

Relazione di laboratorio

Lisa Merlo Marco Militello Nicolò Negro Pet

25/03/22

1 Strumenti di laboratorio

1. Breadboard
2. Generatore di corrente
3. Voltmetro da banco e palmare
4. Amperometro
5. Resistenze
6. Diodo

2 Introduzione e obiettivi

L'obiettivo dell'esperienza è la verifica della legge di Ohm ($V = RI$) e la caratterizzazione tensione-corrente di un conduttore Ohmico (resistore) e di uno non Ohmico (diodo), entrambi alimentati da una corrente continua. Il circuito viene costruito tramite l'utilizzo di una breadboard, nella quale vengono collegate le resistenze, il generatore di corrente, il voltmetro e l'amperometro. Questi ultimi servono per misurare la differenza di potenziale in Volt e la tensione di corrente nel circuito in Ampere. Inoltre, nel caso del diodo, il circuito è stato riprodotto e analizzato tramite Multisim.

3 Metodo

L'esperimento si divide in tre diverse sezioni. La prima parte dell'esperimento prevede la verifica in modo quantitativo delle legge di Ohm attraverso l'uso di resistenze, con valori compresi tra le decine e le migliaia di Ohm, poste in parallelo e in serie. Per contrastare l'effetto delle resistenze interne degli strumenti di misura sono stati sfruttati due circuiti differenti. Il primo (Figura 1) è stato utilizzato per resistenze piccole rispetto a quelle del voltmetro, mentre il secondo (Figura 2) per resistenze grandi rispetto a quelle interne dell'amperometro. Per confermare che le resistenze interne degli strumenti fossero compatibili con gli errori considerati, abbiamo utilizzato gli stessi circuiti ma invertendo le resistenze utilizzate¹.

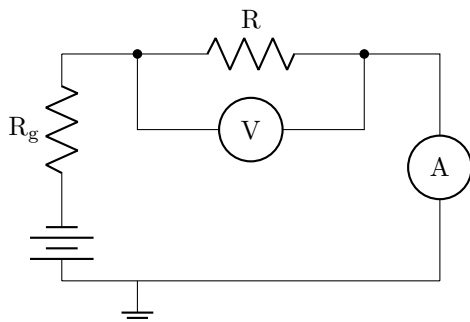


Figura 1: Primo circuito

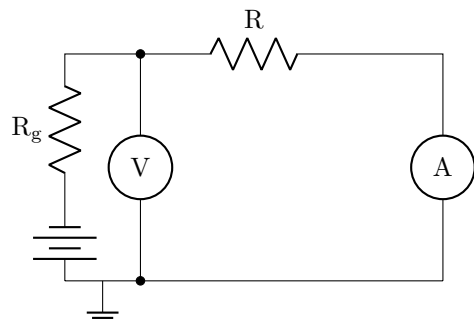


Figura 2: Secondo circuito

Una volta costruiti i circuiti opportuni, i dati sono stati acquisiti tramite i Voltmetri e gli Amperometri in dotazione. Nella seconda parte dell'esperimento si è valutato il circuito in figura

¹Abbiamo ottenuto, tramite minimi quadrati, $R_A = 3,1 \pm 0,12 \, \Omega$, $R_V = 10,4 \pm 0,7 \, M\Omega$.

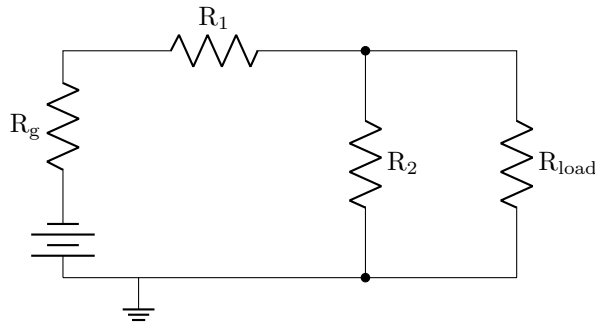


Figura 3: Circuito usato per la seconda parte

e si è ricavato il valore delle resistenze R_1 e R_2 necessarie per ottenere una tensione in uscita V_{out} circa alla metà di V_{in} (Tensione in entrata). Tramite la legge di Kirchhoff si ricava che le due resistenze devono avere lo stesso valore. In particolare, abbiamo ipotizzato che, affinché R_{load} non influisse sul valore di V_{out} , essa dovesse essere molto grande rispetto a R_1 ed R_2 , idealmente infinita. E' stato quindi campionato il valore della tensione in uscita al variare della resistenza R_{load} per verificare che il risultato fosse in accordo con quanto aspettato.

La terza e ultima parte riguarda la verifica della legge di Shockley, $I = I_0(e^{\frac{Vq}{gkT}} - 1)$, tramite un circuito identico a quello in figura 1, sostituendo alla resistenza un diodo.

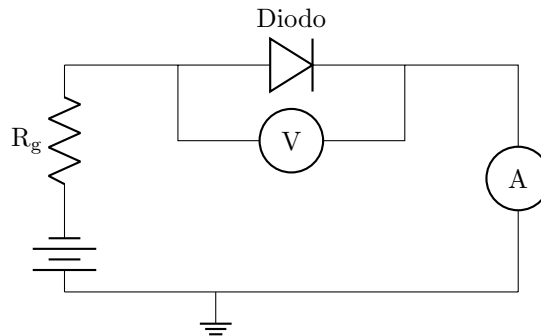


Figura 4: Circuito con diodo

4 Dati

Gli errori utilizzati per le misure dirette (Tensione - Corrente) corrispondono alla sensibilità degli strumenti. Per quanto riguarda le misure indirette, gli errori sono stati ricavati tramite le formule dei minimi quadrati e confrontati con quelli ottenuti tramite l'opzione fit di ROOT. Anche i test del Chi-quadro e le probabilità ad essi associate sono state calcolate tramite le funzioni di ROOT.

4.1 Prima parte - Verifica della legge di Ohm

Le tabelle contenenti le misure dirette di corrente e tensione con i relativi errori si trovano in Appendice 7.1.

4.2 Seconda parte

Utilizzando il circuito della Figura 3, abbiamo campionato il valore di V_{out} al variare della resistenza R_{load} , mantenendo V_{in} , R_1 e R_2 invariati (vedi Tabella 6).

4.3 Terza parte - Verifica della legge di Shockley

Partendo dal circuito raffigurato (Figura 4) è stata campionata la tensione (fino ad un massimo di 1V) al variare della corrente; la procedura è stata ripetuta anche tramite Multisim (Figura 11).

5 Analisi dati

5.1 Prima parte - Verifica della legge di Ohm

Misurati i dati necessari, è stata effettuata l'interpolazione tramite ROOT, di seguito è riportato il grafico della prima resistenza. Abbiamo ricavato il valore della resistenza tramite l'interpolazione con una retta di un'equazione $y = Rx + p_0$ e confrontato con il valore atteso.

| Resistenza 1 | | | |
|---------------|--------|---------------|--------|
| Corrente [mA] | Errore | Voltaggio [V] | Errore |
| 0.85 | 0.01 | 0.019 | 0.001 |
| 1.75 | 0.01 | 0.038 | 0.001 |
| 2.49 | 0.01 | 0.055 | 0.001 |
| 3.30 | 0.01 | 0.071 | 0.001 |
| 4.08 | 0.01 | 0.089 | 0.001 |
| 4.99 | 0.01 | 0.108 | 0.001 |
| 28.06 | 0.01 | 0.606 | 0.001 |
| 31.86 | 0.01 | 0.689 | 0.001 |
| 35.57 | 0.01 | 0.769 | 0.001 |
| 39.43 | 0.01 | 0.852 | 0.001 |
| 43.88 | 0.01 | 0.949 | 0.001 |
| 47.23 | 0.01 | 1.021 | 0.001 |
| 53.24 | 0.01 | 1.151 | 0.001 |
| 57.60 | 0.01 | 1.246 | 0.001 |
| 61.84 | 0.01 | 1.337 | 0.001 |
| 65.38 | 0.01 | 1.414 | 0.001 |
| 69.85 | 0.01 | 1.551 | 0.001 |
| 74.43 | 0.01 | 1.611 | 0.001 |

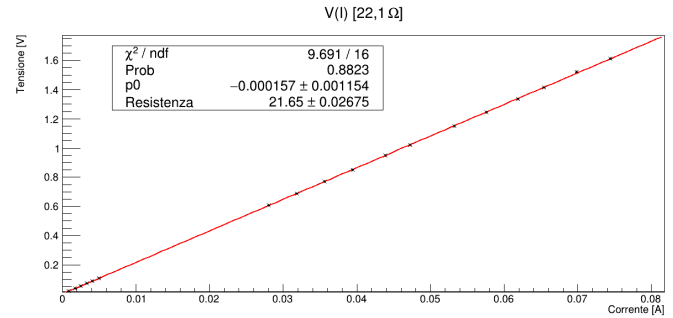


Figura 5: Interpolazione $R = 22,1 \pm 0,1 \Omega$

Tabella 1: Dati $R = 22,1 \pm 0,1 \Omega$

Il modello scelto sembra descrivere accuratamente i dati, ma per confermare questa tesi è stato utilizzato il test del chi-quadro. Inizialmente abbiamo notato che in tutti i casi la procedura dava un risultato statisticamente inaspettato: la probabilità che la curva si adattasse ai dati sperimentali era del 100% circa. Per ovviare a questo problema, ci siamo focalizzati sugli errori delle misure dirette. Infatti, poiché abbiamo usato come errori la sensibilità degli strumenti, la distribuzione associata agli errori non è gaussiana, ma uniforme. Abbiamo quindi associato alle misure un errore pari a $\frac{S}{\sqrt{12}}$ (con S sensibilità). In questo modo, abbiamo ottenuto dei valori del chi-quadro più plausibili; le probabilità sono riportate nei grafici in appendice.

La procedura è stata poi ripetuta con le resistenze in parallelo e in serie, il cui valore equivalente è stato ricavato dalle seguenti relazioni:

$$R_{serie} = \sum_{k=1}^N R_k$$

$$\frac{1}{R_{parallelo}} = \sum_{k=1}^N \frac{1}{R_k}$$

5.2 Parte Seconda

E' possibile notare dalla tabella 6 che i risultati sono in accordo con il modello atteso: nel caso di resistenze con valore compreso tra le decine di Ω si nota una variazione significativa della tensione in uscita. V_{out} appare invece invariata solo quando si raggiungono valori molto grandi rispetto alle resistenze R_1 ed R_2 (dal valore di $10,3 \pm 0,1 \Omega$), corrispondenti alle migliaia di Ω .

5.3 Terza parte - Verifica della legge di Shockley

Anche in questo caso, per poter verificare la validità della legge di Shockley, è stata effettuata l'interpolazione dei dati tramite ROOT. E' stata utilizzata una curva esponenziale del tipo:

$$y = A(e^B - 1) \quad \text{con } A = I_0 \quad B = \frac{qV}{gkT}$$

Come è possibile vedere dal grafico 10, i dati sono disposti secondo un andamento esponenziale. Inoltre, per avvalorare questa tesi, abbiamo ripetuto l'esperimento in maniera virtuale su Multisim. Dopo aver caratterizzato il diodo "1N4007" messo a disposizione sul sito, abbiamo raccolto i dati che confermano quanto detto precedentemente. Nonostante il diodo non fosse identico a quello usato in laboratorio, in entrambi i grafici è possibile notare l'andamento esponenziale che ci aspettavamo di riscontrare.

6 Conclusione

I dati ricavati ci hanno permesso di confermare i modelli attesi.

Innanzitutto, i valori delle resistenze ottenuti tramite interpolazioni sono in accordo con quelli attesi, misurati tramite multimetro, il che conferma la validità della legge di Ohm. Nel caso invece della terza parte, siamo stati in grado di confermare la legge di Shockley e, inoltre, di trovare un range di tensione nel quale il diodo è in grado di condurre. Si può infatti notare dal grafico che il diodo inizia a condurre valori apprezzabili di corrente a partire da una tensione applicata di $0,7 \pm 0,1$ V.

7 Appendice

7.1 Prima parte - Verifica legge di Ohm

| Resistenza 2 | | | |
|----------------------|--------|---------------|--------|
| Corrente [μA] | Errore | Voltaggio [V] | Errore |
| 11.82 | 0.01 | 0.118 | 0.001 |
| 20.48 | 0.01 | 0.204 | 0.001 |
| 31.06 | 0.01 | 0.309 | 0.001 |
| 40.07 | 0.01 | 0.403 | 0.001 |
| 50.35 | 0.01 | 0.499 | 0.001 |
| 60.60 | 0.01 | 0.600 | 0.001 |
| 70.88 | 0.01 | 0.702 | 0.001 |
| 81.37 | 0.01 | 0.806 | 0.001 |
| 90.35 | 0.01 | 0.894 | 0.001 |
| 100.82 | 0.01 | 0.998 | 0.001 |
| 110.49 | 0.01 | 1.093 | 0.001 |
| 120.68 | 0.01 | 1.194 | 0.001 |
| 130.06 | 0.01 | 1.286 | 0.001 |
| 142.78 | 0.01 | 1.413 | 0.001 |
| 150.81 | 0.01 | 1.492 | 0.001 |
| 159.58 | 0.01 | 1.578 | 0.001 |
| 169.68 | 0.01 | 1.678 | 0.001 |
| 179.90 | 0.01 | 1.780 | 0.001 |
| 190.39 | 0.01 | 1.883 | 0.001 |
| 200.29 | 0.01 | 1.980 | 0.001 |

Tabella 2: Dati $R = 9,88 \pm 0,01 K\Omega$

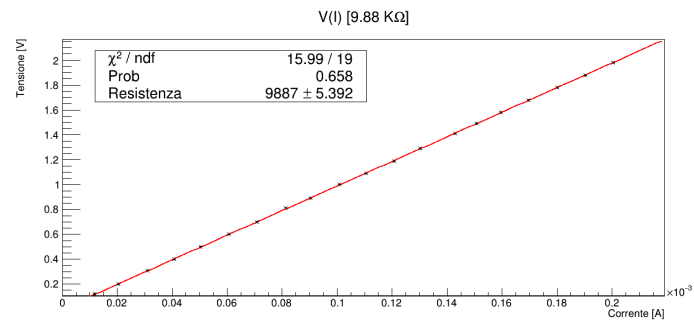


Figura 6: Interpolazione $R = 9,88 \pm 0,01 K\Omega$

| Resistenza 3 | | | |
|----------------------|--------|---------------|--------|
| Corrente [μA] | Errore | Voltaggio [V] | Errore |
| 1.87 | 0.01 | 0.075 | 0.001 |
| 5.21 | 0.01 | 0.205 | 0.001 |
| 8.33 | 0.01 | 0.326 | 0.001 |
| 10.88 | 0.01 | 0.425 | 0.001 |
| 15.53 | 0.01 | 0.529 | 0.001 |
| 16.26 | 0.01 | 0.635 | 0.001 |
| 20.16 | 0.01 | 0.786 | 0.001 |
| 22.33 | 0.01 | 0.872 | 0.001 |
| 25.02 | 0.01 | 0.976 | 0.001 |
| 27.49 | 0.01 | 1.072 | 0.001 |
| 30.99 | 0.01 | 1.209 | 0.001 |
| 33.77 | 0.01 | 1.316 | 0.001 |
| 36.69 | 0.01 | 1.430 | 0.001 |
| 39.92 | 0.01 | 1.556 | 0.001 |
| 44.70 | 0.01 | 1.743 | 0.001 |
| 47.77 | 0.01 | 1.862 | 0.001 |
| 51.31 | 0.01 | 2.000 | 0.001 |

Tabella 3: Dati $R = 28,32 \pm 0,01 \text{ K}\Omega$

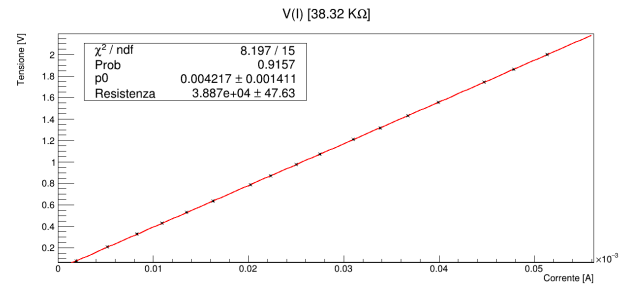


Figura 7: Interpolazione $R = 28,32 \pm 0,01 \text{ K}\Omega$

| Resistenze in serie | | | |
|---------------------|--------|---------------|--------|
| Corrente [mA] | Errore | Voltaggio [V] | Errore |
| 0.79 | 0.01 | 0.025 | 0.001 |
| 1.56 | 0.01 | 0.050 | 0.001 |
| 2.26 | 0.01 | 0.072 | 0.001 |
| 3.01 | 0.01 | 0.095 | 0.001 |
| 3.77 | 0.01 | 0.118 | 0.001 |
| 4.52 | 0.01 | 0.141 | 0.001 |
| 6.45 | 0.01 | 0.203 | 0.001 |
| 10.03 | 0.01 | 0.315 | 0.001 |
| 13.37 | 0.01 | 0.421 | 0.001 |
| 16.52 | 0.01 | 0.519 | 0.001 |
| 18.31 | 0.01 | 0.575 | 0.001 |
| 20.60 | 0.01 | 0.647 | 0.001 |

Tabella 4: Dati $R_{eq} = 32,4 \pm 0,02 \Omega$

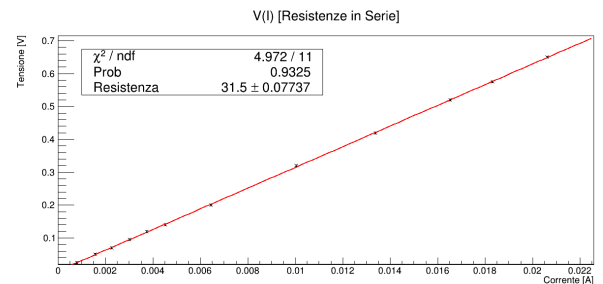


Figura 8: Interpolazione $R_{eq} = 32,4 \pm 0,02 \Omega$

| Resistenze in parallelo | | | |
|-------------------------|--------|---------------|--------|
| Corrente [mA] | Errore | Voltaggio [V] | Errore |
| 8.66 | 0.01 | 0.059 | 0.001 |
| 18.46 | 0.01 | 0.125 | 0.001 |
| 27.37 | 0.01 | 0.185 | 0.001 |
| 37.84 | 0.01 | 0.242 | 0.001 |
| 46.60 | 0.01 | 0.318 | 0.001 |
| 53.81 | 0.01 | 0.364 | 0.001 |
| 72.11 | 0.01 | 0.487 | 0.001 |
| 82.48 | 0.01 | 0.557 | 0.001 |
| 93.10 | 0.01 | 0.629 | 0.001 |
| 103.74 | 0.01 | 0.700 | 0.001 |

Tabella 5: Dati $R_{eq} = 7,03 \pm 0,01 \Omega$

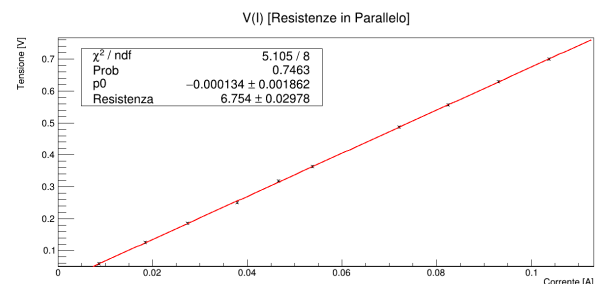


Figura 9: Interpolazione $R_{eq} = 7,03 \pm 0,01 \Omega$

7.2 Seconda parte

| $R_{load} [\Omega]$ | Errore | $V_{out} [V]$ | Errore |
|---------------------|--------|---------------|--------|
| 1 | 1 | 0.085 | 0.001 |
| 4 | 1 | 0.217 | 0.001 |
| 20 | 1 | 0.385 | 0.001 |
| 60 | 1 | 0.445 | 0.001 |
| 1000 | 1 | 0.482 | 0.001 |
| 4000 | 1 | 0.484 | 0.001 |
| 10000 | 1 | 0.485 | 0.001 |
| 40000 | 1 | 0.484 | 0.001 |
| 100000 | 1 | 0.484 | 0.001 |
| 100000000 | 1 | 0.482 | 0.001 |

Tabella 6: Dati ricavati con $V_{in} = 0,970 \pm 0,1 V$

7.3 Terza parte

| Diodo | | | |
|---------------|---------|---------------|--------|
| Corrente [mA] | Errore | Voltaggio [V] | Errore |
| 0.00003 | 0.00001 | 0.110 | 0.001 |
| 0.0002 | 0.0001 | 0.230 | 0.001 |
| 0.007 | 0.001 | 0.370 | 0.001 |
| 0.06 | 0.01 | 0.460 | 0.001 |
| 0.3 | 0.1 | 0.560 | 0.001 |
| 18 | 1 | 0.718 | 0.001 |
| 48 | 1 | 0.760 | 0.001 |
| 79 | 1 | 0.779 | 0.001 |
| 115 | 1 | 0.790 | 0.001 |
| 156 | 1 | 0.801 | 0.001 |
| 202 | 1 | 0.809 | 0.001 |
| 235 | 1 | 0.813 | 0.001 |
| 266 | 1 | 0.818 | 0.001 |
| 345 | 1 | 0.823 | 0.001 |
| 413 | 1 | 0.828 | 0.001 |
| 486 | 1 | 0.831 | 0.001 |

Tabella 7: Dati Diodo

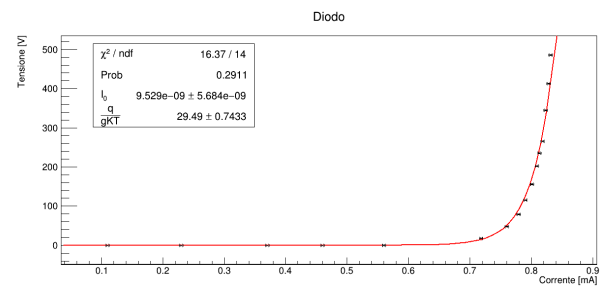


Figura 10: Interpolazione Diodo

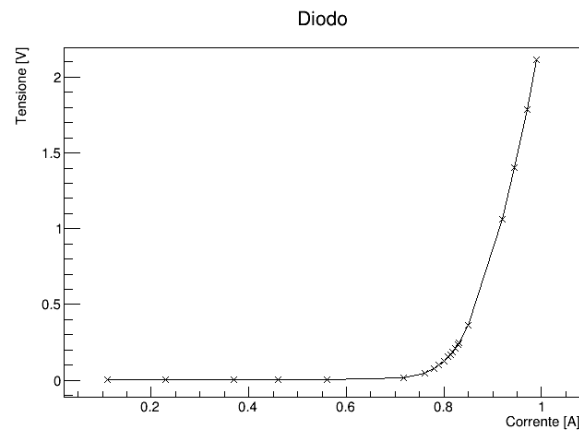


Figura 11: Diodo esperienza virtuale