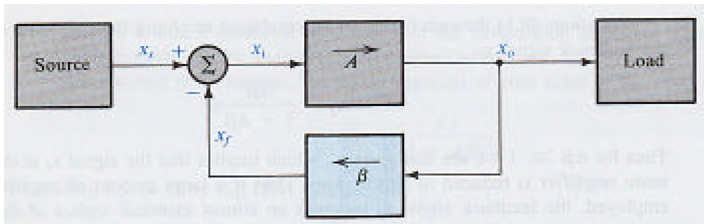
Circuiti in retroazione

- I circuiti in retroazione hanno la seguente topologia:



$$x_O = A\ x_i = A(x_S - x_f) = A(x_S - \beta x_O)$$

$$\Rightarrow \quad x_O = \frac{A}{1 + Ab} x_s \qquad \boxed{A_f = \frac{A}{1 + Ab}}$$

Retroazione: nomenclatura

- Si definiscono le seguenti quantità:

b	Fattore di retroazione
Ab	Guadagno ad anello aperto
$1 + Ab$	Grado di retroazione
$A_f = \frac{A}{1 + Ab}$	Guadagno ad anello chiuso

Circuiti in retroazione

- Si distinguono due casi:

$$\left|1+Ab\right|>1$$ Retroazione **negativa** ⇨ $A_f < A$

$$\left|1+Ab\right|<1$$ Retroazione **positiva** ⇨ $A_f > A$

Proprietà dei circuiti in retroazione negativa

- Desensibilizzazione

$$\frac{dA_f}{dA} = \frac{1}{(1+Ab)^2}$$

E quindi: $$\boxed{\frac{dA_f}{A_f} = \frac{1}{(1+Ab)}\frac{dA}{A}}$$

La variazione del guadagno A_f dell' amplificatore retroazionato è inferiore alla variazione di A.
Questo effetto benefico si chiama **desensibilizzazione**.

Proprietà dei circuiti in retroazione negativa

- Estensione della banda

Consideriamo un amplificatore con funzione di trasferimento a <u>singolo polo</u>:

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

Per l' amplificatore retroazionato risulta:

$$A_f(s) = \frac{A_M / (1 + A_M b)}{1 + s / w_H (1 + A_M b)} \Longrightarrow \boxed{w_{Hf} = w_H (1 + A_M b)}$$

Proprietà dei circuiti in retroazione negativa

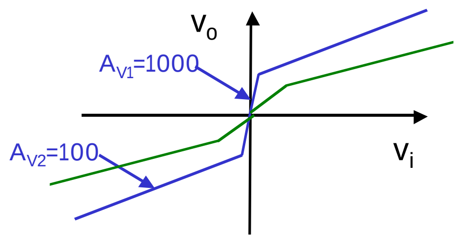
- Costanza del prodotto Banda·Guadagno

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

$$w_{\mathrm{Hf}} = w_{\mathrm{H}} (1 + \mathrm{A}\ b) \Longrightarrow \boxed{\mathrm{A_f} \cdot w_{\mathrm{Hf}} = \mathrm{A} \cdot w_{\mathrm{H}}}$$

Proprietà dei circuiti in retroazione negativa

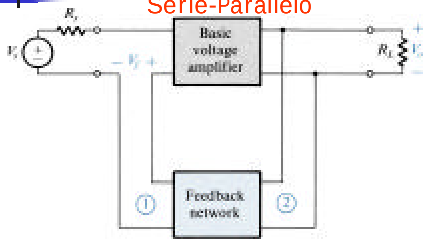
- Riduzione della distorsione non lineare



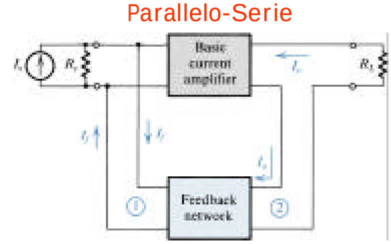
Se b = 0.01 : A_{fV1}= 1000/(1+1000·0.01) = 90.9
A_{fV2}= 100/(1+100·0.01) = 50

Circuiti in retroazione: analisi

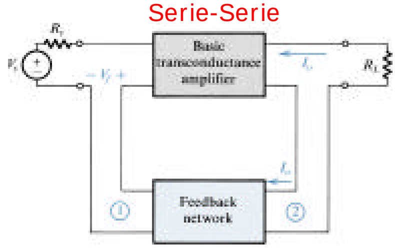
Serie-Parallelo



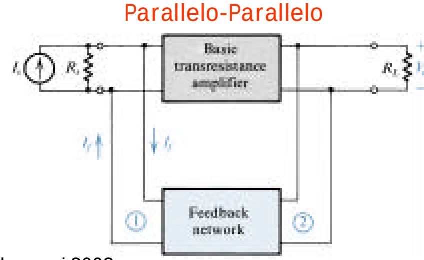
Parallelo-Serie



Serie-Serie

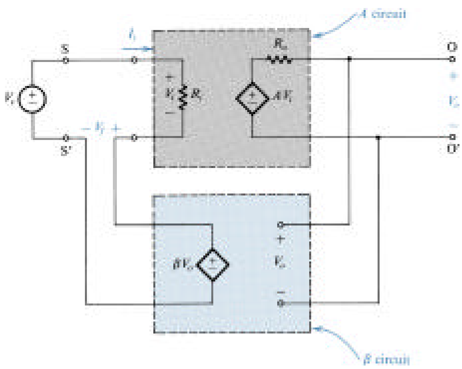


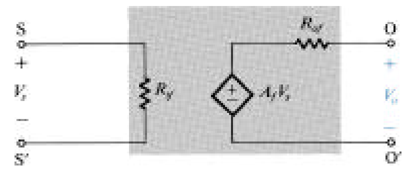
Parallelo-Parallelo



Topologia Serie-Parallelo

Caso Ideale





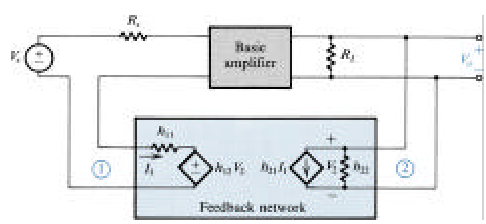
$$A_f = \frac{A}{1 + Ab}$$

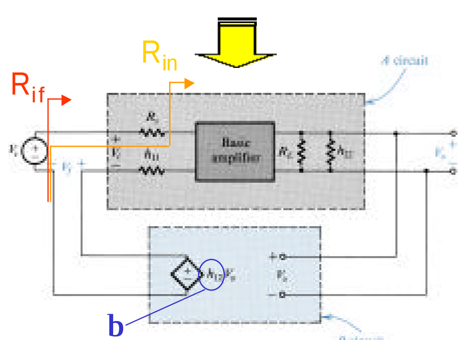
$$R_{if} = R_i(1 + Ab)$$

$$R_{of} = R_o/(1 + Ab)$$

Topologia Serie-Parallelo

Caso Reale





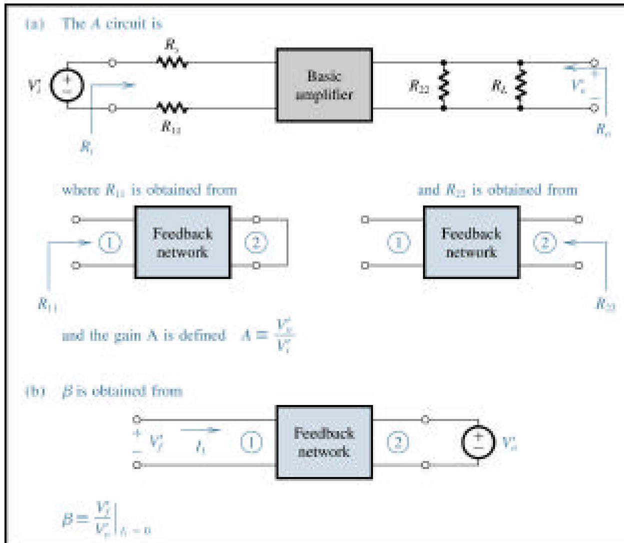
$$A_f = \frac{A}{1 + Ab}$$

$$R_{in} = R_{if} - R_S$$

$$R_{out} = 1\Big/\left(\frac{1}{R_{of}} - \frac{1}{R_L}\right)$$

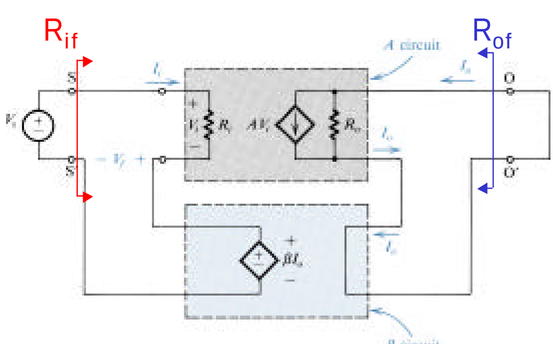
Topologia Serie-Parallelo: analisi

Una volta riconosciuta la topologia, semplici regole permettono di analizzare il circuito retroazionato



Topologia Serie-Serie

- Tipica degli amplificatori a transconduttanza:



$X_i = V_s$
$X_o = I_o$

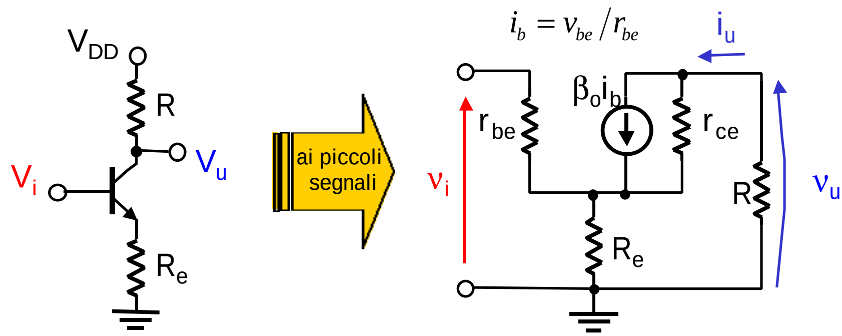
$$A_f = \frac{I_O}{V_S} = \frac{A}{1+Ab}$$

$$R_{if} = R_i \cdot (1 + Ab)$$

$$R_{of} = R_o \cdot (1 + Ab)$$

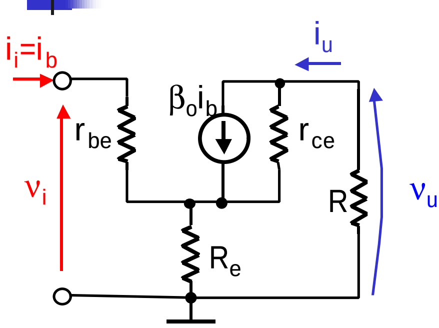
Topologia Serie-Serie: un esempio

- Talvolta la retroazione non traspare dalla topologia



Il modello più adatto in questo caso è quello Serie-Serie

Topologia Serie-Serie: un esempio



$$v_i = (r_{be} + R_e)\cdot i_i + R_e \cdot i_u$$

$$v_u = R_e(i_i + i_u) + r_{ce}(i_u - b_o i_i) = (-b_o r_{ce} + R_e)\cdot i_i + (R_e + r_{ce})\cdot i_u$$

$$v_u = -R \cdot i_u$$

eliminando v_u e i_i si ottiene:

$$i_u = \underbrace{\frac{(b_o r_{ce} - R_e)}{(r_{ce} + R + R_e)(r_{be} + R_e)}}_{A} \cdot (v_i - \underset{\beta}{R_e} i_u)$$

Circuiti retroazionati: analisi della stabilità

- In generale sia A che β sono funzione della frequenza.
- A_f è quindi una **funzione di trasferimento**

$$A_f(s) = \frac{A(s)}{1 + A(s)\,\beta(s)}$$

Per l' analisi della stabilità del circuito retroazionato si usano gli stessi criteri applicati in precedenza considerando l' **equazione caratteristica**

$$\boxed{1 + A(s)\,\beta(s) = 0}$$

Amplificatori operazionali

- Per amplificatori operazionali si intende quella categoria di dispositivi integrati che presentano due morsetti di ingresso (invertente e non invertente) ed un morsetto di uscita in cui la relazione di ingresso uscita è:

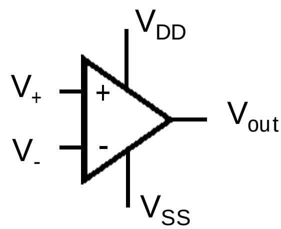
$$U = A\,(In_+ - In_-)$$

- Generalmente le grandezze sono tensioni e quindi:

$$\mathbf{V_{OUT} = A_V\,(V_+ - V_-)}$$

Amplificatori operazionali

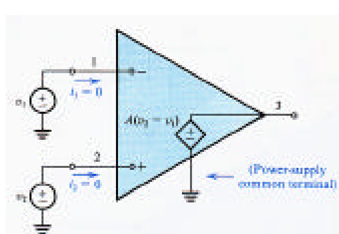
- Un amplificatore operazionale viene indicato con il simbolo



- Solitamente non vengono indicati i morsetti di alimentazione

Amplificatore operazionale ideale

- L' amplificatore operazionale ideale è definito come un amplificatore dalle seguenti caratteristiche:
  - Guadagno in tensione infinito $A_V = \infty$
  - Banda passante infinita $B_W = \infty$
  - Inpedenza di ingresso infinita $Z_{IN+} = Z_{IN-} = \infty$
  - Impedenza di usita nulla $R_O=0$

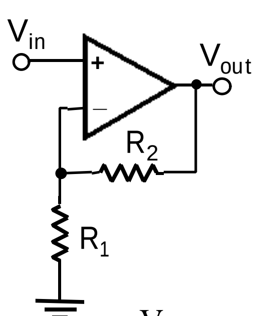


Amplificatore operazionale ideale

Qual' è l' utilità di un simile dispositivo ?

- Gli operazionali non vengono quasi mai utilizzati "ad anello aperto" .
- Viceversa sono utilizzati in circuiti in retroazione.

OPAMP: un esempio



$$V_{out} = A(V_+ - V_-)$$

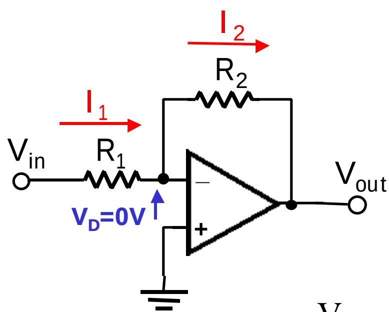
$$V_+ = V_{in}$$
$$V_- = V_{out} R_1 / (R_1 + R_2)$$

$$V_{out} = A(V_{in} - V_{out} \underbrace{R_1 / (R_1 + R_2)}_{b})$$

$$V_{out} = \underbrace{\frac{A}{1 + A\frac{R_1}{R_1 + R_2}}}_{A_f} V_{in} \quad \xrightarrow{A \to \infty} \quad \boxed{V_{out} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} V_{in}}$$

Amplificatore non invertente

OPAMP: analisi semplificata



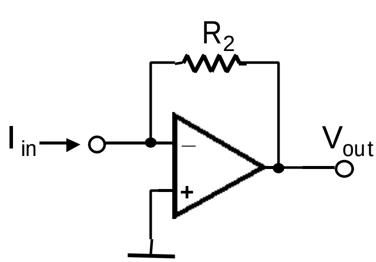
- $I_+ = I_- =$ **0A** ⇨ $I_1=I_2$
- **A ® ¥** ⇨ V_D=0V

$$\frac{V_{in}}{R_1} = -\frac{V_{out}}{R_2} \Rightarrow \boxed{V_{out} = -\frac{R_2}{R_1} V_{in}}$$

Amplificatore invertente

Un caso particolare: convertitore I-V

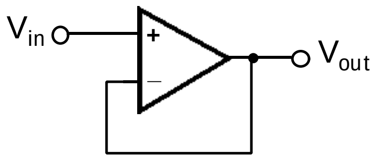
- Il convertirore I-V si può pensare come un caso particolare dello schema precedente



$$V_{out} = - R_2 I_{in}$$

Amplificatore a transresistenza

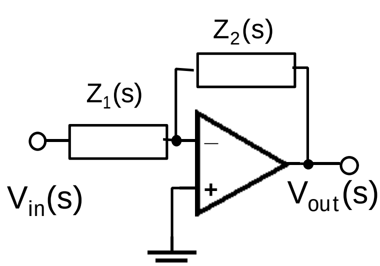
OPAMP: il voltage follower



$$V_{out} = V_{in}$$

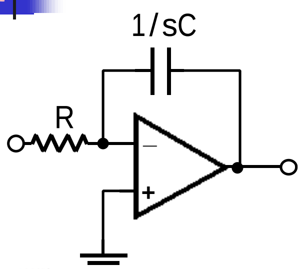
Configurazioni con impedenze

- Retroazionando un opamp con impedenze di possono ottenere circuiti che eseguono operazioni sul segnale di ingresso

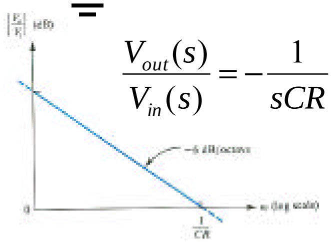


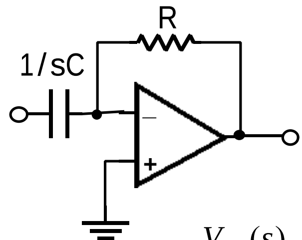
$$V_{out}(s) = -\frac{Z_2(s)}{Z_1(s)} V_{in}(s)$$

Configurazioni con impedenze

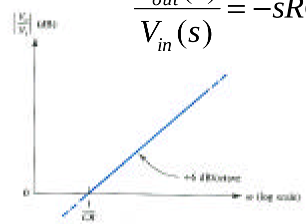


$$\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = -\frac{1}{sCR}$$





$$\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = -sRC$$

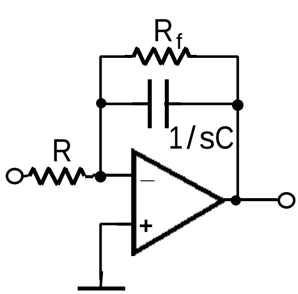


Integratore invertente (*)

Derivatore invertente

Integratore di Miller

- **(*) In DC l' integratore non risulta retroazionato.**
- Risultato: ogni piccolo offset nella tensione in ingresso viene integrato e la tensione in uscita cresce indefinitamente in modulo (caso ideale).



$$\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = -\frac{R_f}{R}\frac{1}{1+sR_fC}$$

$A_{DC} = -R_f/R$ $\omega_{-3dB} = 1/R_fC$

Stadio passa basso