

Corso di Laboratorio di Fisica

AA 2025/2026
Laurea in Fisica

docenti: Roberto Stroili, Marcello Lunardon, Francesco Sgarbossa

ESERCITAZIONI PRATICHE NEL LABORATORIO DI ELETTRONICA

rev. 2.0

PREMESSA ALLA PREMESSA

*La premessa e le note riportate nel seguito sono parte integrante delle schede delle esperienze. **Leggete sempre tutto il testo**, possibilmente **prima** di iniziare l'esperienza.*

PREMESSA

Le esercitazioni vengono proposte suddivise in 2 sessioni per volta. Si precisa a tal proposito che:

- 1) i circuiti sono proposti con una sequenza consigliata, frutto dell'esperienza degli anni passati, così come per ognuno di essi viene indicato un tempo di esecuzione indicativo, che vi può aiutare nella valutazione dei progressi del vostro lavoro. Se un circuito vi richiede troppo tempo rispetto alle indicazioni non esitate a chiedere aiuto al docente o all'assistente presente in laboratorio;*
- 2) se alla fine qualche misura o qualche circuito non viene completato a causa di problemi tecnici o altre difficoltà che possono capitare in laboratorio, non è un problema ai fini della valutazione finale. Preferiamo che sia fatto qualcosa in meno, ma bene, piuttosto che tutto in fretta e in modo meccanico. In questi casi parlatene sempre con i docenti.*

*In parallelo all'esecuzione delle esperienze va compilato il **logbook elettronico**, utilizzando l'apposito foglio xls che trovate nella sezione Laboratorio della pagina moodle. Oltre ai **dati raccolti**, vanno inseriti anche **alcuni screenshot dell'oscilloscopio e/o foto come da indicazioni** nel seguito.*

*Per i segnali potete salvare immagine e forma d'onda sulla chiave USB: in questo caso **verificate sempre l'immagine acquisita prima di procedere**, perché negli anni scorsi sono capitati non di rado errori di salvataggio di cui gli studenti si sono accorti solo dopo diversi giorni, perdendo la possibilità di recuperare le informazioni originali. Se non funzionasse per qualche motivo il salvataggio su USB va bene anche la foto dell'oscilloscopio.*

***Il logbook xls** vi aiuterà a visualizzare immediatamente i grafici principali e di calcolare alcune grandezze semplici, che serviranno per verificare al volo se il circuito funziona correttamente e se le misure sono state prese bene. In questo modo potrete correggere subito eventuali banali errori di misura o di trascrizione o capire se c'è qualche componente difettoso e sostituirlo senza perdere troppo tempo.*

Il logbook va poi consegnato su moodle alla fine della seconda giornata, come da indicazioni all'inizio del corso. Nel caso variazioni logistiche per assenze/recuperi o altro mettersi d'accordo con i docenti per tempi e modalità di consegna.

STUDIO DI CIRCUITI CON AMPLIFICATORI OPERAZIONALI

Materiale e strumentazione disponibile

- integrato TL082C contenente 2 amplificatori operazionali (vedi schema qui sotto)
- resistenze e condensatori di varie taglie
- un alimentatore di tensione continua stabilizzato (2 uscite 0-20V + 1 uscita fissa 5V)
- un generatore di funzioni Tektronix AFG 1022 a 2 canali
- un oscilloscopio digitale Tektronix TBS 1102B a 2 canali con relative sonde 10x
- due multimetri digitali
- basetta millefori
- cavi unipolari e coassiali di varia tipologia

Per le misure con l'oscilloscopio, salvo esplicita indicazione diversa, utilizzare sempre le sonde!

Schema di alimentazione dell'operazionale

- Collegare l'amplificatore operazionale alle alimentazioni $V_{cc} = +15V$ e $V_{ee} = -15V$. Dal momento che, a causa dell'alto guadagno, gli operazionali sono soggetti a fenomeni di oscillazione, collegare due capacità da $0.1 \mu F$ tra le alimentazioni dell'operazionale e la massa, posizionandoli in prossimità dei pin dell'opamp.
- **WARNINGS:**
 - a. Attenzione a non invertire le polarità delle alimentazioni, si può bruciare l'integrato! Se subito dopo l'accensione vi accorgete che il chip scalda, spegnete subito l'alimentatore e ricontrollate tutto.
 - b. Prima di effettuare qualsiasi modifica al circuito, spegnere le alimentazioni.
 - c. Per evitare che gli input stages dell'opamp si danneggino, non superare mai i valori specificati per V_{cc} e V_{ee} .

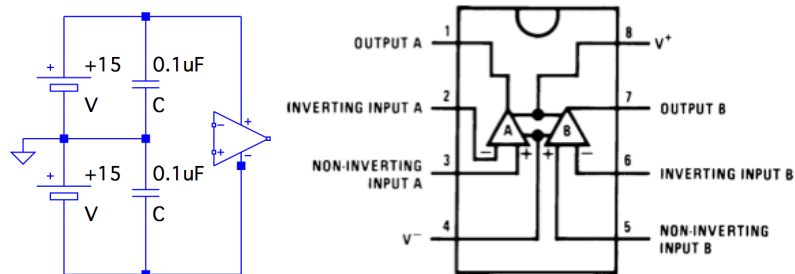


fig.1: schema del circuito di alimentazione dell'opamp TL082 e relativa piedinatura dell'integrato.

PRIMA GIORNATA – WARM-UP

1a) Circuito RC (60' – 120')

Per riprendere confidenza con il laboratorio e la strumentazione già utilizzata a Sperimentazioni 2, si propone la realizzazione del ben noto circuito RC su cui andrete a fare una serie di misure tipo.

Assemblate sulla basetta un circuito **RC passa-basso** serie con capacità $C \sim 1 - 10 \text{ nF}$ e resistenza $R \sim 68 \text{ k}\Omega - 220 \text{ k}\Omega$, avendo cura di misurare prima col multimetro tutti i componenti. Si ricorda che nelle cassettiere non di rado sono presenti componenti di valore diverso da quello indicato sullo scatolino...

→ *logbook: valori misurati con relative scale di lettura e modello dello strumento utilizzato*

1. Inserire in ingresso un'onda quadra di ampiezza $V_{in} \sim 1 - 5 \text{ V}$ e frequenza 50 Hz e visualizzare senza le sonde il segnale di ingresso e la scarica del condensatore in uscita assicurandosi che il condensatore si scarichi completamente prima della successiva carica.
2. Misurare senza le sonde :
 - a. l'altezza del segnale in ingresso (V_{in}) e di quello in uscita (V_{out})
 - b. il tempo caratteristico τ di scarica del condensatore: (a) con misura puntuale quando l'ampiezza del segnale si è ridotta di un fattore $1/e$ e (b) più accuratamente con 6-7 punti della fase di scarica da analizzare in seguito

→ *logbook: valori misurati e relative scale di lettura; screenshot di esempio con V_{in} e V_{out} sovrapposti*

3. Misurare nuovamente V_{in} , V_{out} e τ come prima, ma con le sonde

→ *logbook: valori misurati e relative scale di lettura; screenshot di esempio con V_{in} e V_{out} sovrapposti*

4. Sempre utilizzando le sonde misurare:
 - a. la frequenza di taglio f_T come frequenza alla quale $V_{out}(f) = V_{out}^{MAX} / \sqrt{2}$
 - b. la funzione di risposta in frequenza del passa-basso (solo amplificazione) prendendo una decina di punti tra 10 Hz e 1 MHz

→ *logbook: valori misurati e relative scale di lettura; screenshot di esempio con V_{in} e V_{out} sovrapposti alla f_i individuata*

5. Analizzare i dati:
 - a. grafico dei logaritmi delle tensioni del punto 2
 - b. grafico dei logaritmi delle tensioni del punto 3
 - c. fit lineare dei grafici a) e b) e stima dei τ corrispondenti
 - d. grafico di Bode del punto 4

→ *logbook: grafici e fit semplici richiesti*

6. Conclusioni:
 - a. Riportare in tabella il tempo caratteristico RC trovato come:
 - i. prodotto dei componenti misurati direttamente
 - ii. τ della scarica del condensatore (con e senza sonde)
 - iii. frequenza di taglio
 - b. Riportare in tabella anche le altezze dei segnali di ingresso e di uscita misurati al punto 2 e 3

→ *logbook: riempire la tabella riepilogativa*

Torna tutto con le aspettative? in caso negativo, cosa e perché?

NOTA BENE: da ora in avanti tutte le misure di tensione con l'oscilloscopio andranno fatte utilizzando le sonde (salvo eventuale diversa indicazione esplicita). Si consiglia all'inizio della sessione di lavoro di verificare la corretta compensazione delle sonde.

1b) Realizzazione di un amplificatore lineare invertente con operazionale (30' – 60')

1. Assemblate il circuito in figura 2, con le tensioni di alimentazioni spente, utilizzando due resistenze R_1 e R_f , con $4.7 \text{ k}\Omega < R_1 < 33 \text{ k}\Omega$, in modo tale da avere un'amplificazione in tensione prevista $|A|$ compresa tra 3 e 6 V/V. Misurare le resistenze e calcolare l'esatto valore dell'amplificazione attesa.

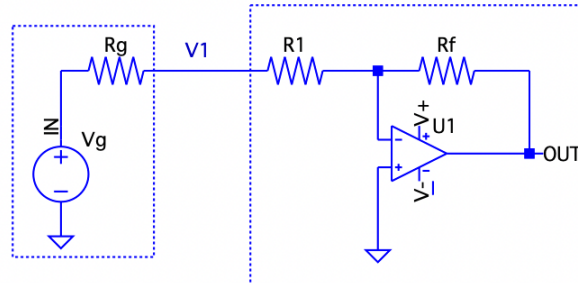


fig.2: amplificatore invertente

2. Generare una tensione sinusoidale di frequenza 1 kHz e una ampiezza 1 V_{pp} e collegarla all'ingresso del circuito
3. Misurare la tensione picco-picco di ingresso con l'oscilloscopio nel punto V1 ($V_{pp,IN}$) e la tensione di uscita in OUT ($V_{pp,OUT}$).
4. Calcolare il valore dell'amplificazione ottenuta sperimentalmente e confrontarlo con quello previsto.

→ logbook: valori misurati e relative scale di lettura; screenshot di esempio con V_{in} e V_{out} sovrapposti. Aggiungere anche una o due foto del circuito montato, che mostrino anche il collegamento all'alimentatore

5. Aumentare infine l'ampiezza del segnale in ingresso fino a 10 V_{PP} . *Come appare ora il segnale di uscita? perché?*

→ logbook: screenshot di V_{in} e V_{out} sovrapposti in saturazione

Torna tutto con le aspettative? in caso negativo, cosa e perché?

FINITE QUESTE MISURE NON SMONTATE IL CIRCUITO! SERVE ANCORA...

Integrazione dell'analisi dati per l'eventuale presentazione

1. calcolare le incertezze strumentali di tutte le misure eseguite e rifare i grafici con le barre di errore
2. fare i grafici dei residui dei fit lineari e commentare la bontà dei fit
3. calcolare le incertezze nella tabella del punto 6 e le compatibilità tra le varie misure delle stesse grandezze
4. Simulare il circuito RC con LTspice e studiare la risposta del circuito nel caso ideale e quando sono attaccati il generatore e l'oscilloscopio (senza e con sonda)

SECONDA GIORNATA – AMPLIFICATORI IN TENSIONE E FILTRI CON OPERAZIONALI

2) Misura della curva di trasferimento VTC (caratteristica V_{in} vs. V_{out}) per un amplificatore invertente (40' – 60') e misura della banda passante.

1. Riprendete l'amplificatore invertente del punto precedente.

Curva VTC

2. Impostare l'onda di ingresso sinusoidale con frequenza 1 kHz e una ampiezza di $0.2 V_{pp}$:
3. Come fatto precedentemente, ricavare sperimentalmente l'amplificazione misurando la tensione picco-picco di ingresso con l'oscilloscopio nel punto V1 ($V_{pp,IN}$) e la tensione di uscita in OUT ($V_{pp,OUT}$).
4. Aumentare progressivamente l'ampiezza del segnale in ingresso e misurare l'ampiezza $V_{pp,OUT}$ in uscita (una decina di punti). Prendere anche un paio di punti in saturazione.
5. Riportare i risultati in un grafico $V_{pp,OUT}$ vs. $V_{pp,IN}$ (curva VTC) e fittare con una retta i punti sperimentali per ricavare una stima dell'amplificazione del circuito e verificare la linearità della risposta quando l'operazionale non è saturato.

→ logbook: valori misurati e relative scale di lettura; screenshot di esempio con V_{in} e V_{out} sovrapposti. Grafico curva VTC e fit semplice

Risposta in frequenza

6. Partire con l'onda sinusoidale impostata a $1 V_{pp}$ di ampiezza e 30 Hz di frequenza e misurare l'ampiezza della tensione in uscita.
7. Prendere altri punti per costruire il grafico della risposta in frequenza (solo amplificazione) a 0.1 kHz, 0.3 kHz, 1 kHz, 3 kHz, ... fino a circa 1 MHz (o fin dove riuscite)

L'ampiezza della tensione in uscita dovrebbe idealmente essere la stessa per ogni frequenza (bandwidth infinita). Inizialmente dovrebbe essere così, ma salendo in frequenza l'operazionale reale non riesce a mantenere il guadagno iniziale, che cala quindi progressivamente...

8. Misurare la **larghezza di banda** in modo diretto: variare la frequenza sul generatore tenendo d'occhio l'ampiezza di uscita fino a trovare la frequenza che corrisponde a un taglio dell'amplificazione di un fattore $1/\sqrt{2}$ (-3 dB) rispetto al valore a bassa frequenza.

→ logbook: valori misurati e relative scale di lettura; grafico di Bode; screenshot di esempio con V_{in} e V_{out} sovrapposti alla frequenza f_i identificata.

3) Realizzazione di un circuito derivatore (40' – 60')

Il circuito rappresentato in figura 3 è un derivatore (attivo). Si ottiene facilmente a partire dal circuito precedente inserendo una capacità in serie sull'ingresso.

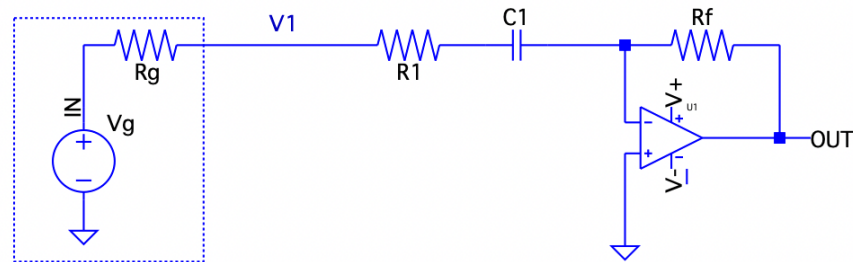


fig.3: circuito derivatore

1. Modificare il circuito precedente aggiungendo la capacità C1 di valore tale che la frequenza di taglio prevista risulti compresa tra 8 kHz e 15 kHz.
2. Misurare la capacità col multimetro e calcolare il valore della frequenza di taglio attesa, il valore atteso di amplificazione ad alta frequenza e quello atteso alla frequenza di taglio.

→ logbook: *valori misurati e relative scale di lettura; valori attesi di f_t , A_{HF} e di $A(f_t)$.*

3. **Verifica qualitativa che avete costruito un derivatore invertente:** utilizzate il generatore di funzioni per iniettare un'onda triangolare di ampiezza 1 V (in V1) con frequenza almeno 20 volte più bassa della frequenza di taglio. Visualizzate la tensione di ingresso (V1) e la tensione in uscita dall'operazionale (OUT) verificando di ottenere la derivata invertita dell'ingresso. In caso contrario contattare il docente.

→ logbook: *screenshot di esempio con Vin e Vout sovrapposti*

4. Ripristinare quindi la forma d'onda sinusoidale e misurare la risposta in frequenza (*solo ampiezze*) prendendo una dozzina di punti tra 30 Hz e 1 MHz, di cui in particolare 3-4 punti attorno alla frequenza di taglio calcolata in precedenza.
5. riportare in grafico l'andamento dell'amplificazione in dB in funzione della frequenza (*grafico di Bode*) e ricavare in fase di analisi dati la stima migliore della frequenza di taglio.

Fate anche in laboratorio una misura veloce della f_t ¹ dai dati raccolti e verificate che sia ragionevolmente simile alle aspettative, in caso contrario contattare i docenti.

→ logbook: *valori misurati e relative scale di lettura; grafico di bode; valore approssimato misurato di f_t .*

¹ a causa della banda limitata dell'opamp il vostro circuito potrebbe cominciare a tagliare in alto prima di aver raggiunto l'amplificazione massima (lo vedete dalla misura precedente della larghezza di banda). Per trovare sperimentalmente la f_t come fatto nel caso del circuito RC (procedura semplice e consigliata) utilizzate come valore di amplificazione massima di riferimento quella misurata con la VTC invece di quella massima che vedete in questo circuito.

4) Amplificatore delle differenze, amplificatore non-invertente e CMRR (60' – 120')

1. Modificate nuovamente il circuito iniziale realizzando il circuito in figura 4, con le tensioni di alimentazioni spente: dopo aver rimosso il condensatore C1, prendere una resistenza R3 dello stesso valore della R1 precedente, e una R4 uguale alla Rf. Misurate i valori delle nuove resistenze, inseritele nel circuito come in figura e calcolate il guadagno teorico atteso.

→ logbook: valori misurati e relative scale di lettura; valore atteso di A_D .

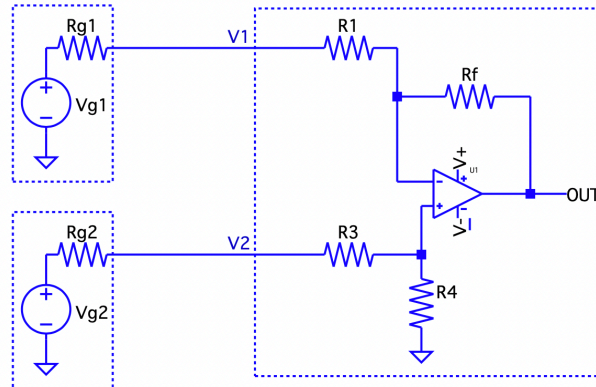


fig.4: amplificatore delle differenze

2. Verificate che avete costruito un **amplificatore delle differenze**:

- 2.1. inserite in V1 (ingresso invertente) un'onda sinusoidale con ampiezza $1 V_{pp}$ e frequenza 1 kHz
- 2.2. inserite su V2 (non invertente) un'onda quadrata con ampiezza $2 V_{pp}$ e frequenza 100 Hz

visualizzate il segnale di uscita triggerando sul segnale più lento, quindi V2.

- 2.3. aggiungete ora un DC offset di +1V all'onda sinusoidale in V1

visualizzate il segnale di uscita: come si è spostato? torna con le aspettative?

- 2.4. aggiungete ora un DC offset di +1V anche all'onda quadrata in V2

visualizzate il segnale di uscita: come si è spostato? torna con le aspettative?

→ logbook: screenshot di V_{in} e V_{out} sovrapposti dei punti 2.3 e 2.4

3. Amplificazione differenziale, di modo comune e CMRR

- 3.1. Misuriamo l'amplificazione dell'ingresso invertente (A1) : mettere a massa l'ingresso V2, inserire in V1 un'onda sinusoidale di frequenza 1 kHz con vari valori di ampiezza compresa tra $0.2 V_{pp}$ e $2 V_{pp}$ (5-6 misure). Misurare la corrispondente tensione di uscita V_{pp} e calcolare l'amplificazione.
- 3.2. In modo analogo misuriamo l'amplificazione dell'ingresso non-invertente (A2) : mettere a massa stavolta l'ingresso V1, inserire in V2 un'onda sinusoidale di frequenza 1 kHz con vari valori di ampiezza compresa tra $0.2 V_{pp}$ e $2 V_{pp}$ (5-6 misure). Misurare la corrispondente tensione di uscita V_{pp} e calcolare l'amplificazione.
- 3.3. Ricavare quindi l'**amplificazione differenziale A_D**

3.4. Misuriamo ora l'**amplificazione di modo comune A_c** : impostare un'onda sinusoidale sul generatore e mandare lo stesso segnale V_{IN} sia sull'ingresso V_1 che su V_2 . Misurare la tensione di uscita V_{OUT} per diversi valori di V_{IN} e ricavare l'amplificazione di modo comune A_c .

3.5. Calcolare il **CMRR** del circuito (da esprimere in dB).

→ *logbook: valori misurati e relative scale di lettura; grafici VTC e fit semplici e calcolo preliminare di A_D , A_c e CMRR; screenshot di esempio con V_{in1} e V_{out} sovrapposti nella misura di A_c (pto 6).*

Integrazione dell'analisi dati per l'eventuale presentazione

1. calcolare le incertezze strumentali di tutte le misure eseguite e rifare i grafici con le barre di errore
2. fare i grafici dei residui dei fit lineari e commentare la bontà dei fit
3. calcolare le incertezze delle grandezze derivate e le compatibilità tra i valori misurati e quelli attesi
4. Simulare i circuiti realizzati con LTspice e confrontare la simulazione con i dati sperimentali: sovrapponete le curve generate con Spice ai grafici dei vostri dati, ove utile evidenziando le differenze con un grafico tipo grafico dei residui (dati – sim)