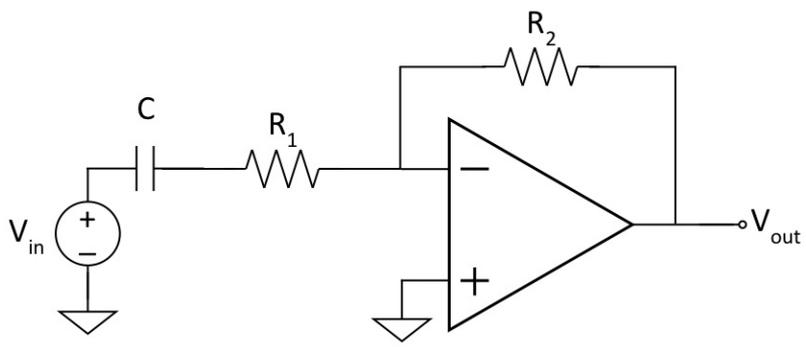


1)

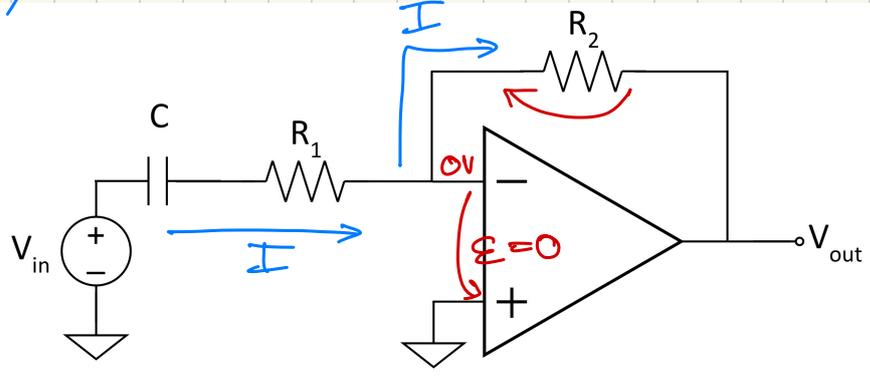
- 1) Determinare l'espressione del guadagno ideale $G_{ID} = \frac{V_{out}}{V_{in}}$ e tracciarne i diagrammi di Bode quotati di modulo e fase.
- 2) Determinare l'espressione del guadagno d'anello G_{LOOP} e tracciare il diagramma di Bode quotato del modulo.
- 3) Valutare la stabilità del circuito.
- 4) Tracciare il grafico approssimato del guadagno reale $G_{REALE} = \frac{V_{out}}{V_{in}}$



DATI:
 $R_1 = 1k\Omega$
 $R_2 = 10k\Omega$
 $C = 10nF$
Opamp a singolo polo:
 $A_0 = 10^4$
 $f_0 = 100Hz$
 $GBWP = 1MHz$

UN VALORE È RIDONDANTE: ESSENDO A SINGOLO POLO POSSO RIGUARLO

1) È RETROAZIONATO NEGATIVAMENTE



POSSO SCRIVERE I:

$$I = \frac{V_{in}}{\frac{1}{sC} + R_1}$$

CHE AL SOLITO VA IN R_2 E NON NELL'OPAMP

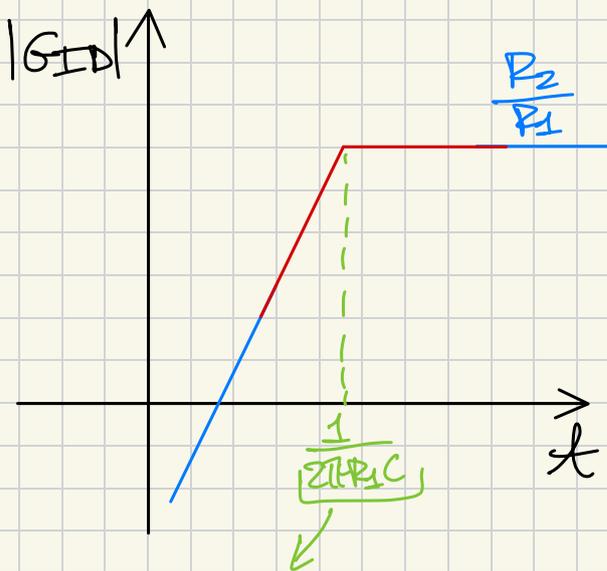
$$\Rightarrow Volt = 0V - IR_2 = - \frac{V_{in} \cdot R_2}{\frac{1}{sC} + R_1}$$

RIPORTIAMOLA IN FORMA CANONICA MOLTIPLICANDO PER sC SOPRA E SOTTO

$$\Rightarrow Volt = -V_{in} \frac{sC R_2}{1 + sC R_1}$$

CHE CI DACE DI PIÙ E LA POSSIAMO

TRACCIARE NEL DIAGRAMMA DI BODE:



PULSAZIONE: FREQUENZA:

$$\frac{1}{1+s\tau} \rightarrow \frac{1}{2\pi f\tau}$$

TRACCIAMOLA PIÙ INTUITIVAMENTE:
 HO UNO ZERO NELL'ORIGINE, QUINDI
 NELL'ORIGINE VARrà 0
 A FREQUENZA INFINITA, HO:

$$\frac{sCR_2}{1+sCR_1} \text{ CON } s \rightarrow +\infty \Rightarrow \frac{\cancel{s}CR_2}{\cancel{s}CR_1} = \frac{R_2}{R_1}$$

$+ \infty \Rightarrow \gg 1$

HO UNO ZERO CHE MI FARÀ CRESCERE
 DI PENDENZA (+20dB), UNO ZERO CHE
 A UN CERTO PUNTO MI FARÀ FARE -20dB
 E ANDARE A REGIME A $\frac{R_2}{R_1}$

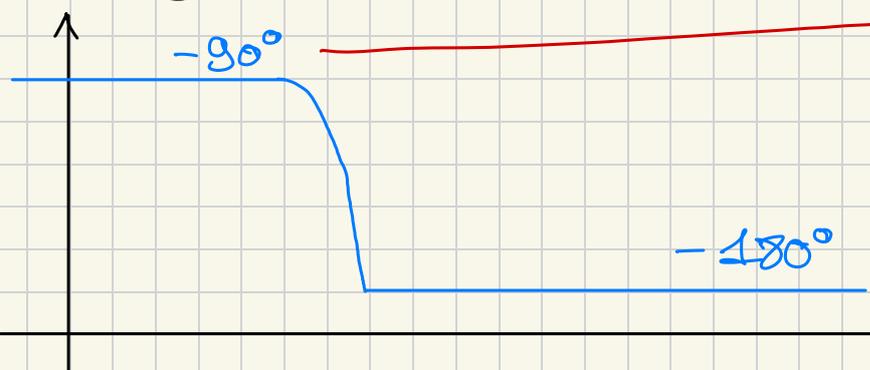
LO VOGLIAMO VERIFICARE ANCHE SUL CIRCUITO INTUITIVAMENTE:
 GUARDIAMO:

A FREQ. NULLA, IL CONDENSATORE È UN APERTO E ALLORA
 V_{in} NON È PIÙ CONNESSA A V_{out} ⇒ G = 0 PERCHÉ NON
 CIRCOLA CORRENTE IN R₁ ED R₂

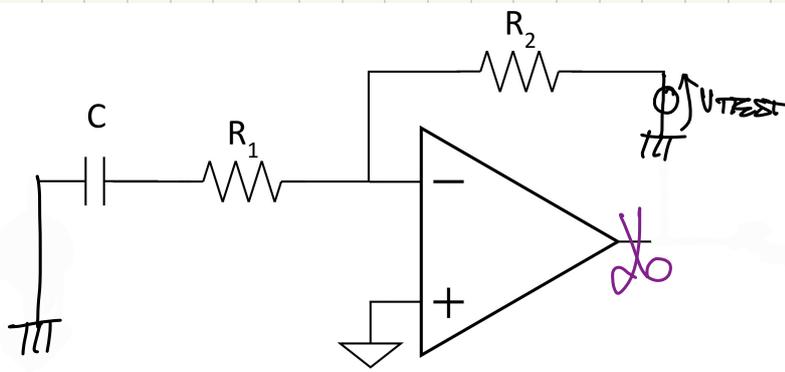
A FREQ. INFINITA, IL CONDENSATORE È UN CORTO E MI
 RITROVO CON LA CLASSICA CONFIGURAZIONE INVERTENTE
 NOTO POI CHE IL FATTO CHE C'È IL CONDENSATORE
 SICURAMENTE INTRODUCE UN POLO (UNO ZERO NON È
 DETTO, MA QUI SÌ)

PER IL DIAGRAMMA DELLA FASE, SAPPIAMO:

- OGNI POLO CI DA -90°
- OGNI ZERO CI DA +90°



PERCHÉ?
 ZERO NELL'ORIGINE, CHE MI
 DA +90°, MA ATTENZIONE,
 LA CONF. È INVERTENTE,
 QUINDI È NEGATIVA
 (PARTO DA UNO SFASAMENTO
 DI -180° + 90°)



VEDO UN PARTITORE:

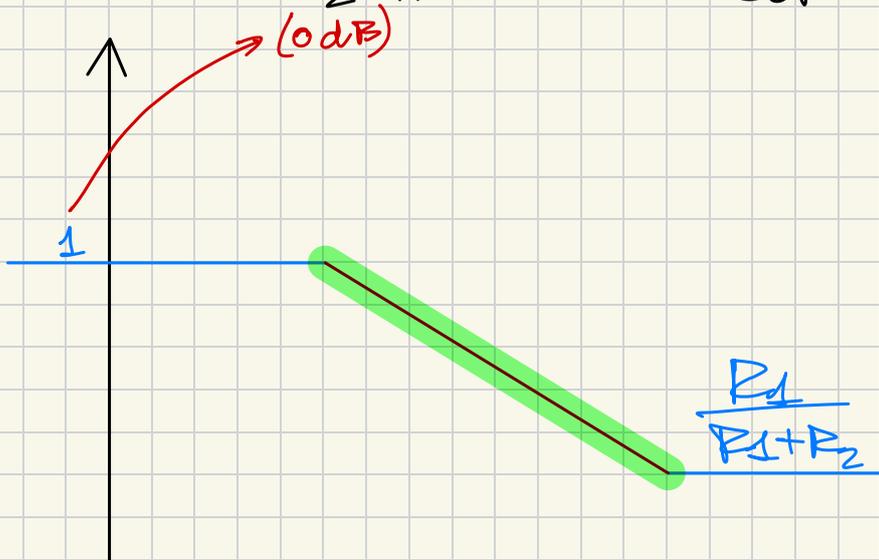
$$G_{loop} = \frac{-A(s) \frac{1}{sC} + R_1}{\frac{1}{sC} + R_1 + R_1} \cdot \frac{sC}{sC} = \frac{-A(s) \frac{1 + sCR_1}{1 + sC(R_1 + R_2)}}{1 + sC(R_1 + R_2)} =$$

LO PERDUO ESPLICITAMENTE

$$= -\frac{A_0}{1 + s\tau_0} \frac{1 + sCR_1}{1 + sC(R_1 + R_2)}$$

NOTIAMO DUNQUE CHE È PIÙ FACILE RAGIONARE SU G_{loop} SENZA $A(s)$ AGGIUNGENDO LA POI ALLA FUNTE COME FACCIAMO?

VEDIAMO A BASSA FREQUENZA: IL COND. È UN APERTO
 \Rightarrow IN R_1 ED R_2 NON CIRCOLA CORRENTE $\Rightarrow A V^-$ HO V_{TEST}



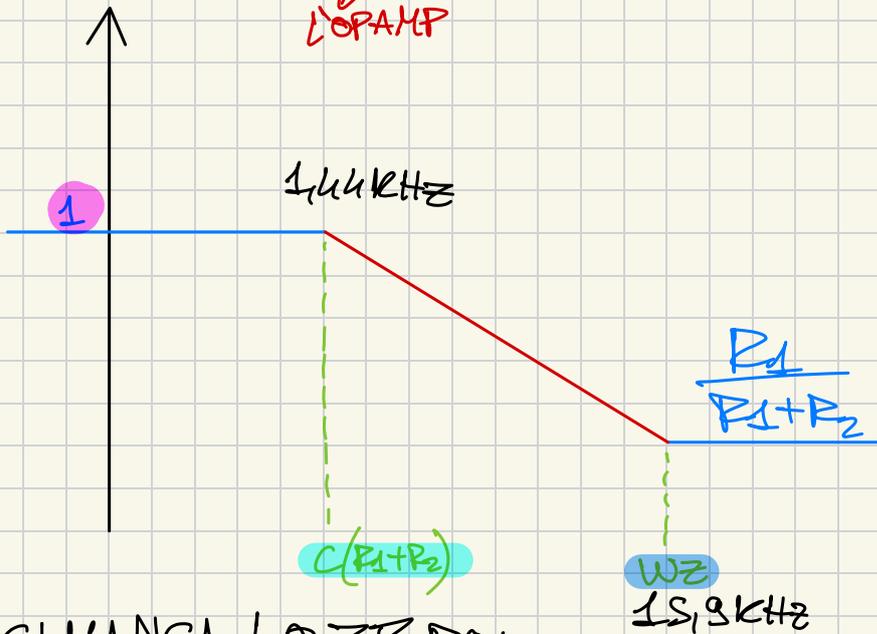
ALL' INFINITO, IL COND. È UN CORTO E HO UN SEMPLICE PARTITORE $\left(\frac{R_1}{R_1 + R_2}\right)$

MA SE COME DICEMO TRASCURIAMO L'OPAMP, IL SOLO CONDENSATORE C DA SICURAMENTE UN POLO (τ)

MAGARI UNO ZERO), MA QUINDI L'UNICO MODO IN CUI LE
CONGIUNGO È

CON IL LOOP POSSO ANCHE CALCOLARE IL POLO DEL
CONDENSATORE: È LA τ DI CARICA!

VEDO $C \cdot (R_1 + \text{OPAMP} // R_2) = C \cdot (R_1 + R_2) \rightarrow$ QUESTO È IL POLO



CI MANCA LO ZERO:

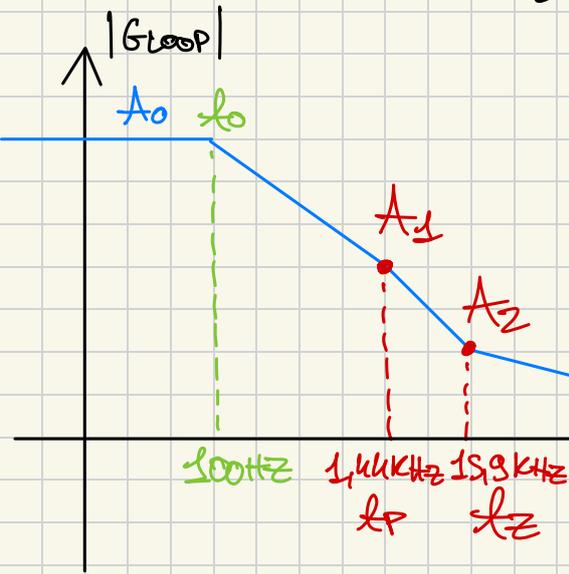
$$1 - \frac{1}{C(R_1+R_2)} = \frac{R_1}{R_1+R_2} \omega_z$$

HO SFRUTTATO IL FATTO CHE IL PRODOTTO GUADAGNO - BANDA
È COSTANTE! (PER -20dB DI PENDENZA, VEDI TEORIA)

$$\Rightarrow \omega_z = \frac{1}{C \cdot R_1}$$

CI TORNA VERIFICANDO L'ESPRESSIONE!

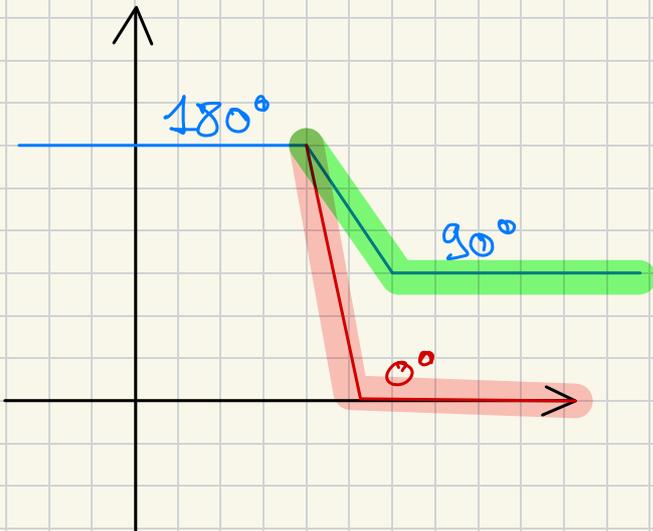
DISSEGNIAMO IL LOOP MATEMATICAMENTE: (PRIMA TRASCRIVIAMOLA)



COMENTO FELICE: IL POLO DELL'OPAMP VIENE SEMPRE A FREQUENZA MOLTO BASSA (PRIMA DI QUALUNQUE ALTRO) \rightarrow (NON SEMPRE)!

"NON È BELLO" ATTRAVERSARE LO 0 CON -40 dB , PERCHÉ VOUL DIRE CHE HO AVUTO DUE POLI E A VO' MARGINE DI FASE O POTENZIALMENTE ($45/0 \dots$) MENTRE CON -20 dB , DOVREBBE ESSERE $> 45^\circ$ "CI PIACE" $> 60^\circ \dots$

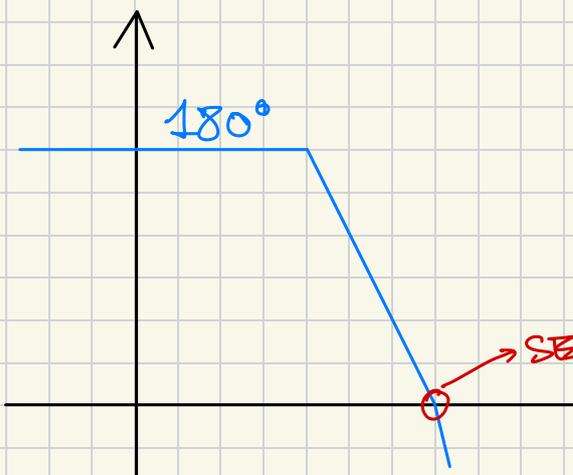
CALCOLO DEL MARGINE DI FASE:



CI PIACE

NON CI PIACE

VIA DI MEZZO:



SECONDO POLO ESATTAMENTE SU ATTRAVERSAMENTO

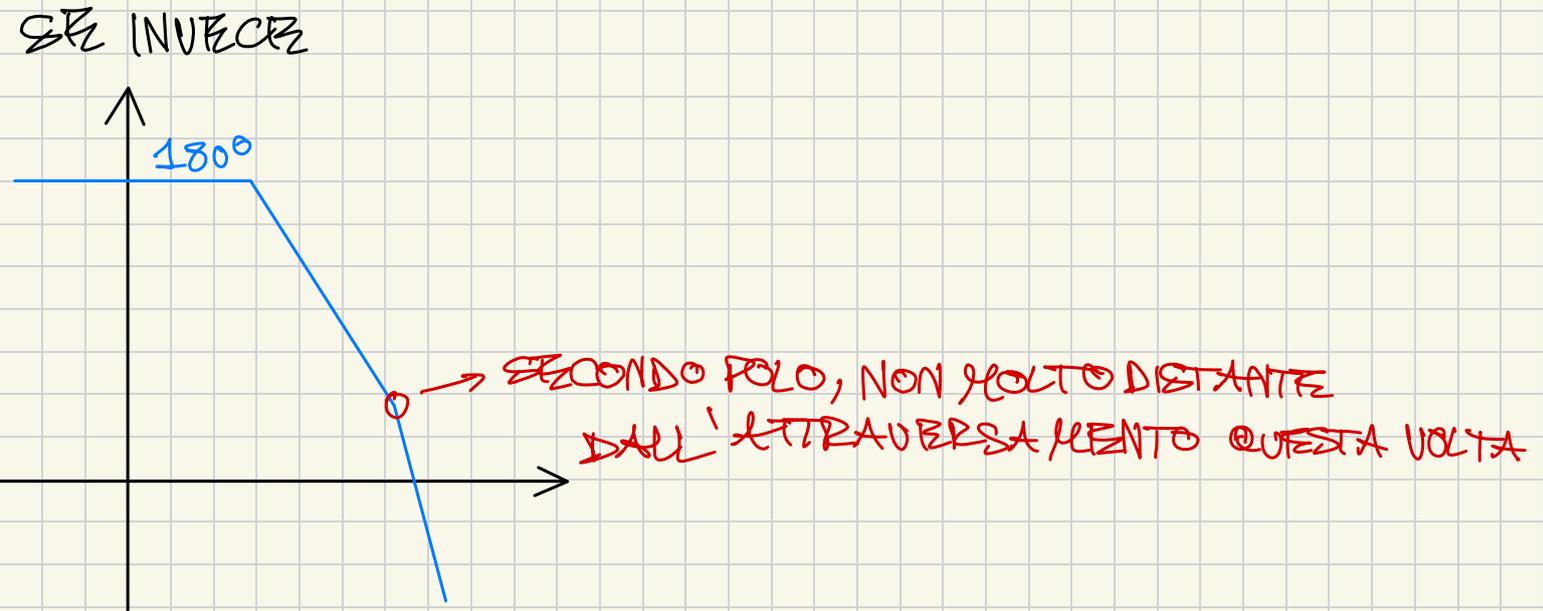
IL MARGINE DI FASE È $180^\circ - 90^\circ - \arctan\left(\frac{\text{POS. ATTRAVERSA M.}}{\text{POS. POLO}}\right)$

PERCHÉ PRIMO POLO MOLTO DISTANTE

UGUALI $\Rightarrow 1$

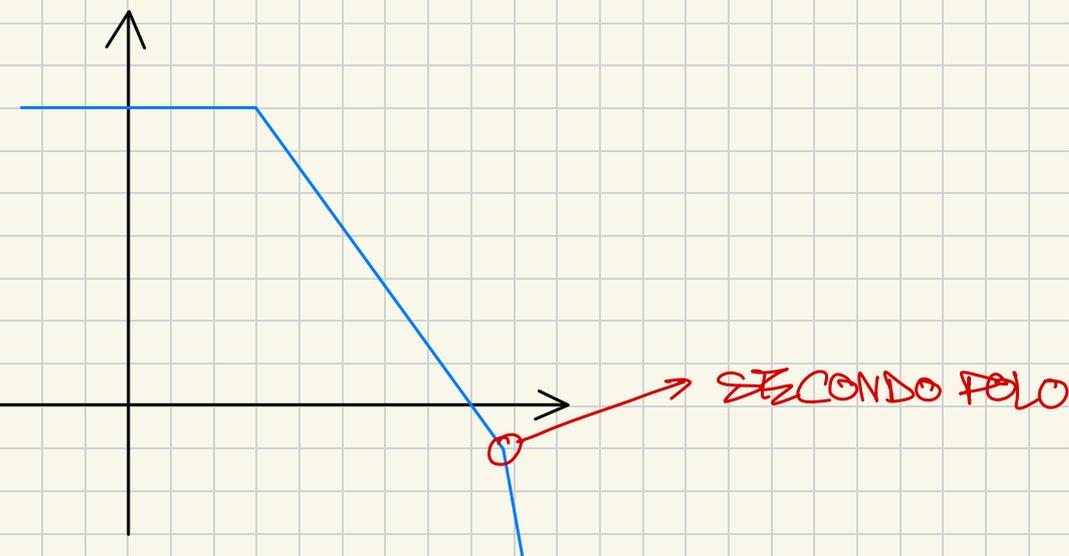
$\Rightarrow 45^\circ$

$= 45^\circ$



AURÒ MARGINE DI FASE $> 45^\circ$ MA $< 90^\circ$

PERCHÉ PUR ATTRAVERSANDO CON -40 dB , VALE POCO SOLO SE MOLTO DISTANTE



PIÙ SI ALLONTANA, MENO PESA

ORA CI MANCA LA ω^* , TORNERÀ IMPORTANTE AL PUNTO SUCCESSIVO: "GIOCHIAMO DI GRAFICA"

POSSO SCRIVERE (PENDENZA -20):

$$A_0 \cdot \omega_0 = A_1 \cdot \omega_p \Rightarrow A_1 = 69,4$$

\downarrow \downarrow \downarrow
 10^4 100Hz $1\mu\text{kHz}$

COME PRIMA (PENDENZA ORA -40):

$$A_1 \cdot \omega_p^2 = A_2 \cdot \omega_z \Rightarrow A_2 = 5,69$$

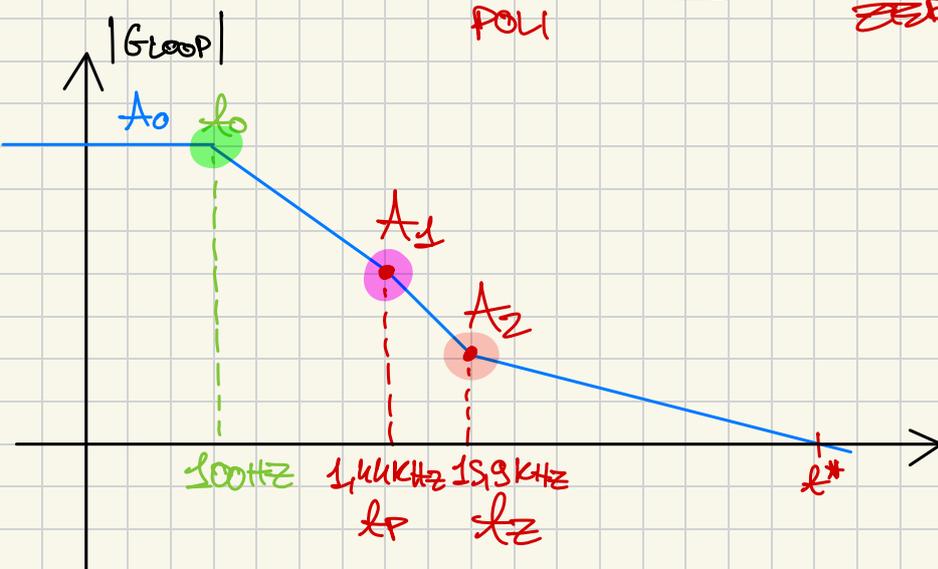
\downarrow \downarrow
 $1\mu\text{kHz}$ 200

CONCLUDIAMO:

$$A_2 \cdot \omega_z = 1 \cdot \omega^*$$
$$\Rightarrow \omega^* = 90,6\text{kHz}$$

3) CALCOLO IL MARGINE DI FASE:

$$\varphi_m = 180^\circ - \underbrace{\arctan\left(\frac{\omega^*}{\omega_p}\right)}_{\text{POLI}} + \underbrace{\arctan\left(\frac{\omega^*}{\omega_z}\right)}_{\text{ZERI}}$$



QUI, NOTIAMO CHE ESSENDO ω^* DISTANTE ALMENO UNA DECADE HA DATO QUASI TUTTO IL SUO CONTRIBUTO (DOPO UNA DECADE ESATTA SAREBBERO ~ 84)

ES: 100Hz RISPETTO A 90kHz È SICURAMENTE -90°

$$\Rightarrow \varphi_{m} = 180^\circ - 90^\circ - 90^\circ + \arctan\left(\frac{f^*}{f_2}\right) \rightarrow 30,6 \text{ kHz}$$

NON DUE DECADE
MA QUASI

15,3 kHz

80°

È UN PO' MENO
DI UNA DECADE
(CHE SAREBBE 9 kHz RISPETTO AI 90 kHz)

4)

$$G_{\text{REALE}} = \frac{G_{\text{ID}}}{1 - \frac{1}{G_{\text{LOOP}}}}$$

G_{LOOP} MOLTO GRANDE

G_{LOOP} MOLTO PICCOLO

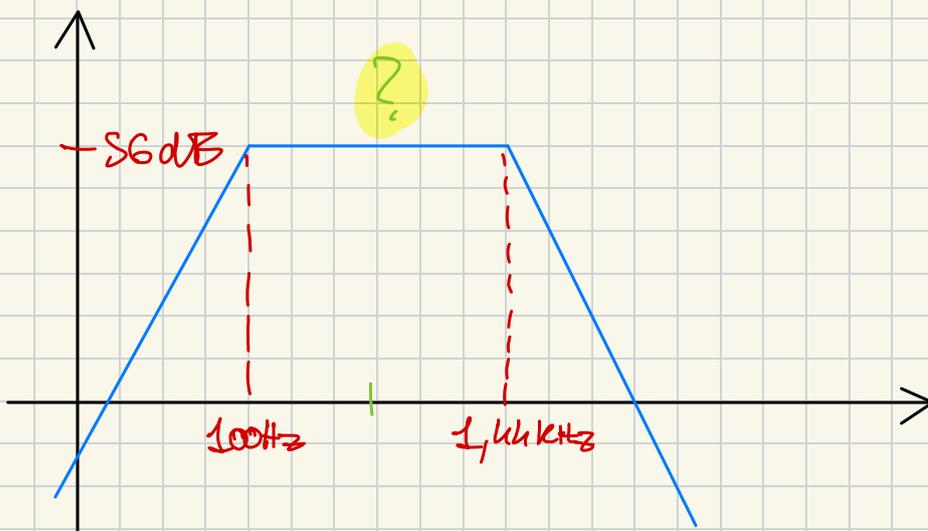
$$G_{\text{OPEN}} = -G_{\text{ID}} \cdot G_{\text{LOOP}}$$

MI TOCCA SCRIVERE IL G_{OPEN}

$$G_{\text{OPEN}} = -G_{\text{ID}} \cdot G_{\text{LOOP}} = -\frac{s C R_2}{1 + s R_1} A(s) \frac{1 + s C R_1}{1 + s C (R_1 + R_2)} =$$

$$= -\frac{A_0}{1 + s T_0} \frac{s C R_2}{1 + s C (R_1 + R_2)}$$

HO UNO ZERO NELL'ORIGINE E
DUE POLI



MA COME QUANTO ?

UN POSSIBILE CONTO È POSIZIONARSI A METÀ (ES: 800 Hz) E

CALCOLARE IL NUMERO (QUI: 56 dB)

MA NON È PRATICO

"SPOSTANDOMI UN PO' DAL POLO" (CI PONIAMO A METÀ)

$$-\frac{A_0 \cdot s C R_2}{1 + s L_0} \cdot \frac{1}{1 + s C (R_1 + R_2)} \rightarrow \text{TRASCURVABILE (ESSENDO NOI PRIMA DEL POLO)}$$

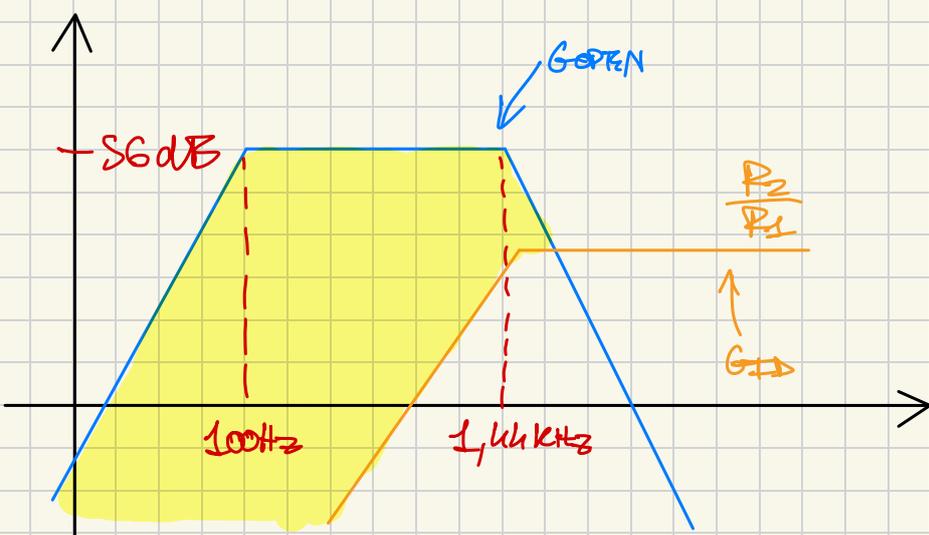
PREVALE DOPO UN PO'

$$\approx A_0 \frac{s C R_2}{s L_0} = 56 \text{ dB}$$

1,4 kHz

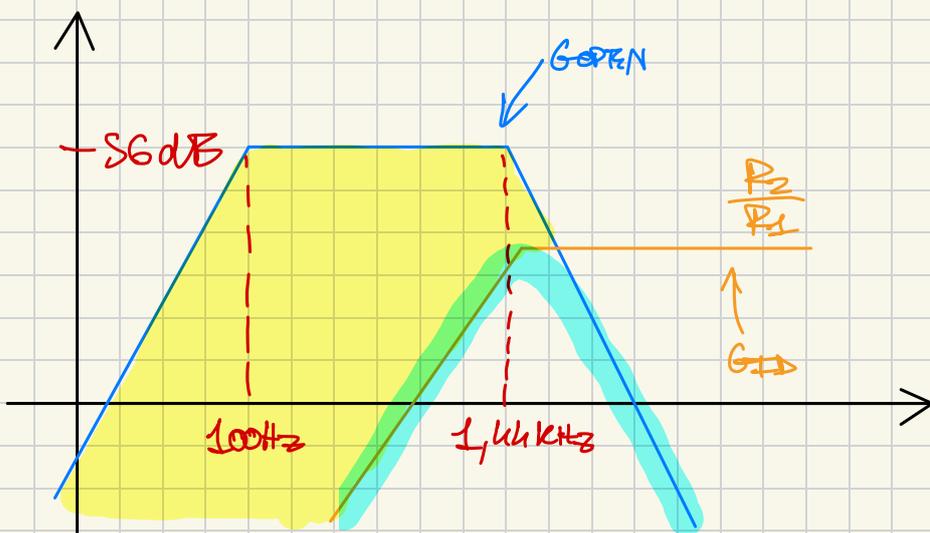
100 Hz

TRACCIO ORA ANCHE IL GID:



L'AREA È IL LOOP (PERCHÉ LA DIFFERENZA SU UN DIAG. DI BODE È UGUALE AL RAPPORTO IN LOGICA LINEARE)

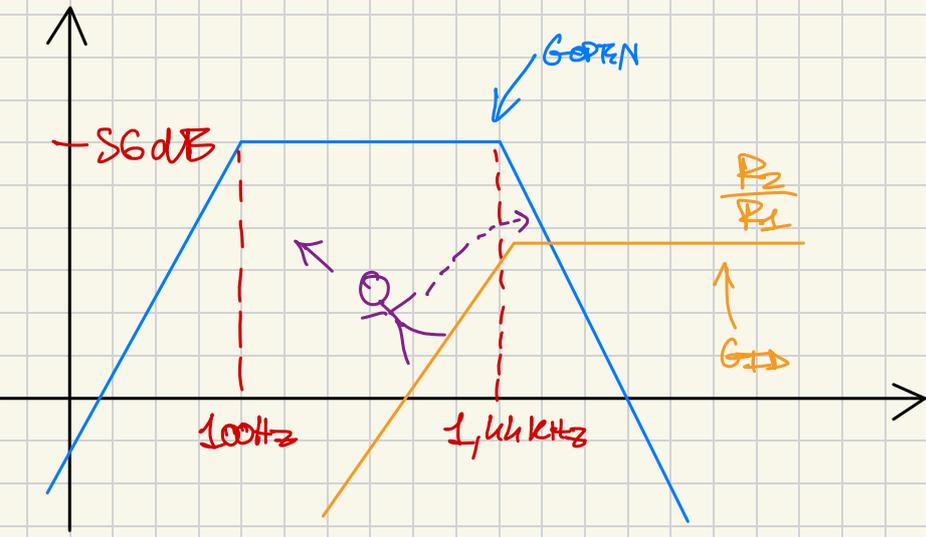
MA NOTIAMO CHE VERSO DESTRA È PICCOLO:



A SX SARÀ GID,
A DX SARÀ GOPEN

⇒ GREATER (APPROSSIMATO)

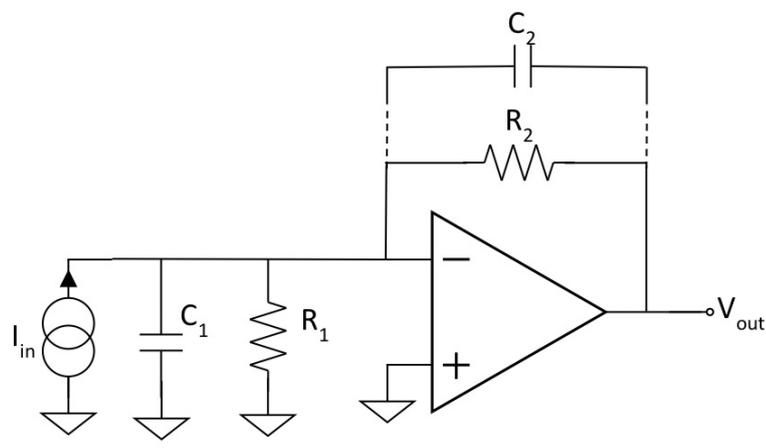
MARGINE DI "CARRINARE" SOPRA AL GD, PER NOI ORA "BASSE"



NOTO G LOOP INIZIALMENTE PARALLELO, POI "SCENDE"
 E POI ANCORA DI DUE VOLTE TE INFINE SCENDE DI 1
 => OTTENGO IL G REALE (LO USO COME VERIFICA)

2)

- Si trascuri per i punti 1 e 2 la presenza della capacità C_2 .
- 1) Determinare l'espressione del trasferimento ideale $T_{ID}(s) = \frac{V_{out}}{I_{in}}$.
 - 2) Valutare la stabilità del circuito.
- Si colleghi ora la capacità C_2 in parallelo a R_2 come mostrato in figura.
- 3) Dimensionare C_2 per avere un margine di fase di 90° .
 - 4) Disegnare su un grafico quotato la tensione di uscita $V_{OUT}(t)$ in risposta ad un gradino di corrente in ingresso di ampiezza $-1mA$.



DATI:

$R_1 = 500\Omega$

$R_2 = 5k\Omega$

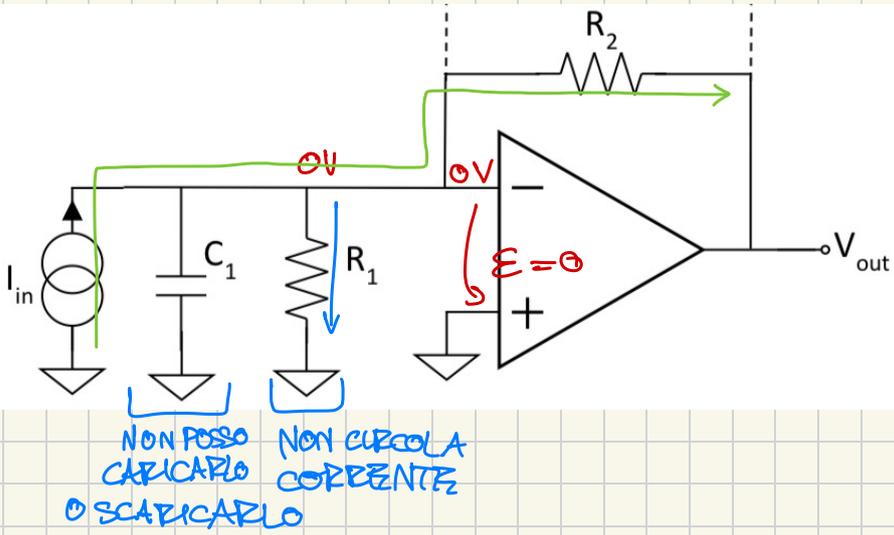
$C_1 = 100pF$

Amplificatore Operazionale:

$A_0 = 10^5$

$GBWP = 100MHz$

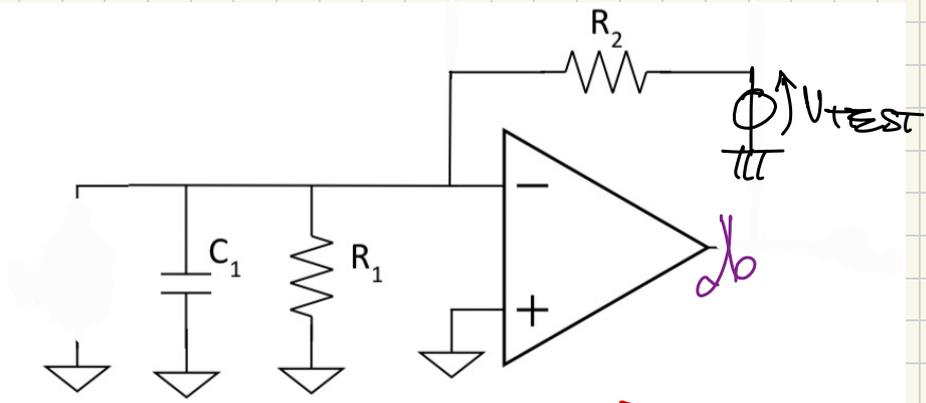
1) È RETROAZIONATO, NEGATIVAMENTE



⇒ LA CORRENTE PUÒ SEGUIRE SOLO QUEL PERCORSO

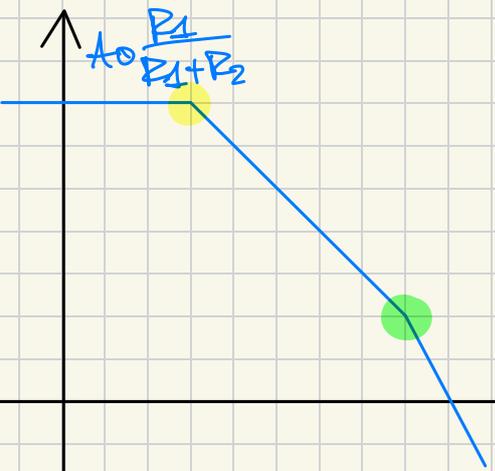
$$\Rightarrow V_{out} = 0V - R_2 \cdot I_{in} \Rightarrow \frac{V_{out}}{I_{in}} = -R_2$$

2) CI SERVE IL LOOP



$$G_{loop} = -A(s) \frac{R_1 \parallel \frac{1}{sC_1}}{R_1 \parallel \frac{1}{sC_1} + R_2} = -A(s) \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot \frac{1}{1 + sC_1(R_1 \parallel R_2)}$$

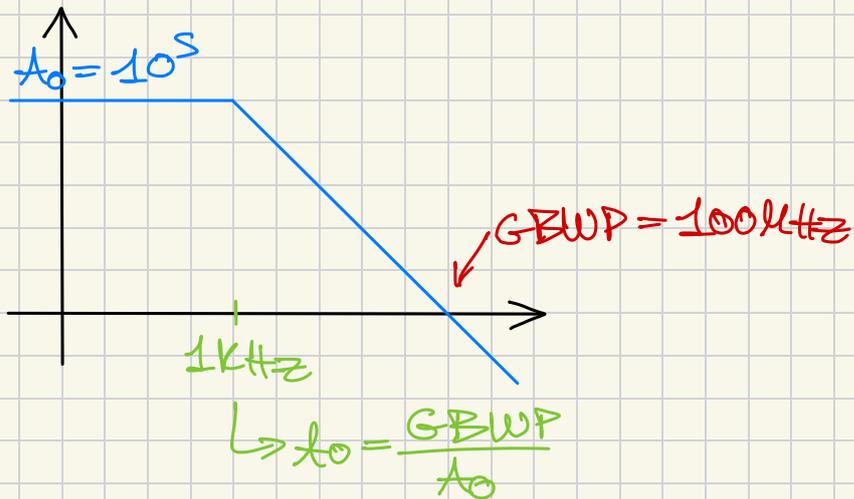
$$= -\frac{A_0}{1 + s\tau_0} \frac{R_1}{R_1 + R_2} \frac{1}{1 + sC_1(R_1 \parallel R_2)}$$



→ PRIMO POLO DÒ PER SCONTATO ESSERE QUELLO DELL'OPAMP

ATTENZIONE! È UN DISEGNO QUALITATIVO! NON HO ANCORA CALCOLATO FREQUENZE E RELATIVI VALORI, NON SONO BANCHE SE È SOPRA L'ASSE

CALCOLIAMO IL PRIMO:



L'ALTRO HA FREQUENZA $\frac{1}{2\pi C_1 (R_1 \parallel R_2)} = 3,5 \text{ MHz}$
 $1 \text{ k}\Omega$

MA CI MANCA ANCORA LA f^* , CHE SI CALCOLA COME PRIMA...
PER ESERCIZIO: GUADAGNO SECONDO POLO: 2,59
FREQUENZA DI TAGLIO (f^*): 5,6 MHz