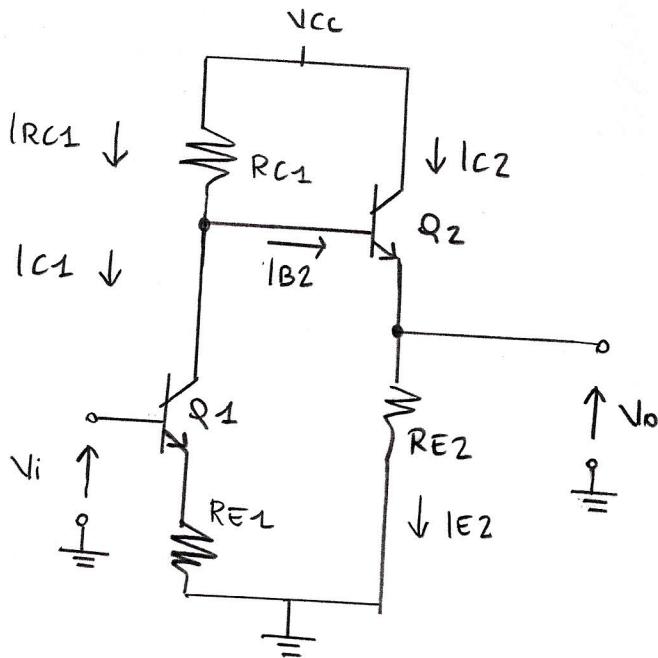


AMPLIFICATORE A 2 STADI: BASE CONNESE + COTTONE COMUNE



DATI

$$\beta_{F1} = 150$$

$$\beta_{F2} = 75$$

$$V_{CC} = 5V$$

$$R_{C1} = 5k\Omega$$

$$R_E1 = 1k\Omega$$

$$I_{C1} = 600 \mu A$$

$$I_S1 = 10 - 14 \mu A = I_S2$$

$$g_{m2} = 5 g_{m1}$$

DETERMINARE

- 1)  $V_i$
- 2)  $R_E2$  t.c.  $Q_2$  sia in attività diretta
- 3)  $R_{in}$  (= resistenza d'ingresso)
- A)  $R_{out}$  (= resistenza di uscita)

SOLUZIONE

$$1) V_i = V_{BE1} + I_{E1} \cdot R_{E1}, \text{ PER PRIMA COSA TROVO } V_{BE1}$$

$$I_{C1} = I_S1 \left( e^{\frac{V_{BE1}}{V_T}} - 1 \right) \Rightarrow \frac{I_{C1}}{I_S1} = e^{\frac{V_{BE1}}{V_T}} - 1 \Rightarrow$$

$$\frac{I_{C1}}{I_S1} + 1 = e^{\frac{V_{BE1}}{V_T}} \Rightarrow \frac{V_{BE1}}{V_T} = \ln \left( \frac{I_{C1}}{I_S1} + 1 \right) = \Delta$$

$$V_{BE1} = V_T \ln \left( \frac{I_{C1}}{I_S1} + 1 \right) = 0.645 V$$

$$\text{MANCA } I_{E2}: \quad I_{E2} = I_{B2} + I_{C2} = I_{C1} \left( 1 + \frac{1}{\beta_{F2}} \right) = 604 \mu A \quad 2/38$$

$$I_{B2} = \frac{I_{C2}}{\beta_{F2}}$$

PUNTO,  $V_i = 4.25 V$

$V_i$  E' LA BATTERIA DA PRENDERE ALL'INGRESSO DATA LA IC CHE  
DESIDERIAMO SCORRA IN Q2 E DATA RE2

$$2) \quad V_{cc} = R_{C1} \cdot I_{RC1} + V_{BE2} + R_{E2} \cdot I_{E2}$$

x            x            x

$$\Rightarrow R_{E2} = \frac{V_{cc} - R_{C1} \cdot I_{RC1} - V_{BE2}}{I_{E2}}$$

CERCO  $I_{E2}$ .  $\beta_{m2} = 5 \beta_{m1}$  E PUNALE A DIRE CHE LA CORRENTE DI  
COMETTORE DI Q2 E' 5 VOLTE LA CORRENTE DI COMETTORE DI Q1.  
(INFATI VALLE  $\beta_m = \frac{I_C}{V_T}$ )

$$I_{E2} = I_{B2} + I_{C2} = \frac{I_{C2}}{\beta_{F2}} + I_{C2} = I_{C2} \left( 1 + \frac{1}{\beta_{F2}} \right) = 5 I_{C1} \left( 1 + \frac{1}{\beta_{F2}} \right)$$

= 3.04 mA

$$\text{CERCO } V_{BE2}. \quad I_{C2} = I_{S2} \left( e^{\frac{V_{BE2}}{V_T}} - 1 \right) \Rightarrow V_{BE2} = V_T \ln \left( \frac{I_{C2}}{I_{S2}} + 1 \right)$$

= 0.69 V

$$\text{MANCA } I_{RC1}. \quad I_{RC1} = I_{C1} + I_{B2}$$

TANTO PIU' E' ELEVATO IL GUADAGNO  $\beta_F$  TANTO PIU' LA CORRENTE  
DI BASE E' TRASURABILE.  $\beta_F = 75$  NON E' UN VALORE COSÌ  
ALTO DA PERMETTERE DI TRASUARARE  $I_B$

$$I_{RC1} = I_{C1} + \underbrace{I_{C2}}_{\beta_{F2}} = 640 \mu A, \text{ DA CWI } R_E2 = 365 \Omega$$

3/38

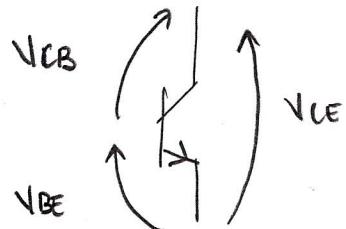
$\sim$

$40 \mu A$

\* ORA VERIFICO CHE I TRANSISTORS LAVORINO EFFETTUAMENTE IN REGIONE ATTUA DIRETTA.

(APPLICANDO  $I_C = \beta_1 B$  ABBIAMO IMPUUTAMENTE SUPPOSTO DI ESSERE IN ATTUA DIRETTA)

AFFIN CHE' SIA VERIFICATO DEVE ESSERE  $V_{CE} > 0.2$  (PER UN TRANSISTOR mpn). INFATI



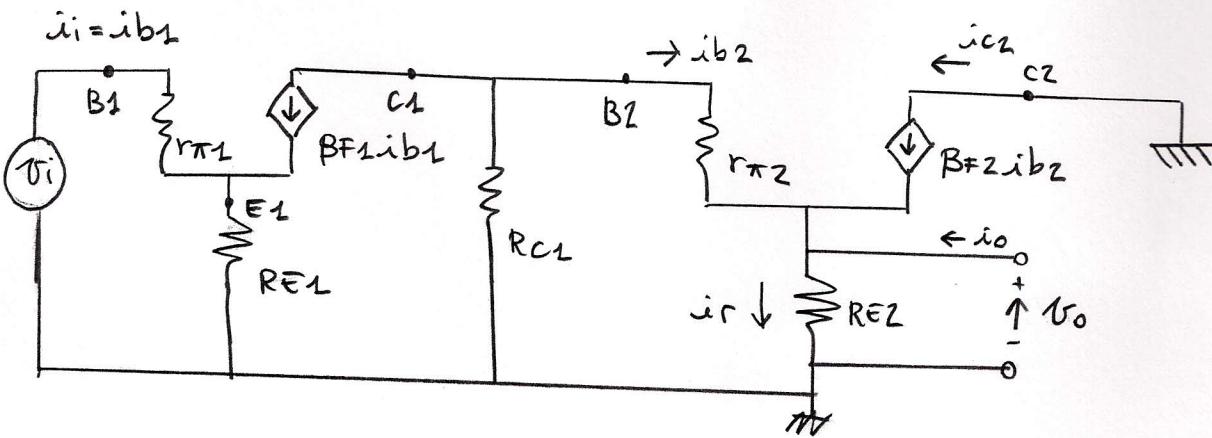
$$V_{CE} = V_{BE} + V_{CB}, \quad V_{CE} > 0.2 \Rightarrow 0.6V$$

$$V_{CB} > -0.4V \Rightarrow V_{BC} < 0.4V$$

GUNZIONE SPENTA

3) PER CALCOLARE L'IMPEDIMENTA DI INGRESSO E DI UNTA REALIZZO IL CIRCUITO EQUIVALENTE AL PICCOLO SEGNALE

CALCOLO DELLA RESISTENZA D'INGRESSO  $\Rightarrow$  REALIZZO IL CIRCUITO EQUIVALENTE SECONDO THÉVENIN GUARDANDO DENTRO AL CIRCUITO (SPENGO I GENERATORI INDIPENDENTI E METTO UN GENERATORE DI PROVA IN INGRESSO)



$$\begin{aligned}
 R_i &= \frac{V_i}{i_i} = i_{b1} r_{\pi 1} + (i_{b1} + B_{f1} i_{b1}) R_{cl} / i_{b1} \\
 &\stackrel{\text{generatori indipendenti spenti}}{=} i_{b1} [r_{\pi 1} + (1 + B_{f1}) R_{cl}] / i_{b1} \\
 &= r_{\pi 1} + (1 + B_{f1}) R_{cl}
 \end{aligned}$$

NOTARE CHE LA RESISTENZA D'INGRESSO DELLO STADIO AD EMETTORE COMUNE NON DIPENDE DALLA RESISTENZA DI CARICO E PUÒ INDÌ DALLA PRESENZA DEL SECONDO STADIO

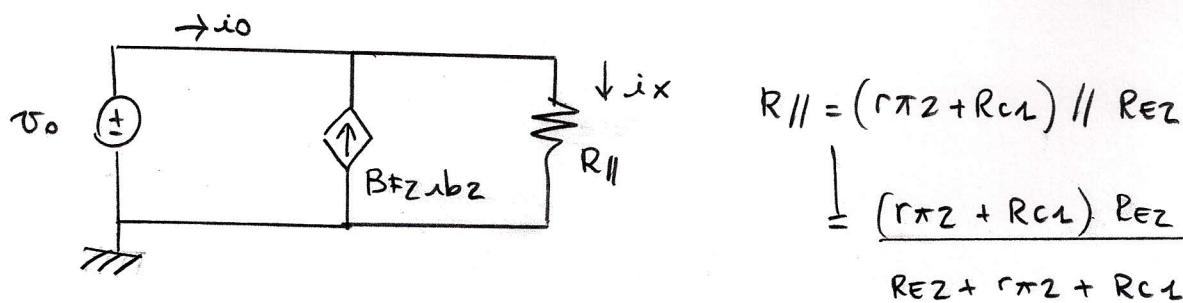
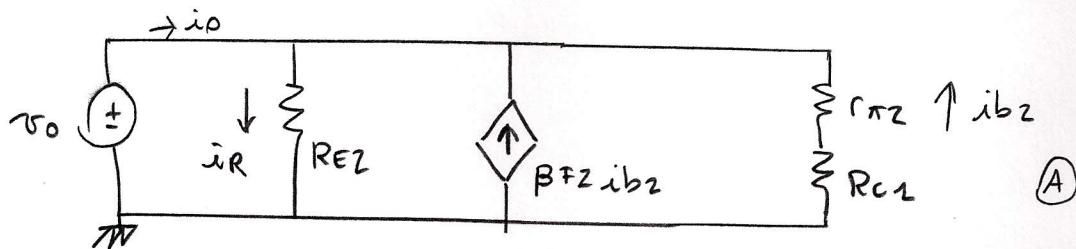
$$r_{\pi 1} = \frac{B_{f1}}{g_{m1}}, \quad g_{m1} = \frac{I_{c1}}{\sqrt{T}} = 23 \text{ mS} \Rightarrow r_{\pi 1} = 6.5 \text{ k}\Omega$$

$$\Rightarrow R_i = 157.5 \text{ k}\Omega$$

4)  $R_{out}$ .

$R_{out}$  È LA RESISTENZA CHE VEDO DAL TERMINALE DI OUTPUT CON INPUT CORTOCIRCUITATO. RICORDARSI DI STACCIARE SEMPRE IL CARICO (SE C'È) E DI METTERE UN GENERATORE DI PROVA IN USUO.

INPUT CORTOCIRCUITATO  $\Rightarrow v_i = 0 \Rightarrow i_{b1} = 0 \Rightarrow$  IL PRIMO STADIO SI ANNUNA  $R_{cl}$  ESCUJA



$$R_{\parallel} = (r_{\pi 2} + R_{C1}) \parallel R_{E2}$$

$$= \frac{(r_{\pi 2} + R_{C1}) R_{E2}}{R_{E2} + r_{\pi 2} + R_{C1}}$$

$$R_o = \left. \frac{V_o}{i_o} \right|_{\substack{\text{gem.} \\ \text{indip.} \\ \text{Spenti}}} ; \quad V_o = -i_b2 (r_{\pi 2} + R_{C1}) \quad (\text{vedi } A)$$

$$i_o = -B_F2 i_b2 + i_x ; \quad i_x = \frac{V_o}{R_{\parallel}} = \frac{-i_b2 (r_{\pi 2} + R_{C1}) (R_{E2} + r_{\pi 2} + R_{C1})}{(r_{\pi 2} + R_{C1}) R_{E2}}$$

$$\Rightarrow i_o = -B_F2 i_b2 - i_b2 \cdot \left( \frac{R_{E2} + r_{\pi 2} + R_{C1}}{R_{E2}} \right)$$

QUINDI

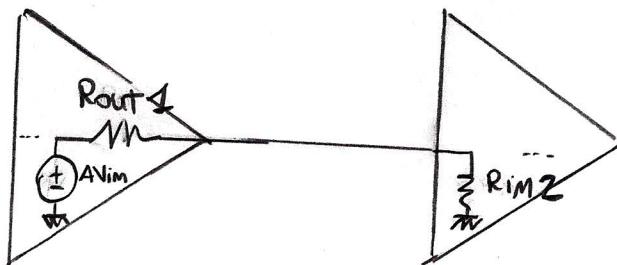
$$R_o = \left. \frac{V_o}{i_o} \right|_{\substack{\text{gem.} \\ \text{indip.} \\ \text{Spenti}}} = \frac{-i_b2 (r_{\pi 2} + R_{C1})}{i_b2 \left( B_F2 + \frac{R_{E2} + r_{\pi 2} + R_{C1}}{R_{E2}} \right)} = \frac{R_{E2} (r_{\pi 2} + R_{C1})}{R_{E2} + r_{\pi 1} + R_{C1} + B_F2 R_{E2}}$$

## PARTE PRIMA ESERCIZIO 2

CALCOLARE IL GUADAGNO DI TENSIONE

CALCOLARE IL GUADAGNO DI TENSIONE DELL'AMPLIFICATORE DELL'ESERCIZIO 1

RICHIAMO: AMPLIFICATORI DI TENSIONE A 2 STADI



METODI PER CALCOLARE IL GUADAGNO DI TENSIONE

1- DAL CARICO AL GENERATORE

A) CONSIDERO IL 2° STADIO ISOLATO E NE CALCOLO IL GUADAGNO,  $AV_2$ , E LA RESISTENZA D'INGRESSO  $R_{m2}$

B) CALCOLO IL GUADAGNO DEL 1° STADIO ISOLATO,  $AV_1$ , CON IN USCITA  $R_{m2}$  IN PARALLELO

$$AV = AV_1 \cdot AV_2$$

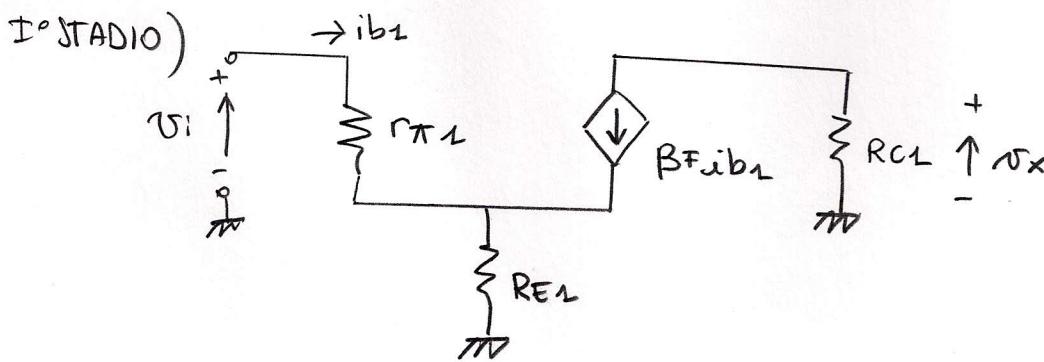
2- DAL GENERATORE AL CARICO

A) CONSIDERO IL 1° STADIO ISOLATO E NE CALCOLO IL GUADAGNO,  $AV_1$ , E LA RESISTENZA DIVISUTA  $R_{out1}$

B) CALCOLO IL GUADAGNO DEL 2° STADIO ISOLATO,  $AV_2$ , CON IN INGRESSO  $R_{out1}$  IN SERIE,

$$AV = AV_1 \cdot AV_2$$

DAL GENERATORE AL CARICO



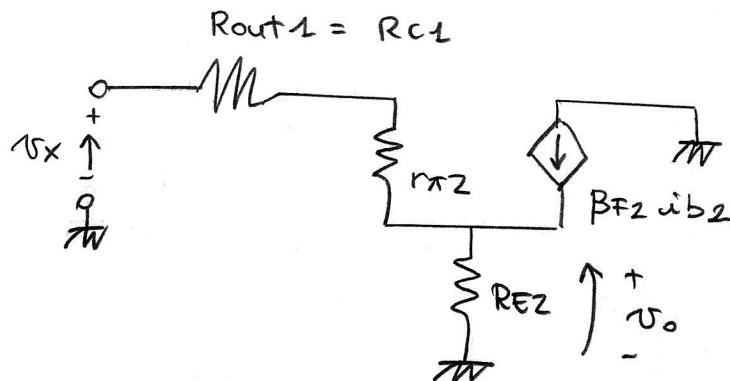
$$AV_1 = \frac{V_x}{V_i} = - \frac{\beta_f i_{b1} R_{C1}}{r_{\pi1} r_{\pi1} + \lambda_{fL} (\beta_f + 1) R_{E1}} = \frac{-\beta_f R_{C1}}{r_{\pi1} + (\beta_f + 1) R_{E1}}$$

$$= -4.76$$

CALCOLO LA RESISTENZA DI USCITA Rout 1

PER FARCI DEVO CORTOCIRCUITARE L'INPUT, PERTANTO  
RI MANE SOLO  $R_{C1} = P$        $Rout_1 = R_{C1}$

II° STADIO)

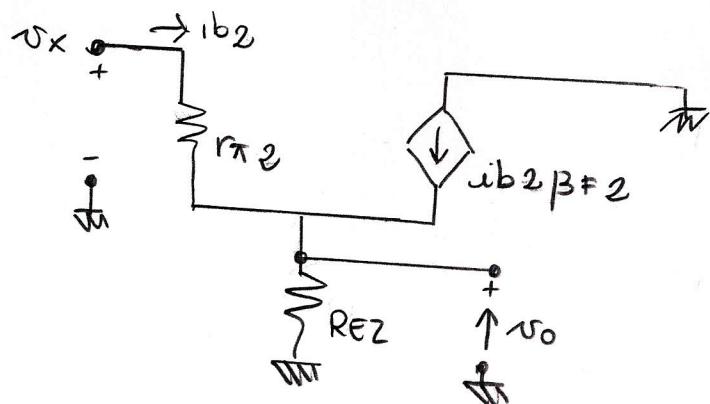


$$AV_2 = \frac{V_o}{V_x} = \frac{R_{E2} (\lambda_f^2) (\beta_f^2 + 1)}{(Rout_1 + r_{\pi2}) i_{b2} + (\beta_f^2 i_{b2} + i_{b2}) R_{E2}} = 0.831$$

$$\Rightarrow AV = AV_1 \cdot AV_2 = -3.96$$

DAL CARICO AL GENERATORE

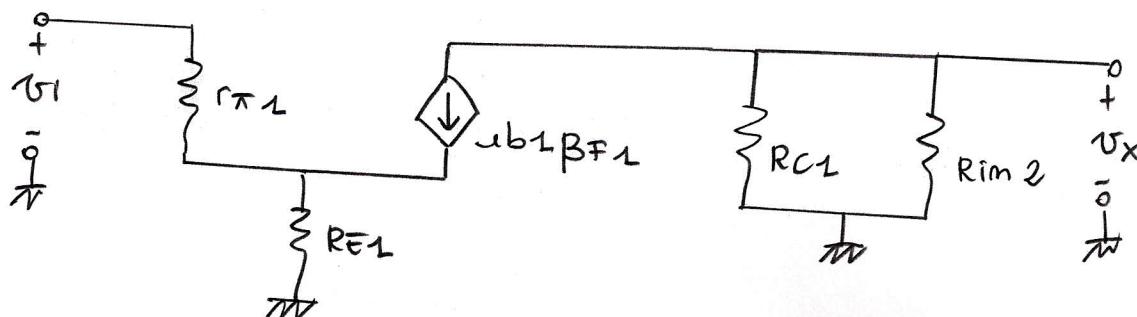
II° STADIO)



$$\frac{v_o}{v_x} = \frac{R_E2 (i_b2 + \beta_{F2} i_b2)}{r_{\pi2} i_b2 + R_E2 (i_b2 + \beta_{F2} i_b2)} = 0.877 = A_{V2}$$

$$R_{im2} = \frac{v_x}{i_b2} = \frac{r_{\pi2} i_b2 + i_b2 (\beta_{F2} + 1) R_E2}{i_b2} = r_{\pi2} + (\beta_{F2} + 1) R_E2$$

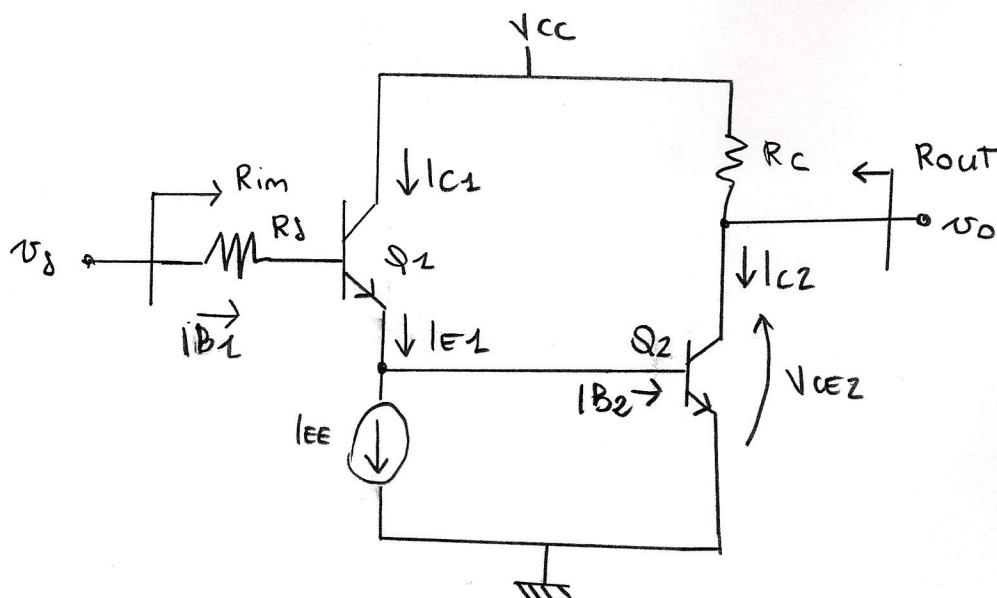
I° STADIO)



$$\frac{v_x}{v_i} = - \frac{(R_{cl} // R_{im2}) i_b1 \beta_{F1}}{r_{\pi1} i_b1 + R_{E1} i_b1 (\beta_{F1} + 1)} = -4.053 = A_{V1}$$

$$A_V = A_{V1} \cdot A_{V2} = A_{V1} \cdot A_{V2} = -3.86$$

AMPLIFICATORE A 2 STADI: COLLETTORE COMUNE + EMISSORE COMUNE

DATI

$$I_{EE} = 100 \mu A$$

$$V_{CC} = 5 V$$

$$R_B = 50 k\Omega$$

$$\beta_{F1} = \beta_{F2} = 100$$

$$V_{BE1} = V_{BE2} = 0.6 V$$

$$I_C2 = 100 \mu A$$

$$V_{CE2} = 2.5 V$$

DETERMINARE

- 1)  $R_C$
- 2)  $v_s$
- 3)  $R_{in}$

- 4)  $R_{out}$
- 5)  $A_v = \frac{v_o}{v_s}$

SOLUZIONE

$$1) V_{CC} = R_C I_C2 + V_{CE2} \Rightarrow R_C = \frac{V_{CC} - V_{CE2}}{I_C2} = 25 k\Omega$$

$$2) v_s = R_B I_{B1} + V_{BE1} + V_{BE2}$$

TROVO  $I_{B1}$ :

$$I_{E1} = I_C1 + I_{B1} = \frac{I_{B1}}{\beta_{F1}} + I_{B1} \Rightarrow$$

$$I_{B1} = \frac{I_{E1}}{\beta_{F1} + 1}$$

MA MANCA  $I_{E1}$ 

$$I_{E1} = I_{EE} + I_{B2} = I_{EE} + \frac{I_{C2}}{\beta_{F2}} = 101 \mu A \Rightarrow I_{B1} = 1 \mu A$$

$$\Rightarrow V_S = 1.25 \text{ V}$$

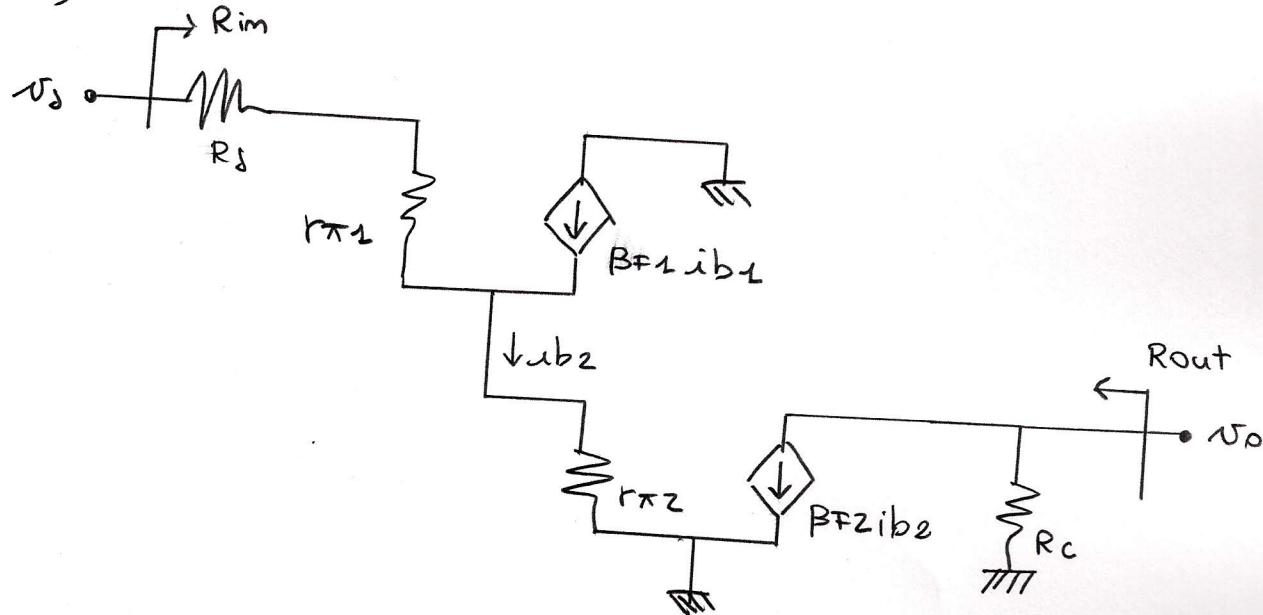
HO FINITO L'ANALISI STATICA, ORA PASSO ALL'ANALISI DI PICCOLO SEGNALE  
MA PRIMA DEVO SEMPRE VERIFICARE LE CONDIZIONI DI SUPPOSIZIONI  
DI AMMVA DIRETTA (V<sub>CE</sub>)

$$V_{CE2} \text{ E' DATO ED } \epsilon' > 0.2 \Rightarrow \text{OK}$$

$$V_{CC} - V_{CE1} - V_{BE2} = 0$$

$$V_{CE1} = V_{CC} - V_{BE2} = 4.4 \text{ V}$$

4) s)

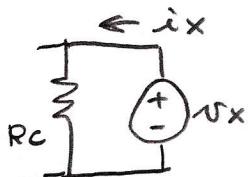


$$R_{in} = \frac{V_S}{i_{b1}} = \frac{(R_d + r_{\pi 1}) i_{b1} + r_{\pi 2} (\beta_{F2} + 1) i_{b1}}{i_{b1}} = R_d + r_{\pi 1} + r_{\pi 2} \frac{\beta_{F2} + 1}{x}$$

$$r_{\pi 1} = \frac{V_T}{I_{B1}} = 26 \text{ m}\Omega, \quad r_{\pi 2} = \frac{V_T}{I_{B2}} = \frac{\beta_2 V_T}{I_{C2}} = 26 \text{ m}\Omega$$

$$\Rightarrow R_{in} = 2.7 \text{ M}\Omega$$

$$R_{out} = \frac{v_x}{i_x}$$



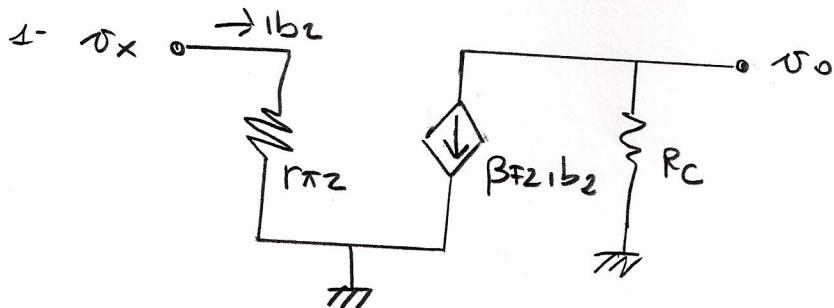
↑ INPUT A CORTO PER CALCOLARE  $R_{out}$

$$\Rightarrow u_{b1} = u_{b2} = 0$$

$$R_{out} = \frac{v_x}{i_x} = R_C = 25 \text{ k}\Omega$$

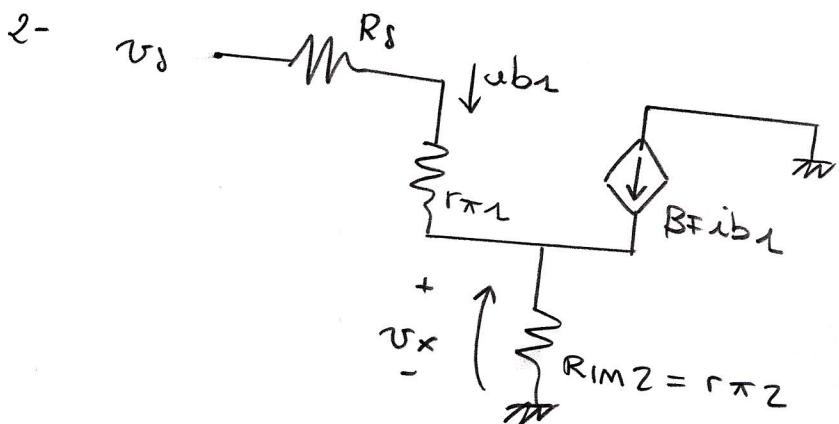
$$3) \quad A_v = A_{V1} \cdot A_{V2}$$

APPLICO IL METODO DAL CARICO AL GENERATORE



$$A_{V2} = \frac{V_o}{V_x} = - \frac{B_f 2 i_{b2} \cdot R_C}{r_{\pi 2} i_{b2}} = - 86.1$$

$$R_{IM2} = r_{\pi 2}$$



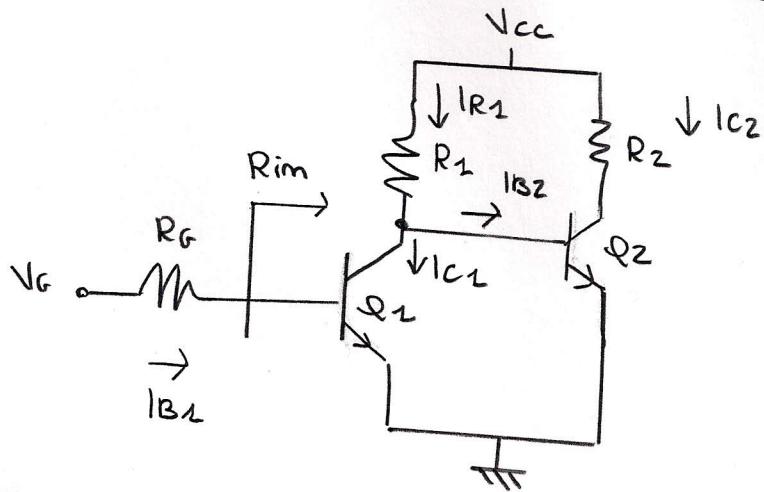
$$A_{V1} = \frac{V_x}{V_d}$$

$$V_d = (R_s + r_{\pi 2}) i_{b1} + r_{\pi 2} (\beta_f 1 + 1) i_{b1}$$

$$V_x = [(\beta_f 1 + 1) i_{b1}] r_{\pi 2}$$

$$\Rightarrow A_{V1} = \frac{(\beta_f 1 + 1) r_{\pi 2}}{(R_s + r_{\pi 2}) + r_{\pi 2} (\beta_f 1 + 1)} = 0.97 \Rightarrow A_v = - 83.2$$

2 STADI EMETTORE COMUNE



DATI

$$R_G = 100 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 330 \Omega$$

$$V_{CC} = 5 \text{ V}$$

$$\beta_{F1} = \beta_{F2} = 100$$

$$V_{BE1} = 0.6 \text{ V}$$

$$V_{BE2} = 0.7 \text{ V}$$

$$I_{C1} = 0.15 \text{ mA}$$

$$I_{C2} = 8 \text{ mA}$$

DETERMINARE

- 1)  $V_g$
- 2)  $R_1$
- 3)  $R_{out}$
- 4)  $R_{in}$
- 5)  $A_V = \frac{V_o}{V_g}$

SOLUZIONE

$$1) V_g = R_G I_{B1} + V_{BE1} = R_G \frac{I_{C1}}{\beta_{F1}} + V_{BE1} = 0.75 \text{ V}$$

$$2) V_{CC} - R_1 I_{R1} - V_{BE2} = 0 \quad ; \quad I_{R1} = I_{C1} + I_{B2} = I_{C1} + \frac{I_{C2}}{\beta_{F2}}$$

$\downarrow$

$$= 0.24 \text{ mA}$$

$$\Rightarrow R_1 = \frac{V_{CC} - V_{BE2}}{I_{R1}} = 18 \text{ k}\Omega$$

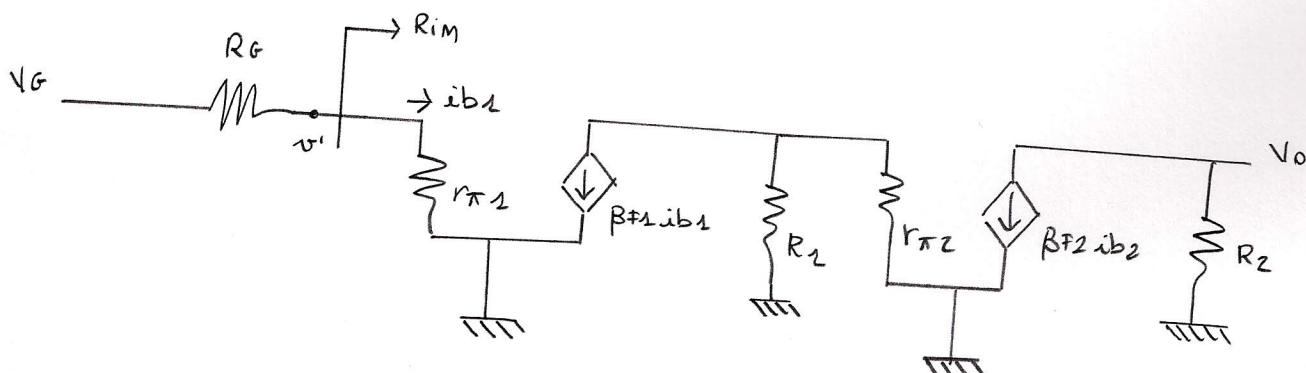
VERIFICA AMMAGNA DIRETTA:

$V_{BE}$  ok

$$V_{CE}: \quad V_{CE1} - V_{BE2} < 0.7V > 0.2V \quad \underline{\text{ok}}$$

$$V_{CC} - R_2 I_{C2} - V_{CE2} = 0 \Rightarrow V_{CE2} = 2 > 0.2V$$

3) 4)



$$R_{in} = \frac{v_i}{ib_1} = \frac{ib_1 r_{pi1}}{ib_1} = r_{pi1} = \frac{V_T}{I_{B1}} = \frac{V_T}{\frac{I_{C1}}{\beta_{F1}}} = 17.3k\Omega$$

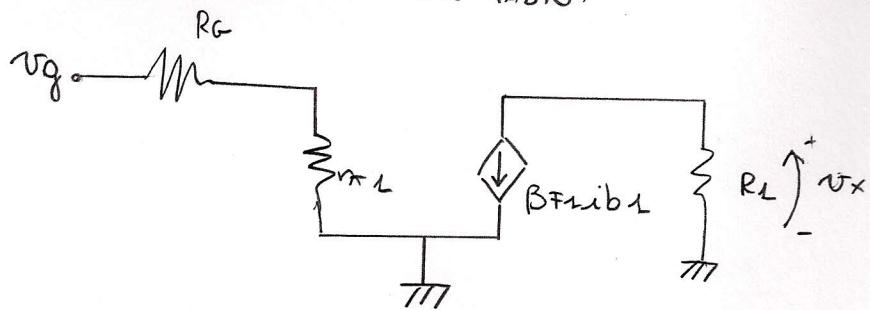
$R_{out} \rightarrow$  PER CALCOLARE  $R_{out}$  TUTTO L'INGRESSO VA IN CORTOCIRCUITO

$$R_{out} = R_2 = 330\Omega$$

$$5) \quad A_V = A_{V1} \cdot A_{V2}$$

APPUNTO IL METODO DAL GENERATORE AL CARICO

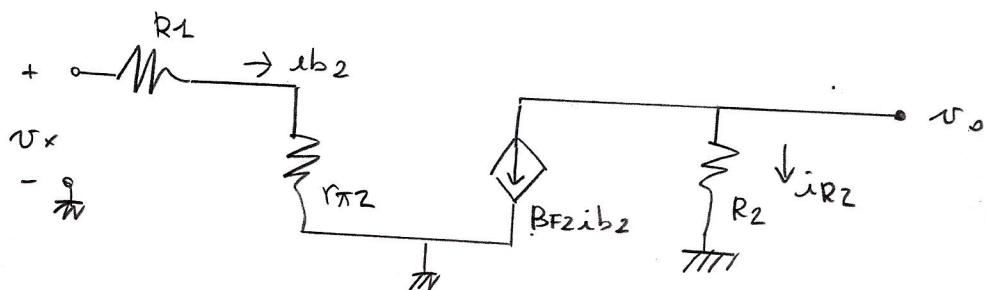
## PRIMO STADIO:



$$A_{V1} = \frac{v_x}{v_g} = - \frac{R_L B \neq 1 i_{b1}}{(R_g + r_{\pi 1}) i_{b1}} = - 15.34$$

$$R_{out1} = R_L$$

## SECONDO STADIO

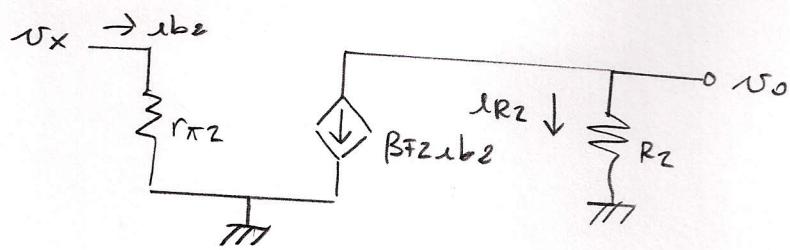


$$A_{V2} = \frac{v_o}{v_x} = \frac{i_{R2} \cdot R_2}{i_{b2} (r_{\pi 2} + R_2)} = \frac{-B \neq 2 i_{b2} \cdot R_2}{i_{b2} (r_{\pi 2} + R_2)}$$

$$r_{\pi 2} = \frac{V_T}{I_{B2}} = \frac{V_T \beta}{I_C 2} = 288 \Omega \Rightarrow A_{V2} = -1.8$$

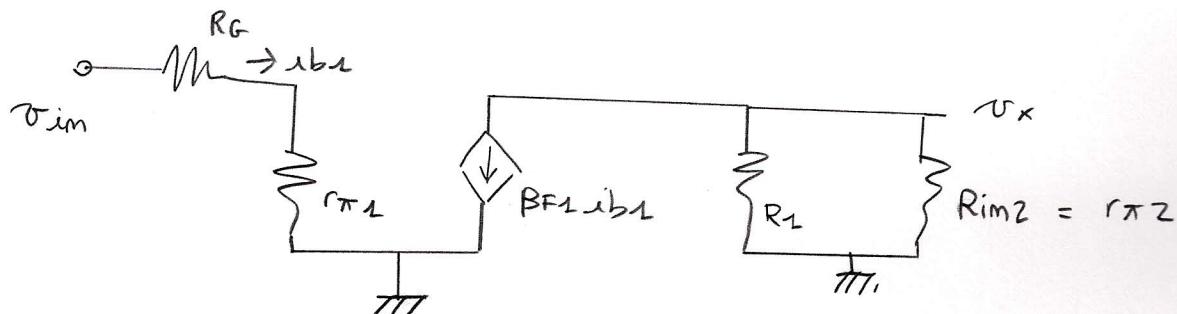
$$A_V = A_{V1} \cdot A_{V2} = 27.7$$

## DDL CARICO AL GENERATORE



$$A_{v2'} = \frac{v_o}{v_x} = \frac{i_{R2} \cdot R_2}{r_{\pi 2} i_{b2}} = \frac{-\beta_{F2} i_{b2} R_2}{r_{\pi 2} i_{b2}} = -14.2$$

$$R_{IM2} = r_{\pi 2}$$



$$A_{v1'} = \frac{v_x}{v_{im}} = \frac{-\beta_{F1} i_{b1} (R_1 \parallel R_{IM2})}{R_G i_{b1} + r_{\pi 1} i_{b1}} = \frac{-\beta_{F1} (R_1 \parallel r_{\pi 2})}{R_G + r_{\pi 1}}$$

$$= -0.24$$

$$\Rightarrow A_v' = A_{v1'} \cdot A_{v2'} = -0.24 \cdot (-14.2) = 27.4 \approx A_v$$

PROGETTARE UNO SPECCHIO DI CORRENTE A MPM CHE FUNZIONI DA POZZO DI CORRENTE

DATI

$$B = 100$$

$$V_A = 50 \text{ V}$$

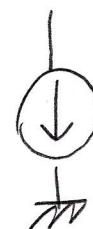
$$V_{CC} = +15 \text{ V}, V_{EE} = -15 \text{ V} \quad \text{MASSA}$$

$$V_{BE} = 0.6 \text{ V}$$

## POZZO DI CORRENTE



## CORRENTE VERSO

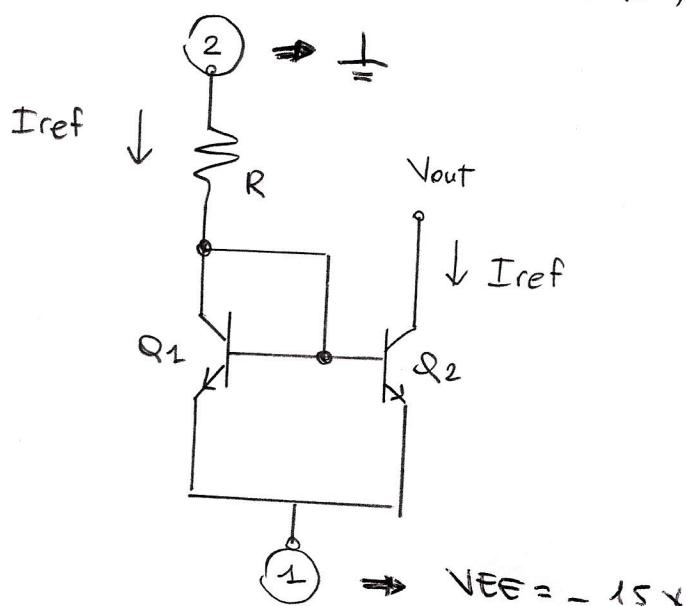


$$I_{ref} = 0.5 \text{ mA}$$

SI NUOLO CHE LA TENSIONE DI USCITA POSSA VARIARE DA  $-5 \text{ A } +5 \text{ V}$ , COE', PER UNA TENSIONE CHE VARIA IN QUESTO RANGE LO SPECCHIO DEVE ESSERE IN GRADO DI MANTENERE  $0.5 \text{ mA}$

SOLUZIONE

PRIMO PASSO : DISEGNARE SPECCHIO A MPM :



VARIABILI DI PROGETTO:  $R$ , TENSIONI ① E ②

1- PRIMA CONSIDERAZIONE:

VOGLIO UNO SPECCHIO DI CORRENTE CHE FA CRIA DA POZZO  $\Rightarrow$

VOGLIO CHE LA CORRENTE SCORRA VERSO IL "BASSO"

PERTANTO,  $V_2 > V_1$

HO 3 POSSIBILITA' PER LE TENSIONI

MASSA  $\rightarrow V_{CC} = +15V$   
 $V_{EE} = -15V$

QUINDI IN ① POSSO AVERE O MASSA O  $V_{EE} = -15V$

NEL CASO DI MASSA AVREI PERO' IL PROBLEMA SEGUENTE:

SO CHE  $V_o$  PUO' ESSERE ANCHE NEGATIVA  $\Rightarrow$   $a_{o1}$  E' IMPOSTO DALLE SPECIFICHE DI PROGETTO.

MA SE  $V_o$  E' NEGATIVA (FINO A  $-5V$ ) E NEL ① HO MASSA AVRO'  $V_{CE2} < 0 \Rightarrow$  INCOMPATIBILE COL REQUISITO FONDAMENTALE DI FUNZIONAMENTO DELLO SPECCHIO, OVVERO BJT IN ATTUA DIRETTA.

PERTANTO NEL ① DOVRO' SCEGLIERE  $V_{EE} = -15V$

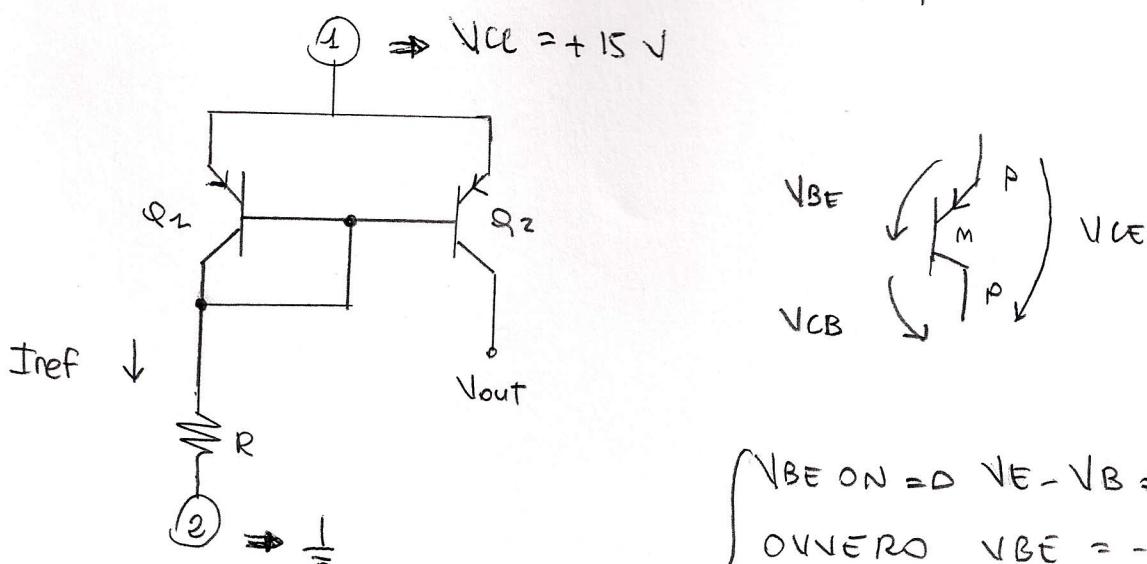
2- NEL PUNTO ② POTREI METTERE O MASSA O  $V_{CC} = +15V$ , METTO MASSA PER RIDURRE IL CONSUMO DI POTENZA

3- PROGETTAZIONE DELLA RESISTENZA R

$$0 - I_{ref} R - V_{BE1} = V_{EE} \Rightarrow R = 28.8 k\Omega$$

$\uparrow \quad //$   
MASSA 0.5 mA

COME ESECUZIO 5 MA CON TRANSISTORI pnp



$$\left\{ \begin{array}{l} V_{BE\text{ ON}} \Rightarrow V_E - V_B = 0.6V, \\ \text{OVVERO } V_{BE} = -0.6V \\ V_{CB\text{ OFF}} \Rightarrow V_C - V_B < 0.4V \\ \text{QUINDI } V_{CB} < 0.4V \end{array} \right.$$

$$\Rightarrow V_{CE} = V_{BE} + V_{CB} = -0.6V + (-0.4V) \Rightarrow V_{CE} < -0.2V$$

PUNTO CHIAVE:  $V_{out}$  DEVE POTER ASSUMERE VALORI POSITIVI.

PERTANTO, SICOME DEVE ESSERE IN QUESTO CASE  $V_{CE} < -0.2V$

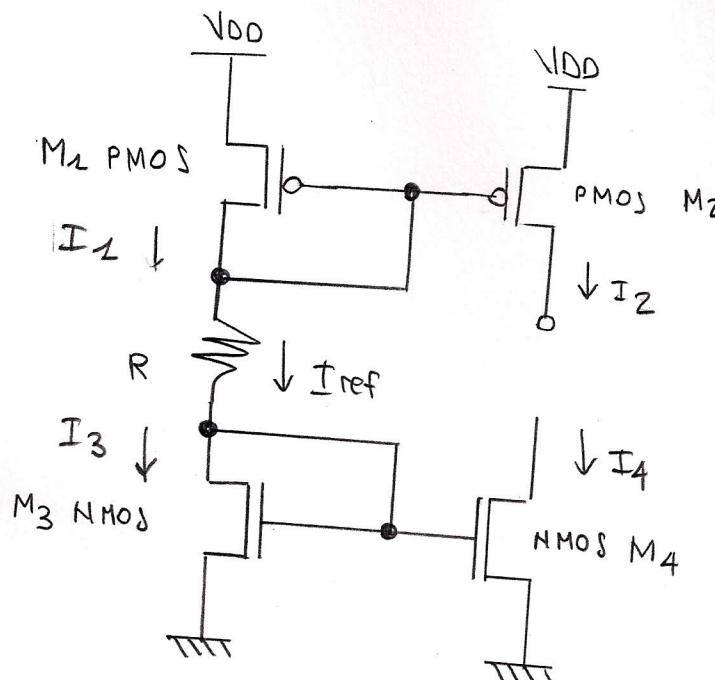
VOGLIO  $V_E > V_C \Rightarrow$  A 1 DEVO METTERE  $V_{CC} = +15V$

NEL PUNTO ② POSSO METTERE MASSA O  $V_{EE} = -15V$ , MENO MASSA PER RIDURRE I CONSUMI

$$R: V_{CC} - V_{BE1} - I_{ref} R = 0 \quad \underbrace{\qquad}_{0.5mA} \Rightarrow R = 28.8 \text{ k}\Omega$$

OSSERVAZIONE: A PARITO' DI  $I_{ref}$  E DEL VALORE ASSUNTO DELLE TENSIONI DI AUMENTAZIONE NON C'E' DIFFERENZA DI R TRA SPECCHIO A ppm E SPECCHIO A pmp.

DOPPIO SPECCHIO DI CORRENTE A MOSFET



DATI

$$V_{DD} = 15 \text{ V}$$

$$I_{ref} = 1 \text{ mA}$$

$$\frac{W_1}{L_1} = \frac{50}{10} = \frac{W_2}{L_2}$$

$$\frac{W_3}{L_3} = \frac{25}{10} \quad \frac{W_4}{L_4} = \frac{50}{40}$$

$$V_{TM} = 1 \text{ V}, \quad V_{TP} = -1 \text{ V}$$

$$\mu_n C_{ox} = 50 \mu\text{A}/\text{V}^2$$

$$\mu_p C_{ox} = 25 \mu\text{A}/\text{V}^2$$

$$\lambda_M = \lambda_P = 0$$

I TRANSISTORS SONO ALLESI  
IN SATURAZIONE (NO VERIFICA)

DETERMINARE

- 1) R
- 2)  $I_2$
- 3)  $I_4$

SOLUZIONE

$$1) \text{ MOSFET : } I_D = k \left( V_{GS} - V_T \right)^2 \left( 1 + \frac{\lambda}{V_{DS}} \right)^0$$

$$\left\{ \begin{array}{l} k = \left( \frac{W}{L} \right) \frac{k_m}{2} = \left( \frac{W}{L} \right) \frac{\mu_n C_{ox}}{2} \\ V_T = V_{TM} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} k = \left( \frac{W}{L} \right) \frac{k_p}{2} = \left( \frac{W}{L} \right) \frac{\mu_p C_{ox}}{2} \\ V_T = V_{TP} \end{array} \right.$$

TRAJUNTO EFFETTUATO DI MODULAZIONE  
DELLA LUNGHEZZA DI CANALE

x NMOS

x PMOS

$$V_{DD} - V_{GS1} - R I_{ref} - V_{GS3} = 0 \Rightarrow M_1 SERVONO V_{GS1} E V_{GS3}$$

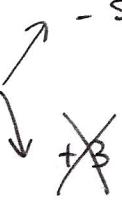
$$F_1 = \left( \frac{w_1}{L_1} \right) \mu_p \frac{C_{ox}}{2} (V_{GS1} - V_{TP})^2 = I_{ref}$$

$$\Rightarrow V_{GS1}^2 - 2V_{TP}V_{GS1} + V_{TP}^2 = I_{ref} \left( \frac{L_1}{w_1} \right) \frac{2}{\mu_p C_{ox}}$$

ORA CON

$$V_{GS1-2} = \frac{2V_{TP} \pm \sqrt{4V_{TP}^2 - 4(V_{TP}^2 - I_{ref} \frac{L_1}{w_1} \frac{2}{\mu_p C_{ox}})}}{2}$$

$$V_{GS1-2} = -1 \pm 4$$


⇒ PRENDO QUESTA POICHÉ SUPPOGO  
IL TRANSISTOR ACCESO

PER M<sub>3</sub> AYR01

$$\left( \frac{w_1}{L_1} = 2 \frac{w_3}{L_3}, \mu_m C_{ox} = 2 \mu_p C_{ox}, \text{ STESSA } I_{ref} \right)$$

$$V_{GS3-2} = +1 \pm 4$$


⇒ SCEGLGO QUESTO VALORE

ORA HO  $V_{GS1-3}$ , POSSO DETERMINARE R

$$R = \frac{(V_{DD} - V_{SG1}) - V_{GS3}}{I_{ref}} = 5 k\Omega$$

$$\begin{array}{l} 2) I_3 \\ 3) I_4 \end{array}$$

$I_{D1} = I_{D3}$  POICHÉ LE CORRENTI DI GATE DEI TRANSISTORI MOS POSSONO CONSIDERARSI NUOVE

AUORA  $I_3 = I_{ref} = 1 \mu A$

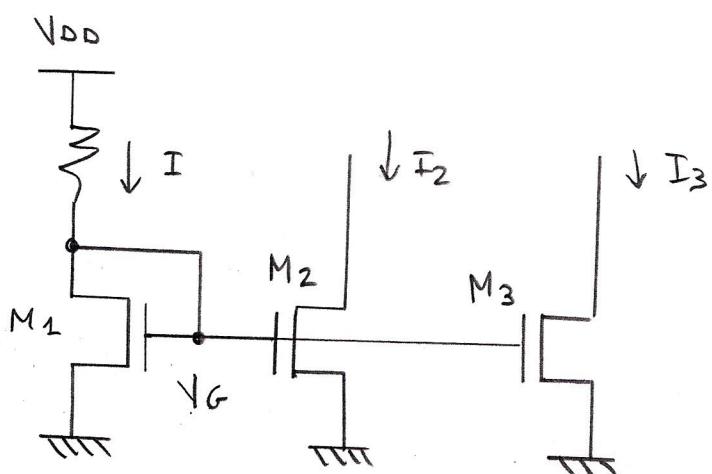
E, siccome  $\frac{W_4}{L_4} = 2 \frac{W_3}{L_3}$  E SONO ENTRAMBI NMOS (PER ENTRAMBI  $\mu_{ncox}$ )

AVRO'

$$I_4 = 2 I_{ref} = 2 \mu A$$

### PRIMA PARTE ESECUZIONE 8

PECCHIO MULTIPLO



DATI

$$I = 1 \mu A$$

$$V_{DD} = 10 V$$

$$V_{TM} = 1 V$$

$$\mu n \text{ Cox} = 50 \mu A/V^2$$

$$\frac{W_1}{L_1} = \frac{100}{40}$$

$$\lambda_n = \lambda_p = 0$$

$$\frac{W_2}{L_2} = \frac{50}{40}$$

$$\frac{W_3}{L_3} = \frac{200}{40}$$

MOS ACCESI IN SATURAZIONE

DETERMINARE

1) R

2)  $I_2$

3)  $I_3$

SOLUZIONE

$$1) V_{DD} - RI_{ref} - V_{GS1} = 0 \Rightarrow \text{trovo } V_{GS1}$$

x

$$I_{O1} = \frac{1}{2} \left( \frac{W_1}{L_1} \right) M_m C_{ox} (V_{GS1} - V_{TM})^2 = I$$

$$\Rightarrow V_{GS1}^2 - 2V_{GS1} - 3 = 0 \Rightarrow V_{GS1} = \frac{2 \pm 4}{2}$$

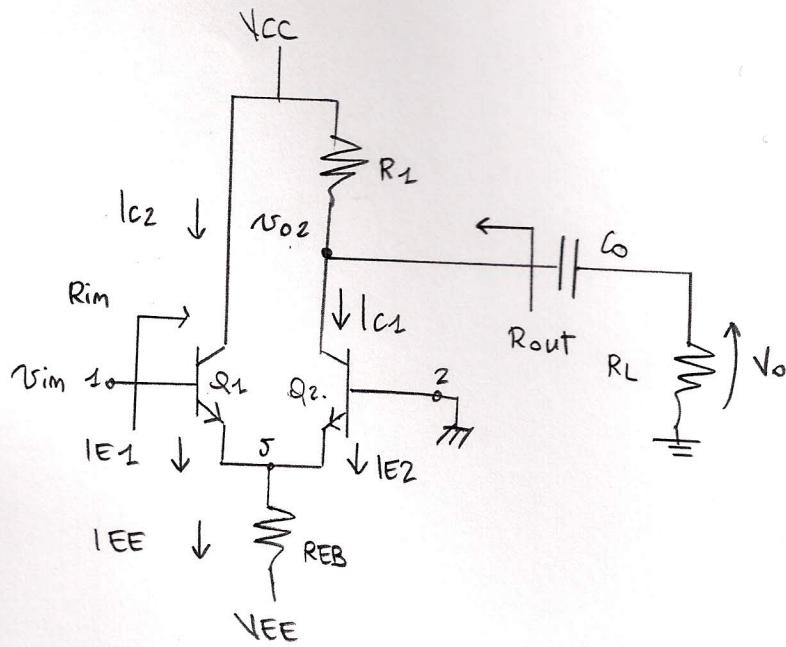
3 soluzioni

-X

$$2) 3) I_2 = \left( \frac{W_2}{L_2} \right) / \left( \frac{W_1}{L_1} \right) I = 0.5 \text{ mA}$$

$$I_3 = \left( \frac{W_3}{L_3} \right) / \left( \frac{W_1}{L_1} \right) I = 2 \text{ mA}$$

COPPIA DIFFERENZIALE A BJT SINGLE-ENDED



DATI

$$V_{CC} = 15V$$

$$V_{EE} = -15V$$

$$R_{EB} = 1.5k\Omega$$

$$R_L = 2k\Omega$$

$$\beta_1 = \beta_2 = 200$$

$$V_{BE1} = V_{BE2} = 0.6V$$

$$Q_1 = Q_2$$

$$R_L = 1k\Omega$$

DETERMINARE

- 1) PUNTO DI LAVORO ( $V_{CE}, I_C$ ) DI  $Q_1$  E  $Q_2$
- 2) GUADAGNO DI TENSIONE DELL'AMPLIFICATORE
- 3)  $R_{in}$ ,  $R_{out}$

1) NELL'ANALISI DEL PUNTO DI LAVORO SE NON È STATO SPECIFICATO ALCUN VALORE DI RIPOSO DELLA TENSIONE DI INGRESSO QUESTO SI DEVE CONSIDERARE NUOVO.

CALCOLUO ANO  $(I_C, V_{CE})$  PER I 2 TRANSISTORI.

IL CIRCUITO RISULTA SIMMETRICO, QUINDI LE CORRENTI DI EMISSORE SONO uguali  $\xrightarrow{(*)}$

LA TENSIONE AL NODO 7 SARÀ  $-V_{BE}$  ( $V_{BE1} = V_{BE2} \hat{=} V_{BE}$ )  $\Rightarrow$

$$V_{EE} + R_{EB} I_{EE} + V_{BE} = 0$$

$$I_{EE} = \frac{-V_{BE} - V_{EE}}{R_{EB}} = 96 \text{ mA}$$

$$I_E1 = I_E2 = \frac{1}{2} I_{EE} = 48 \text{ mA}$$

DATI  $I_E1 = I_E2$  CALCOLO LE CORRENTI DI COLLETTORE

$$\begin{aligned} I_C &= I_{C2} = \beta_1 I_{B1} \\ &= \beta_1 \frac{I_E1}{\beta_1 + 1} = 4.78 \text{ mA} \end{aligned}$$

$$\left[ \begin{aligned} I_E &= I_C + I_B = \beta_1 I_B + I_B = I_B (\beta_1 + 1) \\ &\Rightarrow I_B = \frac{I_E}{\beta_1 + 1} \end{aligned} \right]$$

MANCA  $V_{CE}$

$$V_{CC} - V_{CE1} - V_{BE} = 0 \Rightarrow V_{CE1} = V_{CC} + V_{BE} = 15.6 \text{ V} ( > 0.2 \text{ V, ok})$$

E ANALOGAMENTE:

26/38

$$V_{CE} - R_L I_{C1} - V_{CE2} - V_{BE} = 0 \Rightarrow V_{CE2} = V_{CC} - R_L I_{C1} - V_{BE} = 10.82 \text{ V}$$

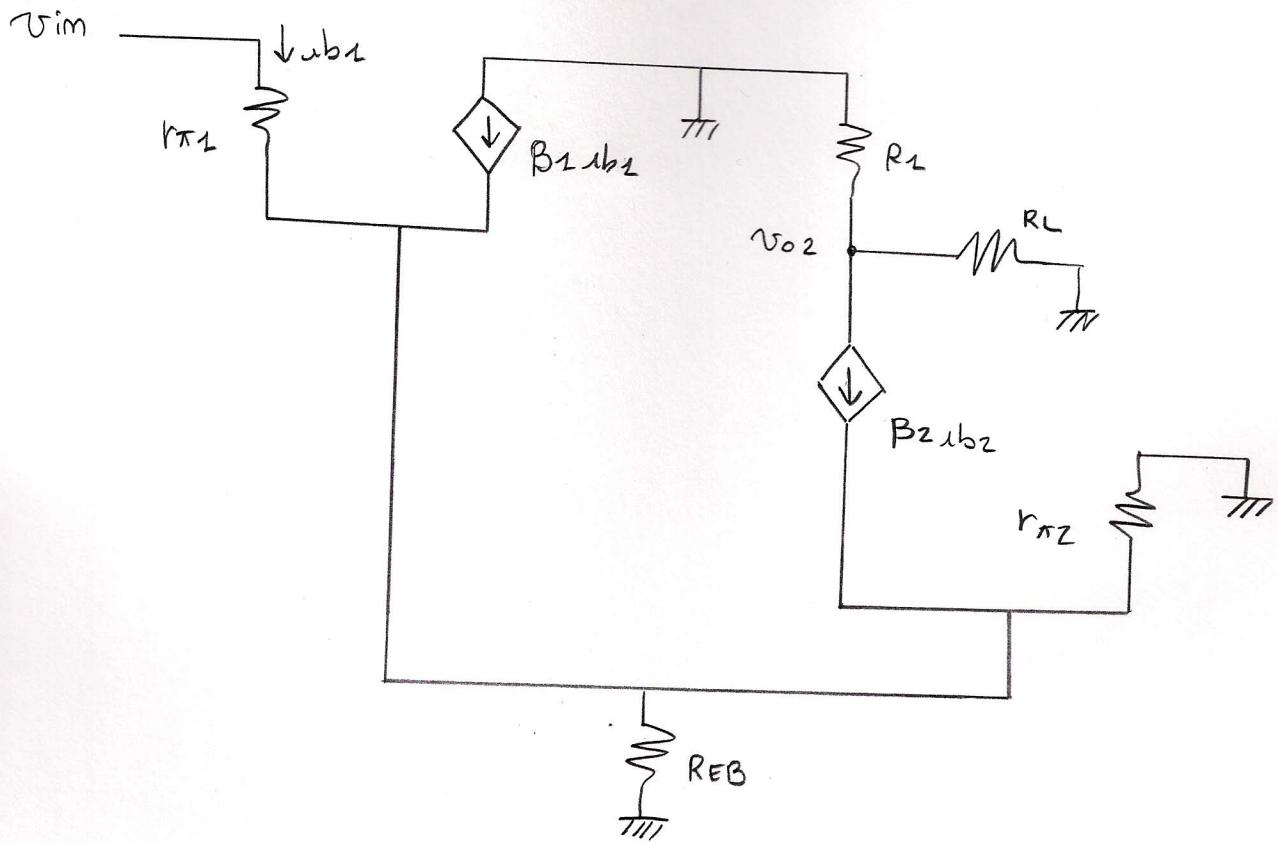
$\curvearrowleft$  ( $> 0.2 \text{ V}, 0 \text{ K}$ )

LA CORRENTE CHE VA TERSO  
CO SI PUO' CONSIDERARE NUOVA IN DC

(\*) IN REALTA' IL CIRCUITO NON E' PERFETTAMENTE SIMMETRICO,  
IN QUANTO SUL RAMO DI Q2 HO UNA  $R_L$  IN PIU', E INFATI LE  
 $V_{CE}$  SONO DIVERSE.

MA, NEL CASO IN QUI LA TENSIONE DI EARLY  $V_{EARLY}$  È GRANDE  
(NOI CONSIDERIAMO SEMPRE  $V_{EARLY} = \infty$ ), LE CORRENTI DI  
COLLETTORE DIPENDONO POCO DAUNA  $V_{CE}$ , E QUINDI UNA  
PICCOLA DIFFERENZA NELLA  $V_{CE}$  E' TRASNURABILE NEL GIUDICARE  
LA SIMMETRIA.

## 2) CIRCUITO EQUIVALENTE AI PICCOLI SEGNALI



$$r_{\pi 1} = r_{\pi 2} = \frac{V_T}{I_B} = \frac{\beta V_T}{I_C} = 1088 \Omega$$

NEL CORSO ABBIAMO CALCOLATO IL GUADAGNO DI TENSIONE IN 2 CAD:

- 1- INGRESSO DIFFERENZIALE
- 2- INGRESSO DI MODO COMUNE

PUESTO CAD NON RIENTRA IN QUESTI DUE PERO' E' POSSIBILE RICONDURSI AI RISULTATI GIA' VISTI. PER DEFINIZIONE:

$$V_{id} = V_{i1} - V_{i2} = V_{im}$$

$$V_{icm} = \frac{V_{i1} + V_{i2}}{2} = \frac{V_{im}}{2}$$

M1 INTERESSA VAWTORE  $V_{o2}$

SI DIMO STRA CHE  $V_{o2}$  PUÒ ESSERE SCRITTO COME SOMMA DI STAZIONE DI DUE TERMINI:

$$V_{o2} = A_{vcm} V_{icm} + A_{vd2} V_{id}$$

DONDE

$A_{vcm}$  = GUADAGNO DI TENSIONE DI MODO COMUNE

$A_{vd2}$  = GUADAGNO DI TENSIONE DIFFERENZIALE PRESO SUL RAZZO 2.

IN IPOTESSI DI LINEARITÀ (PICCOLO SEGNALE) POSSO SCRIVERE:

$$\begin{cases} V_{o2} = A_{11} V_{i1} + A_{12} V_{i2} \\ V_{o2} = A_{21} V_{i1} + A_{22} V_{i2} \end{cases} \quad \text{P.D.E.}$$

$A_{11}, A_{12}, A_{21}, A_{22}$  SONO COEFFICIENTI

LA SIMMETRIA DEL CIRCUITO IMPOSTA  $A_{11} = A_{22}$ ,  $A_{12} = A_{21}$

POI, IMPOSANDO  $V_{i2} = 0$   $\Rightarrow V_{i1} = 0$  OTTENGO

$$\begin{cases} V_{o1} = A_{11} V_{i1} \\ V_{o2} = A_{21} V_{i1} \end{cases} \quad \left| \begin{array}{c} \\ V_{i2}=0 \end{array} \right. \quad \begin{cases} V_{o1} = A_{12} V_{i2} \\ V_{o2} = A_{22} V_{i2} \end{cases} \quad \left| \begin{array}{c} \\ V_{i1}=0 \end{array} \right.$$

PER SIMMETRIA:

$$V_{o1} = A_{11} V_{i1} = V_{o2} = A_{22} V_{i2}$$

$$V_{o2} = A_{21} V_{i1} = V_{o1} = A_{12} V_{i2}$$

E POICHÉ

$$V_{i1} = V_{ican} + \frac{V_{id}}{2}$$

$$V_{i2} = V_{ican} - \frac{V_{id}}{2}$$

INFATI:

$$\begin{aligned} V_{ican} + \frac{V_{id}}{2} &= \frac{V_{i1}+V_{i2}}{2} + \frac{V_{i1}-V_{i2}}{2} = V_{i1} \\ V_{ican} - \frac{V_{id}}{2} &= \frac{V_{i1}+V_{i2}}{2} - \frac{V_{i1}-V_{i2}}{2} = V_{i2} \end{aligned}$$

HO

$$\begin{cases} v_{01} = A_{11} \left( v_{icm} + \frac{v_{id}}{2} \right) + A_{12} \left( v_{icm} - \frac{v_{id}}{2} \right) \\ v_{02} = A_{21} \left( v_{icm} + \frac{v_{id}}{2} \right) + A_{22} \left( v_{icm} - \frac{v_{id}}{2} \right) \end{cases}$$

E

$$\begin{cases} v_{01} = (A_{11} + A_{12}) v_{icm} + \left( \frac{A_{11} - A_{12}}{2} \right) v_{id} \\ v_{02} = (A_{21} + A_{22}) v_{icm} + \left( \frac{A_{21} - A_{22}}{2} \right) v_{id} \end{cases}$$

ORD POSSO CALCOLARE

$$v_{od} = v_{01} - v_{02} \quad \& \quad v_{ocm} = \frac{v_{01} + v_{02}}{2}$$

$$v_{od} = (A_{11} + A_{12}) v_{icm} + \left( \frac{A_{11} - A_{12}}{2} \right) v_{id} - (A_{21} + A_{22}) v_{icm} - \left( \frac{A_{21} - A_{22}}{2} \right) v_{id}$$

$$v_{ocm} = (A_{11} + A_{12}) v_{icm} + \left( \frac{A_{11} - A_{12}}{2} \right) \frac{v_{id}}{2} + (A_{21} + A_{22}) \frac{v_{icm}}{2} + \left( \frac{A_{21} - A_{22}}{2} \right) \frac{v_{id}}{2}$$

POICHE'

$$A_{11} = A_{22}, \quad A_{12} = A_{21} \Rightarrow A_{11} + A_{12} = A_{22} + A_{21}$$

E QUINDI:

$$v_{od} = \left( \frac{A_{11} - A_{22} - A_{21} + A_{22}}{2} \right) v_{id} = \frac{A_{11} - A_{12}}{2} v_{id}$$

$$v_{ocm} = \left( \frac{A_{11} + A_{12} + A_{21} + A_{22}}{2} \right) v_{icm} = \left( \frac{2A_{11} + 2A_{12}}{2} \right) v_{icm} = (A_{11} + A_{22}) v_{icm}$$

## OSSERVAZIONE:

SE L'INGRESSO È PURAMENTE DI MODO COMUNE L'Uscita È PURAMENTE DI MODO COMUNE, VICEVERSA, SE L'INGRESSO È PURAMENTE DIFFERENZIALE L'Uscita SARÀ PURAMENTE DI MODO DIFFERENZIALE

INFATI:

$$\text{SE } v_{icm} = 0 \quad v_{o1} = \left( \underbrace{\frac{A_{11} - A_{12}}{2}} \right) v_{id}$$

= GUADAGNO DI TENSIONE DI MODO DIFFERENZIALE  
CON INGRESSO SINGLE-ENDED (z)  $\hat{=} A_{vds1}$

$$\text{SE } v_{idm} = 0 \quad v_{o2} = \left( \frac{A_{21} - A_{22}}{2} \right) v_{id}$$

= GUADAGNO DI TENSIONE DI MODO DIFFERENZIALE  
CON INGRESSO SINGLE-ENDED (z)  $\hat{=} A_{vds2}$

$$\text{HO } A_{vds1} = -A_{vds2}$$

$$\text{SE INVECE PONGO } v_{id} = 0 \quad v_{o1} = v_{o2} = \left( \underbrace{A_{11} + A_{12}} \right) v_{icm}$$

$A_{vcm}$

INDIPENDENTE DA DONDE  
PRENDO L'Uscita

RIS:

TUTTO QUESTO PER DEMONSTRARE CHE, IN IPOTESI DI LINEARITÀ E SIMMETRIA,  
QUALSIASI SIANO LE TENSIONI DI INGRESSO POSSO SEMPRE SVIVERE LE  
TENSIONI D'USCITA COME COMBINAZIONE DI DUE TERMINI:

$$v_{o1} = A_{vds1} v_{id} + A_{vcm} v_{icm}$$

$$v_{o2} = A_{vds2} v_{id} + A_{vcm} v_{icm}$$

$$\tau_{id} = \tau_{i,1} - \tau_{i,2} = \tau_{im}$$

$$\tau_{iam} = \frac{\tau_{i,1} + \tau_{i,2}}{2} = \frac{\tau_{im}}{2}$$

VOGLIO CALCOLARE  $\frac{\tau_{o,2}}{\tau_{im}} = Av$

$$Av = \frac{Ards_2 \tau_{id} + Arcm \tau_{iam}}{\tau_{im}} = \frac{Ards_2 \tau_{im} + Arcm \frac{\tau_{im}}{2}}{\tau_{im}}$$

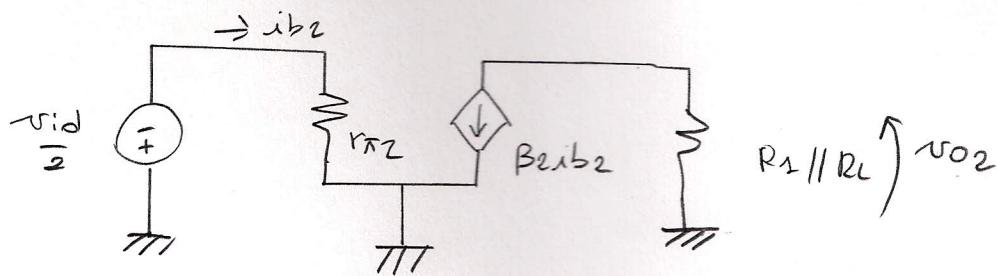
$$= Ards_2 + \frac{Arcm}{2}$$

In CN:

$$Ards_2 = \frac{\tau_{o,2}}{\tau_{id}}$$

$$Arcm = \frac{\tau_{o,cm}}{\tau_{im}} = \frac{\tau_{o,1} + \tau_{o,2}}{2} \cdot \frac{1}{\tau_{im}} = \frac{\tau_{o,2}}{\tau_{im}}$$

ANALIZZO IL SEMICIRCUITO DI MODO DIFFERENZIALE, CALCOLO  $A_{v_{d2}}$



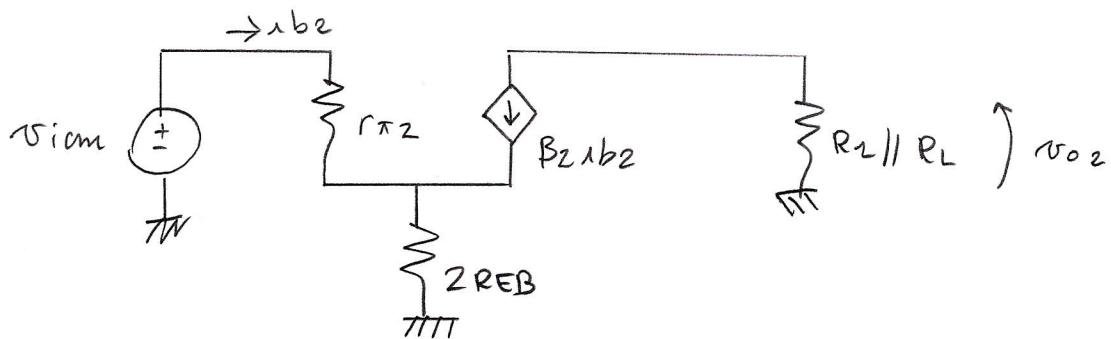
$$A_{v_{d2}} = \frac{v_{o2}}{v_{id}}$$

$$v_{o2} = -B_2 v_{b2} (R_L \parallel R_L)$$

$$-\frac{v_{id}}{2} = r_{\pi 2} v_{b2} \Rightarrow v_{id} = -2(r_{\pi 2}) v_{b2}$$

$$\frac{v_{o2}}{v_{id}} = \frac{B_2 (R_L \parallel R_L)}{2 r_{\pi 2}} = 61,27$$

ANALIZZO IL SEMICIRCUITO DI MODO COMUNE, CALCOLO  $A_{v_{cm}}$



$$A_{v_{cm}} = \frac{v_{o2}}{v_{icm}}$$

$$v_{o2} = -B_2 v_{b2} (R_L \parallel R_L)$$

$$v_{icm} = v_{b2} r_{\pi 2} + (\beta_2 + 1) v_{b2} 2 R_{EB}$$

$$\frac{v_{o2}}{v_{in}} = \frac{-\beta_2 (R_L || R_L)}{r_{\pi 2} + 2(\beta_2 + 1) R_E B} = 0.22$$

QUINDI

$$A_v = A_{vdss} + \frac{A_{vcm}}{2}$$

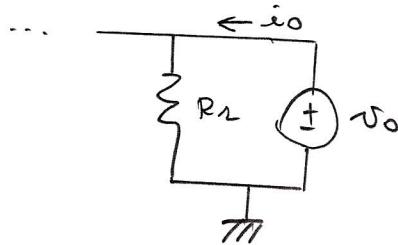
3) CALCOLA  $R_{in}$  E  $R_{out}$ 

$$R_{in} = \frac{v_{in}}{i_{b1}} \Rightarrow \text{POSSO CALCOLARE } R_{in} \text{ COME } R_{in} = \frac{v_{id}}{i_{b1}}$$

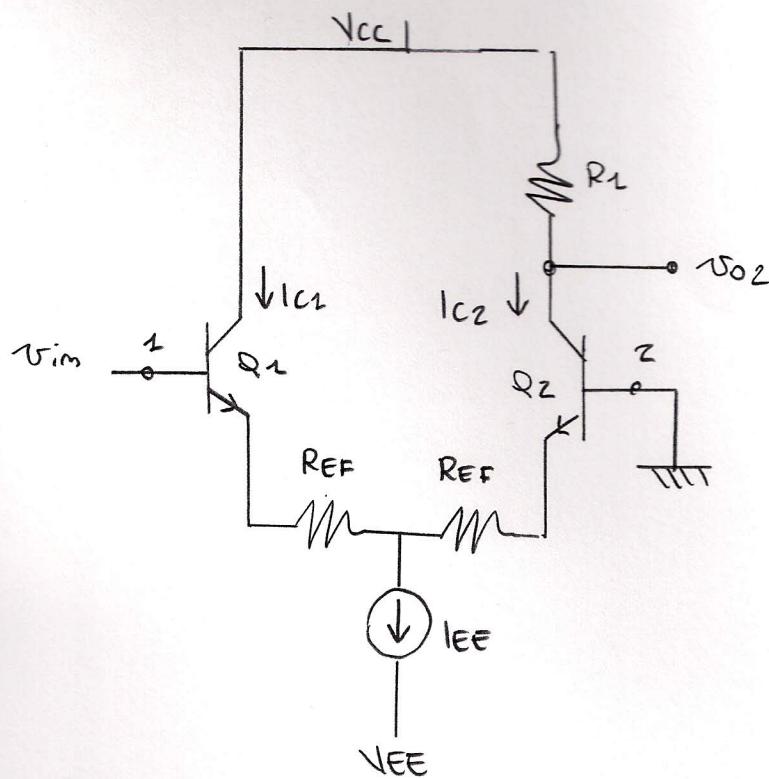
UTIZZANDO IL SEMI CIRCUITO DI MODO DIFFERENZIALE

$$\frac{v_{id}}{2} - r_{\pi 2} i_{in} = 0 \quad v_{id} = 2r_{\pi 2} i_{in}$$

$$\Rightarrow R_{in} = 2r_{\pi 2} = 2180 \Omega$$

 $R_{out} = \frac{v_o}{i_o}$ , STACCIANDO IL CARICO E CORTOCIRCUITANDO L'INPUT:


$$R_{out} = R_L$$



DATI

$$V_{CC} = 15V$$

$$V_{EE} = -15V$$

$$I_{EE} = 10 \text{ mA}$$

$$R_{EE} = 20 \text{ k}\Omega$$

$$R_L = 1 \text{ k}\Omega$$

$$\beta = 200$$

$$Q_1 = Q_2$$

$$I_{C1} \approx I_{C2} \approx \frac{1}{2} I_{EE} = 5 \text{ mA}$$

DETERMINARE

$$1) A_v = \frac{v_{o2}}{v_{im}}$$

$$2) R_{im}$$

JOWZIONE

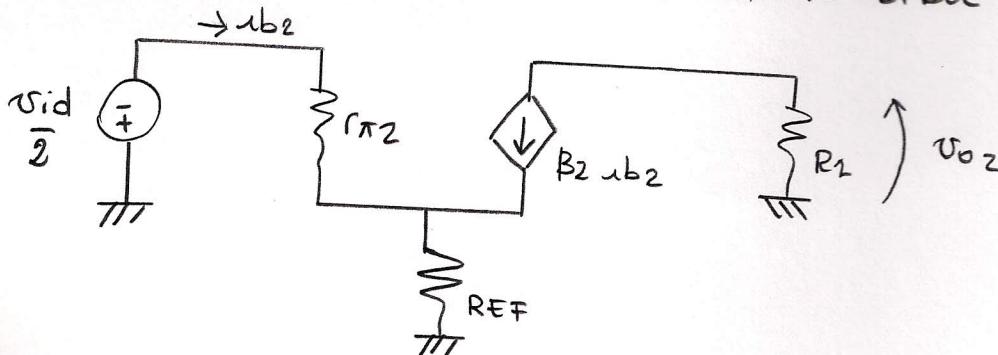
$$A_v = \frac{v_{o2}}{v_{im}}, \quad v_{o2} = A_{vd2} v_{id} + A_{vcm} v_{icm}$$

$$v_{id} = v_{i1} - v_{i2} = v_{im}$$

$$v_{icm} = \frac{v_{i1} + v_{i2}}{2} = \frac{v_{im}}{2}$$

$$A_v = \frac{A_{vd2} v_{im} + A_{vcm} \frac{v_{im}}{2}}{v_{im}} = A_{vd2} + \frac{A_{vcm}}{2}$$

CALCOLO ANDS2 E A15 cm

ANDS2  $\rightarrow$  SEMICIRCUITO DI MODO DIFFERENZIALE

$$A_{ANDS2} = \frac{V_{o2}}{V_{id}} , \quad V_{o2} = -\beta_2 i_b2 R_L$$

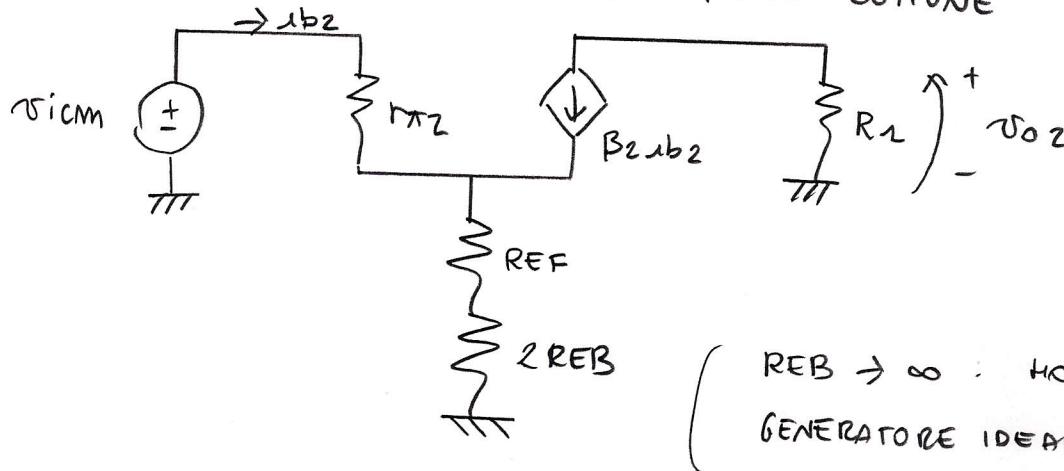
$$-\frac{V_{id}}{2} = r_{pi2} i_b2 - R_{REF} i_b2 (\beta_2 + 1) \Rightarrow$$

$$V_{id} = -2 [r_{pi2} i_b2 + (\beta_2 + 1) i_b2 R_{REF}]$$

$$A_{ANDS2} = \frac{\beta_2 R_L}{2[r_{pi2} + (\beta_2 + 1) R_{REF}]} = 19.76$$

$$\uparrow$$

$$r_{pi2} = \frac{V_T}{I_B2} = \frac{B V_T}{I_C2} = 1040 \Omega$$

A15 cm  $\rightarrow$  SEMICIRCUITO DI MODO COMUNE

$REB \rightarrow \infty$  : HO UN  
 GENERATORE IDEALE DI CORRENTE

$$A_{vcm} = \frac{v_{o2}}{v_{im}}, \quad v_{o2} = -R_L \cdot b_2 \beta_2$$

$$v_{im} = b_2 r_{\pi 2} + b_2 (\beta + 1) (R_{EF} + 2R_EB)$$

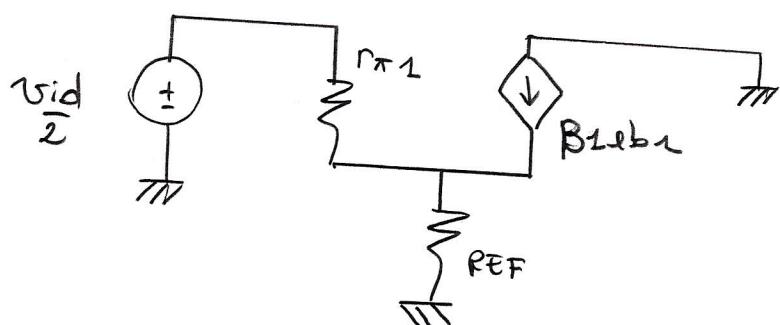
$$A_{vcm} = \frac{-R_L \cdot b_2 \beta_2}{b_2 r_{\pi 2} + b_2 (\beta + 1) (R_{EF} + 2R_EB)}$$

$\lim_{R_EB \rightarrow +\infty}$   $A_{vcm} = 0 \Rightarrow$  SE IL GENERATORE DI CORRENTE E' IDEALE IL GUADAGNO DI MODO COMUNE E' NUVO

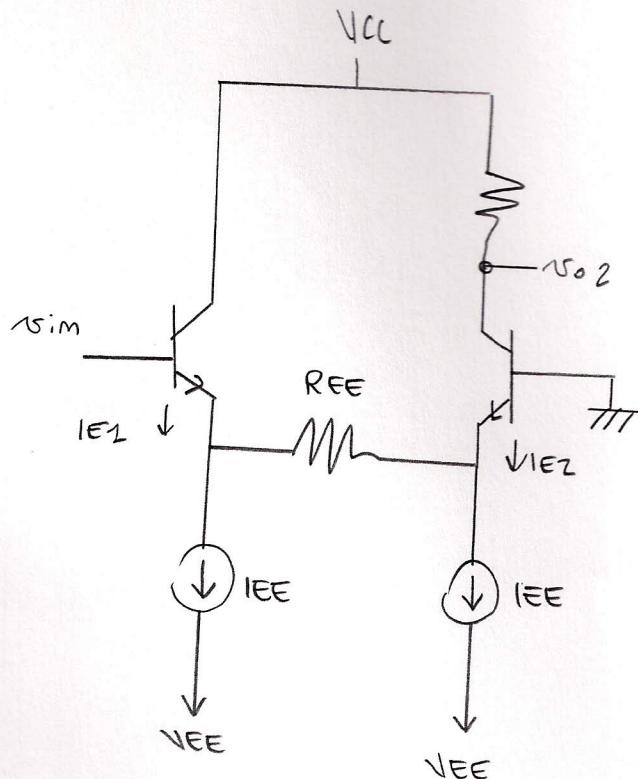
QUINDI  $A_v = A_{vdss2} + \frac{A_{vcm}}{2} = A_{vdss2} = 18.76$

2) Rim

DISEGNO IL CIRCUITO DI MODO DIFFERENZIALE



$$R_{im} = \frac{v_{im}}{b_2} = \frac{v_{id}}{b_2} = 2 [r_{\pi 1} + (\beta + 1) R_{EF}] = 10.1 \text{ k}\Omega$$



DATI

$$V_{CC} = 15V$$

$$V_{EE} = -15V$$

$$\beta = 200$$

$$Q_1 = Q_2$$

$$R_{EE} = 100 \mu\Omega$$

$$I_{EE} = 1 \mu A$$

$$R = 10 k\Omega$$

DETERMINAZIONE

$$A_v = \frac{V_{O2}}{V_{im}}$$

SOLUZIONE

$$\text{DIMETRICA} \Rightarrow I_{E1} = I_{E2} = I_{EE}$$

$$r_{\pi 1} = r_{\pi 2} = \frac{V_T}{IB} = \frac{\beta V_T}{IC} \sim \frac{\beta V_T}{I_{EE}} = 5.2 k\Omega$$

↓  
TRASNURO

LA CORRENTE

DI BASE,  $\beta$  È MOLTO ALTO

$$A_v = \frac{V_{O2}}{V_{im}} = \frac{A_{vd} \beta_2 V_{i,d} + A_{vcm} \beta_2 V_{icm}}{V_{im}}$$

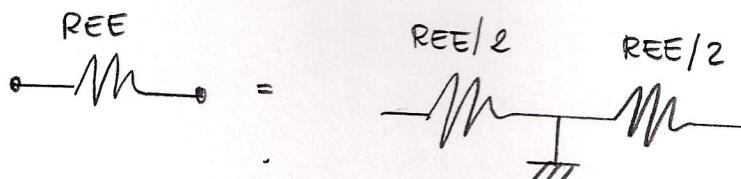
$$V_{i,d} = V_{i1} - V_{i2} = V_{im}$$

$$V_{icm} = \frac{V_{i1} + V_{i2}}{2} = \frac{V_{im}}{2}$$

$$A_{Vr} = A_{Vds2} + \frac{A_{Vcm}}{2}$$

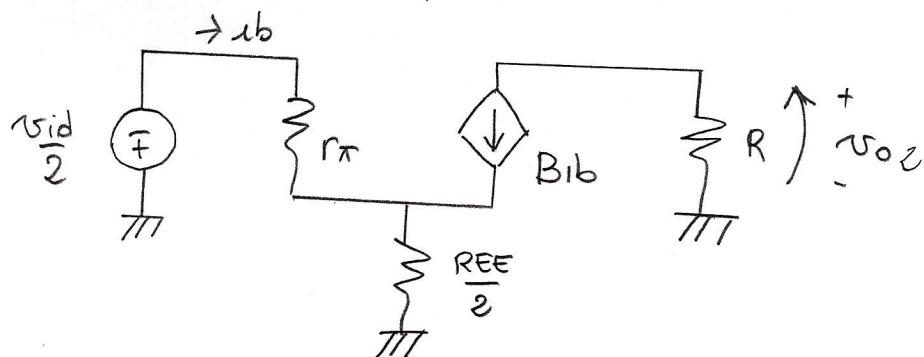
In questo caso però il circuito è diverso rispetto al caso tradizionale, infatti ho una resistenza REE.

Si possiamo ricondurre al caso originale poiché



DEL FATO CHE QUI CI SIANO DUE GENERATORI ANZICHE' UNO NON IMPORTA: SONO CIRCUITI APERTI AL PICCOLO SEGNALE

$$\text{CALCOLO } A_{Vds2} = \frac{V_{o2}}{V_{id}}$$



$$-\frac{V_{id}}{2} = I_b r_\pi + I_b (\beta + 1) \frac{R_{EE}}{2}, \quad V_{o2} = -\beta i_b R$$

$$\text{QUINDI } A_{Vds2} = \frac{-\beta i_b R}{-2 [k_r r_\pi + k_r (\beta + 1) \frac{R_{EE}}{2}]} = \frac{\beta R}{2 [r_\pi + (\beta + 1) \frac{R_{EE}}{2}]} = 65.6$$

ESSENDO I GENERATORI DI CORRENTE IDEALI,  $A_{Vcm} = 0 \Rightarrow$

$$A_{Vr} = A_{Vds2} = 65.6$$