

Scheda di laboratorio n.03

Amplificatore operazionale I

1 Introduzione agli “OpAmp”

L'amplificatore operazionale (OpAmp) è un dispositivo elettronico disegnato per essere – in una certa misura – “universale” e permettere di costruire circuiti *analogici* senza doversi confrontare con le complessità di componenti discreti quali, per esempio, gli apparentemente semplici transistori. Gli operazionali trovano un vasto utilizzo in circuiti di misura, nel condizionamento dei segnali, nel filtraggio eccetera ed esistono fin dai tempi delle valvole termoioniche. Nella sua versione moderna, l'OpAmp è un *circuito integrato* di piccole dimensioni e (spesso) dal costo molto contenuto, che integra al suo interno qualche decina di transistori e altri componenti passivi. La prima realizzazione di un OpAmp come dispositivo *monolitico* (ossia letteralmente in un'unica pietra, in questo caso di silicio) risale alla metà degli anni '60 quando la Fairchild Semiconductor¹ commercializzò l'OpAmp $\mu A709$. Il dispositivo fu progettato da Robert Widlar e ben presto incapsulato nella forma *dual in line* che ancora oggi viene adoperata (Figura 1.1.a). Widlar ed il suo gruppo fecero la fortuna della Fairchild e, pochi anni dopo egli fu tra i fondatori della National Semiconductor e poi della Linear Technology, che una delle ditte più importanti nel mercato dei circuiti integrati analogici.

Il simbolo circuitale dell'OpAmp è visibile in Fig.1.1.b. Il componente è **attivo** e ha due alimentazioni, una positiva e una negativa e tipicamente simmetriche, chiamate $+V_s$ e $-V_s$. Queste sono **spesso omesse** perché ovvie e per rendere gli schemi più leggibili (ma ci sono, **sempre!**)² l'OpAmp ha tre connessioni dette:

- *ingresso invertente*, spesso indicato come V_- o $-$ (da **non confondere** con l'alimentazione negativa $-V_s$);
- *ingresso non-invertente*, V_+ o $+$ (da **non confondere** con l'alimentazione positiva $+V_s$);
- *uscita*, tipicamente indicata come V_{out} .

1.1 Regole d'oro degli OpAmp

In breve, un OpAmp è un *amplificatore differenziale* caratterizzato da un'amplificazione A molto grande, in cui il voltaggio di output V_{out} è determinato dai due voltaggi di ingresso $V_+/-$ secondo l'equazione

$$V_{out} = A(V_+ - V_-).$$

In aggiunta a questo, il circuito è disegnato per avere un assorbimento di corrente tipicamente trascurabile ai due ingressi. Nel limite in cui possiamo approssimare A come infinita e la corrente assorbita dai due ingressi come esattamente nulla, otteniamo quello che viene detto un OpAmp *ideale*, che ha un comportamento universale e che rende

¹La Fairchild può essere considerata l'incubatore della Silicon Valley, tanto che il vasto gruppo di industrie “discendenti” fondate da suoi dipendenti (fra queste la Intel) è noto come “Fairchildren”. La Fairchild fu fondata da un gruppo di giovani ingegneri e fisici (fra cui Gordon Moore, quello della famosa legge) che prima lavoravano per Schokley, premio Nobel per l'invenzione dell'effetto transistor, e che sono passati alla storia come “gli otto traditori”.

²Altre possibili notazioni per l'alimentazione positiva sono V_C (collector) o V_D (drain), mentre l'alimentazione negativa potrebbe essere indicata come V_E (emitter) o V_S (source).

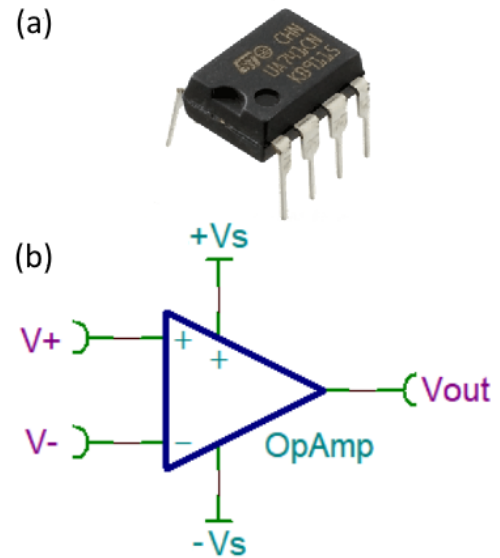


Figura 1.1: Amplificatore operazionale: (a) formato dual in line; (b) simbolo circuitale.

particolarmente semplice disegnare una grande varietà di circuiti. Nei circuiti OpAmp il voltaggio di uscita V_{out} è elettricamente connesso - tipicamente attraverso una rete di componenti passivi - agli ingressi $V+$ e/o $V-$, andando a creare un meccanismo detto di *feedback*, o retroazione. Tipicamente (ma non sempre) il feedback è *negativo* e quindi tende a sopprimere la differenza fra i due ingressi $V+$ e $V-$ e a limitare il voltaggio di uscita. Nel limite in cui A diventa infinita questo porta $V+$ e $V-$ a coincidere, portandoci nel limite delle **Regole d'oro degli OpAmp**:

1. **Regola 1.** I due voltaggi di ingresso sono identici: $V+ = V-$;
2. **Regola 2.** La corrente assorbita dai due ingressi $V+$ e $V-$ è nulla.

Ovviamente $V+ = V-$ non implica affatto $V_{out} = 0$, dato che A è idealmente infinita. Inoltre, non bisogna preoccuparsi di apparenti inconsistenze con la legge dei nodi di Kirchhoff per le correnti agli input e output: l'OpAmp è alimentato (ricordiamo sempre che esistono e vanno collegate le tensioni di alimentazione $V_{s+/-}$, anche se magari non sono esplicitamente indicate) semplicemente $V+$, $V-$ e V_{out} non sono tutte le connessioni del circuito e della corrente scorre anche da a verso le alimentazioni.

1.2 Primi circuiti ad OpAmp con feedback resistivo negativo

I primi due circuiti che verificheremo sperimentalmente derivano da una semplice applicazione delle regole d'oro appena definite e realizzano degli amplificatori con un guadagno che è determinato dalle resistenze coinvolte nella retroazione, mentre dipende poco o nulla dalle caratteristiche dell'OpAmp, inclusi in particolare i suoi eventuali piccoli difetti. Va innanzi tutto notato che, in entrambi i circuiti, l'output è connesso all'ingresso invertente e quindi un aumento di V_{out} porta ad un aumento di $V-$, creando una retroazione negativa; siamo quindi nelle condizioni in cui le regole d'oro degli OpAmp hanno senso.

Nel circuito in Figura 1.2a abbiamo che il voltaggio di ingresso V_{in} è connesso al polo non invertente, quindi, sfruttando la prima regola, abbiamo $V+ = V- = V_{in}$; questo implica che la resistenza R_1 è percorsa da una corrente $I = V_{in}/R_1$. Per la seconda regola, l'assorbimento di corrente di $V-$ è trascurabile e quindi I è anche la corrente che attraversa R_2 e possiamo calcolare

$$V_{out} = V_{in} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right). \quad (1.1)$$

Abbiamo, quindi, ottenuto un amplificatore con un guadagno $G = 1 + R_2/R_1$, che non dipende dai dettagli dell'OpAmp, ma solo dalle resistenze che abbiamo posto nella rete di retroazione. Visto che abbiamo $G > 0$ questa configurazione viene detta *non invertente*.

Qualcosa di simile succede nel circuito in Figura 1.2b, dove abbiamo $V+$ collegato al riferimento di terra e quindi anche $V- = 0$. Questo implica che la resistenza R_1 è percorsa da una corrente $I = V_{in}/R_1$ che non può far altro (non essendoci alcuna corrente in ingresso negli input) che continuare in R_2 e quindi abbiamo

$$V_{out} = -\frac{R_2}{R_1} V_{in}, \quad (1.2)$$

ovvero un amplificatore con guadagno $G = -R_2/R_1$. Dato che $G < 0$, questo viene detto un amplificatore *invertente*. Per distinguere il guadagno, o amplificazione, G dovuti alla presenza della retroazione dall'amplificazione intrinseca dell'OpAmp A , indicheremo quest'ultima come "amplificazione *open loop*", dove il *loop* è chiaramente quello di retroazione.

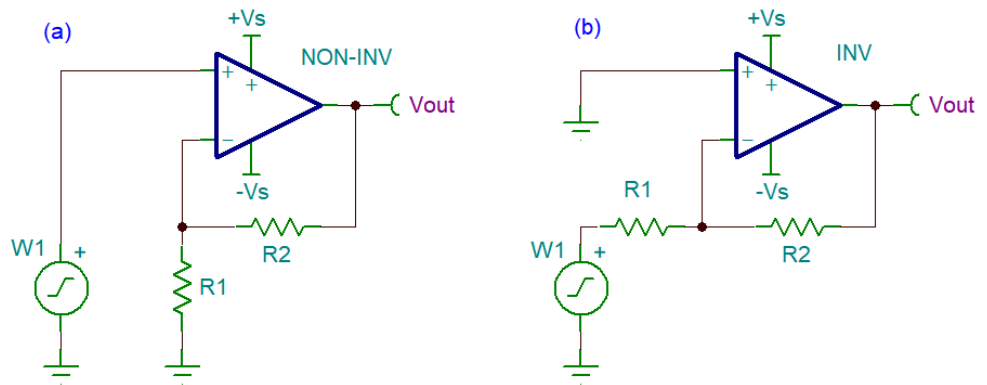


Figura 1.2: Amplificatore (a) invertente e (b) non-invertente.

2 Montaggio dei primi circuiti OpAmp

Prenderemo confidenza con gli OpAmp utilizzando il modello OP07 e l'equivalente più recente OP77 prodotti dalla Analog Devices.

Task 1 Verificare la serigrafia sul chip fornito e verificare che il modello sia corretto. Studiare il *datasheet* di OP07/OP77 e riportare sul *logbook*

- la piedinatura dell'integrato e le varie connessioni dell'operazionale.
- i valori di alimentazione previsti, e in particolare gli *absolute maximum ratings*.

L'OpAmp è il primo circuito integrato che usiamo. Il formato *dual-in-line* (Figura 1.1) ha un segno di riconoscimento (*key*) sull'involucro per riconoscere la *piedinatura* del *chip*, ovvero un semi-cerchietto sul dorso del *case* che individua il lato da cui cominciare a contare i pin. Disponendo il *chip* con il cerchietto in alto, il pin numero 1 è quello in alto a sinistra. In alcuni casi il semicerchio sul dorso è sostituito da un cerchietto inciso in corrispondenza del pin numero 1. In ogni caso i pin si leggono in senso antiorario guardando il chip dall'alto. Nel foglio di specifiche di ogni integrato c'è sempre uno schema grafico della piedinatura.

IMPORTANTE. Non c'è nulla di più comune dello scambiare alimentazione positiva e negativa e bruciare qualcosa. Contiamo che non succeda mai e per evitarlo questo abbiamo i seguenti consigli:

- L'**entropia** non è un vostro alleato. Tenete i vostri montaggi il più possibile puliti e usate i colori standard per i cavi: se li scambiate funziona tutto lo stesso ma sarà n volte più facile confondersi.
- La **fretta** non è un vostro alleato (e contribuisce all'entropia del tutto). Pianificate che fate, ci metterete meno tempo che lanciandovi a montare/misurare tutto quello che capita.
- Usate tester e strumenti affini. Per esempio uò essere utile controllare visivamente le connessioni di alimentazione, ma misurarle è anche meglio.

Oltre a questi consigli, diamo il seguenti indicazioni più perentorie:

- **è obbligatorio distribuire le alimentazioni e le connessioni di terra usando i rails che si trovano lungo il lato lungo della breadboard.**
- **la pulizia del montaggio sarà osservata e valutata.**

Controllo dell'alimentazione duale tramite il modulo `tdwf`. Illustriamo i passaggi chiave necessari, dando per scontato che sia stato creato un oggetto `ad2` (al solito ricordiamo che il nome della variabile è solo un nome e potete cambiarlo a vostro piacere, basta che usiate sempre lo stesso) per aprire la comunicazione

```
ad2.vdd = +4      # impostazione voltaggio positivo a +4V
ad2.vss = -3      # impostazione voltaggio negativo a -3V
ad2.power(True)  # attiva l'alimentatore (False lo spegne)
```

Nota. Come in altri casi, si ricorda che l'istruzione `ad2.close()` non solo interrompe le comunicazione, ma **spegne anche qualsiasi output, incluse le alimentazioni**. Tentare di misurare il voltaggio di alimentazione con il multimetro, sperando di "inseguirlo" mentre viene prima acceso e poi subito dopo spento dal codice, è una impresa senza speranza. Suggeriamo le seguenti alternative:

1. inserire, prima dell'istruzione `.close()`, un `input("Premere ENTER per continuare")`
2. inserire, sempre nello stesso punto, un `time.sleep(numero_secondi)`
3. ricordiamo che non è necessario inserire l'istruzione `.close()` alla fine del codice. Una opzione è per esempio di trasferirla in un'altra cella del codice. Ricordate solo che finché non chiudete la comunicazione Analog Discovery 2 non può essere usato da altri programmi, incluso un altro *kernel* python che per esempio potreste avviare lanciando un altro script.

2.1 Amplificatore invertente

L'OpAmp va collocato a cavallo di due matrici larghe di connettori orizzontali, separate da una *cessa*. A questo punto siamo pronti a montare il circuito dell'amplificatore invertente. Come buona regola, si eseguano i collegamenti necessari in questo ordine:

1. riferimento di terra;
2. ingressi e uscita dell'OpAmp;
3. le due alimentazioni (per ultime).

Si noti che Analog Discovery 2 include due uscite di alimentazione che arrivano rispettivamente fino a $\pm 5V$ e che fanno capo al **cavo rosso** e al **cavo bianco**. Per attivare queste alimentazioni sarà necessario utilizzare alcuni nuovi comandi come indicato nel precedente paragrafo. Eseguire il montaggio e test del circuito secondo i seguenti *Task*.

Task 2 Impostare l'alimentatore duale in maniera che fornisca una uscita a $+5V$ e una a $-5V$ rispetto al contatto di terra. Verificare i voltaggi effettivi erogati e riportarli sul *logbook*.

Task 3 Si monti sulla breadboard il circuito dell'amplificatore invertente (Figura 1.2b), scegliendo due resistenze il cui rapporto sia 10, per esempio $R_2 = 22\text{ k}\Omega$ e $R_1 = 2.2\text{ k}\Omega$. Collegare il circuito alla scheda di acquisizione come già fatto nel caso dei circuiti passivi, connettendo W1 all'ingresso del circuito, che verrà monitorato da Ch1 e connettendo l'uscita a Ch2. Eseguire i seguenti test sperimentali:

1. usare un segnale standard (per esempio una sinusoide a 1 kHz di ampiezza opportuna) per verificare se l'amplificatore funziona come previsto;
2. studiare che cosa succede quando V_{out} si avvicina alle tensioni di alimentazione.

Salvare il risultato dello studio su un grafico conclusivo `AmplificatoreInvertente.pdf`.

2.2 Amplificatore non invertente

Il passaggio dalla configurazione invertente a quella non invertente dell'esercizio precedente è immediata.

Task 4 Partendo dal montaggio precedente, si scollegi l'ingresso $V+$ da terra e il collegamento a terra venga spostato a quello che era l'ingresso V_{in} . Inoltre si deve portare il *pin* di ingresso proveniente dall'output W1 all'ingresso $V+$. Ripetere lo stesso studio fatto per il primo circuito e salvare il risultato su un grafico conclusivo `AmpificatoreNonInvertente.pdf`.

2.3 Circuito inseguitore o *buffer*

Una configurazione OpAmp fondamentale è il cosiddetto *inseguitore*, detto anche *voltage follower* o *buffer*. In pratica, si tratta di un amplificatore non invertente con resistenza di *feedback* nulla, ovvero con l'uscita cortocircuitata con l'ingresso invertente. L'amplificazione di questa combinazione è 1 per il segnale applicato all'ingresso $V+$ (Fig.2.1). Come illustrato a lezione, questo circuito produce semplicemente una *copia* del segnale di ingresso, il che è apparentemente poco utile ma può essere fondamentale per adattare le impedenze.

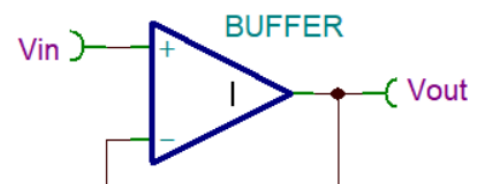


Figura 2.1: *Buffer*.

Task 5 Realizzate il filtro CRRC studiato nella settimana precedente, inserendo in questo caso un *buffer* fra i due stadi del filtro. Verificare che disaccoppia come atteso i due stadi del filtro, facendo in modo che la funzione di risposta complessiva sia uguale al prodotto della risposta dei due stadi.