Laboratorio di Segnali e Sistemi
- Esercitazione -3 -

Amplificatore ad Emettitore Comune con capacità sull'emettitore

Claudio Luci

SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

last update : 070117

Esercitazione 3

Amplificatore CE con capacità in parallelo a R_E

- Misura della frequenze di taglio per tre valori diversi della capacità C_E
- Misura dell'amplificazione massima (a frequenze intermedie)
- Diagrammi di Bode (ampiezza e fase)
- Misura della r_e
- Misura della resistenza d'uscita nel caso di massima larghezza di banda
- Misura della resistenza d'ingress nel caso di massima larghezza di banda
- Facoltativo: studio dell'amplificatore con una piccola reazione negativa

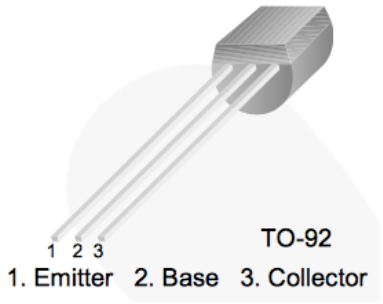
Relazione

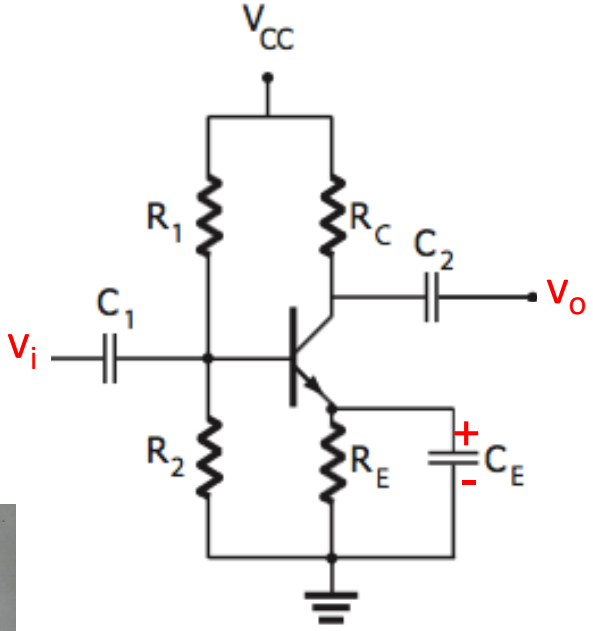
- Presentare il set di misure per uno dei due tipi di amplificatore (con o senza C_E);
- Facoltativo (voto bonus): confronto delle misure tra i due amplificatori (ad esempio amplificazione, resistenza d'ingresso, banda passante …)

Amplificatore CE

Utilizzeremo il transistor 2N2222A (npn) per realizzare un amplificatore ad emettitore comune **con capacità** sull'emettitore. Vogliamo studiare l'effetto di questo condensatore sul diagramma di Bode del circuito. Utilizziamo il circuito dell'esercitazione precedente, ma dobbiamo cambiare Il valore di C_1 **(Nelle tabelle sono indicati i valori delle resistenze scelti la volta scorsa)**

Involucro plastico

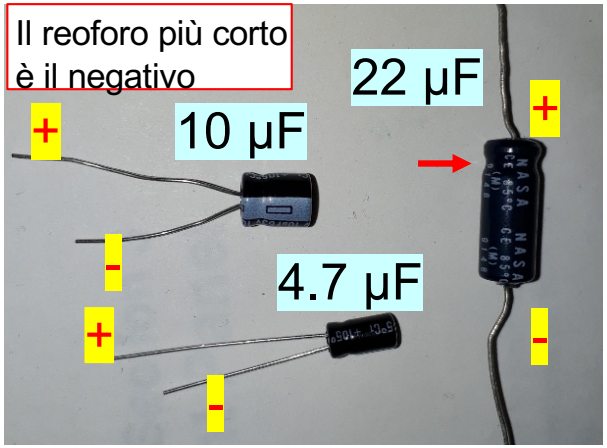




Abbiamo scelto:

- V_{CC}=12 V
- V_{CE} = 5-6 V
- I_C ~ 1 mA
- A_V = **-(5-6)**
- **f_t ~ 1 kHz**

Il reoforo più corto è il negativo



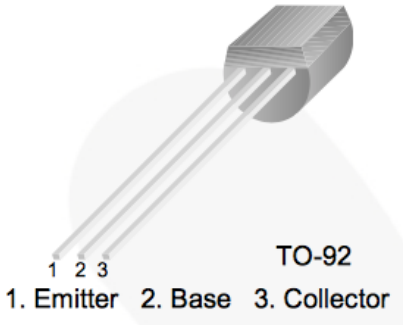
Vedremo con che criterio scegliere C_1 e C_E. Vogliamo avere la frequenza di taglio indotta da C_1 intorno a 100 Hz e scegliamo diversi valori della frequenza di taglio indotta da C_E

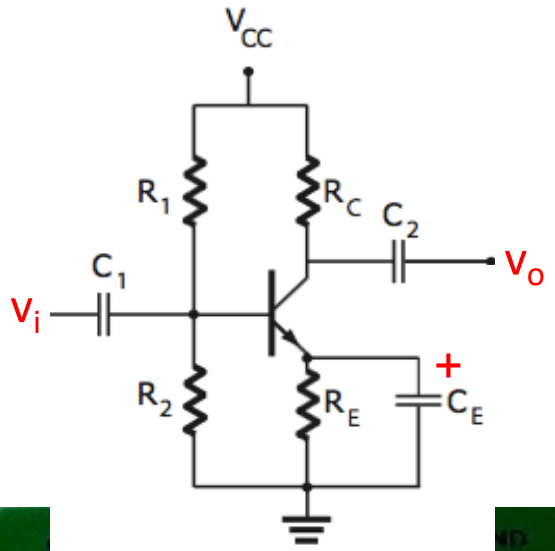
Ad esempio:

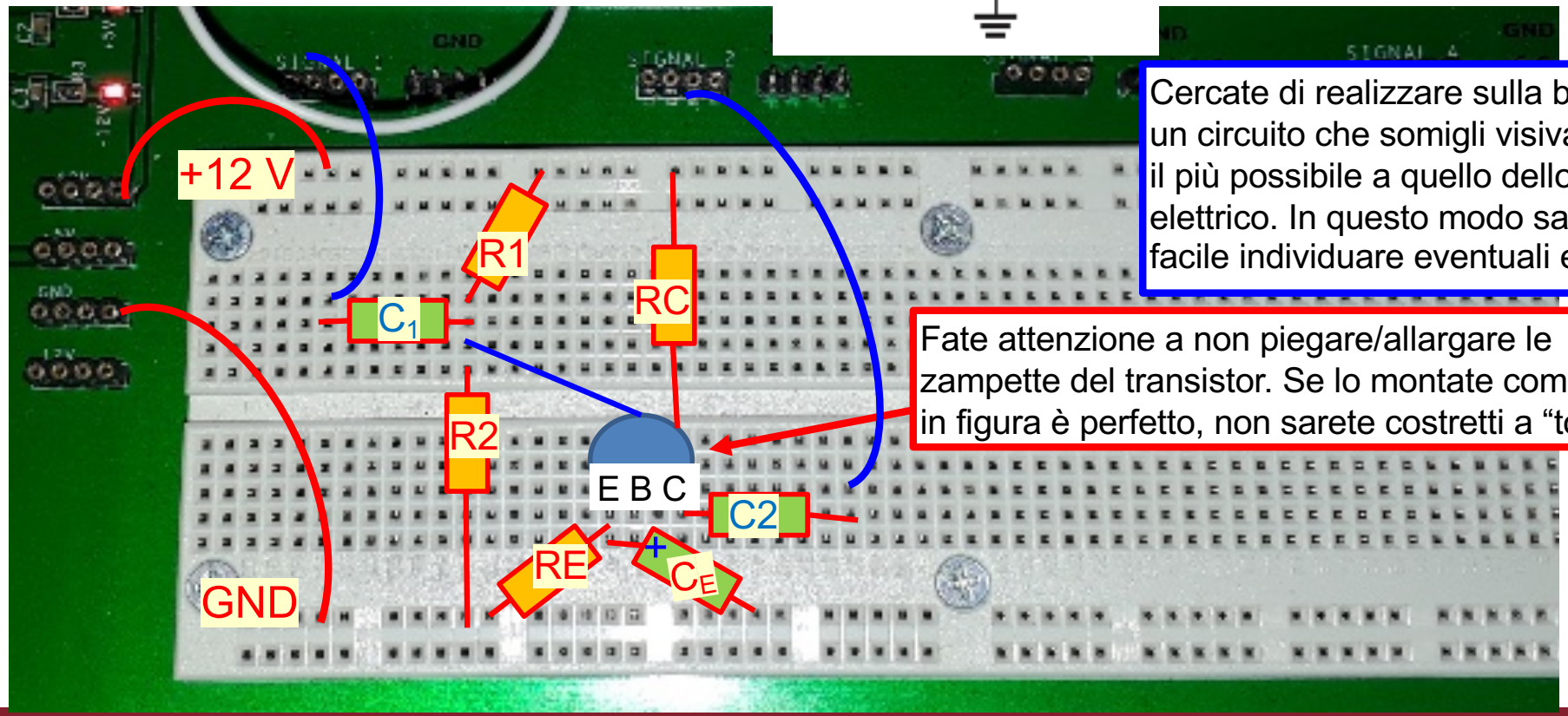
- R_C = 5.6 kΩ
- R_E = 1 kΩ
- R_1 = 33 kΩ (47 kΩ)
- R_2 = 5.6 kΩ
- C_1 = 44 → 330-470 nF
- C_2 = 470 nF → 1 μF
- **C_E = xx µF (el.)**

Se volete diminuire l'amplificazione → cambiate R_1

Esempio di montaggio





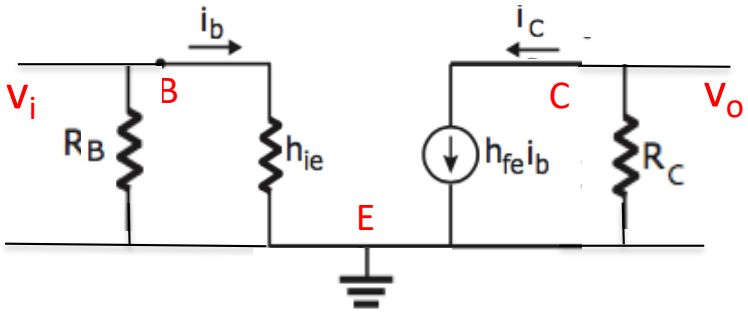


Cercate di realizzare sulla basetta un circuito che somigli visivamente il più possibile a quello dello schema elettrico. In questo modo sarà più facile individuare eventuali errori

Fate attenzione a non piegare/allargare le zampette del transistor. Se lo montate come in figura è perfetto, non sarete costretti a "torturarlo"

Amplificazione del circuito

Lavoriamo a frequenze intermedie in modo da trascurare tutte le capacità del circuito



$$A_V = -\frac{I_C}{V_T} \cdot R_C$$

- L'introduzione della C_E non ha cambiato il punto di lavoro del transistor che avete gia misurato:

$$A_v = -\frac{1 \cdot 10^{-3}}{25 \cdot 10^{-3}} \cdot 5.6 \cdot 10^3 = -224$$

Molto grande!

- Dinamica d'ingresso: *($Vi_max = min(V_{CE}-0.2;\ V_{CC}-V_{CE})/A_V = 5.2/224 = 23\ mV$)*

$$Vi_{\max} = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{A_V} = \frac{(R_C + R_E) I_C}{R_C\, I_C / V_T} = V_T \times \left(1 + \frac{R_E}{R_C}\right)$$

Se V_{CE}-0.2 < V_{CC}-V_{CE} → Vi_max < V_T

Si può lavorare con un segnale così basso ma facciamo attenzione.

Come diminuire la I_c

Se avete problemi con un'amplificazione così grande (ad esempio non riuscite a raggiungere il plateau, occorre diminuirla: $A_v = I_C \cdot R_C / V_T$

- *Questo può essere fatto riducendo I_C oppure R_C*
- *$I_C = V_E / R_E$; quindi aumentando R_E oppure diminuendo V_E*
- *Però avere una R_E quasi uguale alla R_C non è una buona cosa (la retta di carico dinamica si discosterebbe troppo da quella statica), quindi è meglio abbassare la V_E abbassando la V_B. Questo si fa prendendo una R_2 più piccola*

- Per avere una I_C ad esempio di 0.5 mA, occorre avere V_E = 0.5 V e quindi V_B=1.2 V

- $V_B = V_{CC} \frac{R_2}{R_1+R_2}$; se $R_1 + R_2 = 12\ k\Omega \Rightarrow R_2 = 1.2\ k\Omega$ *e* $R_1 = 10.8\ k\Omega$

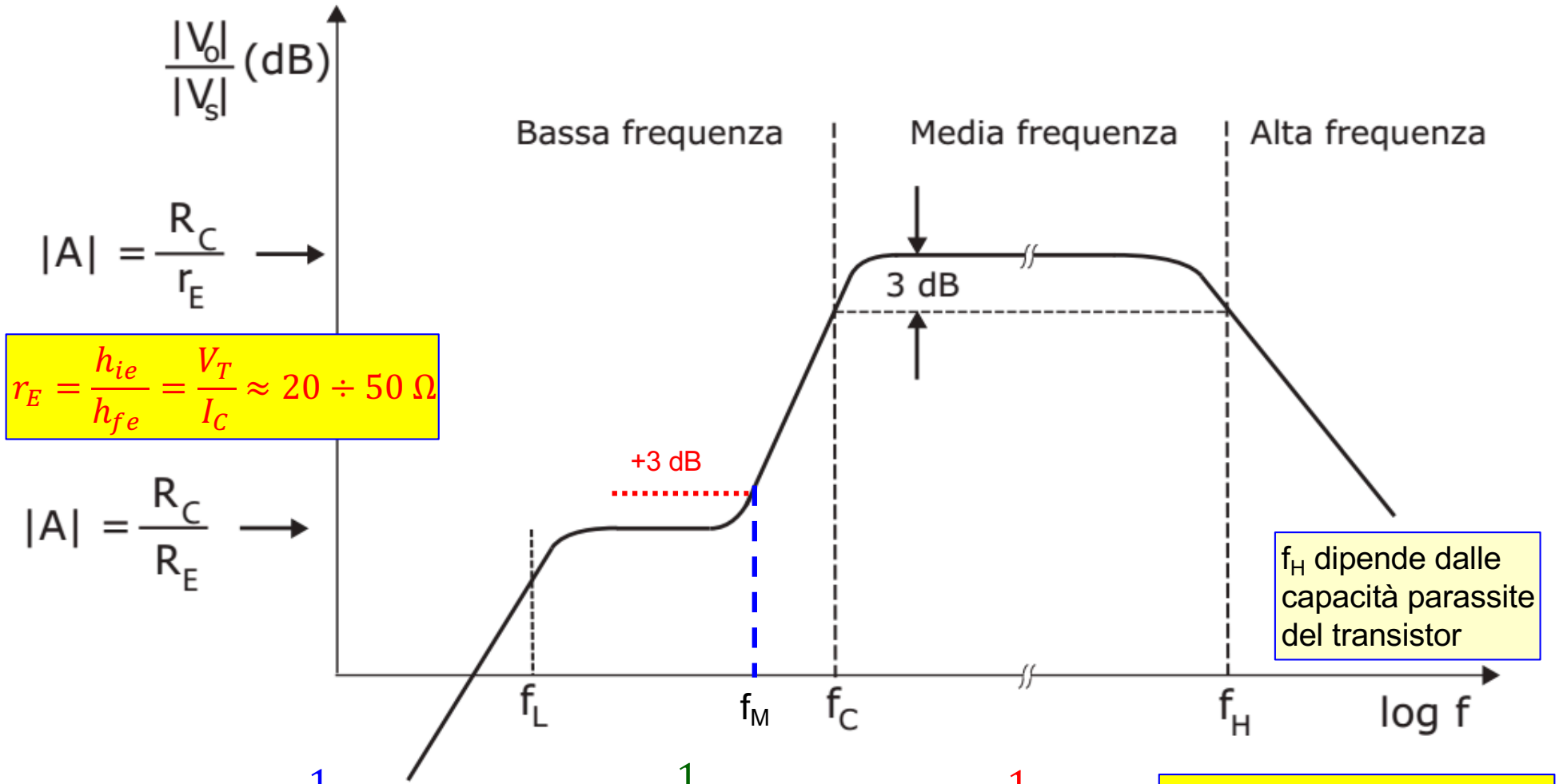
  però R_2 è troppo piccola, allora le scaliamo per un fattore ~ 4.5

  $R_2 = 5.6\ k\Omega$ *e* $R_1 = 47\ k\Omega$ *(di fatto cambiamo R_1 e non R_2 !)*

  $V_B = V_{CC} \frac{R_1}{R_1+R_2} = 12 \times \frac{5.6}{5.6+47} = 1.28\ V$ *(dovrebbe andare bene)*

Fate verifica veloce dell'amplificazione massima, della dinamica d'ingresso e della frequenza di taglio inferiore e di quella superiore (avendo messo la C_E grande, come vedremo in seguito).

Diagramma di Bode



$|A| = \frac{R_C}{r_E}$ →

$r_E = \frac{h_{ie}}{h_{fe}} = \frac{V_T}{I_C} \approx 20 \div 50\ \Omega$

$|A| = \frac{R_C}{R_E}$ →

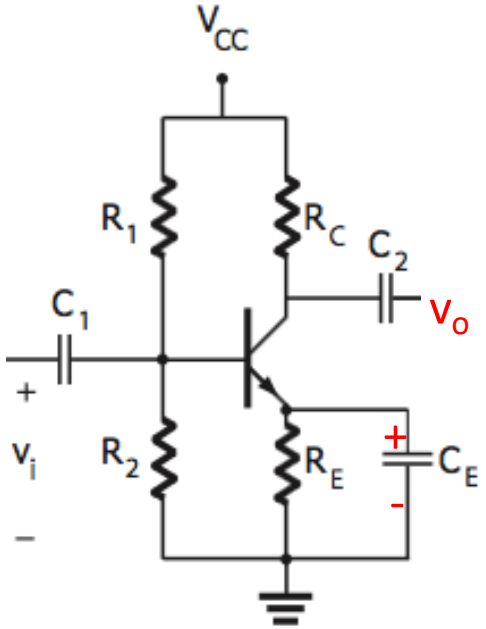
f_H dipende dalle capacità parassite del transistor

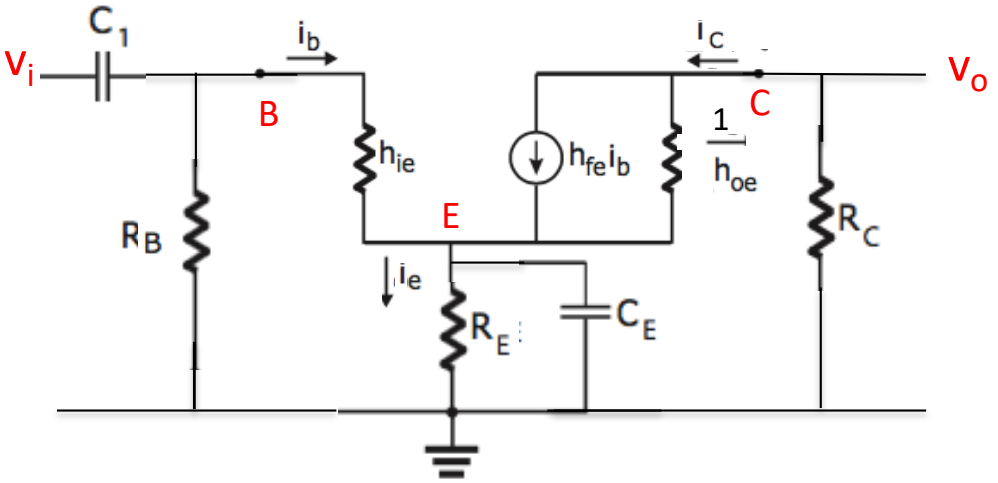
$f_L \approx \frac{1}{2\pi C_1 R_B}$ $f_M \approx \frac{1}{2\pi C_E R_E}$ $f_C \approx \frac{1}{2\pi C_E r_E}$

N.B. $\frac{f_C}{f_M} = \frac{R_E}{r_E} \approx 20 \div 50$

Molto difficile vedere nello stesso plot i due plateaux. Sceglieremo tre diversi valori di C_E per studiare i vari regimi di frequenza e misurare le frequenze di taglio.

Amplificazione in funzione di f





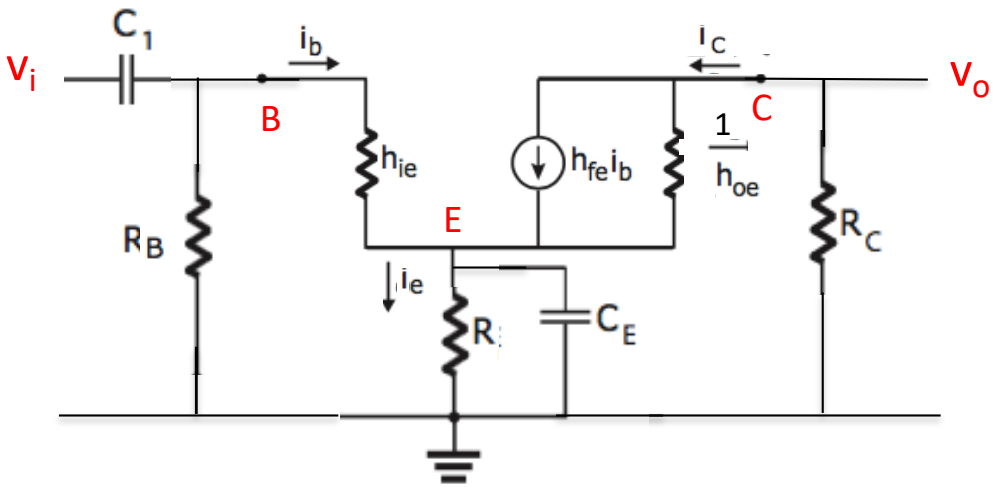
$$Z_E = R_E \parallel C_E = \frac{R_E}{1 + J\omega R_E C_E}$$

$$Z_i = R_B \parallel \left[h_{ie} + (h_{fe} + 1) \frac{R_E}{1 + J\omega R_E C_E} \right]$$

- La frequenza di taglio inferiore introdotta da C_1 dipende da C_1 e Z_i, la quale a sua volta dipende da C_E. Per semplificare scegliamo C_1 e C_E in modo tale che la frequenza di taglio di C_1 sia piccola e che la reattanza di C_E sia grande rispetto a R_E a quella frequenza e possiamo fattorizzare i contributi di C_1 e C_E nell'andamento in frequenza dell'amplificatore.

1. $\omega_L \approx \frac{1}{R_B C_1}$; facciamo in modo che: $\frac{1}{\omega_L C_E} \gg R_E$, cioe' $\omega_L \ll \omega_M = \frac{1}{R_E C_E}$
2. Se $f_M >> f_L$ allora i due contributi sono distinti tra loro, altrimenti la frequenza di taglio inferiore dipende da entrambi i condensatori, a meno che f_C (che vedremo) sia molto minore di f_L

Amplificazione in funzione di f



$$V_B = h_{ie} i_b + (h_{fe} + 1) Z_E \, i_b$$

$$V_o = -h_{fe} i_b R_C$$

$$\Rightarrow \frac{V_o}{V_B} = -\frac{h_{fe} R_C}{h_{ie} + (h_{fe} + 1) Z_E}$$

$$r_E = \frac{h_{ie}}{h_{fe}}$$

- Sostituiamo l'espressione di Z_E nella formula e ricordiamo che *hie/hfe* è la resistenza r_E che interviene nel modello a T del transistor; r_E schematizza la resistenza del silicio tra il contatto metallico dell'emettitore e la giunzione base emettitore, essa è dell'ordine di una decina di Ohm.

$$A_V = -\frac{R_C}{r_E} \frac{1}{1 + \frac{R_E / r_E}{1 + J\omega R_E C_E}}$$

- Da notare che:

$$\lim_{\omega \to \infty} A_V = -\frac{R_C}{r_E} = \frac{h_{fe} R_C}{h_{ie}}$$

$$\lim_{\omega \to 0} A_V = -\frac{R_C}{R_E}$$

Amplificazione in funzione di f

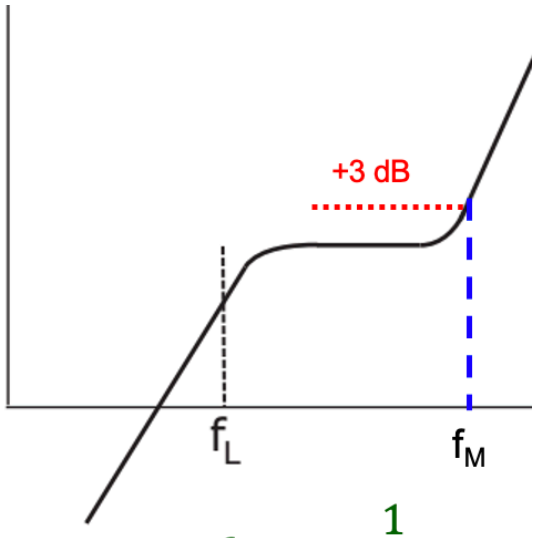
$$A_V = -\frac{R_C}{r_E}\frac{1}{1+\frac{R_E/r_E}{1+J\omega R_E C_E}} = -\frac{R_C}{r_E}\cdot\frac{1+J\omega R_E C_E}{1+\frac{R_E}{r_E}+J\omega R_E C_E} \approx -\frac{R_C}{r_E}\cdot\frac{1+J\omega R_E C_E}{\frac{R_E}{r_E}+J\omega R_E C_E}$$

- Troviamo il modulo:

$$|A_V| = \frac{R_C}{r_E}\cdot\frac{\sqrt{1+(\omega R_E C_E)^2}}{\sqrt{\left(\frac{R_E}{r_E}\right)^2+(\omega R_E C_E)^2}}$$

- Calcoliamo quanto vale per $\omega_M = \frac{1}{R_E C_E}$:

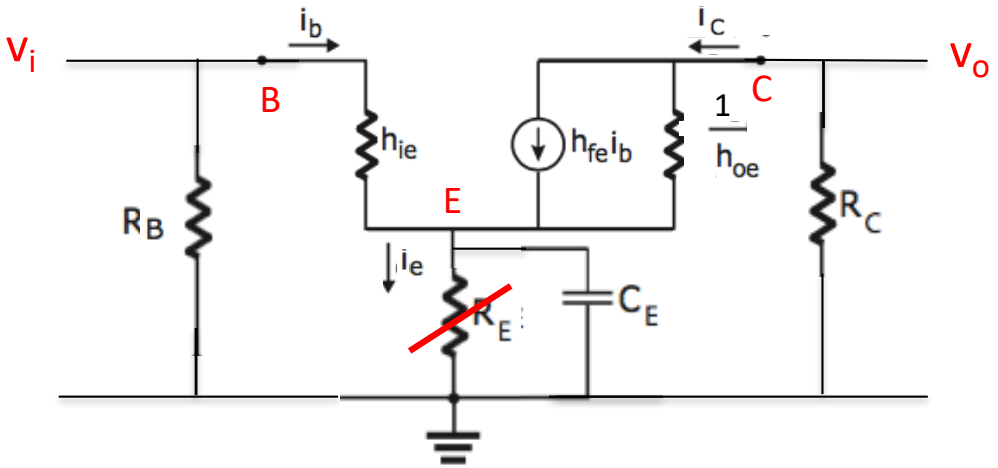
$$|A_V| = \frac{R_C}{r_E}\cdot\frac{\sqrt{1+1}}{\sqrt{\left(\frac{R_E}{r_E}\right)^2+1}} \approx \frac{R_C}{r_E}\cdot\frac{\sqrt{1+1}}{\sqrt{\left(\frac{R_E}{r_E}\right)^2}} = \frac{R_C}{R_E}\cdot\sqrt{2} = \frac{R_C}{R_E} + 3\ \text{dB}$$



$$f_M \approx \frac{1}{2\pi C_E R_E}$$

Amplificazione in funzione di f

- Vediamo ora che succede per frequenze f molto maggiori di f_M:

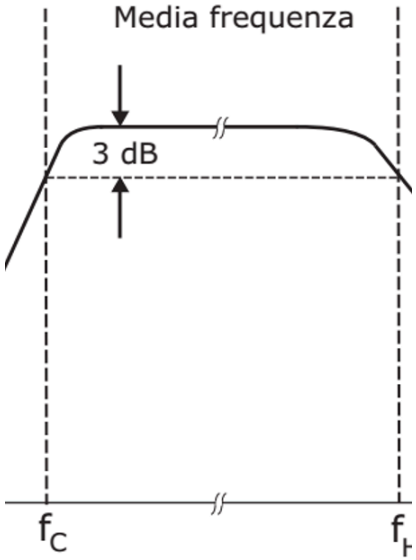


$$\omega \gg \omega_M = \frac{1}{R_E C_E} \Rightarrow \frac{1}{\omega C_E} \ll R_E$$

$$V_B = h_{ie} i_b + (h_{fe} + 1)\frac{1}{j\omega C_E} i_b$$

$$V_o = -h_{fe} i_b R_C$$

$$\Rightarrow \frac{V_o}{V_B} = -\frac{h_{fe} R_C}{h_{ie} + (h_{fe} + 1)\frac{1}{j\omega C_E}} = -\frac{R_C}{r_E} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{J\omega r_E C_E}}$$



- Troviamo il modulo: $|A_V| = \frac{R_C}{r_E} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega r_E C_E}\right)^2}}$

- Per $\omega_C = \frac{1}{r_E C_E}$ si ha: $|A_V| = \frac{R_C}{r_E} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}}$

$$f_C \approx \frac{1}{2\pi C_E r_E}$$

Scelta dei condensatori

- Vogliamo che la frequenza di taglio indotta da C_1 sia piccola, ad esempio 70 – 100 Hz.
  La resistenza d'ingresso dell'amplificatore, trascurando la C_E, è pari a circa 4.5 kOhm

$$C_1 = \frac{1}{2\pi f_L R_i} = \frac{1}{2\pi \cdot 10^2 \cdot 4.5 \cdot 10^3} = 353\ nF \ \Rightarrow 330\ nf\ oppure\ 470\ nF$$

1. Proviamo ora a misurare f_M ; scegliamo una C_E tale da avere f_M=5 kHz, sapendo che f_C sarà 20-50 volte più grande e quindi sarà difficile misurarla (perché interviene la frequenza di taglio superiore)

$$C_E = \frac{1}{2\pi f_M R_E} = \frac{1}{2\pi \cdot 5 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 10^3} = 32\ nF \ \Rightarrow 33\ nf$$

2. Vogliamo ora misurare f_C; scegliamo una C_E tale da avere anche questa volta una frequenza di taglio di 5 kHz, ma questa volta la capacità dovrebbe essere circa 20-50 volte più grande.
   Se $r_E = \frac{V_T}{I_C} = \frac{25\ mV}{0.5\ mA} = 50\ \Omega$ possiamo scegliere:

$$C_E = \frac{1}{2\pi f_C r_E} = \frac{1}{2\pi \cdot 5 \cdot 10^3 \cdot 50} = 660\ nF \ \Rightarrow 580\ nF\ oppure\ 1\ \mu f$$

3. A questo punto mettete una C_E grande, in modo da avere una f_C la più piccola possibile, ad esempio:

$$C_E = 100\ \mu F \ \Rightarrow \ f_C = 165\ Hz$$

questa frequenza di taglio è confrontabile con quella indotta da C_1, che ora dovrebbe essere aumentata perché la resistenza interna dell'amplificatore è diminuita.

Verifica del circuito

Una volta montato il circuito, occorre fare alcune verifiche preliminari prima di iniziare le misure richieste

1. Controllate il punto di lavoro del transistor:
   - **V_{CE}, V_{BE}, I_C, I_B, I_E**
2. Misurate anche il potenziale della base e dell'emettitore e confrontatelo con i valori aspettati dal progetto

1. Una volta verificato che il punto di lavoro corrisponde, grosso modo, a quanto progettato, potete fornire in ingresso un segnale sinusoidale di ampiezza tale da far lavorare il transistor sempre nella zona attiva.

2. Fate un rapido scan in frequenze per individuare il valore dell'amplificazione massima
   - Controllate che il segnale di uscita non sia distorto. Se lo fosse riducete l'ampiezza del segnale d'ingresso
3. Controllate dove si trova la posizione della frequenza di taglio, corrispondente al 70% dell'amplificazione massima.

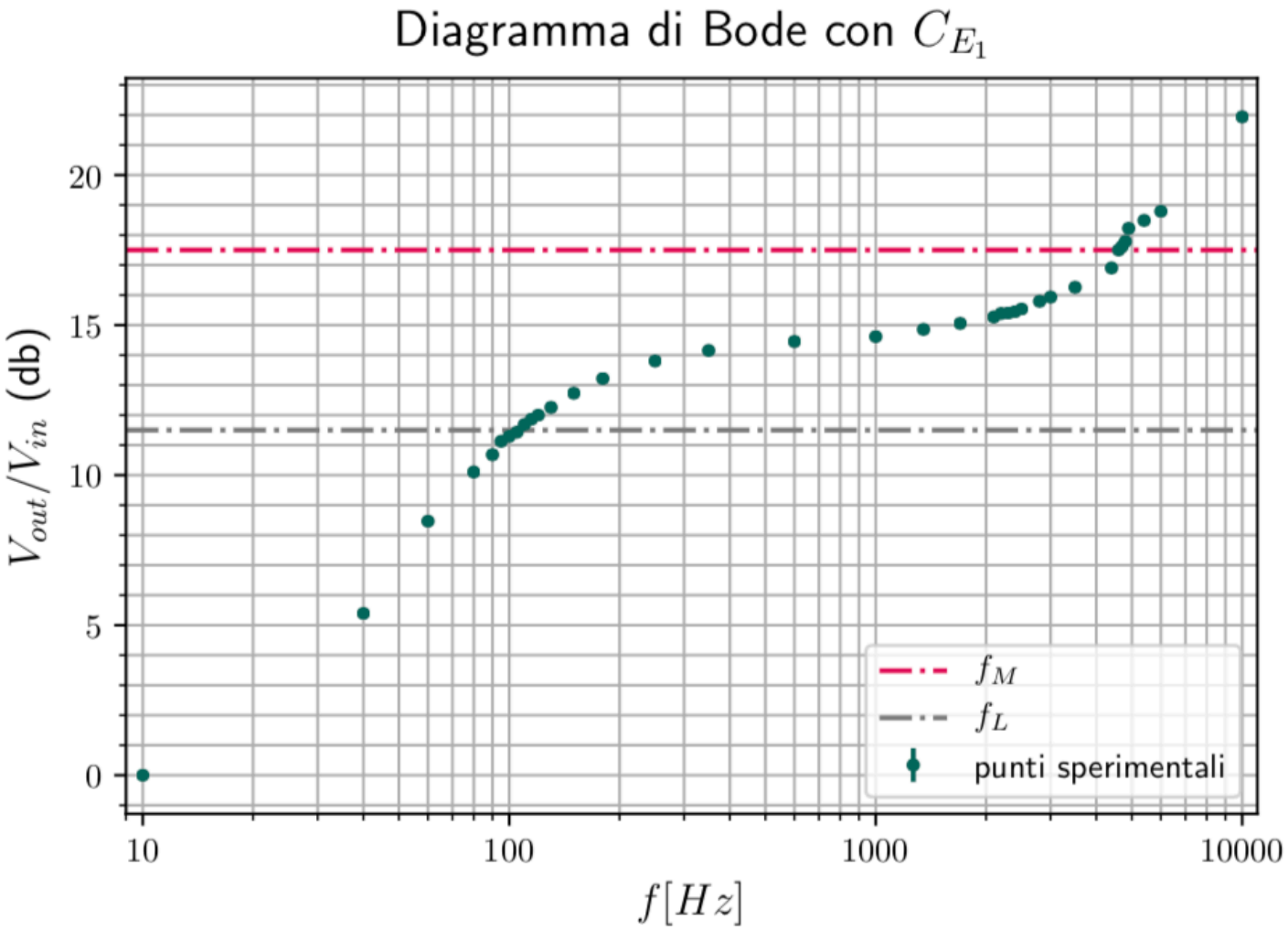
Fate questa verifica con la C_E grande

Misura di f_L e f_M

- Utilizzate C_E = 33 nF
- Fate uno scan in frequenza partendo da frequenze basse (10-20 HZ).
- Dovreste raggiungere un plateau pari a R_C/R_E .
  Se il plateau è troppo "stretto" e non potete misurare bene l'amplificazione e le due frequenze di taglio, diminute leggermente C_E.
- Aumentate la frequenza in modo da vedere la risalita dell'amplificazione
- Non dovreste essere in grado di vedere un secondo plateau

- Su questo grafico dovreste essere in grado di misurare f_L, f_M e il plateau.
- Controllate se torna con quanto ci aspettiamo in base ai calcoli fatti in precedenza.

Diagramma di Bode con C_{E1}



qual e' il valore del plateau con la sua incertezza?

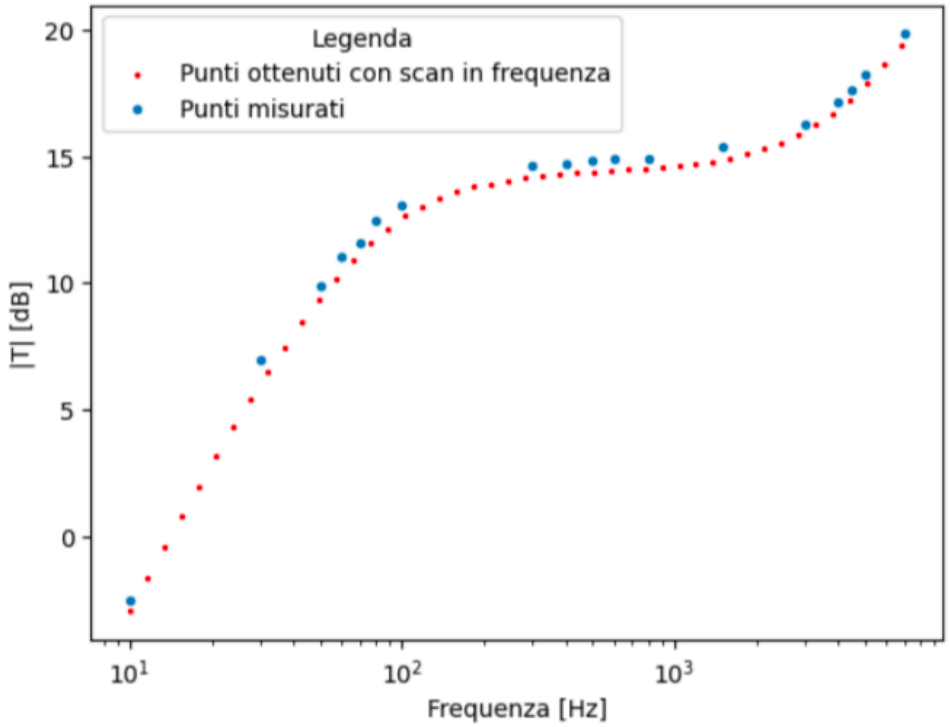
Frequenze di taglio	Valore teorico	Valore sperimentale
f_L [Hz]	103.9 ± 2.1	106.7 ± 13.4
f_M[Hz]	4701 ± 94	4590 ± 300

Diagramma di Bode con C_{E1} (un altro gruppo)

Componenti	Valore misurato
R_C	$(5.58 \pm 0.06)k\Omega$
R_E	$(1.00 \pm 0.01)k\Omega$
R_1	$(46.3 \pm 0.5)k\Omega$
R_2	$(5.58 \pm 0.06)k\Omega$
C_1	$(473 \pm 5)nF$
C_2	$(941 \pm 9)nF$

Componenti	Valore misurato
C_{E_1}	$(34.5 \pm 0.3)nF$
C_{E_2}	$(953 \pm 10)nF$
C_{E_3}	$(95.4 \pm 0.9)\mu F$

Ampiezza



Fase

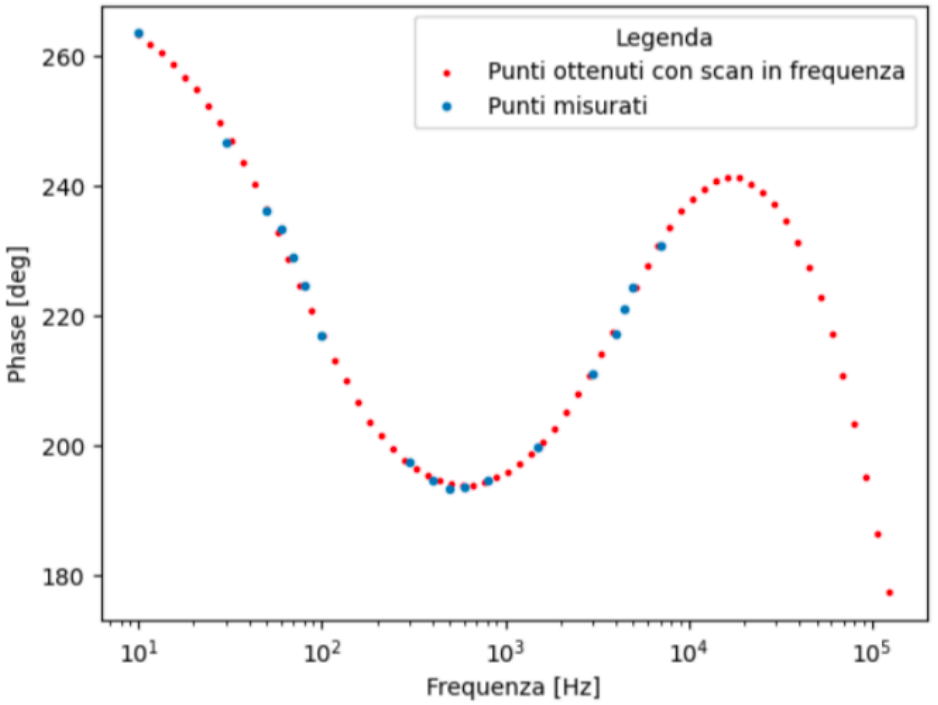
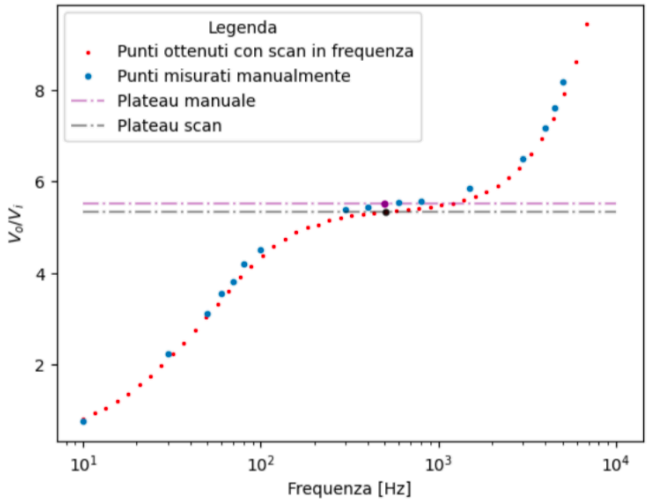


Diagramma di Bode con C_{E1} (un altro gruppo)

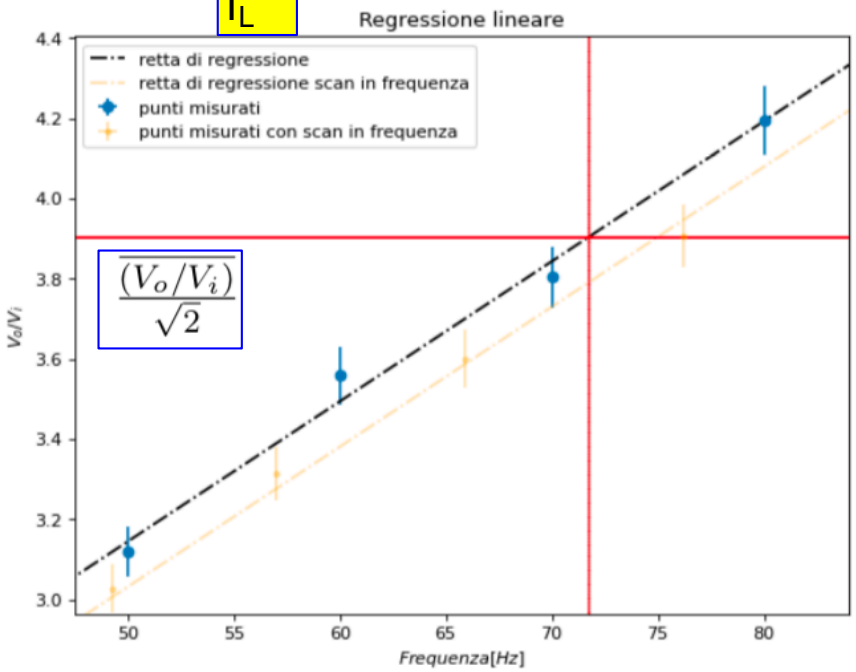


$$f_M^{th} \approx \frac{1}{2\pi C_{E_1} R_E} = (4.61 \pm 0.13) kHz.$$

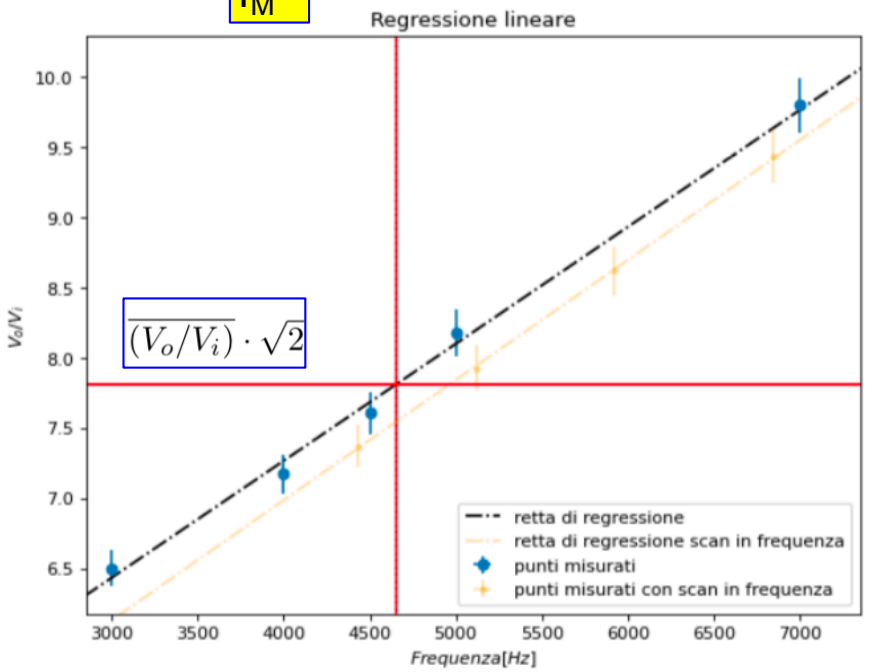
$$\overline{(V_o/V_i)}^{th} \approx R_C/R_E = (5.57 \pm 0.11)$$

	$f_L[Hz]$	$f_M[kHz]$	$\overline{(V_o/V_i)}$
Misure manuali	71.4 ± 2.4	4.70 ± 0.13	5.52 ± 0.11
Scan in frequenza	74.3 ± 2.0	4.96 ± 0.10	5.34 ± 0.09

f_L



f_M



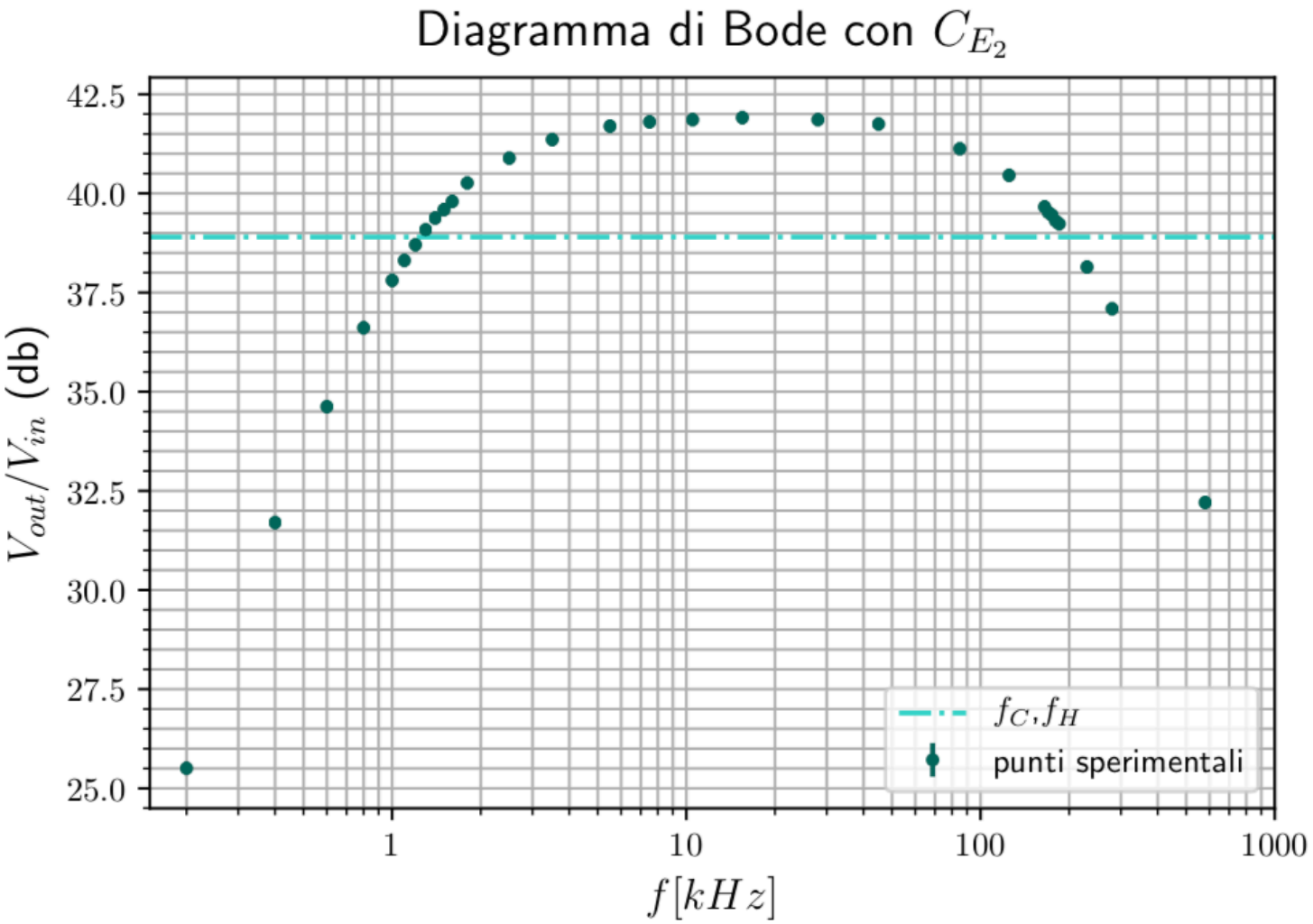
Misura di f_C e f_H e stima di r_E

- Utilizzate C_E = 3.3 μF
- Fate uno scan in frequenza partendo da frequenze basse (100-200 HZ).
- Potreste avere un piccolo plateau, da verificare
- Aumentate la frequenza in modo da vedere la risalita dell'amplificazione
- Dovreste raggiungere il secondo plateau alla massima amplificazione
- Aumentate ancora la frequenza in modo da vedere la discesa dell'amplificazione

- Su questo grafico dovreste essere in grado di misurare f_C, f_H e il plateau.
  f_H dovrebbe essere più piccola di quella misurata la volta scorsa perché all'aumentare dell'amplificazione diminuisce la banda passante.
- Controllate se torna con quanto ci aspettiamo in base ai calcoli fatti in precedenza.

- Se f_C è molto diversa da quello che ci aspettiamo, 5 kHz, vuol dire che la stima che abbiamo fatto di r_E non è corretta. Provate a cambiare C_E in modo da avere f_C nell'intervallo voluto.
- Provate a stimare r_E anche dal valore del'amplificazione al platea. Due valori di r_E misurati con f_C e con Av_{max} dovrebbero essere compatibili tra loro.

Diagramma di Bode con C_{E2}



come avete stimato il valore teorico? Vi serve rE che voi non avete

Frequenza di taglio	Valore teorico	Valore sperimentale
f_c [kHz]	1.18 ± 0.02	1.21 ± 0.13

Diagramma di Bode con C_{E2}

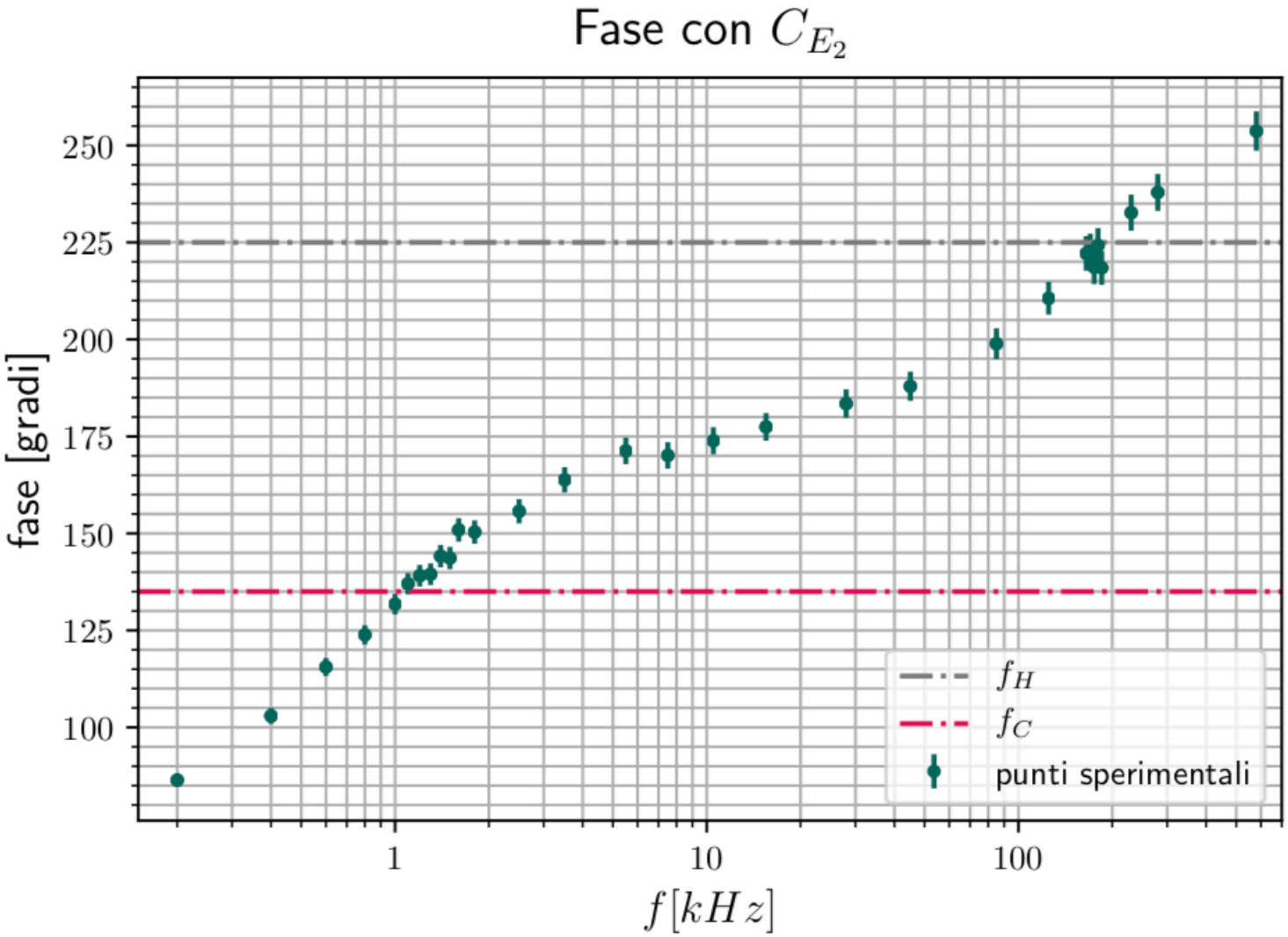
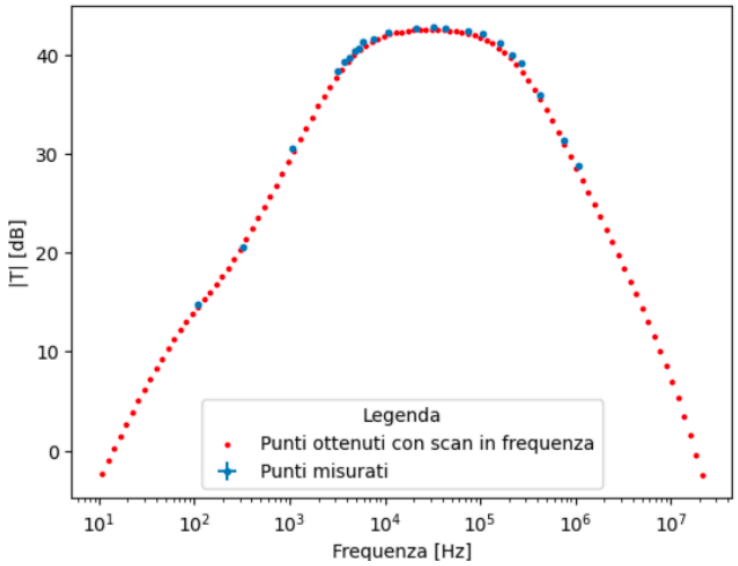
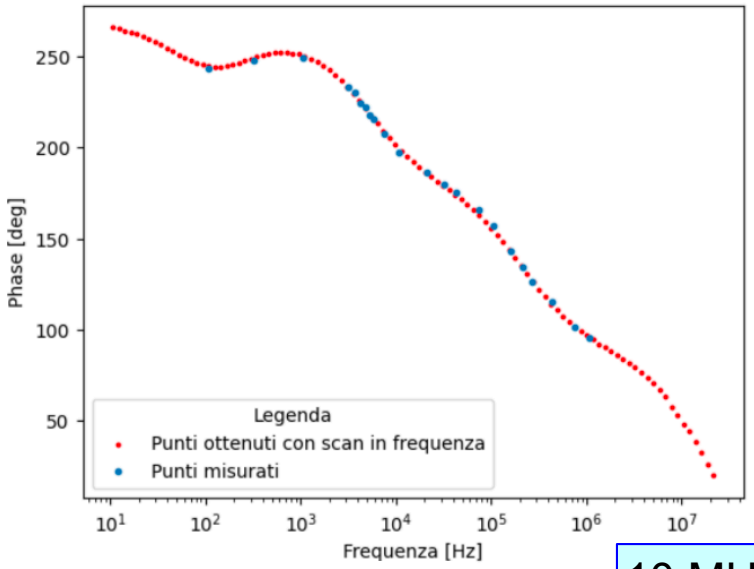


Diagramma di Bode con C_{E2} (un altro gruppo)

Ampiezza (dB)



Fase



10 MHz

Componenti	Valore misurato
C_{E_1}	$(34.5 \pm 0.3)nF$
C_{E_2}	$(953 \pm 10)nF$
C_{E_3}	$(95.4 \pm 0.9)\mu F$

Ampiezza (lineare)

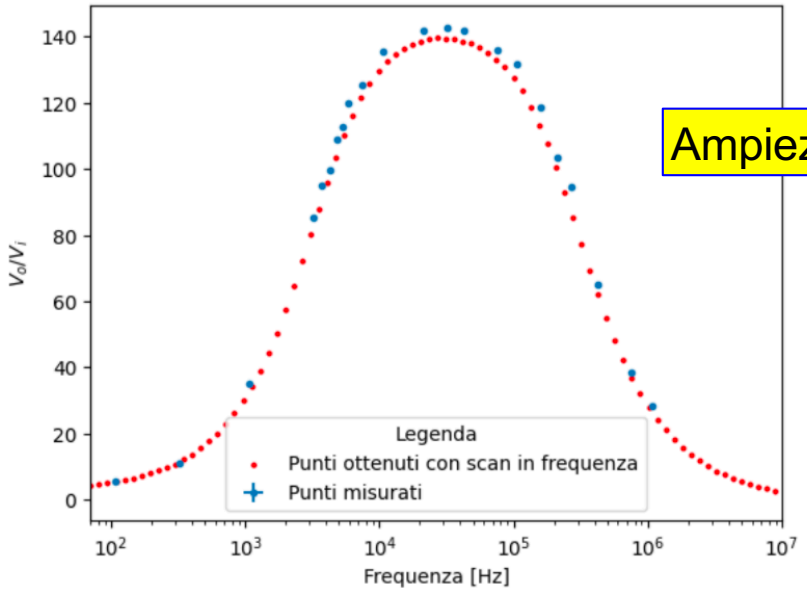
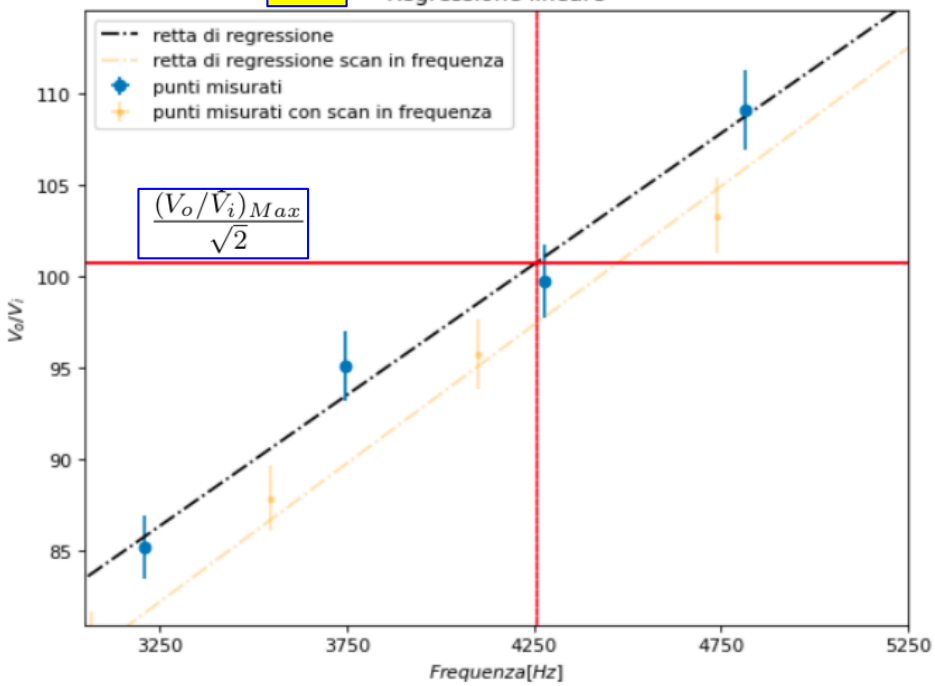
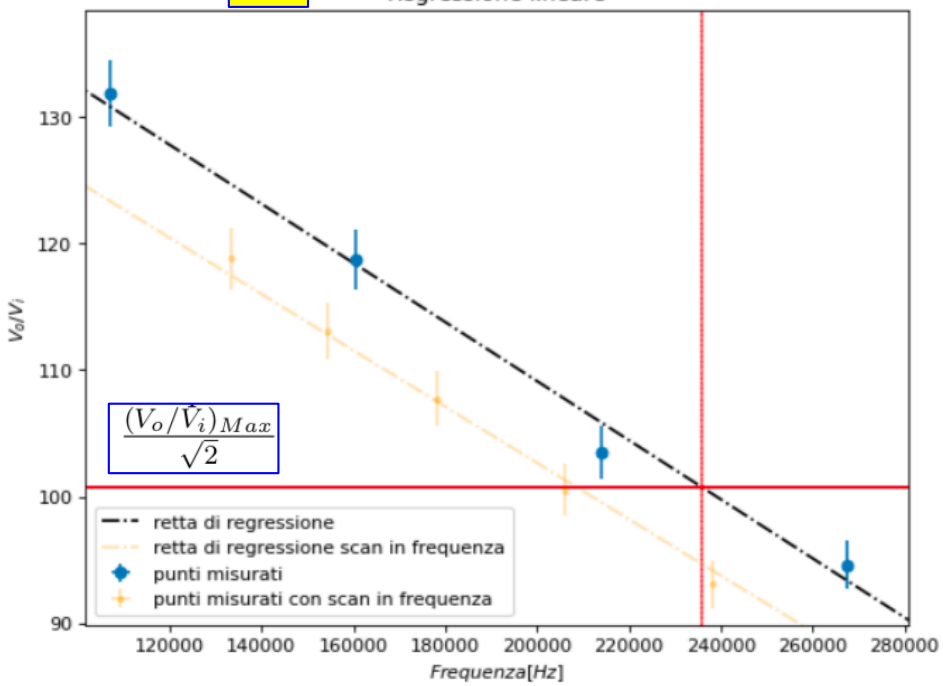


Diagramma di Bode con C_{E2} (un altro gruppo)

f_C



f_H



	$f_C[kHz]$	$f_H[kHz]$	$(V_o/V_i)_{Max}$
Misure manuali	4.26 ± 0.21	236 ± 8	143 ± 3
Scan in frequenza	4.34 ± 0.19	218 ± 6	139 ± 2

$$r_E = 1/(2\pi C_{E_2} f_C)$$

$$r_E = \frac{R_C}{(V_o/V_i)_{Max}}$$

	$r_E[\Omega]$ **(da** f_C**)**	$r_E[\Omega]$ **(da** $(V_o/V_i)_{Max}$**)**
Misure manuali	39.2 ± 1.7	39.0 ± 1.2
Scan in frequenza	38.5 ± 1.2	40.1 ± 1.3

Massima larghezza di banda

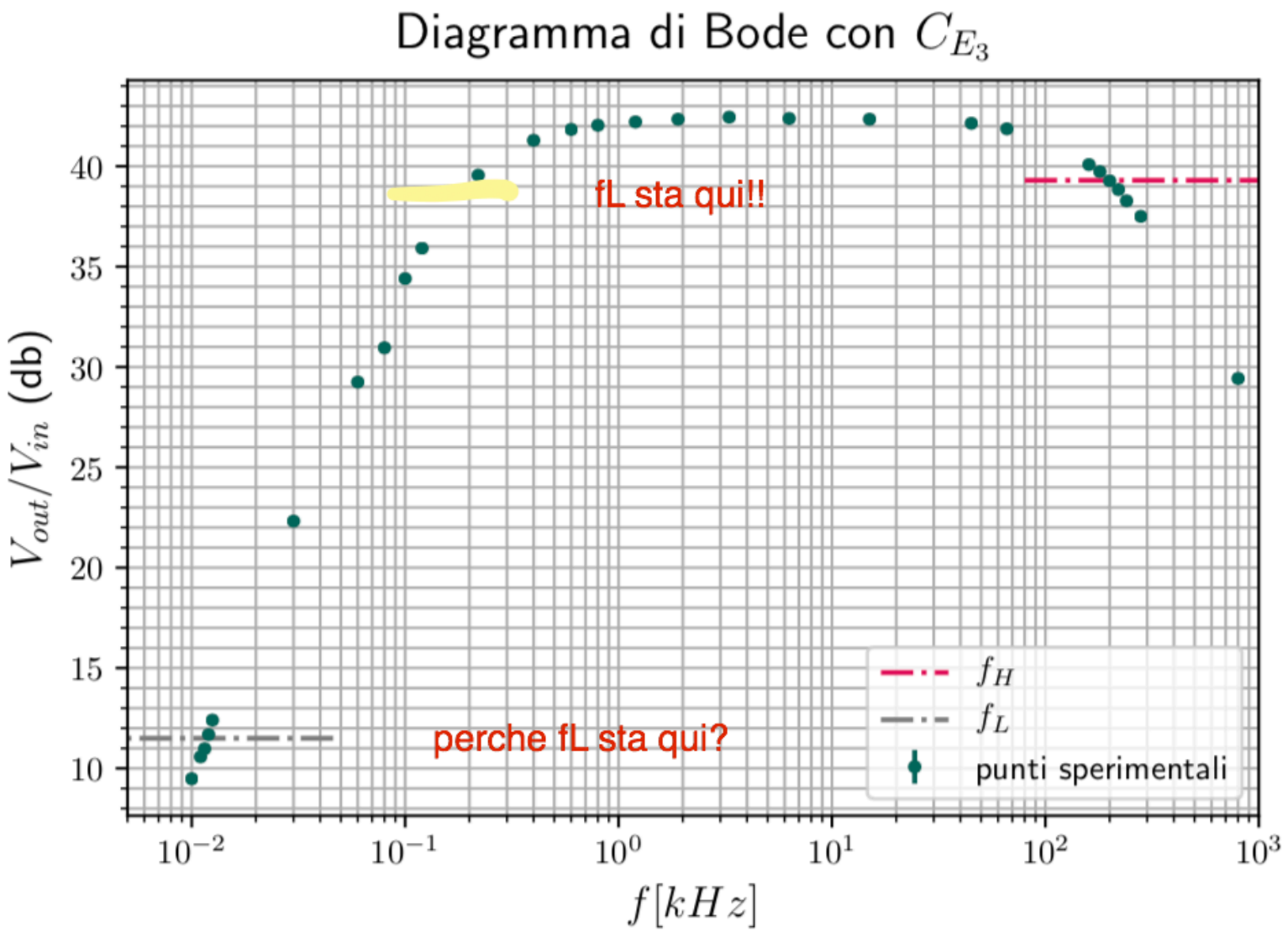
- Utilizzate C_E = 100 μF
- Dovremmo avere una frequenza di taglio molto piccola.
- Fate uno scan in frequenza partendo da frequenze basse (10-20 HZ).
- Verificate che si raggiunge abbastanza presto il plateau alla massima amplificazione
- Aumentate ancora la frequenza in modo da vedere la discesa dell'amplificazione

- Su questo grafico dovreste essere in grado di misurare f_L, f_H e il plateau.
- Controllate se torna con quanto ci aspettiamo in base ai calcoli fatti in precedenza. *La frequenza di taglio inferiore f_L dovrebbe essere diversa da quella misurata in precedenza, perché ora concorrono sia C_1 che C_E.*

- Se il polo introdotto da C_1 e da C_E sono alla stessa frequenza di taglio, per questo valore la funzione di trasferimento diminuisce di 6 dB e lo sfasamento dovrebbe essere di 90 gradi. Provate a vedere se qualitativamente osservate questi comportamenti.

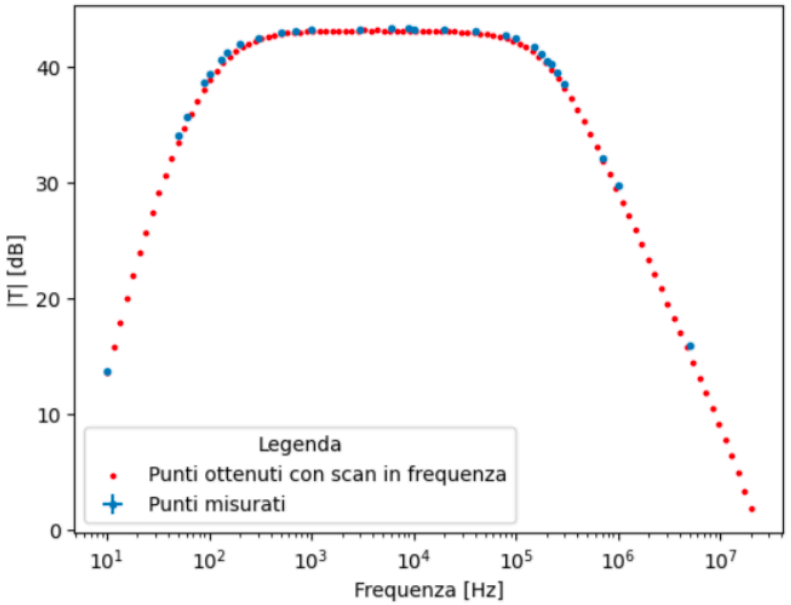
- Ovviamente quando l'amplificazione diminuisce molto potete/dovete aumentare la tensione del segnale d'ingresso per migliorare la misura.

Diagramma di Bode con C_{E3}

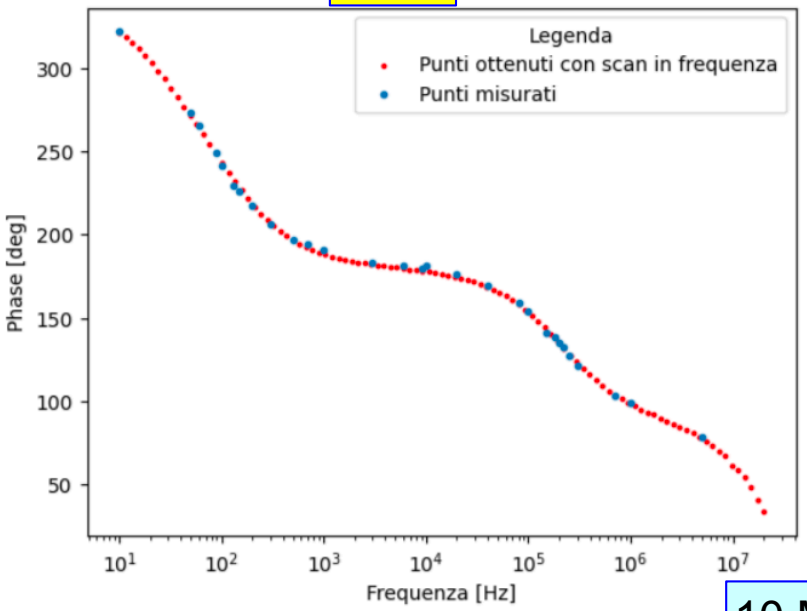


Massima larghezza di banda con C_{E3} (un altro gruppo)

Ampiezza (dB)



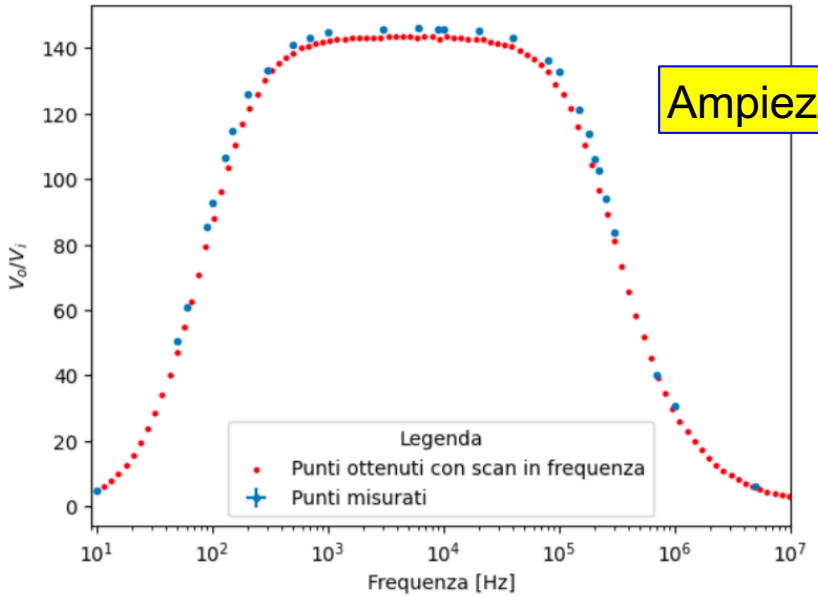
Fase



10 MHz

Componenti	Valore misurato
C_{E_1}	$(34.5 \pm 0.3)nF$
C_{E_2}	$(953 \pm 10)nF$
C_{E_3}	$(95.4 \pm 0.9)\mu F$

Ampiezza (lineare)



Massima larghezza di banda con C_{E3} (un altro gruppo)

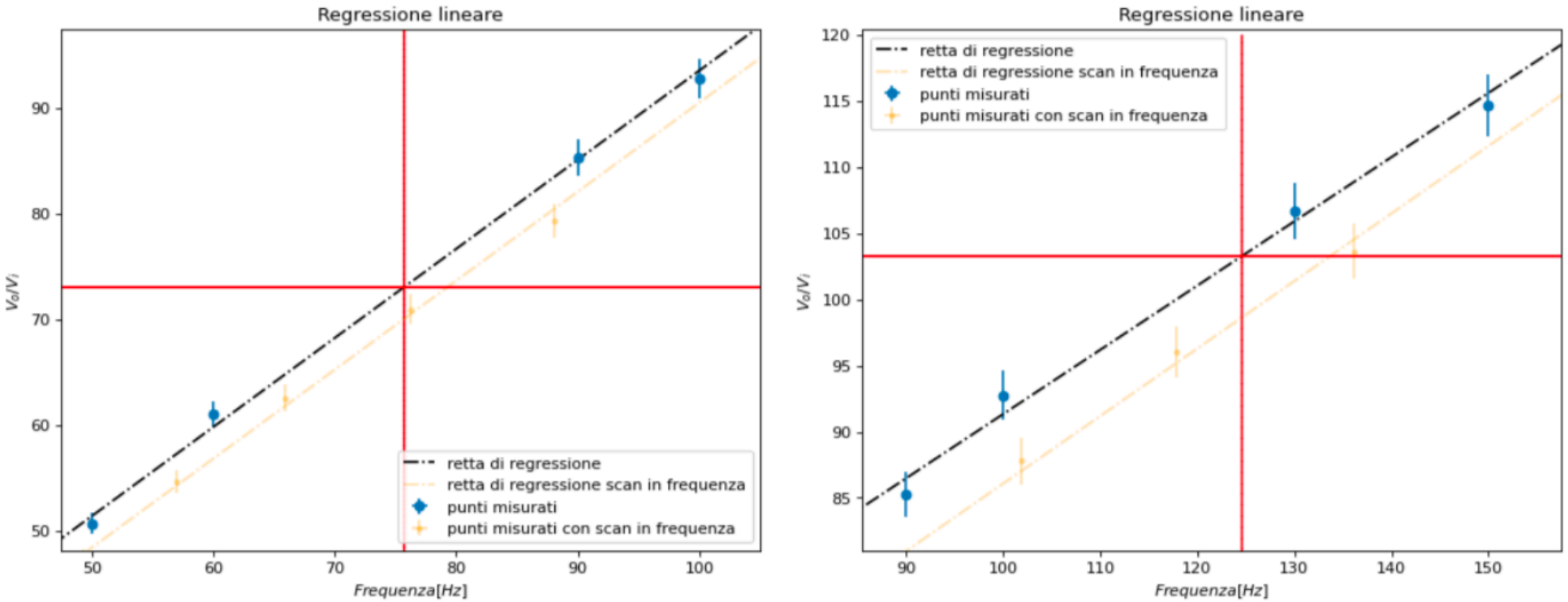
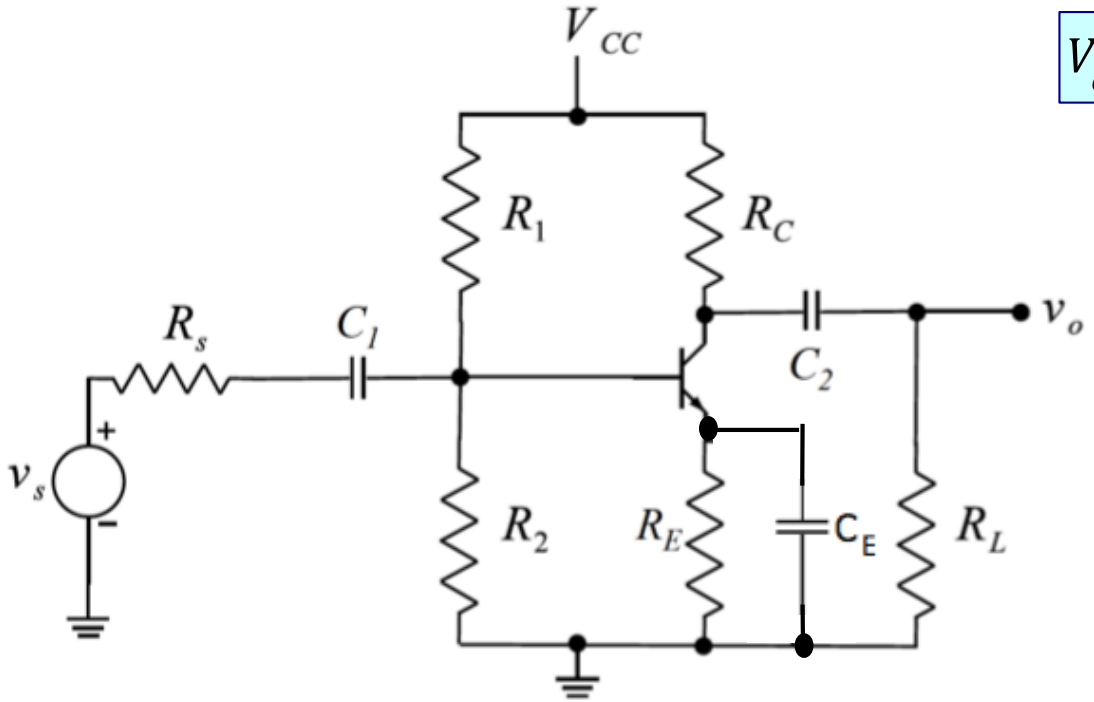


Figura 10: Fit lineari, frequenza di taglio f_L (sx) e f_H (dx)

	$f_L[Hz]$	$f_H[kHz]$	$(V_o/V_i)_{Max}$
Misure manuali	130 ± 4	216 ± 6	146 ± 3
Scan in frequenza	125 ± 4	202 ± 6	142 ± 3

Resistenza d'uscita (fatta con la C_E grande)

- Misurate ore la resistenza d'uscita Ro dell'amplificatore a ***frequenze intermedie***.
- Per farlo occorre confrontare la tensione d'uscita con e senza un carico R_L esterno.
- Il carico R_L deve essere tale da ottimizzare la sensibilità della misura, quindi esso deve avere un valore vicino alla Ro che si vuole misurare, che sappiamo essere uguale a R_C.
- Non dimenticate di inserire il condensatore C_2.



V_o e' la tensione che misurate senza R_L

$$V_o^* = V_o \frac{R_L}{R_{out} + R_L}$$

$$R_{out} = \frac{V_o - V_o^*}{V_o^*} R_L$$

Le tensioni vanno misurate con l'oscilloscopio

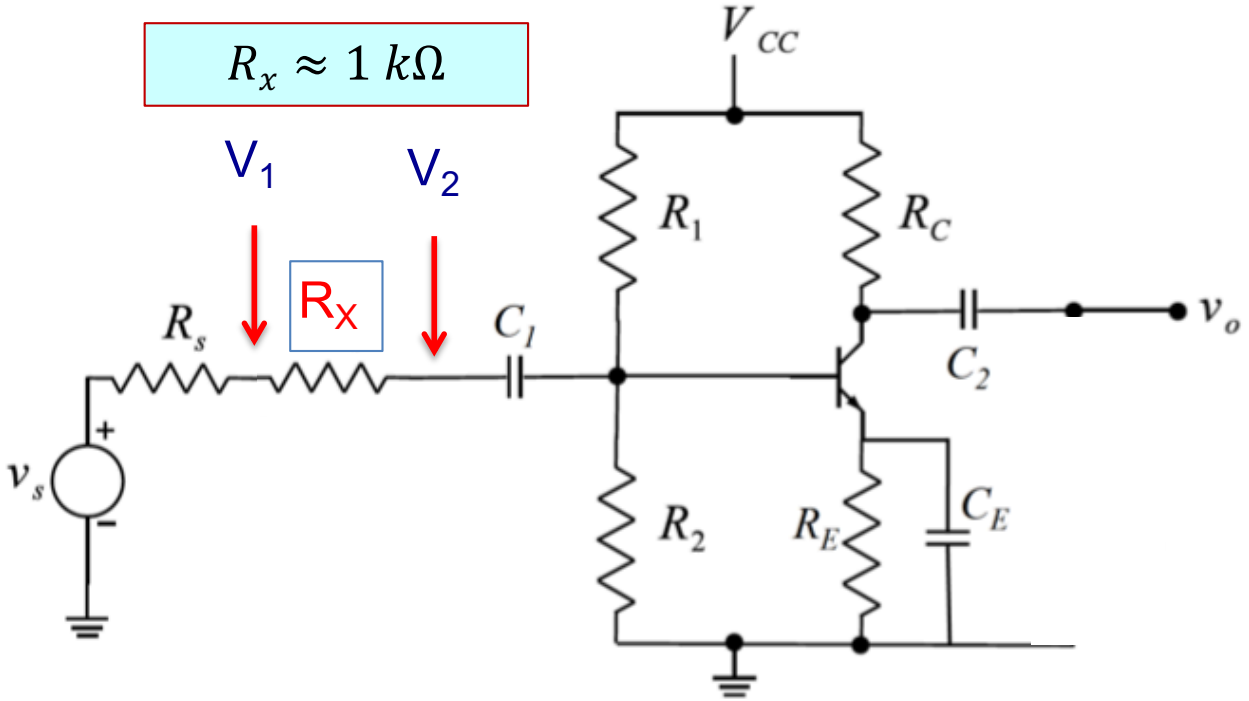
Andrebbero fatte diverse misure al variare di R_L

Resistenza d'ingresso

- proviamo a valutare la resistenza d'ingresso dell'amplificatore. (usate la C_E grande)
- puo' essere valutata dalla misura della frequenza di taglio
- oppure modificando il circuito nel modo seguente:

$$R_{in} = \frac{1}{2\pi f' C_1}$$

$R_x \approx 1\ k\Omega$



$$V_2 = V_1 \frac{R_{in}}{R_X + R_{in}}$$

$$R_{in} = \frac{V_2}{V_1 - V_2} R_X$$

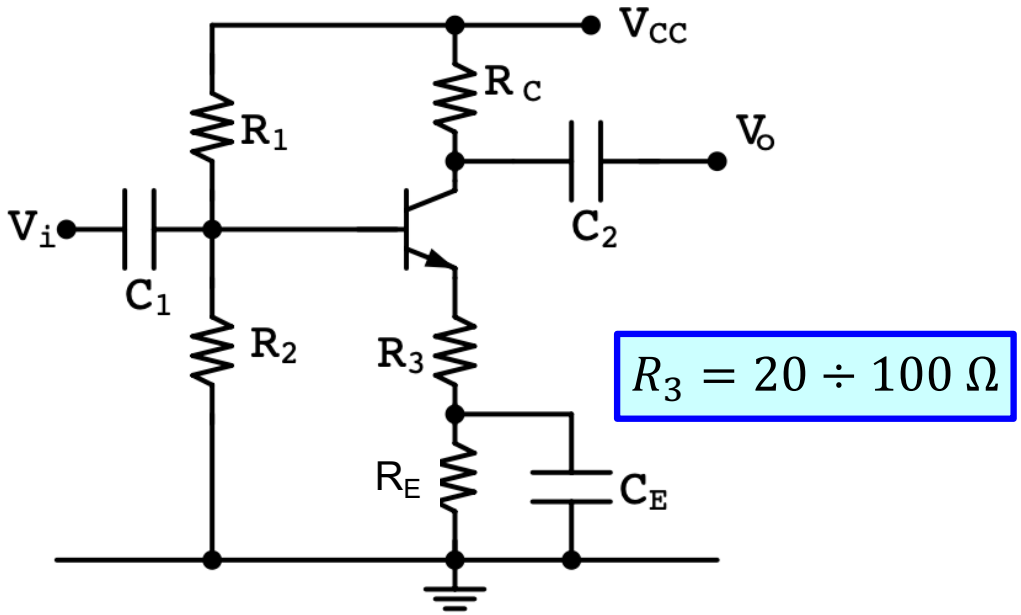
Le tensioni vanno misurate con l'oscilloscopio

Andrebbero fatte diverse misure al variare di R_X

- Utilizzate la resistenza d'ingresso misurata, unitamente alla capacità C_1, per valutare la frequenza di taglio inferiore e confrontatela con quella ricavata dal diagramma di Bode.

Amplificatore con piccola reazione (facoltativo)

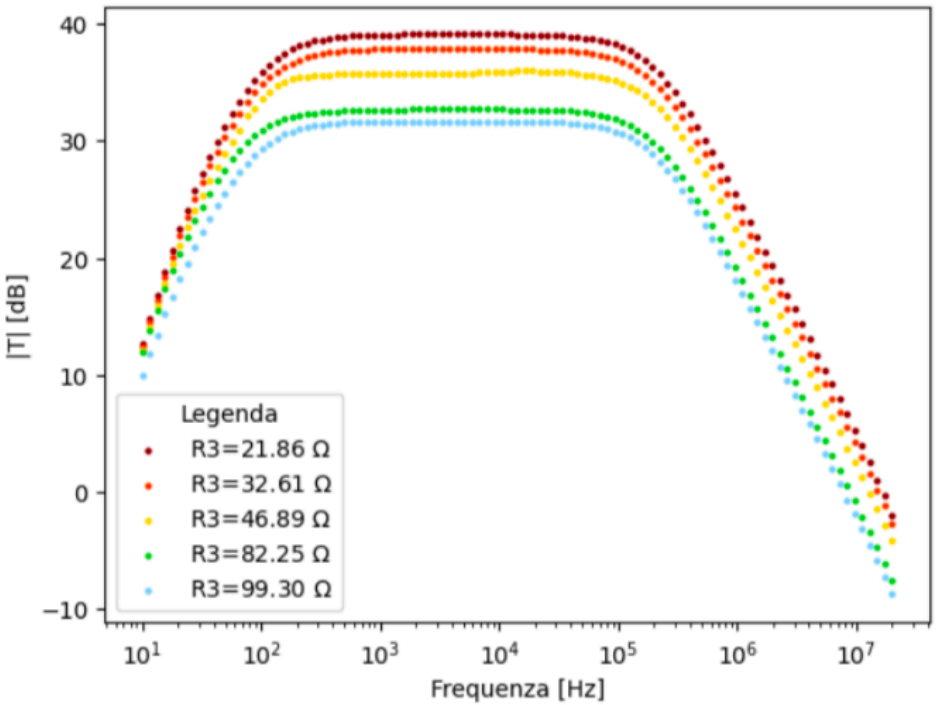
- Modificate leggermente il circuito aggiungendo una piccola reazione negativa tramite la resistenza R_3. Utilizzate la C_E grande.
- Fate il diagramma di Bode.
- Se avete tempo, provate a fare la misura per diversi valori di R_3
- Misurate l'amplificazione massima e le due frequenze di taglio. Confrontate i risultati ottenuti con il caso precedente senza la R_3.



$R_3 = 20 \div 100\ \Omega$

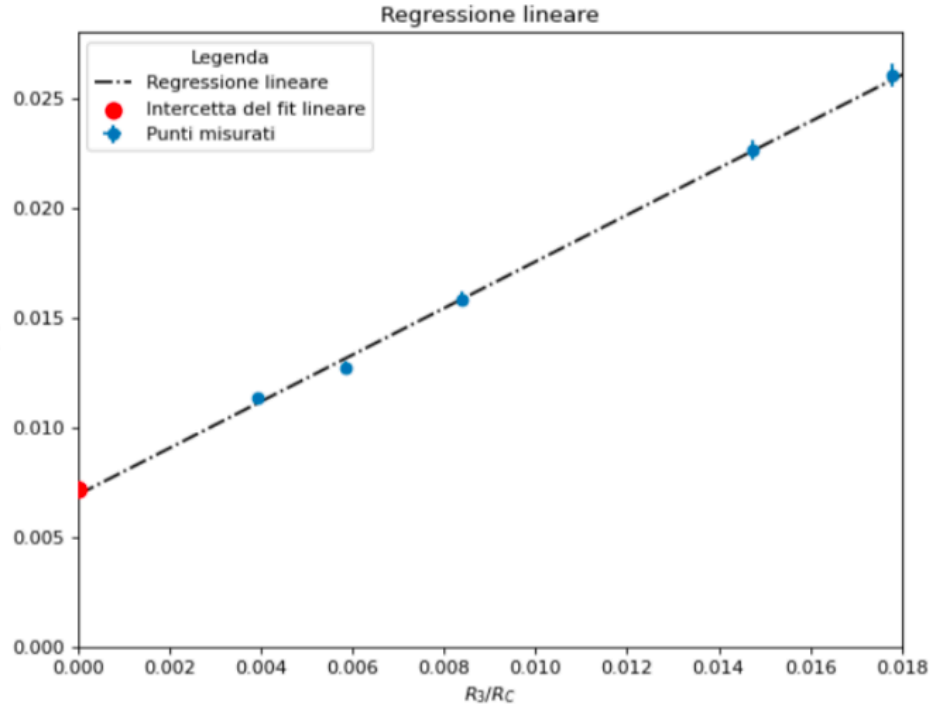
Provate a calcolare da soli qual e' l'amplificazione massima aspettata.

Amplificatore con piccola reazione (facoltativo)



R_3 [Ω]	$f_L[Hz]$	$f_H[kHz]$	$(V_o/V_i)_{Max}$
21.9 ± 0.2	109 ± 4	205 ± 6	86.2 ± 1.7
32.6 ± 0.3	104 ± 3	203 ± 6	77.7 ± 1.6
46.9 ± 0.5	90.2 ± 1.9	213 ± 6	63.0 ± 1.3
82.3 ± 0.8	75.5 ± 1.4	207 ± 6	43.4 ± 0.9
99.3 ± 1.0	87.8 ± 1.8	207 ± 6	38.4 ± 0.7

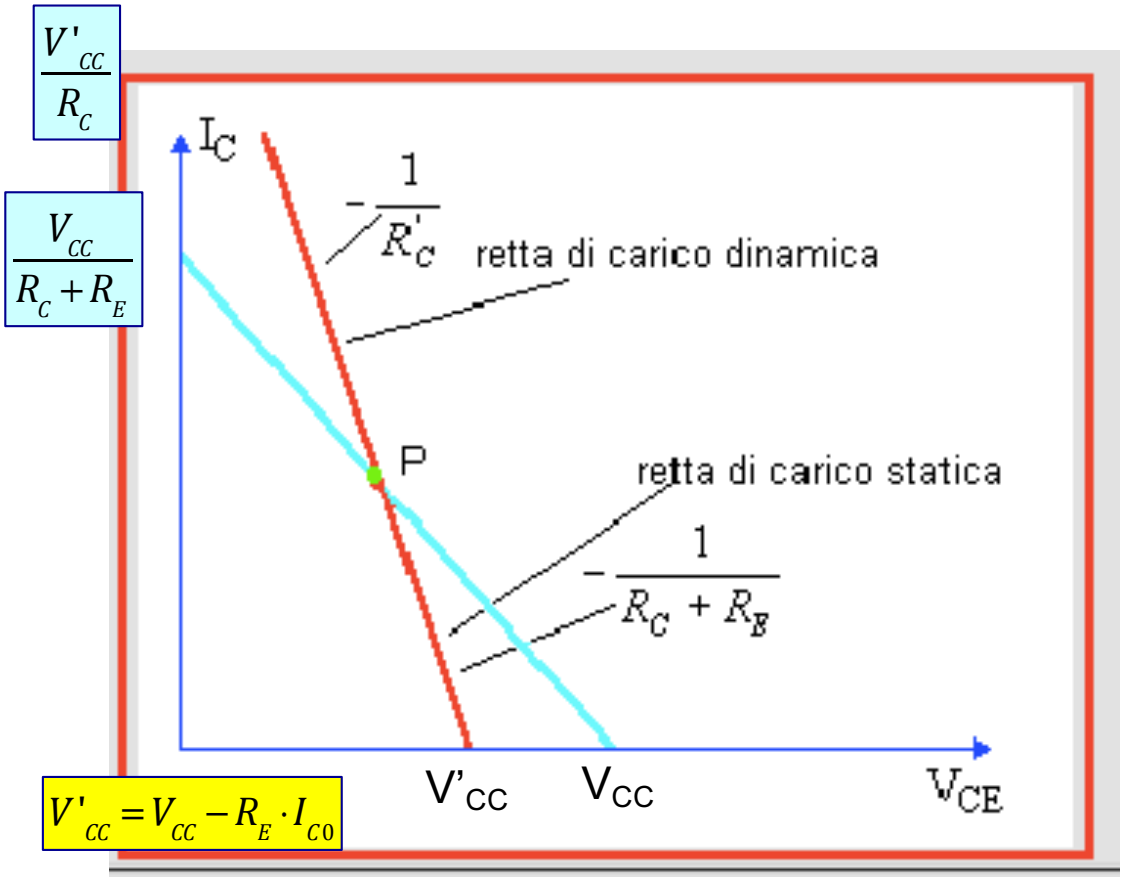
Fit lineare $\frac{1}{A_v}$ vs R_3.



$$\frac{1}{A_v} = \frac{R_3}{R_C} + \frac{r_E}{R_C}, \text{ con } \frac{r_E}{R_C} \text{ intercetta del fit.}$$

Si può ricavare r_E dall'intercetta

Retta di carico dinamica



Esempio: V_{CC} = 10 V, I_C = 1 mA
R_C = 1.2 k e R_E = 1.3 k

$$V'_{CC}=V_{CC}-V_E=10-1.3=8.7\ \text{V}$$

$$\frac{V_{CC}}{R_C+R_E}=\frac{10}{1.2+1.3}=4\ \text{mA}$$

$$\frac{V'_{CC}}{R_C}=\frac{8.7}{1.2}=7.25\ \text{mA}$$

A parita' di ΔI_B , la ΔV_{CE} e' la meta' sulla retta dinamica

$$\Delta V_{CE}^{\max}=V'_{CC}-V_{CE0}=8.7-7.5=1.2\ \text{V}$$

$$\Delta V_I^{\max}=\frac{\Delta V_{CE}^{\max}}{A_v}=\frac{1.2}{50}=24\ \text{mV}$$

E' importante a questo punto osservare che in realtà il punto di lavoro non si sposta lungo la retta di carica statica, ma lungo quella di carico dinamica che può essere abbastanza facilmente individuata perché se ne conosce la pendenza $\left(-\frac{1}{R'_C}\right)$ *e un punto che è sempre quello di lavoro determinato in precedenza. Infatti quando il segnale sinusoidale passa per lo zero, il p.d.l. diventa quello del progetto statico.*

SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Fine esercitazione 3