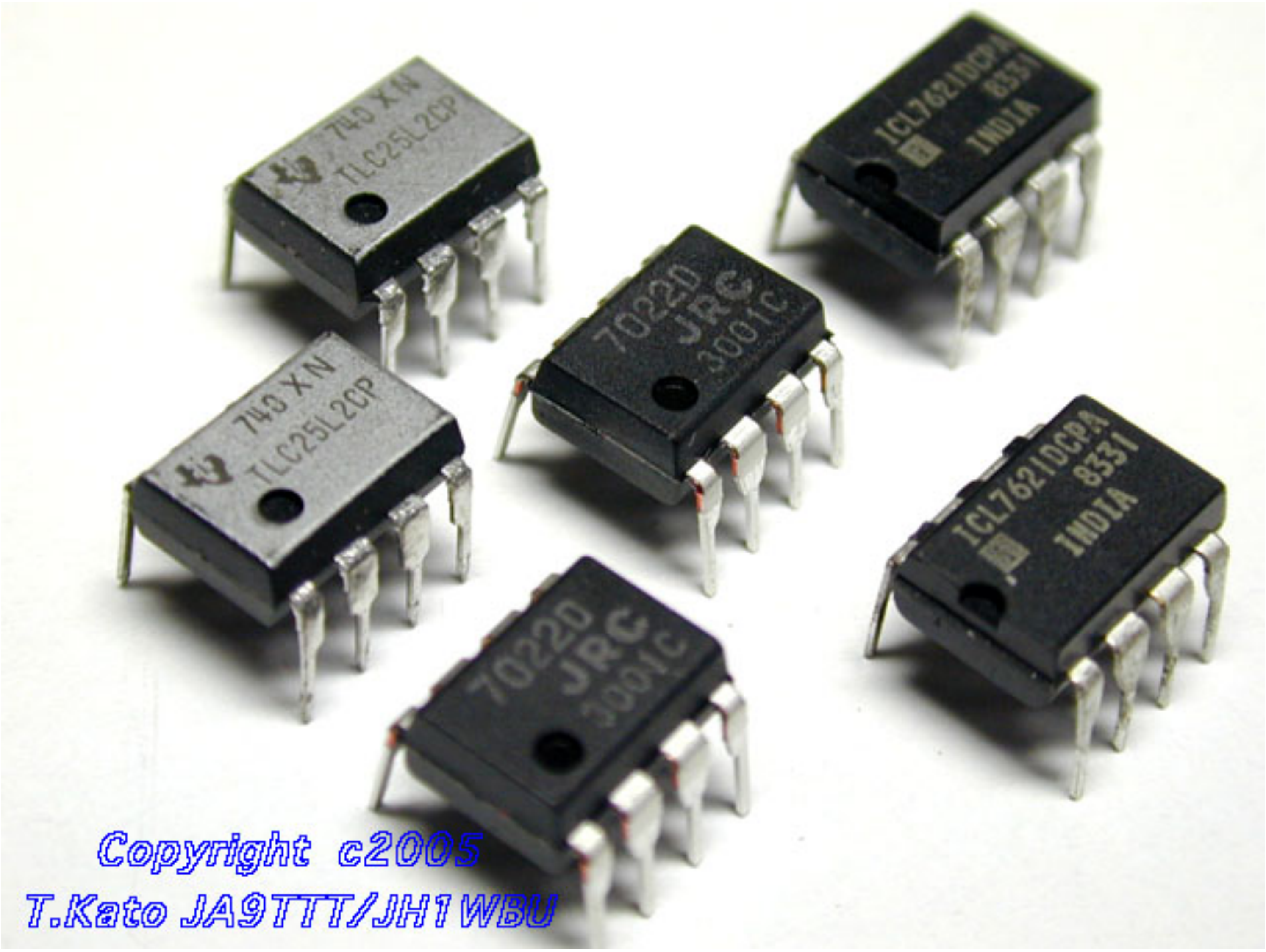
Laboratorio II, modulo 2
2016-2017

Amplificatori operazionali

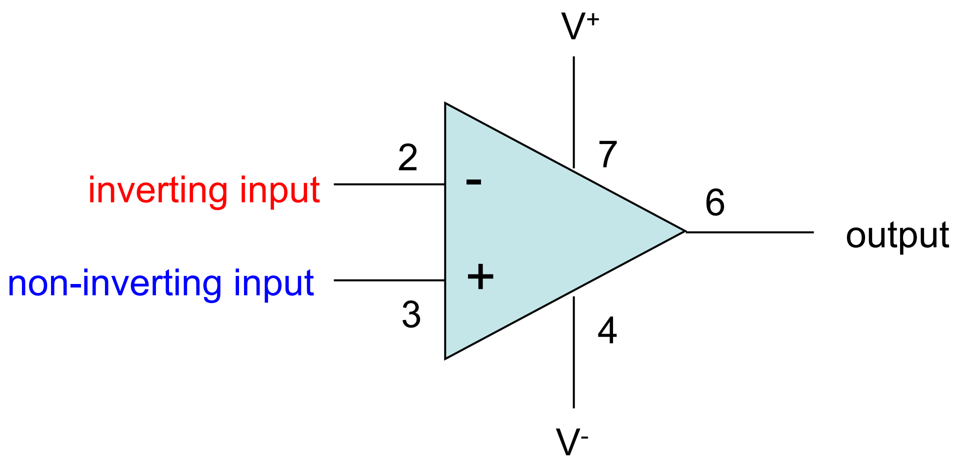
(cfr. http://physics.ucsd.edu/~tmurphy/phys121/phys121.html)

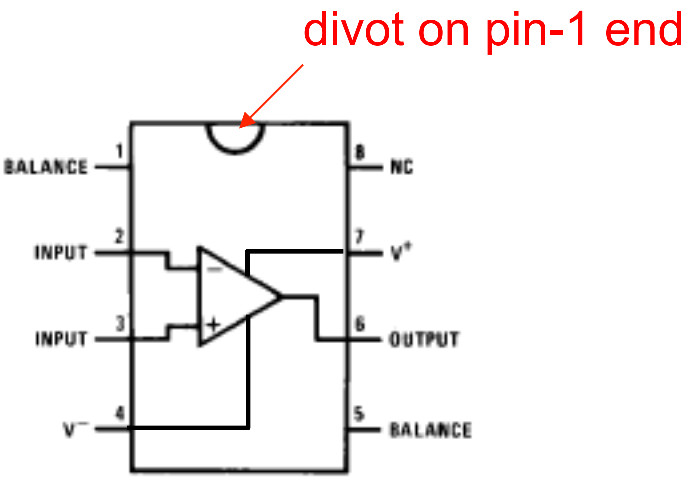
Amplificatori operazionali



Amplificatori operazionali

- sono disegnati come triangoli negli schematici dei circuiti
- ci sono due input
  - invertente and non-invertente
- un output
- alimentazione (nessuna messa a terra, floating)

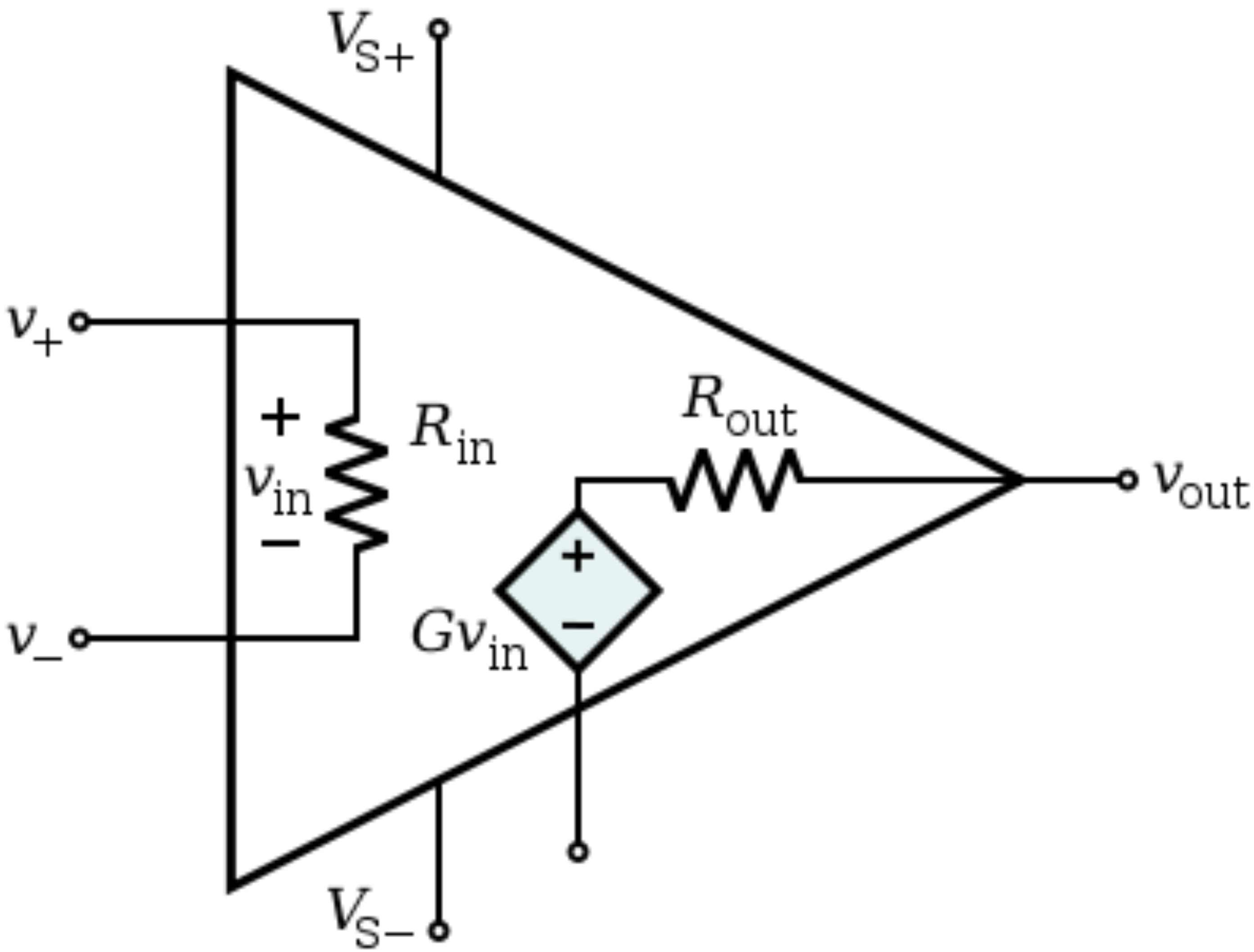




Operazionale ideale

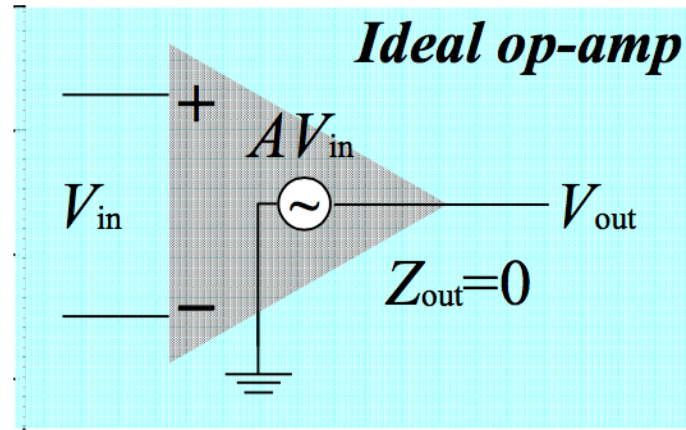
- guadagno in voltaggio infinito
  - una differenza di voltaggio fra i due input è amplificata infinitamente
  - nella realtà ~200000
- impedenza in ingresso infinita
  - non c'è flusso di corrente in entrata agli input
  - nella realtà ~ 10^6 Ω
- impedenza in uscita nulla
  - indipendente dal carico
  - in realtà vero fino ad una certa corrente (5-25 mA)
- infinitamente veloci (banda infinita)
  - in realtà, limitati a pochi MHz
  - slew rate limitato a 0.5–20 V/μs

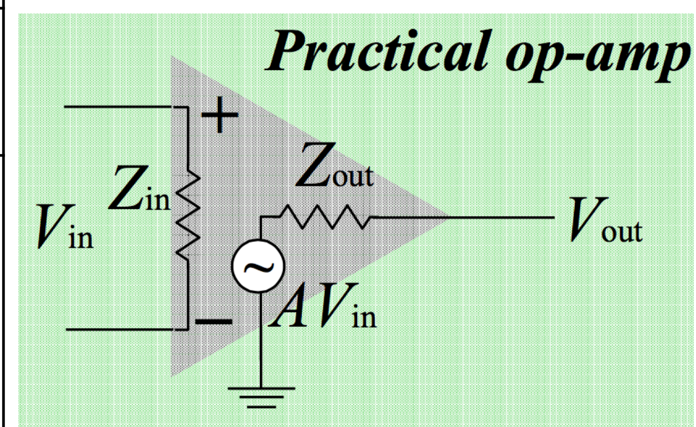
Modello



Ideale vs reale

	Ideal	Practical (LM741)
Open Loop gain *A*	$\propto$	10^5
Gain-Bandwidth Product *GBP*	$\propto$	1MHz
Input Impedance Z_{in}	$\propto$	0.3-2MΩ
Output Impedance Z_{out}	0 Ω	10-100 Ω
Output Voltage V_{out}	Depends only on $V_d = (V_+ - V_-)$ Differential mode signal	Depends slightly on average input $V_c = (V_+ + V_-)/2$ Common-Mode signal
CMRR	$\propto$	80-100dB



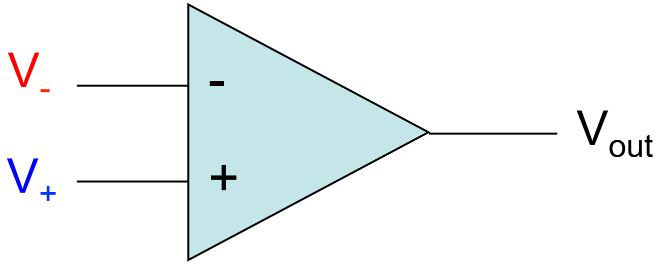


Operazionale senza *feedback*

- Relazione fra uscita e ingressi:

$$V_{out} = G \times (V_+ - V_-)$$

- se $V_+ > V_-$, l'uscita sarà positiva
- se $V_- > V_+$, l'uscita sarà negativa



- Un Guadagno di 200000 rende l'utilizzo dell'operazionale, in questo montaggio mostrato sopra, praticamente inutilizzabile

Common-Mode Rejection Ratio

Definiamo:

- Input differenziale:

$$V_d = (V_+ - V_-)$$

- Input modo comune:

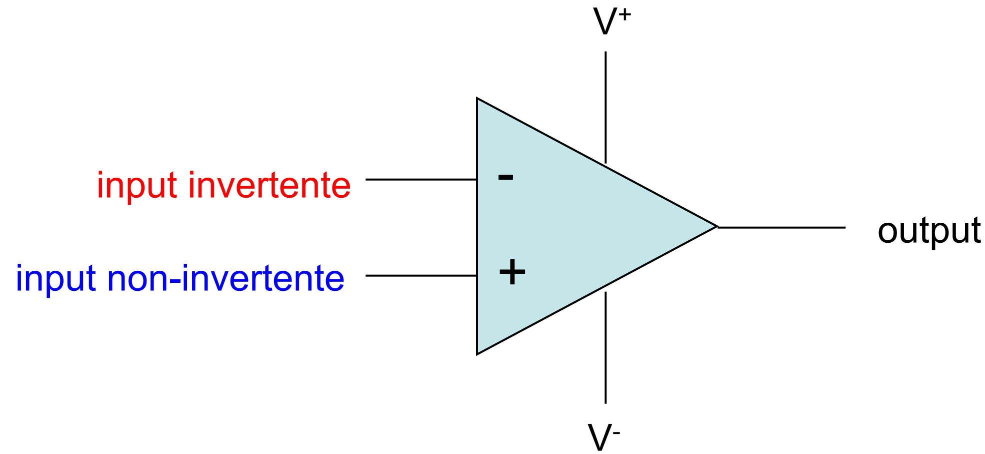
$$V_c = ½ (V_+ + V_-)$$

Un operazionale reale avrà:

$$V_o = G_d V_d + ½ G_c V_c$$

G_d: guadagno differenziale

G_c: guadagno modo comune



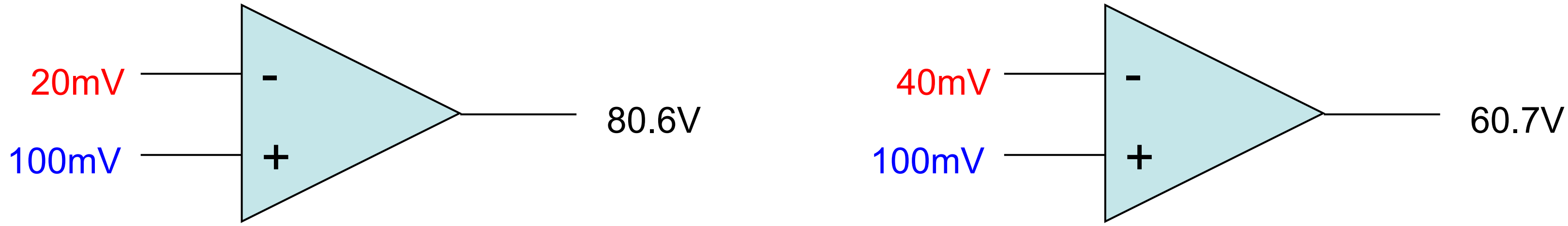
$$\text{CMRR} = G_d/G_c \quad \text{o, in dB} \quad = 20\log_{10}(G_d/G_c)$$

Nota:

se $G_d >> G_c$, cioè CMRR $\rightarrow \propto$

$\rightarrow V_o \sim G_d V_d$

Misura CMRR



Risolviamo il sistema:

$V_{d1} = (100–20)\text{mV} = 80\text{mV}$ $\quad$ $V_{d2} = (100–40)\text{mV} = 60\text{mV}$

$V_{c1} = ½(100+20)\text{mV} = 60\text{mV}$ $\quad$ $V_{c2} = ½(100+40)\text{mV} = 70\text{mV}$

(1) $V_o = 80\text{mV } G_d + 60\text{mV } G_c = 80.6\text{V}$

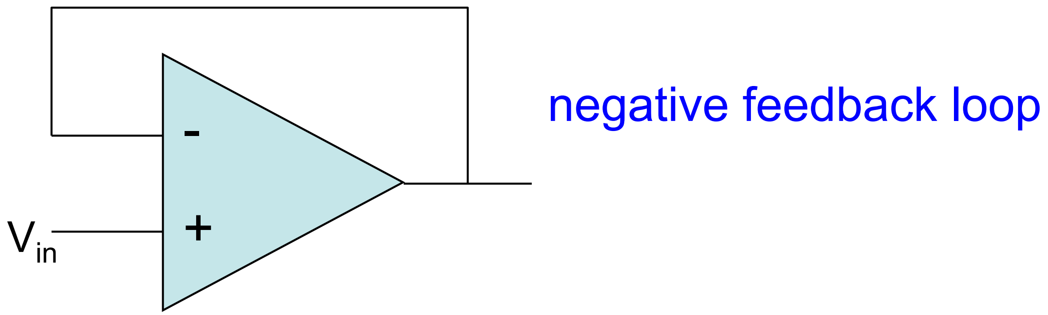
(2) $V_o = 60\text{mV } G_d + 70\text{mV } G_c = 60.7\text{V}$

$\rightarrow G_d=1000 \quad G_c=10 \rightarrow \text{CMRR} = 20 \log_{10}(1000/10) = 40\text{dB}$

Guadagno infinito e feedback negativo

- Il guadagno infinito sarebbe inutile eccetto in un montaggio auto-regolante con feedback negativo:
  - feedback negativo → stabilità
  - feedback positivo → deriva e oscillazioni
- collegando l'output al'input invertente:
  - se l'output è < V_{in}, l'output tenderà a diventare positivo
  - se l'output è > V_{in}, l'output tenderà a diventare negativo

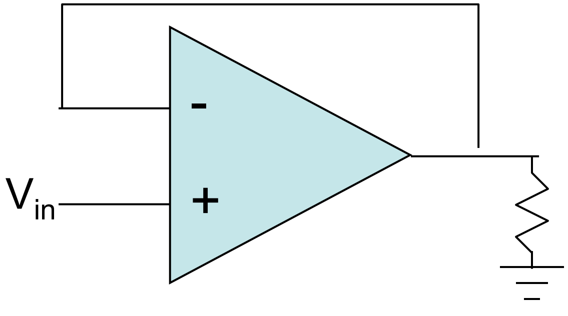
  → il risultato è che l'output velocemente si forza a diventare esattamente V_{in}



Buffer

- Anche con un carico:
  - l'operazionale farà il possibile (all'interno delle sue limitazioni di corrente) per cambiare l'output affinchè l'input invertente raggiunga V_{in}
  - il feedback negativo lo rende auto-regolante
  - nel caso disegnato l'operazionale produce (o tira, se V_{in} è negativa) una corrente* attraverso il carico finchè l'output non raggiunge V_{in}

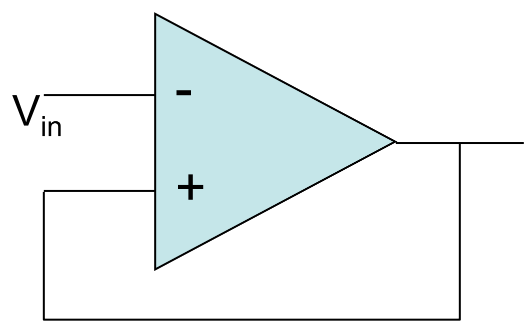
  → abbiamo creato un **buffer**: possiamo "applicare" V_{in} a un carico senza alterarlo con nessuna corrente



* l'output, a differenza degli input produce o tira corrente

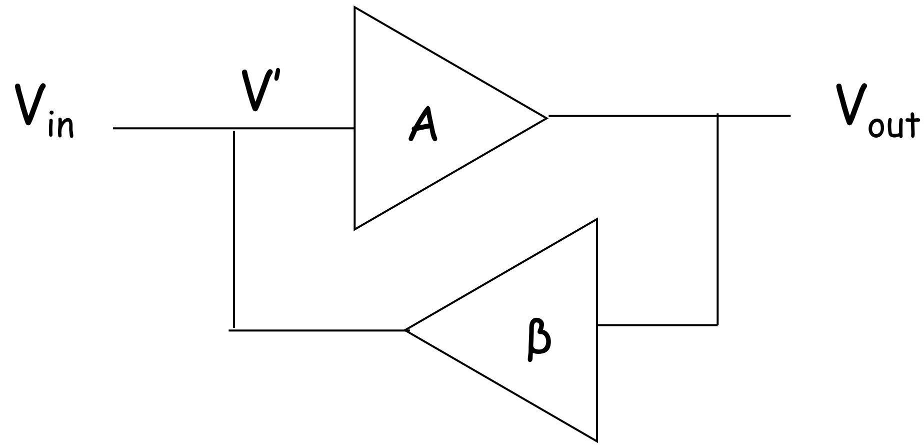
Patologia da feedback positivo

- nella configurazione sotto, se l'input non invertente è anche di pochissimo > V_{in}, l'output sarà positivo (in realtà dipende dalla differenza ma è amplificato dal guadagno ideale dell'operazionale)
- questo rende l'output maggiore di V_{in} ancora di più, peggiorando la situazione di cui sopra
- il sistema deriva immediatamente alla tensione di alimentazione (la direzione dipende dalla condizione iniziale)



feedback positivo: “sbagliato”

Feedback



$$G = \frac{V_{out}}{V_{in}}$$

$$V_{out} = AV'$$

$$V' = V_{in} + \beta V_{out}$$

$$V_{out} = A\left(V_{in} + \beta V_{out}\right)$$

$$V_{out}\left(1 - \beta A\right) = AV_{in}$$

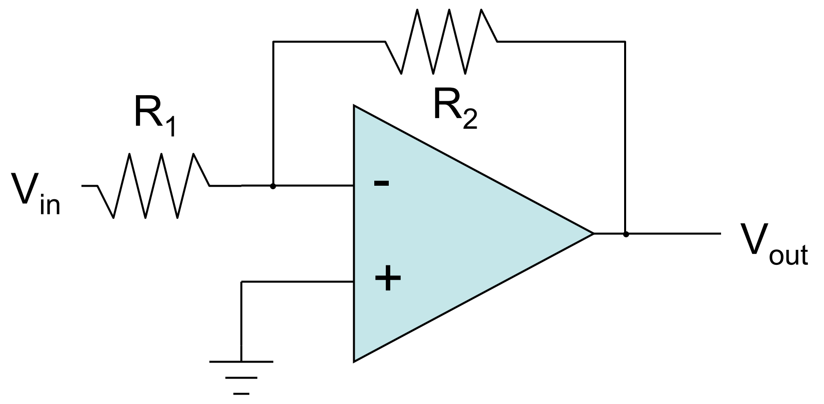
$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{A}{(1 - \beta A)}$$

$$G = \frac{A}{(1 - \beta A)} \sim \frac{1}{\beta}$$

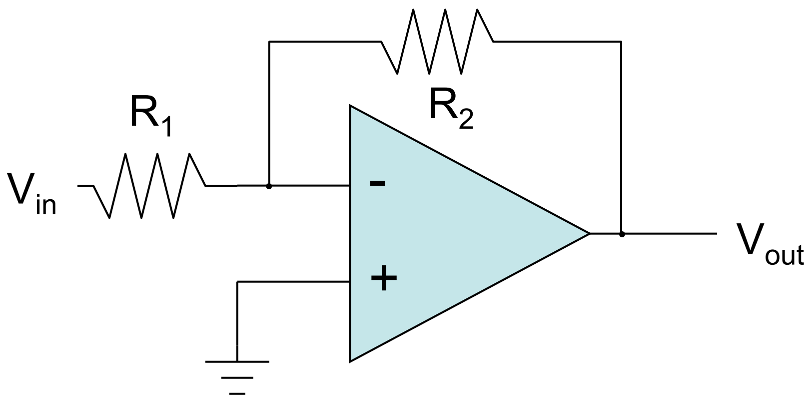
“Regole d’oro” dell’operazionale

- quando un amplificatore operazionale è in una qualsiasi configurazione a feedback negativo, obbedirà alle seguenti due regole:
  - gli input non tirano o producono corrente (questo è vero anche senza feedback)
  - l’operazionale farà di tutto per portare a zero la differenza di voltaggio fra i due input

Operazionale invertente

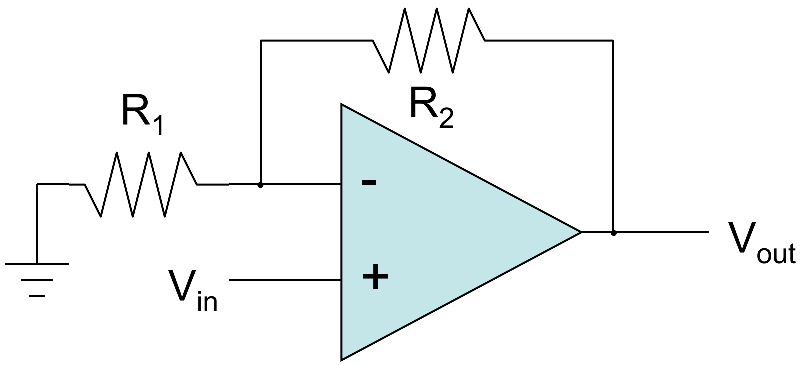


Operazionale invertente

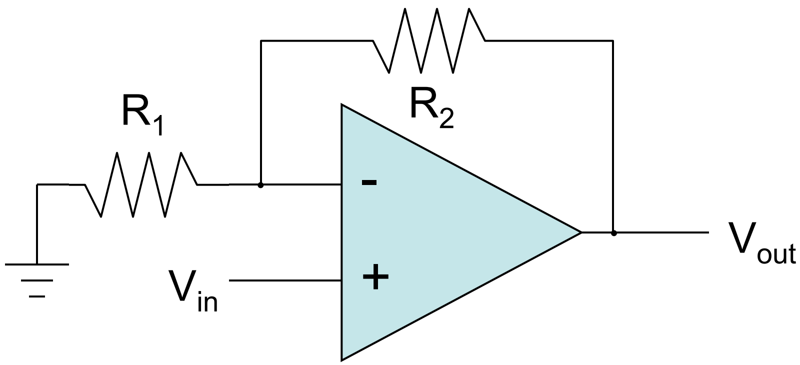


- terminali a "ground virtuale":
  - la corrente attraverso R_1 è $I_f = V_{in}/R_1$
- non c'è corrente in entrata all' operazionale (prima regola):
  - la corrente attraverso R_1 deve andare attraverso R_2
  - la caduta di potenziale ai capi di R_2 è $I_f R_2 = V_{in}(R_2/R_1)$
- quindi $V_{out} = 0 - V_{in}(R_2/R_1) = -V_{in}(R_2/R_1)$
- quindi V_{in} viene amplificato di un fattore $-R_2/R_1$:
  - il segno negativo lo rende un amplificatore invertente

Operazionale non-invertente

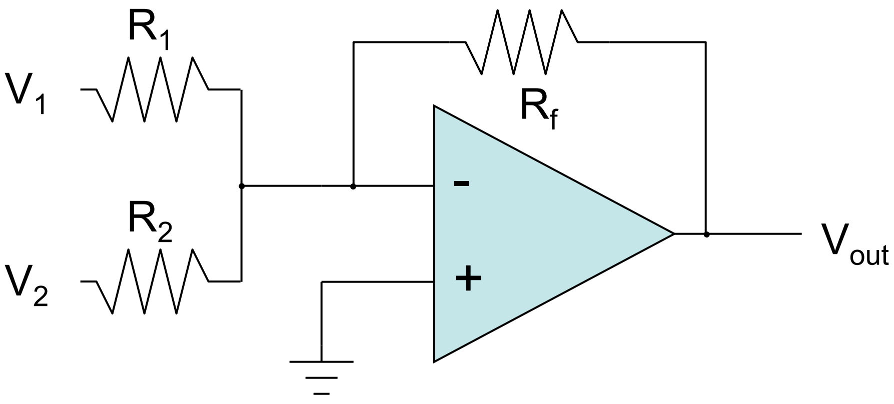


Operazionale non-invertente

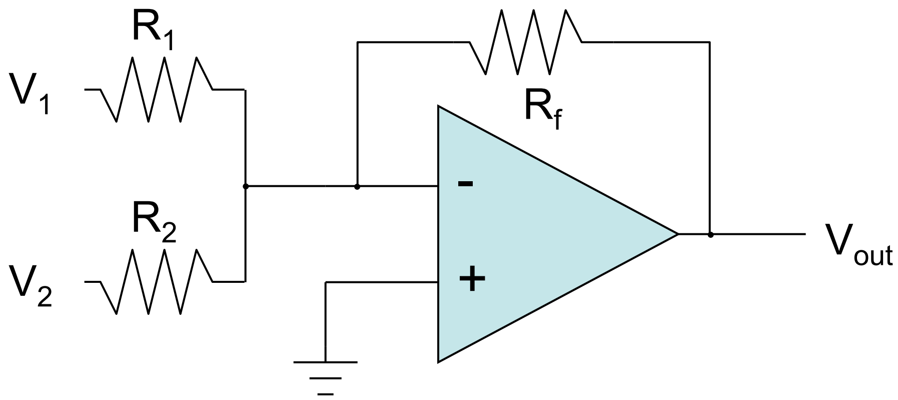


- il terminale negativo viene portato a V_{in} (cfr. ground virtuale):
  - la corrente attraverso R_1 è $I_f = V_{in}/R_1$
- la corrente in R_1 non viene dagli input:
  - viene dall'output, attraverso R_2
  - la caduta su R_2 è $I_f R_2 = V_{in}(R_2/R_1)$
  - $V_{out} = V_{in} + V_{in}(R_2/R_1) = V_{in}(1 + R_2/R_1)$
  - il guadagno è $(1 + R_2/R_1)$, ed è positivo

Amplificatore sommatore

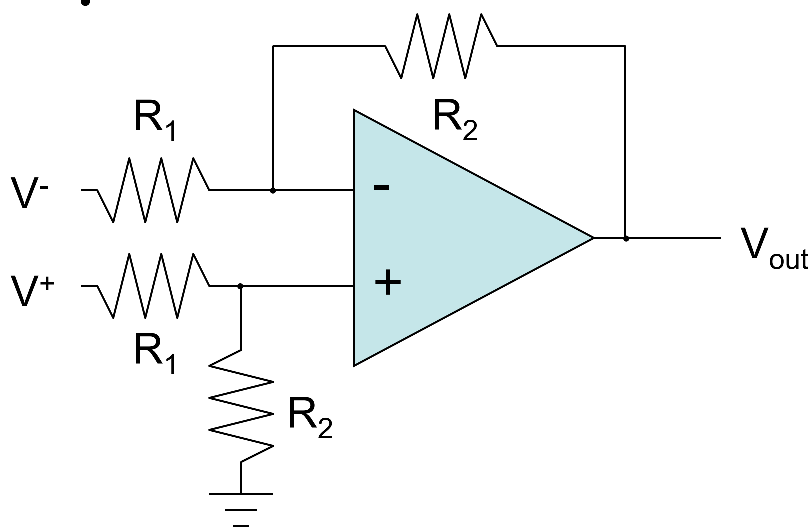


Amplificatore sommatore

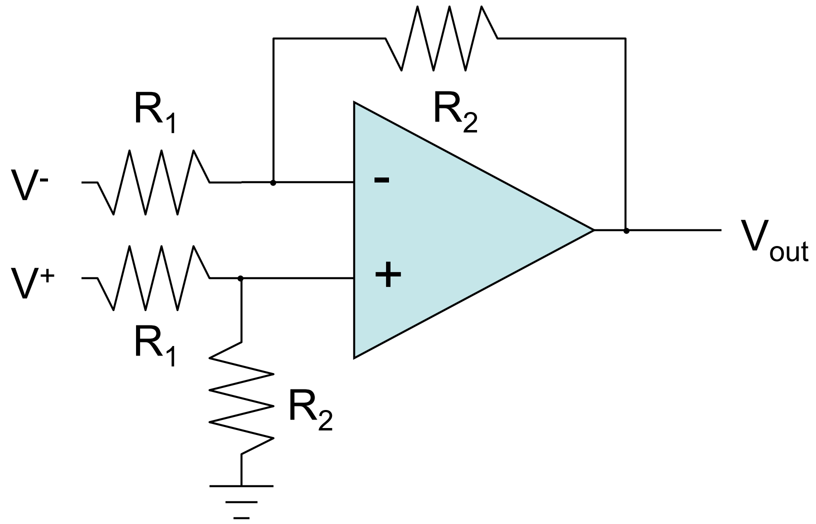


- come l'invertente ma con due input:
  - input invertente a "ground virtuale"
  - I_1 e I_2 si sommano e passano per R_f
  - otteniamo la somma (invertita):
    $V_{out} = -R_f\,(V_1/R_1 + V_2/R_2)$
    - se $R_2 = R_1$, la somma è "normale": $(V_1 + V_2)$
    - altrimenti è "pesata"

Amplificatore sottrattore

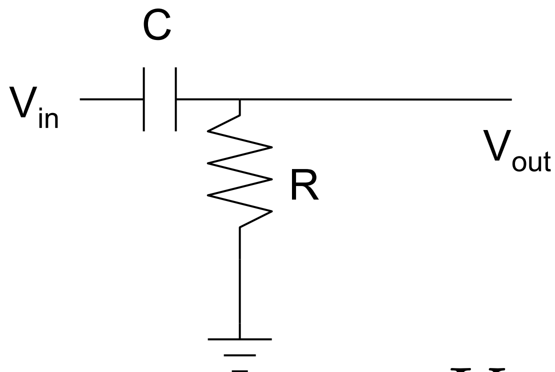


Amplificatore sottrattore



- l'input non invertente è un partitore di tensione:
  - $V_{nodo} = V_{+}R_2/(R_1 + R_2)$
- quindi $I_f = (V_{-} - V_{nodo})/R_1$
  - $V_{out} = V_{nodo} - I_f R_2 =$
    $V_{+}(1 + R_2/R_1)(R_2/(R_1 + R_2)) - V_{-}(R_2/R_1)$
  - quindi $V_{out} = (R_2/R_1)(V_{+} - V_{-})$

Differenziatore/Filtro passa-alto



$$Q = CV$$

$$I = \frac{dQ}{dt} = C\frac{dV}{dt}$$

$$I = C\frac{d}{dt}(V_{in} - V_{out}) = \frac{V_{out}}{R}$$

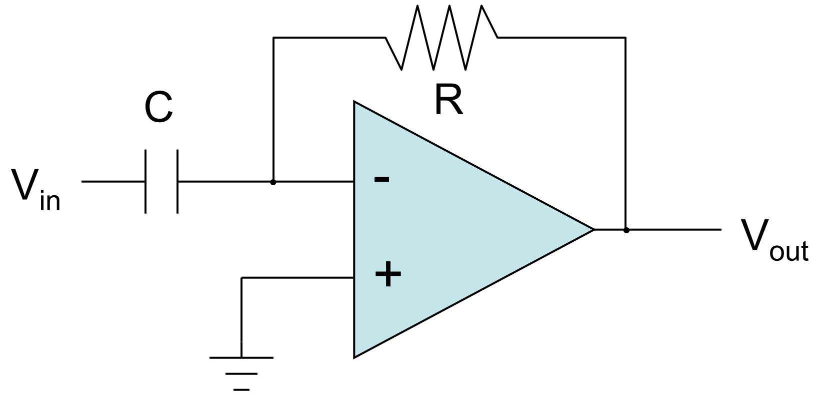
Se vale la condizione

$$\frac{dV_{out}}{dt} \ll \frac{dV_{in}}{dt}$$

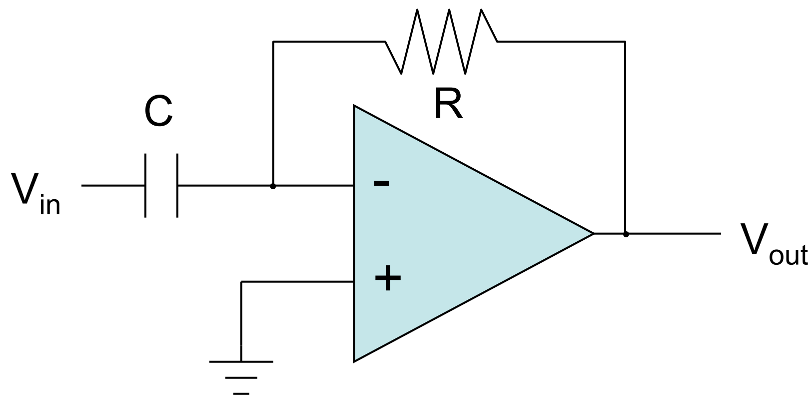
cioè se la caduta ai capi di R è << di quella ai capi di C

$$C\frac{dV_{in}}{dt} = \frac{V_{out}}{R} \quad \rightarrow \quad V_{out} = RC\frac{dV_{in}}{dt}$$

Amplificatore differenziatore/filtro passa-alto



Amplificatore differenziatore/filtro passa-alto



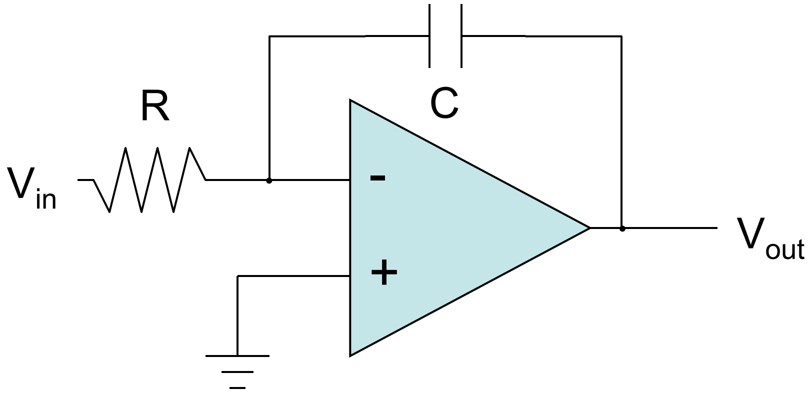
- per il capacitore $Q = CV$

$$I = \frac{dQ}{dt} = C\frac{dV}{dt}$$

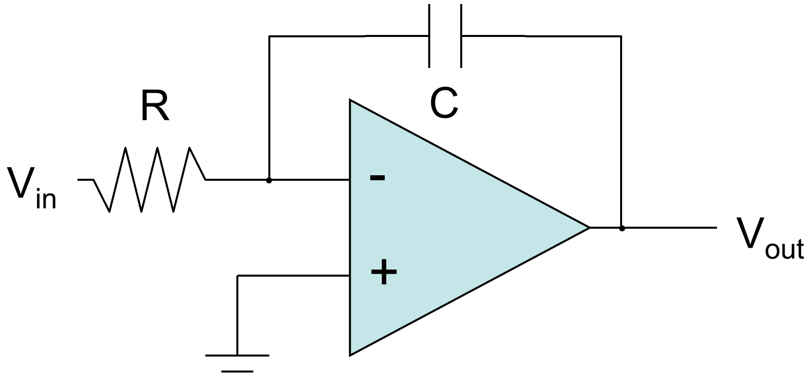
$$V_{out} = -I_{cap}R = -RC\frac{dV}{dt}$$

- quindi abbiamo realizzato un differenziatore o un filtro passa-alto

Amplificatore integratore/filtro passa-basso



Amplificatore integratore/filtro passa-basso



$$Q = CV$$

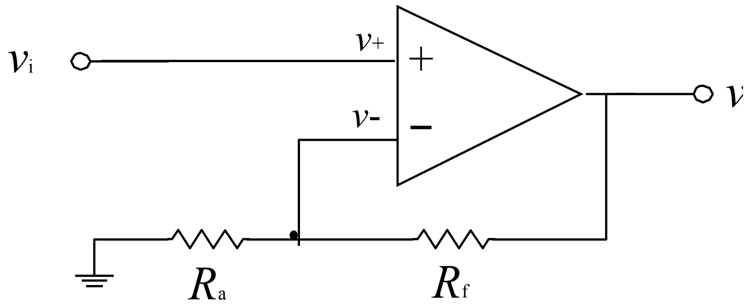
$$I = \frac{dQ}{dt} = C\frac{dV}{dt}$$

- $I_f = V_{in}/R \rightarrow C \cdot dV_{cap}/dt = V_{in}/R$
  - e siccome il capacitore a sinistra è a “ground virtuale”: $V_{out} = V_{cap} \rightarrow - dV_{out}/dt = V_{in}/RC$

$$V_{out} = -\frac{1}{RC}\int V_{in} dt$$

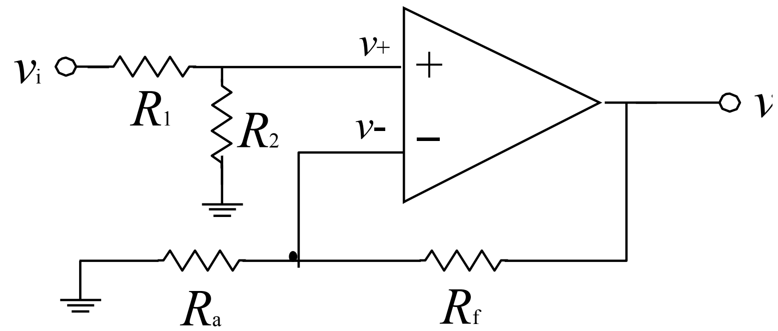
  - abbiamo quindi realizzato un integratore o un filtro passa-basso

Altri montaggi



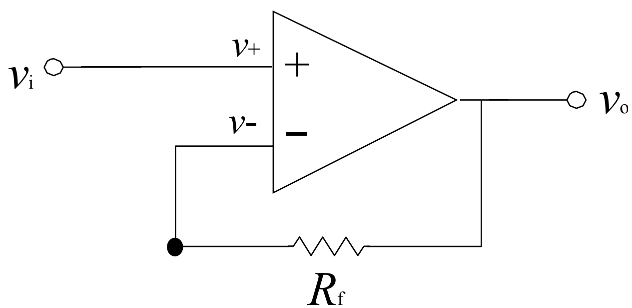
Amplificatore non invertente

$$v_o = (1 + \frac{R_f}{R_a})v_i$$



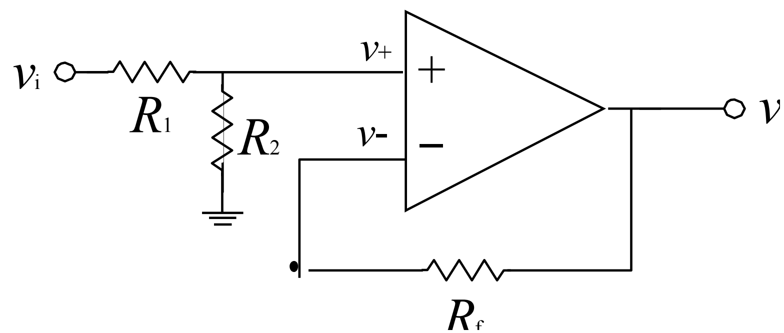
Amplificatore non invertente con partitore

$$v_o = (1 + \frac{R_f}{R_a})(\frac{R_2}{R_1 + R_2})v_i$$



Inseguitore di voltaggio - buffer

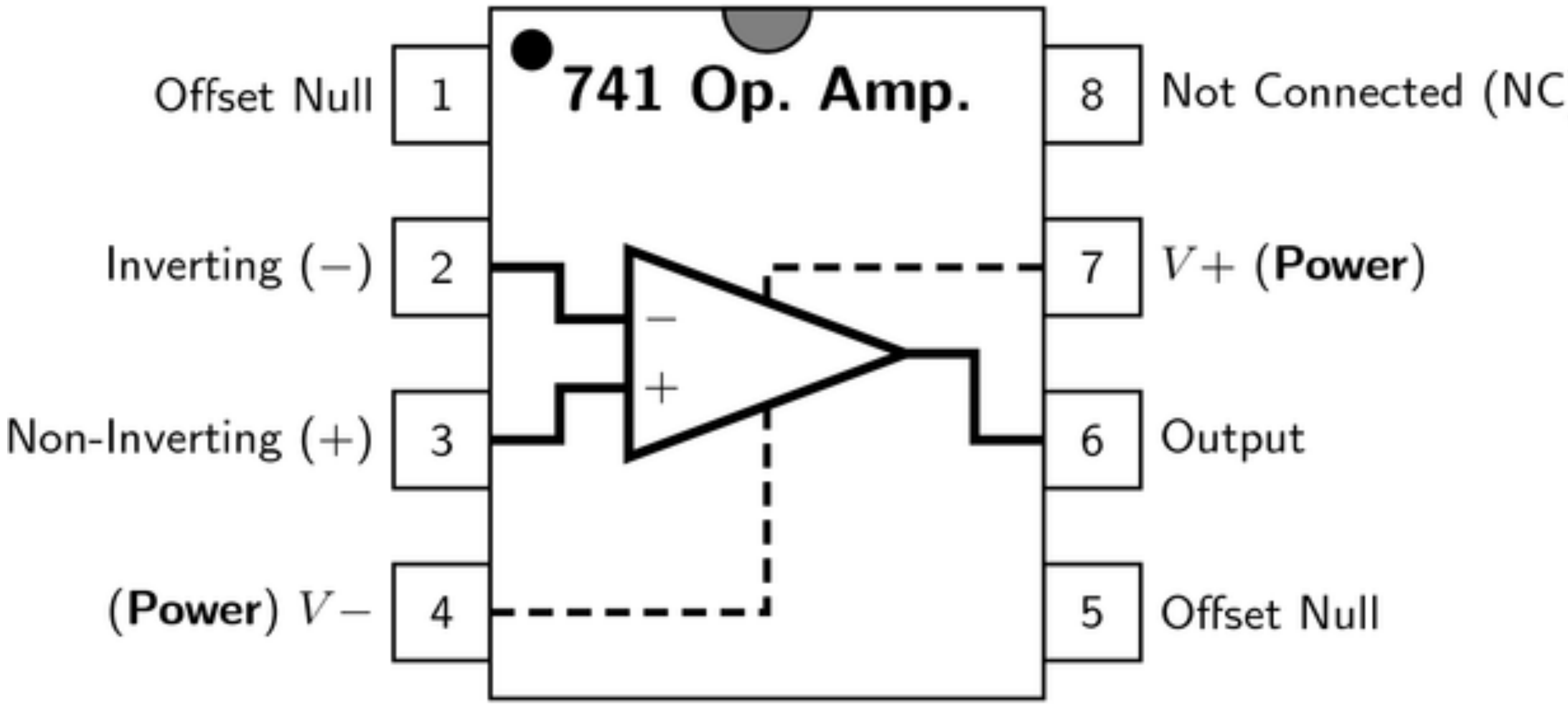
$$v_o = v_i$$



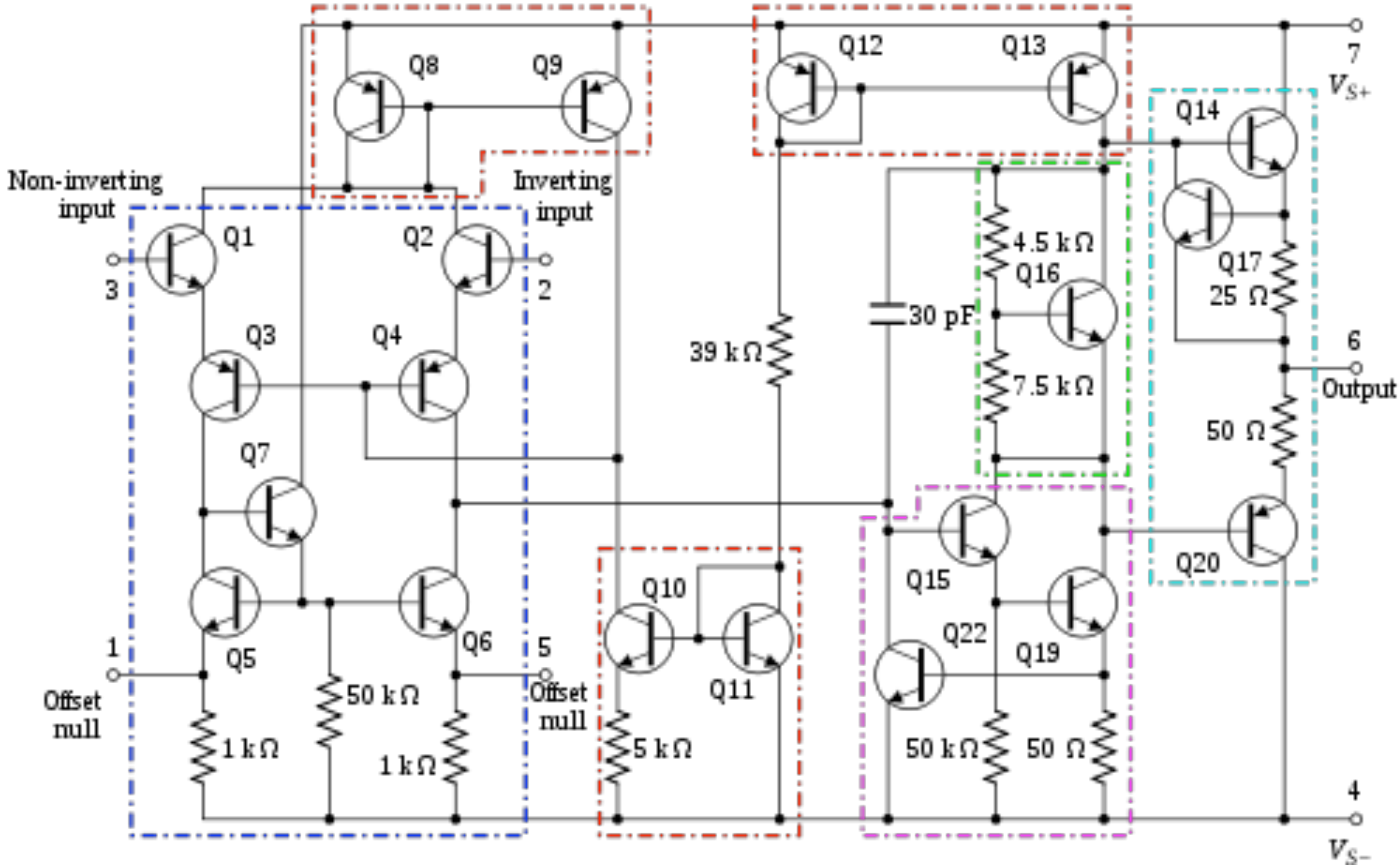
Amplificatore a guadagno < 1

$$v_o = \frac{R_2}{R_1 + R_2} v_i$$

esempio: serie 741

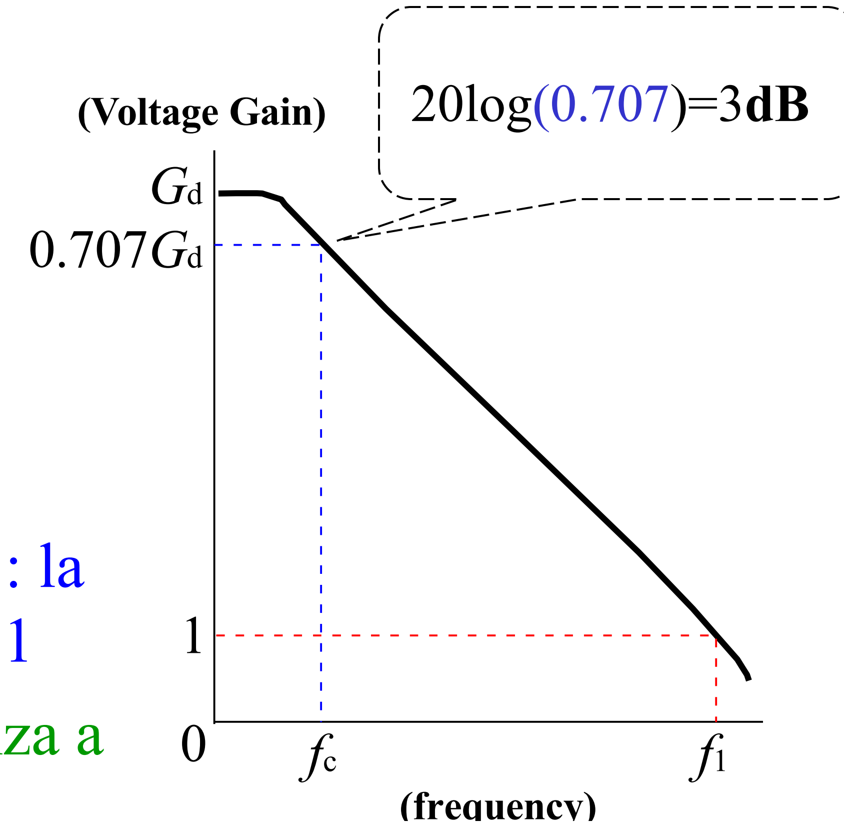


esempio: serie 741



Relazione Frequenza-Guadagno

- idealmente i segnali sono amplificati a tutte le frequenze
- nella realtà la banda è limitata
- gli operazionali della famiglia 741 hanno un limite di pochi KHz.

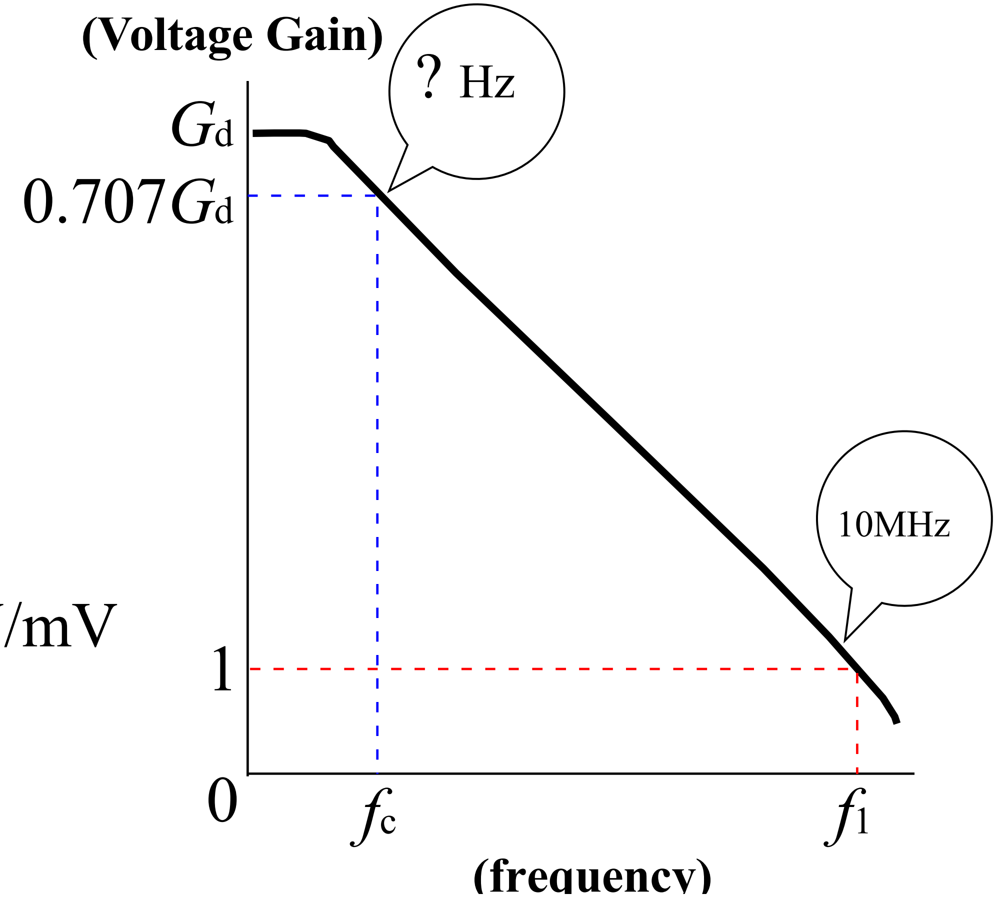


- frequenza a guadagno unitario, f_1: la frequenza a cui il guadagno vale 1
- frequenza di cutoff, f_c: la frequenza a cui il guadagno ha avuto una diminuizione di 3dB

$$\boxed{\text{prodotto GB: } f_1 = G_d f_c}$$

Prodotto GB

Esempio: determinare la frequenza di cutoff di un'operazionale che ha una frequenza di guadagno unitario di f_1 = 10 MHz e un guadagno differenziale G_d = 20**V**/m**V** (20000)



<u>Soluzione:</u>

f_1 = 10 MHz

usando l'equazione del prodotto GB:

$f_1 = G_d f_c$

$f_c = f_1 / G_d$ = 10 MHz / 20 V/mV

$= 10 \times 10^6 / 20 \times 10^3$

= 500 Hz

GBP per il 741

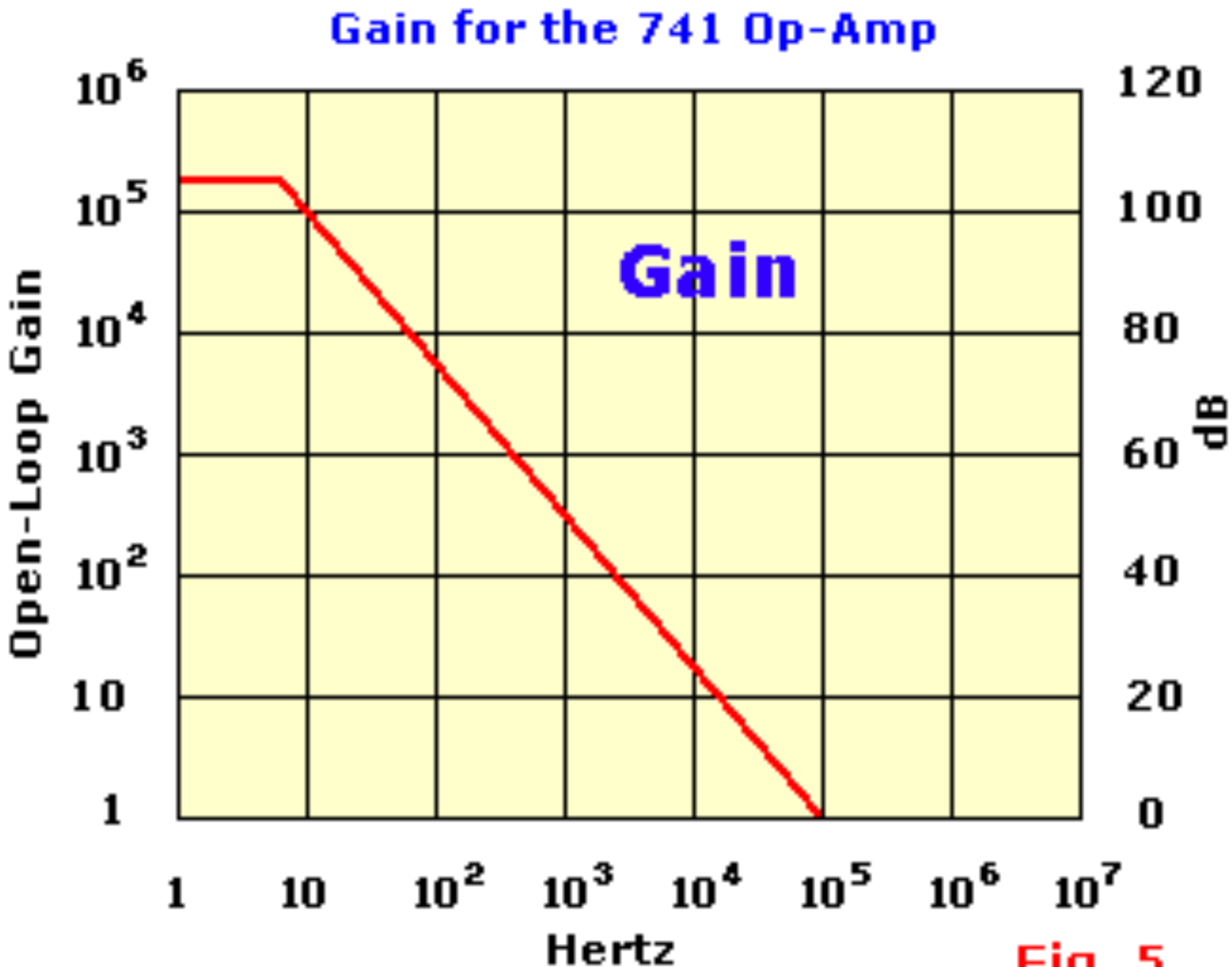


Fig. 5

Gain-Bandwidth Product (GBP) = A * BW