



## Amplificatore operazionale reale

- I valori tipici dei parametri che caratterizzano un OPAMP reale sono i seguenti:
  - Guadagno in tensione  $A_{VDC} = 10^5 \cdot 10^6$
  - Correnti di ingresso  $I_+ = I_- = \begin{cases} 10^{-8} \text{ A} & \text{bipolari} \\ 10^{-11} \text{ A} & \text{JFET} \\ 10^{-14} \text{ A} & \text{MOS} \end{cases}$
  - Capacità di pilotaggio  $I_{OUTmax} = \pm 10 \text{ mA}$
  - Tensione massima di uscita  $|V_{out}| = |V_{DD}| - 1.5V (*)$

**Banda passante**

**$B_W = 1..10 \text{ Hz}$**

Benini & Lanzoni 2002



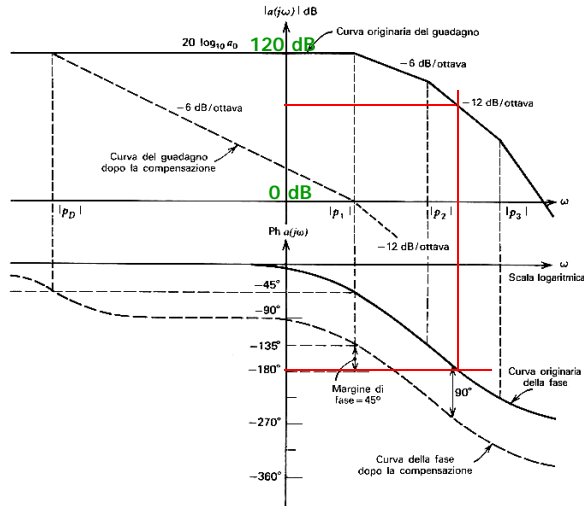
## Amplificatore operazionale reale

**Come mai la banda è così limitata ?**

- Gli operazionali reali sono amplificatori ad altissimo guadagno con più di 2 poli.
- Per garantirne la stabilità si introduce un **polo dominante** a bassissima frequenza (**compensazione**).

Benini & Lanzoni 2002

## Compensazione



## Compensazione

- Molti componenti commerciali di uso generale sono **compensati internamente** (es. TL081,  $\mu A741$ ).
- Il valore del polo dominante viene scelto in modo da stabilizzare il circuito per ogni valore di  $\beta$ .
- La riduzione di banda dell' amplificatore può essere molto superiore al necessario.
- Esistono **operazionali non compensati** in cui la compensazione è carico dell' utilizzatore (es. LM301).



## Prodotto Guadagno-Banda

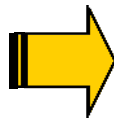
- La presenza del polo dominante permette di approssimare il comportamento in frequenza dell' OPAMP con quello di un amplificatore a singolo polo.

$$A(s) = \frac{A_M}{1 + s / w_H}$$

Come già notato:

$$A_f = \frac{A}{1 + A b}$$

$$w_{Hf} = w_H (1 + A b)$$



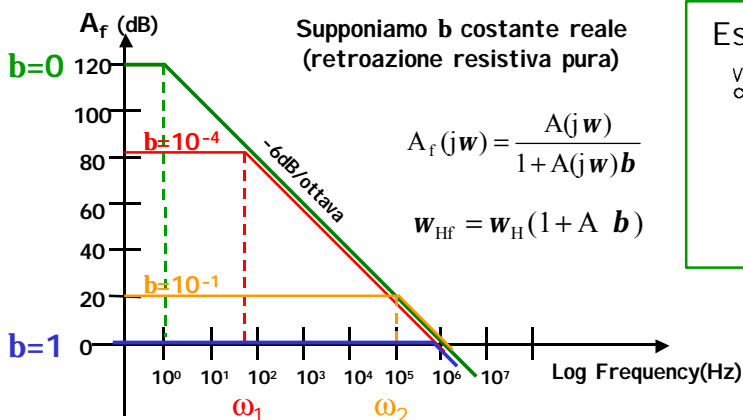
$$A_f \cdot w_{Hf} = A \cdot w_H$$

Benini & Lanzoni 2002

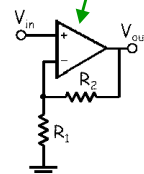


## Prodotto Guadagno-Banda

- Per aumentare la banda del circuito retroazionato dobbiamo sacrificare il guadagno e viceversa.



Es.  $A_{VDC} = 10^6$



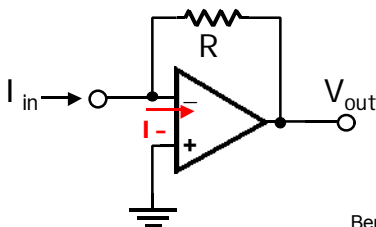
Benini & Lanzoni 2002



## Corrente di polarizzazione di ingresso

- L' OPAMP reale ha correnti di ingresso non nulle a causa della polarizzazione dei transistori dello stadio di ingresso
- Problemi:
  - Guadagni diversi da quelli ideali
  - tensioni di uscita non nulle per ingressi nulli
  - drift (integratore)

### Es. Convertitore I-V



$$V_{out} = -RI_{in} + RI_-$$

per  $I_{in}=0$ :

$$V_{out} = RI_- \Rightarrow \text{Offset di } V_{out}$$

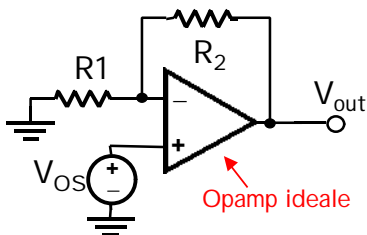
Benini & Lanzoni 2002



## Tensione di offset in ingresso

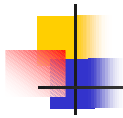
- Cortocircuitando a massa gli ingressi di un OPAMP reale, l' uscita non è nulla.
- Per ottenere  $V_{OUT}=0$  bisogna applicare una tensione esterna agli ingressi pari a  $-V_{OS}$ .
- $V_{OS}$  è la **tensione di offset** (dell' ordine di mV)

### Es. Amplificatore invertente



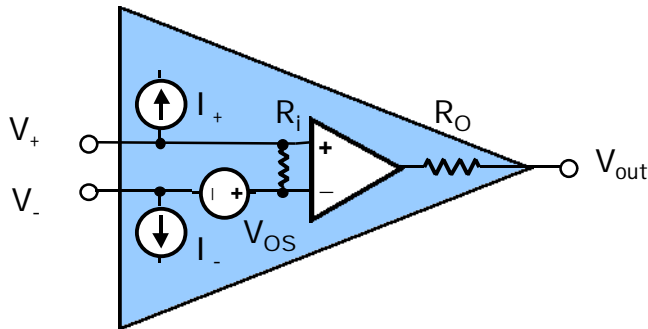
$$V_{out} = V_{OS}(1 + R_2/R_1)$$

Benini & Lanzoni 2002



## Non idealità in DC

Per tenere conto delle non idealità in DC dell' OPAMP reale si può ipotizzare un blocco costituito da un OPAMP ideale corredato da diversi elementi che modellano le non idealità .



Benini & Lanzoni 2002



## CMRR

- Per CMRR si intende il **rapporto di reiezione di modo comune** ovvero il rapporto fra il guadagno differenziale e quello di modo comune.

$$CMRR = \left| \frac{A_{dm}}{A_{cm}} \right|$$

- Per gli OPAMP reali CMRR = 90..110 dB

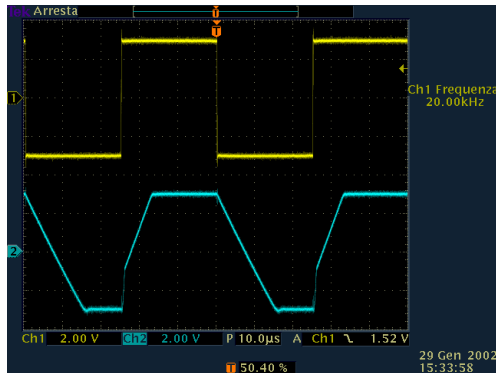
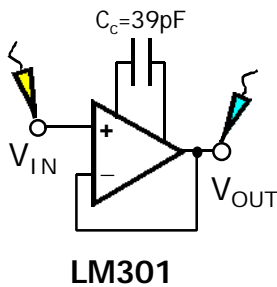
Benini & Lanzoni 2002



## Stadio di uscita: Slew Rate

- Per Slew rate si intende la massima derivata del segnale in uscita:

$$SR = \left. \frac{dv_o}{dt} \right|_{\max}$$

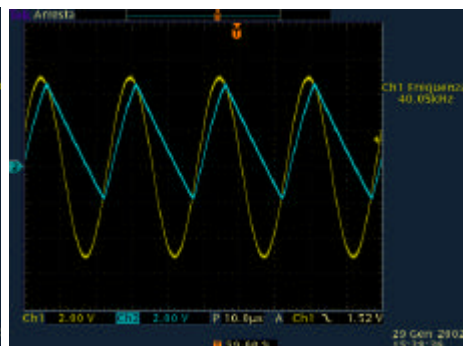
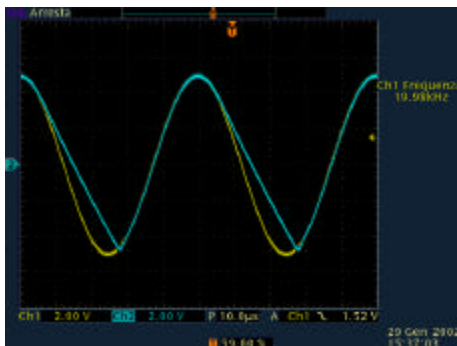


Benini & Lanzoni 2002



## Stadio di uscita: Slew Rate

- La limitazione dello SR produce distorsione anche per segnali a bassa frequenza ma grande ampiezza.

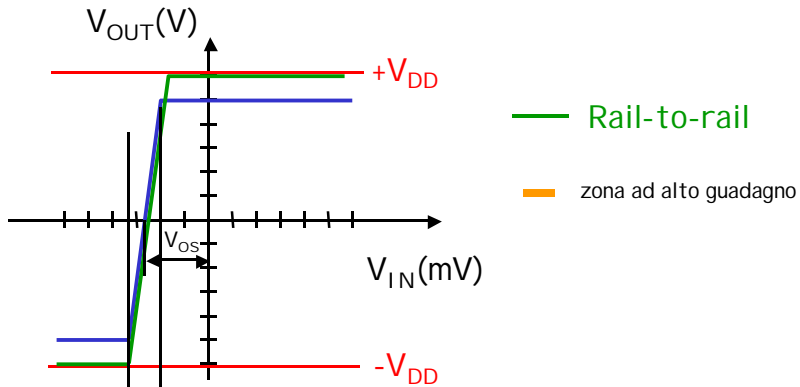


Benini & Lanzoni 2002



## Stadio di uscita: Saturazione

- La tensione di uscita è limitata alla tensione di alimentazione.

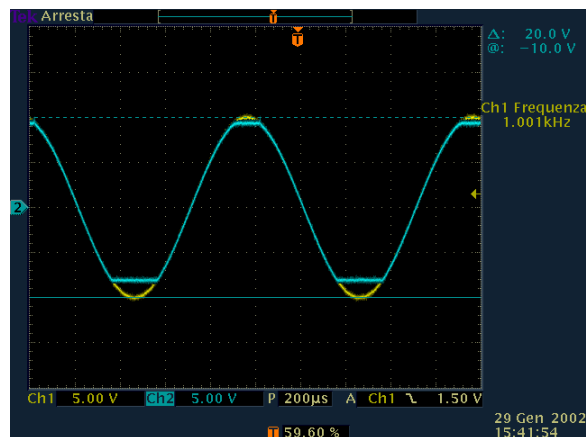


Benini & Lanzoni 2002



## Stadio di uscita: Saturazione

- La saturazione non è in genere simmetrica



Benini & Lanzoni 2002



## Amplificatori differenziali

- In molti campi è necessario ricorrere ad amplificatori differenziali ove:

$$V_{OUT} = A(V_{IN+} - V_{IN-})$$

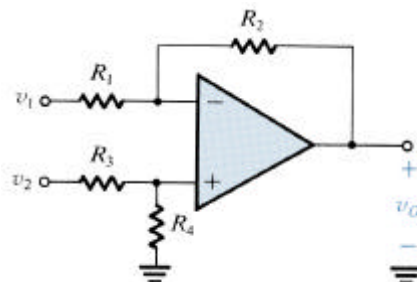
- Un amplificatore differenziale risulta utile per esempio nel caso di una linea rumorosa per eliminare i disturbi di modo comune.

Benini & Lanzoni 2002



## Amplificatore differenziale ad OPAMP

- Uno semplice schema ad operazionali che realizza un amplificatore differenziale è il seguente:



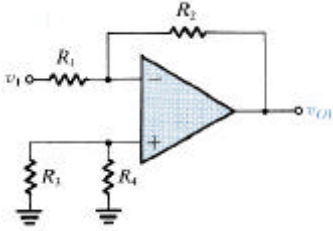
Benini & Lanzoni 2002



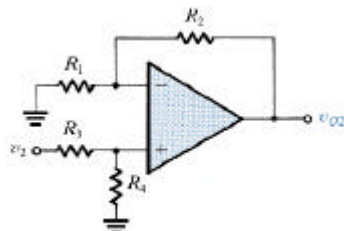


## Amplificatore differenziale ad OPAMP

- Analizziamo il circuito applicando separatamente un segnale ai due ingressi collegando l'altro a massa e sovrapponendo gli effetti



$$V_{O1} = -\frac{R_2}{R_1} V_1$$



$$V_{O2} = V_2 \left( \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \left( \frac{R_1 + R_2}{R_1} \right) = V_2 \frac{1 + R_2/R_1}{1 + R_3/R_4}$$

Benini & Lanzoni 2002



## Amplificatore Differenziale ad OPAMP

- Sommando i contributi si ottiene:

$$V_O = V_{O1} + V_{O2} = -\frac{R_2}{R_1} V_1 + \frac{1 + R_2/R_1}{1 + R_3/R_4} V_2$$

- Si vuole che la componente di modo comune non venga amplificata. Perciò:

$$V_1 = V_2 \Rightarrow V_O = 0$$

- Ciò si verifica se :  $R_2/R_1 = R_4/R_3$

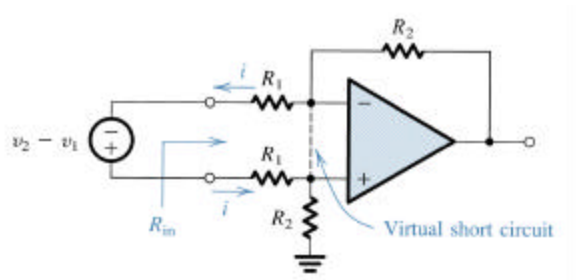
Benini & Lanzoni 2002



## Amplificatore differenziale: $R_{in}$

- Per valutare  $R_{IN}$  scriviamo l'equazione della maglia di ingresso:

$$v_2 - v_1 = R_1 i + 0 + R_1 i \Rightarrow R_i = 2R_1$$

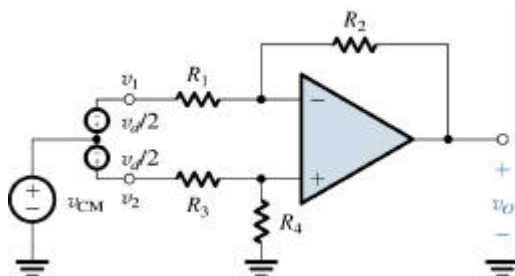


Benini & Lanzoni 2002



## Circuito equivalente della linea disturbata

- Una linea disturbata da una componente di modo comune può essere schematizzato come segue:

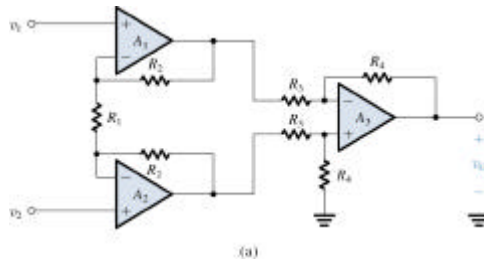


Benini & Lanzoni 2002



## Amp. Differenziale per Strumentazione

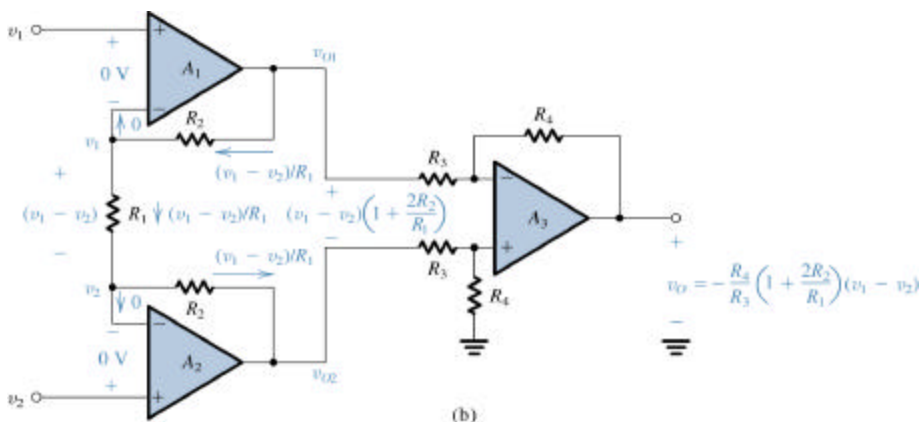
- Rispetto al precedente ha i seguenti vantaggi:
  - Impedenza di ingresso altissima
  - Guadagno aggiustabile variando una sola resistenza



Benini & Lanzoni 2002



## Amp. Differenziale per strumentazione



Benini & Lanzoni 2002