



Università degli Studi di Bergamo

SCUOLA DI INGEGNERIA
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Informatica

Elettronica e Misure Industriali

Relazione esperienze di laboratorio

Prof.
Valerio Re

Candidato
Giulia Allievi
Matricola 1058231

Prof.
Massimo Manghisoni

Indice

| | | |
|----------|---|-----------|
| 0 | Introduzione | 4 |
| 1 | Circuito 1: Emitter Follower | 5 |
| 1.1 | Introduzione | 5 |
| 1.2 | Prima versione | 5 |
| 1.2.1 | Punto di lavoro | 6 |
| 1.2.2 | Analisi di piccolo segnale | 7 |
| 1.2.3 | Componenti, strumenti e misure | 8 |
| 1.3 | Seconda versione | 13 |
| 1.3.1 | Punto di lavoro | 13 |
| 1.3.2 | Analisi di piccolo segnale | 13 |
| 1.3.3 | Componenti, strumenti e misure | 13 |
| 2 | Circuito 2: Common Emitter Amplifier | 14 |
| 2.1 | Introduzione | 14 |
| 2.2 | Prima versione | 14 |
| 2.2.1 | Schema | 14 |
| 2.2.2 | Analisi del circuito | 14 |
| 2.3 | Seconda versione | 14 |
| 2.3.1 | Punto di lavoro | 14 |
| 2.3.2 | Analisi di piccolo segnale | 14 |
| 2.3.3 | Componenti, strumenti e misure | 14 |
| 2.4 | Terza versione | 14 |
| 2.4.1 | Punto di lavoro | 14 |
| 2.4.2 | Analisi di piccolo segnale | 14 |
| 2.4.3 | Componenti, strumenti e misure | 14 |
| 3 | Circuiti 3 e 4: Amplificatore operazionale $\mu A741$ | 15 |
| 3.1 | Introduzione | 15 |
| 3.2 | Amplificatore invertente | 15 |
| 3.2.1 | Schema | 15 |
| 3.2.2 | Analisi del circuito | 15 |
| 3.2.3 | Componenti, strumenti e misure | 15 |
| 3.3 | Integratore | 15 |
| 3.3.1 | Schema | 15 |
| 3.3.2 | Analisi del circuito | 15 |
| 3.3.3 | Componenti, strumenti e misure | 15 |

Introduzione

Nelle esperienze di laboratorio si sono realizzati ed analizzati i seguenti circuiti:

- Esperienza 1: Emitter follower con alimentazione duale;
- Esperienza 2: Emitter follower con alimentazione singola;
- Esperienza 3: Common emitter amplifier con alimentazione duale e singola;
- Esperienza 4: Amplificatore invertente ed integratore con $\mu A741$.

La relazione è suddivisa per tipologia di circuito.

Circuito 1: Emitter Follower

1.1 Introduzione

Il primo circuito realizzato è l'*Emitter follower*, detto anche *Common collector*. Questo circuito ha un guadagno unitario, infatti la tensione misurata in uscita è uguale alla tensione applicata in ingresso, perciò si comporta come un buffer. Ne abbiamo realizzate due diverse versioni, una con alimentazione duale ed una con alimentazione singola.

1.2 Prima versione

La prima versione di *Emitter follower* analizzata è quella ad alimentazione duale. Di seguito si riportano lo schema, l'analisi del punto di lavoro e di piccolo segnale, e le misure effettuate su questo circuito.

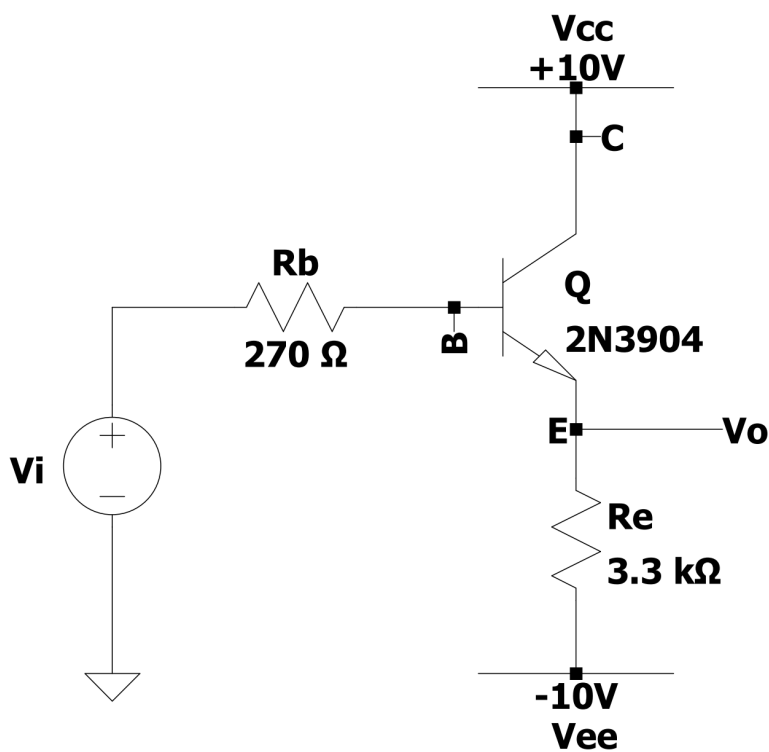


Figura 1.1: Schema dell'*Emitter follower* ad alimentazione duale.

1.2.1 Punto di lavoro

In quest'analisi bisogna spegnere i generatori di segnale e sostituirli con un cortocircuito se sono generatori di tensione, oppure con un circuito aperto se sono generatori di corrente. I condensatori sono sostituiti con un circuito aperto e gli induttori con un cortocircuito. Successivamente si va a determinare la tensione di ogni nodo e la corrente che scorre in ogni ramo.

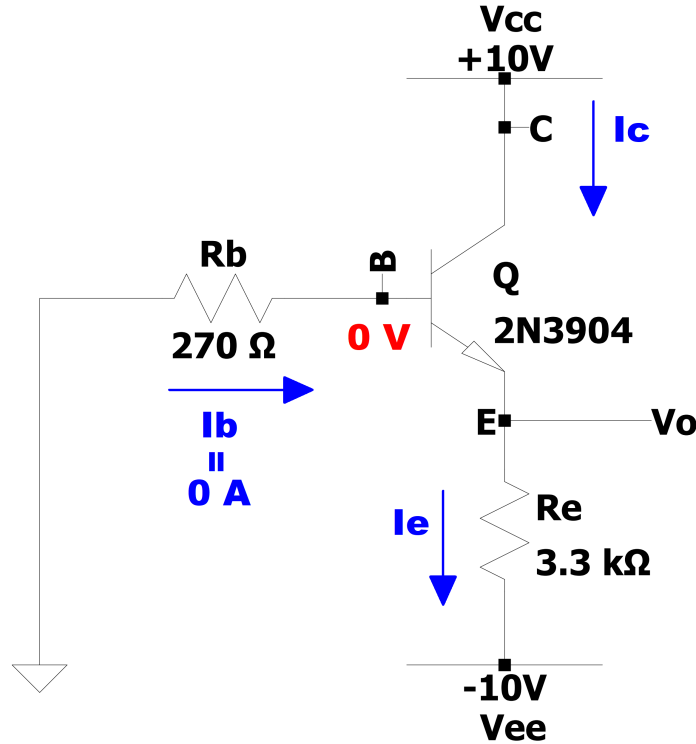


Figura 1.2: Punto di lavoro dell'*Emitter follower* ad alimentazione duale.

Come si vede nell'immagine 1.2, il generatore di segnale v_i viene sostituito con un cortocircuito, quindi la resistenza R_B si trova fra massa e la base del transistor Q . In questo caso non dobbiamo apportare altre modifiche al circuito originale.

Nell'analisi utilizziamo il modello ideale del transistor, perciò assumiamo che $\beta \rightarrow \infty$ e che $I_B = 0A$, di conseguenza la corrente che fluisce nella resistenza è nulla, perciò, per la legge di Ohm, sarà nulla anche la caduta di tensione ai suoi capi, quindi si ricava che $V_B = 0V$.

Dal bilancio di correnti del transistor (lo trattiamo come se fosse un nodo) otteniamo che $I_C + I_B = I_E$, ma dato che I_B è nulla, allora $I_C = I_E$.

Supponendo che il transistor si trovi in regione attiva diretta, la tensione V_{BE} fra la base e l'emettitore è pari a circa $+0.7V$ perché la giunzione è polarizzata direttamente. Dato che sappiamo che $V_B = 0V$, possiamo calcolare per differenza V_E , dunque $V_E = -0.7V$. Anche V_o sarà pari a questo valore dato che l'uscita viene prelevata all'emettitore.

V_C è pari alla tensione di alimentazione positiva, perciò $V_C = V_{CC} = 10V$. Dato che $V_{CB} > 0V$, la giunzione base-collettore è polarizzata inversamente, quindi l'ipotesi che il transistor si trovi in regione attiva diretta è verificata.

Ora possiamo calcolare la corrente di emettitore con la legge di Ohm:

$$V_E - V_{EE} = R_E \cdot I_E \rightarrow I_E = I_C = \frac{V_E - V_{EE}}{R_E} = \frac{-0.7V - (-10V)}{3.3k\Omega} = 2.818mA$$

Il circuito è ora completamente risolto, come ultima cosa si può calcolare la transconduttanza che ci servirà successivamente per l'analisi di piccolo segnale. La transconduttanza è definita come rapporto tra la corrente di collettore stazionaria I_C e la tensione termica V_T , che a temperatura ambiente vale circa 26mV.

$$\text{In formule: } g_m = \frac{I_C}{V_T} = \frac{2.818mA}{26mV} = 0.108 \frac{A}{V}.$$

In tabella 1.1 sono riassunte tutte le grandezze ricavate dal punto di lavoro.

| $V_B[V]$ | $V_C[V]$ | $V_E[V]$ | $I_B[A]$ | $I_E[mA]$ | $I_C[mA]$ | $g_m[A/V]$ |
|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|------------|
| 0 | 10 | -0.7 | 0 | 2.818 | 2.818 | 0.108 |

Tabella 1.1: Riassunto delle grandezze ricavate dal punto di lavoro del circuito.

1.2.2 Analisi di piccolo segnale

Nell'analisi di piccolo segnale bisogna spegnere i generatori di grandezze continue e sostituirli con un cortocircuito se sono generatori di tensione, oppure con un circuito aperto se sono generatori di corrente. Per analisi approssimate, i condensatori sono sostituiti con un cortocircuito e gli induttori con un circuito aperto; per analisi più accurate, invece, non vengono sostituiti e si utilizza la loro impedenza per risolvere il circuito. Infine, i transistor vengono sostituiti con il loro modello per piccolo segnale. Successivamente si va a determinare la tensione di ogni nodo e la corrente che scorre in ogni ramo, esattamente come avveniva per l'analisi del punto di lavoro.

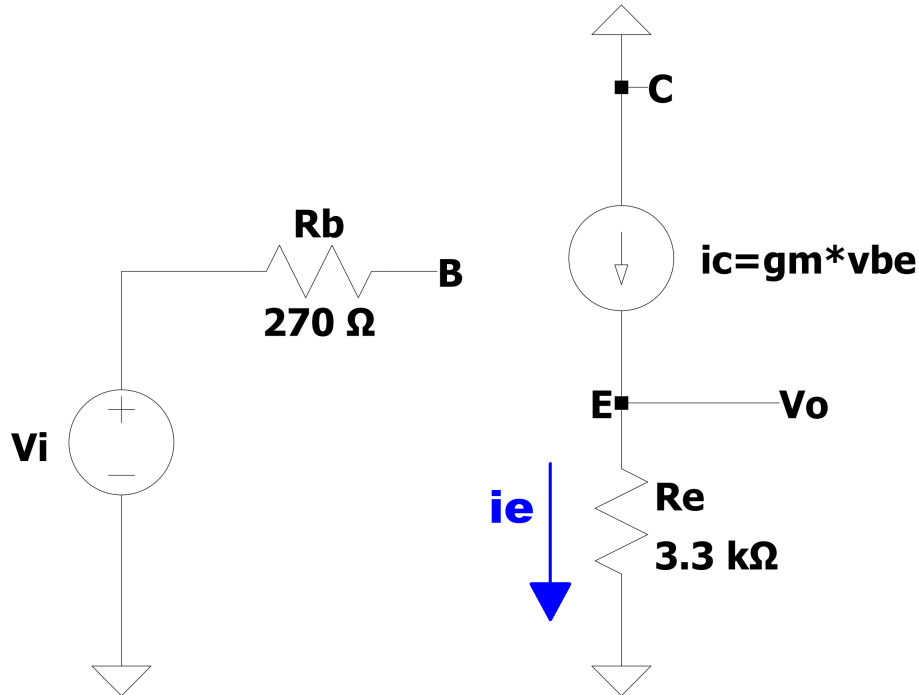


Figura 1.3: Analisi di piccolo segnale dell'*Emitter follower* ad alimentazione duale.

Come si può notare dalla figura 1.3, il BJT viene sostituito con il modello per piccolo segnale a bassa frequenza, quindi il terminale di base risulta isolato dal collettore e dall'emettitore, invece questi due terminali sono collegati attraverso un generatore di corrente di valore pari al prodotto fra la transconduttanza g_m e la tensione v_{BE} .

Dato che la base del transistor è isolata, nel circuito di sinistra non circola corrente, perciò non c'è caduta di tensione sulla resistenza R_B , quindi la tensione v_B risulta pari alla tensione applicata in ingresso con il generatore v_i .

Abbiamo già detto che $i_C = g_m \cdot v_{BE} = g_m(v_B - v_E)$. Ma dato che $v_B = v_i$ e $v_E = v_o$, la formula precedente per il calcolo della corrente di collettore si può riscrivere come $i_C = g_m(v_i - v_o)$.

Ricaviamo i_E con la legge di Ohm: $i_E = \frac{v_E - 0V}{R_E} = \frac{v_o}{R_E}$.

Dal bilancio delle correnti al nodo E otteniamo che $i_C = i_E$. Sostituendo alle due correnti l'espressione ricavata ai punti precedenti ricaviamo la seguente equazione:

$$g_m(v_i - v_o) = \frac{v_o}{R_E}.$$

A questo punto possiamo ricavare la funzione di trasferimento del circuito manipolando l'espressione ottenuta in precedenza. Questa risulta:

$$\frac{v_o}{v_i} = \frac{g_m R_E}{1 + g_m R_E} \simeq 1 \text{ per } g_m R_E \gg 1.$$

Allora, si può dire che $v_o = v_i$, ovvero il circuito si comporta come un buffer, come si era già accennato nell'introduzione del circuito.

1.2.3 Componenti, strumenti e misure

Il circuito, mostrato in figura 1.4, è stato realizzato su una breadboard utilizzando questi componenti:

- transistor bipolare NPN 2N3904;
- una resistenza da $270\ \Omega$ per R_B ;
- due resistenze, una da $1.5\text{ k}\Omega$ (R_{E1}) ed una da $1.8\text{ k}\Omega$ (R_{E2}) connesse in serie, per realizzare la resistenza R_E da $3.3\text{ k}\Omega$.

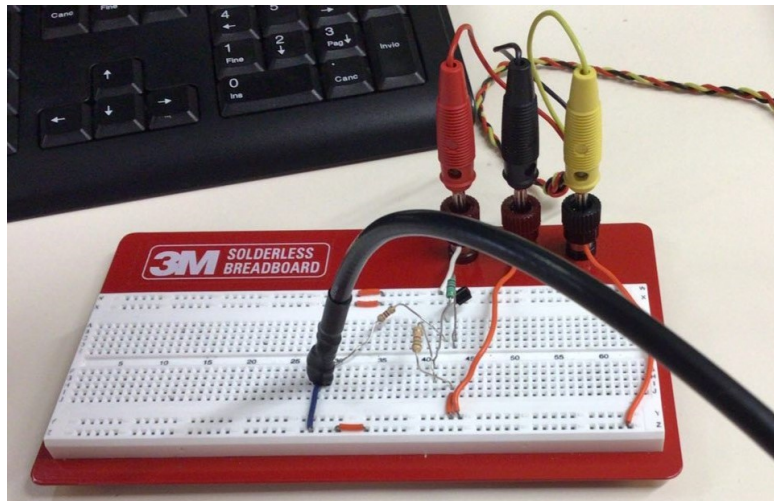


Figura 1.4: Fotografia del circuito *Emitter follower* ad alimentazione duale realizzato in laboratorio.

Per le misure e le analisi, sono stati utilizzati i seguenti strumenti:

- alimentatore da banco, con alimentazione positiva impostata a 10V ed alimentazione negativa a -10V, entrambe con limite in corrente di 50mA;
- generatore di forme d'onda;
- multimetro da banco;
- oscilloscopio a due canali.

Per prima cosa, con il multimetro si sono misurati i valori delle resistenze ed i valori delle tensioni delle giunzioni p-n del transistor (tensione *base-emettitore* e tensione *base-collettore*). I valori ottenuti sono mostrati in tabella 1.2.

| | Valore nominale | Valore misurato |
|----------|-----------------|------------------|
| R_B | 270 Ω | 271 Ω |
| R_{E1} | 1.5 k Ω | 1.448 k Ω |
| R_{E2} | 1.8 k Ω | 1.788 k Ω |
| V_{BE} | $\simeq 0.7V$ | 0.699V |
| V_{BC} | $\simeq 0.7V$ | 0.659V |

Tabella 1.2: Grandezze misurate prima di realizzare il circuito.

Le due giunzioni p-n hanno valori di tensione diversi, questo è dovuto alla tecnologia di realizzazione del BJT: essendo un dispositivo planare, le due giunzioni hanno lunghezza diversa, di conseguenza anche il loro valore di tensione sarà diverso. Il valore totale della resistenza R_E è pari a 3.236 k Ω , poco meno del 2% rispetto al suo valore nominale che è 3.3 k Ω .

Dopo aver posizionato tutti i componenti sulla breadboard, è stato fatto lo studio del punto di lavoro del circuito. Non è stato applicato il segnale e il terminale della resistenza R_B non connesso alla base del transistor è stato collegato a massa. Il circuito risultante è mostrato in figura 1.5.

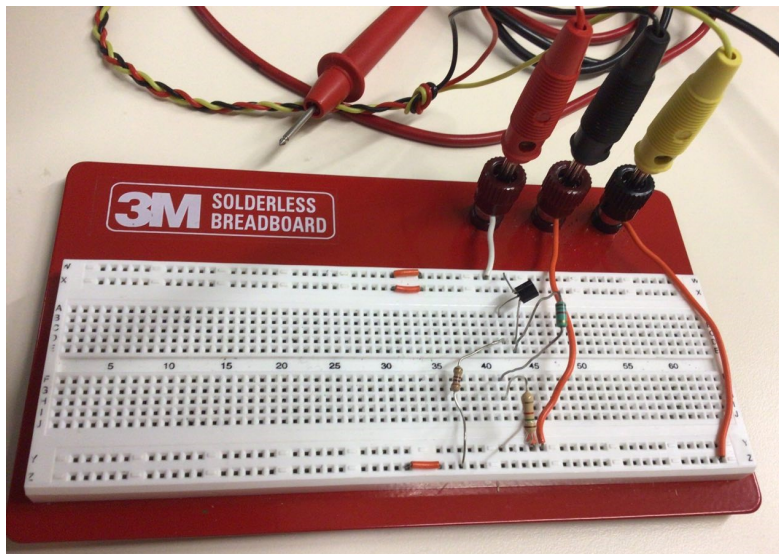


Figura 1.5: Fotografia del circuito *Emitter follower* con le connessioni per lo studio del punto di lavoro.

Le tensioni sono state misurate con il multimetro da banco, le correnti di base e di emettitore sono state ricavate utilizzando la legge di Ohm, mentre la corrente di collettore è stata calcolata per differenza dalle altre due correnti. I risultati sono mostrati in tabella 1.3.

| V_B [mV] | V_C [V] | V_E [V] | I_B [mA] | I_E [mA] | I_C [mA] | g_m [A/V] |
|------------|-----------|-----------|------------|------------|------------|-------------|
| -3.515 | 10.000 | -0.687 | 0.013 | 2.878 | 2.865 | 0.108 |

Tabella 1.3: Grandezze misurate dallo studio del punto di lavoro del circuito.

I valori ottenuti sono confrontabili con i risultati teorici calcolati nella sezione 1.2.1. La differenza principale è che sia V_B che I_B non sono nulle, anche se il loro valore (in modulo) è molto piccolo. In particolare, dato che la corrente I_B è piccola, l'approssimazione adottata nello studio teorico del circuito di trascurarla è ragionevole.

Dopo lo studio del punto di lavoro del circuito, è stato applicato in ingresso il segnale collegando con un cavo BNC il generatore di forme d'onda al circuito. Il circuito risultante è quello già mostrato in figura 1.4. La forma d'onda utilizzata è una sinusoide con tensione picco-picco V_{PP} di 1V e frequenza f pari a 1 kHz.

Per visualizzare graficamente la tensione in ingresso e la tensione in uscita è stato utilizzato l'oscilloscopio. Entrambe le sonde sono state collegate a massa con il coccodrillo, la punta di una sonda è stata collegata alla base del transistor (canale 1, traccia gialla) mentre la punta dell'altra sonda è stata collegata all'emettitore (canale 2, traccia azzurra). Il grafico è visibile in figura 1.6.

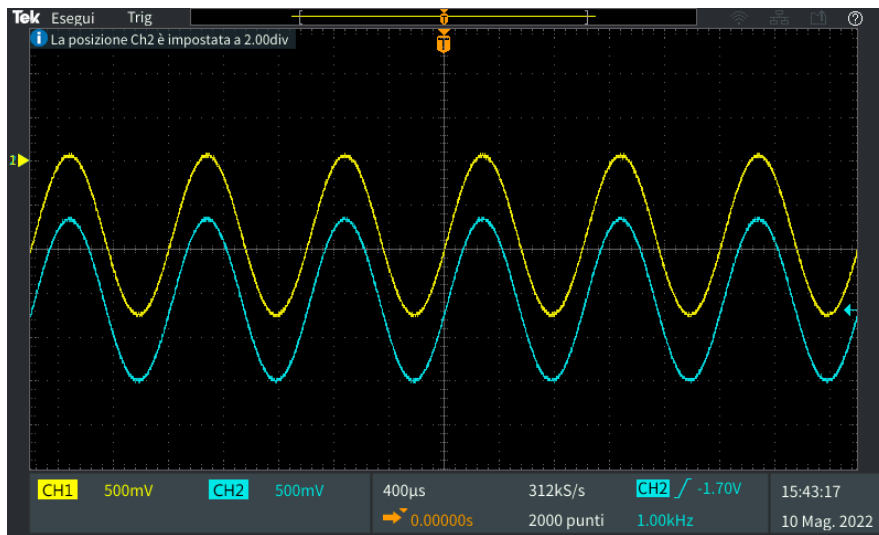


Figura 1.6: Grafico della tensione in ingresso (CH1) e della tensione in uscita (CH2) al circuito.

Com'è possibile vedere dal grafico, il guadagno del circuito è unitario perché entrambe le sinusoidi hanno la stessa ampiezza. La tensione applicata in ingresso la misuriamo in uscita con una differenza di circa 0.7V, che è la caduta di tensione data dalla giunzione p-n fra base ed emettitore. I due segnali sono in fase.

In realtà, il guadagno del circuito non è esattamente unitario e nemmeno lo sfasamento, o offset, è proprio nullo, come invece sembrerebbe dal grafico precedente. La tensione in uscita è legata alla tensione in ingresso da una relazione del tipo $y = a + bx$, dove y è la tensione in uscita, x la tensione in ingresso, a l'offset e b il guadagno del circuito. Per ricavare il valore dei parametri a e b sono state

applicate in ingresso al circuito diverse sinusoidi, tutte di frequenza 1 kHz ma di ampiezza variabile. La tensione picco-picco è infatti stata variare da 0.5V a 5.0V con step di 0.5V. Successivamente, con l'oscilloscopio, si sono misurati i valori di tensione picco-picco in ingresso, V_{PP_i} , e in uscita, V_{PP_o} .

Per ridurre l'effetto dei disturbi e del rumore sulle misure, i segnali sono stati filtrati con un passabasso con frequenza di taglio di 20 MHz, poi sono stati mediati utilizzando 16 acquisizioni. Facendo così, il valore misurato dall'oscilloscopio risulta molto più stabile. Le misure sono riportate in tabella 1.4.

| V_{PP_i} [V] | V_{PP_o} [V] |
|----------------|----------------|
| 0.503 | 0.505 |
| 1.000 | 1.006 |
| 1.497 | 1.506 |
| 1.989 | 2.002 |
| 2.486 | 2.502 |
| 2.978 | 3.001 |
| 3.473 | 3.496 |
| 3.965 | 3.993 |
| 4.461 | 4.497 |
| 4.951 | 4.985 |

Tabella 1.4: Valori della tensione picco-picco in ingresso e in uscita al circuito.

I dati della tabella precedente sono stati elaborati su MATLAB per ricavare la retta di regressione che ci permette di stimare i valori di a e b . Nel grafico seguente, la figura 1.7, si riportano le misure, la retta interpolata e la retta teorica.

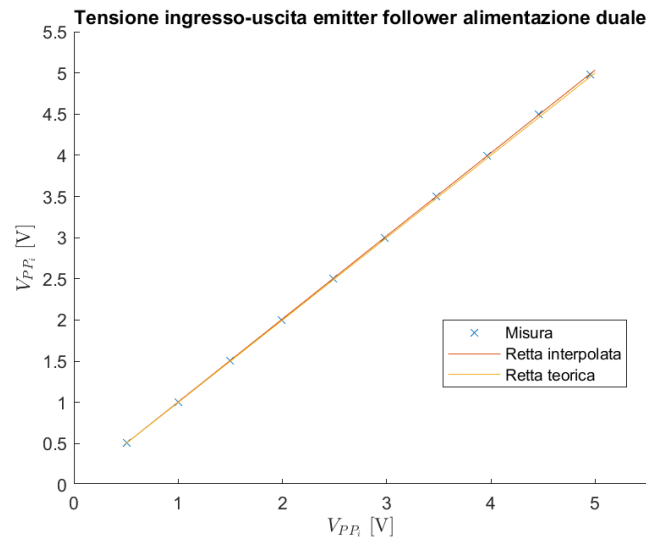


Figura 1.7: Confronto grafico fra la tensione ingresso-uscita interpolata e quella teorica.

L'equazione della retta interpolata è: $y = -0.0020949 + 1.0077x$. Il risultato è chiaramente in disaccordo con la teoria, perché sebbene il guadagno è molto prossimo all'unità, non può essere maggiore, perché questo significherebbe che il circuito eroga più energia rispetto a quella fornita in ingresso. Il

motivo di questo risultato anomalo può essere dovuto alla regolazione non sufficientemente precisa della capacità di compensazione della sonda collegata al secondo canale dell'oscilloscopio.

1.3 Seconda versione

1.3.1 Punto di lavoro

1.3.2 Analisi di piccolo segnale

1.3.3 Componenti, strumenti e misure

Circuito 2: Common Emitter Amplifier

2.1 Introduzione

2.2 Prima versione

2.2.1 Schema

2.2.2 Analisi del circuito

2.3 Seconda versione

2.3.1 Punto di lavoro

2.3.2 Analisi di piccolo segnale

2.3.3 Componenti, strumenti e misure

2.4 Terza versione

2.4.1 Punto di lavoro

2.4.2 Analisi di piccolo segnale

2.4.3 Componenti, strumenti e misure

Circuiti 3 e 4: Amplificatore operazionale $\mu\text{A}741$

3.1 Introduzione

3.2 Amplificatore invertente

3.2.1 Schema

3.2.2 Analisi del circuito

3.2.3 Componenti, strumenti e misure

3.3 Integratore

3.3.1 Schema

3.3.2 Analisi del circuito

3.3.3 Componenti, strumenti e misure