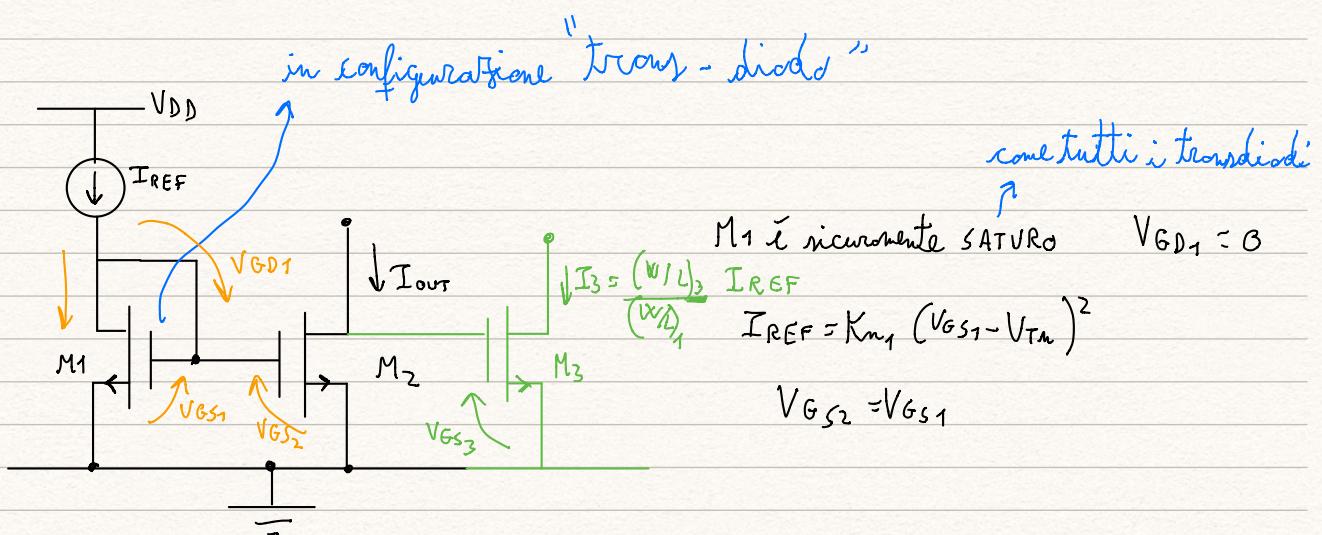


SPECCHI DI CORRENTE E STADIO DIFFERENZIALE CON CARICO A SPECCHIO:

WB:



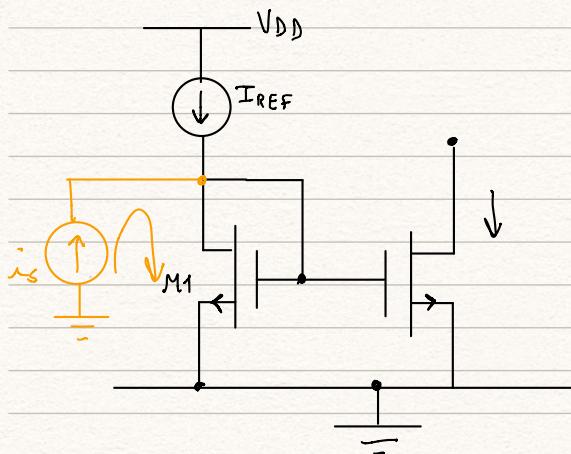
Hp: M₂ sia SATURATO

$$I_{out} = K_{n2} (V_{GS2} - V_{Trn})^2 = K_{n2} (V_{GS1} - V_{Trn})^2 \approx \frac{K_{n2}}{K_{n1}} I_{REF} = \frac{1/2 \mu n C_{ox} (\frac{W}{L})_2}{1/2 \mu n C_{ox} (\frac{W}{L})_1} I_{REF}$$

$= \frac{(\frac{W}{L})_2}{(\frac{W}{L})_1} \cdot I_{REF}$

\rightarrow la corrente in ingresso è ex specchiata in uscita, proporzionale al rapporto delle $\frac{W}{L}$ dei transistor

SU SEGNALE



$$V_{gr1} = i_s / g_{m1}$$

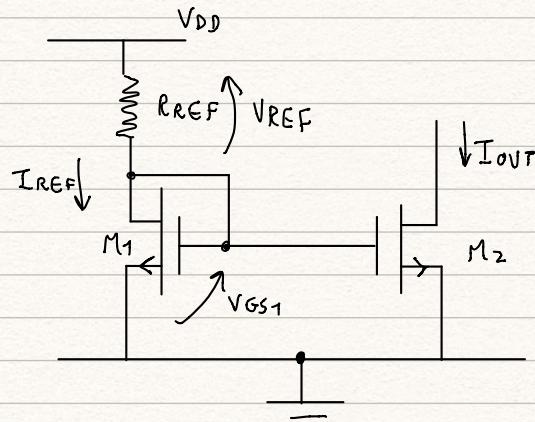
$$V_{gr2} = V_{gr1}$$

$$i_{out} = g_{m2} V_{gr2} - g_{m2} V_{GS1} = \frac{g_{m2}}{g_{m1}} i_s =$$

$$= \frac{2K_{n2} (V_{GS2} - V_{Trn})}{2K_{n1} (V_{GS1} - V_{Trn})} i_s = \frac{K_{n2}}{K_{n1}} i_s = \frac{1/2 \mu n C_{ox} (\frac{W}{L})_2}{1/2 \mu n C_{ox} (\frac{W}{L})_1} i_s$$

i_s corrente di piccolo segnale

$$= \frac{(\frac{W}{L})_2}{(\frac{W}{L})_1} i_s$$

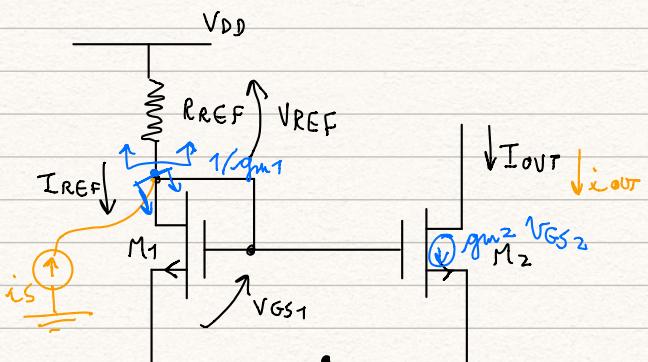


$$\left\{ \begin{array}{l} I_{REF} = K_m V_{GS1} (V_{GS1} - V_{TH})^2 \\ V_{DD} = I_{REF} R_{REF} + V_{GS1} \end{array} \right.$$

Magnolia:

modo A portazione di corrente

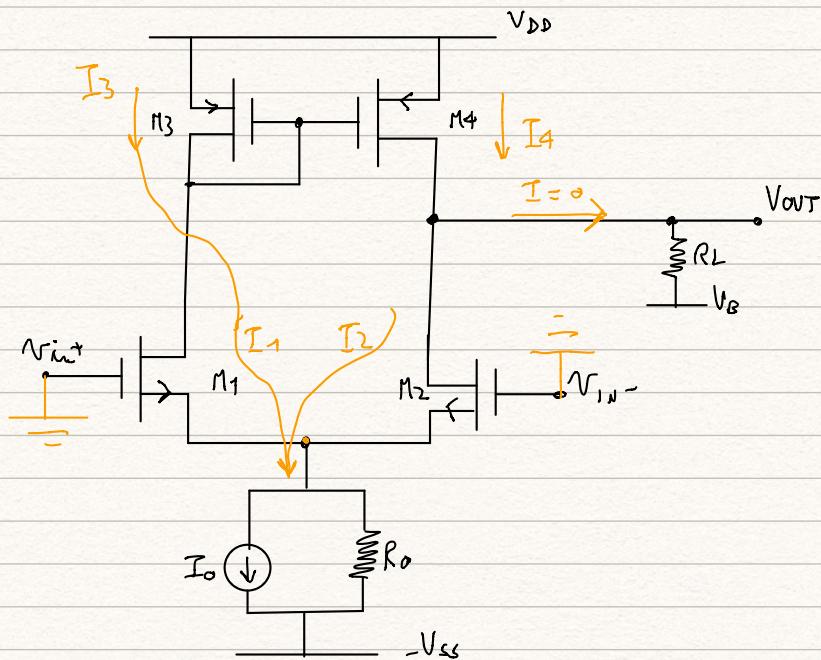
$$i_{N_1} = \frac{R_{REF}}{R_{REF} + 1/g_{m1}} j_s$$



$$i_{out} = g_{m2} V_{GS2} = g_{m2} V_{GS1} = \frac{g_{m2} i_{M1}}{g_{m1}} = \frac{(W/L)_2}{(W/L)_1} \cdot \frac{1}{\frac{R_{REF}}{R_{REF} + 1/g_{m1}}} \text{ is}$$

FATTORE DI SPECCHIAMENTO

STADIO DIFFERENZIALE CON CARICO A SPECCHIO:



M_1, M_2 coppia differenziale

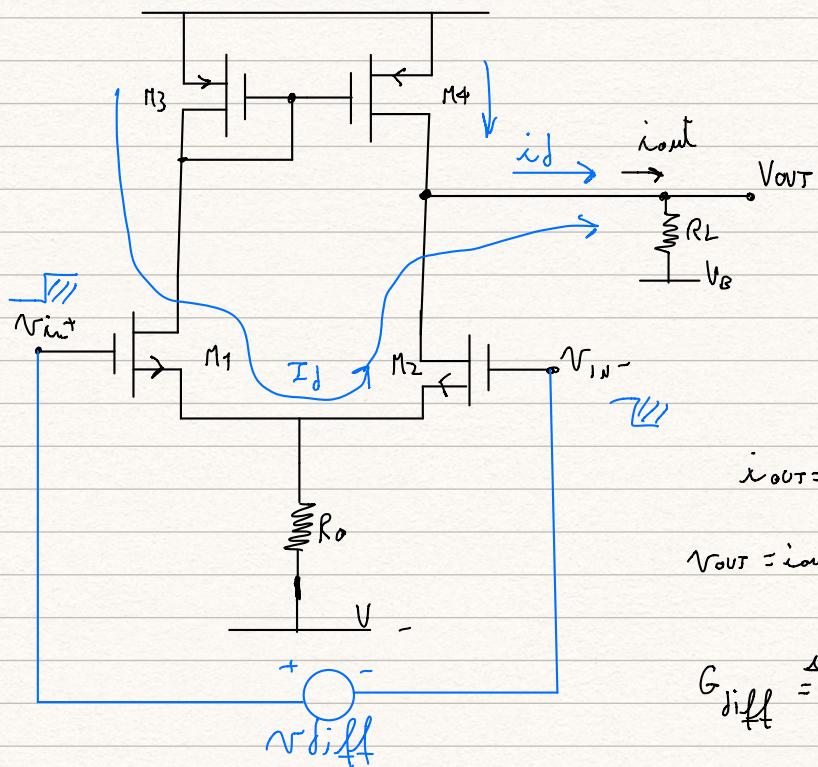
M₃, M₄ corico a specchio

(A) POLARIZZAZIONE (-)

$$I_3 = I_1 = I_4 = I_2 \rightarrow I = 0 ; V_{out} = V_B$$

dove I_2 e I_4 sono neri

(B) SEGNALI DIFFERENZIALE



$$i_d = \frac{V_{diff}}{\frac{1}{g_m1} + \frac{1}{g_m2}} = \frac{V_{diff}}{2/g_m}$$

$$i_{out} = i_d + i_d = 2i_d$$

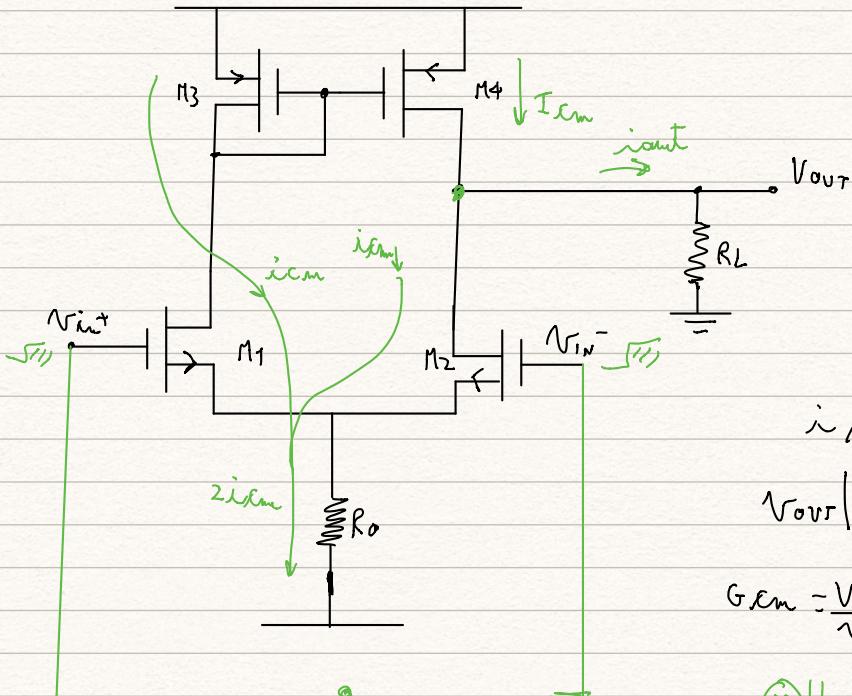
$$V_{out} = i_{out} R_L = 2i_d R_L = 2 \sqrt{g_m R_L}$$

$$G_{diff} = \frac{V_{out}}{V_{diff}} = g_m R_L$$

😊 $G_{diff} = g_m R_L$ per uscita single ended

(guadagno un fattore 2 rispetto alla condizione di corico resistivo!)

(C) SEGNALE DI MODO COMUNE



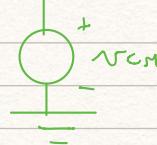
bilancio di corrente al modo di uscita

$$i_{cm} = i_{cm} + i_{out} \rightarrow i_{out} = 0 !!!$$

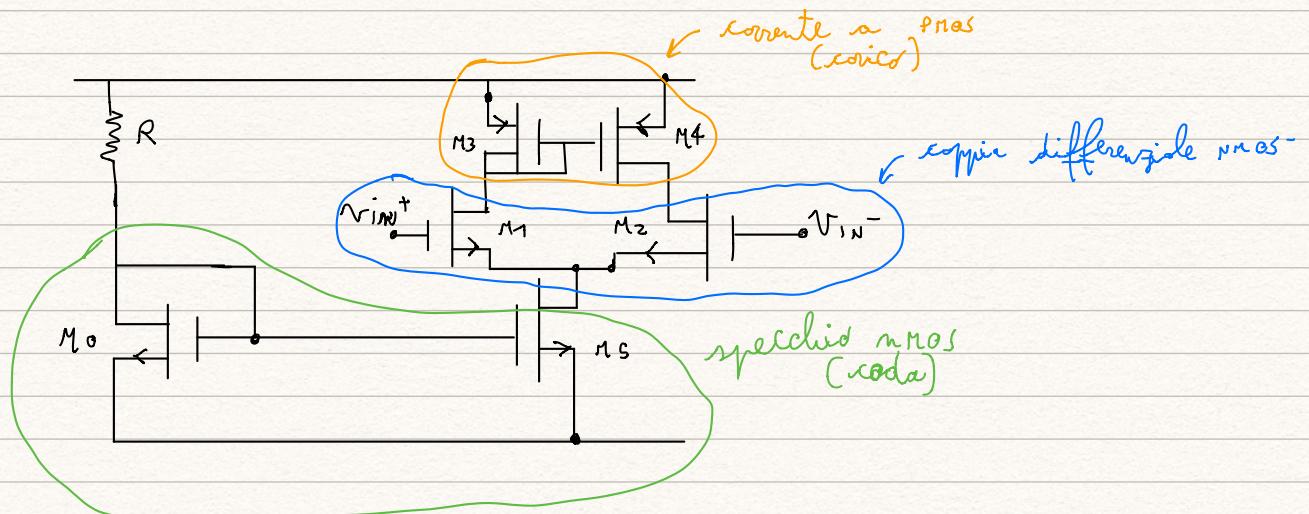
$$\left. V_{out} \right|_{cm} = 0$$

$$G_{cm} = \frac{V_{out}}{V_{cm}} = 0 \rightarrow CMRR = \left| \frac{G_{diff}}{G_{cm}} \right| = \infty$$

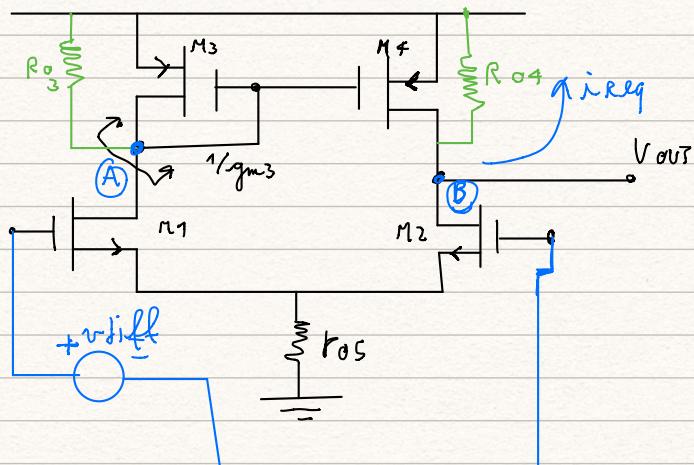
😊!! $G_{cm} = 0$ e $CMRR = \infty$!!



nella realtà uno studio differenziale con corico o specchio è fatto così:



su regole:



regole differenziali

$$i_d = \frac{v_{diff}}{1/gm_1 + 1/gm_3}$$

$$i_3 = \frac{R_o3}{R_o3 + 1/gm_3} i_d \quad (\text{partitione di corrente al nodo})$$

$$i_4 = i_3$$

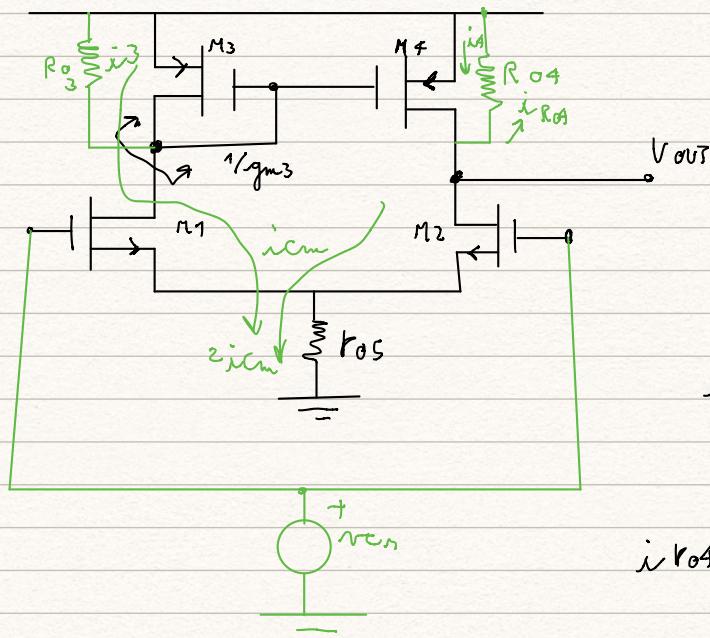
bilancio di corrente al nodo (B)

$$i_{ro4} = i_4 + i_8 = \frac{R_o3}{R_o3 + 1/gm_3} i_d + i_f = i_f \left[1 + \frac{R_o3}{R_o3 + 1/gm_3} \right]$$

(tende a 2 se $R_o3 \rightarrow \infty$)

$$V_{out} = i_{ro4} \cdot R_o4$$

regole di modo comune



$$i_Q = i_3 = i_{COM} \frac{R_03}{R_03 + 1/gm_3}$$

bilancio di corrente in uscita:

$$i_4 = i_{COM} + i_{R04}$$

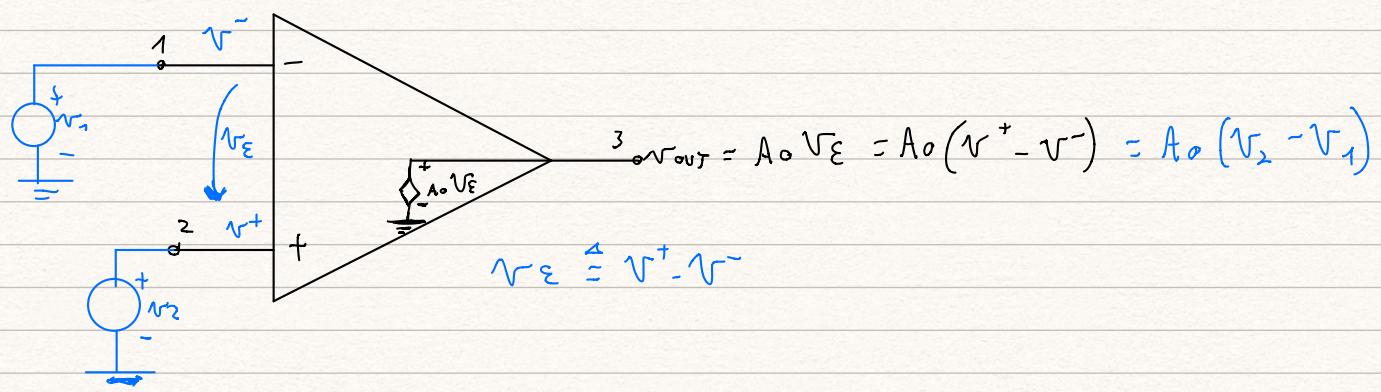
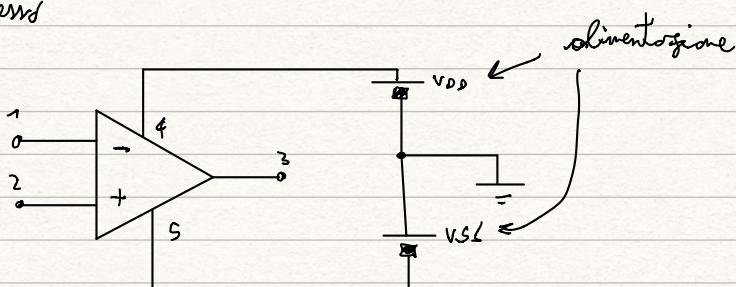
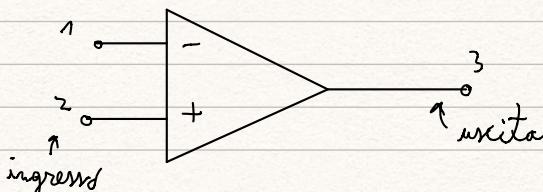
$$i_{R04} = i_4 - i_{COM} = i_{COM} \left[\frac{R_03}{R_03 + 1/gm_3} - 1 \right]$$

$\rightarrow 0 \text{ se } R_03 \rightarrow \infty$

$$V_{OUT} = i_{R04} \cdot R_04$$

parallello delle R_0 $G_{COM} \neq 0$ anche con corso a specchio

Amplificatore operazionale:



AMPLIFICATORE OPERAZIONALE IDEALE:

- 1) Non sovraccarica e eroga corrente ai morsetti di ingresso
 ↳ resistenza di ingresso infinita
 - 2) L'uscita è presa in copy di un generatore di tensione ideale
 ↳ resistenza di uscita nulla
 - 3) Rigetta qualsiasi segnale di modo comune presente in ingresso
 ↳ $G_{CM} = 0; CMRR = \infty$
- A₀: guadagna ad anello aperto (guadagno differenziale)

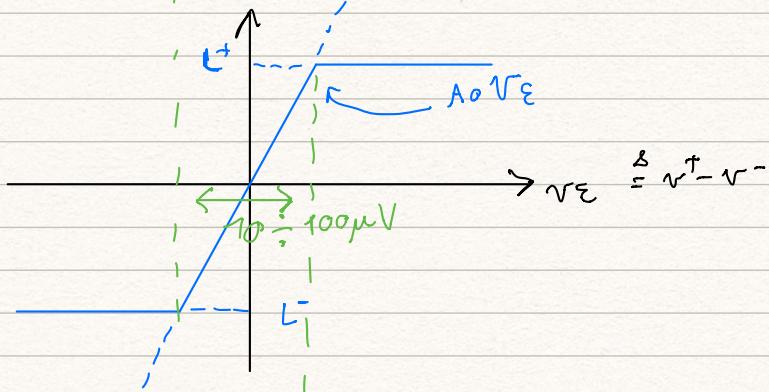
- 4) A₀ è indipendente dalla frequenza → larghezza di banda infinita
- 5) A₀ → ∞ (reale $T_{typ} = 10^5 - 10^6$)

$$V_{out} = A_0 (v^+ - v^-) \rightarrow 0$$

per mantenere V_{out} infinito

«cortocircuito virtuale tra i morsetti di un operazionale»

v^- segue esattamente quello che fa v^+

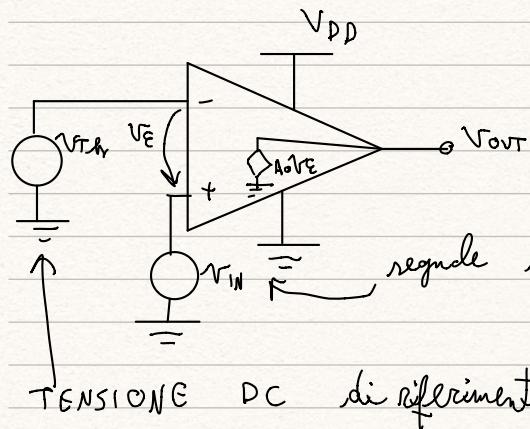
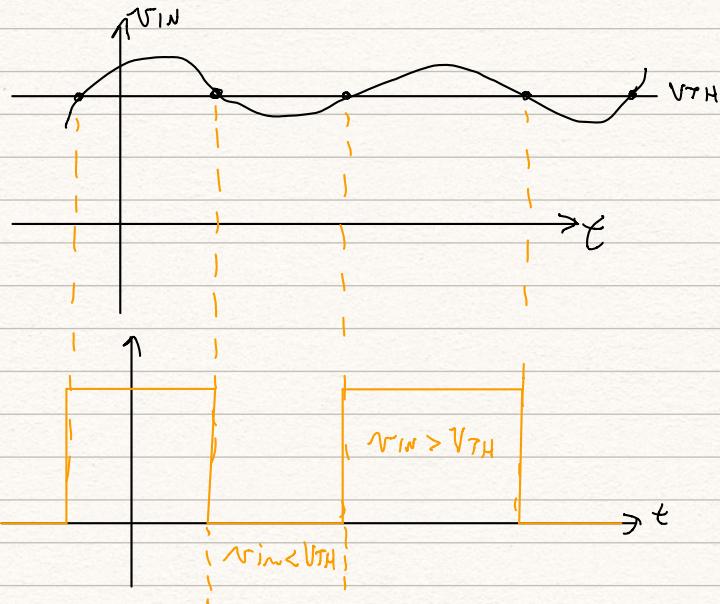


L^+, L^- livello di saturazione della tensione di uscita, legati ai valori della tensione di alimentazione

$$V_{out} \approx 10V; A_0 = 10^5$$

$$v_E = \frac{V_{out}}{A_0} \approx \frac{10V}{10^5} = 10^{-4}V = 10^{-4}V = 100 \mu V$$

AMPLIFICATORE OPERAZIONALE COME COMPARATORE:

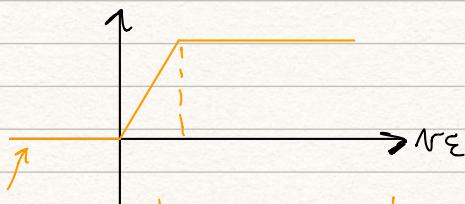


$$V_{in} > V_{th} \rightarrow V_E > 0$$

V_{out} ritorna al livello di saturazione positivo

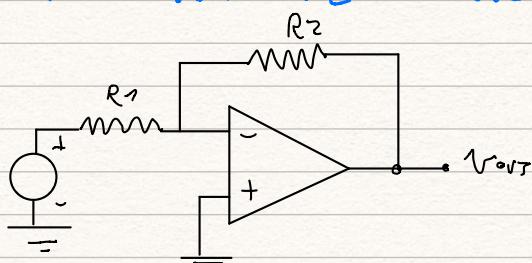
$$V_{in} < V_{th} \rightarrow V_E < 0$$

V_{out} ritorna al livello di saturazione negativo
(zero nel caso considerato)



livello di saturazione negativo pari a 0

CONFIGURAZIONE INVERTENTE:



$$i_1 = \frac{V_{in} - V_-}{R_1}$$

$$i_2 = \frac{V^- - V_{OUT}}{R_2}$$

$$\frac{V_{IN}}{R_1} - \frac{V^-}{R_1} = \frac{V^-}{R_2} - \frac{V_{OUT}}{R_2}$$

$$V_{OUT} = A_o (V^+ - V^-) \approx -A_o V^-$$

$V^+ = 0$

$$V^- = -\frac{V_{OUT}}{A_o}$$

$$\frac{V_{IN}}{R_1} - \frac{V_{OUT}}{A_o R_1} = -\frac{V_{OUT}}{R_2} - \frac{V_{OUT}}{R_2}$$

$$\frac{V_{IN}}{R_1} + \frac{V_{OUT}}{A_o R_1} = -\frac{V_{OUT}}{A_o R_2} - \frac{V_{OUT}}{R_2}$$

$$V_{OUT} \left[\frac{1}{A_o R_1} + \frac{1}{A_o R_2} + \frac{1}{R_2} \right] = -\frac{V_{IN}}{R_1}$$

$$V_{OUT} = -\frac{V_{IN}}{R_1} \frac{\frac{1}{A_o R_1} + \frac{1}{A_o R_2} + 1/R_2}{\frac{1}{A_o} + \frac{R_1}{A_o R_2} + R_1} = -\frac{V_{IN}}{\frac{1}{A_o} + \frac{R_1}{A_o R_2} + R_1}$$

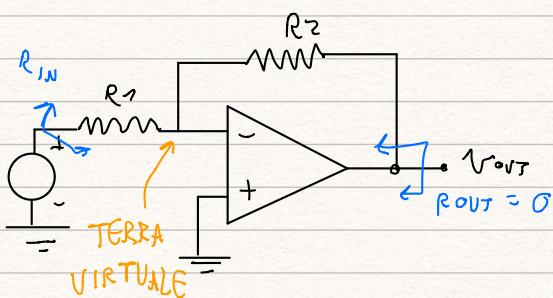
$$G \stackrel{\Delta}{=} \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = -\frac{1}{\frac{1}{A_o} + \frac{R_1}{A_o R_2} + \frac{R_1}{R_2}} = -\frac{R_2}{\frac{R_2}{A_o} + \frac{R_1}{A_o} + R_1} = -\frac{R_2/R_1}{\frac{R_2}{A_o A_0} + \frac{1}{A_o} + 1} =$$

$$\therefore -\frac{R_2/R_1}{1 + \frac{1}{A_o} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)}$$

$$\text{se } A_o \rightarrow \infty \quad \frac{1}{A_o} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \rightarrow 0$$

$$G|_{\text{ideale}} \stackrel{\Delta}{=} \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} \Big|_{A_o \rightarrow \infty} = -\frac{R_2}{R_1}$$

tensione di uscita sfasata di 180° rispetto a V_{IN}



$$V_{OUT} = A_o (V^+ - V^-)$$

$$V^+ - V^- = \frac{V_{OUT}}{A_o} \xrightarrow{A_o \rightarrow \infty} 0$$

condizionato virtuale tra i morsetti dell'opamp

$$v^+ = 0 \rightarrow v^- = 0$$

mentre $v^- = 0$
 rende disponibile la corrente entrante in un altro ramo del circuito

Grazie al nodo di terra virtuale

- tensione ai capi di R_1 è V_{IN} :

$$i = \frac{V_{IN}}{R_1}$$

$$v_{OUT} = -i R_2 = -V_{IN} \frac{R_2}{R_1}$$

$$G_{IDEALE} = -\frac{R_2}{R_1}$$

assumendo $A_o \rightarrow \infty$

- risulta in ingresso $R_{IN} = R_1$

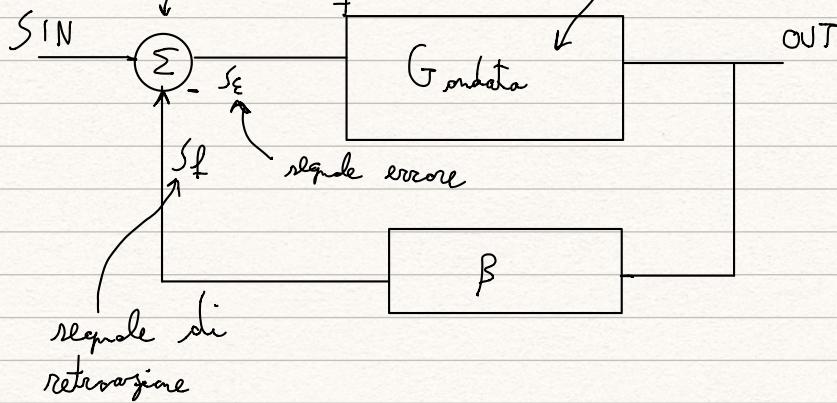
RETROAZIONE NEGATIVA:

elaborato da Black su un "cancello" di F.Brown nel 1909

nel 1934

nodo di confronto o sommatore

nell'articolo originale di Black è μ



$$S_F = S_{OUT} \beta$$

$$S_{OUT} = Gondata S_E$$

$$S_E = S_{IN} - S_F$$

$$S_{OUT} = Gondata S_E = Gondata (S_{IN} - S_F) = Gondata [S_{IN} - S_{OUT} \beta]$$

$$S_{OUT} = Gondata S_{IN} - Gondata \beta S_{OUT}$$

$$S_{OUT} [1 + Gondata \beta] = Gondata S_{IN}$$

$$\frac{S_{out}}{S_{in}} = \frac{G_{ondata}}{1 + G_{ondata}\beta}$$

\rightarrow GUADAGNO AD ANELLO CHIUSO

$$S_+ = S_{out}\beta = G_{ondata} S \in \beta - G_{ondata}\beta = G_{loop} \quad \text{GUADAGNO D'ANELLO}$$

$$\frac{S_{out}}{S_{in}} = \frac{G_{ondata}}{1 - G_{loop}}$$

$$\frac{S_{out}}{S_{in}} = \frac{1}{G_{ondata}\beta} \quad \frac{G_{ondata}}{\frac{1}{G_{ondata}} + 1}$$

$$\frac{S_{out}}{S_{in}} \xrightarrow[G_{ondata} \rightarrow \infty]{} \left(\frac{1}{\beta} \right)$$

G, sotto questo segnale che si ha con G_{loop} infinito

- GUADAGNO AD ANELLO APERTO
- GUADAGNO D'ANELLO
- GUADAGNO IDEALE
- GUADAGNO DI ANDATA

[retroazione negativa: $G_{loop} < 0$]