

Relazione Circuiti 1

Raffaelli Nicolò, Rossi Francesco, Varsi Alessandro

Marzo 2023

Abstract

In questa prima esperienza di Laboratorio II abbiamo imparato a lavorare con i circuiti **in maniera pratica**, attraverso **la breadboard**, e sostanzialmente verificato che tutte le conoscenze da noi acquisite in aula riflettessero la **realtà**.

Abbiamo cominciato praticamente da zero, in quanto in partenza non avevamo mai avuto a che fare con un apparato sperimentale di questo tipo.

Conoscendo solo due informazioni essenziali sulla breadboard, abbiamo dovuto mettere alla prova le nostre conoscenze teoriche già consolidate applicandole agli strumenti, in modo da capire come costruire ogni circuito utile alla finalizzazione dei nostri obiettivi.

L'esperienza si articola in tre parti, ognuna delle quali richiede la **costruzione di diversi circuiti** a seconda di quello che è necessario verificare, le quali in maniera sommaria richiedevano di:

1. Configurare opportunamente gli strumenti per effettuare misure di resistenze per poi verificare la **legge di Ohm** e il funzionamento di resistori in serie e parallelo
2. Costruire un **partitore resistivo** che rispetti certe condizioni
3. Caratterizzazione corrente-tensione di un dispositivo non lineare, cioè di un **diodo**

Per tutta la durata dell'esperimento abbiamo lavorato in regime di corrente continua.

Indice

1	Parte prima	2
1.1	Obiettivo	2
1.2	Metodo	2
1.3	Svolgimento e presa dati	3
1.4	Analisi dati	5
1.4.1	Resistenza interna dell'amperometro	5
1.4.2	Resistenza interna del voltmetro	6
1.4.3	Legge di Ohm	7
1.5	Conclusioni	9
1.5.1	Resistenze Interne	9
1.5.2	Legge di Ohm	9
2	Parte seconda	10
2.1	Obiettivo	10
2.2	Metodo	10
2.3	Svolgimento e presa dati	10
2.4	Analisi Dati	11
2.5	Conclusioni	12
3	Parte terza	13
3.1	Obiettivo	13
3.2	Metodo	13
3.3	Svolgimento e presa dati	13
3.4	Analisi dati	14
3.5	Conclusioni	16

1 Parte prima

1.1 Obiettivo

Verificare le Leggi di Ohm e valutare le **resistenze** interne della strumentazione.

1.2 Metodo

In laboratorio sono stati messi a disposizione due multimetri, uno palmare e uno da banco, in grado di misurare sia correnti che tensioni. Abbiamo scelto di utilizzare quello da banco come amperometro, perché le correnti in gioco in questo esperimento sono piccole e richiedono quindi uno strumento molto sensibile. Il multimetro palmare è stato anche utile per la misura diretta di resistenze.

Per la prima parte è stato necessario scegliere la configurazione più adatta alla misura di ogni resistenza interna, a seconda che fosse quella dell'amperometro o del voltmetro.

In generale, per entrambe le configurazioni del nostro circuito (composto solo da generatore di tensione e resistore), è necessario fare in modo che i nostri strumenti di misura non influenzino, con le loro resistenze interne, le nostre misurazioni.

Per farlo l'amperometro viene messo in serie mentre il voltmetro in parallelo, entrambi rispetto alla nostra unica resistenza. In seguito, a seconda della resistenza di carico, la configurazione generale presenta delle differenze e abbiamo così due diverse configurazioni.

I motivi della posizione sono rispettivamente che l'amperometro ha una bassa resistenza interna, per cui averlo in serie alla resistenza permettere di misurare la corrente effettiva passante per il circuito, mentre il voltmetro che ha un'alta resistenza interna, messo ai capi del resistore misura proprio la sua caduta di potenziale.

Per tutti i calcoli sono state utilizzate le formule per la conversione di diverse resistenze in una resistenza equivalente:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (\text{Parallelo})$$

$$R_{eq} = R_1 + R_2 \quad (\text{Serie})$$

1. Per misurare la **resistenza interna dell'amperometro**, sapendo che è dell'ordine degli Ohm, abbiamo scelto la configurazione **II** utilizzando una resistenza di carico simile a quella dell'amperometro, così che il voltmetro misuri la caduta di potenziale dovuta sia alla resistenza di carico che a quella dell'amperometro.

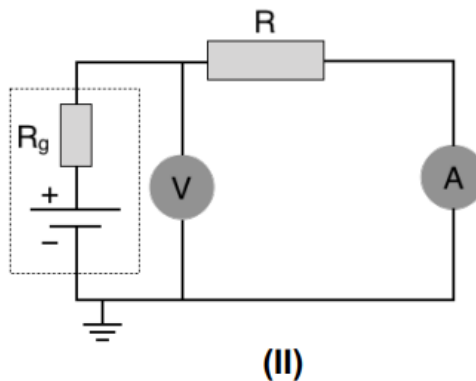


Figura 1: Configurazione II

2. Per misurare invece la **resistenza interna del voltmetro**, (supposta essere intorno ai 10 MOhm), abbiamo scelto la configurazione **I** utilizzando una resistenza di carico dello stesso ordine dello strumento, in modo che l'amperometro misuri la corrente modificata rispetto a quella generata dal generatore di corrente a causa delle due resistenze (carico e voltmetro) in parallelo.

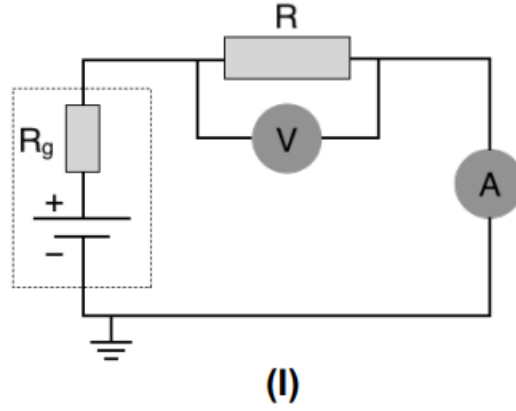


Figura 2: Configurazione I

- Una volta verificate e misurate le resistenze interne dei due strumenti dobbiamo verificare la validità delle leggi di Ohm. Per farlo abbiamo utilizzato la configurazione II, costruendo la resistenza sia in serie che in parallelo dell'ordine delle centinaia di Ohm, e facendo variare la tensione in un range di 8-17 V.

1.3 Svolgimento e presa dati

- Cominciando con la misurazione della resistenza interna dell'amperometro abbiamo utilizzato una resistenza di carico pari a 33Ω scegliendola così dello stesso ordine, con un errore associato del 5% (fornito dal costruttore). Effettuate $N = 10$ misure tensione/corrente, facendo variare la tensione, ed effettuati i calcoli risulta $R_A = 200 \Omega$, troppo grande per le previsioni.

Questo risultato ci ha fatto sospettare che ci fosse qualche tipo di problema, e infatti scopriamo dal manuale fornito dal costruttore che l'amperometro che stavamo utilizzando ha una resistenza interna variabile a seconda delle correnti che lo attraversano. Le correnti utilizzate da noi erano troppo piccole (ordine dei μA).

Dunque per migliorare il risultato abbiamo costruito una resistenza di carico minore, in particolare pari a 11Ω , mettendo in parallelo 3 resistenze da 33Ω e abbiamo utilizzato tensioni più alte. I dati raccolti sono riportati nella seguente tabella:

Corrente (mA)	Tensione (V)	σ_I	σ_V
22.02	0.30	0.15	0.01
29.35	0.40	0.12	0.01
36.72	0.50	0.14	0.01
44.07	0.60	0.13	0.01
51.52	0.70	0.13	0.01
58.86	0.80	0.16	0.01
66.27	0.90	0.12	0.01
73.73	1.00	0.12	0.01
81.12	1.10	0.13	0.01
88.49	1.11	0.14	0.01

Tabella 1: Resistenza interna dell'amperometro

Il valore della corrente ed il relativo errore sono stati ottenuti nel seguente modo: i valori letti dall'amperometro oscillavano in un range di circa 0.3 mA, quindi abbiamo registrato l'estremo inferiore e quello superiore di questo intervallo, prendendo come valore della corrente il punto medio e come errore la semiampiezza, in modo tale che avesse senso la scrittura, per esempio, (22.02 ± 0.15) mA.

2. Passando alla misurazione della resistenza interna del voltmetro, dopo aver cambiato la configurazione sulla breadbord, abbiamo utilizzato una resistenza di carico pari a $(0.89 \pm 0.01) M\Omega$, così che fosse dello stesso ordine del voltmetro. Abbiamo effettuato quindi 10 misurazioni tensione/corrente, sempre facendo variare le tensioni, ottenendo i seguenti risultati:

Corrente (μA)	Tensione (V)	σ_I	σ_V
0.238	0.198	0.013	0.001
0.360	0.298	0.013	0.001
0.480	0.398	0.01	0.001
0.600	0.498	0.009	0.001
0.720	0.598	0.011	0.001
0.842	0.698	0.012	0.001
0.962	0.798	0.01	0.001
1.083	0.898	0.01	0.001
1.203	0.998	0.009	0.001

Tabella 2: Resistenza interna del voltmetro

3. Per passare alla verifica della legge di Ohm abbiamo modificato la posizione del voltmetro in modo da ottenere nuovamente la configurazione II e abbiamo verificato che differenza di potenziale e corrente fossero direttamente proporzionali. Per farlo è stato necessario interpolare i dati con una funzione lineare e verificarne la compatibilità del modello tramite un test del chi-quadro. I dati raccolti sono riportati di seguito, mentre l'analisi del fit è rimandata al paragrafo successivo.

Corrente (μA)	Tensione (V)	σ_I	σ_V
14.02	8.02	0.11	0.01
15.78	9.00	0.12	0.01
17.53	10.03	0.13	0.01
19.28	11.03	0.10	0.01
21.03	12.03	0.16	0.01
22.79	13.04	0.14	0.01
24.54	14.04	0.11	0.01
26.30	15.04	0.09	0.01
28.05	16.05	0.11	0.01
29.80	17.05	0.10	0.01

Tabella 3: Legge di Ohm

Con la stessa configurazione, abbiamo poi verificato la dipendenza lineare tra tensione e corrente prevista dalla legge di Ohm considerando sistemi più complessi di resistenze in parallelo e serie. Facendo attenzione di lavorare con resistenze piccole rispetto a quella del voltmetro e grandi rispetto a quella dell'amperometro, abbiamo scelto una resistenza di $R = 570 k\Omega$ mettendola in serie e in parallelo rispettivamente con $R_S = 150 k\Omega$ e $R_P = 700 k\Omega$ verificando ancora la correttezza del modello, in particolare le relazioni tra resistenza equivalente e singole resistenze all'interno di un circuito (tutte le resistenze sono affette da un errore percentuale di 5 punti percentuali, dati del costruttore).

Corrente (μA)	Tensione (V)	σ_I	σ_V
25.71	8.02	0.10	0.01
28.92	9.02	0.12	0.01
32.13	10.03	0.09	0.01
35.34	11.03	0.11	0.01
38.55	12.03	0.11	0.01
41.76	13.04	0.09	0.01
44.97	14.04	0.12	0.01
48.18	15.04	0.13	0.01
51.39	16.05	0.14	0.01
54.59	17.05	0.11	0.01

Tabella 4: Verifica delle legge di Ohm per due resistenze in parallelo

Corrente (μA)	Tensione (V)	σ_I	σ_V
11.13	8.02	0.11	0.01
12.52	9.02	0.09	0.01
13.91	10.03	0.10	0.01
15.03	11.03	0.12	0.01
16.69	12.03	0.11	0.01
18.08	13.04	0.13	0.01
19.47	14.04	0.11	0.01
20.86	15.04	0.09	0.01
22.26	16.05	0.14	0.01
23.65	17.05	0.11	0.01

Tabella 5: Verifica delle legge di Ohm per due resistenze in serie

1.4 Analisi dati

Per la misura delle tensioni, la probabilità che la grandezza assuma un qualsiasi valore interno al range identificato dalla sensibilità dello strumento ($10mV$) è uguale per ogni valore: la distribuzione più sensata da associare alla grandezza è la distribuzione uniforme. Per poter effettuare il test del chi-quadro è stato necessario associare ai dati un errore pari alla deviazione standard della distribuzione uniforme $\frac{b-a}{\sqrt{12}}$ e trattarli come distribuiti secondo una pdf gaussiana. Le stesse scelte sono state fatte per tutte le parti dell'esperimento e la spiegazione non verrà ripetuta ogni volta.

1.4.1 Resistenza interna dell'amperometro

Le differenze di potenziale e le correnti misurate dai nostri strumenti corrispondono a quelle di un circuito con una resistenza equivalente data dalla serie tra la nostra resistenza di carico R_L e quella interna dell'amperometro R_A . Indicata con R_M tale resistenza equivalente (quella misurata), per ricavare il nostro componente incognito usiamo la formula

$$R_A = R_M - R_L \quad (1)$$

Il valore della resistenza equivalente è stato ottenuto dai dati sperimentali di tensione e corrente tramite un'interpolazione con la funzione $V = aI + b$. Data la legge di Ohm $V = RI$, la resistenza equivalente verrà individuata dal parametro libero a , mentre ci si aspetta che b sia pari a zero, entro i limiti statistici delle misure. Il risultato del fit è mostrato nel seguente grafico:

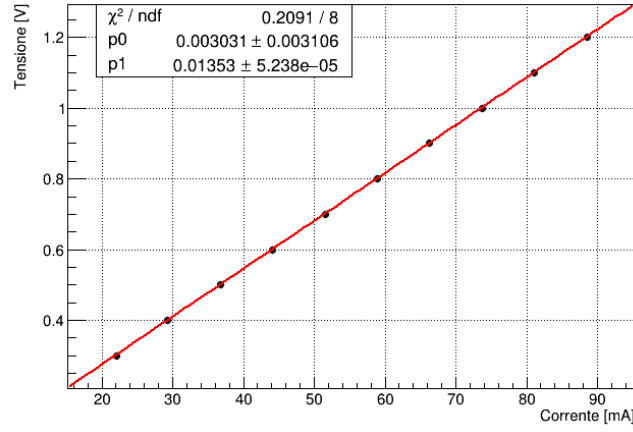


Figura 3: Interpolazione Resistenza Interna Amperometro

ROOT ha fornito un valore per la resistenza misurata pari a $R_M = (13.52 \pm 0.05) \Omega$. Usando l'equazione (1) si ottiene una stima per la resistenza interna dell'amperometro

$$\langle R_A \rangle = 13.52 - 11 = 2.52 \Omega$$

Con un errore associato

$$\sigma_{R_A} = \sqrt{\sigma_{R_M}^2 + (5\%R_L)^2} = 0.55$$

Il valore definitivo della resistenza interna dell'amperometro diventa quindi:

$$R_A = (2.5 \pm 0.6) \Omega$$

Un'ulteriore e ultima verifica è stata fatta attraverso il T-test per l'intercetta che deve passare dall'origine:

$$\frac{P_0}{\sigma} = 0,967 < 1$$

1.4.2 Resistenza interna del voltmetro

I passaggi sono stati molto simili, solo che in questo caso resistenza di carico e componente incognito si trovano in parallelo, quindi la formula è la seguente:

$$R_V = \frac{R_M R_L}{R_M - R_L} \quad (2)$$

I dati sono stati fittati ancora con la retta $V = aI + b$ in modo tale che R_M corrisponda al parametro libero a .

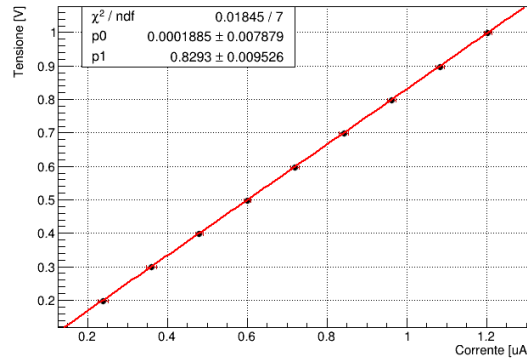


Figura 4: Interpolazione Resistenza Interna Voltmetro

Come si evince dal box in alto a sinistra $R_M = (0.829 \pm 0.001) M\Omega$. Usando l'equazione (2) si ottiene una stima per la resistenza interna dell'amperometro

$$\langle R_V \rangle = \frac{0.829 \times 0.89}{0.89 - 0.829} = 12.161 M\Omega$$

Con un errore associato:

$$\begin{aligned} \sigma_{R_V}^2 &= \frac{\partial R_V^2}{\partial R_M} \sigma_{R_M}^2 + \frac{\partial R_V^2}{\partial R_L} \sigma_{R_L}^2 = \\ &= \frac{(R_L + 1)^2}{(R_L - R_M)^4} \sigma_{R_M}^2 + \frac{(R_L - 1)^2}{(R_L - R_M)^4} \sigma_{R_L}^2 = \\ &= \frac{(R_L + 1)^2 \sigma_{R_M}^2 + (R_M^2 - 1)(\sigma_{R_L}^2)}{R_L^4 - R_M^4} = 0.345 M\Omega \end{aligned}$$

Il valore definitivo della resistenza interna del voltmetro è quindi:

$$R_V = (12.1 \pm 0.3) M\Omega$$

Analogamente a quanto fatto prima verifichiamo con il T-test l'intercetta:

$$T - test : \frac{b}{\sigma_b} = 0.0238 < 1$$

1.4.3 Legge di Ohm

Utilizzando la configurazione II abbiamo preso i dati e interpolato con la funzione $V = aI + b$.

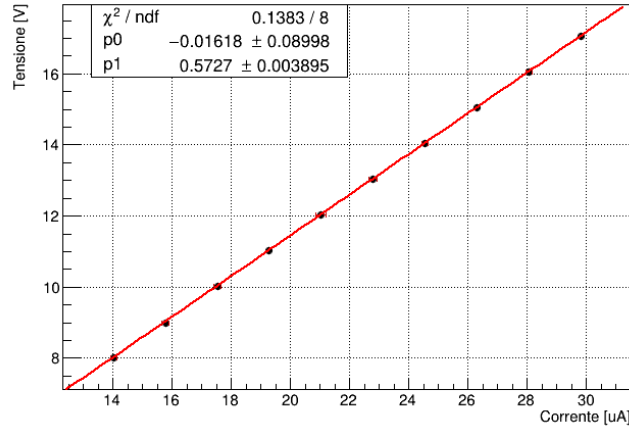


Figura 5: Interpolazione Legge di Ohm

In questo caso il coefficiente angolare della retta è la resistenza cercata. Risulta quindi

$$b = R = (573 \pm 4) k\Omega$$

Verifichiamo inoltre che la retta passi per l'origine:

$$\frac{b}{\sigma_b} = 0.179 < 1$$

Successivamente abbiamo applicato Ohm a sistemi più complessi, in ordine prima mettendo due resistenze in parallelo e poi in serie. Le funzioni con le quali abbiamo interpolato sono le stesse utilizzate per il fit precedente dove il *parametro* b è proprio la resistenza equivalente. In questo caso, a differenza del precedente, era stato misurato in partenza questo parametro quindi si tratta di una verifica della legge di Ohm.

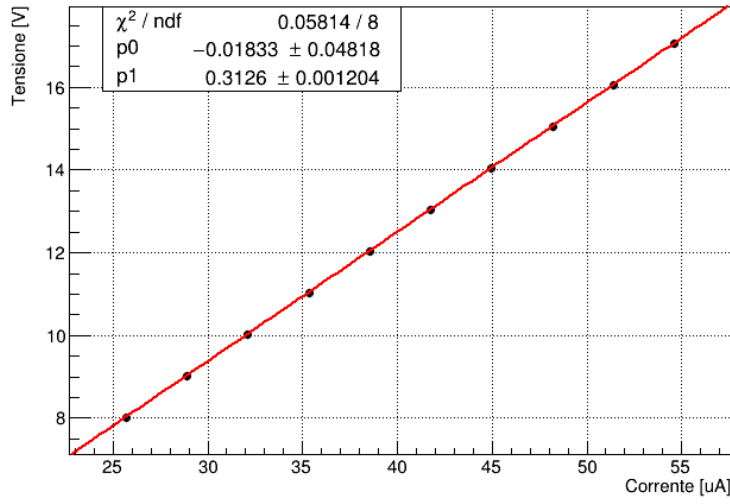


Figura 6: Interpolazione Legge di Ohm con resistenze in parallelo

$$b = R_{eq} = (312.6 \pm 1.2) k\Omega$$

Verichiamo inoltre che la retta passi per l'origine:

$$\frac{b}{\sigma_b} = 0.458 < 1$$

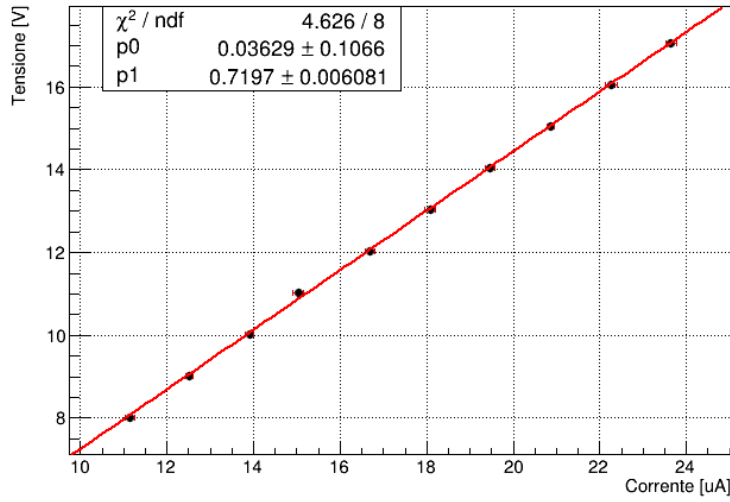


Figura 7: Interpolazione Legge di Ohm con resistenze in serie

$$b = R_{eq} = (719 \pm 6) k\Omega$$

Verichiamo inoltre che la retta passi per l'origine:

$$\frac{b}{\sigma_b} = 0.339 < 1$$

1.5 Conclusioni

1.5.1 Resistenze Interne

Attraverso questa analisi dati abbiamo avuto la conferma che le configurazioni da noi scelte per i analizzare le resistenze interne dei nostri strumenti di misura fossero corrette in quanto i valori ottenuti rispecchiano quelli calcolati in aula. Gli strumenti di misurazione sono quindi messi in maniera tale da influenzare il meno possibile i valori misurati.

1.5.2 Legge di Ohm

L'analisi mostra come l'ipotesi che sta alla base della Legge di Ohm sia consistente con i dati osservati: vi è effettivamente una dipendenza lineare tra i valori di caduta di potenziale ai capi di un conduttore e la corrente che scorre attraverso.

Inoltre è stato possibile anche dimostrare che questa stessa dipendenza si riscontra efficacemente in sistemi più complessi; non solo: questa dipendenza ha intercetta nulla e coefficiente angolare proprio della resistenza stimata dal costruttore. Dato le nostre resistenze teoriche equivalenti in parallelo e serie erano rispettivamente $314.17\text{ k}\Omega$ e $720\text{ k}\Omega$ possiamo concludere che anche le leggi di composizione sulle resistenze equivalenti siano corrette.

2 Parte seconda

2.1 Obiettivo

In questa seconda parte abbiamo analizzato il cosiddetto Partitore Resistivo, un circuito le cui componenti fondamentali sono due resistori in serie, che abbiamo dovuto scegliere in maniera tale da ottenere una corrente in uscita che sia circa la metà di quella in entrata. In particolare si ottiene l'effetto di dimezzare la tensione ai capi di una resistenza di carico messa in parallelo alla seconda resistenza, la qualcosa ha una rilevanza pratica nelle strumentazioni elettroniche di tutti i giorni.

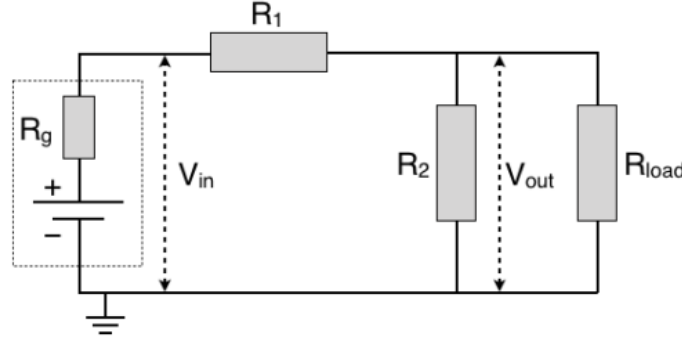


Figura 8: Configurazione Partizione Resistivo

2.2 Metodo

Effettuando i calcoli a mano, utilizzando la legge delle maglie e trascurando la resistenza di carico, abbiamo calcolato che affinché la corrente in uscita sia circa metà di quella in entrata è necessario che $R_1 \simeq R_2$. Si rimanda la dimostrazione al paragrafo sull'analisi dei dati.

Dunque abbiamo preso 3 coppie di resistenze differenti nell'ordine delle centinaia, decine di migliaia e centinaia di migliaia di Ohm, e verificato che al variare della tensione la corrente misurata in uscita fosse sempre circa la metà di quella entrata. I valori delle resistenze sono stati misurati da noi con il voltmetro e come errore abbiamo preso l'incertezza dello strumento.

2.3 Svolgimento e presa dati

Una volta configurata la breadboard mettendo a turno le due resistenze accoppiate in serie, abbiamo fatto variare la tensione in un range di 0,1-1 V per ogni coppia di resistori e verificato che effettivamente la nostra scelta di prendere i resistori uguali tra loro dava come risultato la V_{out} attesa.

1. $R_{1misurata} = 667 \text{ k}\Omega$

V_{in}	0.100	0.200	0.300	0.400	0.500	0.600	0.700	0.800	0.900	1.000
V_{out}	0.049	0.099	0.150	0.200	0.250	0.300	0.351	0.401	0.451	0.502

Tabella 6: Tensioni in entrata e tensioni in uscita per R_1

2. $R_{2misurata} = 676 \Omega$

V_{in}	0.100	0.200	0.300	0.400	0.500	0.600	0.700	0.800	0.900	1.000
V_{out}	0.049	0.099	0.150	0.199	0.249	0.299	0.350	0.399	0.449	0.500

Tabella 7: Tensioni in entrata e tensioni in uscita per R_2

3. $R_{3misurata} = 21.6 k\Omega$

V_{in}	0.100	0.200	0.300	0.400	0.500	0.600	0.700	0.800	0.900	1.000
V_{out}	0.049	0.099	0.149	0.199	0.249	0.298	0.349	0.398	0.448	0.499

Tabella 8: Tensioni in entrata e tensioni in uscita per R_3

2.4 Analisi Dati

Riportiamo qui di seguito i calcoli eseguiti per la scelta corretta dei resistori in serie al fine di avere la corrente in uscita circa la metà di quella in entrata; in quanto i dati risultino molto simili l'analisi è stata fatta solo sulla terza coppia di resistori e i valori di entrata e uscita delle tensioni:

$$V_i = V_{R_1} + V_{R_2}$$

$$V_i - (R_1 + R_2)I = 0 \rightarrow I = \frac{V_i}{R_1 + R_2}$$

$$V_{R_2} = R_2 I = \frac{V_i}{R_1 + R_2} R_2$$

$$V_{R_2} = V_{out} = \frac{1}{2} V_{in} \rightarrow \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 0.5$$

Ottenendo così:

$$R_1 = R_2$$

Per analizzare i dati abbiamo deciso di fare un fit tra le tensioni in entrata e uscita e verificare che la dipendenza lineare sia a $P_1 = 2$ e intercetta nulla; in quanto i dati risultino molto simili l'analisi è stata fatta solo sulla terza coppia di resistori e i valori di entrata e uscita delle tensioni. Per quanto riguarda invece l'errore associato alle tensioni, è stata presa la sensibilità dello strumento e applicato il discorso presentato anche nella parte prima.

Coefficiente di dipendenza tra V_{in} e V_{out} fornitoci da ROOT $P_1 = 2.003 \pm 0.005$

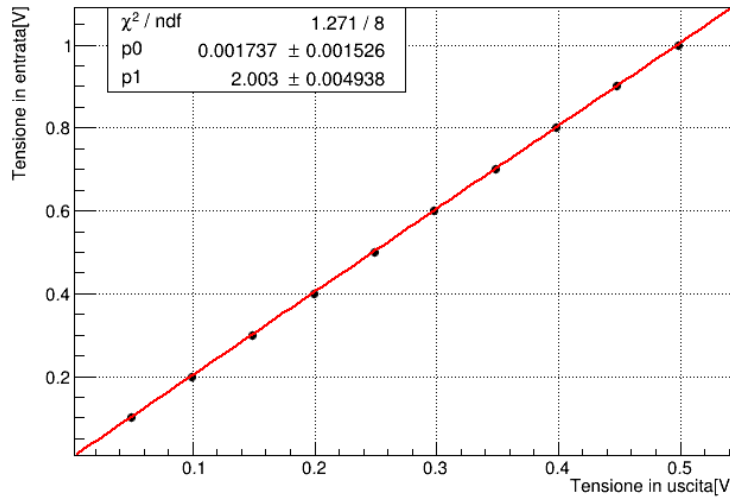


Figura 9: Interpolazione Tensioni in entrata e uscita con Partitore Resistivo

In ordine, i T-test per i valori del coefficiente angolare della retta aspettato e l'intercetta:

$$\frac{P_1 - 2}{\sigma} = 0,6 < 1$$

$$\frac{P_0}{\sigma} = 1,06 < 2$$

2.5 Conclusioni

Visti i risultati riteniamo quindi di aver ben dimostrato la nostra ipotesi per cui è possibile dimezzare i valori delle tensioni prodotti da un qualunque generatore, attraverso la scelta di porre due resistori in serie che abbiano valori di resistenza circa uguali.

3 Parte terza

3.1 Obiettivo

In questa terza e ultima parte abbiamo inserito una nuova componente dal comportamento non lineare, un conduttore di corrente chiamato **diodo**. Tramite presa dati di tensione e corrente dovevamo verificare che questo resistore, che nel circuito viene sostituito alla resistenza usata finora, rispetti la previsione della Legge di Shockley:

$$I = I_0(e^{qV/gkT} - 1) \quad (3)$$

3.2 Metodo

La nuova difficoltà relativa alla nuova componente è il suo **comportamento non lineare** e la conseguente necessità di usare entrambe le configurazioni per prendere i dati. Il dispositivo infatti a basse tensioni, in un range da 0,1 a 0,6 A, presenta una resistenza molto alta e non lascia passare corrente, mentre superata una certa **tensione di soglia** (tra 0,7 e 0,8 A) permette alla corrente di passare in maniera esponenziale.

L'idea per fare una **presa dati efficace** per questo tipo di comportamento è quella di utilizzare la configurazione più adatta **a seconda del comportamento del diodo**, cioè se sta lavorando come una resistenza alta o bassa.

Per resistenze di carico basse, nel momento che il diodo permette alla corrente di passare (lavora cioè come una resistenza di carico molto bassa), abbiamo utilizzato la configurazione II mentre per le resistenze di carico alte, che corrispondono al mancato passaggio di corrente a causa del diodo (lavora cioè come una resistenza molto alta), utilizziamo la configurazione I.

3.3 Svolgimento e presa dati

Durante il primo pomeriggio in laboratorio abbiamo effettuato la presa dati come spiegato sopra, e nel visionare i dati della corrente ci siamo resi conto che ci fosse qualcosa di profondamente sbagliato nel circuito in quanto la corrente superava i 10 mA solo per tensioni superiori a 0.87 V, quindi un risultato molto differente da quello previsto dalla documentazione fornitaci.

Il giorno seguente quindi abbiamo riprovato con lo stesso diodo ed effettivamente il problema persisteva, nonostante la configurazione da noi scelta fosse quella corretta. Abbiamo poi scoperto che il diodo che stavamo usando era difettoso, per cui una volta sostituito è cominciata la presa dati efficace.

Tensione (V)	Corrente (μA)	σ_V	σ_I	Tensione (V)	Corrente (μA)	σ_V	σ_I
0.5	0.041	0.01	0.012	0.77	48.023	0.01	0.014
0.55	0.137	0.01	0.013	0.78	77.553	0.01	0.011
0.58	0.336	0.01	0.009	0.79	98.723	0.01	0.010
0.6	0.587	0.01	0.008	0.8	157.58	0.01	0.009
0.63	1.403	0.01	0.009	0.81	190.45	0.01	0.008
0.65	2.252	0.01	0.011	0.82	223.51	0.01	0.007
0.66	3.484	0.01	0.009	0.83	300.04	0.01	0.009
0.68	5.224	0.01	0.013	0.84	350.32	0.01	0.008
0.7	9.032	0.01	0.011	0.85	430.65	0.01	0.012
0.71	10.528	0.01	0.012	0.86	520.5	0.01	0.011
0.72	14.08	0.01	0.008	0.87	623.34	0.01	0.011
0.73	20.721	0.01	0.009	0.88	740.78	0.01	0.012
0.75	33.601	0.01	0.007	0.89	824.46	0.01	0.009
0.76	42.081	0.01	0.007				

Tabella 9: presa dati diodo

3.4 Analisi dati

Nel range di conduzione la caratteristica del diodo può essere approssimata con una retta con forte pendenza e il valore della tensione di soglia V_γ risulta essere l'intercetta con l'asse x . Di seguito si riporta il risultato del fit e la stima per V_γ . La funzione interpolante è del tipo $I = aV + b$.

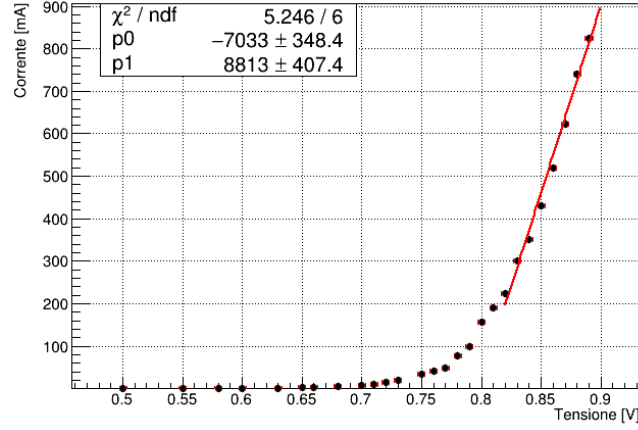


Figura 10: Fit lineare per ricercare V_γ

$$V_\gamma = -\frac{b}{a} = \frac{7033}{8813} = 0.798 \text{ V}$$

La propagazione degli errori deve tenere conto anche della covarianza, dato che i parametri a e b sono correlati.

$$\sigma_V^2 = \frac{1}{a^4}(b^2\sigma_a^2 - 2ab\sigma_{ab}^2 + a^2\sigma_b^2) = 0.008$$

La tensione di soglia viene quindi

$$V_\gamma = (0.80 \pm 0.09) \text{ V}$$

Abbiamo proseguito tentando un fit con la Legge di Shockley (3) per ottenere una stima di I_0 e g , utilizzando la seguente funzione interpolante:

$$I = I_0(e^{\frac{cV}{g}} - 1)$$

con $c = \frac{q}{kT} = 38.6 \text{ V}^{-1}$. Il grafico è riportato di seguito:

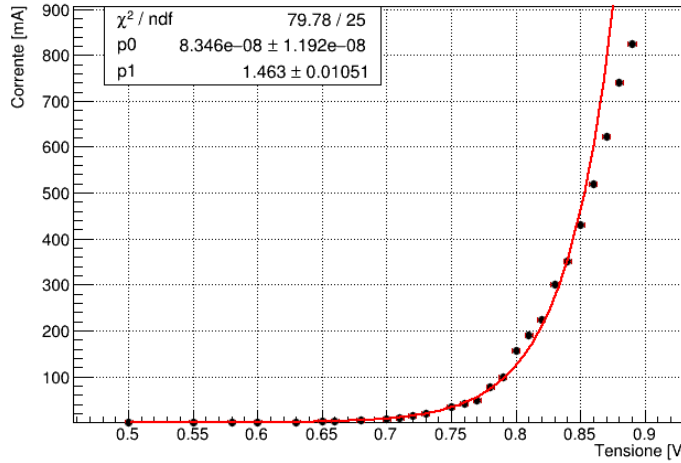


Figura 11: Fit totale del diodo

I valori dei parametri liberi trovati da *ROOT* sono:

$$g = 1.46 \pm 0.01$$

$$I_0 = (80 \pm 10) \text{ nA}$$

Il risultato non è assolutamente soddisfacente, dato che risulta

$$\chi^2_{rid} = \frac{79.78}{25} = 3.19$$

Abbiamo deciso di fare un ulteriore tentativo dividendo l'interpolazione in due, prima nell'intervallo che precede la regione di conduzione e poi in quello con $V > V_\gamma$.

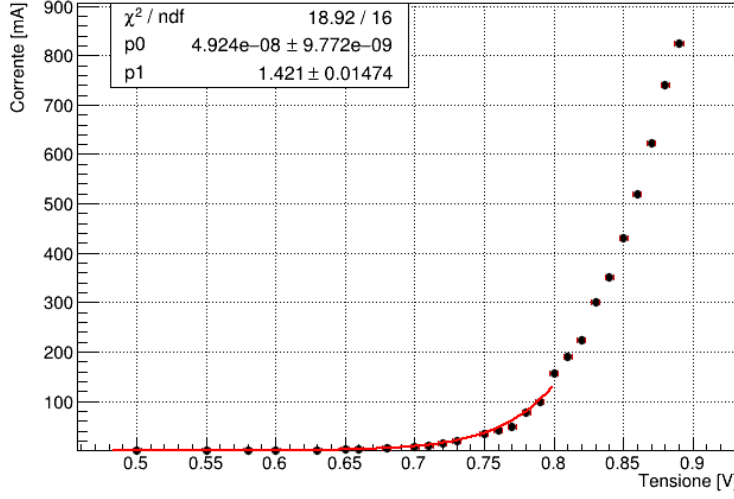


Figura 12: Comprtamento del diodo per $V < V_\gamma$

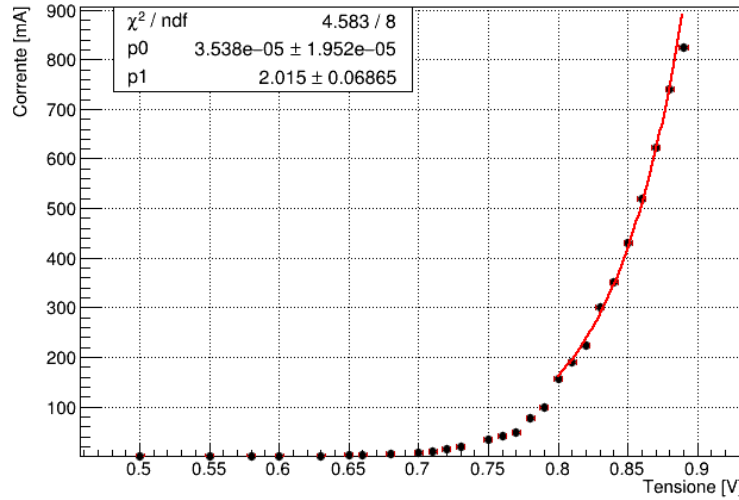


Figura 13: Comportamento del diodo per $V > V_\gamma$

3.5 Conclusioni

Il fit che descrive il diodo seguendo la funzione esponenziale non è accettabile, come mostra il valore del χ^2_{rid} .

Separando l'interpolazione in due parti, invece, si osserva che il modello ha un buon livello di compatibilità con i dati in entrambi gli intervalli, ma i fit forniscono valori molto differenti per i parametri liberi.

In prima battuta abbiamo ipotizzato che il problema potesse essere un'erronea scelta della configurazione da usare per la presa dati. Tuttavia, durante l'esperienza abbiamo valutato la resistenza caratteristica del diodo punto per punto tramite

$$R = \frac{\Delta V}{\Delta I}$$

osservando che dai 0.6 V in poi questo valore scendeva sotto i $1000\ \Omega$ e quindi abbiamo scelto questo come istante in cui cambiare la configurazione. Il problema di apparente discontinuità tra i dati che si osserva intorno agli $0.79 - 0.80\text{ V}$, quindi, deve avere un'origine differente.

Dato che la discontinuità sembra coincidere con il valore V_γ , abbiamo attribuito questa anomalia al passaggio a regime di conduzione del diodo.