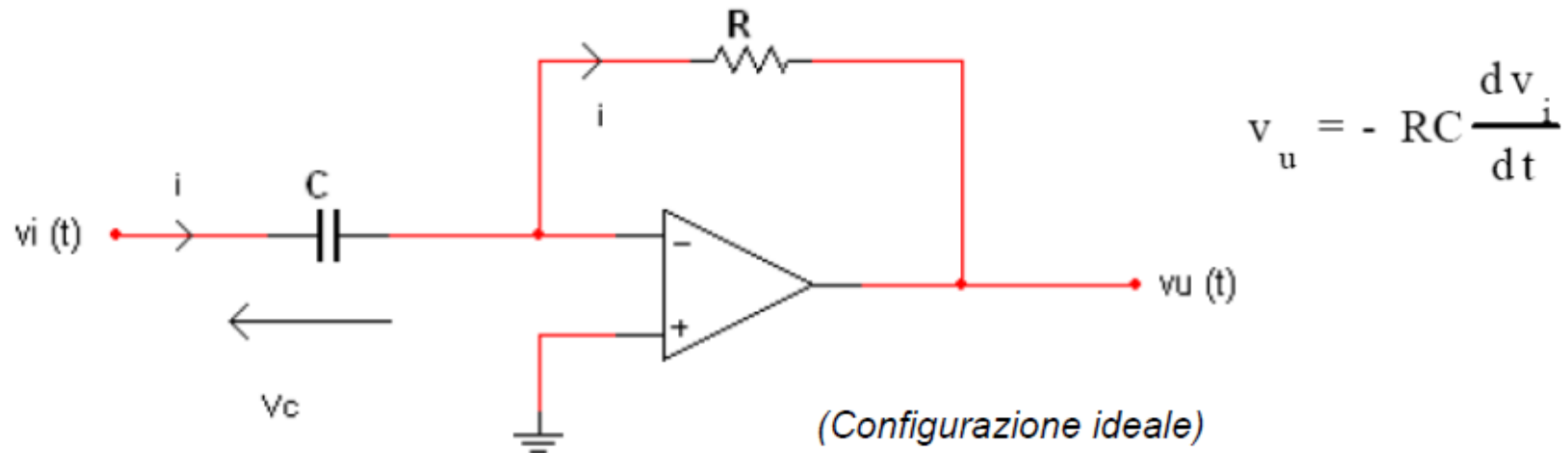
Integratore

- Esempio



Amplificatori operazionali

Derivatore



- Il derivatore permette di ottenere in uscita la derivata (invertita) del segnale di ingresso.