

## RETROAZIONE

Un amplificatore è soggetto a reazione quando una parte del segnale d'uscita viene riportata in ingresso e sommato algebricamente al segnale d'ingresso.

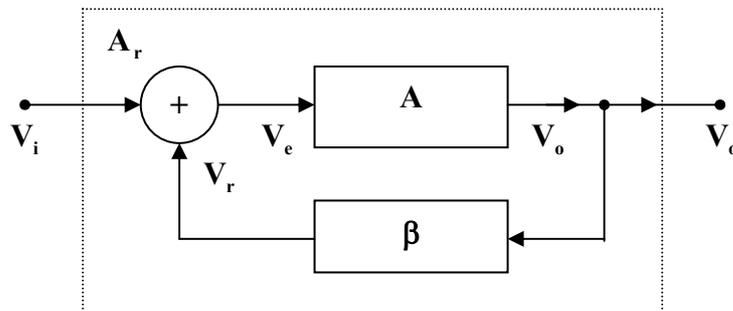
In un amplificatore retroazionato è presente una rete  $\beta$  (beta) di retroazione che riporta in ingresso una parte del segnale d'uscita.

Il segnale retroazionato si somma algebricamente al segnale d'ingresso. Se il segnale di retroazione è in fase con quello d'ingresso, si avrà la somma dei due con conseguente aumento del segnale d'ingresso: in questo caso si parla di retroazione positiva. Se il segnale di retroazione è in opposizione di fase con quello d'ingresso, si avrà la differenza dei due, con conseguente diminuzione del segnale d'ingresso: in questo caso si parla di retroazione negativa.

La reazione negativa è frequentemente utilizzata nella progettazione degli amplificatori. La perdita di guadagno che essa comporta è compensata dai significativi vantaggi che si possono ottenere. In particolare, il guadagno può essere reso praticamente indipendente dalle caratteristiche dinamiche dei componenti attivi utilizzati come amplificatore; può essere migliorata la risposta in frequenza, la distorsione del segnale d'uscita e il rapporto segnale/rumore; si possono ottenere valori ottimali per quanto riguarda la resistenza d'uscita e la resistenza d'ingresso. Quest'ultimo aspetto è legato al tipo di reazione negativa, cioè al modo con cui viene prelevato in uscita il segnale da inviare alla rete di reazione, ed al modo con cui avviene la somma tra il segnale d'ingresso e quello di reazione.

La reazione positiva è da evitarsi in tutte le applicazioni lineari, mentre si usa in quei dispositivi che devono lavorare tra le tensioni di saturazione, quali i comparatori con isteresi e gli oscillatori sinusoidali.

Lo schema a blocchi di un amplificatore retroazionato è riportato in figura.



$V_i$  = segnale d'ingresso del blocco dell'amplificatore retroazionato

$V_o$  = segnale d'uscita

$A$  = amplificatore

$\beta$  = rete di retroazione

$V_e$  = segnale d'ingresso del blocco amplificatore

$V_r$  = segnale di retroazione

$A_r$  = amplificatore retroazionato

Il cerchietto all'ingresso è un nodo sommatore in cui convergono i segnali da sommare algebricamente. Le lettere  $\beta$  e  $A$ , nei blocchi, indicano le funzioni di trasferimento della rete di reazione e dell'amplificatore non retroazionato.

### Calcolo di $A_r$

Nel determinare  $A_r$  si suppone che la rete di retroazione  $\beta$  non carichi l'uscita, cioè la tensione d'uscita  $V_o$  non cambia sia che si collega  $\beta$  sia che la si scolleghi.

Si scrivono le relazioni funzionali dei blocchi:

$$V_e = V_i + V_r \quad \Rightarrow \quad V_i = V_e - V_r \quad \text{nodo sommatore}$$

$$A = \frac{V_o}{V_e} \quad \text{blocco amplificatore non retroazionato}$$

$$\beta = \frac{V_r}{V_o} \quad \Rightarrow \quad V_r = \beta V_o \quad \text{blocco di retroazione}$$

$$A_r = \frac{V_o}{V_i} = \frac{V_o}{V_e - V_r} = \frac{\frac{V_o}{V_e}}{\frac{V_e - V_r}{V_e}} = \frac{A}{1 - \beta \frac{V_o}{V_e}} = \frac{A}{1 - \beta A}$$

Supponendo che  $A$  e  $\beta$  siano f.d.t. reali, si ha:

$$- \text{ Se } \begin{cases} \beta, A > 0 \\ \beta, A < 0 \end{cases} \Rightarrow \beta A > 0 \Rightarrow V_i \text{ e } V_r \text{ sono in fase} \Rightarrow |1 - \beta A| > 1 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow A_r > A \quad \text{retroazione positiva}$$

$$- \text{ Se } \beta A = 1 \Rightarrow A_r = \frac{A}{1 - \beta A} \rightarrow \infty \quad \text{condizione usata per gli oscillatori sinusoidali}$$

$$- \text{ Se } \begin{cases} \beta > 0 \text{ e } A < 0 \\ \beta < 0 \text{ e } A > 0 \end{cases} \Rightarrow \beta A < 0 \Rightarrow V_i \text{ e } V_r \text{ sono in opposizione di}$$

$$\text{fase} \Rightarrow |1 - \beta A| < 1 \Rightarrow A_r < A \quad \text{retroazione negativa}$$

Nel caso risulti  $\beta A \gg 1$ , nel denominatore dell'espressione di  $A_r$  può essere trascurato 1 rispetto al prodotto  $\beta A$ :

$$\beta A \gg 1 \Rightarrow A_r = \frac{A}{1 - \beta A} \cong -\frac{1}{\beta}$$

In tale condizione il funzionamento dell'amplificatore retroazionato, ossia la sua f.d.t, dipende dalla sola rete beta di retroazione, che è una rete passiva, e non dipende più dall'amplificatore. La condizione  $\beta A \gg 1$  si ottiene utilizzando amplificatori con elevata amplificazione, quali gli amplificatori operazionali.

### Proprietà della retroazione negativa

#### Stabilità dell'amplificazione ad anello chiuso

Fissata l'ampiezza della tensione d'ingresso, un aumento di amplificazione  $A$ , supposto costante  $\beta$ , produce un aumento del guadagno d'anello  $\beta A$ , con conseguente riduzione del segnale d'ingresso del blocco  $A$ , che tende a ridurre l'aumento del segnale d'uscita, ossia compensa automaticamente, in buona parte, le variazioni del segnale d'uscita per variazioni di  $A$ .

Una quantizzazione del miglioramento della stabilità dell'amplificazione si ottiene confrontando le variazioni relative dell'amplificazione con e senza retroazione.

Indicando con  $\frac{dA}{A}$  la variazione relativa dell'amplificazione senza retroazione e con

$\frac{dA_r}{A_r}$  la variazione relativa dell'amplificazione con retroazione, si ha:

$$A_r = \frac{A}{1 - \beta A} \Rightarrow dA_r = \frac{1 - \beta A + \beta A}{(1 - \beta A)^2} \cdot dA = \frac{1}{(1 - \beta A)^2} \cdot dA$$

dividendo  $dA_r$  per  $A_r$  e  $\frac{1}{(1 - \beta A)^2} \cdot dA$  per  $\frac{A}{1 - \beta A}$ , si ha:

$$\frac{dA_r}{A_r} = \frac{1 - \beta A}{A} \cdot \frac{1}{(1 - \beta A)^2} \cdot dA = \frac{1}{1 - \beta A} \cdot \frac{dA}{A}$$

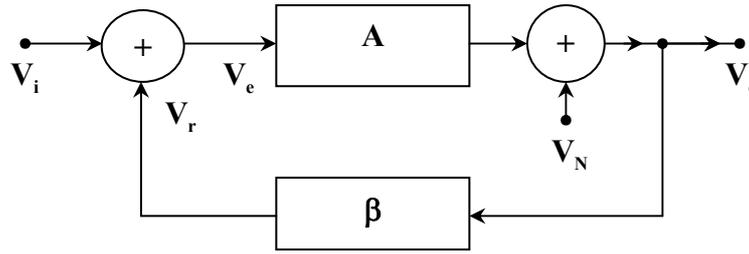
Alle frequenze di centro banda, essendo  $1 - \beta A > 1$ , risulta  $\frac{dA_r}{A_r} < \frac{dA}{A}$ , ossia la stabilità dell'amplificazione migliora in presenza di retroazione negativa.

#### Aumento del rapporto segnale/rumore

I rumori (noise) o disturbi, tensioni indesiderate di frequenza elevata che si sovrappongono al segnale utile, possono essere prodotti da cause esterne all'amplificatore (campi elettromagnetici, ripple dell'alimentazione) oppure internamente all'amplificatore (derive termiche, rumore dei componenti).

Una misura del corretto funzionamento dell'amplificatore relativamente alla presenza di rumore viene data dal **rapporto segnale/rumore (S/N)** espresso in dB. Tanto più alto risulta questo rapporto, tanto migliore sarà il funzionamento dell'amplificatore.

Consideriamo il caso di un disturbo  $V_N$  che nasce all'uscita dell'amplificatore  $A$ , come in figura.



In assenza di retroazione,  $V_r = 0$  e  $V_e = V_i$ , si ha:

$$V_o = AV_e + V_N = AV_i + V_N \Rightarrow \frac{S}{N} = \frac{AV_i}{V_N}$$

dove  $AV_i$  è il segnale utile e  $V_N$  è il segnale di rumore.

In presenza di retroazione, si ha:

$$\begin{aligned} V_o &= AV_e + V_N = A(V_i + V_r) + V_N = A(V_i + \beta V_o) + V_N \Rightarrow \\ \Rightarrow V_o - A\beta V_o &= AV_i + V_N \Rightarrow V_o = \frac{AV_i}{1 - A\beta} + \frac{V_N}{1 - A\beta} \end{aligned}$$

Poiché  $\frac{AV_i}{1 - A\beta}$  rappresenta il segnale utile e  $\frac{V_N}{1 - A\beta}$  il segnale di rumore, si ha:

$$\frac{S}{N} = \frac{AV_i}{V_N}$$

Il rapporto segnale/rumore senza e con retroazione resta invariato (a parità di segnale d'ingresso). Il segnale d'uscita, rispetto al caso senza retroazione, risulta ridotto di un fattore  $1 - A\beta$ . Se invece si mantiene inalterata l'ampiezza del segnale d'uscita (a parità di segnale d'uscita), aumentando il segnale d'ingresso di  $1 - A\beta$  volte, si ha:

$$\begin{aligned} V_o &= AV_e + V_N = A[V_i(1 - A\beta) + V_r] + V_N = A[V_i(1 - A\beta) + \beta V_o] + V_N \Rightarrow \\ \Rightarrow V_o - A\beta V_o &= AV_i(1 - A\beta) + V_N \Rightarrow V_o = AV_i + \frac{V_N}{1 - A\beta} \end{aligned}$$

Poiché  $AV_i$  rappresenta il segnale utile e  $\frac{V_N}{1 - A\beta}$  il segnale di rumore, si ha:

$$\frac{S}{N} = \frac{AV_i}{V_N}(1 - A\beta)$$

a parità di segnale d'uscita il rapporto segnale/rumore, con retroazione negativa, migliora di un fattore  $1 - A\beta$ .

### Riduzione della distorsione armonica

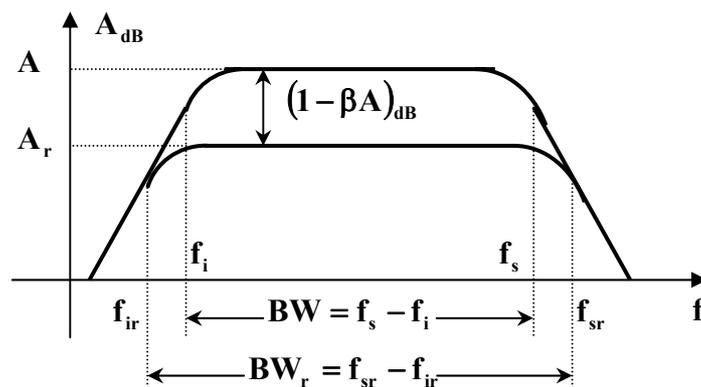
Si ha distorsione armonica del segnale d'uscita quando vengono interessate zone di funzionamento non lineari dei dispositivi amplificatori. In tale caso si ha una distorsione di ampiezza del segnale d'uscita. Un segnale sinusoidale distorto in ampiezza è sviluppabile in serie di Fourier, il cui primo termine è un segnale sinusoidale non distorto della stessa frequenza (fondamentale) più termini sinusoidali (armoniche) di frequenza doppia, tripla, ecc., della fondamentale. Tali armoniche di ordine superiore al primo possono essere viste come segnali di rumore che si sovrappongono a quello d'uscita (armonica del primo ordine). Pertanto, così come la retroazione negativa riduce a parità di segnale d'uscita il rumore di un fattore  $1 - A\beta$ , allo stesso modo sono ridotte le armoniche di ordine superiore al primo componenti il segnale distorto.

### Banda passante

Il prodotto banda-guadagno, noto come **frequenza di transizione**  $f_T$ , è una figura di merito per l'amplificatore, ossia tale prodotto è costante sia in assenza di retroazione negativa sia in presenza di retroazione negativa:

$$A_r \cdot BW_r = \frac{A}{1 - \beta A} \cdot BW(1 - \beta A) = A \cdot BW$$

In particolare, la frequenza di taglio inferiore si riduce di un fattore  $1 - A\beta$ , la frequenza di taglio superiore aumenta di un fattore  $1 - A\beta$ .

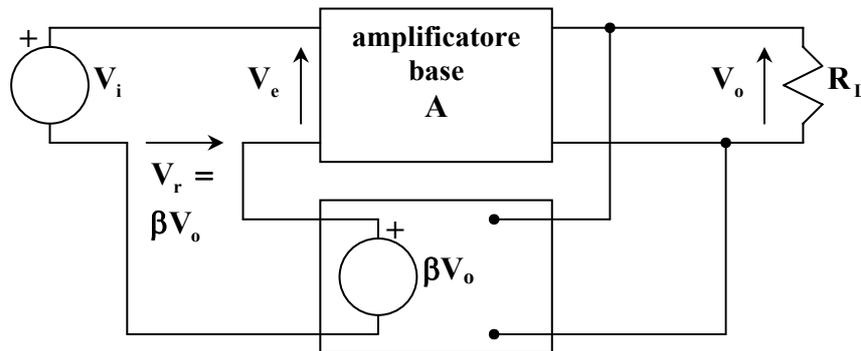


$$f_{ir} = \frac{f_i}{1 - \beta A} \quad ; \quad f_{sr} = f_s \cdot (1 - \beta A)$$

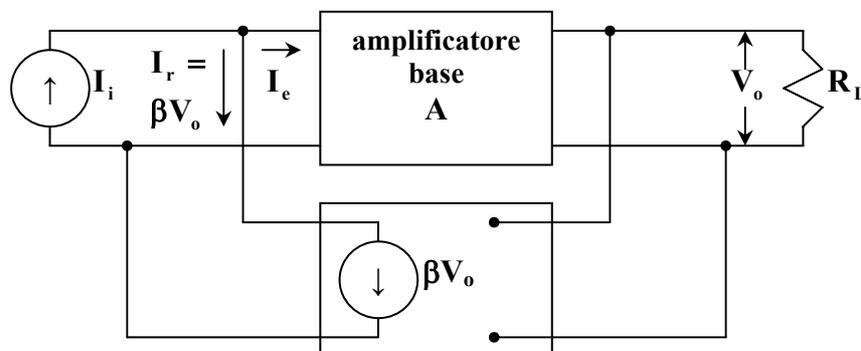
## Tipi di retroazione

Le modalità di collegamento della rete di retroazione con l'amplificatore base sono in diretta relazione col tipo di grandezza prelevata e confrontata.

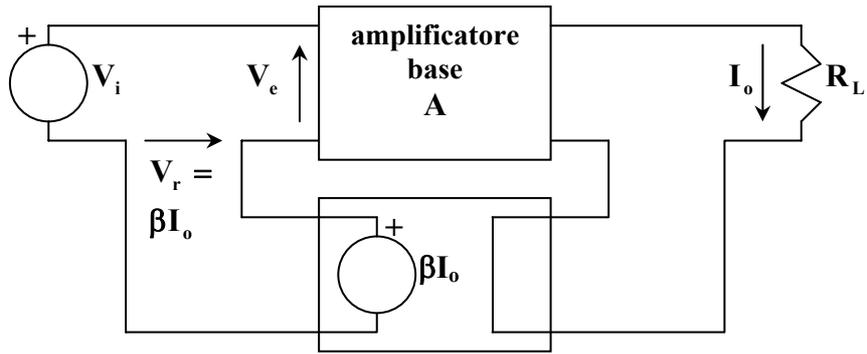
- Se la grandezza prelevata all'uscita dell'amplificatore è la **tensione**  $V_o$  presente ai capi del carico  $R_L$ , la **reazione** viene detta **di tensione**, ovvero, il quadripolo di reazione è collegato in **parallelo** all'uscita dell'amplificatore base. Se, invece, la grandezza prelevata all'uscita dell'amplificatore è la **corrente**  $I_o$  in  $R_L$ , la **reazione** viene detta **di corrente**, ovvero, il quadripolo di reazione è collegato in **serie** all'uscita dell'amplificatore base.
- Se il confronto dei segnali d'ingresso avviene sotto forma di differenza tra tensioni,  $V_i$  e  $V_r$ , il circuito d'uscita del quadripolo di reazione e quello d'ingresso dell'amplificatore base sono posti **in serie**, realizzando una maglia che include anche la sorgente ideale di segnale  $V_i$ . Se il confronto dei segnali d'ingresso avviene sotto forma di differenza tra correnti,  $I_i$  e  $I_r$ , il circuito d'uscita del quadripolo di reazione e quello d'ingresso dell'amplificatore base convergono ad un nodo dove confluiscono le correnti  $I_i$  e  $I_r$ , in tale caso il collegamento tra il circuito d'uscita del quadripolo di reazione e quello d'ingresso dell'amplificatore base è di tipo **parallelo**.



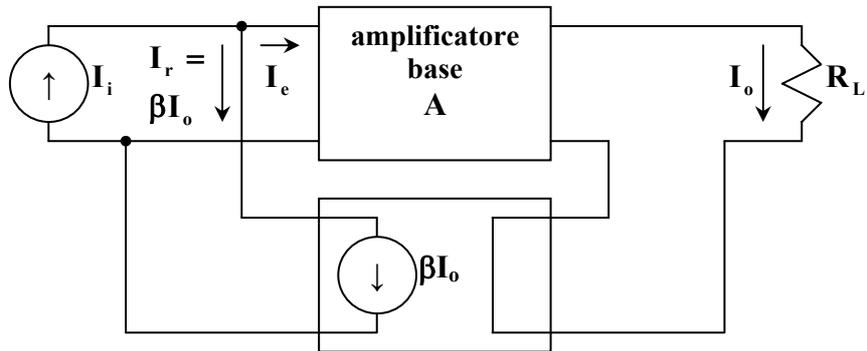
Controreazione di tensione-serie



Controreazione di tensione-parallelo



Controreazione di corrente-serie



Controreazione di corrente-parallelo

Tipo di reazione	Grandezza controllata	Grandezza di reazione	f.d.t. di $A$	f.d.t. di $\beta$	f.d.t. di $A_r$	$R_{ir}$	$R_{or}$
Tensione-serie	Tensione	Tensione	$A_v = \frac{V_o}{V_e}$	$\frac{V_r}{V_o}$	$A_{rv} = \frac{V_o}{V_i} = \frac{A_v}{1 - \beta A_v}$	$R_i(1 - \beta A_v)$	$\frac{R_o}{1 - \beta A_v}$
Tensione-parallelo	Tensione	Corrente	$A_R = \frac{V_o}{I_e}$	$\frac{I_r}{V_o}$	$A_{rR} = \frac{V_o}{I_i} = \frac{A_R}{1 - \beta A_R}$	$\frac{R_i}{1 - \beta A_R}$	$\frac{R_o}{1 - \beta A_R}$
Corrente-serie	Corrente	Tensione	$A_G = \frac{I_o}{V_e}$	$\frac{V_r}{I_o}$	$A_{rG} = \frac{I_o}{V_i} = \frac{A_G}{1 - \beta A_G}$	$R_i(1 - \beta A_G)$	$R_o(1 - \beta A_G)$
Corrente-parallelo	Corrente	Corrente	$A_I = \frac{I_o}{I_e}$	$\frac{I_r}{I_o}$	$A_{rI} = \frac{I_o}{I_i} = \frac{A_I}{1 - \beta A_I}$	$\frac{R_i}{1 - \beta A_I}$	$R_o(1 - \beta A_I)$