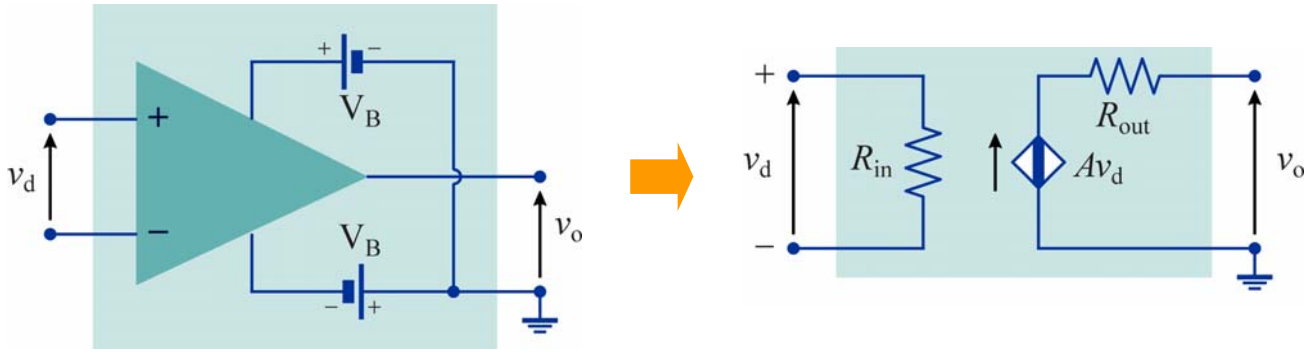
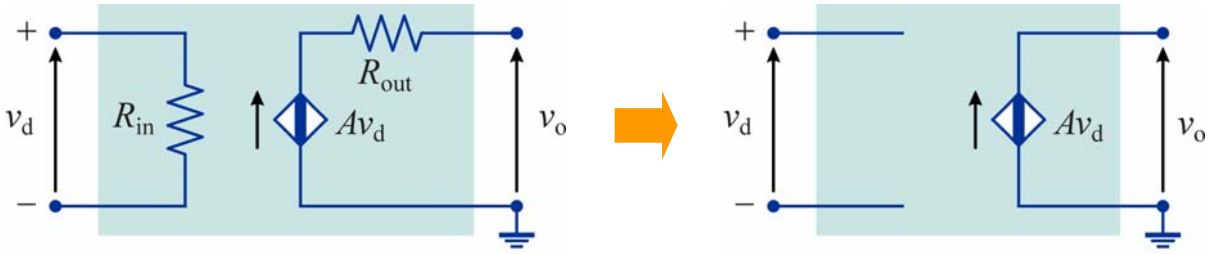
Amplificatore operazionale

- L'amplificatore operazionale può essere rappresentato come un dispositivo a due porte
- La porta di ingresso ha come terminali l'ingresso non invertente e l'ingresso invertente
  - La tensione v_d è detta **tensione di ingresso differenziale**
- La porta di uscita ha come terminali l'uscita e la massa, rappresentata dal nodo a cui sono collegati i due generatori di alimentazione (l'amplificatore operazionale non ha terminali collegati a massa)



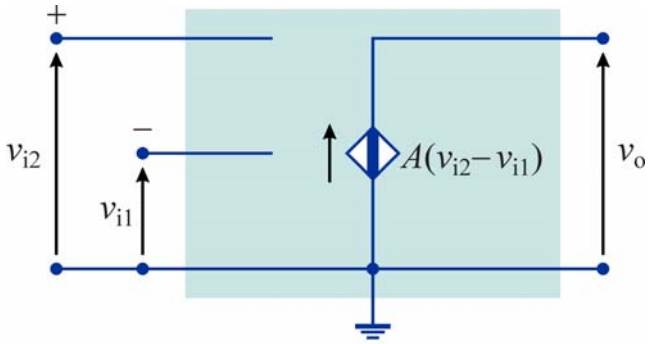
Amplificatore operazionale



- L'amplificatore operazionale è un amplificatore di tensione con
  - resistenza di ingresso R_{in} elevata (valori tipici > $10^6\ \Omega$)
  - resistenza di uscita R_{out} piccola (valori tipici < $100\ \Omega$)
  - guadagno A elevato (valori tipici 10^5-10^6 cioè 100-120 dB)
- A è detto **guadagno ad anello aperto** (*open loop gain*)
- Normalmente è possibile considerare R_{in} praticamente infinita e R_{out} praticamente nulla
  - ➡ la corrente alla porta di ingresso è nulla

Amplificatore operazionale

- Un amplificatore operazionale può essere rappresentato anche come un dispositivo a tre porte, mettendo in evidenza le tensioni tra gli ingressi e la massa



- Questa rappresentazione mette in evidenza che l'amplificatore operazionale amplifica la differenza tra le tensioni applicate ai suoi ingressi (cioè si comporta come un **amplificatore differenziale**)

Ingresso differenziale e di modo comune

- Quando le tensioni applicate ai due ingressi sono uguali la tensione un uscita è (idealmente) uguale a zero
- In pratica, a causa di inevitabili asimmetrie nel circuito, la relazione tra gli ingressi e l'uscita risulta del tipo

$$v_o = A_2 v_{i2} - A_1 v_{i1}$$

con A_1 e A_2 non esattamente uguali

- Per studiare il comportamento dell'amplificatore in queste condizioni conviene introdurre, oltre alla tensione di ingresso differenziale

$$v_d = v_{i2} - v_{i1}$$

la **tensione di ingresso di modo comune**, definita come

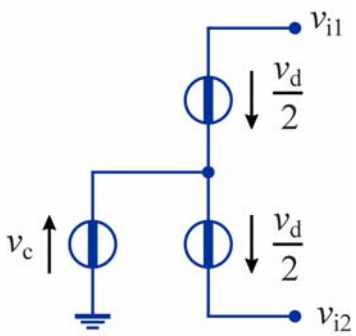
$$v_c = \frac{v_{i2} + v_{i1}}{2}$$

Ingresso differenziale e di modo comune

- Le tensioni degli ingressi possono essere espresse in funzione della tensione differenziale e della tensione di modo comune mediante le relazioni

$$v_{i1} = v_c - \frac{v_d}{2} \qquad v_{i2} = v_c + \frac{v_d}{2}$$

che possono essere interpretate mediante il seguente circuito equivalente



Guadagno differenziale e di modo comune

- Introducendo le espressioni precedenti degli ingressi nella relazione

$$v_o = A_2 v_{i2} - A_1 v_{i1}$$

si ottiene

$$v_o = A_2\left(v_c + \frac{v_d}{2}\right) - A_1\left(v_c - \frac{v_d}{2}\right) = \frac{A_2 + A_1}{2} v_d + (A_2 - A_1) v_c = A_d v_d + A_c v_c$$

- Nell'ultima espressione sono stati introdotti il **guadagno differenziale**

$$A_d = \frac{A_2 + A_1}{2}$$

e il **guadagno di modo comune**

$$A_c = A_2 - A_1$$

Rapporto di reiezione di modo comune

- Il rapporto tra il guadagno differenziale e il guadagno di modo comune è detto **rapporto di reiezione di modo comune** (**CMRR**, *common-mode rejection ratio*)

$$\mathrm{CMRR} = \frac{|A_d|}{|A_c|}$$

- Di solito il CMRR è espresso in dB

$$\mathrm{CMRR(dB)} = 20\log_{10}\frac{|A_d|}{|A_c|}$$

- Il CMRR è una figura di merito che indica quanto il comportamento di un amplificatore differenziale è prossimo al comportamento ideale

Rapporto di reiezione di modo comune

- Gli amplificatori operazionali hanno valori del CMRR molto elevati (tipicamente 80-100 dB)
- Spesso è possibile considerare il CMRR praticamente infinito
- In queste condizioni si può ritenere

$$A_1 = A_2 = A$$

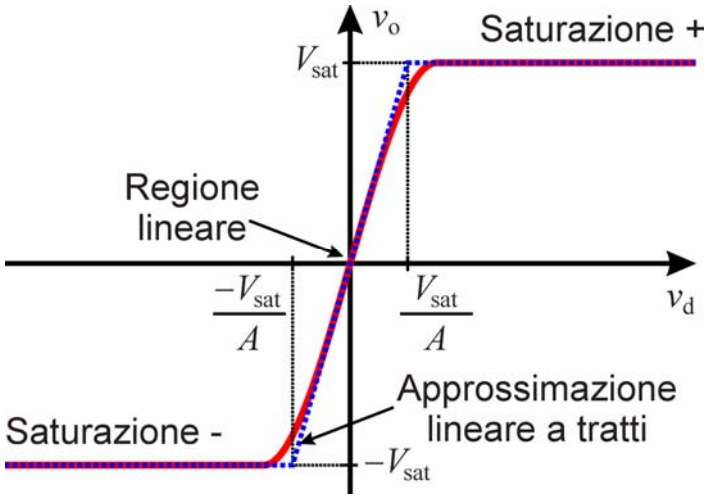
e quindi

$$A_d = A$$

$$A_c = 0$$

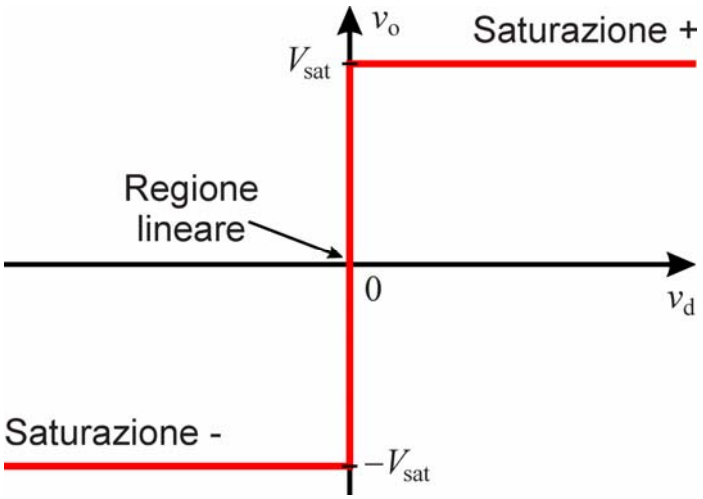
Caratteristica ingresso-uscita

- La caratteristica di trasferimento di un amplificatore operazionale ha un andamento praticamente lineare nell'intorno dell'origine, con pendenza pari ad A
- Al crescere di v_d 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



Caratteristica ingresso-uscita ideale

- Dato che A è molto grande, l'intervallo di valori di v_d corrispondente alla regione lineare è molto piccolo (poche decine o centinaia di μV)
- Nella regione lineare si può ritenere che v_d sia praticamente nulla, il che equivale a considerare il guadagno A praticamente infinito

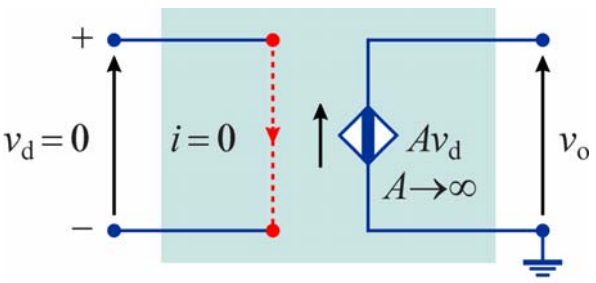


Amplificatore operazionale ideale

- Le considerazioni precedenti portano alla definizione dell'**amplificatore operazionale ideale,** che è caratterizzato dalle seguenti proprietà
  - Resistenza di ingresso R_{in} infinita
  - Resistenza di uscita R_{out} nulla
  - Guadagno ad anello aperto A infinito
  - Guadagno di modo comune A_c nullo
    - ➡ Rapporto di reiezione di modo comune infinito
  - Larghezza di banda infinita (guadagno indipendente dalla frequenza)

Cortocircuito virtuale

- Un amplificatore operazionale ideale può essere rappresentato come un doppio bipolo per il quale
  - la tensione e la corrente della porta di ingresso sono entrambe nulle
  - la tensione e la corrente della porta di uscita possono assumere entrambe valori arbitrari
- L'ingresso invertente e l'ingresso non invertente sono sempre allo stesso potenziale, come se fossero collegati tra loro da un cortocircuito
- Le correnti ai due terminali di ingresso sono sempre nulle, mentre se i due terminali fossero effettivamente uniti da un cortocircuito si avrebbe, in generale, una corrente diversa da zero
- Per questo si dice che i due ingressi sono in **cortocircuito virtuale**



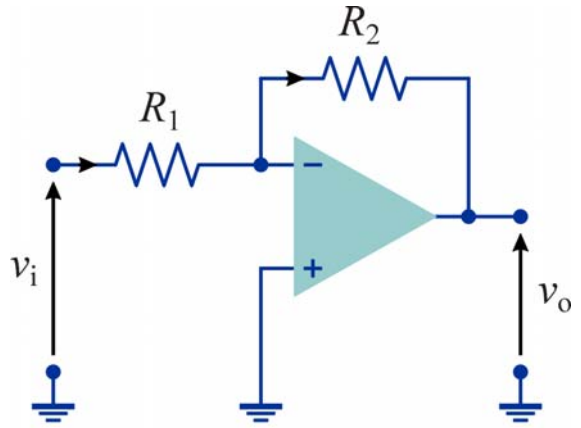
Analisi di circuiti con amplificatori operazionali ideali

- Circuiti relativamente semplici possono essere risolti in modo diretto, tenendo conto dei cortocircuiti virtuali
  - La porta di ingresso di un operazionale viene considerata
    - come un cortocircuito per quanto riguarda le tensioni
    - come un circuito aperto per quanto riguarda le correnti
- Procedimenti di validità più generale possono essere ottenuti come estensione dei metodi sistematici di analisi circuitale (come il metodo delle correnti di maglia, delle tensioni di nodo, ecc.)
- In particolare, risulta piuttosto semplice l'estensione del metodo delle tensioni di nodo

Metodo delle tensioni di nodo per circuiti con amplificatori operazionali ideali

- Le correnti agli ingressi degli operazionali sono nulle
  - le equazioni di nodo si scrivono trascurando i terminali di ingresso degli operazionali
- La corrente al terminale di uscita può assumere un valore arbitrario
  - le correnti di uscita vanno incluse nelle equazioni di nodo come **incognite ausiliarie**
    - di solito il verso di riferimento viene scelto entrante dal punto di vista dell'operazionale, quindi uscente dal nodo
      - le correnti compaiono nelle equazioni di nodo con segno +
- La tensione tra gli ingressi di un'operazionale è nulla
  - per ogni operazionale si deve introdurre un'**equazione ausiliaria** che impone l'uguaglianza delle tensioni dei nodi a cui sono collegati gli ingressi

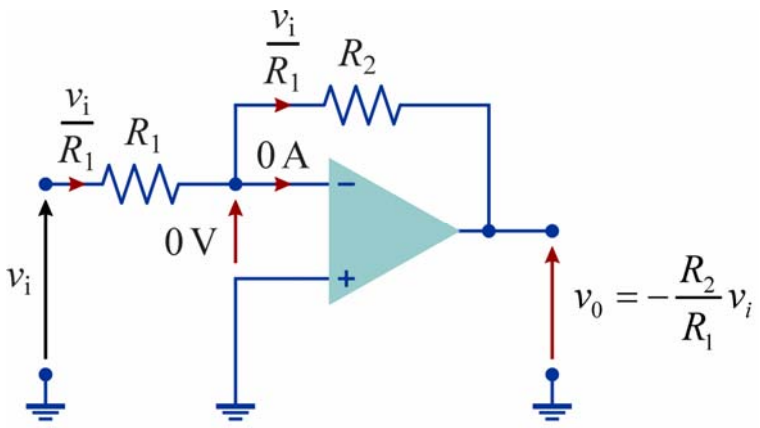
Amplificatore invertente



- L'ingresso invertente è virtualmente a massa
  - La tensione di R_1 coincide con v_i
  - La tensione di R_2 è uguale a $-v_o$
- La corrente entrante nell'ingresso invertente è nulla
  - le correnti di R_1 e R_2 sono uguali

Amplificatore invertente

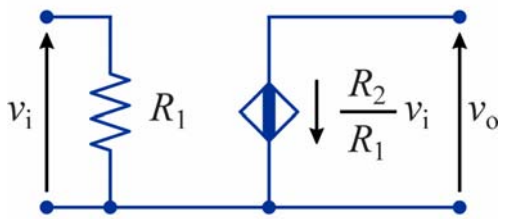
$$v_o = -R_2 i_2 = -R_2 i_1 = -R_2 \frac{v_i}{R_1}$$



- Guadagno di tensione

$$A_V = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{R_2}{R_1}$$

- Resistenza di ingresso

$$R_{in} = \frac{v_i}{i_1} = R_1$$

Circuito equivalente