

# **Controreazione**

# Il concetto di retroazione

---

La reazione è quel particolare principio per il quale un sistema che deve svolgere una determinata funzione è dotato di un elemento di confronto fra la prestazione desiderata e quella effettivamente ottenuta, così che discrepanza fra le due prestazioni genera un segnale col quale il sistema può correggere il suo comportamento. Tutto ciò implica che l'**uscita** del sistema sia confrontata con l'uscita desiderata, e che il segnale di errore venga riportato in **entrata** per fornire al sistema stesso il segnale di correzione.

Si forma perciò una specie di anello del percorso dei segnali: il segnale di entrata percorre il sistema producendo un'uscita, che a sua volta viene prelevata, elaborata e, infine, riportata all'entrata.

Questo anello può produrre effettivamente il miglioramento delle prestazioni desiderate del sistema, oppure può provocare l'instabilità; per effetto della reazione le caratteristiche di stabilità del sistema possono essere migliorate, anzi uno dei tanti scopi della reazione è proprio quello di migliorare la stabilità.

Al contrario, se la reazione non è eseguita correttamente, oppure se è eseguita direttamente a quello scopo, il sistema può diventare instabile; è quanto si fa appositamente per la realizzazione di oscillatori.

# Il concetto di retroazione

---

*In un sistema retroazionato, un segnale proporzionale all'uscita viene riportato in ingresso e viene sommato o sottratto al segnale di ingresso stesso per ottenere l'uscita desiderata.*

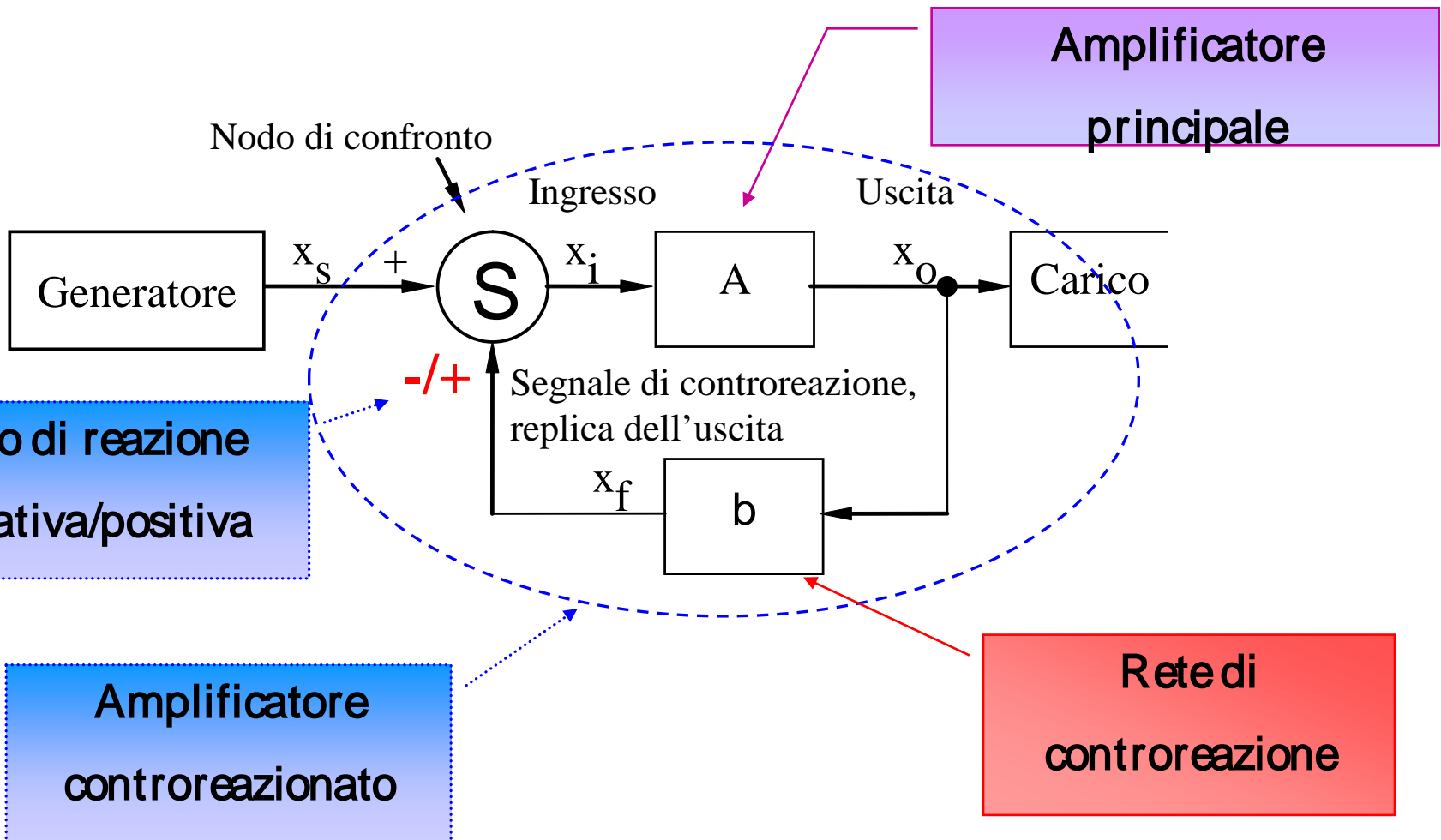
## *Retroazione positiva*

- ü *utile per realizzare:*
  - *oscillatori*
  - *multivibratori bistabili*
  - *filtri attivi*
- û *sgradita negli amplificatori lineari*

## *Retroazione negativa*

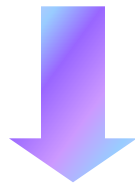
- ü *stabilizzazione del guadagno*
- ü *riduzione delle distorsioni non lineari*
- ü *aumento o riduzione delle impedenze di ingresso e di uscita*
- ü *estensione della banda passante*
- û *riduzione del guadagno*
- û *possibilità di oscillazione*

# Struttura generale della controreazione

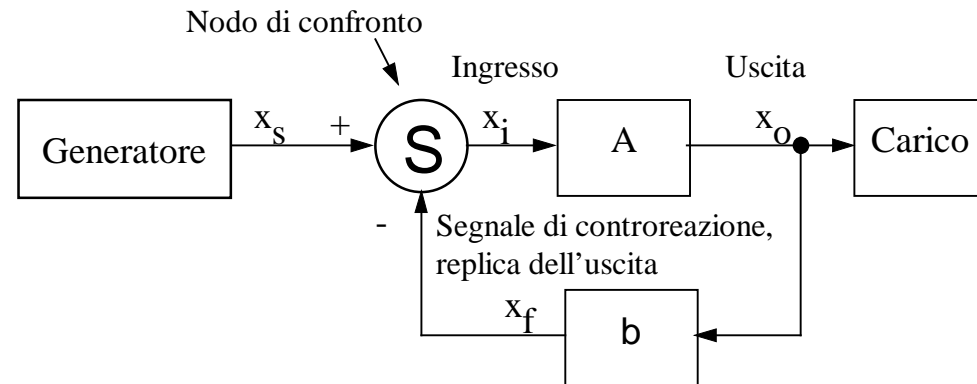


# Controreazione

Ø Il segnale d'uscita  $x_o$  viene riportato in ingresso attraverso la rete di controreazione



Ø Il segnale di controreazione  $x_f$  viene sottratto al segnale  $x_s$  inviato dal generatore, (ingresso dell'intero amplificatore controreazionato).




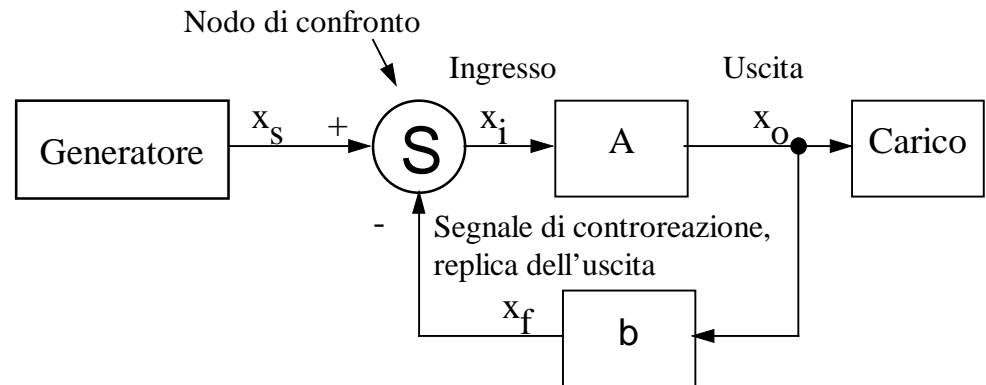
Ø L'ingresso dell'amplificatore principale diventa

$$Ø x_i = x_s - x_f$$

# Controreazione

Ø Date le relazioni fra i segnali


$$\begin{cases} x_o = Ax_i \\ x_f = bx_o \\ x_i = x_s - x_f \end{cases}$$



Ø Il guadagno dell'amplificatore controreazionato risulta:

$$A_f = \frac{x_o}{x_s} = \frac{x_o}{x_i + x_f} = \frac{Ax_i}{x_i + bx_o} = \frac{Ax_i}{x_i + Abx_i} = \frac{A}{1 + Ab}$$

# Controreazione

---

## Ø Definizioni:

Ø **Ab** Ø Guadagno di anello. Nel caso di controreazione negativa **Ab** deve essere positivo, in questo modo il segnale di controreazione  $x_f$  ha lo stesso segno di  $x_s$ , e il segnale differenza  $x_i$  risulta minore di  $x_s$ .

Ø **1 + Ab** Ø Tasso di controreazione. Se **Ab** è positivo, il guadagno ad anello chiuso risulta minore del corrispondente guadagno ad anello aperto di un fattore proprio pari al tasso di controreazione

# Controreazione

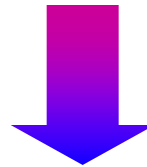
---

Ø Dall'espressione trovata per il guadagno:

$$A_f = \frac{x_o}{x_s} = \frac{x_o}{x_i + x_f} = \frac{Ax_i}{x_i + bx_o} = \frac{Ax_i}{x_i + Abx_i} = \frac{A}{1 + Ab}$$

Ø Se si verifica  $Ab \gg 1$  (guadagno di anello elevato) risulta:

$$A_f \gg 1/b$$



Ø Il guadagno dell'amplificatore controreazionato è determinato quasi interamente dalla rete di controreazione.



# Controreazione: stabilizzazione del guadagno

---

Ø Nell'ipotesi di  $b = \text{cost.}$ , si può determinare analiticamente la stabilizzazione del guadagno; infatti differenziando ambo i membri dell'espressione del guadagno dell'amplificatore controreazionato si ottiene:

$$dA_f = d\left(\frac{A}{1 + Ab}\right) = \frac{1 + Ab - Ab}{(1 + Ab)^2} dA = \frac{dA}{(1 + Ab)^2}$$

Ø e, dividendo per  $A_f$ :

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

Ø La variazione relativa di  $A_f$ , dovuta a variazioni nei parametri del sistema, è minore della variazione relativa di  $A$  di un fattore pari al tasso di controreazione ( $1 + Ab$ ).

Ø Per questa ragione il tasso di controreazione ( $1 + Ab$ ) viene anche denominato **fattore di stabilizzazione**.

# Controreazione: allargamento della banda passante

---

Ø Si consideri un amplificatore la cui risposta alle alte frequenze sia caratterizzata da un singolo polo.

Ø Il guadagno alle medie e alle alte frequenze può essere espresso come (filtro passa-basso)

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

Ø dove  $A_M$  rappresenta il guadagno a centro banda e  $w_H$  rappresenta la frequenza di taglio superiore (a 3dB).

Ø Applicando a questo amplificatore la controreazione negativa con un fattore  $b$  indipendente dalla frequenza, si ottiene un guadagno ad anello chiuso dato da:

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

# Controreazione: allargamento della banda passante

---

Ø Sostituendo l'espressione di  $A(s)$ :

$$\begin{aligned} A_f(s) &= A(s) \times \frac{1}{1 + bA(s)} = \frac{A_M}{1 + s/w_H} \times \frac{1}{1 + b \frac{A_M}{1 + s/w_H}} = \frac{A_M}{(1 + s/w_H)} \times \frac{(1 + s/w_H)}{1 + s/w_H + bA_M} = \frac{A_M}{1 + bA_M + s/w_H} = \\ &= \frac{A_M}{1 + bA_M} \times \frac{1}{1 + \frac{s}{w_H(1 + bA_M)}} \end{aligned}$$

Ø Quindi l'amplificatore controreazionato avrà un guadagno a centrobanda  $A_{Mf}$  pari a :

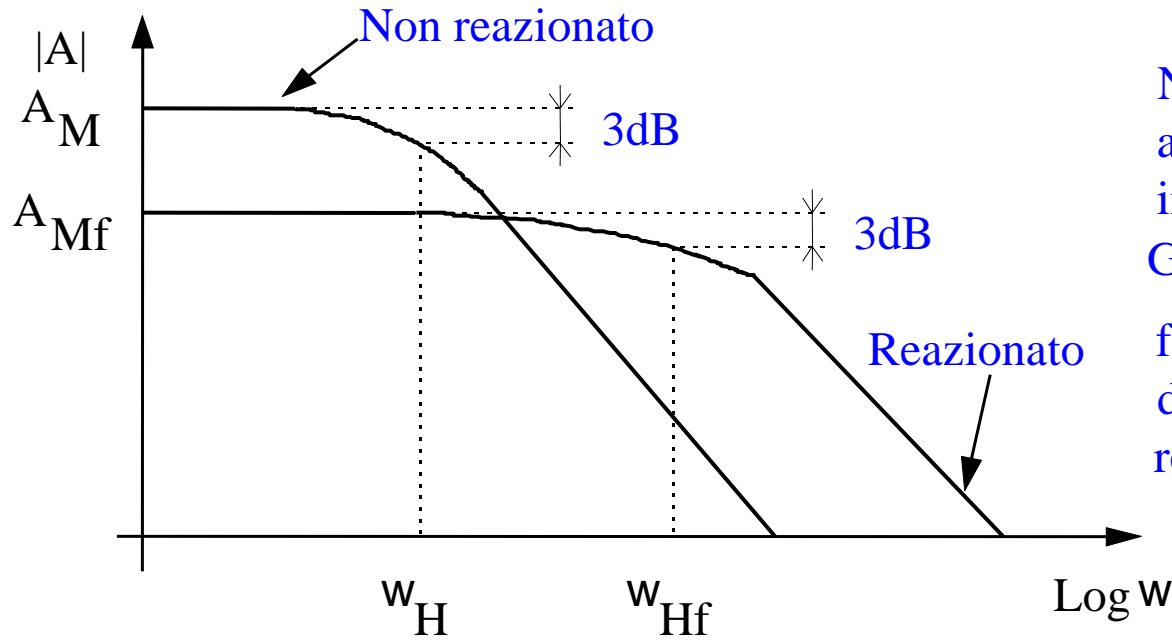
$$A_{Mf} = \frac{A_M}{1 + b A_M}$$

Ø e una frequenza di taglio superiore  $w_{Hf}$  pari a:

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

Ø Ne segue che la frequenza di taglio superiore risulta moltiplicata per un fattore pari al tasso di controreazione.

# Controreazione: allargamento della banda passante



Notare che le due aree sono uguali: infatti il prodotto  $GB = A_M W_H$ , il fattore di merito dell'amplificatore, resta costante.

Analogamente si può dimostrare che, se il guadagno a catena aperta è caratterizzato da un polo dominante alle basse frequenze che dà luogo a una frequenza di taglio inferiore  $W_L$ , allora l'amplificatore controreazionato avrà una frequenza di taglio inferiore

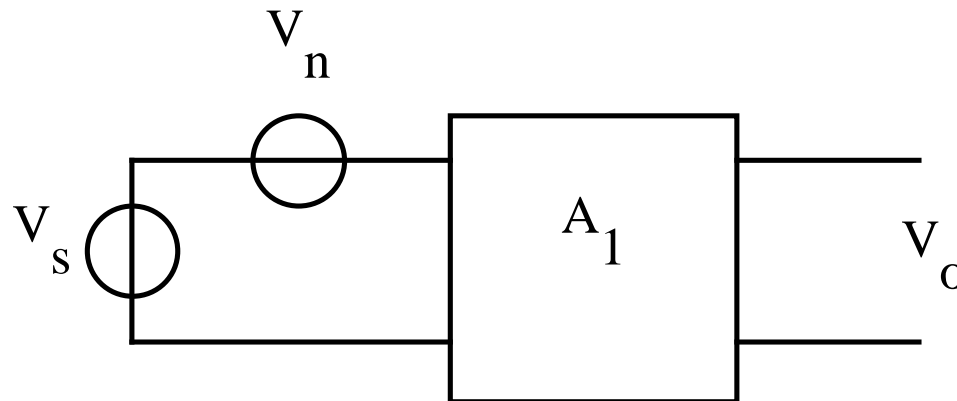
$$W_{Lf} = \frac{W_L}{1 + A_M b}$$

# Controreazione: riduzione del rumore

---

Ø La controreazione negativa può essere utilizzata per ridurre il rumore o l'effetto delle interferenze in un amplificatore o, più precisamente, per aumentare il rapporto segnale/rumore.

Ø Si consideri un amplificatore con guadagno  $A_1$ , cui viene applicato un segnale di ingresso  $V_S$ ; l'amplificatore è affetto da rumore o interferenze schematizzati da  $V_n$ :

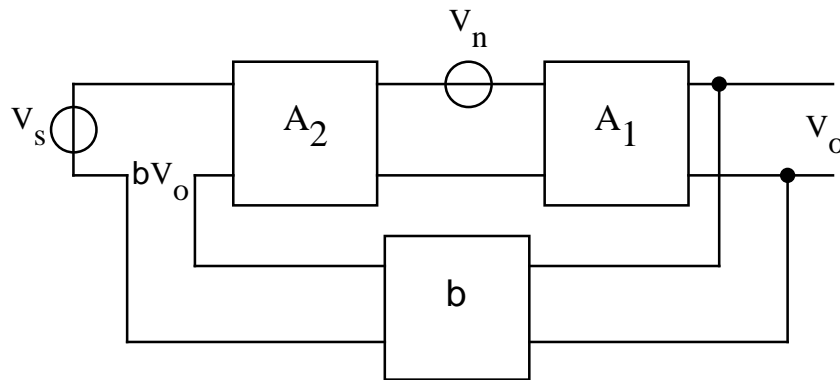


Ø Il rapporto segnale/rumore per questo amplificatore vale:

$$\text{Ø } S / N = V_S / V_N$$

# Controreazione: riduzione del rumore

Ø Si consideri il circuito:



Ø La tensione di uscita del circuito può essere ricavata mediante la sovrapposizione degli effetti:

$$V_o = V_s \frac{A_1 A_2}{1 + b A_1 A_2} + V_n \frac{A_1}{1 + b A_1 A_2}$$

Ø Quindi il rapporto segnale / rumore all'uscita diviene:

$$\frac{S}{N} = A_2 \frac{V_s}{V_N}$$

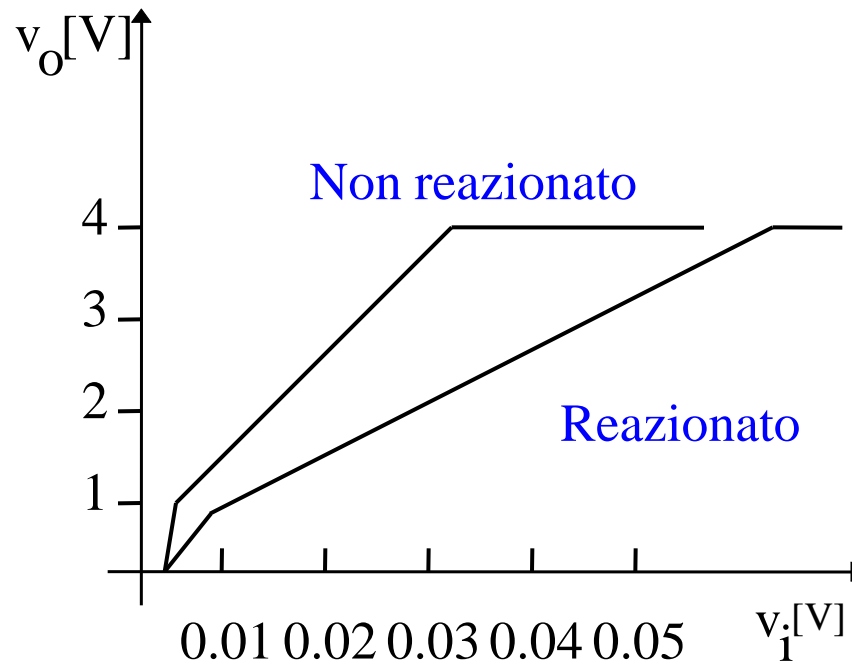
Ø ed è  $A_2$  volte maggiore di quello del circuito originale.

Ø (Vedi ad esempio il problema del ronzo dell'alimentazione negli stadi finali di potenza; viene risolto inserendo un preamplificatore per piccoli segnali con forte controreazione negativa).

# Controreazione: riduzione della distorsione lineare

---

Applicando la controreazione negativa, la caratteristica di un amplificatore può essere notevolmente linearizzata, riducendo la distorsione non lineare. Infatti si è già osservato come, grazie alla controreazione negativa, il guadagno complessivo ad anello chiuso di un amplificatore mostra una dipendenza molto ridotta dal guadagno a catena aperta dell'amplificatore principale.



# Controreazione: riduzione della distorsione lineare

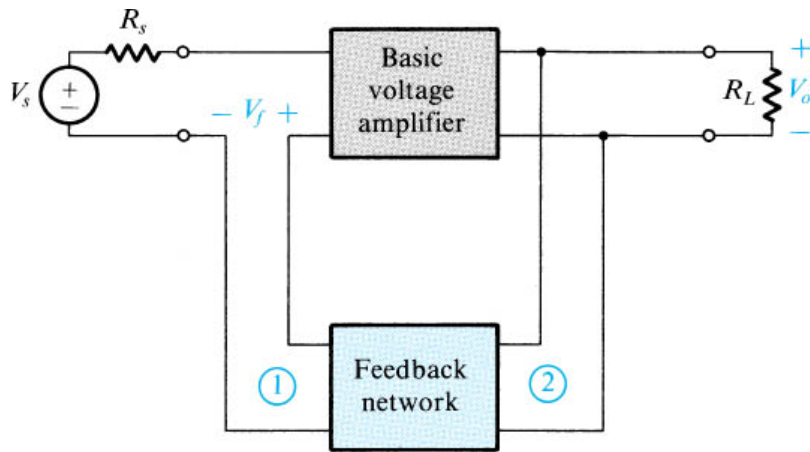
---

Ø Si è così ottenuta una notevole riduzione delle variazioni di pendenza, responsabili della non linearità, a scapito di una riduzione del guadagno di tensione.

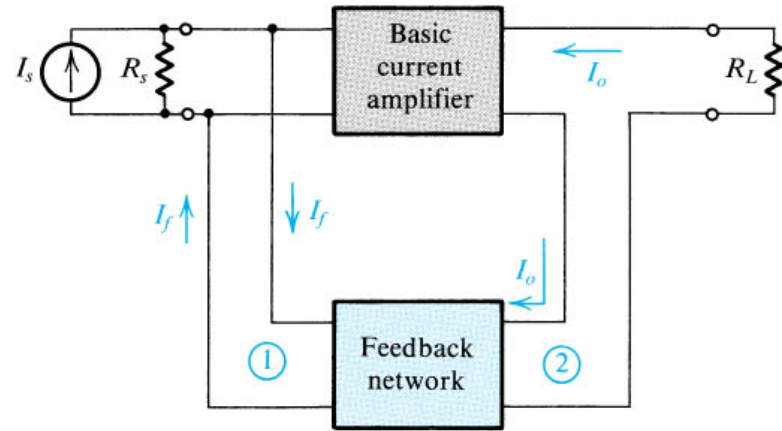
Ø Da notare che la controreazione negativa non ha alcun effetto quando l'amplificatore va in saturazione, essendo il guadagno  $A$  e quindi il tasso di controreazione  $A\beta$  prossimi allo zero.



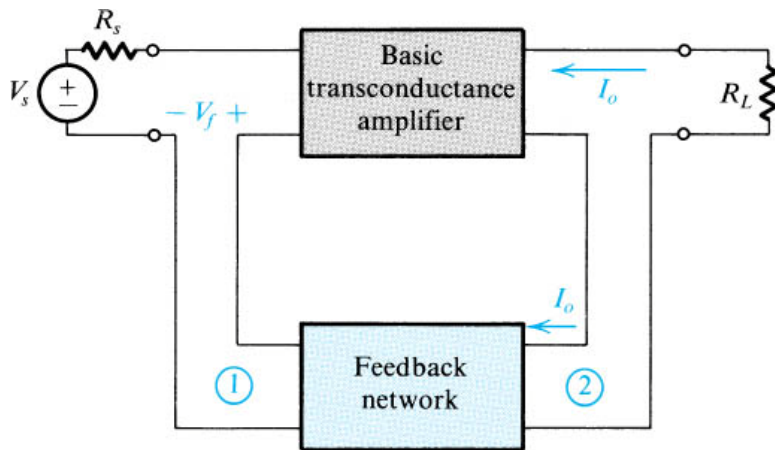
# Tipi di controreazione



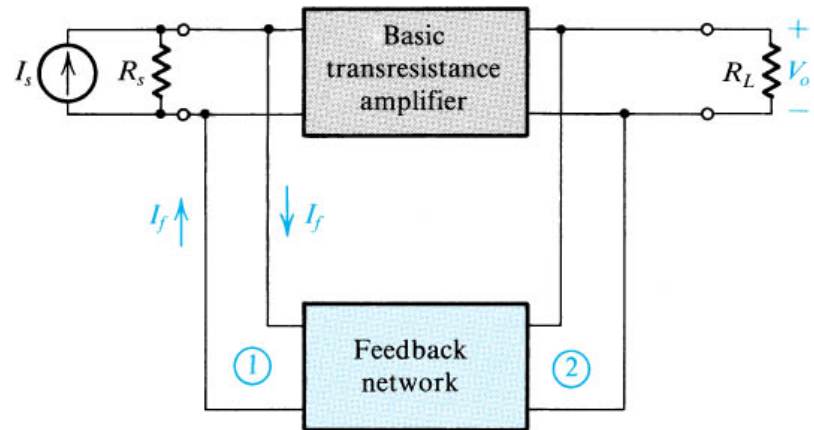
(a)



(b)



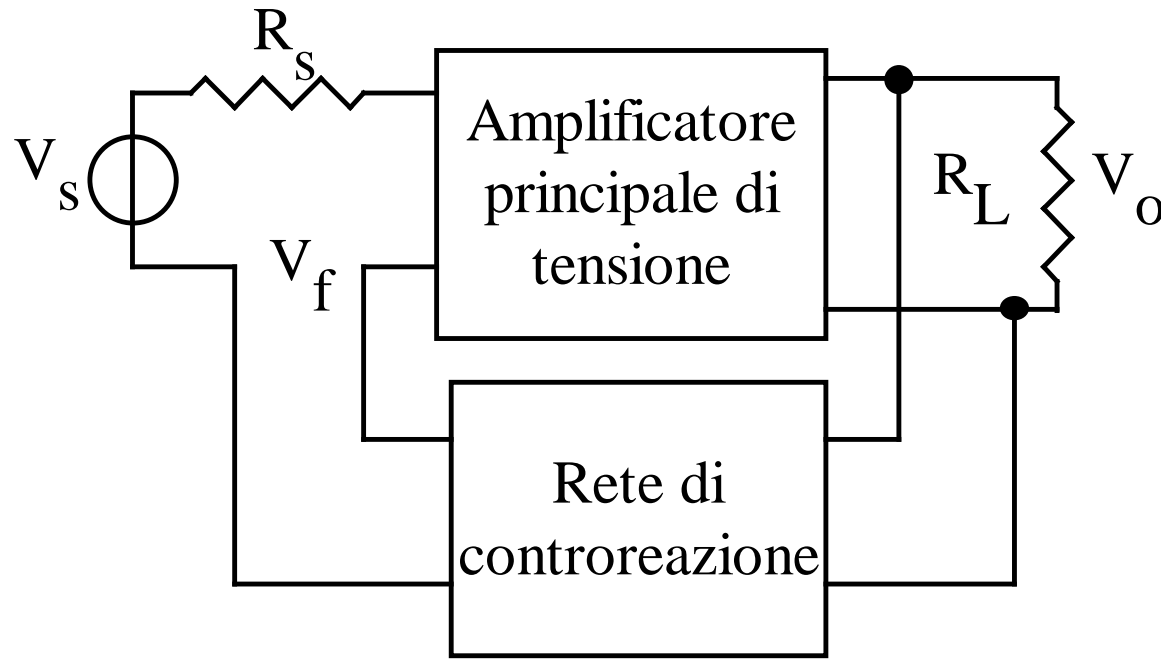
(c)



(d)

# Controreazione serie/parallelo (amplificatore di tensione)

---

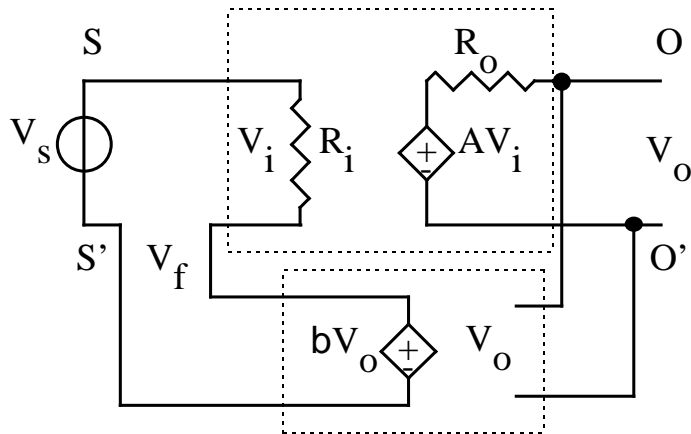


Ø Il generatore di segnale viene schematizzato con l'equivalente di Thevenin.

Ø In uscita si preleva una tensione in parallelo, che viene riportata in ingresso in serie al generatore di segnale.

Ø Questa configurazione non solo stabilizza il guadagno di tensione, ma serve ad aumentare  $R_i$  ed a ridurre  $R_o$ .

# Controreazione serie/parallelo (amplificatore di tensione)

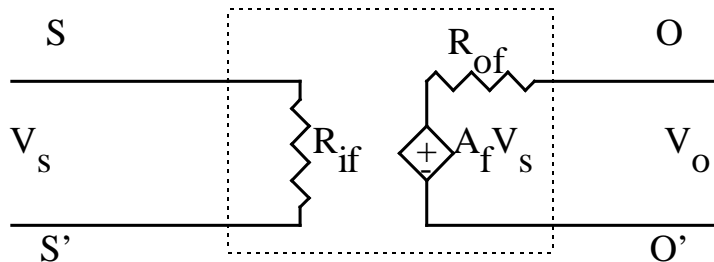


Resistenza d'ingresso  $R_{if}$  dell'amplificatore controreazionato:

$$R_{if} = \frac{V_s}{I_i} = R_i \frac{V_s}{V_i} = R_i \frac{V_i + bV_o}{V_i} = R_i \frac{V_i + bAV_i}{V_i} = R_i(1 + Ab)$$

La resistenza di ingresso viene aumentata di un fattore pari al tasso di controreazione.

$\beta$



Resistenza d'uscita  $R_{of}$  dell'amplificatore controreazionato:

Si pone  $V_s = 0$  e si applica in uscita una tensione di prova  $V_x$ .

$$I_x = \frac{V_x - AV_i}{R_o}$$

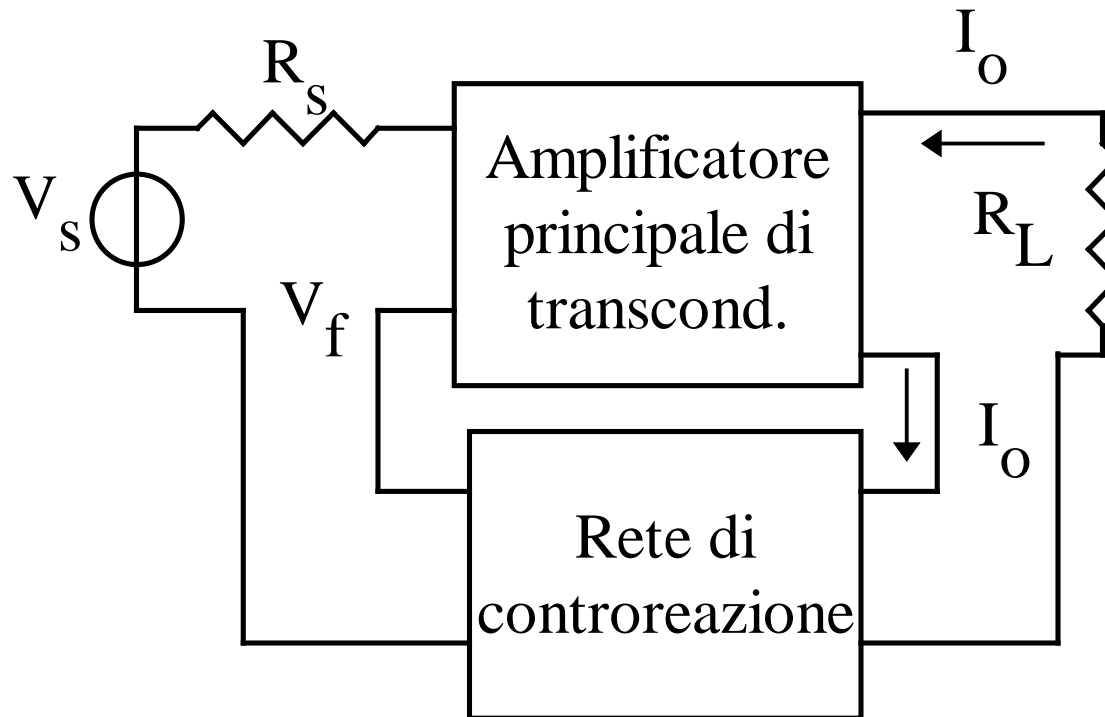
Con  $V_s = 0$  ho:  $V_i = -V_f = -bV_o = -bV_x$

$$I_x = \frac{V_x + AbV_x}{R_o} = V_x \frac{1 + Ab}{R_o} \quad \therefore \quad R_{of} = \frac{V_x}{I_x} = \frac{R_o}{1 + Ab}$$

La resistenza di uscita risulta ridotta di un fattore pari al tasso di controreazione.

# Controreazione serie/serie (amplificatore di transconduttanza)

---

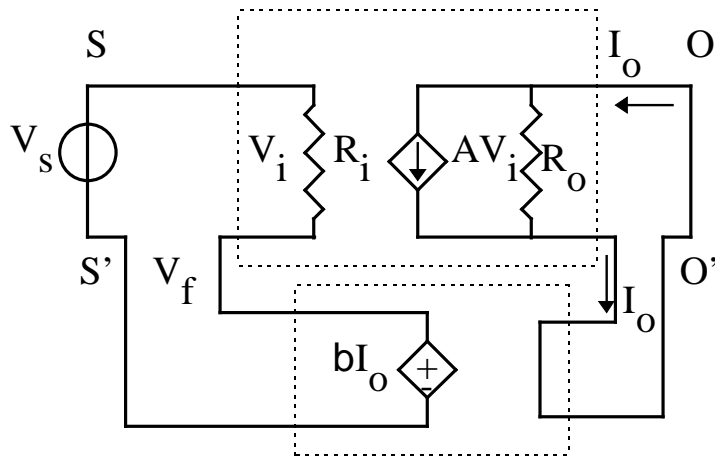


Il generatore di segnale viene schematizzato con l'equivalente di Thevenin.

In uscita si preleva una corrente con un collegamento in serie; in ingresso si riporta una tensione in serie al segnale.

Questa configurazione non solo stabilizza il guadagno, ma produce un aumento sia di  $R_i$  che di  $R_o$ .

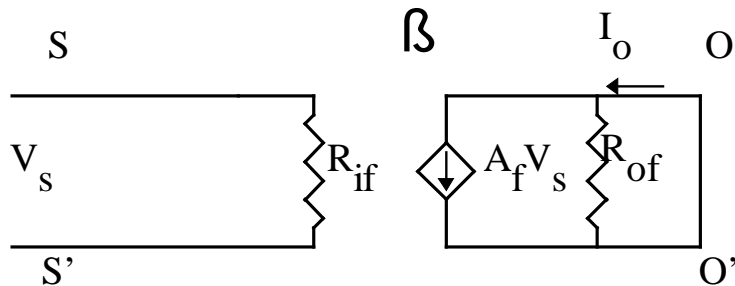
# Controreazione serie/serie (amplificatore di transconduttanza)



Resistenza di ingresso  $R_{if}$  dell'amplificatore controreazionato:

$$R_{if} = \frac{V_s}{I_i} = \frac{V_s}{V_i/R_i} = R_i \frac{V_s}{V_i} = R_i \frac{V_i + bI_o}{V_i} = R_i \frac{V_i + bAV_i}{V_i} = R_i(1 + Ab)$$

La resistenza di ingresso viene aumentata di un fattore pari al tasso di controreazione.



Resistenza di uscita  $R_{of}$  dell'amplificatore controreazionato: si pone  $V_s = 0$  e si applica all'uscita una corrente di prova  $I_x$ :

$$V_x = R_o(I_x - A V_i). \text{ con } V_s = 0, \quad V_i = -V_f = -b I_o = -b I_x$$

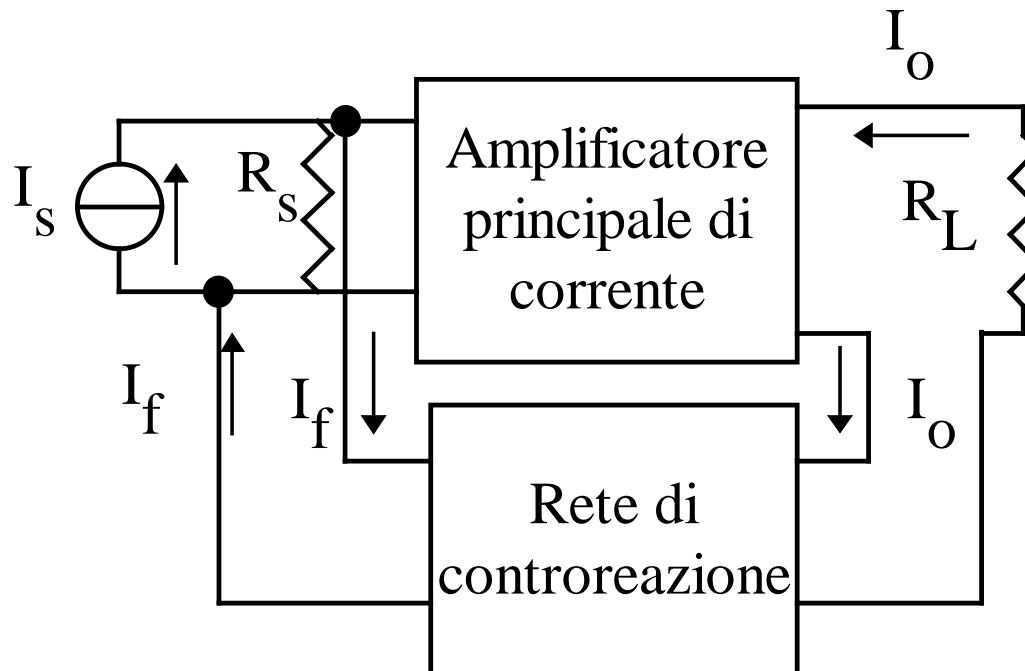
$$V_x = R_o(I_x + Ab I_x) = I_x R_o(1 + Ab)$$

La resistenza di uscita risulta aumentata di un fattore pari al tasso di controreazione.

$$R_{of} = \frac{V_x}{I_x} = R_o(1 + Ab)$$

# Controreazione parallelo/serie (amplificatore di corrente)

---

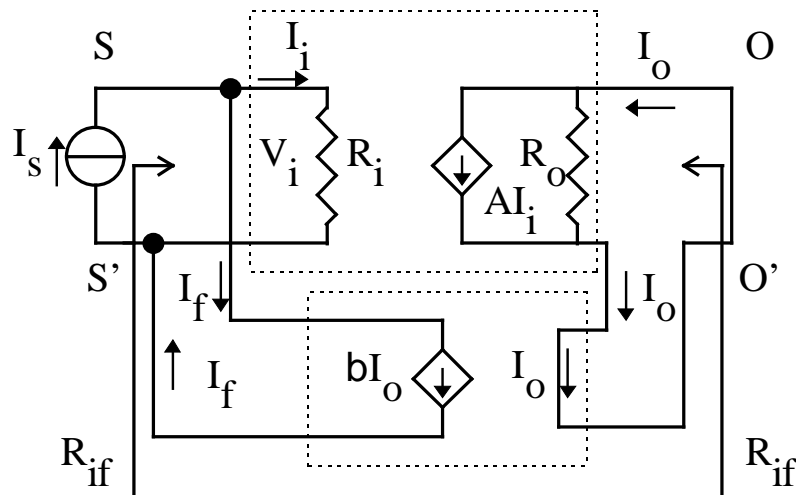


Il generatore di segnale viene schematizzato con lo schema equivalente di Norton.

In uscita si preleva una corrente con un collegamento in serie; e la si riporta in parallelo in ingresso.

Questa configurazione non solo stabilizza il guadagno, ma produce una diminuzione di  $R_i$  e un aumento di  $R_o$ .

# Controreazione parallelo/serie (amplificatore di corrente)



**Resistenza d'ingresso**  $R_{if}$  dell'amplificatore controreazionato:

$$R_{if} = \frac{V_i}{I_s} = \frac{R_i}{(1 + Ab)}$$

La resistenza di ingresso viene diminuita di un fattore pari al tasso di controreazione.

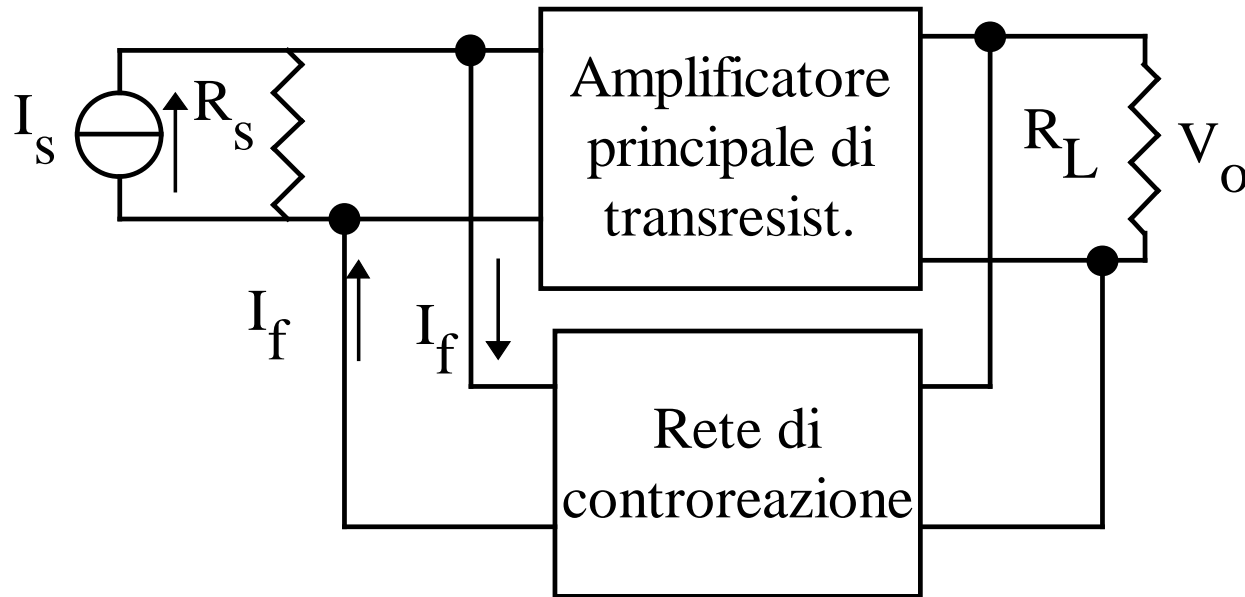
**Resistenza d'uscita**  $R_{of}$  dell'amplificatore controreazionato:

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

La resistenza di uscita risulta aumentata di un fattore pari al tasso di controreazione.

# Controreazione parallelo/parallelo (amplificatore di transresistenza)

---



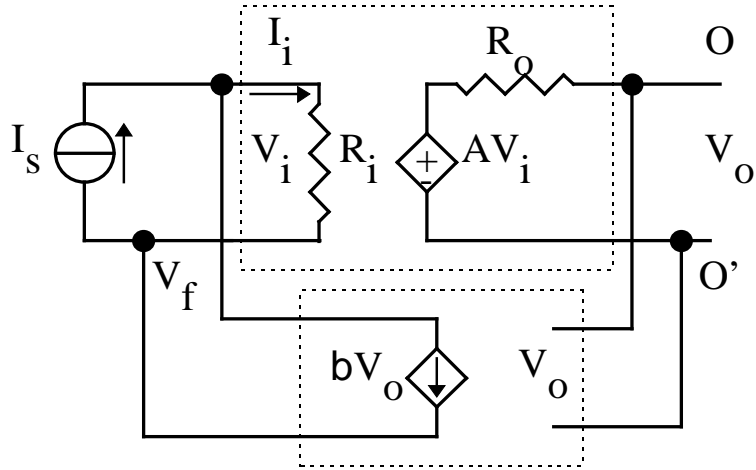
Il generatore di segnale viene schematizzato con lo schema equivalente di Norton.

In uscita si preleva una tensione con un collegamento in parallelo; in ingresso si riporta una corrente in parallelo al segnale.

Questa configurazione non solo stabilizza il guadagno, ma produce una riduzione sia di  $R_i$  che di  $R_o$ .



# Controreazione parallelo/parallelo (amplificatore di transresistenza)



Ø Resistenza di ingresso dell'amplificatore controreazionato:  $R_{if}$

$$R_{if} = \frac{R_i}{1 + Ab}$$

Ø La resistenza di ingresso viene diminuita di un fattore pari al tasso di controreazione.

Ø Resistenza di uscita  $R_{of}$  dell'amplificatore controreazionato:  $R_{of} = \frac{R_o}{1 + Ab}$

Ø La resistenza di uscita risulta diminuita di un fattore pari al tasso di controreazione.