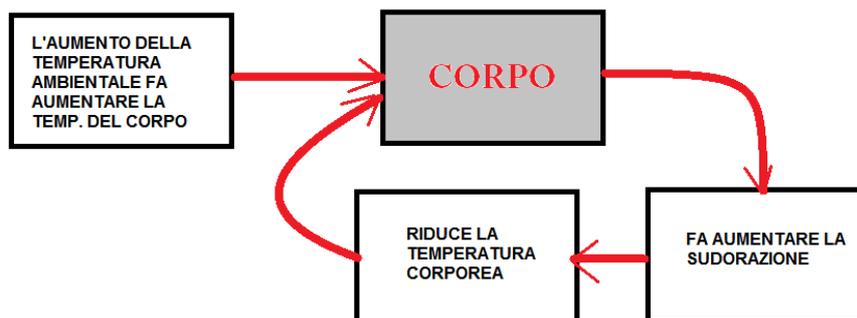


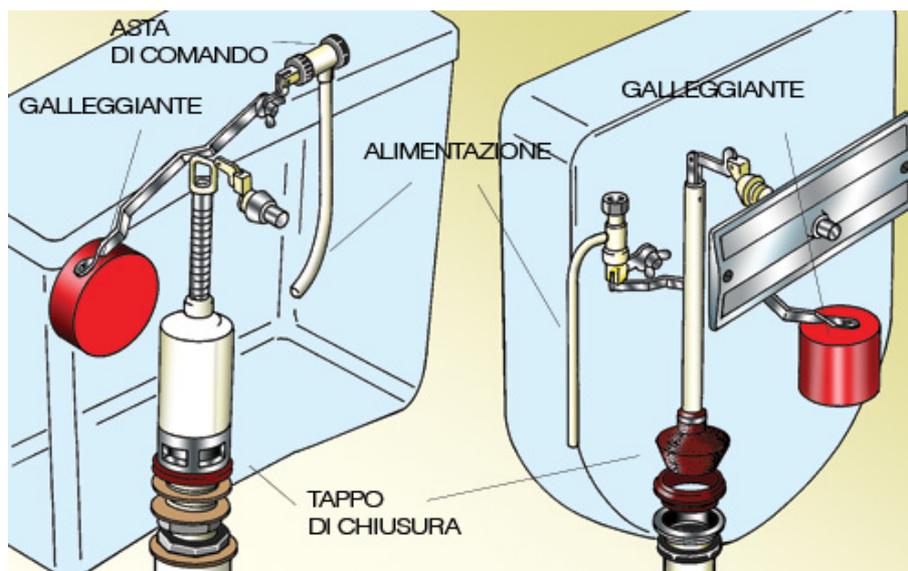
## Semplici esempi di retroazione negativa

In generale si parla di **retroazione negativa** (*negative feedback*) quando in un sistema il segnale di uscita agisce all'indietro (*retroagisce*) sottraendosi parzialmente al segnale di ingresso e contrastando gli effetti di quest'ultimo.

Vi sono molti esempi in natura, nella fisiologia umana e nelle applicazioni tecnologiche che possono essere facilmente descritti con il meccanismo della retroazione negativa. Per esempio la *sudorazione* controlla la temperatura del corpo in questo modo: quando la temperatura ambientale aumenta, aumenta anche la temperatura del corpo e questo produce sudorazione; tuttavia il sudore, evaporando, fa abbassare la temperatura corporea. Dunque l'aumento della temperatura ambientale provoca una contro-azione da parte del sistema che contrasta tale aumento:

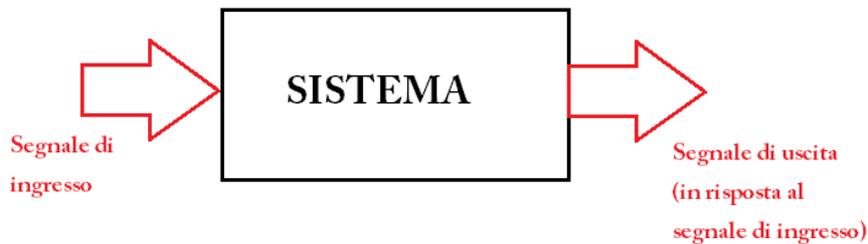


Un altro semplice esempio è il meccanismo per il controllo del livello dell'acqua nella vasca dello sciacquone del water. In questo caso l'aumento del livello del liquido nella vasca provoca il sollevamento del galleggiante, il quale a sua volta agisce su una valvola chiudendo l'afflusso di acqua:



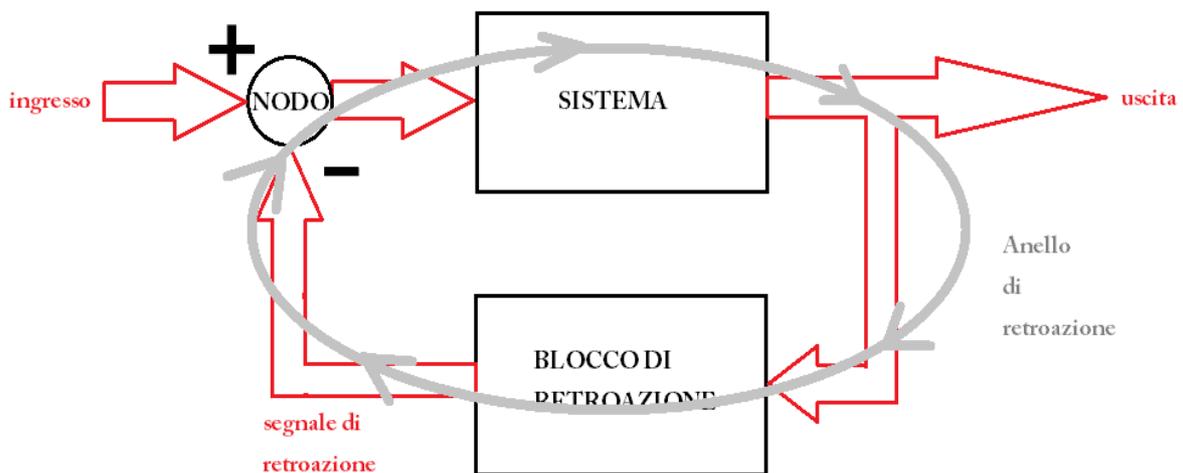
## Anello di retroazione

La presenza di una retroazione negativa inverte il normale flusso di segnali e di informazioni in un sistema, capovolgendo in un certo senso anche il rapporto di causa - effetto. Infatti normalmente in un sistema l'ingresso agisce sull'uscita (rapporto di causa ed effetto). Questo tipo di relazione viene detta *feedforward*, che è appunto il contrario del *feedback*. Un semplice esempio di feedforward è un amplificatore dove la tensione di uscita dipende dalla tensione di ingresso.



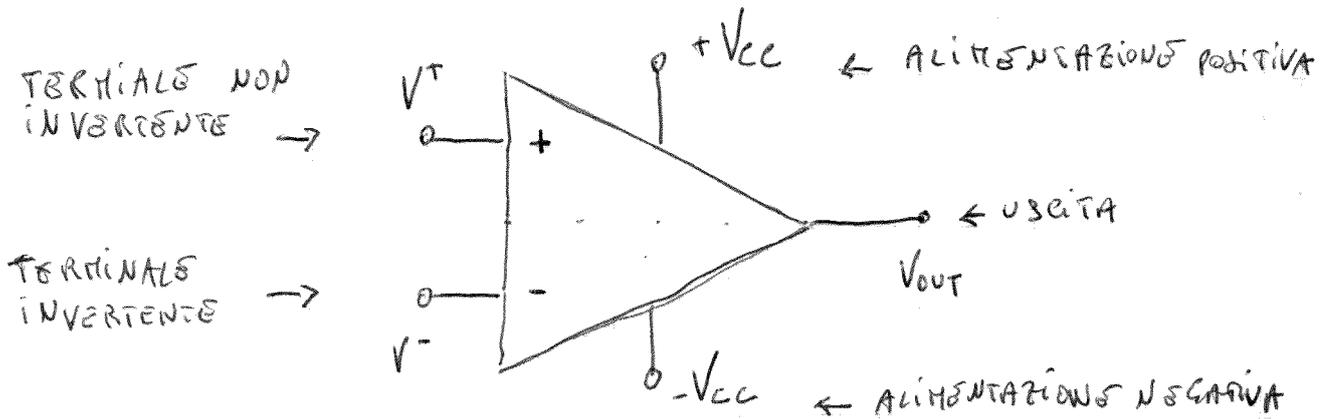
In un sistema con retroazione negativa la situazione può invece essere schematizzata così:

Discuteremo in seguito i dettagli di questo schema. Per adesso si osservi la presenza di un **anello chiuso di retroazione** (*feedback closed loop*), cioè di un percorso circolare (ad anello) chiuso che dall'ingresso va all'uscita e quindi torna verso l'ingresso:



Si osservi anche l'apparente paradosso dell'uscita che dipende dall'ingresso, il quale però a sua volta dipende dall'uscita, in un circolo infinito di retroazione.

# AMPLIFICATORE OPERAZIONALE



## CARATTERISTICHE

### IDEALE

$$A_{dF} = \infty ; A_S = 0$$

$$R_{in} = \infty$$

$$I^+ = I^- = 0$$

$$R_{out} = 0$$

### REALE

$$A_{dF} = 200'000 \quad (\text{minimo})$$

$$R_{in} = 1 \text{ M}\Omega \quad (\text{minimo})$$

$$I^+, I^- \approx \text{mA}$$

$$R_{out} = 50 \Omega \quad (\text{massimo})$$

$A_d$  Amplificazione differenziale

$A_S$  Amplificazione di modo comune

$V_d = V^+ - V^-$  Tensione di ingresso differenziale

$V_S = (V^+ + V^-) / 2$  Tensione di ingresso di modo comune

$$V_{OUT} = A_d V_d + A_S V_S \rightarrow \text{nel caso ideale } \underline{V_{OUT} = A_d V_d}$$

$R_{in}$   $\equiv$  Resistenza di ingresso (tra + e -)

$R_{out}$   $\equiv$  Resistenza di uscita (tra out e Massa)

$I^+, I^-$   $\equiv$  Correnti di polarizzazione (entrambi rispettivamente nei terminali + e -)

## MASSA VIRTUALE (SOLO NOZ CASO DI RETROAZIONE NEGATIVA)

La  $V_{out}$  può variare nei limiti dettati dall'alimentazione

$$V_{out} \in (-V_{ee}, V_{ee})$$

Si come  $V_{out} = V_d \quad A_{ol} = A_{ol} (V^+ - V^-)$  ovvero

$$V^+ - V^- = \frac{V_{out}}{A_{ol}} \quad \text{se } A_{ol} \rightarrow \infty \quad \text{allora}$$

$$V^+ - V^- = 0 \quad \text{cioè } V^- = V^+$$

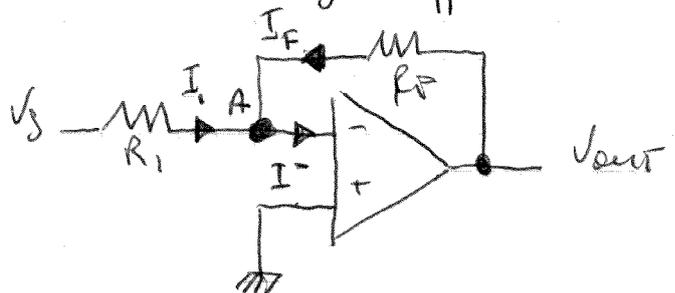
cioè i terminali + e - sono virtualmente cortocircuitati (hanno lo stesso potenziale) anche se fra i due c'è una resistenza idealmente infinita.

## APPLICAZIONI LINEARI (CON RETROAZIONE NEGATIVA)

### 1) AMPLIFICATORE INVERTENTE

È invertente perché l'uscita ha segno opposto rispetto all'ingresso

- di uso più frequente
- della massa virtuale
- di Kirchhoff



$$I_1 = \frac{V_S - V^-}{R_1} = \frac{V_S - V^+}{R_1} = \frac{V_S}{R_1} \quad ; \quad I_F = \frac{V_{out} - V^-}{R_F} = \frac{V_{out} - V^+}{R_F} = \frac{V_{out}}{R_F}$$

$$I_1 + I_F = I^- = 0 \quad \Rightarrow \quad I_F = -I_1 \quad \text{quindi}$$

$$\frac{V_{out}}{R_F} = -\frac{V_S}{R_1} \quad \Rightarrow \quad V_{out} = -\frac{R_F}{R_1} V_S$$

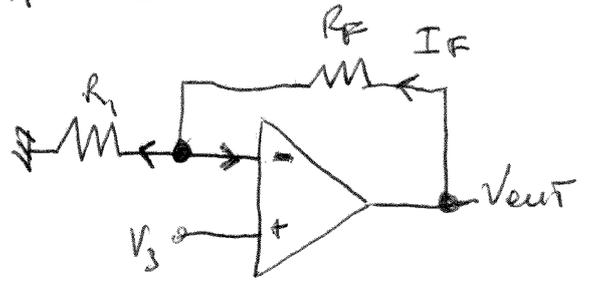
4) Amplificatore con guadagno non invertente

de  $I^- = 0$

$I_F = I_1 = \frac{V_{out}}{R_1 + R_F}$  quindi:

$V^- = R_1 I_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_F} V_{out},$  ma:

$V^- = V^+ = V_3$  quindi  $V_3 = \frac{R_1}{R_1 + R_F} V_{out} \Rightarrow V_{out} = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) V_3$



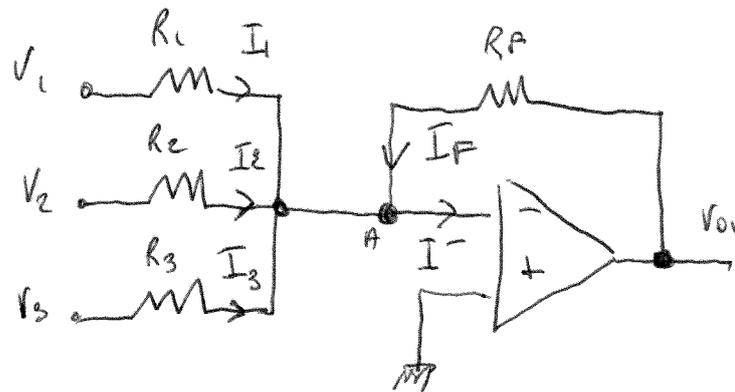
3) SOMMATORE INVERTENTE

$I_F = \frac{V_{out} - V^-}{R_F} = \dots = \frac{V_{out}}{R_F}$

$I_1 = \frac{V_1 - V^-}{R_1} = \dots = \frac{V_1}{R_1}$

$I_2 = \frac{V_2 - V^-}{R_2} = \dots = \frac{V_2}{R_2}$

$I_3 = \frac{V_3 - V^-}{R_3} = \dots = \frac{V_3}{R_3}$



$I_1 + I_2 + I_3 + I_F = I^- = 0$

(Kirchhoff al Nodo A) quindi:

$I_F = - (I_1 + I_2 + I_3)$

stituendo:

$\frac{V_{out}}{R_F} = - \left( \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} \right) \Rightarrow$

$V_{out} = -R_F \left( \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} \right)$

de  $R_1 = R_2 = R_3 \Rightarrow$

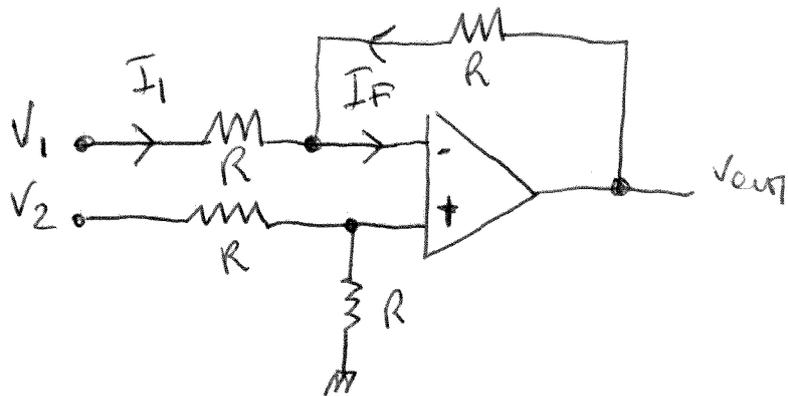
$V_{out} = -\frac{R_F}{R} (V_1 + V_2 + V_3)$

#### 4) DIFFERENZIALE

$$V^+ = \left( \frac{R}{R+R} \right) V_2 = \frac{V_2}{2}$$

$$I_1 = \frac{V_1 - V^-}{R} = \frac{V_1 - V^+}{R}$$

$$I_F = \frac{V_{out} - V^+}{R} = \frac{V_{out} - V^+}{R}$$



$$I_1 + I_F = I^- = 0 \quad \Rightarrow \quad I_F = -I_1 \quad \text{sostituendo:}$$

$$\frac{V_{out} - V^+}{R} = - \frac{V_1 - V^+}{R} \quad \text{sostituendo } V^+$$

$$V_{out} - \frac{V_2}{2} = -V_1 + \frac{V_2}{2} \quad \Rightarrow \quad V_{out} = -V_1 + V_2 = -(V_2 - V_1)$$

#### 5) DERIVATORE INVERTENTE

Il condensatore è un componente elettrico che immagazzina le cariche elettriche la cui relazione costitutiva è:

$$Q = C V_c$$

con  $Q$  = carica elettrica immagazzinata

$V_c$  = Tensione elettrica ai capi del condensatore

$C$  = capacità elettrica

Per definizione la corrente elettrica è la quantità di carica che fluisce attraverso una sezione trasversale che determina del flusso di elettroni

nell'unità di tempo quindi  $i = \frac{dQ}{dt}$  che per il condensatore diventa:

$$i_c = \frac{dQ}{dt} = C \frac{dV_c}{dt}$$

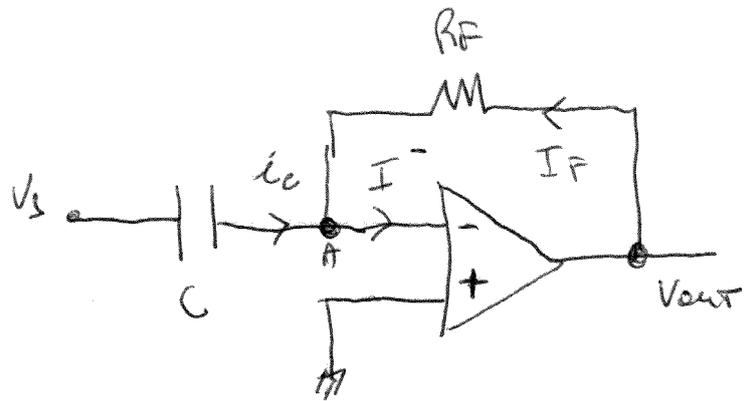
$$i_c = C \frac{d\{V_s - V^-\}}{dt} = \dots$$

$$= C \frac{dV_s}{dt}$$

$$i_F = \frac{V_{out} - V^-}{R_F} = \dots = \frac{V_{out}}{R_F}, \text{ Applicando Kirchhoff in A}$$

$$i_F + i_c = I^- = 0 \Rightarrow \text{quindi } i_F = -i_c, \text{ sostituendo}$$

$$\frac{V_{out}}{R_F} = -C \frac{dV_s}{dt} \Rightarrow V_{out} = R_F \cdot C \frac{dV_s}{dt}$$



## 6) CONVERTITORE TENSIONE - CORRENTE

La caratteristica di un convertitore  $V/I$  è quella di "Breve" sulla Resistenza di carico un valore della corrente che non dipende dal valore della Resistenza stessa. (vedi circuito dell'esercizio precedente NON in vertente),

Il valore della corrente su  $R_F$  è

$$i_F = -i_1 = -\frac{V_s}{R_1}$$

Tale valore dipende da  $V_s$ , da  $R_1$  ma non da  $R_F$

## 7) Convertitore corrente / Tensione

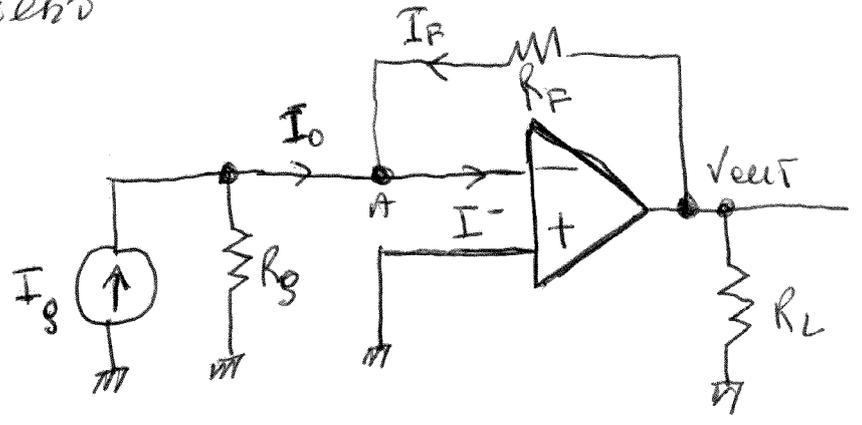
La caratteristica del convertitore I/V è quella di "Creare" una tensione sul carico indipendente dal valore del carico stesso

$$I_F = \frac{V_{out} - V^-}{R_F} = \dots = \frac{V_{out}}{R_F}$$

$$I_0 + I_F - I^- = 0$$

$$I_F = -I_0$$

$$\frac{V_{out}}{R_F} = -I_0 \Rightarrow V_{out} = -R_F I_0 \quad (\text{indipendente da } R_L)$$



## APPLICAZIONI NON LINEARI

(senza retroazione o con retroazione positiva)

### 1) COMPARATORE

serve per confrontare una tensione con un valore di riferimento.

NON si può applicare il principio della cassa virtuale e quindi  $V^+ \neq V^-$

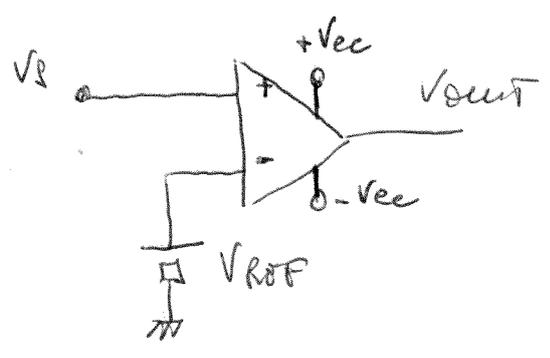
se  $V_S > V_{REF}$  allora

$V_d \bar{e} > 0$  essendo  $A_d \rightarrow \infty$

la  $V_{out}$  vale  $+V_{cc}$

se  $V_S < V_{REF}$  allora  $V_d \bar{e} < 0$

e la  $V_{out}$  vale  $-V_{cc}$



Questo tipo di circuito presenta il problema che un pur piccolo variazione di  $V_S$  nei dintorni di  $V_{REF}$  provoca una commutazione della  $V_{out}$  da  $+V_{cc}$  a  $-V_{cc}$  e viceversa (anche un pur piccolo valore di Rumore presente sulla  $V_S$  può portare ad una commutazione non voluta), per questo molte volte si usa il:

## 2) Comparatore con Isteresi

Il comparatore con Isteresi presenta un intervallo "proibito", infatti se la  $V_S$  varia all'interno di questo intervallo la  $V_{out}$  non cambia

- se  $V_{out} = -V_{cc}$

la tensione nel punto A vale:

$$V_A^- = -\frac{V_{cc} R_2}{R_1 + R_2} + \frac{V_{REF} R_1}{R_1 + R_2}$$

la  $V_{out}$  resta a  $-V_{cc}$  fin quando la  $V_S$  non diventa più piccola di  $V_A^-$

- se  $V_{out} = +V_{cc}$

$$V_A^+ = \frac{V_{cc} R_2}{R_1 + R_2} + \frac{V_{REF} R_1}{R_1 + R_2}$$

la  $V_{out}$  resta a  $+V_{cc}$  finché la  $V_S$  non diventa più grande di  $V_A^+$

