

QUADERNO DI LABORATORIO

Francesco Pasa

francescopasa@gmail.com - Gruppo A5

1 Sorgente di corrente costante e sommatore pesato

1.1 Obiettivo

Nella prima sessione di laboratorio abbiamo riepilogato gli amplificatori operazionali, costruendo due semplici circuiti: un generatore di corrente costante e un sommatore pesato di tensioni.

1.2 Materiali e circuiti

Per costruire i due circuiti in esame, mostrati in figura 1.1, abbiamo utilizzato i seguenti materiali:

- Breadboard, cavi a banana e cavetti da breadboard.
- Amplificatore operazionale UA741.
- Resistenze: $3.9\text{ k}\Omega$, $50\text{ k}\Omega$, $100\text{ k}\Omega$ e una variabile per simulare un carico con impedenza non costante. Nel nostro caso abbiamo usato una resistenza con un range operativo da 0 a $10\text{ k}\Omega$.
- Alimentatore di corrente continua.
- Generatore di funzioni d'onda Agilent 33120A.
- Multimetro Agilent 34410A.
- Oscilloscopio Agilent DSO-X 2002A, con generatore di funzioni d'onda integrato (purtroppo questo modello ha solo 2 canali di input, per il test del sommatore sarebbe stato meglio avere un oscilloscopio con almeno 3 input).

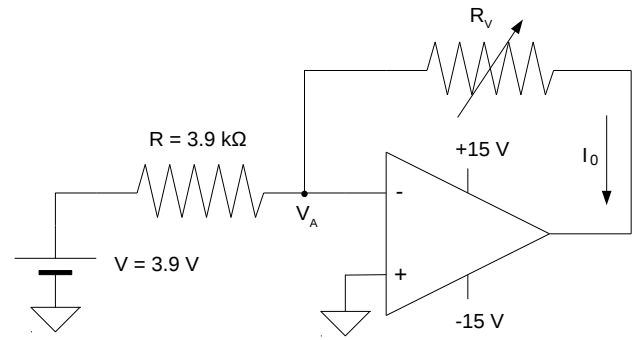
1.3 Dati e risultati

1.3.1 Generatore di corrente costante.

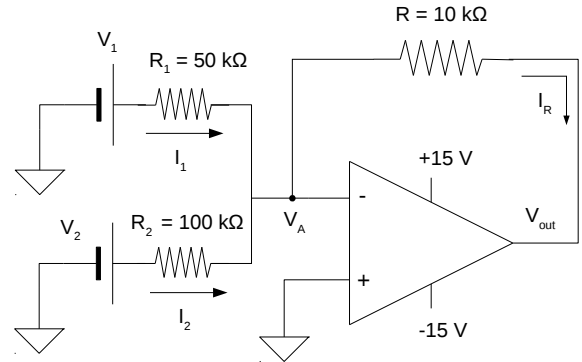
Il generatore di corrente costante è stato costruito come nello schema in figura 1.1a. La scelta della tensione di input V è stata dettata dal valore della resistenza R a nostra disposizione e dalla corrente che volevamo generare: 1 mA . Infatti il polo invertente dell'operazionale è un ground virtuale (cioè $V_A = 0$), quindi la corrente I_0 , tenuto conto del fatto che il polo assorbe una corrente trascurabile, vale V/R (1 mA appunto).

Poiché abbiamo usato una resistenza R con una tolleranza del 5%, che assumo come incertezza sul valore della stessa, e che l'incertezza di risoluzione sulla tensione V è di 0.005 V , il valore atteso della corrente con l'incertezza è $I_0 = 1 \pm 0.05\text{ mA}$.

Abbiamo misurato con il multimetro la corrente I_0 al variare del valore della resistenza R_v , per verificare il funzionamento del generatore. La noiosa tabella 1.1 mostra che la corrente non varia al variare della resistenza di carico, proprio come volevamo realizzare. Il circuito si comporta come una sorgente di corrente costante.



(a) Generatore di corrente costante



(b) Sommatore pesato di tensioni

Figura 1.1: Circuiti costruiti durante l'esperienza

1.3.2 Sommatore pesato di tensioni.

Il sommatore pesato di tensioni che abbiamo realizzato è il circuito 1.1b, ed è pensato per fornire il seguente output

$$V_{\text{out}} = R \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} \right) \quad (1.1)$$

Come nel circuito precedente si ha che $V_A = 0$ (ground virtuale) e che l'amplificatore operazionale assorbe una quantità di corrente trascurabile, per cui la corrente di retroazione I_R è data dalla somma di I_1 e I_2 (per la conservazione della carica). Le resistenze R_1 e R_2 trasformano le tensioni in ingresso nelle correnti I_1 e I_2 , pesandole secondo l'inverso dei valori delle stesse. Questo implica che I_R dipende dalle tensioni in input pesate, e quindi anche $V_{\text{out}} = RI_R$ dipende da esse.

La resistenza R determina il guadagno del circuito. Per esempio per la tensione V_1 il guadagno vale

$$G = \frac{V_{\text{out}}}{V_1} = \frac{R}{R_1} = 0.2 \pm 0.014 \quad (1.2)$$

dove abbiamo considerato incertezze sulle resistenze pari al 5%.

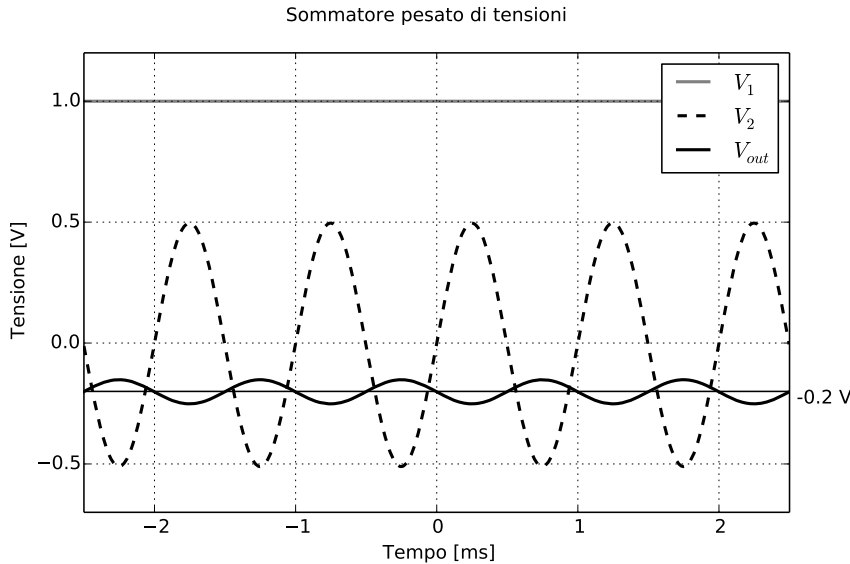


Figura 1.2: Il grafico riporta un esempio del funzionamento del circuito 1.1b. I canali V_1 e V_2 sono stati impostati rispettivamente a una tensione continua di 1 V e ad una sinusoide 1 Vpp (peak-to-peak) di frequenza 1 kHz di offset nullo. La sinusoide nera mostra l'output: è esattamente quello che ci si aspettava dalla formula (1.1).

I_0 [mA]	R_v [k Ω]
1.009 ± 0.0005	10
1.009 ± 0.0005	9
1.009 ± 0.0005	8
1.009 ± 0.0005	7
1.009 ± 0.0005	6
1.009 ± 0.0005	5
1.009 ± 0.0005	4
1.009 ± 0.0005	3
1.009 ± 0.0005	2
1.009 ± 0.0005	1

Tabella 1.1: La corrente nel circuito 1.1a rimane costante al variare della resistenza di carico R_v . Le incertezze riportate sul valore di corrente sono incertezze di risoluzione del multimetro (metà della risoluzione), mentre sui valori di resistenza non sono riportate perché non rilevanti (sono comunque dell'ordine di qualche ohm).

Per verificare il corretto funzionamento del circuito abbiamo generato due segnali, usando il generatore di forme d'onda a nostra disposizione e quello integrato nell'oscilloscopio, e li abbiamo dati in input al circuito. Poi con l'oscilloscopio abbiamo verificato che l'output si comportasse secondo la (1.1). Il risultato è stato positivo: abbiamo provato diverse combinazioni di sinusoidi, onde quadre, rampe e triangoli e in tutti i casi il circuito si è comportato correttamente.

Purtroppo l'oscilloscopio a nostra disposizione non ha 3 canali in ingresso (che sarebbero stati utili per vedere contemporaneamente i due input e l'output), per cui abbiamo dovuto usare la funzione di persistenza per visualizzare i 3 segnali, che non permette di salvare i dati. A causa di questo fatto non siamo riusciti a riportare i grafici che mostrino il funzionamento del circuito.

Siamo quindi tornati in laboratorio alcuni giorni dopo e abbiamo montato il circuito una seconda volta per acquisire almeno un grafico che mostrasse

il funzionamento del circuito. Il risultato è riportato in figura 1.2. Per motivi di chiarezza del grafico, abbiamo scelto $V_1 = 1$ V DC, mentre V_2 era un'onda sinusoidale di frequenza 1 kHz e di ampiezza 1 V picco-picco. L'output è riportato in figura e corrisponde a quanto previsto dalla formula (1.1).

Il guadagno per V_1 è esattamente 0.2 come calcolato sopra. L'amplificatore è invertente.

1.4 Conclusione

Purtroppo a causa del disguido nel salvataggio dei dati di persistenza non siamo riusciti ad inserire nemmeno un grafico dell'output del sommatore pesato, se non quello che abbiamo acquisito qualche giorno dopo.

Fortunatamente, questo grafico mostra chiaramente che il circuito 1.1b si comporta come un sommatore pesato invertente.

Questa è stata la sessione introduttiva, volta più che altro a familiarizzare con il nuovo corso, e la giornata è stata più che altro un'introduzione e un ripasso degli amplificatori operazionali. Come tale posso dire che l'esperienza è stata positiva, sia perché siamo riusciti a montare i circuiti correttamente sia perché abbiamo usato per la prima volta il generatore integrato nell'oscilloscopio. Inoltre, ora che abbiamo capito meglio come funziona questo strumento, eviteremo di fare errori simili nell'acquisizione dei dati nelle prossime esperienze.

2 Amplificatore operazionale reale: parte 1

2.1 Obbiettivo

Osservare praticamente le caratteristiche di un amplificatore operazionale reale che lo differenziano da un operazionale ideale. Tra queste ci concentreremo sulla tensione di offset e sulle correnti di polarizzazione, misurando queste quantità per avere un'idea del loro ordine di grandezza e quindi di quando diventi importante considerarle nelle applicazioni.

2.2 Materiali e Circuiti

Abbiamo realizzato i circuiti schematizzati in Figura 2.1. Ci siamo serviti dei seguenti materiali:

- Breadboard, cavi a banana e cavetti da breadboard.
- Amplificatore operazionale UA741.
- Resistenze: 10 Ω , 10 k Ω , 100 k Ω e una variabile per aggiustare l'offset dell'amplificatore operazionale. Nel nostro caso abbiamo usato una resistenza trimmer con un range operativo da 0 a 10 k Ω .
- Alimentatore di corrente continua.
- Multimetro Agilent 34410A.
- Oscilloscopio Agilent DSO-X 2002A.

2.3 Dati e risultati

2.3.1 Tensione di offset

Un amplificatore operazionale ideale amplifica la differenza tra i due segnali in ingresso. Questo significa che se i due segnali sono uguali, l'output deve essere zero. Negli operazionali reali questo non è vero: esiste infatti una tensione di offset V_{offset} tra gli ingressi per la quale l'output è nullo, mentre se gli ingressi sono allo stesso potenziale l'uscita non è nulla (anzi spesso l'uscita è in saturazione a causa dell'enorme guadagno dell'amplificatore). Questa tensione è dovuta al processo produttivo di costruzione degli operazionali. Un amplificatore ha uno stadio di amplificazione differenziale in ingresso costruito utilizzando due transistor, che non possono mai essere prodotti in maniera perfettamente uguale. Differenti transistor rispondono in modo anche abbastanza diverso agli input e questo causa uno sbilanciamento negli ingressi dell'operazionale.

L'esistenza della tensione di offset implica anche che un cosiddetto ground virtuale abbia in realtà

una tensione diversa da zero. In pratica si può anche vedere V_{offset} come la differenza di potenziale mantenuta tra gli ingressi se non sono collegati tra di loro.

Esistenza della tensione di offset. La figura 2.2 mostra la differenza tra la situazione reale e quella ideale. Come è ben visibile in figura, è necessario applicare una tensione di offset per avere un output nullo. In altre parole, collegando i due input allo stesso potenziale, nel caso ideale la tensione dovrebbe essere nulla, ma in quello reale non lo è. Per verificare questo fatto abbiamo montato il circuito 2.1a e abbiamo misurato la tensione di output. È risultato che l'output era in saturazione negativa (come in figura 2.2), ovvero $V_{\text{out}} = -12.80 \pm 0.005$ V. Collegando l'ingresso invertente con tensioni negative fino a -15 V e vedendo che l'uscita restava circa costante (a -15 V ha raggiunto -12.94 ± 0.005 V), ci siamo accertati di essere realmente in saturazione. Abbiamo quindi verificato l'esistenza della tensione di offset.

Misura della tensione di offset. Per misurare la tensione di offset abbiamo utilizzato il circuito 2.1b. Il circuito sfrutta l'amplificatore operazionale per amplificare la tensione V_{offset} in modo da renderla facilmente misurabile. Poiché la differenza di potenziale tra gli ingressi è non nulla, $V_A \neq 0$. Si ha quindi (facendo riferimento alla figura 2.3):

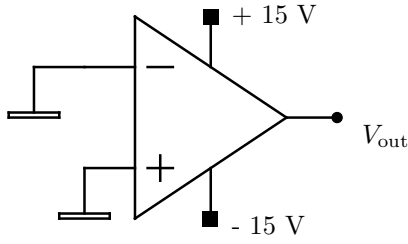
$$I_1 = \frac{V_A}{R_1}, \quad I_2 = I_1 - I_p^- = \frac{V_A}{R_1} - I_p^- \quad (2.1)$$

da cui, usando la legge di Ohm, si ottiene

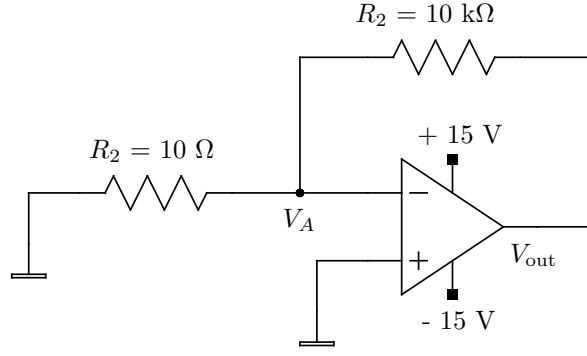
$$V_{\text{out}} = V_A + R_2 I_2 = V_A + \frac{R_2}{R_1} V_A - R_2 I_p^- \quad (2.2)$$

Questa formula riassume il funzionamento del circuito. Misurando V_{out} è possibile ricavare facilmente il valore di V_A , assumendo che il contributo dato da I_p^- sia trascurabile. Dato che la tensione di offset è la tensione che esiste tra i terminali di input dell'operazionale, cioè $V_A = V_{\text{offset}}$, possiamo così misurare V_{offset} .

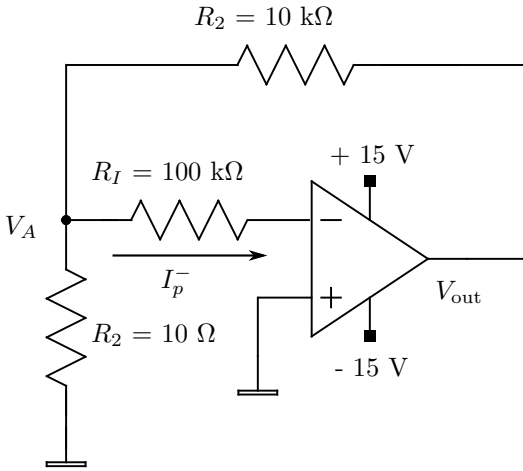
Grossomodo, il funzionamento di questo circuito può essere pensato intuitivamente nel seguente modo. Supponiamo che la tensione di offset tra non invertente ed invertente sia positiva (cioè se il non invertente è a 0 V, l'invertente è a V_{offset} V.). All'accensione dell'alimentazione, $V_A = 0$ V, per cui, essendo l'amplificatore non ideale, l'uscita sarà positiva (ricordo che un amplificatore operazionale segue



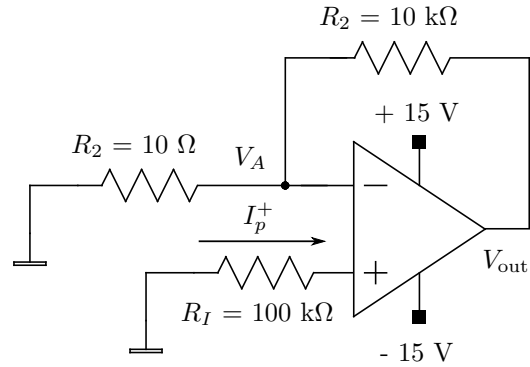
(a) Circuito utilizzato per osservare l'esistenza della tensione di offset.



(b) Circuito per misurare V_{offset} . Questo circuito sfrutta l'amplificatore per amplificare il valore della tensione di offset e renderla più facilmente misurabile.



(c) Circuito per la misura della corrente di polarizzazione I_p^- . Questo circuito richiede la cancellazione della tensione di offset per funzionare.



(d) Circuito per la misura della corrente di polarizzazione I_p^+ . Questo circuito richiede il bilanciamento della tensione di offset per funzionare.

Figura 2.1: Circuiti costruiti durante l'esperienza

una legge del tipo $V_{\text{out}} = G(V^+ - V^- + V_{\text{offset}})$, dove G è il guadagno differenziale). Il ramo di feedback tende quindi ad alzare la d.d.p. in V_A e la avvicina a V_{offset} , riducendo V_{out} . Il ciclo di feedback si ripete (o meglio tutto si bilancia quasi istantaneamente) finché V_A non diventa praticamente indistinguibile da V_{offset} (grazie al fatto che il guadagno di un operazionale è enorme, circa 10^5).

Poiché, come è evidente dalla (2.2), anche I_p^- ha un certo rilievo, abbiamo scelto i valori $R_1 = 10 \Omega$ e $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$, in modo da rendere il contributo del secondo termine molto grande rispetto a quello dell'ultimo termine.

Dalle nostre misure è risultato:

$$V_{\text{out}} = -970 \pm 30 \text{ mV} \quad (2.3)$$

da cui si calcola (abbiamo assunto 5% di incertezza sui valori delle resistenze)

$$V_{\text{offset}} = \frac{V_{\text{out}}}{1 + R_2/R_1} = -0.97 \pm 0.07 \text{ mV} \quad (2.4)$$

in accordo con i valori tipici per un operazionale economico come l'UA741.

Abbiamo inoltre misurato direttamente il valore di V_A , perché in questo caso è stato possibile farlo con il multimetro a nostra disposizione, ottenendo $V_{\text{offset}} = 1.07 \pm 0.005 \text{ mV}$, risultato quasi compatibile con quello precedente.

2.3.2 Correzione della tensione di offset

La tensione di offset può essere di qualche millivolt, come visto nel paragrafo precedente, e per



Figura 2.2: La figura mostra la tensione in uscita in funzione della differenza di tensione agli input di un operazionale reale e di uno ideale. La pendenza e V_{offset} sono esagerate (la pendenza è molto minore di quella reale, mentre la tensione di offset è molto più grande) per motivi di chiarezza grafica. In un amplificatore reale, oltre al fatto che esiste una tensione di offset, le tensioni di saturazione non coincidono con quelle di alimentazione ed inoltre non sono simmetriche e neppure esattamente costanti (su un intervallo V_{diff} da 0 a -15 V abbiamo misurato una variazione di 0.14 V) e il guadagno non è infinito.

alcune applicazioni di precisione questo può essere un grosso limite. In tal caso è necessario usare un amplificatore operazionale con una tensione di offset minore. È anche possibile ridurre la tensione di offset utilizzando gli appositi piedini, come faremo in seguito.

Gran parte degli amplificatori operazionali è infatti munita di due piedini di regolazione dell'offset che vanno collegati agli estremi di una resistenza variabile. Il piedino centrale della resistenza va collegato all'alimentazione. Sbilanciando la resistenza in modo che la tensione alimentazione-offset sia diversa per i due piedini, andiamo a polarizzare lo stadio differenziale in ingresso all'opamp, aggiustando in questo modo la risposta del circuito. Riusciamo così a ridurre V_{offset} a qualche μV .

Questa operazione si esegue misurando la tensione di offset e regolando la resistenza fino a raggiungere il valore di tensione minore possibile. Dopo questa operazione, abbiamo misurato la nuova tensione di offset con lo stesso circuito di prima (il circuito 2.1b). Abbiamo ottenuto

$$V_{\text{offset}} = 3 \pm 3 \mu\text{V} \quad (2.5)$$

che è notevolmente minore della precedente. Notare che in questo caso sarebbe stato molto più

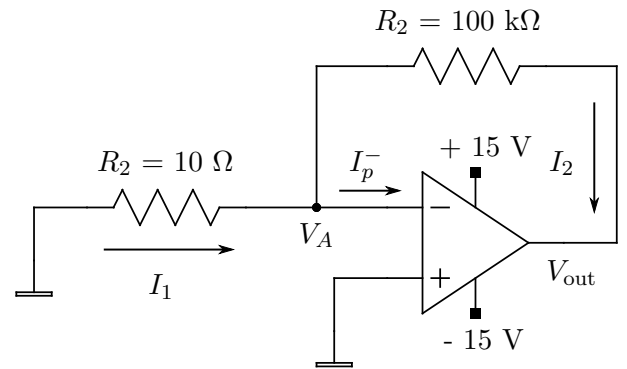


Figura 2.3: La figura riporta il circuito 2.1b con indicate le correnti che scorrono nei vari rami. Il verso delle correnti è stato scelto coerentemente con il segno che abbiamo usato nei calcoli e per scrivere i risultati.

difficile misurare direttamente questa differenza di potenziale, dato che è molto piccola.

2.3.3 Correnti di polarizzazione

Oltre alla tensione di offset, un'altra deviazione dall'idealità importante degli opamp reali è l'esistenza delle correnti di polarizzazione. Un amplificatore reale, al contrario di quello ideale, assorbe infatti una minima quantità di corrente attraverso gli ingressi. Queste correnti variano da qualche nanoampere a qualche femtoampere a seconda del tipo di transistor utilizzati per la costruzione dell'operazionale.

Per misurare queste correnti dobbiamo sfruttare l'amplificazione fornita dall'operazionale, poiché le correnti sono troppo piccole per essere misurate accuratamente con gli strumenti a nostra disposizione.

Misura della corrente di polarizzazione assorbita dall'ingresso invertente. Abbiamo quindi costruito il circuito 2.1c. Per la misura della corrente di polarizzazione è fondamentale usare un trimmer per eliminare la tensione di offset prima di montare il circuito. In questo caso vale $V_A = R_I I_p^-$. È necessario scegliere R_I grande in modo da rendere V_A più facilmente misurabile. Noi abbiamo optato per una resistenza da 100 k Ω . Il circuito funziona poi come il precedente, vale infatti la stessa analisi circuitale del caso precedente.

In questo caso però quello che vogliamo misurare è I_p^- e non V_A . Sostituendo in (2.2) l'espressione di V_A , risulta:

$$V_{\text{out}} = \left(R_I + \frac{R_2}{R_1} R_I - R_2 \right) I_p^- \quad (2.6)$$

perciò

$$I_p^- = \frac{V_{\text{out}}}{R_I + \frac{R_2}{R_1} R_I - R_2} \quad (2.7)$$

Facendo più misure di V_{out} (l'output variava abbondantemente sul multimetro e sull'oscilloscopio), calcolando I_p^- in ogni caso e poi facendo media e deviazione standard abbiamo ottenuto

$$I_p^- = 27.7 \pm 1.7 \text{ nA} \quad (2.8)$$

anche questo un valore tipico per amplificatori operazionali basati su transistor BJT.

Misura della corrente di polarizzazione assorbita dall'ingresso non invertente. Una corrente di polarizzazione entrante nell'ingresso non invertente è stata scelta positiva, come abbiamo fatto per l'ingresso invertente.

Il procedimento è del tutto analogo al precedente, ad eccezione del circuito; in questo caso abbiamo usato il 2.1d. La differenza sta nella posizione della resistenza R_I che deve adesso trasformare I_p^+ in una tensione e non I_p^- . Poiché l'offset è stato azzerato (o meglio, reso trascurabile, in queste misure V_A è dell'ordine dei millivolt, mentre la tensione di offset, come mostrato prima è di microvolt) $V_A = R_I I_p^+$. Vale quindi la seguente formula, ricavata come quella del paragrafo precedente:

$$I_p^+ = \frac{V_{\text{out}} + R_2 I_p^-}{R_I + \frac{R_2}{R_1} R_I} \quad (2.9)$$

Con lo stesso procedimento di prima abbiamo quindi ottenuto

$$I_p^+ = -29 \pm 3 \text{ nA} \quad (2.10)$$

2.4 Conclusione

Dopo aver calcolato le correnti di polarizzazione, ci siamo proposti di ricalcolare il valore di V_{offset} con la formula (2.2) senza però trascurare il valore di I_p^- . Abbiamo quindi inserito il valore della corrente di polarizzazione trovato nei paragrafi precedenti non rilevando alcun cambiamento nelle cifre significative di V_{offset} . Allo stesso modo abbiamo verificato che il valore di tensione di offset residua dopo l'azzeramento non fosse influenzato da questa correzione.

Siamo quindi certi che le approssimazioni eseguite non inficiano la correttezza dei risultati presentati in questa relazione. Ci riteniamo soddisfatti di tali risultati, poiché sono in pieno accordo con i valori tipici che ci sono stati riferiti a lezione. È

stato inoltre interessante vedere quanto sia facile notare l'esistenza di queste deviazioni dall'idealità di un amplificatore operazionale. L'esperienza è inoltre stata utile per conoscere l'ordine di grandezza di queste deviazioni, in modo da non commettere errori (o almeno avere uno strumento in più per correggerli) nella progettazione e realizzazione di circuiti elettronici.

3 Amplificatore operazionale reale: parte 2

3.1 Obbiettivo

Come nell'esperienza precedente, lo scopo è quello di verificare alcune caratteristiche importanti degli amplificatori operazionali reali. In questa relazione ci concentreremo sullo slew rate, sul guadagno open loop in funzione della frequenza e sulla corrente massima che l'amplificatore riesce a fornire. Tutte queste caratteristiche devono essere tenute in considerazione nella progettazione dei circuiti.

3.2 Materiali e circuiti

Ci siamo serviti dei seguenti materiali:

- Breadboard, cavi a banana e cavetti da breadboard.
- Amplificatore operazionale UA741.
- Resistenze: 100 Ω , 2.2 k Ω , 10 k Ω , 100 k Ω e una variabile per aggiustare l'offset dell'amplificatore operazionale. Nel nostro caso abbiamo usato una resistenza trimmer con un range operativo da 0 a 10 k Ω .
- Condensatore da 180 pF.
- Alimentatore di corrente continua.
- Generatore di forme d'onda Agilent 33120A.
- Multimetro Agilent 34410A.
- Oscilloscopio Agilent DSO-X 2002A.

Per le misure abbiamo utilizzato i circuiti riportati in figura 3.1, che verranno spiegati nei seguenti paragrafi.

3.3 Dati e risultati

Slew rate. La prima parte dell'esperienza era centrata sulla misura dello slew rate dell'amplificatore operazionale. Lo slew rate è il tasso di cambiamento massimo della tensione di uscita per unità di tempo. Anche se idealmente un operazionale risponde istantaneamente ai cambiamenti in ingresso, in realtà impiega del tempo ad adattare la tensione di uscita, soprattutto perché contiene dei condensatori.

Per misurare lo slew rate del nostro operazionale, abbiamo montato il circuito 3.1a, che è il circuito standard per fare queste misure ed è riportato nel manuale del costruttore dell'opamp. Il circuito è semplice ed è pensato per una misura diretta. Il ramo di feedback serve per fare un amplificatore con guadagno unitario (un follower), mentre resistenza

e capacità servono per polarizzare l'operazionale e per tagliare le frequenze alte (i rimbalzi che si hanno ai bordi delle onde quadre).

Per la misura si fornisce in input un'onda quadra generata con il generatore di funzioni d'onda (che ha uno slew rate molto alto che fa sì che il suo output sia molto vicino ad un'onda quadra. Abbiamo misurato uno slew rate di circa 500 V/ μ s per il nostro generatore.) e si misura V_{out} , che è un trapezio a causa appunto dello slew rate finito dell'operazionale. La figura 3.2 mostra un esempio di quello che succede dando in ingresso un'onda quadra. Per convenzione, si misura il tempo impiegato dalla tensione per salire dal 10% al 90% della tensione massima dello scalino. Lo slew rate è calcolabile così:

$$S = \frac{V_{90\%} - V_{10\%}}{t_{90\%} - t_{10\%}} \quad (3.1)$$

Nelle nostre misure abbiamo utilizzato un'onda quadra di 10 Vpp a 1 kHz. Misurando lo slew rate sia in salita che in discesa, e abbiamo ottenuto due valori diversi

$$S_{salita} = 0.498 \pm 0.004 \text{ V}/\mu\text{s} \quad (3.2)$$

$$S_{discesa} = -0.353 \pm 0.003 \text{ V}/\mu\text{s} \quad (3.3)$$

Il valore in salita è vicinissimo al dato specificato dal produttore: 0.5 V/ μ s. Il dato in discesa è minore circa del 30% rispetto a quello in salita.

Lo slew rate ha implicazioni piuttosto pesanti ad alte frequenze di funzionamento del circuito. Infatti se all'amplificatore operazionale è dato in input un segnale che varia in maniera molto veloce (un segnale periodico ad alta frequenza), ad un certo punto l'amplificatore non riuscirà più a "star dietro", per così dire, al segnale, e inizierà a deformarlo. Per verificare questo comportamento, abbiamo usato lo stesso circuito di prima, ma il generatore di forme d'onda è stato impostato per fornire un'onda sinusoidale 10 Vpp di diverse frequenze. Variando la frequenza abbiamo notato che il segnale inizia ad essere deformato a circa 13 kHz (solo in discesa ovviamente, poiché lo slew rate è minore). In figura 3.3 sono mostrati input e output alla frequenza di 20 kHz. La deformazione del segnale è evidente sia in salita che in discesa ed è pure abbastanza seria, nonostante la frequenza non sia poi così alta (è grande l'ampiezza del segnale).

Corrente massima. In questo paragrafo ci proponiamo di misurare la corrente massima che il nostro amplificatore riesce a fornire dall'uscita. Per la misura ci siamo serviti del circuito 3.1b. Il circuito è semplicissimo: è simile al precedente, ma tra

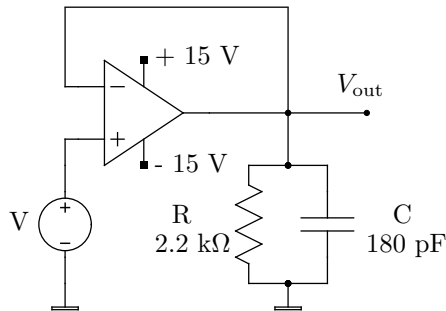
l'uscita e terra è presente solo una resistenza molto piccola ($100\ \Omega$) in modo che la tensione v_{out} non sia determinata dalla tensione in ingresso, bensì dalla massima corrente che l'amplificatore riesce a fornire. Misurando V_{out} si ricava banalmente la corrente dalla legge di Ohm, assumendo che la corrente assorbita dall'ingresso invertente sia trascurabile.

Abbiamo fornito in input un'onda triangolare di 10 Vpp a 1 kHz. L'uscita registrata è stata un'andamento, sempre triangolare, di 2.7 V da picco a picco. Dividendo a metà (cioè prendendo la massima tensione che V_{out} assume, nell'altra metà dell'onda la corrente scorre semplicemente al rovescio) e usando la legge di Ohm si ottiene $I_{max} = 13.5 \pm 0.7\text{ mA}$. Il range tipico riportato sul manuale è 10-20 mA.

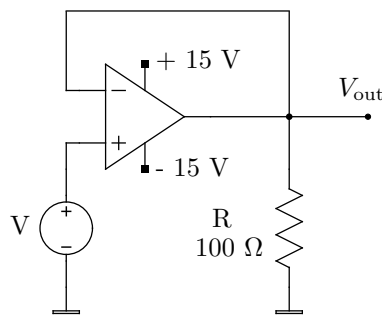
Banda passante. La banda passante di un circuito è la banda di frequenze nella quale il segnale

non viene attenuato. Quantitativamente si considera l'intervallo dello spettro in frequenza del circuito tra le frequenze alle quali il segnale viene attenuato di -3 dB rispetto al massimo, cioè le frequenze di taglio. Abbiamo quindi registrato la risposta in frequenza del circuito 3.1c, che è un semplice amplificatore non invertente di guadagno $G = R_2/R_1$. Abbiamo considerato due configurazioni del circuito: una con $R_2 = 10\text{ k}\Omega$ e l'altra con $R_2 = 100\text{ k}\Omega$, mentre $R_1 = 1\text{ k}\Omega$ in entrambi i casi. I due circuiti amplificavano quindi 20 dB e 40 dB rispettivamente.

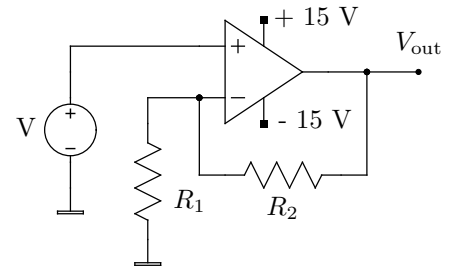
Abbiamo quindi fornito in ingresso una sinusoide di $V = 50\text{ mVpp}$ e abbiamo misurato con l'oscilloscopio l'ampiezza dell'onda in uscita variando la frequenza all'ingresso. Il valore di 50 mV è stato scelto perché volevamo fare misure fino a 1 MHz circa e non volevamo che lo slew rate dell'amplificatore influisse sulle misure. Infatti a 1 MHz un'onda



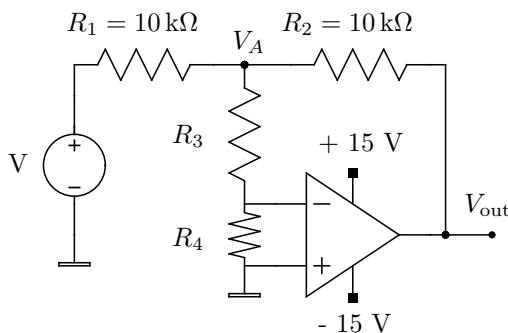
(a) Circuito utilizzato per misurare lo slew rate dell'opamp. Il circuito è riportato sul manuale dell'operazionale ed è lo standard per questo tipo di misure.



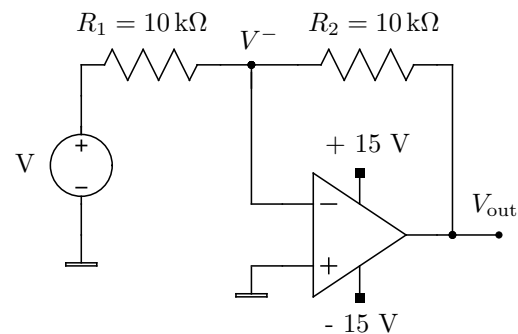
(b) Per la misura della massima corrente erogabile dall'operazionale ci siamo serviti del circuito in figura.



(c) Circuito di cui abbiamo misurato la banda passante. Il circuito è stato utilizzato in due differenti configurazioni: una con guadagno di 20 dB e $R_2 = 10\text{ k}\Omega$ e l'altro con un guadagno di 20 dB e $R_2 = 100\text{ k}\Omega$.



(d) Circuito utilizzato per misurare il guadagno open loop di un amplificatore operazionale. Il circuito è pensato per fare misure a basse frequenze, dove l'operazionale ha un guadagno molto elevato (circa 10^5). Quando l'operazionale viene usato ad alte frequenze il suo guadagno si riduce notevolmente e il circuito in figura diventa inutilizzabile. In questi regimi si utilizza il circuito 3.1e.



(e) Circuito per la misura del guadagno open loop ad alte frequenze. In circuito in pratica serve a fare una misura diretta del guadagno, tuttavia utilizza un ramo di feedback per impedire saturazioni non volute (per esempio causate dalla tensione di offset, che non può mai essere perfettamente oppure da altre tensioni DC dovute all'alimentazione che vengono amplificate moltissimo perché a bassa frequenza).

Figura 3.1: Circuiti costruiti durante l'esperienza

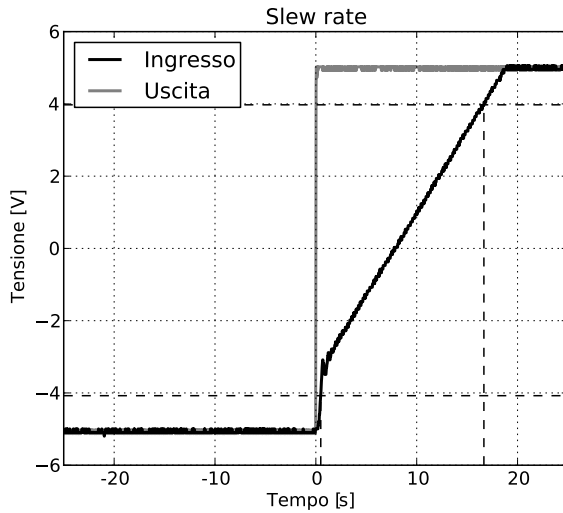


Figura 3.2: La figura mostra il comportamento dell'operazionale ad un brusco cambiamento della tensione differenziale in ingresso. Il circuito realizzato (il 3.1a) è un emitter follower e dovrebbe copiare il segnale in ingresso all'uscita. Invece, a causa del fatto che lo slew rate dell'operazionale è finito, la tensione impiega circa $20 \mu s$ a passare da $-5 V$ a $5 V$.

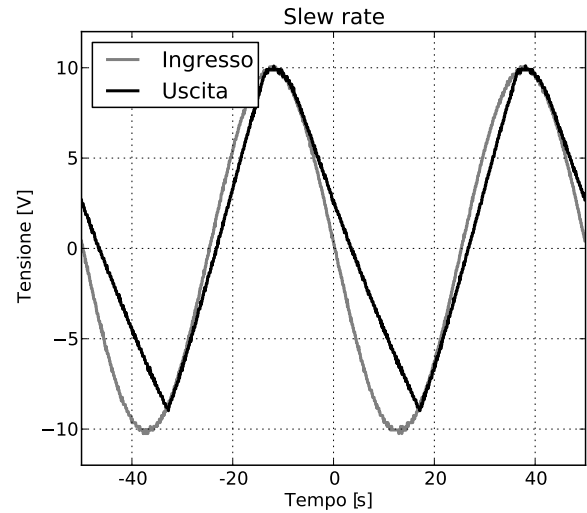


Figura 3.3: La figura mostra il comportamento dell'operazionale ad un brusco cambiamento della tensione differenziale in ingresso. Il circuito realizzato (il 3.1a) è un emitter follower e dovrebbe copiare il segnale in ingresso all'uscita. Invece, a causa del fatto che lo slew rate dell'operazionale è finito, la tensione impiega circa $20 \mu s$ a passare da $-5 V$ a $5 V$.

sinusoidale va dal massimo al minimo in $0.5 \mu s$ e quindi è necessario che l'ampiezza sia al massimo $0.25 V$ (assumendo $0.5 V \mu s$) affinché l'operazionale non abbia problemi. In realtà la pendenza massima della sinusoide è ancora maggiore, quindi per essere conservativi abbiamo scelto $1/5$ del valore massimo. Successivamente, calcolando in ogni punto il guadagno in decibel con la formula $G = 20 \log_{10}(R_2/R_1)$ e plottando i valori in funzione della frequenza, abbiamo ottenuto i grafici in figura 3.4. La banda passante dei due circuiti è:

- Da zero a 108 ± 6 kHz per il circuito con guadagno 20 dB.
- Da zero a 11 ± 5 kHz per il circuito con guadagno 40 dB.

Il fatto che il guadagno di questi circuiti non sia costante su tutte le frequenze è dovuto al fatto che ad alte frequenze il guadagno open loop dell'operazionale diminuisce di molto e quindi la retroazione non funziona più come dovrebbe. Con queste misure volevamo mostrare proprio questo fatto, che rappresenta l'ultimo aspetto degli amplificatori operazionali reali che vogliamo andare a studiare. Infatti il guadagno open loop non è costante, ma fortemente dipendente dalla frequenza, come mostreremo nel seguente paragrafo.

Guadagno in funzione della frequenza. Abbiamo sempre detto che un operazionale ha un gua-

dagno differenziale enorme, dell'ordine di 100-120 dB (nel caso ideale sarebbe infinito). Tuttavia questo è vero solo a frequenze molto basse, dell'ordine dei 10 Hz. A frequenze più alte il guadagno si riduce notevolmente, fino a diventare unitario attorno ad 1 MHz.

La misura del guadagno è difficile, soprattutto a basse frequenze, poiché il guadagno è enorme e la misura diretta è impossibile. Inoltre a causa dell'enorme guadagno una misura senza retroazione è praticamente impossibile, perché anche piccole tensioni DC in ingresso (dovute a rumore o al generatore di forme d'onda o anche la semplice tensione di offset che è impossibile eliminare completamente) vengono amplificate moltissimo, portando l'output in saturazione.

La soluzione è utilizzare l'intelligente circuito 3.1d. Abbiamo usato le resistenze $R_3 = 100 k\Omega$ e $R_4 = 100 \Omega$. Nel circuito il segnale in ingresso V è simile alla tensione presente in V_A . Il partitore di tensione formato da R_3 ed R_4 fa sì che all'ingresso invertente sia presente una tensione $V_A \cdot [R_3/(R_3 + R_4)] = V_A/1001$. Il ramo di feedback serve a impedire all'operazionale di saturare, mentre R_1 è necessaria al corretto funzionamento del feedback (altrimenti V_A sarebbe costretta ad essere uguale a V , e quindi il feedback non agirebbe). Misurando V_A e V_{out} e sapendo che il comportamento dell'amplificatore è modellizzato dalla formula $V_{out} = A(V^+ - V^-)$, dove V^+ e V^- sono le

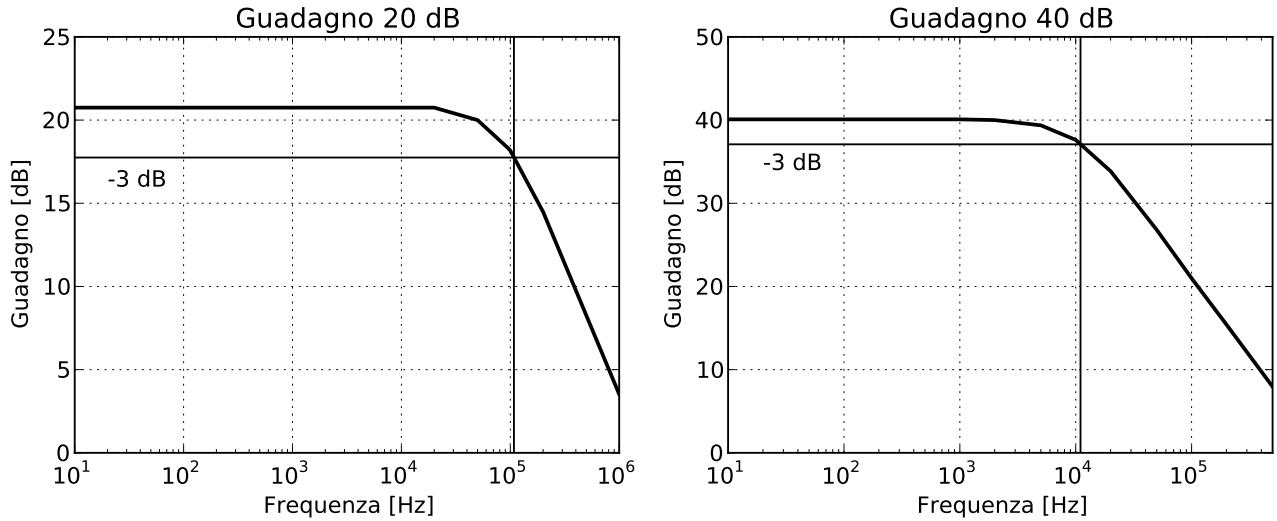


Figura 3.4: La figura mostra l'amplificazione in frequenza del circuito 3.1c nelle due varianti con guadagno di 20 dB e 40 dB circa. I circuiti si comportano come filtri passa basso con frequenza di taglio di 108 ± 6 kHz (20 dB) e 11 ± 5 kHz (40 dB). Sono filtri di primo ordine, con un'attenuazione di 20 dB per decade.

tensioni agli ingressi non invertente ed invertente rispettivamente, mentre A è il guadagno che vogliamo misurare, si ha:

$$A = \frac{R_3 + R_4}{R_3} \frac{V_{\text{out}}}{V_A} = 1001 \frac{V_{\text{out}}}{V_A} \quad (3.4)$$

(Il segno meno è sparito perché noi consideriamo solo l'ampiezza, e non la fase, di V_{out} e V_A .)

È importante notare che all'aumentare della frequenza il guadagno diminuisce e quindi, a parità di input, V_A aumenta, mentre V_{out} diminuisce. Ad un certo punto questo andamento è controproducente perché V_{out} diventa troppo piccola per una misura affidabile. Al raggiungimento di questo punto abbiamo quindi deciso di utilizzare il circuito 3.1e che permette una semplice misura diretta del guadagno, mediante la formula:

$$A = \frac{V_{\text{out}}}{V_A} \quad (3.5)$$

Per le misure abbiamo utilizzato la canonica onda sinusoidale di 50 mVpp (sempre per non avere problemi con lo slew rate). Il grafico in figura 3.5 mostra l'andamento misurato, che è simile al grafico tipico riportato sul manuale. L'amplificatore ha un guadagno in continua di 99.9 ± 0.4 dB (circa la metà del valore tipico 106 dB), e si comporta come un filtro RC con un'attenuazione di 20 dB/decade (6 dB/ottava).

Nella figura 3.6 abbiamo riportato lo stesso grafico con anche gli andamenti in frequenza degli amplificatori non invertenti del paragrafo precedente, per mostrare come l'attenuazione del segnale che si osserva in questi circuiti sia dovuta al comportamento

in frequenza dell'operazionale. Per applicazione ad alta frequenza sono disponibili amplificatori senza condensatori all'interno.

3.4 Conclusione

Anche in questa esperienza abbiamo conosciuto aspetti interessanti degli operazionali e abbiamo scoperto alcuni difetti che possono influenzare il comportamento dei circuiti con essi costruiti.

A parte il valore di amplificazione open loop, gli altri risultati sono vicinissimi ai dati di targa. L'amplificazione è comunque abbastanza variabile da pezzo a pezzo e comunque abbiamo ottenuto un valore il cui ordine di grandezza è corretto.

Figura 3.5: Il grafico mostra l'andamento del guadagno open loop dell'amplificatore operazionale UA741 in funzione della frequenza. Come si vede il guadagno è massimo solo in una ristretta banda di frequenze, fino a circa 8 Hz. Poi il guadagno diminuisce ad un decimo ogni decade. I punti neri sono stati rilevati con il circuito 3.1d e si vede che a frequenze alte l'incertezza diventa cospicua, mentre quelli grigi sono stati misurati con il circuito 3.1e. Nei punti dove l'incertezza non è visibile essa è minore della dimensione dei punti. Il guadagno diventa unitario a circa 1 MHz.

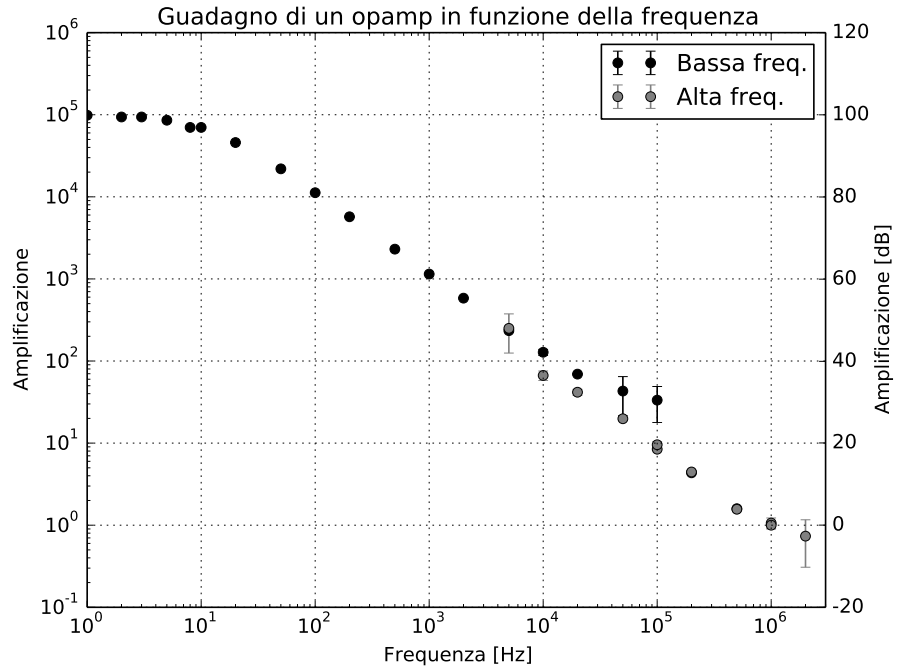
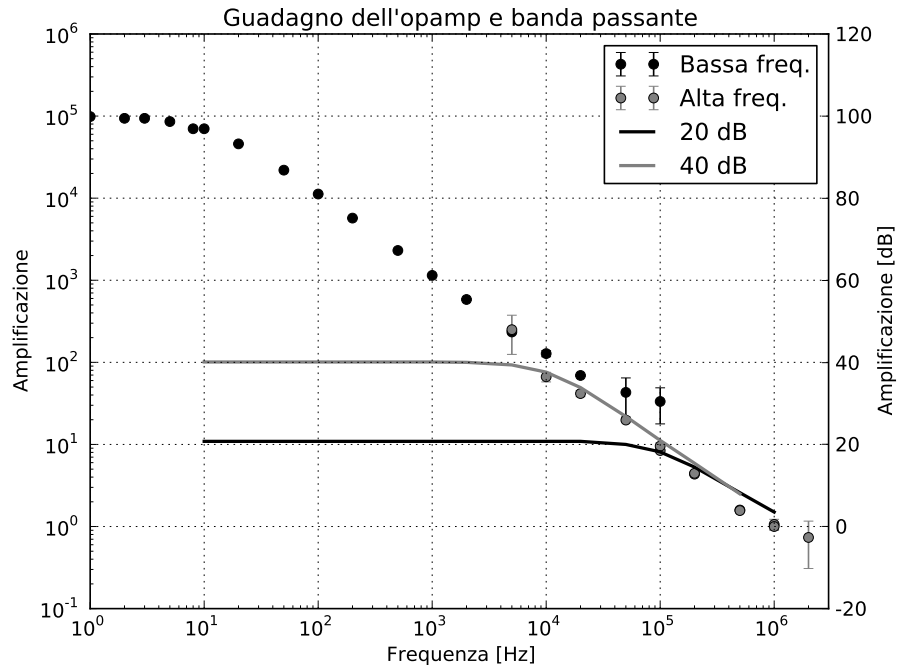


Figura 3.6: Nel grafico sono visibili gli stessi dati delle figure 3.4 e 3.5, solo che sono mostrati assieme. Come si vede è proprio a causa dell'andamento del guadagno in frequenza dell'opamp che questi circuiti hanno una frequenza di taglio ed una riduzione del guadagno.



4 Comparatori, oscillatori a rilassamento, interruttori crepuscolari

4.1 Obiettivo

L'obiettivo di questa esperienza è l'introduzione di un nuovo componente: il comparatore LM311. Questo componente è simile ad un amplificatore operazionale UA741 con la differenza che è molto più veloce (vogliamo che un comparatore sia veloce), non contiene capacità (quindi la diminuzione del guadagno all'aumentare della frequenza è molto meno marcata) ed è a collettore aperto, cioè permette all'utilizzatore di impostare dall'esterno la corrente assorbita. In questo modo è possibile pilotare carichi che richiedono correnti elevate. Utilizzeremo questo componente per realizzare un semplice circuito comparatore, un oscillatore e un interruttore crepuscolare. Utilizzeremo per la prima volta il feedback positivo.

4.2 Materiali e circuiti

- Breadboard, cavi a banana e cavetti da breadboard.
- Amplificatore operazionale LM311.
- Resistenze: 100 Ω , 2 da 10 k Ω e 100 k Ω .
- Capacità da 100 nF.
- Fototransistor.
- Alimentatore di corrente continua.
- Generatore di forme d'onda Agilent 33120A.
- Oscilloscopio Agilent DSO-X 2002A.

4.3 Dati e risultati

Comparatore. Lo scopo della realizzazione di questo circuito è famigliarizzare con il comparatore LM311. Il primo circuito che abbiamo montato, in figura 4.1a, è il più semplice utilizzo di questo componente. L'ingresso è impostato sul piedino non invertente in modo da ottenere un comparatore non invertente. L'ingresso invertente è invece collegato a comune e definisce la soglia di riferimento per la comparazione (mettendolo a comune la soglia è quindi 0 V). Collegando questo ingresso ad una tensione continua a scelta, il comparatore comparerà il segnale in ingresso alla tensione scelta.

Il comparatore LM311 funziona in modo un po' diverso dall'UA741. Essenzialmente agisce come se al suo interno ci fosse un interruttore con i capi collegati all'uscita e a comune (l'LM311 ha un piedino da collegare a ground, mentre per l'UA741 non era necessario). L'interruttore è interdetto se $V^+ > V^-$

ed è chiuso in caso contrario. Quindi quando l'ingresso non invertente V^+ è ad una tensione maggiore di quello invertente V^- l'uscita è a +15 V (alimentazione) a causa della resistenza di pull-up R. Invece, se $V^- > V^+$, l'uscita è a comune. La resistenza R è stata scelta "grande" (10 k Ω) per evitare il passaggio di troppa corrente e la conseguente dissipazione di potenza nel caso di uscita a ground. Per le altre specifiche del circuito si faccia riferimento alla figura 4.1a.

Quindi abbiamo un circuito che confronta un segnale con lo zero e fornisce in uscita uno stato binario: V_{sat}^+ se il segnale è maggiore di zero e 0 V se il segnale è minore di zero. Per testarne il funzionamento abbiamo fornito in ingresso vari segnali con il generatore di funzioni d'onda. Un esempio è riportato in figura 4.2.

Il problema principale di questo circuito è il fatto che è soggetto al rumore. Nelle vicinanze di una transizione da positivo a negativo possono esserci più punti che intersecano il riferimento a causa del fatto che c'è sempre rumore sommato al segnale. Noi lo abbiamo testato con funzioni d'onda di ampiezza picco-picco piuttosto ridotta (200 mV e 600 mV) per far sì che la transizione fosse più lenta e gli effetti del rumore risultassero più evidenti. Il rumore è visibile in figura 4.5.

Trigger di Schmitt. Per evitare questo problema del rumore si utilizza il cosiddetto trigger di Schmitt, ovvero un circuito come quello riportato in figura 4.1d. Il trigger di Schmitt è un comparatore con isteresi, vale a dire un comparatore che invece di scattare al passaggio di una soglia, ha una fascia di tensioni in cui non agisce e scatta solo quando il segnale esce da questa banda. La figura 4.3 chiarifica il funzionamento.

Ma come è possibile ottenere un effetto simile in un circuito? La soluzione è utilizzare un feedback *positivo* come indicato in figura 4.1d. In questa configurazione (è evidentemente possibile costruire un trigger simile in configurazioni diverse), le resistenze R_1 ed R_2 formano un partitore che determina la tensione V^+ all'ingresso non invertente, determinando così la grandezza della banda dove il comparatore non agisce.

Se la tensione V_{in} supera lo zero, anche la tensione V^+ lo supera, ed il comparatore interdetto costringe V_{out} a rimanere alla tensione alta (che in questo caso varia con la tensione in ingresso. Se le tensioni in ingresso sono piccole rispetto a 15 V, si ottiene un'uscita di $(15 V) \cdot (R_1 + R_2) / (R_1 + R_2 + R_3) = 13.6 V$). In seguito, quando V_{in} scende sotto lo zero, il parti-

tore fa sì che la tensione in V^+ sia ancora maggiore di zero, evitando così la commutazione del comparatore. Ovviamente ad un certo punto, quando V_{in} supera la tensione di soglia negativa V_{OL} (determinata dalle resistenze) anche V^+ diventa minore di zero e V_{out} viene messo a terra. Da questo punto in poi il partitore funziona in modo diverso, infatti R_3 non ne fa più parte. Quindi quando la tensione sale nuovamente, si ha che il segnale in ingresso deve superare lo zero (la soglia alta V_{OH}) affinché V^+ superi lo zero facendo chiudere il comparatore e riportando tutto alle condizioni iniziali. Si ha quindi un comportamento di isteresi, con tensioni in salita trattate in maniera differente da quelle in discesa. Il punto principale del discorso è che se l'ampiezza tipica del rumore è minore dell'ampiezza della

banda, il comparatore sarà molto meno soggetto a scatti casuali.

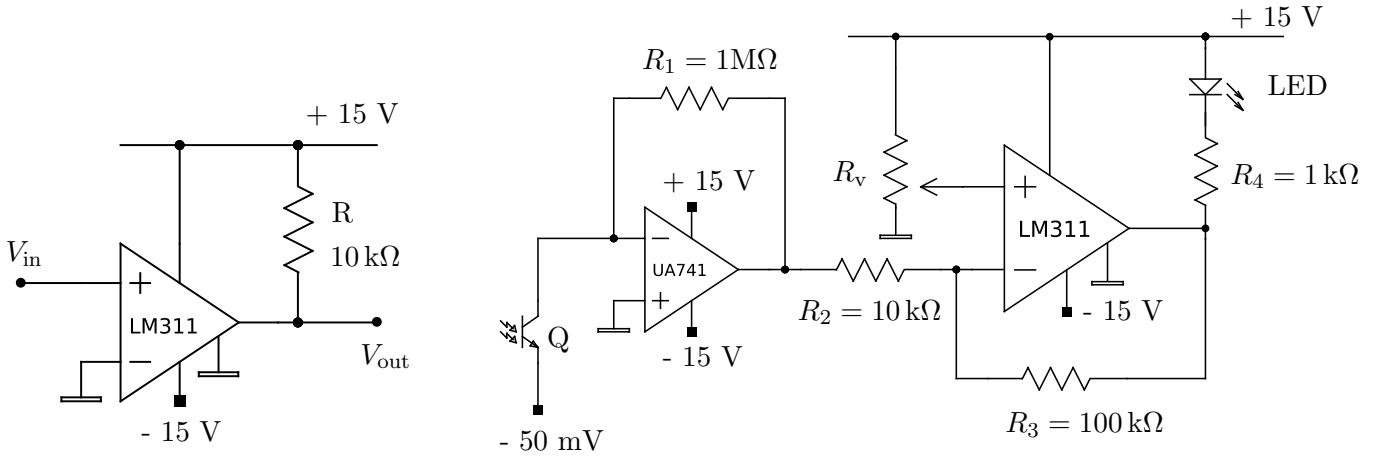
Per il circuito abbiamo scelto $R_1 = 100\ \Omega$, $R_2 = 100\text{ k}\Omega$ e $R_3 = 10\text{ k}\Omega$. In questo modo, valendo la formula

$$V^+ = V_{in} + (15\text{ V} - V_{in}) \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (4.1)$$

si ottiene che

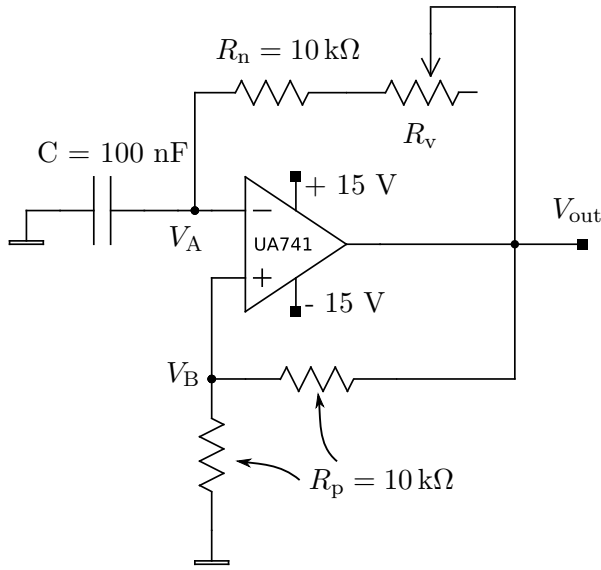
$$V_{in} = V^+ \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_2 + R_3} - 15V \frac{R_1}{R_2 + R_3} \quad (4.2)$$

Imponendo $V^+ = 0$ ed inserendo i valori da noi scelti, risulta

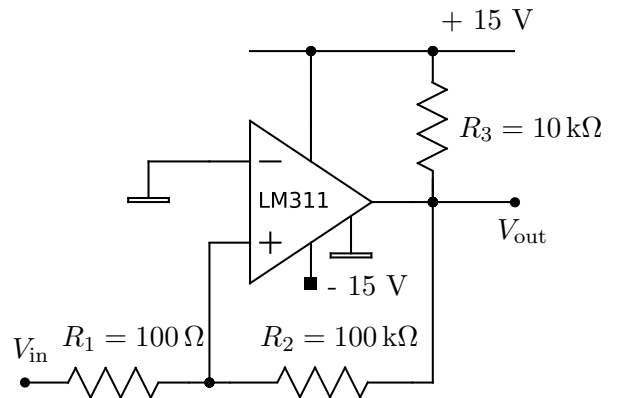


(a) Comparatore semplice.

(b) Interruttore crepuscolare.



(c) Oscillatore a rilassamento.



(d) Comparatore con isteresi (trigger di Schmitt). Questo circuito sfrutta una retroazione positiva per evitare che il comparatore scatti più volte a causa del rumore (elettrico o non).

Figura 4.1: Circuiti costruiti durante l'esperienza

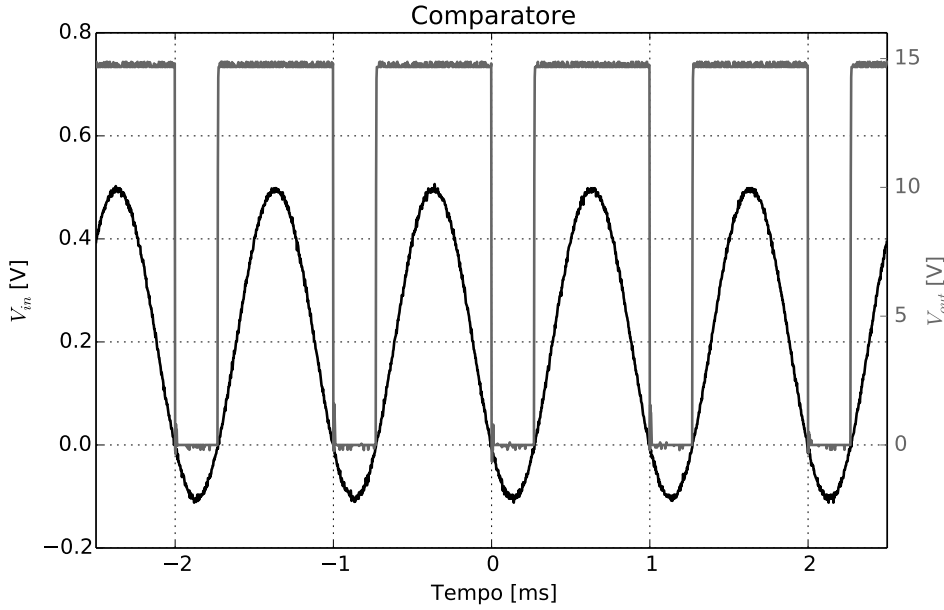


Figura 4.2: Esempio di funzionamento del circuito 4.1a. Il segnale in ingresso è la sinusoide di 600 mVpp a 1 kHz con un offset di +200 mV (la scala per l'ingresso è a sinistra, per l'uscita è a destra). Come si può notare il circuito compara correttamente il segnale in ingresso con il comune, fornendo una specie di onda quadra all'uscita. Gli effetti del rumore non sono visibili a questa scala di tempo, ma sono visibili in figura 4.5.

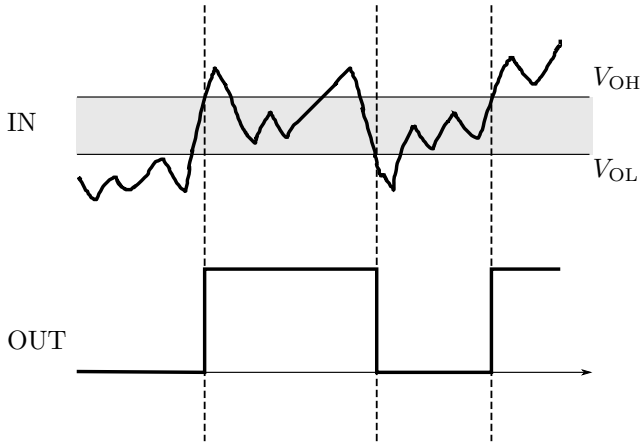


Figura 4.3: Funzionamento di un comparatore con isteresi. Il passaggio tra i due stati di uscita del comparatore avviene non ad una determinata soglia, ma all'uscita della banda di tensioni compresa tra due soglie V_{OH} e V_{OL} . In questo modo il comparatore è molto meno soggetto al rumore.

$$V_{OL} = -15V \frac{R_1}{R_2 + R_3} = -13.6 \text{ mV} \quad (4.3)$$

Poiché $V_{OH} = 0$, la fascia di tensioni “di isteresi” è ampia 13.6 mV, che è dell'ordine del rumore presente nel nostro circuito. La figura 4.5 mostra gli effetti dell'isteresi sul rumore. In figura è visibile il circuito del paragrafo precedente e quello con isteresi, che presenta molto meno rumore. Aumentando R_1 è possibile aumentare la banda “di isteresi” e quindi diminuire ancora il rumore (l'ovvio svantaggio è che si perde sensibilità nella comparazione, quindi è sconsigliato aumentare troppo

le soglie). Notare che sarebbe stato possibile avere una banda simmetrica rispetto allo zero, mettendo $V^- = -13.6 \text{ mV}/2$ anche se questo può portare a rumore ulteriore.

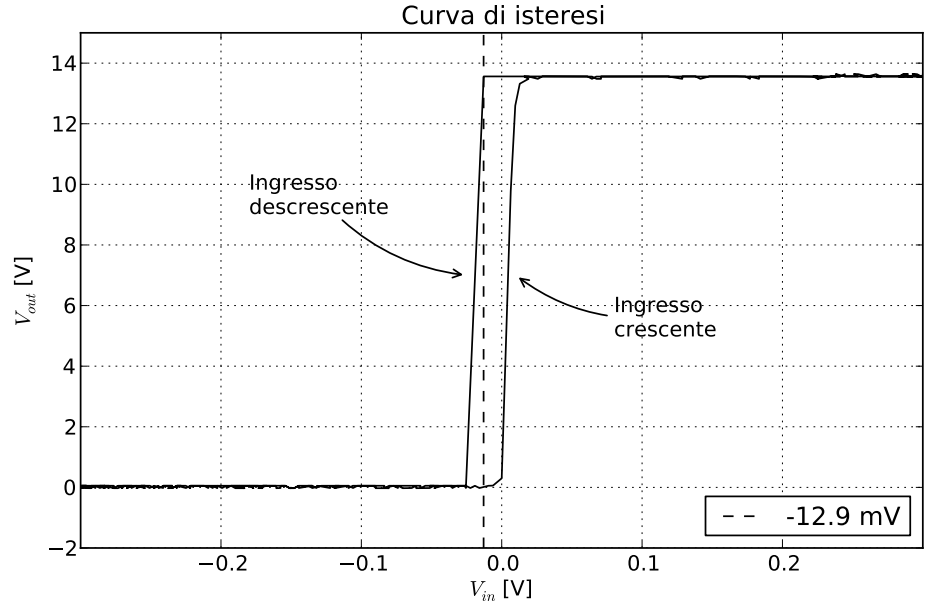
Con l'oscilloscopio abbiamo misurato la tensione V_{OL} , rilevando $14.1 \pm 0.1 \text{ mV}$, vicino al valore calcolato. La discrepanza è spiegabile grazie al fatto che era presente rumore dell'ordine di grandezza della soglia e quindi è difficile capire dove veramente inizia la commutazione.

Abbiamo inoltre acquisito i dati e graficato la curva di isteresi del circuito. Il risultato è visibile in figura 4.4. Si vedono bene le due soglie V_{OL} e V_{OH} , anche se nell'intervallo dove il comparatore commuta ci sono pochi punti, che in parte spiegano il fatto che le soglie siano oblique. Con questo metodo $V_{OL} = 12.9 \text{ mV}$, mentre V_{OH} è vicina a 0 V.

Oscillatore a rilassamento. Passiamo ora all'analisi di un circuito completamente diverso, l'oscillatore a rilassamento riportato in figura 4.1c. Questo circuito genera un'onda quadra di ampiezza $V_{sat}^+ - V_{sat}^-$ e di frequenza regolabile da 370 Hz a 438 Hz tramite il trimmer sulla retroazione negativa. Si noti che in questo circuito abbiamo usato l'UA741.

Come funziona questo circuito? All'accensione del circuito l'uscita si trova, per esempio, a V_{sat}^+ (a causa della tensione di offset o di altri disturbi, come abbiamo visto nella precedente relazione). Questo significa che $V_B = V_{sat}^+/2$ e che, grazie alla retroazione negativa, il condensatore inizia a caricarsi. L'uscita resta a V_{sat}^+ finché ai capi del condensatore la tensione non supera $V_B = V_{sat}^+/2$, dopodiché l'operaziona-

Figura 4.4: Curva di isteresi del trigger di Schmitt. La curva di isteresi si ottiene graficando la tensione in output versus la tensione di input. In questo caso l'input va da - 0.3 V a 0.3 V e ritorno. Si vedono bene le due soglie e la banda di isteresi. L'ampiezza dell'output è 13.7 V.



le porta l'uscita a V_{sat}^- . In seguito $V_B = V_{\text{sat}}^-/2$ e il condensatore si scarica e carica con polarizzazione inversa, fino a che ai suoi capi non c'è una tensione pari a $V_B = V_{\text{sat}}^-/2$. Al che l'operazionale porta l'uscita a V_{sat}^+ ed il ciclo ricomincia. La frequenza del ciclo è determinata dalla resistenza sulla retroazione negativa, che limita la corrente di carica del condensatore e quindi la velocità di carica. A resistenze più basse corrispondono frequenze più alte e viceversa.

Dopo aver montato il circuito ne abbiamo verificato il funzionamento, che è risultato corretto. L'ampiezza picco-picco dell'onda quadra generata è stata misurata ed era pari a 27.3 V, indipendentemente dalla frequenza generata. Quindi $V_{\text{sat}}^\pm = \pm 13.7$ V.

Usando la definizione di capacità, la legge di Ohm e risolvendo l'equazione differenziale nel caso in cui $V_{\text{out}} = V_{\text{sat}}^+$, si ottiene l'equazione che descrive la carica del condensatore. Imponendo come condizioni iniziali che a $t = 0$ si avesse $V_A = V_{\text{sat}}^-/2 = -V_{\text{sat}}^+/2$ (ovvero che l'uscita abbia appena commutato verso $V_{\text{out}} = V_{\text{sat}}^+$), e risolvendo per t si ottiene

$$t = \frac{T}{2} = RC \log \left(\frac{2}{3} - \frac{2}{3} \frac{V_A}{V_{\text{sat}}} \right) \quad (4.4)$$

Per calcolare il periodo dell'onda possiamo quindi porre $V_A = V_{\text{sat}}^+/2$. Facendo l'inverso del periodo si ottiene la frequenza:

$$f_{R_v=0} = 460 \pm 90 \text{ Hz} \quad (4.5)$$

$$f_{R_v=10 \text{ k}\Omega} = 230 \pm 50 \text{ Hz} \quad (4.6)$$

Per il calcolo delle incertezze, abbiamo assunto un'incertezza del 5% sulle resistenze e del 20% sulla capacità, ovvero le tolleranze dei componenti usati. Le misure hanno rivelato valori $f_{R_v=0} = 438 \text{ Hz}$ e $f_{R_v=10 \text{ k}\Omega} = 298 \text{ Hz}$, il primo dei quali è compatibile con i nostri risultati, mentre il secondo no (non sappiamo perché).

Interruttore crepuscolare. L'ultimo circuito che abbiamo realizzato è una semplice ma molto interessante applicazione del trigger di Schmitt. Si tratta di un circuito che analizza il segnale proveniente da un fototransistor (un transistor simile ad un BJT ma controllato dalla luminosità ambientale invece che dalla corrente di base) e che accende o spegne un LED in base a tale segnale. Una versione modificata del circuito può essere utile per accendere delle luci automaticamente la sera o in altre situazioni simili. Il diagramma schematico del circuito è mostrato in figura 4.1b.

Nel circuito, la corrente che attraversa il fototransistor Q dipende dalla luminosità dell'ambiente attorno al transistor. Il transistor è collegato a - 50 mV invece che a comune per assicurare una corretta polarizzazione del transistor in qualsiasi condizione operativa. L'amplificatore UA741 serve, assieme alla retroazione R_1 , ad amplificare la corrente fornita dal fototransistor e a convertirla in tensione. Abbiamo verificato che la corrente massima che il transistor assorbe (in condizioni di massima luminosità) è di circa 14 μA ; conseguentemente è stata usata una resistenza $R_1 = 1 \text{ M}\Omega$ per trasformare la corrente di un segnale di qualche Volt. Nello stadio successivo, troviamo il comparatore LM311

Rumore con e senza trigger

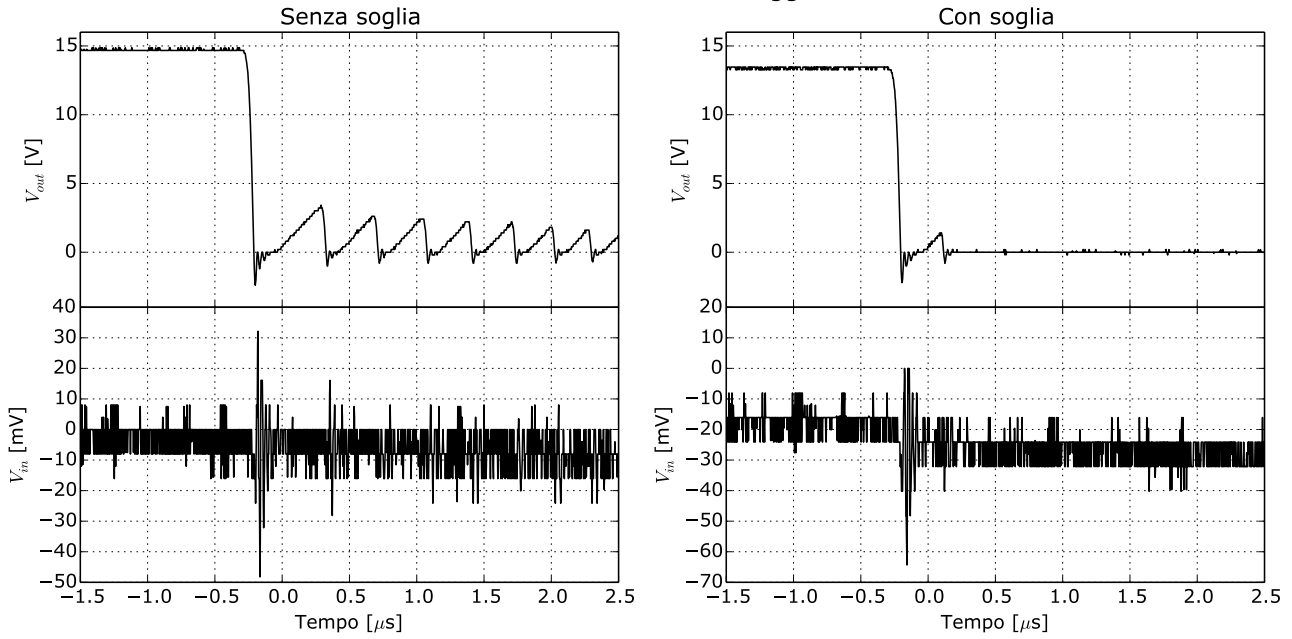


Figura 4.5: Nel grafico a sinistra è riportato l'output del circuito 4.1a (in alto) e l'ingresso dello stesso circuito, riportato in scala molto ingrandita per visualizzare il rumore. Stessa cosa per la figura a destra, solo che in questo caso il circuito è il trigger di Schmitt (4.1d). Evidentemente il rumore è molto minore. Si notino le scale temporali (per questo il rumore non è visibile nella figura 4.2) e l'ampiezza del rumore in uscita (vari Volt). Nell'immagine a destra si nota inoltre che la commutazione avviene circa ai -13.6 mV previsti.

all'interno di un trigger di Schmitt, che compara il segnale amplificato con una soglia regolabile tramite la resistenza variabile R_v . Nel feedback positivo troviamo due resistenze $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$ ed $R_3 = 100 \text{ k}\Omega$ che fanno sì che le soglie V_{OL} e V_{OH} siano piuttosto distanti e che il circuito sia poco soggetto al rumore (vogliamo che il LED si accenda e si spenga in modo stabile; vorremmo evitare di vedere il LED accendersi e spegnersi ripetutamente a causa di variazioni di luminosità repentine). In seguito abbiamo un ramo che collega l'uscita dell'LM311 con l'alimentazione positiva mediante una resistenza (limitatore di corrente) e il diodo LED.

Quando la luce ambientale è alta, il fototransistor assorbe molta corrente, e all'ingresso non invertente dell'LM311 arriva una tensione alta. Se la tensione supera la soglia impostata dall'utilizzatore, il comparatore è in interdizione e attraverso il diodo passa pochissima corrente, non sufficiente ad illuminarlo. Quando l'ambiente è poco luminoso il transistor assorbe poca corrente, all'ingresso del comparatore arriva una tensione bassa e il comparatore mette a terra la sua uscita. Quindi scorre una corrente $I = \frac{15V}{R_4} = 15 \text{ mA}$ attraverso il diodo. Questa corrente è sufficiente per far funzionare il LED.

Dopo aver montato il circuito (tra molte peripezie a dire il vero), abbiamo verificato il suo funzio-

namento, che è risultato estremamente stabile. Il diodo si illumina nel momento in cui è utile che lo faccia (quando la luminosità diventa scarsa) ed è totalmente assente qualsiasi scatto del LED dovuto a rumore (ricordiamo che le stesse lampade del laboratorio si accendono e si spengono alla frequenza della rete, ovvero 50 Hz).

4.4 Conclusione

Nonostante i circuiti si siano rivelati non proprio banali da montare (anche a causa di errori da principianti), siamo riusciti a verificare il funzionamento di tutti e quattro i circuiti in esame. I risultati numerici sono stati in buon accordo con la teoria, nonostante qualche deviazione significativa.

Da notare il fatto che abbiamo usato per la prima volta il feedback positivo, sia per il trigger che per l'oscillatore. Abbiamo usato con successo due nuovi componenti (LM311 e fototransistor) in circuiti di grande importanza applicativa.

Tutto sommato l'esperienza è stata molto interessante. Per concludere, vogliamo citare Otto Schmitt, il geniale inventore ed ingegnere statunitense che inventò l'omonimo trigger di Schmitt imitando il sistema nervoso dei calamari. Tra le sue alte imprese riportiamo l'aver pubblicato il suo primo articolo su Science a 17 anni e l'aver fondato il campo dell'ingegneria biomedica.

5 Rettificatore di precisione, amplificatore differenziale e misure di temperatura

5.1 Obbiettivo

Montaggio e verifica del funzionamento di alcuni circuiti di precisione, verifica del funzionamento dell'instrumental amplifier AD622 e misure a 4 fili con il multimetro.

In particolare realizzeremo un rettificatore a mezz'onda di precisione, un amplificatore differenziale che useremo per eliminare il rumore dovuto alla rete e misureremo la temperatura con la resistenza al platino.

5.2 Materiali e circuiti

- Breadboard, cavi a banana e cavetti da breadboard.
- Amplificatore operazionale LM311 e amplificatore strumentale AD622.
- Resistenze: 4 da 10 Ω , 2 da 100 Ω , 2 da 100 k Ω , 5 da 10 k Ω e un trimmer da 10 k Ω .
- 2 diodi.
- Resistenza al platino PT100.
- Alimentatore di corrente continua.
- Generatore di forme d'onda Agilent 33120A.
- Multimetro Agilent 34410A.
- Oscilloscopio Agilent DSO-X 2002A.

5.3 Dati e risultati

Rettificatore a mezz'onda di precisione. Il problema dei rettificatori realizzati con i diodi è la caduta di tensione in polarizzazione diretta del diodo. Questa caduta, dell'ordine dei 0.5-0.7 V, implica che la tensione in uscita non potrà mai avere la stessa ampiezza di quella in ingresso e, essendo grande, può portare a problemi con segnali piccoli in ingresso.

Una soluzione elegante e semplice è quella di utilizzare un operazionale come indicato nel circuito 5.1a. Il circuito sfrutta la retroazione per far sì che l'amplificatore porti V_o alla stessa tensione dell'ingresso, se quest'ultimo è positivo. Per fare ciò deve valere $V_{o1} = V_o + V_d$, dove V_d indica la caduta in diretta del diodo. Quando invece l'ingresso è negativo l'opamp va in saturazione negativa e il diodo entra in interdizione. In questa modalità l'amplificatore agisce in modalità open-loop. R_L gioca il ruolo di carico pilotato dal circuito.

Abbiamo quindi montato il circuito per verificarne il corretto funzionamento e i limiti operativi. Abbiamo fornito in input delle onde sinusoidali di diverse frequenze (50 Hz, 500Hz, 5 kHz, 10 kHz) e visualizzato l'output. Nelle figure 5.2, 5.3 e 5.4 sono mostrati tre grafici: nei primi due sono graficate le tensioni di input, V_o e V_{o1} e dimostra il funzionamento del circuito, il terzo è semplicemente un ingrandimento della transizione da $V_o = 0$ V a $V_o = V_{in}$. L'operazionale impiega un certo tempo, variabile con la frequenza del segnale, per uscire dallo stato di saturazione negativa e raggiungere la zona di funzionamento lineare. La transizione opposta, da uscita uguale al segnale a $V_o = 0$ V, non presenta questo tipo di imprecisione.

Come mai c'è un ritardo? La tensione di offset in questo caso è troppo piccola per avere effetti cospicui come quelli osservati. Inizialmente abbiamo pensato che il ritardo nella risposta fosse dovuto allo slew rate, ovvero al fatto che per passare da -15 V a circa 0 V l'operazionale UA741 ha bisogno di circa 30 μ s (assumendo uno slew rate di 0.5 V/ μ s, misurato nelle precedenti relazioni). Tuttavia abbiamo osservato ritardi variabili fino a 160 μ s per cui, anche se lo slew rate di sicuro gioca un ruolo, deve esserci qualcos'altro a ritardare ulteriormente l'amplificatore. Questo "qualcos'altro" è il fatto che, per uscire dall'interdizione o dalla saturazione, i transistor che compongono l'operazionale impiegano un certo tempo. Questo tempo è tanto minore quanto maggiore è la derivata della tensione, poiché questo causa cambiamenti più repentini e correnti più alte all'interno dell'operazionale.

Questo spiega il comportamento del circuito e anche la diminuzione del tempo di commutazione all'aumentare della frequenza. Spiega inoltre perché questo ritardo avvenga solo con una tensione in ingresso crescente ma non quando decresce.

Rettificatore a mezz'onda migliorato. Poiché stiamo tentando di costruire un raddrizzatore a mezz'onda di precisione, vogliamo eliminare il problema presentato nel paragrafo precedente. Vogliamo quindi impedire che l'operazionale vada in saturazione negativa per evitare i problemi connessi alla commutazione. Ancora meglio, vorremmo tenere il suo output vicino al riferimento, in modo da ridurre possibili problemi di slew rate.

Abbiamo quindi realizzato il circuito 5.1b. In questo caso il raddrizzatore è invertente, cioè mantiene solo le parti dell'input negative, rendendole però positive.

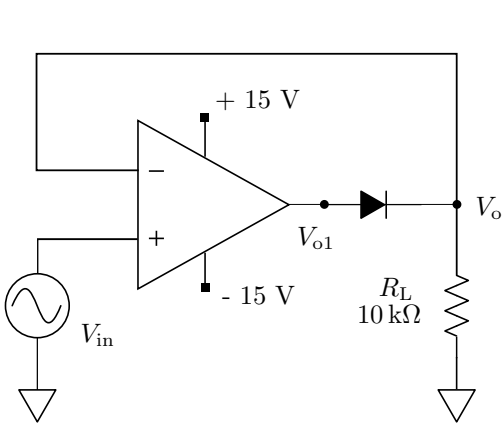
Riassumiamo il funzionamento del circuito:

- Se $V_{in} > 0$: il diodo D_2 è interdetto e il circuito funziona come un amplificatore invertente, con guadagno 1 se $R_1 = R_2$. D_1 fa in modo che $V_{o1} = V_o + V_d$.
- Se $V_{in} < 0$: l'operazionale tenta di andare in saturazione negativa, per cui D_1 è interdetto e la retroazione non funziona più. Poiché l'ingresso invertente è un ground virtuale e il carico è a comune si ha $V_o = 0$ V. Il diodo D_2 impedisce all'operazionale di andare in saturazione negativa e mantiene la sua uscita a $-V_d$.

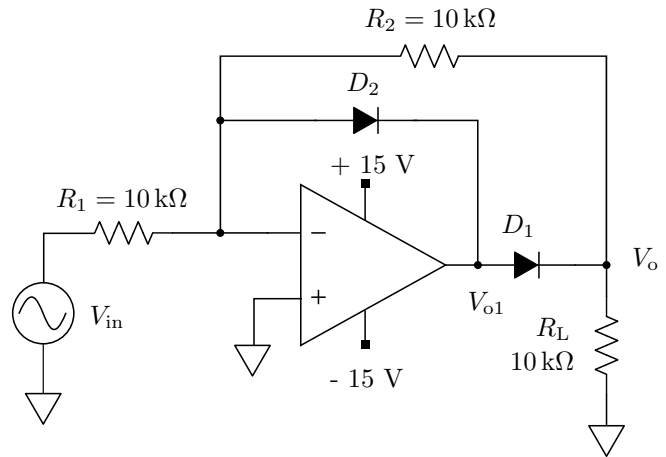
Abbiamo quindi analizzato il comportamento del circuito per la stessa onda sinusoidale 1 Vpp e per le stesse frequenze del circuito precedente. In figura 5.5 è mostrato il grafico con le misure di V_o e V_{o1} e dell'ingresso alla frequenza di 500 Hz. In questo caso abbiamo rilevato un comportamento molto

più pulito, con commutazioni con ritardi molto meno marcati (generalmente da 3 a 5 microsecondi). Inoltre, si osserva la figura riferita sopra, V_{o1} non è mai sceso oltre i - 0.5 V.

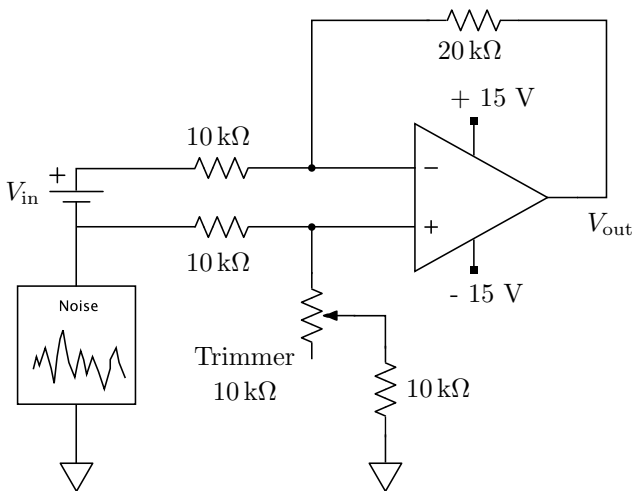
Amplificatore differenziale. Nella fase successiva dell'esperienza, abbiamo studiato gli amplificatori strumentali, ovvero degli amplificatore differenziali che sono utili per eliminare il rumore nel caso in cui si debbano fare misure utilizzando cavi lunghi (per esempio un apparato sperimentale e apparecchi di misura dall'altro lato del laboratorio o in locali adiacenti). La lunghezza dei cavi introduce problematiche legate al rumore che non sorgono nel caso cavi corti. Per esempio, in un caso del genere può essere conveniente collegare usare la terra come comune, cosa che però induce disturbi a causa del fatto che i punti in cui l'impianto elettrico è messo



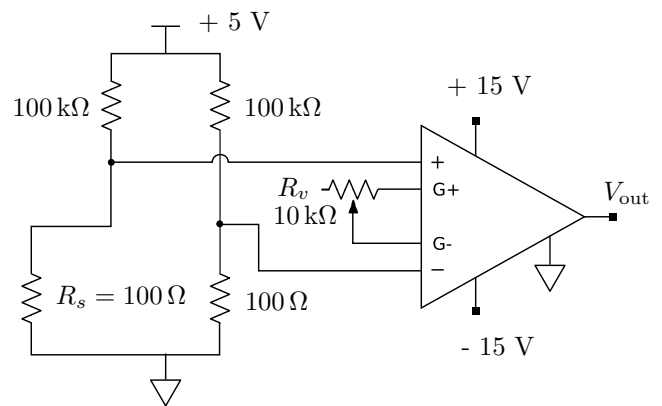
(a) Semplice raddrizzatore a mezz'onda costruito con un UA741.



(b) Raddrizzatore migliorato.



(c) Amplificatore differenziale usato per filtrare il rumore.



(d) Circuito di verifica del funzionamento dell'amplificatore strumentale AD622.

Figura 5.1: Circuiti costruiti durante l'esperienza

Figura 5.2: Input e output (V_o) del raddrizzatore a mezz'onda semplice (circuitto 5.1a). L'input è una sinusoide di 1 Vpp a 500 Hz. È visibile un certo ritardo del circuito a seguire l'andamento dell'ingresso, quando questa da negativo diventa positivo. Rispetto ad un raddrizzatore a diodi non è presente un offset di 0.6 V.

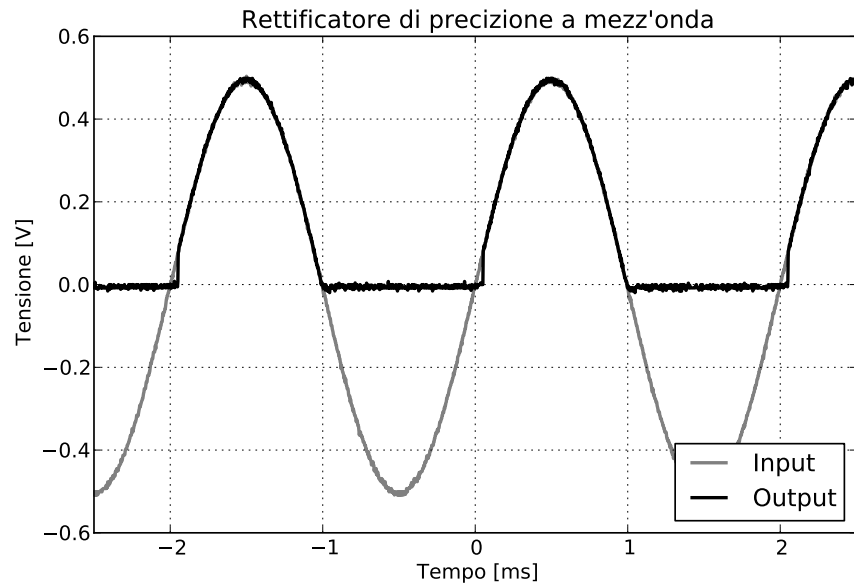


Figura 5.3: Input e tensione V_{o1} all'uscita dell'amplificatore operazionale nel circuito 5.1a. Si vede come l'operazionale vada in saturazione negativa (circa -13 V) e come impieghi un certo tempo a tornare in funzionamento lineare (per esempio al tempo $t = 0$). È inoltre visibile l'effetto della caduta in diretta del diodo, che ammonta a circa 0.4 V nel grafico. L'input è sempre una sinusoide 1 Vpp a 500 Hz.

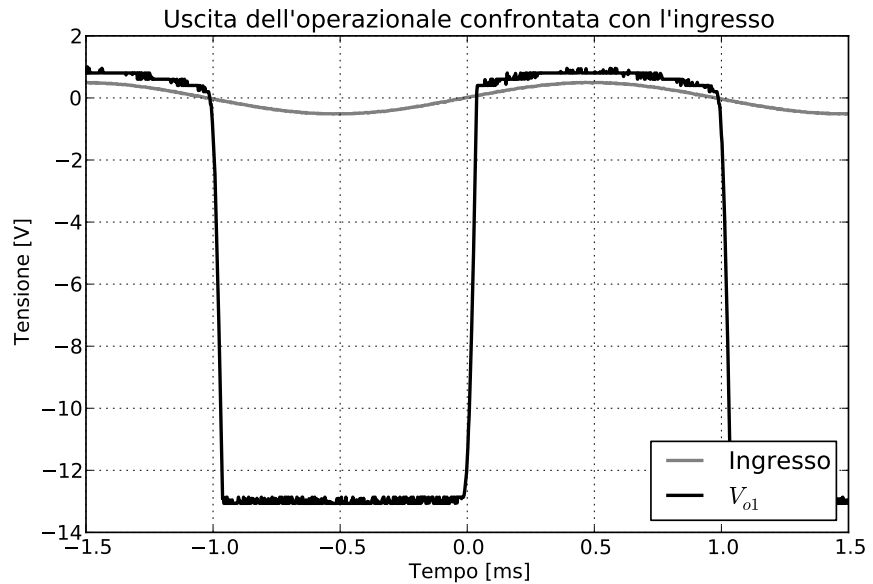
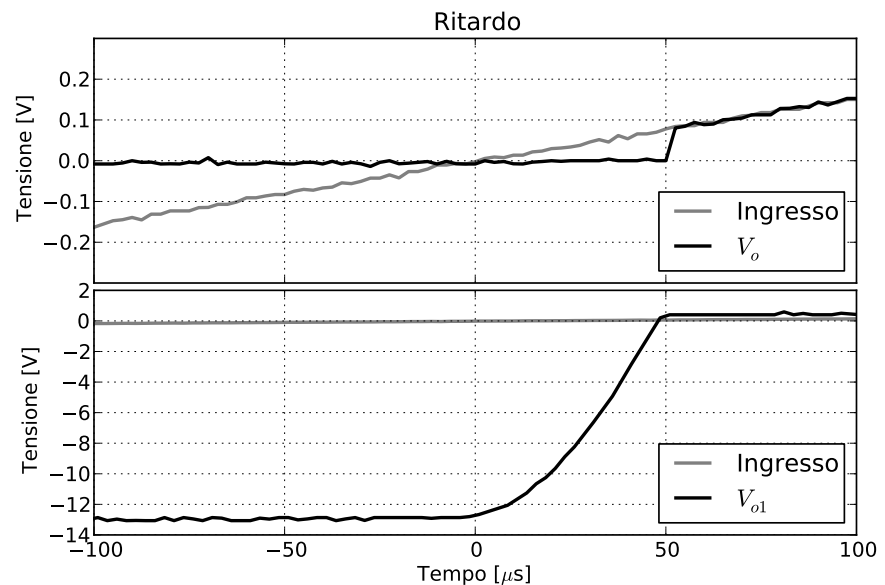


Figura 5.4: Questa immagine è un'ingrandimento delle precedenti due (figure 5.2 e 5.3) nella zona dove avviene il ritardo. Il ritardo è circa $50 \mu s$, inspiegabile con il solo slew rate limitato dell'operazionale. Nel grafico in basso, la parte iniziale della curva nera (la parte meno pendente) è il momento in cui l'operazionale spende tempo ad uscire dalla saturazione.



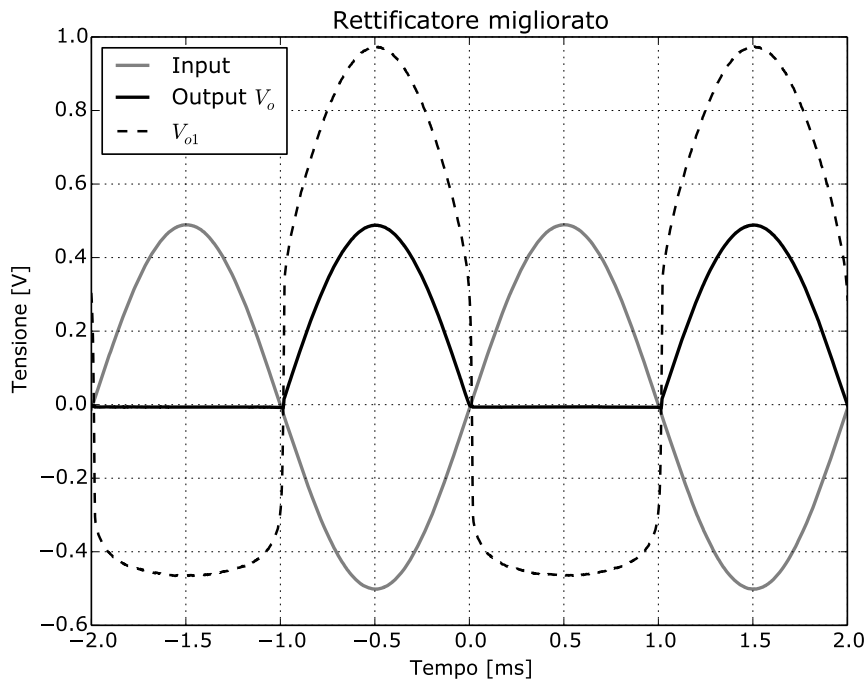


Figura 5.5: Il raddrizzatore ottimizzato produce un output molto più pulito (senza ritardi) mantenendo V_{o1} vicino a 0 V. Il raddrizzatore in questo caso mantiene le semionde negative raddrizzandole. V_{o1} è circa 0.5 V più alta di V_o , come ci si aspetta dalla caduta in polarizzazione diretta del diodo. Il fatto che la curva tratteggiata sia tonda in basso è dovuto alla caratteristica del diodo.

a terra possono trovarsi a potenziali diversi. Inoltre sono più forti i disturbi generati da onde radio, onde elettromagnetiche generate dalla rete e da altra strumentazione.

Per evitare i problemi dovuti al rumore si può utilizzare un amplificatore differenziale in un circuito come il 5.1c. Nel circuito V_{in} rappresenta il segnale da misurare (nel nostro caso una tensione DC). In questo caso abbiamo usato un amplificatore differenziale costruito con un UA741, che è costituito dall'operazionale e da tutte le resistenze visibili nel circuito. Il trimmer serve per regolare con precisione le resistenze, poiché è impossibile trovare delle resistenze tutte uguali. Per eseguire la taratura abbiamo collegato i due ingressi ($V_{in} = 0$) e abbiamo modificato la resistenza fino a che l'output non è diventato nullo. Per simulare la presenza di rumore, abbiamo utilizzato il generatore di forme d'onda collegato tra il segnale e comune. Le resistenze sono state scelte per amplificare l'ingresso differenziale di un fattore 2.

Lo scopo del circuito è quello di amplificare solo il segnale con l'amplificatore differenziale, mentre il rumore, essendo presente in entrambi gli input viene scartato.

Il test del funzionamento è semplice: si visualizza l'output e il rumore (il segnale generato dal generatore di funzioni) e variando frequenza, ampiezza e forma del rumore si verifica che il segnale amplificato non venga modificato. Abbiamo quindi posto $V_{in} = 1$ V e provato con sinusoidi, onde quadre, triangoli, rampe e altre funzioni a frequenze da 50

Hz a 100 kHz. Il circuito si è comportato bene, anche se quando il rumore ha un'ampiezza grande (per esempio 10 Vpp) si nota che l'output, invece di essere piatto, è una onda sinusoidale di circa 5 mVpp. In ogni caso un rumore di tale ampiezza in pratica non si ha mai. L'intero problema del rumore si ha solo se si vuole misurare un segnale comparabile con la dimensione del rumore, cioè di qualche millivolt.

Instrumental amplifier AD622. L'amplificatore differenziale studiato nel paragrafo precedente non è privo di problemi, prima di tutto la piccola impedenza in ingresso. Inoltre spesso è comodo poter variare il guadagno senza dover cambiare le resistenze e ricalibrare il circuito. Per risolvere questo problema è possibile usare un circuito costruito con 3 amplificatori operazionali; un tale circuito sfrutta l'elevata impedenza degli ingressi degli opamp e non sarebbe complicato da costruire. Tuttavia è ancora più comodo e preciso utilizzare un integrato che contiene al suo interno l'intero circuito. In questo modo si ha anche il beneficio aggiuntivo di avere delle resistenze costruite in modo tale da non sbilanciare il circuito. Questi integrati sono anche chiamati instrumental amplifiers.

L'integrato da noi utilizzato è l'AD622, che viene venduto in un package simile a quello di un operazionale, con la particolarità che va connesso a comune e che ha due piedini che devono essere collegati ad una resistenza variabile. Cambiando valore della resistenza è possibile variare il guadagno del

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	°C
-30.00	88.22	87.83	87.43	87.04	86.64	86.25	85.85	85.46	85.06	84.67	-30.00
-20.00	92.16	91.77	91.37	90.98	90.59	90.19	89.80	89.40	89.01	88.62	-20.00
-10.00	96.09	95.69	95.30	94.91	94.52	94.12	93.73	93.34	92.95	92.55	-10.00
0.00	100.00	99.61	99.22	98.83	98.44	98.04	97.65	97.26	96.87	96.48	0.00
0.00	100.00	100.39	100.78	101.17	101.56	101.95	102.34	102.73	103.12	103.51	0.00
10.00	103.90	104.29	104.68	105.07	105.46	105.85	106.24	106.63	107.02	107.40	10.00
20.00	107.79	108.18	108.57	108.96	109.35	109.73	110.12	110.51	110.90	111.29	20.00
30.00	111.67	112.06	112.45	112.83	113.22	113.61	114.00	114.38	114.77	115.15	30.00
40.00	115.54	115.93	116.31	116.70	117.08	117.47	117.86	118.24	118.63	119.01	40.00
50.00	119.40	119.78	120.17	120.55	120.94	121.32	121.71	122.09	122.47	122.86	50.00
60.00	123.24	123.63	124.01	124.39	124.78	125.16	125.54	125.93	126.31	126.69	60.00
70.00	127.08	127.46	127.84	128.22	128.61	128.99	129.37	129.75	130.13	130.52	70.00
80.00	130.90	131.28	131.66	132.04	132.42	132.80	133.18	133.57	133.95	134.33	80.00
90.00	134.71	135.09	135.47	135.85	136.23	136.61	136.99	137.37	137.75	138.13	90.00
100.00	138.51	138.88	139.26	139.64	140.02	140.40	140.78	141.16	141.54	141.91	100.00

Figura 5.6: Valori della resistenza PT100 per varie temperature.

circuito.

Per prendere confidenza con l'AD622 abbiamo realizzato il circuito 5.1d. Il circuito non fa altro che amplificare lo sbilanciamento di un ponte di Wheatstone. La resistenza R_s è stata montata fisicamente lontana dalle altre per poter essere riscaldata e raffreddata senza interferire con le altre.

Abbiamo quindi visualizzato l'output del circuito. In condizioni di operazione a temperatura ambiente l'output valeva -1040 ± 10 mV a causa del sempre presente sbilanciamento delle resistenze. Il guadagno è stato scelto in modo da avere un output in queste condizioni di circa 1 V. Successivamente abbiamo riscaldato la resistenza R_s con un dito. In queste condizioni operative abbiamo misurato -1210 ± 10 mV in uscita. Raffreddando invece la resistenza con una bomboletta di refrigerante abbiamo registrato -460 ± 10 mV. Poiché il valore a temperatura ambiente è negativo abbiamo che R_s è leggermente più piccola dell'altra resistenza da 100 Ω (il ponte di Wheatstone può essere visto come due partitori e l'output del partitore con R_s deve essere più piccolo dell'altro). All'aumentare della temperatura il valore di resistenza diminuisce, poiché l'uscita scende, quindi il coefficiente di temperatura è negativo.

Misura di temperatura. Come ultima misura della giornata, abbiamo usato una resistenza al platino PT100 per la misura di temperatura con il multimetro, in misurazione con 4 cavi. La resistenza al platino che ci è stata fornita ha una resistenza di 100 Ω alla temperatura di 0 °C. Le resistenze al platino hanno delle variazioni ben precise di resistenza al variare della temperatura e hanno tolleranze piccole. Si trovano tabulati i valori di resistenza per

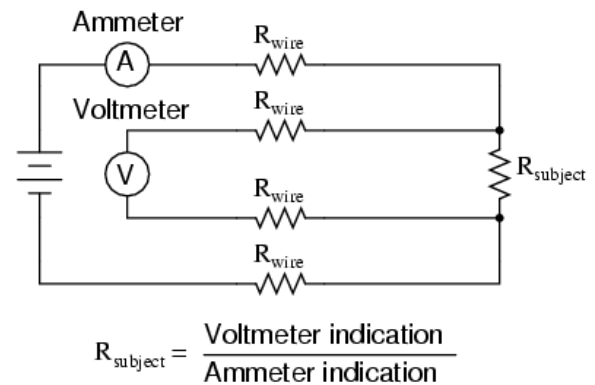


Figura 5.7: Misura a 4 cavi.

ogni grado centigrado (figura 5.6), in modo da poter fare facilmente la conversione tra resistenza e temperatura.

Per questo tipo di misura è importante riuscire a misurare esattamente la resistenza, senza introdurre errori sistematici dovuti all'impedenza dei cavi di collegamento. Poiché la resistenza è da soli 100 Ω anche un cavo con un'impedenza piuttosto piccola, per esempio 1 Ω (che potrebbe essere la resistenza di un cavo sottile abbastanza lungo), ci fa compiere un errore dell'1%, cioè di circa 3 °C. Per ovviare a questo inconveniente si utilizza la misura a 4 fili. In questa modalità di misura (figura 5.7), invece di utilizzare due fili, far scorrere la corrente in un circolo e misurare la caduta di potenziale (che include la caduta dovuta ai cavi di collegamento), se ne utilizzano 4: 2 formano un loop in cui è imposta una corrente dall'esterno, gli altri due servono alla misura della tensione. Su un anello si misura la corrente, che passa sicuramente attraverso la resistenza in esame R_{subject} , nell'altro si misura la tensione ai capi, utilizzando un voltmetro che fa passare pochissima

corrente. Utilizzando la legge di Ohm si ottiene una misura molto più precisa, poiché nel ramo di misura della tensione la corrente è piccolissima. Può sembrare che questa modalità di misura non faccia guadagnare nulla, tuttavia il trucco stà nel fatto che la corrente che passa attraverso un amperometro è alta, mentre quella in un voltmetro è bassa. Combinando i due strumenti si ha che la misura di tensione è influenzata praticamente solo dalla R_{subject} poiché attraverso di essa passa molta corrente, mentre nelle resistenze dei cavi di collegamento del voltmetro ne passa pochissima.

Abbiamo quindi simulato la resistenza dei cavi con delle resistenze da $10\ \Omega$. A temperatura ambiente abbiamo misurato $112.00\ \Omega$ che indica una temperatura di $31\ ^\circ\text{C}$ (in lab fa un gran caldo!). Con la misura a due fili si otteneva invece $134\ \Omega$ (circa $112 + 2 \times 10$), che significherebbe $78\ ^\circ\text{C}$. Anche se questo è un esempio artificioso, si capisce ben che bastano pochi Ohm sui cavi di collegamento per rendere completamente inutile la misura. Riscaldando la resistenza con le dita abbiamo invece letto $114.32\ \Omega$ ($37\ ^\circ\text{C}$), mentre raffreddandola con lo spray abbiamo misurato $89,5\ \Omega$ ($-27\ ^\circ\text{C}$).

6 Termostatazione

6.1 Obbiettivo

In questa sessione di Laboratorio abbiamo realizzato dapprima un termometro analogico basato sulla resistenza al platino PT100 e poi un circuito di termostatazione in grado di mantenere una resistenza alla temperatura desiderata.

6.2 Materiali

- Breadboard, cavi a banana e cavetti da breadboard.
- 3 amplificatori operazionali OP07 e un amplificatore strumentale AD622.
- Generatore di tensione di riferimento REF02.
- Resistenze: 1 k Ω , 1.5 k Ω , 2.2 k Ω , 4.7 k Ω , 10 k Ω , 3 \times 100 Ω .
- Potenzimetri: 3 \times 1 k Ω , 10 k Ω
- Resistenza al platino PT100.
- Resistenza riscaldante da 27 Ω da 1/2 W.
- Alimentatore di corrente continua.
- Generatore di forme d'onda Agilent 33120A.
- Multimetro Agilent 34410A.
- Oscilloscopio Agilent DSO-X 2002A.

6.3 Dati e risultati

Lo schema del circuito realizzato è mostrato in figura 6.1. Lo scopo del circuito è quello di misurare la temperatura tramite la resistenza PT100 e di attivare o disattivare la resistenza R_s (l'elemento riscaldante) in modo che la temperatura rimanga ad un valore impostato. È il funzionamento di base di un termostato di una casa o di un forno elettrico. Ovviamente noi abbiamo riscaldato solo la resistenza R_s , per cui nel nostro circuito R_s e PT100 erano a contatto tra loro.

Analizziamo ora il circuito con tutti i suoi blocchi funzionali, evidenziati nello schema, in modo da capire come opera e quali accorgimenti sono necessari per farlo funzionare correttamente. Questo circuito inizia ad essere di una certa complessità per cui è importante testare ogni blocco funzionale separatamente. In questo modo si evita di perdere troppo tempo per capire dov'è l'errore. Riporiamo in ogni sezione i risultati dei nostri test.

I primi tre blocchi (1, 2 e 3) servono per la lettura della temperatura, mentre il 4 comanda il circuito di riscaldamento. Le specifiche che sono state richieste erano le seguenti: l'output dei primi 3 circuiti doveva essere una tensione proporzionale alla

temperatura, con una costante di proporzionalità di 100 mV/°C. Inoltre l'output doveva essere 0 V a 0 °C. In questo modo la lettura della temperatura è semplice, ogni grado Celsius corrisponde a 0.1 V.

Generatore di tensione di riferimento. Per costruire il circuito di nostro interesse è importante avere a disposizione una sorgente di tensione stabilizzata, utile in più punti del circuito. Poiché il nostro scopo era di costruire un termostato e non uno stabilizzatore di tensione, abbiamo utilizzato uno stabilizzatore integrato, il REF02. All'apparenza del tutto simile ad un comune operazionale, questo integrato necessita di essere alimentato da una tensione da 8 V a 40 V (nel nostro caso 15 V come gli altri operazionali presenti nel circuito) e di essere collegato a comune. L'output dell'integrato è una tensione di 5 V con qualche millivolt di errore. Oltre ad avere una buona stabilità, il REF02 ha anche un ottimo coefficiente termico, con un output che varia di soli 10 ppm/°C.

Il REF02 in nostro possesso forniva in output 5.004 V.

Conversione da resistenza a tensione. Il blocco 1 serve per leggere, mediante la resistenza al platino PT100 la temperatura dell'ambiente (o meglio, della resistenza R_s) e a trasformarla in una tensione. Questo blocco è un generatore di corrente costante da 1 mA, corrente che passa poi attraverso la PT100 (l'ingresso dell'operazionale assorbe pochi nanoampere). Si ha quindi una tensione in uscita proporzionale alla temperatura. La PT100 è una resistenza che vale 100 Ω a 0°C e che ha un coefficiente di temperatura di 0.385 m Ω °C⁻¹. Abbiamo scelto il valore di 1 mA per la corrente perché in questo modo la PT100 dissipa 0.1 mW, un valore molto ridotto che evita surriscaldamenti della resistenza e il conseguente errore nella lettura della temperatura. La precisione nel valore della corrente è fondamentale, infatti, se per esempio al posto di 1 mA passasse 1.01 mA, a 0°C si avrebbe un errore di 1 Ω nella lettura della resistenza che equivale ad un'incertezza di circa 3 °C, errore del tutto non trascurabile.

Poiché dal REF02 arrivano 5 V e l'ingresso invertente è un ground virtuale, per ottenere la corrente desiderata è necessario utilizzare una resistenza da 5 k Ω . Dato che questo valore deve essere preciso per il motivo visto sopra, al posto di utilizzare una resistenza da 5 k Ω con il 5% di incertezza è consigliabile usarne una più piccola (per esempio 4.7 k Ω) e poi mettere in serie un potenziometro P_1 da 1 k Ω in

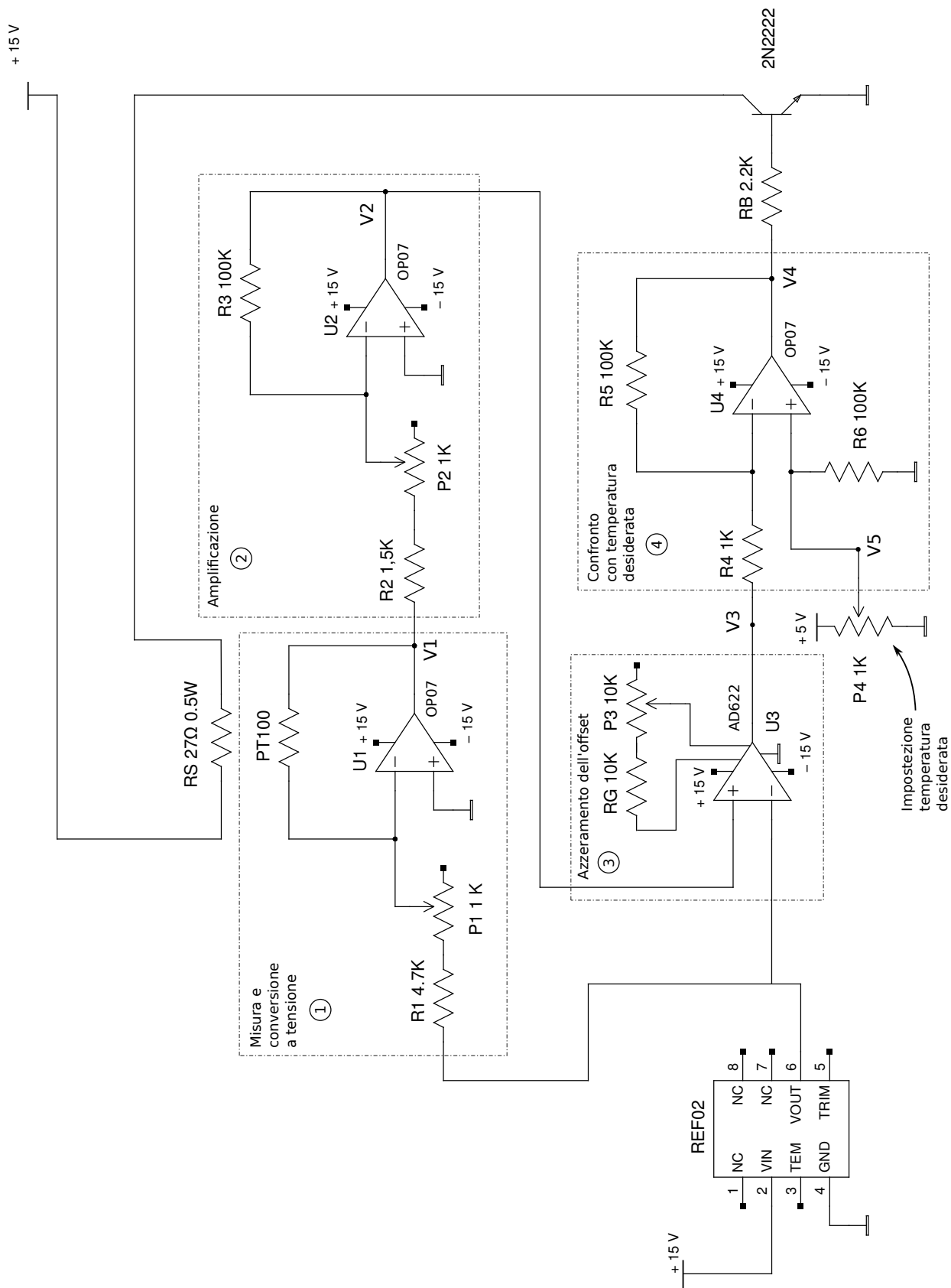


Figura 6.1

modo da poter regolare a piacere la resistenza. Questo trucco è molto utile e lo abbiamo usato in altre parti del circuito. Sempre per la stessa ragione è necessario usare un operazionale con una tensione di offset piccola. Abbiamo utilizzato un OP07, che è costruito per avere una tensione di offset bassa. Il produttore riporta un massimo di $75 \mu\text{V}$, circa 20 volte di meno di un $\mu\text{A}741$.

Per la taratura abbiamo collegato un amperometro in serie al generatore di corrente e, agendo sul trimmer, ci siamo assicurati che passasse una corrente di 1 mA. Siamo riusciti ad ottenere una corrente di $1.0001 \pm 1 \text{ mA}$!

Amplificatori (blocchi 2 e 3). L'output del blocco 1 è quindi di $100 + T \times 0.385 \text{ mV}$ dove T è la temperatura in Celsius. Le specifiche richieste erano di avere un output con una sensibilità di $100 \text{ mV}/^\circ\text{C}$, in modo da poter leggere comodamente la temperatura e da rendere semplice la misura (per rilevare 0.385 mV serve un buon strumento). Di conseguenza, il blocco 2 è un amplificatore di tensione. Era inoltre richiesto che a 0°C l'output del blocco 3 fosse di 0 V, per poter leggere la temperatura direttamente con il voltmetro senza dover fare calcoli. Per ottenere questo risultato il blocco 3 è un'INA (l'AD622 come nella precedente esperienza) che amplifica la differenza tra i suoi due ingressi. Fornendo a uno degli input dell'INA il segnale amplificato proveniente dalla resistenza al platino e all'altro una tensione opportuna è possibile eliminare la tensione (l'offset) dovuta ai 100Ω a 0°C della PT100.

Anche se può sembrare ovvio regolare il blocco 2 in modo che trasformi 0.385 mV in 100 mV , questa non è la scelta più saggia, perché all'ingresso del blocco 3 si avrebbero 10 V a 0°C e per annullare l'offset serve quindi una tensione stabile di 10 V , mentre noi abbiamo solo 15 V e 5 V . Inoltre a temperature oltre i $35\text{-}40^\circ\text{C}$ l'operazione U_2 rischia di andare in saturazione. Un'alternativa è la seguente: il blocco 2 amplifica la tensione proveniente dalla PT100 in modo che a 0°C il suo output sia di 5 V . In questo modo il terzo blocco può fare il confronto tra la tensione di 5 V proveniente dal REF02 e quella del termometro e fornire un output nullo a 0°C . È inoltre necessario regolare il guadagno dell'INA U_3 in modo che l'uscita vari di $100 \text{ mV}/^\circ\text{C}$.

Facciamo alcuni brevi calcoli per capire come tarare il circuito. Il blocco 2 deve avere un guadagno $G_2 = 50$ per trasformare i 100 mV forniti dal primo blocco a 0°C in 5 V , quindi due valori di resistenza opportuna sono $100 \text{ k}\Omega$ e $2 \text{ k}\Omega$ (que-

sto secondo valore si ottiene sommando resistenza da $1.5 \text{ k}\Omega$ e potenziometro da $1 \text{ k}\Omega$ per poter tarare il guadagno). Il terzo blocco riceve quindi $V_2 = 5 \text{ V} + 0.385 \times G_2 T \text{ mV} = 5 + 0.01925 \times T \text{ V}$. Vogliamo quindi che il guadagno del blocco 3 sia $G_3 = 100/19.25 = 5.195$. L'AD622 può essere tarato per avere un guadagno G_3 da 1 a 1000 collegando i due piedini di guadagno con una resistenza opportuna. La formula per calcolare questa resistenza è $R_G = 50.5 \text{ k}\Omega / (G_3 - 1) \simeq 12040 \Omega$. Per ottenere questa resistenza abbiamo usato il solito trucco di mettere una resistenza da $10 \text{ k}\Omega$ in serie ad un potenziometro da $10 \text{ k}\Omega$.

Per testare il funzionamento dei due blocchi abbiamo collegato il circuito al generatore di tensione in modo da poter variare l'ingresso di ciascun blocco e leggere col multimetro l'uscita. In questo modo ci siamo assicurati che i guadagni fossero impostati più precisamente possibile al valore voluto.

A questo punto siamo in possesso di un termometro di facile lettura. Abbiamo quindi testato i primi tre blocchi collegati tra loro, misurando la temperatura del laboratorio: abbiamo letto $V_3 = 2.68 \text{ V}$ che vuol dire 26.8°C . Confrontando il risultato con quello degli altri gruppi abbiamo trovato un buon accordo.

Elemento riscaldante e circuito di controllo.

Ora che siamo in possesso di un termometro, possiamo vedere come funziona l'ultimo blocco. Quello che vogliamo ottenere è la termostatazione di una resistenza, vale a dire che lo scopo è mantenere una resistenza ad una determinata temperatura. La resistenza riscaldante R_s si riscalda grazie al passaggio di corrente. Deve essere collegata a $+5 \text{ V}$ e a comune mediante un transistor di potenza, come il 2N2222 da noi utilizzato. Il transistor deve essere di potenza poiché per scaldare la resistenza è necessario il passaggio di una grande corrente. È necessario usare una resistenza piccola, come quella da 27Ω che abbiamo usato noi, per assicurare il passaggio di una grande quantità di corrente. La caduta in saturazione da collettore a emettitore del transistor è di 0.4 V , quindi usando la resistenza riferita sopra si ottiene $I = (V_{\text{alimentazione}} - V_{\text{CE}}^{\text{sat}}) / R_s = 170 \text{ mA}$.

Bisogna notare che la resistenza R_s non è stata alimentata dal REF02: abbiamo allestito un canale di alimentazione e un cavo per il comune separato dal resto del circuito. Questo è fondamentale per il corretto funzionamento del circuito. Il REF02 non è in grado di fornire 170 mA di corrente. Inoltre usare lo stesso filo del resto del circuito per il collegamento a comune è molto problematico perché

la corrente è ingente e questo fa sì che, anche se la resistenza dei cavi è piccola, ci siano delle differenze di potenziale tra un punto e l'altro. Avere i collegamenti a comune a diversi potenziali all'interno del circuito è un disastro, il circuito diventa inutile.

La corrente di base I_B del transistor controlla la corrente di collettore I_C , finché il transistor non entra in saturazione, con una legge approssimativamente lineare: $I_C = \beta I_B$ ($\beta \simeq 75$). Possiamo quindi agire sulla corrente di base per accendere o spegnere la corrente che attraversa R_s . Questo è lo scopo del blocco 4. Inoltre poiché la legge sopra riportata è lineare, è possibile costruire un controllo di tipo *proporzionale*, ovvero un sistema che varia la corrente in base a quanto distante è la temperatura di R_s da quella desiderata.

Le specifiche richieste sono le seguenti: se la temperatura è più alta di quella desiderata il transistor deve essere in interdizione, in modo da bloccare la corrente e quindi il riscaldamento. Se la temperatura è più bassa di almeno un grado di quella desiderata, la corrente attraverso R_s deve essere massima, ovvero 170 mA. Se la temperatura è inferiore a quella desiderata ma di meno di un grado la corrente deve essere proporzionale alla distanza dalla temperatura voluta.

La temperatura desiderata si imposta mediante il potenziometro P_4 con la solita scala 0.1 V/°C e 0 V indica 0°C. Se per esempio al piedino centrale (V_5) di P_4 ci sono 4 V allora la temperatura desiderata è 40°C. Il potenziometro P_4 è stato alimentato dal REF02 e rappresenta la manopola del termostato.

Il blocco 4 è un altro amplificatore differenziale che confronta la temperatura letta e trasformata dai primi 3 blocchi con quella desiderata, amplificando di 100 volte la differenza. Se la tensione all'input invertente V_3 è superiore a quella impostata significa che la temperatura è più alta del voluto e l'amplificatore va in saturazione negativa mandando il transistor in cut-off. Se la tensione V_3 è minore di quella impostata si ottiene che $V_4 = 100 \times (V_5 - V_3)$. Perciò, quando la differenza tra temperatura misurata e desiderata è 1°C, $V_4 = 10$ V. Vogliamo che a questa tensione il transistor vada in saturazione, in modo che se V_4 aumenta ancora la corrente rimanga fissa. Affinché il transistor vada in saturazione è necessario che $I_C = 170 \text{ mA} = \beta I_B \implies I_B = 2.27 \text{ mA}$. La tensione di base V_B del transistor in regione lineare è 1.3 V (a causa della caduta base-emettitore. Il valore 1.3 V è riportato nelle specifiche del transistor), di conseguenza deve valere $R_B = (10 - 1.3) \text{ V} / 2.27 \text{ mA} = 3.8 \text{ k}\Omega$.

Costruito in questo modo il circuito opera per-

fettamente secondo le specifiche. Per testare l'ultimo blocco abbiamo semplicemente verificato il funzionamento del circuito nel complesso, poiché le altre parti erano già state testate. Abbiamo provato ad impostare la temperatura desiderata a 40°C monitorando al contempo V_3 , V_4 e la corrente attraverso l'elemento riscaldante. Abbiamo constatato che la temperatura è aumentata fino a circa 39°C con una corrente stabile di 170 mA e che dopo quella temperatura la corrente è calata bruscamente, per raggiungere lo zero quando la temperatura ha superato la soglia desiderata. Dopodiché la temperatura ha continuato ad oscillare attorno alla soglia desiderata, a volte costringendo il controller a mandare nuovamente il transistor in saturazione.

6.4 Conclusione

L'esperienza è stata una delle più interessanti finora, sia perché si cominciano a vedere i frutti di tutti i circuiti che abbiamo studiato, sia perché il circuito è piuttosto complesso e richiede un certo metodo nella realizzazione. Inoltre il risultato è molto interessante e ha applicazioni pratiche estremamente comuni e utili. Siamo molto soddisfatti dell'esperienza. L'unica pecca è stato il tempo a disposizione limitato.

7 Elettrocardiogramma

7.1 Obiettivo

L'obiettivo è costruire un circuito per la misura della tensione generata dal cuore durante il suo funzionamento; come test del circuito ci siamo fatti un elettrocardiogramma (ECG) "fatto in casa"!

7.2 Materiali e circuiti

- Breadboard, cavi a banana e cavetti vari.
- 3 amplificatori operazionali OP07 e un amplificatore strumentale AD622.
- Isolatore ISO 124.
- Resistenze: 220 Ω , 3.9 k Ω , 10 k Ω , 100 k Ω .
- Capacità: 3 \times 10 nF, 100 nF, 470 nF.
- 2 batterie da 9 V.
- Cavi con calza e 3 elettrodi per la misura.
- Alimentatore di tensione continua.
- Generatore di forme d'onda Agilent 33120A.
- Multimetro Agilent 34410A.
- Oscilloscopio Agilent DSO-X 2002A.

7.3 Dati e risultati

Battito cardiaco Per capire come misurare l'attività cardiaca è necessaria una breve introduzione al funzionamento del cuore. In cuore è composto da due atri e due ventricoli, come mostrato in figura 7.1. Si gonfiano e poi congraggono prima gli atri e poi ventricoli in modo da pompare il sangue lungo i vasi sanguigni. Un apposito sistema di valvole fa in modo che il sangue non venga spinto nella direzione sbagliata diminuendo l'efficienza dell'organo.

La membrana cellulare in condizioni normali è polarizzata, ovvero c'è una differenza di potenziale tra interno ed esterno a causa delle diverse concentrazioni di ioni tra interno ed esterno. Il miocardio, o muscolo cardiaco, contiene alcune cellule (formanti miocardio specifico) che sono in grado di depolarizzarsi. Queste cellule forniscono, ad intervalli circa regolari, l'impulso elettrico che fa contrarre il cuore. Essendo il cuore un organo complicato la stimolazione elettrica deve essere precisa ed è composta di varie fasi che agiscono su svariate parti del cuore in successione.

Poiché il corpo è un buon conduttore, essendo formato in gran parte da soluzioni ioniche, questi impulsi si trasmettono facilmente a tutto il corpo, generando differenze di potenziale abbastanza semplici da misurare. In questo modo è possibile rilevare, senza interventi invasivi, le varie fasi di contrazione del cuore e verificare l'insorgenza di problemi di salute.

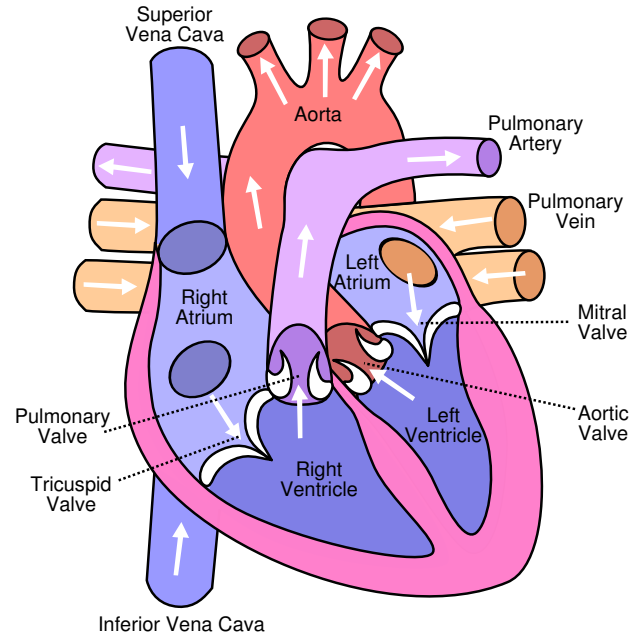


Figura 7.1

Esistono decine di modi di disporre gli elettrodi sul corpo per misurare l'attività cardiaca e ognuna porta a un diverso tipo di elettrocardiogramma. Il modo più semplice è usare 3 elettrodi: uno sulla caviglia per mettere a comune il corpo, e due sui polsi per rilevare le differenze di potenziale generate dal miocardio specifico (si può immaginare il miocardio come un momento di dipolo variabile che genera una differenza di potenziale). Il nostro compito è di misurare, amplificare e filtrare queste minuscole differenze di potenziale per poter leggere l'andamento temporale dell'attività cardiaca.

Difficoltà nella misura L'elettrocardiogramma è una misura piuttosto delicata, poiché ci sono molti fattori di disturbo, tra i quali:

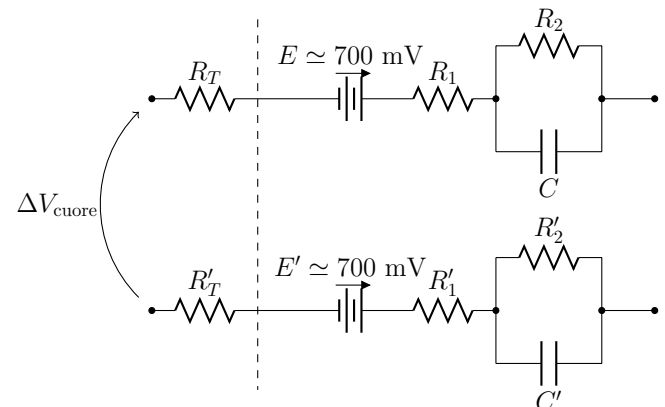


Figura 7.2: Le R_T rappresentano la resistenza del corpo, mentre la parte a destra della linea tratteggiata è il circuito equivalente dell'elettrodo.

- Movimenti e posizioni reciproche delle varie parti del corpo.
- Movimenti e posizioni dei cavi di collegamento.
- Interazioni tra corpo ed elettrodi. Il circuito 7.2 mostra il circuito equivalente del sistema corpo + elettrodi.
- Effetti di induzione e capacitivi sulle varie parti del circuito e sul paziente dovuti per esempio alla tensione di rete.

Tutti questi disturbi, uniti al fatto che il segnale elettrico proveniente dal cuore è di pochi millivolt, rendono la misura difficoltosa. È quindi necessario prendere svariate precauzioni, che vedremo nel prossimo paragrafo.

Blocchi funzionali Il circuito per la misura è mostrato in figura 7.3. Il circuito è stato alimentato da due batterie da 9 V al fine di evitare contatti accidentali tra tensione di rete, terra e corpo. Questi contatti potrebbero portare a folgorazioni del pa-

ziente. Analizziamo quindi i vari blocchi funzionali del circuito.

Il segnale che arriva dai polsi è piuttosto piccolo, nell'ordine dei millivolt, ed è molto sporco. Il primo blocco è costituito da un amplificatore alle differenze AD622 il cui scopo è amplificare la differenza di potenziale tra i polsi del paziente. Per ridurre il rumore i due ingressi sono dotati di due filtri passa-basso formati dalle resistenze R_F e dai condensatori C_c . Inoltre per ridurre ulteriormente le frequenze molto alte, il condensatore C_m mette gli ingressi in modo comune a frequenze alte. Abbiamo poi scelto le resistenze di guadagno R_G in modo da avere un guadagno elevato: la scelta è caduta su due resistenze da $120\ \Omega$, il guadagno dell'AD622 era quindi $G = 1 + 2R_G/50.5\ \text{k}\Omega = 1 + 440/50.5\ \text{k}\Omega = 116$.

Una volta amplificato il segnale, abbiamo utilizzato un filtro passa alto (blocco 2) per eliminare le componenti continue e a bassa frequenza che a noi non interessano. Questo filtro ha una capacità piuttosto grande per tagliare solo le componenti a bassissima frequenza (ha una frequenza di taglio di

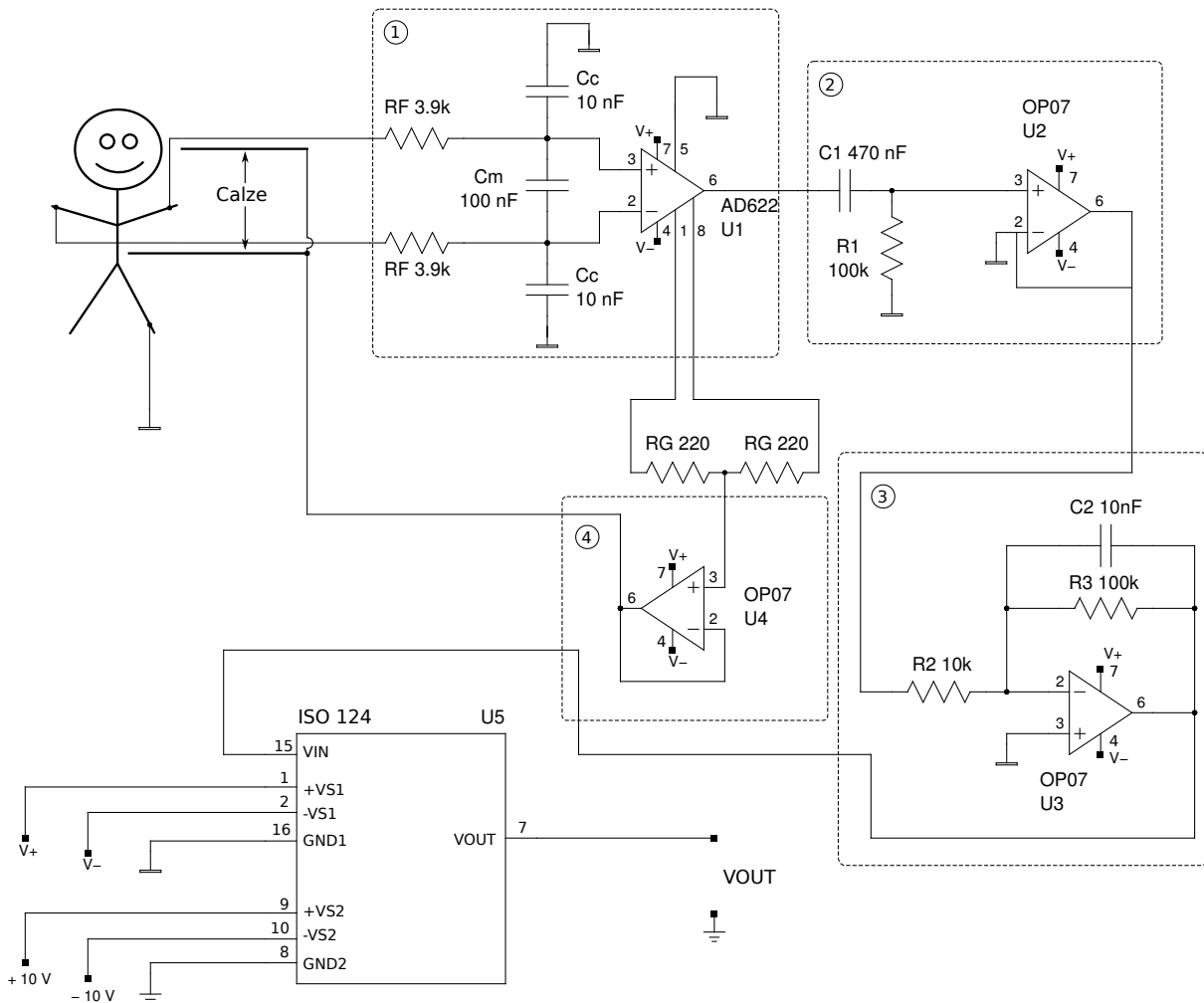


Figura 7.3: Circuito per la misura dell'ECG

circa 3-4 Hz), poiché il segnale cardiaco ha una frequenza di 1-2 Hz. In questo modo, anche se il segnale viene attenuato un po', si eliminano le componenti continue e altri rumori che non vogliamo avere nell'ECG. Il blocco contiene anche un follower (opamp U2), per avere un'alta impedenza all'uscita del filtro.

Infine il blocco 3 è costituito da un ulteriore stadio di amplificazione, realizzato operativo in modalità di amplificatore invertente con guadagno $G = -10$. L'unica cosa da notare è la capacità C_2 , che non è altro che un ulteriore filtro per il rumore ad alta frequenza. Il condensatore evita che vengano amplificati i segnali ad alte frequenze.

Un altro accorgimento per ridurre il rumore è il blocco 4. Questo blocco preleva tra le 2 R_G la media delle due tensioni all'ingresso dell'AD622 e dopo l'opamp U4, la cui funzione è solo di aumentare l'impedenza in modo da non disturbare il funzionamento dell'AD622, questa tensione media viene inserita nelle calze dei cavi di collegamento agli elettrodi. Le calze sono degli involucri conduttori che avvolgono i cavi veri e propri, e hanno due funzioni:

- Limitano le perdite dell'isolante che avvolge i cavi perché la differenza di potenziale tra cavo e calza è piccola.
- Fanno sì che entrambi i cavi di collegamento vedano lo stesso potenziale e siano meno influenzati dalle loro posizioni sul banco di laboratorio.

Dopo questo stadio abbiamo quindi il segnale finale che formerà l'ECG. Tuttavia c'è ancora un problema di sicurezza. Collegando questo circuito, che è stato alimentato da +9 V e -9 V forniti da due batterie in serie per evitare collegamenti con la rete, con l'oscilloscopio c'è il rischio che qualche parte venga a contatto con tensioni di rete (per esempio perché l'oscilloscopio è malfunzionante, ma anche perché semplicemente non sappiamo come sia realizzato internamente). Abbiamo quindi utilizzato un amplificatore isolante ISO 124. Questo componente accetta in ingresso due diverse coppie di tensioni di alimentazione e due riferimenti diversi, indicati rispettivamente con $+V_{S1}$, $-V_{S2}$, GND1, $+V_{S2}$, $-V_{S2}$, GND2 in figura 7.3. Inoltre possiede un ingresso e un'uscita: l'uscita è una replica dell'ingresso, ma è riferita a GND2 e alimentata da $+V_{S2}$, $-V_{S2}$ invece che essere riferita a GND1 come l'entrata. Questo permette di separare alimentazioni e riferimenti di due parti del circuito, isolandole elettricamente, ma di mantenere inalterato il segnale da

trasmettere. L'uscita dell'ISO 124 è quindi collegata all'oscilloscopio per poter visualizzare l'ECG.

Risultati Dopo aver montato il circuito, ne abbiamo testato il comportamento provando a misurare l'elettrocardiogramma di uno dei membri del gruppo. Il risultato è stato molto incoraggiante. In figura 7.4 è mostrata la registrazione ottenuta. Si possono notare le varie fasi dell'attività cardiaca, che approfondiremo nel prossimo paragrafo. Inoltre si nota che la frequenza è circa 75 battiti/minuto, un valore tipico. In figura 7.5 vediamo invece un elettrocardiogramma fatto dopo che lo stesso soggetto era uscito per compiere qualche centinaio di metri di corsa. Il battito cardiaco è ora attorno a 150 battiti/minuto!

Un'analisi più dettagliata dell'ECG fa riferimento alla figura 7.6. In questa immagine è mostrato uno spezzone ingrandito dell'ECG della figura 7.4. Sono distinguibili diverse fasi dell'attività cardiaca:

- Onda P: È dovuta alla depolarizzazione degli atri, ovvero alla loro contrazione. In questa fase il sangue viene pompato dagli atri ai ventricoli.
- Complesso QRS: È dovuto alla contrazione dei ventricoli, ovvero alla fase durante la quale il sangue viene pompato fuori dal cuore. Poiché i ventricoli hanno una massa muscolare molto maggiore a quella degli atri, il picco è molto più pronunciato.
- Onda T: In questa fase i ventricoli si ripolarizzano, ovvero si rilassano, risucchiando sangue dall'esterno.
- Onda U: Non è ben chiaro a cosa sia dovuta. L'ipotesi più plausibile è che rappresenti la ripolarizzazione del setto interventricolare. Spesso è assente. Tuttavia nel caso in cui fosse troppo prominente, è un sintomo di alcune malattie cardiache.

7.4 Conclusione

Questa è stata una delle esperienze più interessanti del semestre, innanzitutto perché abbiamo ottenuto un bellissimo risultato di utilità pratica. Vedere com'è semplice la costruzione di un utilissimo strumento medico è molto interessante.

Dal punto di vista dell'elettronica, gli aspetti nuovi e più interessanti sono l'eliminazione del rumore tramite vari metodi (tra cui l'utilizzo di cavi con calze) e l'utilizzo dell'ISO 124.

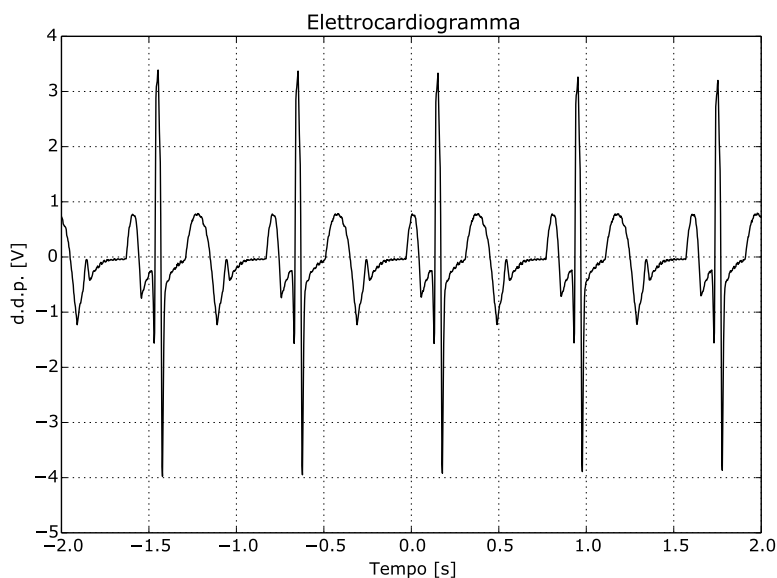


Figura 7.4: Esempio di elettrocardiogramma misurato con il circuito che abbiamo montato. Il battito é di 75 battiti/minuto. Misurando la distanza tra i picchi, abbiamo notato che il cuore é estremamente preciso: ogni picco é distanziato da quello vicino da circa 800 ms, con una deviazione massima di 2 ms. Sono inoltre visibili altri picchi secondari, dovuti a varie fasi dell'attività cardiaca. Il paziente era uno dei membri del gruppo.

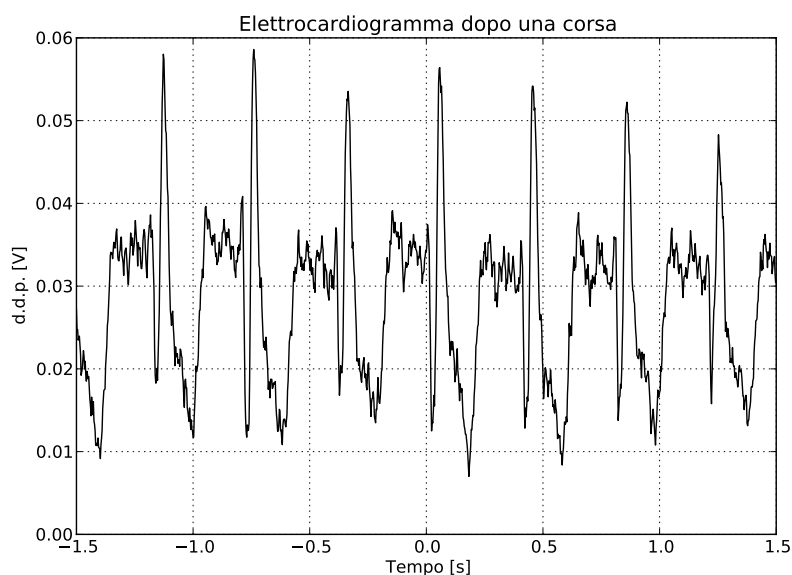


Figura 7.5: ECG dello stesso soggetto dell'ECG in figura 7.4 soltanto che in questo caso il paziente é uscito dal laboratorio e ha percorso qualche centinaio di metri di corsa prima della misura. Di conseguenza, il battito é salito a circa 150 battiti/minuto, o circa 400 ms tra i battiti, sempre con una precisione di pochi millisecondi. Questo ECG é un poco piú rumoroso del precedente.

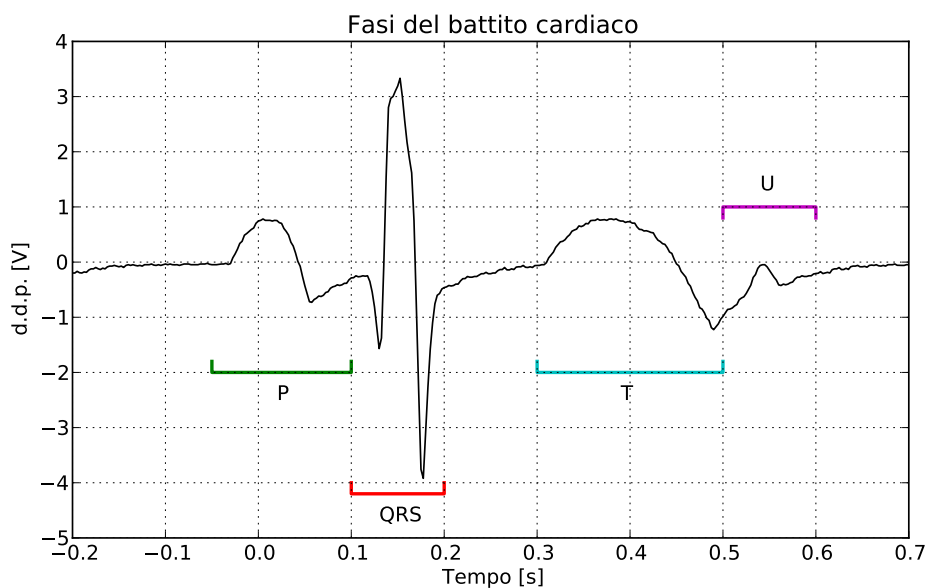


Figura 7.6: Quest'immagine é un ingrandimento della figura 7.4 e rappresentano un tipico battito cardiaco visto tramite ECG. Si vedono molto bene le varie onde generate dalle fasi dell'attività cardiaca. Riassumendo quanto scritto nel testo: **P** é la fase di contrazione degli atri, **QRS** é l'onda generata dalla contrazione dei ventricoli, **T** é il rilassamento dei ventricoli e **U** é generata dal setto interventricolare.

8 Oscillatore a ponte di Wien e compensazione delle sonde

8.1 Obbiettivo

Costruzione di un generatore di onde sinusoidali detto oscillatore a ponte di Wien. Inoltre impareremo ad utilizzare sonde compensabili e verificheremo il loro funzionamento.

8.2 Materiali e circuiti

- Breadboard, cavi a banana e cavetti vari.
- 3 amplificatori operazionali OP07 e un'amplificatore strumentale AD622.
- Isolatore ISO 124.
- Resistenze: $220\ \Omega$, $3.9\ \text{k}\Omega$, $10\ \text{k}\Omega$, $100\ \text{k}\Omega$.
- Capacità: $3 \times 10\ \text{nF}$, $100\ \text{nF}$, $470\ \text{nF}$.
- 2 batterie da $9\ \text{V}$.
- Cavi con calza e 3 elettrodi per la misura.
- Alimentatore di tensione continua.
- Generatore di forme d'onda Agilent 33120A.
- Multimetro Agilent 34410A.
- Oscilloscopio Agilent DSO-X 2002A.

8.3 Dati e risultati

L'oscillatore a ponte di Wien (figura 8.1), che prende il nome dal fatto che non è altro che un ponte di wien modificato con l'inserimento di un amplificatore operazionale, è un particolare tipo di oscillatore che genera onde sinusoidali.

8.4 Conclusione

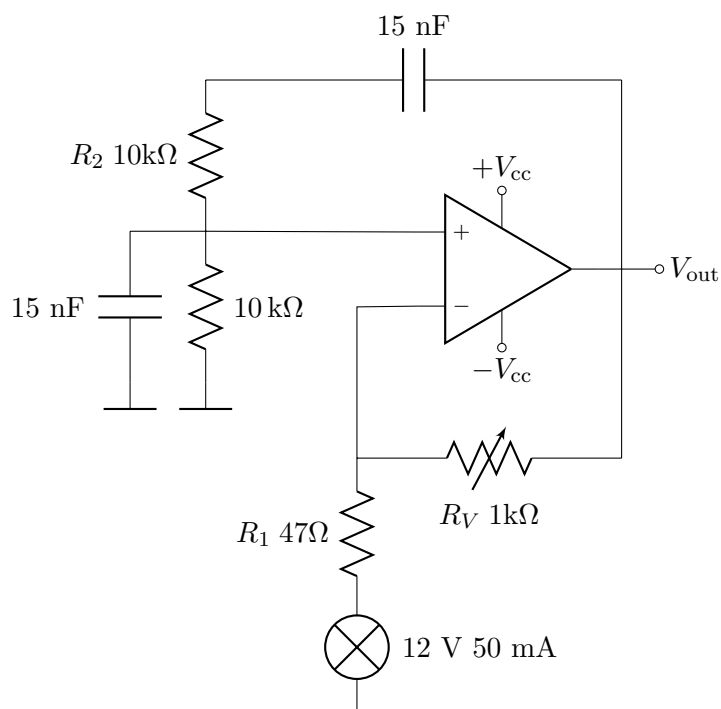


Figura 8.1: Oscillatore a ponte di Wien.

9 Introduzione all'elettronica digitale: porte logiche

- 9.1 Obiettivo
- 9.2 Materiali e circuiti
- 9.3 Dati e risultati
- 9.4 Conclusione