



Università degli studi di Milano-Bicocca

Facoltà di Fisica

Circuiti 1

Relazione di laboratorio

Gruppo T1_22

Lando Livio
Pievaioli Davide
Sandrelli Matteo

Marzo 2025

1 Introduzione

In questa esperienza di laboratorio abbiamo studiato diversi fenomeni elettrici attraverso la caratterizzazione di componenti circuitali fondamentali. L'obiettivo generale è stato quello di analizzare il comportamento di resistori e diodi, verificando le principali leggi che governano questi elementi e valutando gli effetti delle non idealità degli strumenti di misura sulle rilevazioni sperimentali.

La prima parte ha riguardato la caratterizzazione tensione-corrente di un resistore, verificando la validità della legge di Ohm per tre resistenze di diverso ordine di grandezza. Abbiamo analizzato le misure in due diverse configurazioni sperimentali per evidenziare l'impatto della resistenza interna degli strumenti e calcolare eventuali correzioni ai dati raccolti.

Successivamente, abbiamo realizzato un partitore resistivo, valutandone la capacità di mantenere una tensione costante su un carico variabile e analizzando l'influenza della resistenza di carico sulle prestazioni del circuito.

Il terzo esperimento ha riguardato la caratteristica tensione-corrente di un diodo, verificando la legge di Shockley e stimando parametri caratteristici del componente, come la costante del diodo e la corrente di saturazione inversa.

1.1 Strumentazione

Gli strumenti impiegati in questa esperienza sono:

- Breadboard per il montaggio dei circuiti,
- Alimentatore CC per fornire tensione variabile,
- Multimetro palmare per la misura di tensione,
- Amperometro,
- Cassetta di resistenze per variare i valori di resistenza nel circuito.

1.2 Stima delle incertezze

Nella misura della tensione e della corrente, l'incertezza strumentale viene determinata a partire dalle specifiche di accuratezza degli strumenti utilizzati, presenti nei rispettivi manuali. In questa sezione, riportiamo le formule per la stima delle incertezze associate alle misure di tensione e corrente.

1.2.1 Incertezza delle misure del multimetro palmare e da banco

Le misure di tensione e corrente sono state effettuate utilizzando due diversi multimetri: uno palmare per la misura delle tensioni e uno da banco per le correnti. L'incertezza associata a ciascuna misura è stata trattata come distribuzione uniforme e successivamente convertita in deviazione standard (incertezza di tipo B) assumendo una distribuzione gaussiana equivalente:

$$\sigma_{\text{gauss}} = \frac{b - a}{\sqrt{12}}$$

dove $a = V - \sigma$, $b = V + \sigma$ e σ è l'incertezza riportata nelle specifiche dello strumento.

Tensione (V) — multimetro palmare Sono stati utilizzati due diversi modelli per l'incertezza a seconda della stabilità della misura:

- **Parte 1: Caratteristica tensione-corrente di un resistore.** I valori oscillavano poco, quindi abbiamo utilizzato il modello preso dal manuale di strumentazione:

$$\sigma_V = 0.005 \cdot V + 2 \cdot 0.1 \text{ mV}$$

- **Parte 2: Partitore resistivo.** I valori oscillavano maggiormente, attorno alla seconda cifra decimale, quindi abbiamo considerato:

$$\sigma_V = 0.05 \cdot V + 2 \cdot 0.1 \text{ mV}$$

- **Parte 3: Caratteristica del diodo e legge di Shockley.** È stato mantenuto il primo modello (più conservativo) perché si è preferito non introdurre un ulteriore livello di incertezza:

$$\sigma_V = 0.005 \cdot V + 2 \cdot 0.1 \text{ mV}$$

Corrente (I) — multimetro da banco Anche in questo caso, sono stati utilizzati due diversi modelli:

- **Parte 1 e 2: Resistore e partitore.** Il multimetro da banco ha una risoluzione di 10 nA, e l'incertezza è stata modellata come:

$$\sigma_I = 0.0025 \cdot I + (15^2) \cdot 10 \text{ nA}$$

- **Parte 3: Diodo.** A causa di forti oscillazioni nei valori misurati di corrente, è stato utilizzato un modello più ampio:

$$\sigma_I = 0.09 \cdot I + (15^2) \cdot 10 \text{ nA}$$

Parte	Tipo di misura	Formula incertezza	Note
1	V (palmare)	$0.005 \cdot V + 2 \cdot 0.1 \text{ mV}$	Valori stabili
	I (banco)	$0.0025 \cdot I + 225 \text{ nA}$	Bassa fluttuazione
2	V (palmare)	$0.05 \cdot V + 2 \cdot 0.1 \text{ mV}$	Maggiori fluttuazioni
	I (banco)	$0.0025 \cdot I + 225 \text{ nA}$	Idem come sopra
3	V (palmare)	$0.005 \cdot V + 2 \cdot 0.1 \text{ mV}$	Modello conservativo
	I (banco)	$0.09 \cdot I + 225 \text{ nA}$	Molta instabilità

Table 1: Modelli di incertezza per le misure di tensione e corrente

Queste incertezze le abbiamo utilizzate per valutare la bontà dei fit e calcolare il valore dei χ^2 nella fase di analisi dati.

2 Caratteristica tensione-corrente di un resistore

2.1 Obiettivo

Scopo di questo esperimento era verificare la legge di Ohm, effettuando misure della caduta di potenziale ai capi di una resistenza e della corrente in un circuito elettrico, al variare di tre valori di resistenze e configurando tale circuito in due modi:

- **Configurazione 1:** L'amperometro è collegato in serie alla resistenza di carico R . In questa configurazione, il voltmetro misura la tensione ai capi della resistenza equivalente R_{eq} , che potrebbe differire dalla tensione sul singolo resistore.
- **Configurazione 2:** Il voltmetro è collegato in parallelo alla resistenza R . Di conseguenza, l'amperometro misura la corrente che attraversa il circuito, che potrebbe non essere esattamente uguale alla corrente che attraversa la resistenza R .

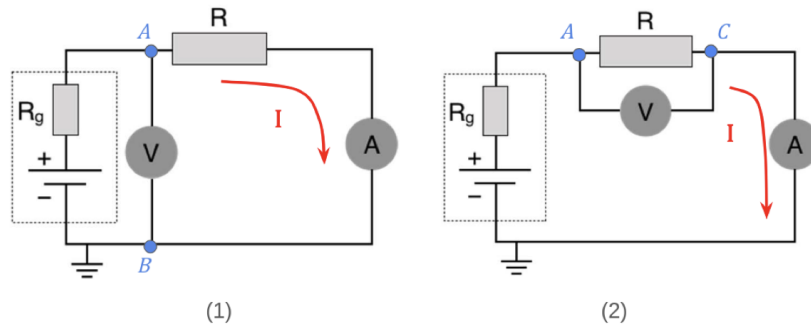


Figure 1: Configurazioni del circuito.

2.2 Configurazione 1

Abbiamo ricreato con la strumentazione in nostro possesso la prima configurazione e abbiamo interpolato i dati ottenuti secondo il seguente modello lineare (legge di Ohm):

$$V = R \cdot I + b \quad (1)$$

Abbiamo tenuto conto dei σ_V e dei σ_I della strumentazione, come scritto precedentemente. Come previsto, le misurazioni più accurate sono state ottenute quando il circuito includeva una resistenza più grande:

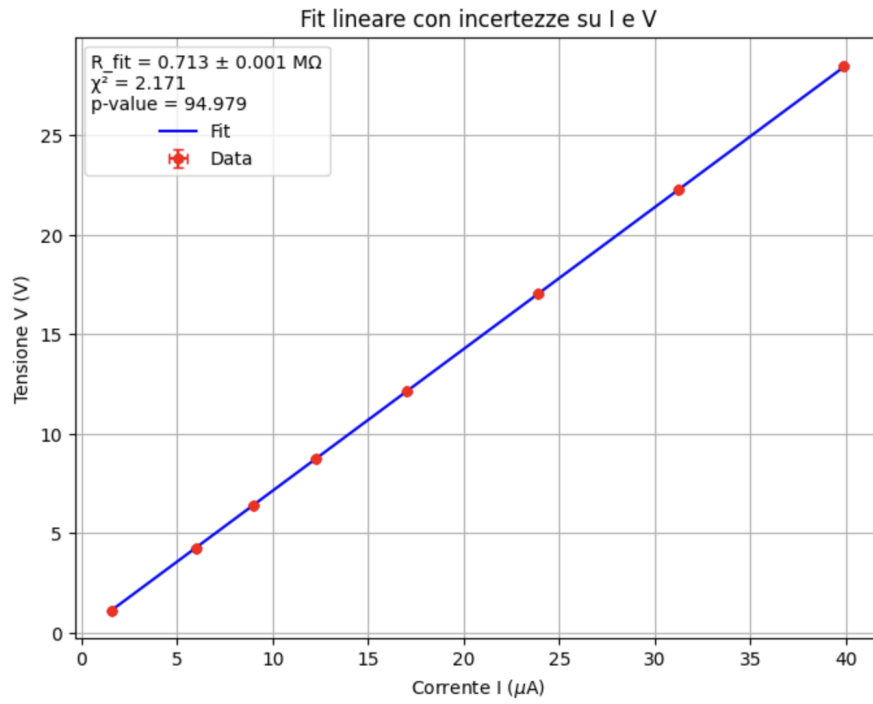


Figure 2: Grafico $V = RI$ con $R = 712000 \Omega$ con $\chi_{\text{red}}^2 = 2$ con p value associato del 95%.

Invece per R piccola questa volta abbiamo ottenuto un grafico dei residui non gaussiano che non oscillano attorno allo zero e un valore di $\chi_{\text{red}}^2 = 2.698$.

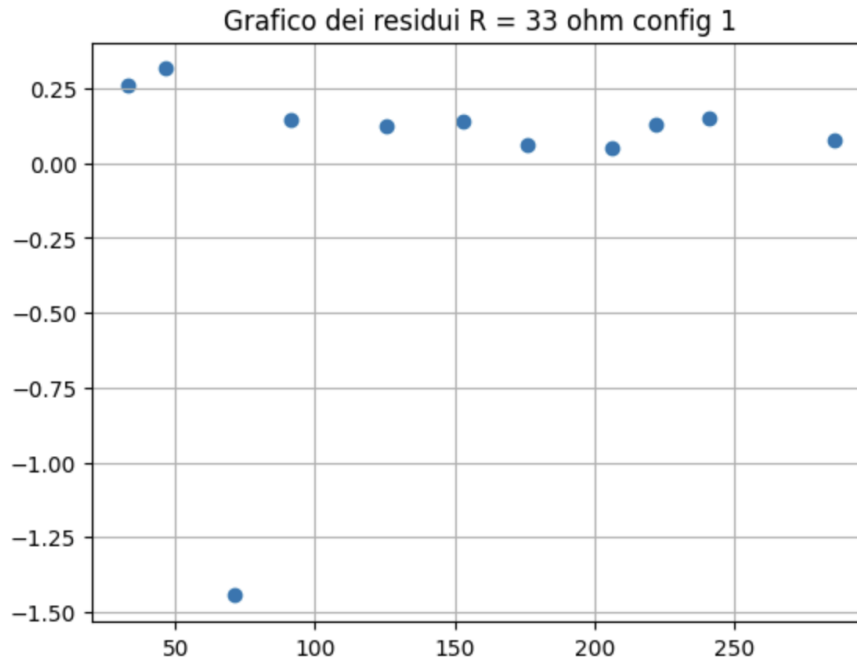


Figure 3: Grafico dei residui con R piccola [prima configurazione].

I risultati ottenuti per la prima configurazione sono i seguenti:

Resistenza	R (k Ω o M Ω)
$R_{\min} = 33 \Omega$	$(3.466 \pm 0.008) \times 10^{-2} \text{ k}\Omega$
$R_{\text{int}} = 3.3 \times 10^3 \Omega$	$(3.33634 \pm 0.02891) \text{ k}\Omega$
$R_{\max} = 7.12 \times 10^5 \Omega$	$(7.1517 \pm 0.0014) \times 10^{-1} \text{ M}\Omega$

Table 2: Risultati del fit per la Configurazione 1

2.3 Configurazione 2

In modo analogo abbiamo svolto l'esperimento per la seconda configurazione e abbiamo ottenuto i dati migliori per una resistenza di valore ridotto, pari a 33Ω :

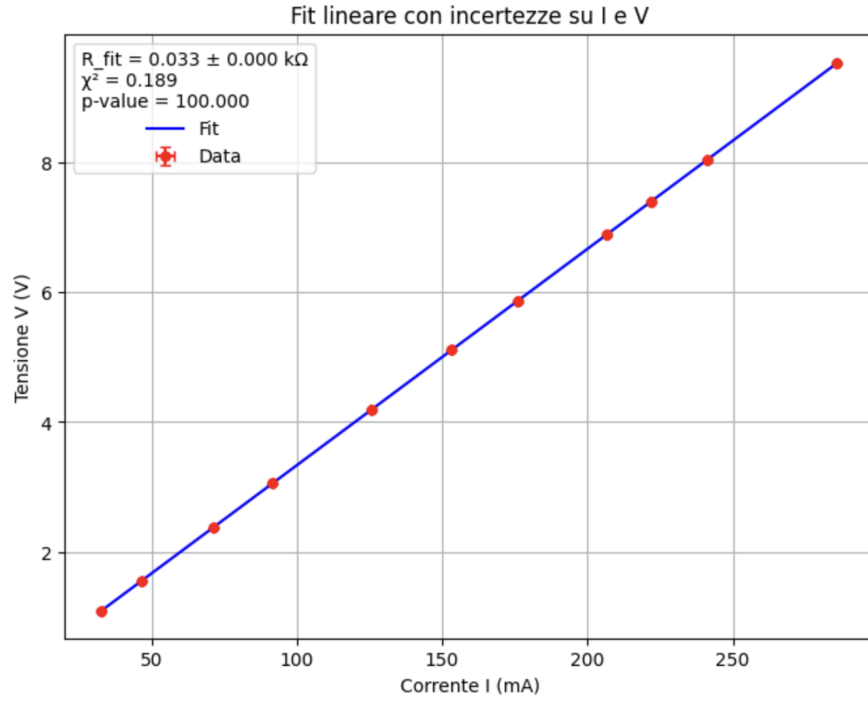


Figure 4: Grafico $V = RI$ con $R = 33 \Omega$ con $\chi^2_{\text{red}} = 0.19$ con p-value associato del 100%.

Invece, come si può osservare dalla Figura 5, 6, il fit lineare relativo al caso in cui è stata utilizzata una resistenza elevata ($R_{\max} = 712 \text{ k}\Omega$) restituisce un valore di resistenza inferiore a quello atteso. Questo risultato evidenzia l'influenza della resistenza parassita del voltmetro durante la raccolta dei dati.

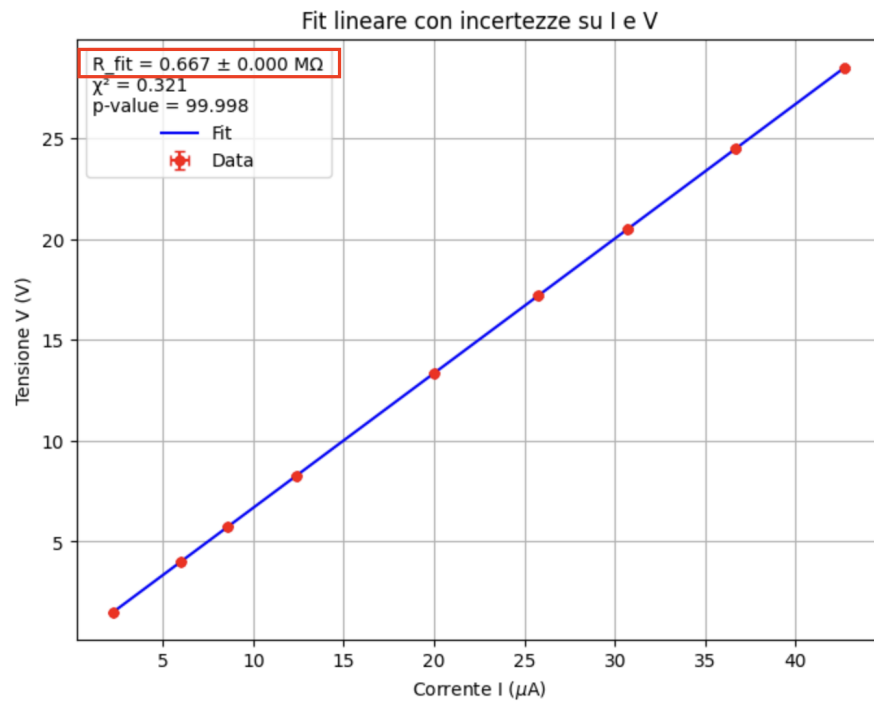


Figure 5: fit configurazione 2 con $R_{\max} = 712 \text{ k}\Omega$.

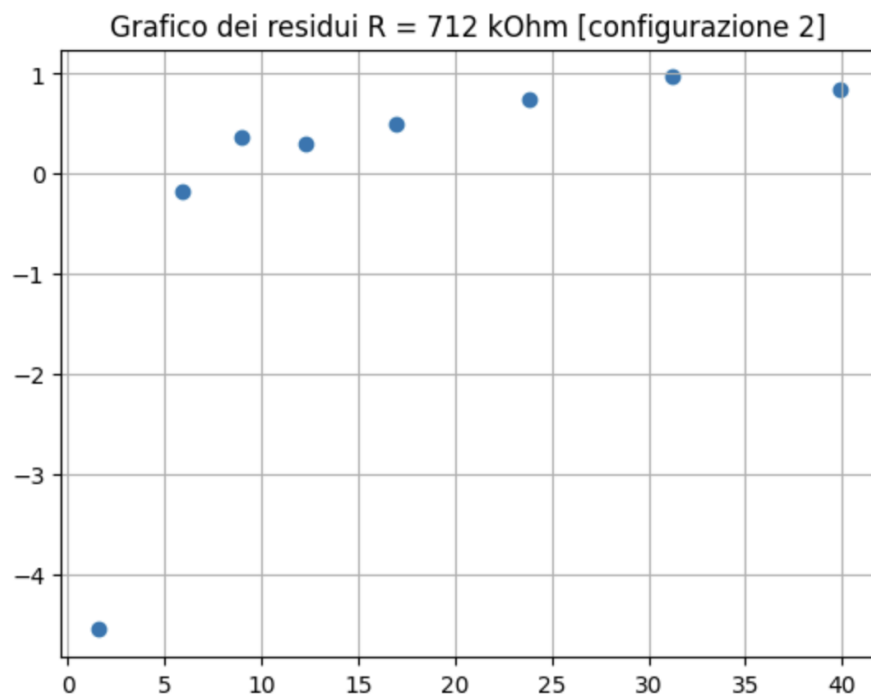


Figure 6: Residui con R grande [seconda configurazione].

Come si può notare dal grafico dei residui con R_{\max} per la seconda configurazione si ottiene un grafico con degli scarti che non oscillano attorno allo zero. I dati ottenuti per le varie configurazioni sono riassunti nella seguente tabella:

Resistenza	R (kΩ o MΩ)
$R_{\min} = 33 \Omega$	$(3.335 \pm 0.002) \times 10^{-2} \text{ k}\Omega$
$R_{\text{int}} = 3.3 \times 10^3 \Omega$	$3.3083 \pm 0.0146 \text{ k}\Omega$
$R_{\max} = 7.12 \times 10^5 \Omega$	$(6.6753 \pm 0.0057) \times 10^{-1} \text{ M}\Omega$

Table 3: Risultati del fit per la Configurazione 2

2.4 Resistenza interna dei multimetri (bias)

2.4.1 Calcolo della resistenza parassita dell'amperometro

Nella prima configurazione, utilizzando una resistenza più piccola R_{\min} , la resistenza interna dell'amperometro R_A può essere determinata considerando il circuito come una serie:

$$R_A + R_{\min} = R_{\text{eq}}, \quad (2)$$

da cui si ricava:

$$R_A = R_{\text{eq}} - R_{\min}. \quad (3)$$

Dai dati sperimentali, otteniamo:

$$R_A = (1.66 \pm 0.01) \Omega. \quad (4)$$

Per la stima delle incertezze sulle resistenze parassite, abbiamo considerato l'errore relativo:

$$\sigma_R = R \cdot 0.009 + 0.2 \Omega. \quad (5)$$

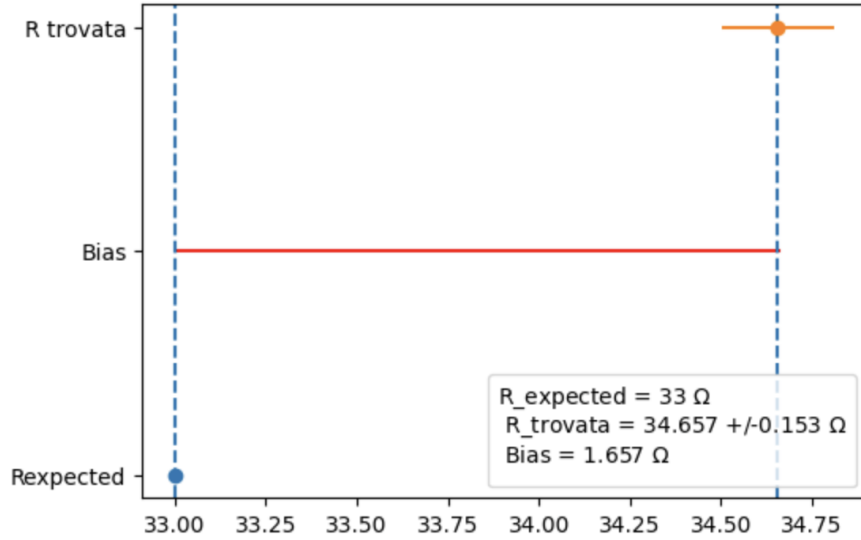


Figure 7: Grafico bias dato da R_{fit} trovata e R_{exp} a causa della resistenza parassita R_A .

2.4.2 Calcolo della resistenza parassita del voltmetro

Nella seconda configurazione, utilizzando una resistenza elevata R_{\max} , il voltmetro misura la tensione ai suoi capi, che non corrisponde esattamente alla caduta

di potenziale V_R sul resistore R . Per stimare la resistenza interna del voltmetro R_V , si utilizza la formula delle resistenze in parallelo:

$$\frac{1}{R_V} + \frac{1}{R_{\max}} = \frac{1}{R_{\text{eq}}}, \quad (6)$$

dove R_{eq} è la resistenza ottenuta dal fit dei dati sperimentali. Isolando R_V , si ottiene:

$$R_V = \frac{R_{\max} \cdot R_{\text{eq}}}{R_{\max} - R_{\text{eq}}}. \quad (7)$$

Sostituendo R_{\max} con la resistenza da noi selezionata e R_{eq} con il parametro fittato, abbiamo ottenuto:

$$R_V = (1.07 \pm 0.01) \times 10^7 \, \Omega. \quad (8)$$

2.5 Conclusioni

Dai risultati ottenuti nelle sezioni precedenti, possiamo affermare che le analisi effettuate sono in linea con le aspettative teoriche.

La prima configurazione ci ha permesso di stimare la resistenza dell'amperometro, con i risultati più precisi ottenuti utilizzando resistenze più elevate. Nella seconda configurazione, invece, abbiamo ottenuto i migliori risultati con resistenze di valore ridotto, il che ci ha consentito di valutare in modo più accurato la resistenza parassita del voltmetro in presenza di resistenze elevate.

In generale, i residui ottenuti sono stati contenuti e i valori del chi-quadro sono risultati piccoli, spesso inferiori a 1. Pertanto, possiamo considerare le nostre misure affidabili e coerenti con il modello teorico.

3 Partitore Resistivo

3.1 Obiettivo

Un *partitore resistivo* è un circuito elettrico utilizzato per ottenere una frazione della tensione di ingresso su un nodo di uscita.

L'obiettivo di questo esperimento era realizzare un circuito in grado di mantenere una tensione di uscita V_{out} costante su un componente resistivo di carico R_L , indipendentemente dal valore della sua resistenza.

A tal fine, il circuito doveva essere progettato in modo che:

- la tensione di uscita V_{out} fosse pari a $0.5 \cdot V_{\text{in}}$ in assenza di carico;
- la variazione della tensione su R_L fosse trascurabile al variare della sua resistenza.

Lo schema elettrico di riferimento è riportato in Figura 8.

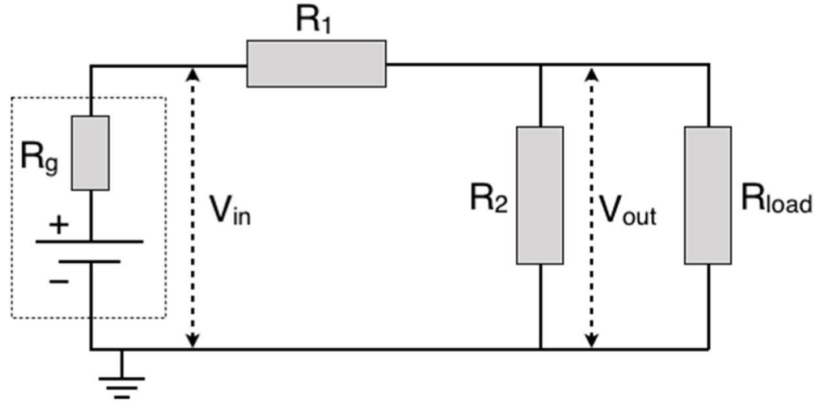


Figure 8: Schema del circuito partitore resistivo.

3.2 Svolgimento

Il partitore resistivo è stato realizzato utilizzando due resistenze R_1 e R_2 , dimensionate in modo tale che:

$$V_{\text{out}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{\text{in}}$$

Imponendo $R_1 = R_2$, la tensione di uscita ideale diventa:

$$V_{\text{out}} = \frac{1}{2} V_{\text{in}}$$

Tuttavia, l'aggiunta di un carico R_L modifica la tensione di uscita. Per minimizzare questo effetto, è necessario che:

$$R_L \gg R_1, R_2$$

Abbiamo quindi eseguito una serie di misurazioni della tensione di uscita V_{out} , variando la resistenza di carico R_{Load} nell'intervallo compreso tra $0\ \Omega$ e $10\ \text{k}\Omega$, al fine di determinare il valore soglia oltre il quale il partitore mantiene una tensione di uscita stabile e prossima a $V_{\text{in}}/2$.

3.3 Analisi dei Dati

Per verificare il corretto funzionamento del partitore resistivo, abbiamo determinato analiticamente l'andamento teorico atteso di V_{out} in funzione di R_L , considerando la resistenza equivalente tra R_L e R_2 , moltiplicata per la corrente totale del circuito:

$$V_{\text{out}} = R_{\text{eq}} \cdot I_{\text{tot}} \quad (9)$$

dove la resistenza equivalente tra R_L e R_2 è data da:

$$R_{\text{eq}} = \frac{R_L R_2}{R_L + R_2} \quad (10)$$

e la corrente totale del circuito era:

$$I_{\text{tot}} = \frac{V_{\text{in}}}{R_1 + R_{\text{eq}}} \quad (11)$$

Sostituendo queste espressioni e imponendo la condizione $R_1 = R_2 = R$, si ottiene la formula finale per la curva teorica:

$$V_{\text{out}} = \frac{R_L \cdot V_{\text{in}}}{R + 2R_L} \quad (12)$$

dove $V_{\text{in}} = 5,357 \text{ V}$ e $R = 32,8 \Omega$ rappresenta il valore delle resistenze R_1 e R_2 utilizzate nel circuito.

Abbiamo quindi rappresentato i dati sperimentali in un grafico V_{out} vs R_L , ed effettuato un fit utilizzando la formula 12, in cui il parametro incognito era proprio la resistenza R . Questo ci ha permesso di verificarne la compatibilità con il comportamento teorico atteso (Figura 9).

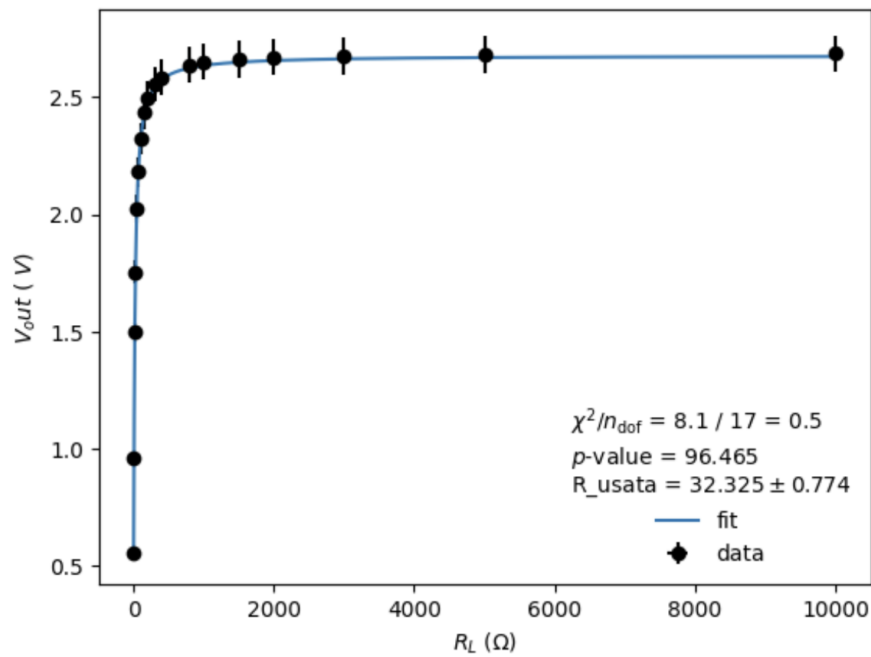


Figure 9: Fit della tensione di uscita V_{out} in funzione di R_L secondo il modello del partitore resistivo.

Successivamente, abbiamo calcolato e rappresentato graficamente la banda di incertezza associata alla curva teorica (Figura 10):

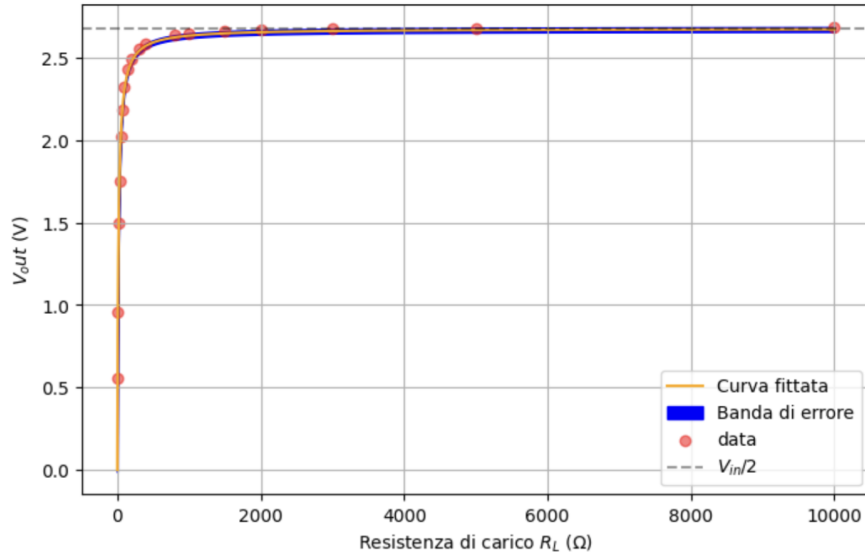


Figure 10: Andamento della tensione di uscita V_{out} in funzione di R_L , con banda di errore teorica.

Valore di R soglia

Infine, individuando l'intersezione tra la banda di incertezza della curva teorica e la retta corrispondente a $V_{in}/2 - \sigma_{V_{in}/2}$, abbiamo determinato il valore soglia della resistenza di carico R_{soglia} oltre il quale il funzionamento del partitore resistivo può considerarsi accettabile, ovvero tale che $V_{out} \in [V_{in}/2 \pm \sigma_{V_{in}/2}]$ (Figura 11).

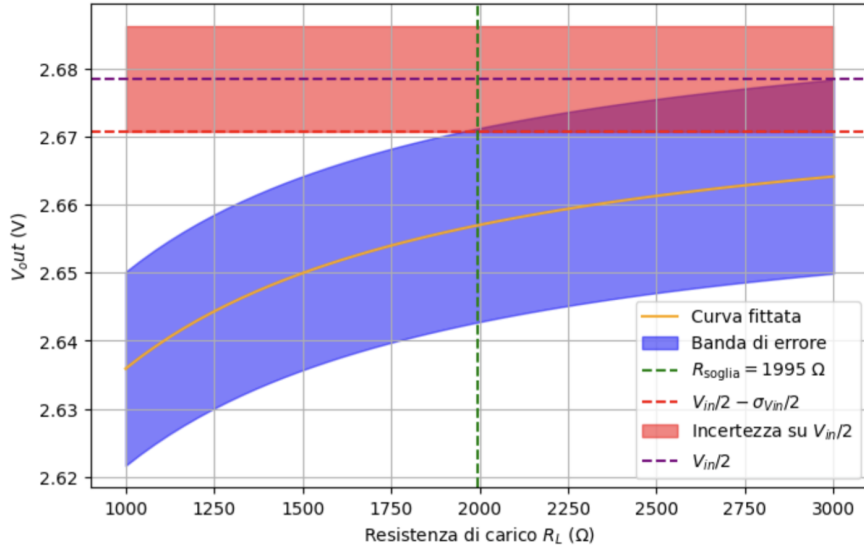


Figure 11: Zoom sull'intervallo in cui V_{out} si avvicina a $V_{in}/2$, evidenziando il valore soglia R_{soglia} .

Il valore sperimentale della soglia ottenuto è:

$$R_{soglia} \approx 1995 \, \Omega \quad (13)$$

Questo risultato indica che, per $R_L \geq 1995 \, \Omega$, la tensione di uscita rimane sufficientemente stabile e prossima al valore teorico previsto, ovvero $V_{in}/2$.

4 Caratteristica tensione-corrente di un diodo

4.1 Obiettivo

Il diodo è un componente elettronico la cui funzione ideale è di permettere il flusso di corrente in solo verso. La relazione *tensione* V *corrente* I è non lineare e descritta dalla Legge di Shockley:

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{qV_d}{gkT}} - 1 \right) \quad (14)$$

I_0	Corrente di saturazione inversa
q	Carica dell'elettrone (1.6×10^{-19} C)
k	Costante di Boltzmann (1.38×10^{-23} J/K)
g	Costante dipendente dal tipo di diodo
T	Temperatura del diodo in Kelvin

Lo scopo di quest'esperienza era verificare tale legge, minimizzando gli effetti di distorsione dovuti al comportamento non ideale degli strumenti di misura.

4.2 Svolgimento

Abbiamo sostituito il resistore utilizzato nella prima parte dell'esperimento [2](#) con il diodo, assicurandoci di aver collegato l'anodo e il catodo di questo rispettivamente al polo positivo e negativo dell'alimentatore, seguendo quindi la naturale direzione di polarizzazione del diodo, tramite l'utilizzo della apposita opzione *test diode* del multimetro palmare.

Quindi, procedendo con la raccolta di diverse misure di *tensione* e *corrente*, siamo stati in grado di valutare la validità della legge [14](#), esplorando le differenze tra l'utilizzo delle due configurazioni.

4.3 Configurazione 1 *vedi Figura 1*

Più adeguata a misurazioni di resistenze grandi (relativamente alla resistenza parassita dell'amperometro).

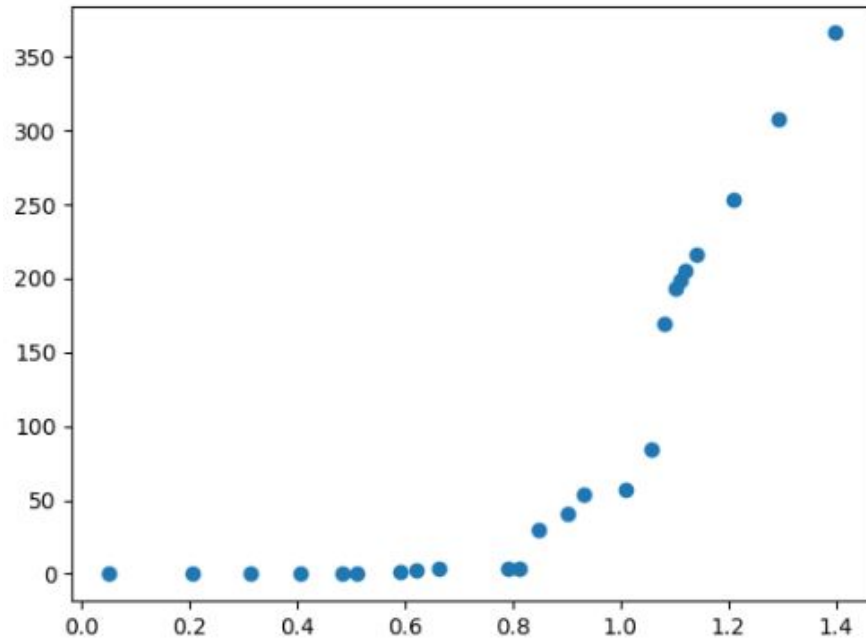


Figure 12: plot esponenziale I - V diodo.

Dal grafico sopra appare evidente che i dati raccolti non seguano una legge esponenziale. In primo luogo, è possibile notare che non ci sono oscillazioni rispetto ad un ipotetico fit esponenziale, quindi si esclude la presenza di errori casuali significativi. Si tratta quindi di errori sistematici. Anche la distribuzione dei residui, non conforme, mette in evidenza il problema.

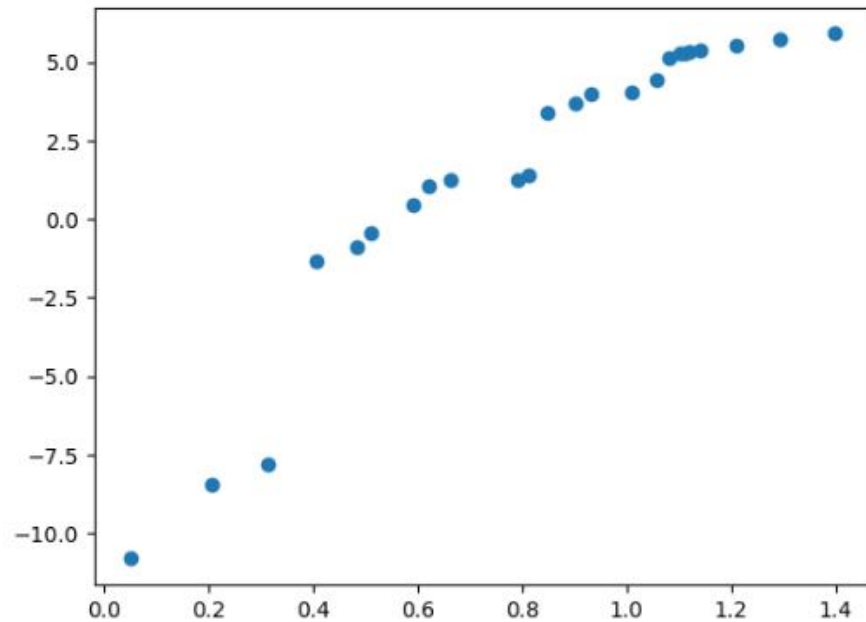


Figure 13: Plot residui valore- σ .

Una possibile spiegazione per questa discrepanza potrebbe risiedere nella configurazione utilizzata. La prima configurazione è infatti ottimizzata per misurare resistenze elevate. Tuttavia, quando il diodo supera una certa soglia di tensione, il suo comportamento cambia, assumendo una resistività molto bassa. In questo caso, la configurazione inizialmente scelta risulta inadeguata per misurare correttamente la resistenza del diodo.

4.4 Configurazione 2 vedi Figura 1

Più adeguata alle misurazioni di resistenze piccole, relativamente alla resistenza parassita del voltmetro.

Abbiamo variato la differenza di potenziale tramite il generatore di potenziale, misurando il voltaggio V in un range di $ddp \in [0.570, 0.816]$ V e la corrente I tramite l'uso dell'ammeter e del voltmetro palmare.

Errori:

- σ_V trascurabile.
- σ_I sensibilmente maggiore di quello fino ad ora usato e discusso in sezione 1.2, a causa delle fluttuazioni del diodo discusse in 4.5 : la corrente fluttuava di valori nell'ordine di 1.0×10^{-4} A.

fit lineare Quindi, trasformando le misure e gli errori di I in *Log scale* e linearizzando la relazione 14 :

$$I_d = \log(I_0) + \log\left(e^{\frac{qV_d}{gkT}} - 1\right) \quad (15)$$

$$a = \frac{q}{gkT}, \quad \sigma_g = \frac{\sigma_a}{a^2}$$

$$b = \log(I_0 - 1), \quad \sigma_{I_0} = e^b \sigma_b$$

abbiamo svolto un fit lineare, mostrato in figura 14:

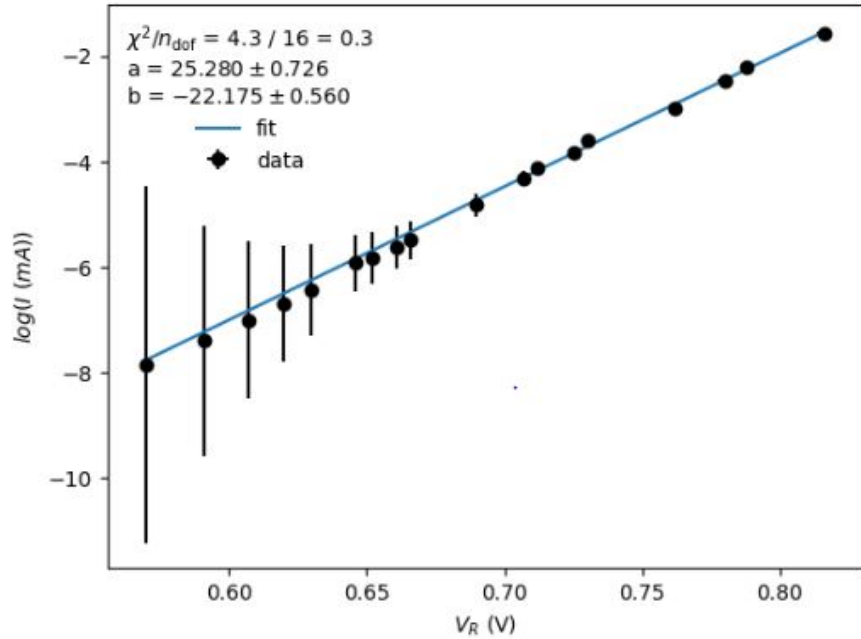


Figure 14: Fit lineare I - V diodo.

$$P_{\text{value}} = 0.99$$

$$I_0 = (6.36 \pm 1.31) \times 10^{-10} \text{ Corrente di saturazione inversa}$$

$g = 1.52 \pm 0.01$ Costante del diodo

Dal χ^2_{red} del fit, pari a 0.3, si evince che il modello si adatta in modo soddisfacente ai dati sperimentali, in quanto il valore risulta compreso nel range tipicamente considerato accettabile per un buon adattamento.

fit esponenziale Similmente, abbiamo svolto il fit esponenziale tramite la relazione 14:

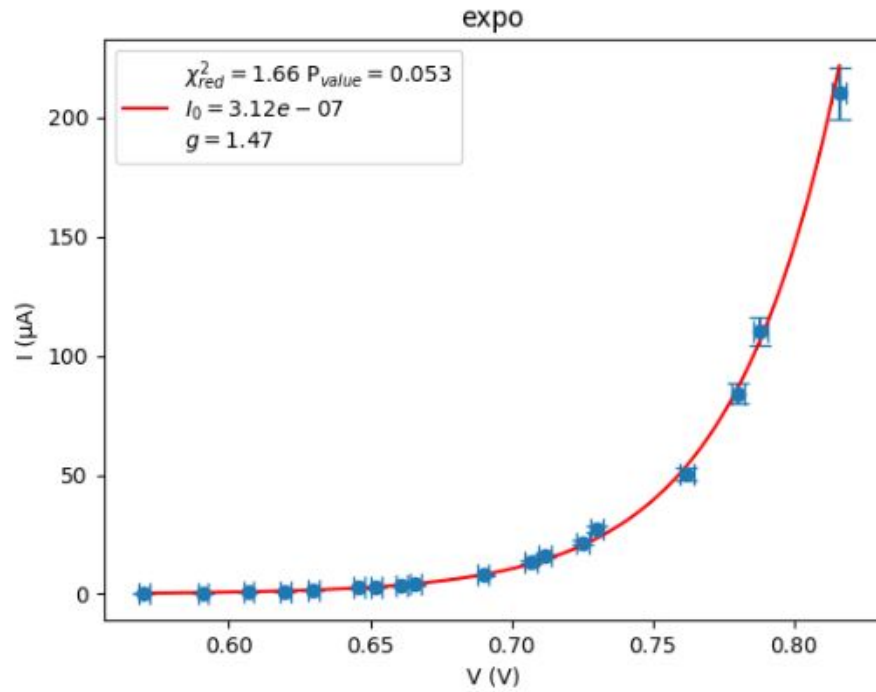


Figure 15: fit esponenziale I - V diodo.

Dal χ^2_{red} del fit, pari a 1.66, si evince che il modello si adatta in modo soddisfacente ai dati sperimentali anche per il fit esponenziale.

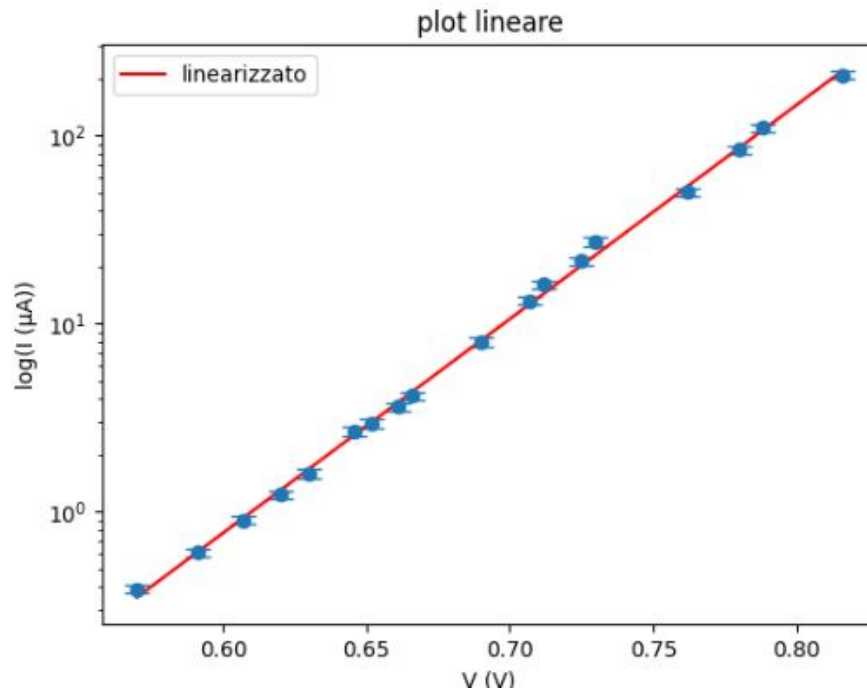


Figure 16: plot lineare I - V diodo.

La linearizzazione dei dati rende evidente la relazione tra *tensione* e *corrente*.

4.5 Considerazioni

- **Non idealità del diodo:** Il diodo non si comporta a voltaggio fisso come una resistenza ideale. Viene osservato sperimentalmente che, a potenziale fisso, la corrente non si stabilizza velocemente come in una resistenza ideale, ma segue un pattern di carica-scarica dell'ordine di 1.0×10^{-4} A su un intervallo di tempo sensibile (da alcuni secondi a decine di secondi), cioè la resistenza del diodo non si stabilizza.

Possibili cause:

- La resistenza del diodo potrebbe essere stata bruciata precedentemente.
 - Avendo effettuato più set di misurazioni prima di quello considerato, non è da escludere un surriscaldamento del diodo.
 - La struttura microscopica del diodo è tale da favorire queste fluttuazioni.
- **Configurazione 1:**
 - Configurazione: La configurazione utilizzata non è necessariamente quella ottimale per la misura. La prima era più adeguata per resistenze alte e la seconda viceversa.
 - Intervallo di non conducibilità: Il comportamento del diodo per i primi valori fa sì che la differenza tra ciascuna delle prime misure di corrente sia così piccola rispetto al rispettivo errore, che viene esclusa una buona

riuscita del fit, anche utilizzando la corretta configurazione (configurazione 2).

- **Configurazione 2:**

- I risultati suggeriscono un buon adattamento ai dati, riportiamo infatti il P-value ottenuto svolgendo un *t-test* tra i valori della costante g ottenuta dai due fit g_{linear} e g_{expo} : $P_{value} = 24\%$.

5 Campo magnetico indotto da una corrente

5.1 Conclusioni

L'esperimento aveva l'obiettivo di verificare l'influenza di un campo magnetico generato da una bobina percorsa da corrente sull'orientazione di un ago magnetico. Tuttavia, non è stato possibile completare con successo la raccolta dei dati a causa della difficoltà nel reperire un'applicazione per smartphone dotata di un sensore di bussola magnetica, indipendente dal GPS.

L'assenza di uno strumento di misura adeguato ha impedito di determinare con precisione l'angolo di deviazione dell'ago in funzione della corrente applicata alla bobina. Di conseguenza, non è stato possibile interpolare i dati con il modello teorico né stimare l'intensità del campo magnetico terrestre.

Nonostante la mancata acquisizione dei dati, l'esperienza ha sottolineato l'importanza di una corretta strumentazione per la buona riuscita di un esperimento e per la validità delle misure ottenute.

Appendice

Esperimento 1: Resistenze

Configurazione 2

V_R [V]	I_R [mA]
1.096	32.840
1.552	46.496
2.369	71.34
3.057	91.63
4.189	125.57
5.108	153.11
5.867	175.90
6.890	206.58
7.400	221.82
8.040	240.99
9.530	285.71

Table 4: Misure per $R = 33 \Omega$

V_R [V]	I_R [mA]
1.010	0.30645
1.480	0.44916
1.728	0.52440
2.179	0.66130
2.982	0.90520
3.291	0.98920
4.486	1.34850
5.441	1.65160
6.231	1.82790
7.360	2.21270
8.640	2.59680
10.14	3.07860
11.35	3.41170
15.04	4.67800
20.76	6.30300
28.47	8.64300

Table 5: Misure per $R = 3300 \Omega$

V_R [V]	I_R [μ A]
1.504	2.26
4.018	6.01
5.754	8.59
8.270	12.41
13.35	20.03
17.19	25.78
20.48	30.69
24.48	36.69
28.48	42.69

Table 6: Misure per $R = 712 \text{ k}\Omega$

Configurazione 1

V_R [V]	I_R [mA]
0.013	0.0986
0.715	20.513
1.2429	35.818
2.078	59.590
3.035	87.030
4.404	126.280
5.422	155.460

Table 7: Misure per $R = 33 \Omega$

V_R [V]	I_R [mA]
0.309	0.09110
1.494	0.44005
4.100	1.27300
8.130	2.39210
12.67	3.73140
17.05	5.01980
22.36	6.78300
28.48	8.63900

Table 8: Misure per $R = 3300 \Omega$

V_R [V]	I_R [μ A]
1.111	1.58
4.253	5.97
6.400	8.97
8.760	12.28
12.12	16.98
17.05	23.87
22.30	31.20
28.48	39.86

Table 9: Misure per $R = 712 \text{ k}\Omega$

Esperimento 2: Partitore resistivo

V_{out} [V]	R_L [$\text{k}\Omega$]
0.555	4
0.960	10
1.498	20
1.755	30
2.025	50
2.182	70
2.322	100
2.436	150
2.495	200
2.554	300
2.586	400
2.639	800
2.651	1000
2.663	1500
2.672	2000
2.677	3000
2.683	5000
2.688	10000

Table 10: Misure per il partitore resistivo

Esperimento 3: Diodo

V_D [V]	I_D [mA]
0.570	0.390
0.591	0.608
0.607	0.906
0.620	1.237
0.630	1.594
0.646	2.684
0.652	2.947
0.661	3.625
0.666	4.133
0.690	8.000
0.707	13.280
0.712	16.154
0.725	21.640
0.730	27.411
0.762	50.087
0.780	84.123
0.788	110.200
0.816	210.120

Table 11: Configurazione 1

V_D [V]	I_D [mA]
0.049	0.020
0.207	0.210
0.314	0.400
0.407	267.120
0.483	412.670
0.509	0.651
0.591	1.564
0.621	2.787
0.662	3.456
0.790	3.550
0.813	4.104
0.848	30.090
0.903	40.780
0.933	54.020
1.009	57.160
1.059	84.500
1.081	168.850
1.101	192.800
1.110	198.650
1.120	205.500
1.140	215.720
1.209	252.430
1.294	307.150
1.397	365.550

Table 12: Configurazione 2