



Associazione per
l'Insegnamento
della Fisica
Sezione di Mantova

Provveditorato agli
Studi di Mantova

Corso di aggiornamento
A.S. 1992/93

NON È
TUTTO
LINEARE...

What do we mean by "understanding" something? We can imagine that complicated array of moving things which constitutes "the world" is something like a great chess game being played by the gods, and we are observers of the game. We do not know what the rules of the game are; all we are allowed to do is to watch the playing. Of course, if we watch long enough, we may eventually catch on to a few of the rules. The rules of the game are what we mean by fundamental physics.

R. Feynman

| | |
|---|----|
| Indice | |
| Presentazione..... | 1 |
| Moto uniformemente accelerato..... | 3 |
| Proporzionalità diretta: conduttori ohmici..... | 12 |
| Relazione tensione corrente per filamento di lampadina e diodo semiconduttore.. | 18 |
| Proporzionalità inversa: resistenza interna di una pila..... | 25 |
| Relazione intensità luminosa - distanza da sorgente puntiforme..... | 30 |
| Simulazione di un decadimento esponenziale utilizzando materiale "povero"..... | 38 |
| Relazione resistenza-temperatura in un termistore N.T.C..... | 49 |
| Appendice..... | 57 |
| Bibliografia..... | 61 |

PRESENTAZIONE

Il corso d'aggiornamento, di cui queste pagine sono testimonianza scritta, è stato il primo, da una decina d'anni a questa parte, interamente progettato, richiesto ed organizzato dalla sezione A.I.F. di Mantova con riconoscimento da parte del Provveditorato agli Studi di Mantova.

Calendario degli incontri e rispettivi conduttori-coordinatori.

| Incontro n° | Data | Argomento | Coordinatori |
|-------------|------------|--|---|
| 1 | 19.11.1992 | Moto uniformemente accelerato | Giuliana Antonini Teresa Zecca |
| 2 | 26.11.1992 | Proporzionalità diretta: conduttori ohmici. | Luigino Grazioli Lina Mantovani |
| 3 | 03.12.1992 | Relazione tensione corrente per filamento di lampadina e diodo semiconduttore. | Maurizio Francesio Riccardo Govoni |
| 4 | 21.01.1993 | Proporzionalità inversa: resistenza interna di una pila. | Luigino Grazioli Lina Mantovani |
| 5 | 18.02.1993 | Relazione intensità luminosa - distanza da sorgente puntiforme. | Leo Vioni Teresa Zecca |
| 6 | 25.02.1993 | Simulazione di un decadimento esponenziale utilizzando materiale "povero". | Giuliana Antonini Maurizio Francesio |
| 7 | 04.03.1993 | Relazione resistenza-temperatura in un termistore N.T.C.. | Riccardo Govoni Leo Vioni |

A questo corso hanno partecipato trentasei docenti di scuola media superiore, inclusi i coordinatori che hanno partecipato ad agli altri incontri come semplici corsisti. Il numero medio di partecipanti per incontro è stato di una ventina d'insegnanti. Molti non hanno potuto partecipare a tutte le sessioni per concomitanti impegni scolastici (lezioni pomeridiane, consigli di classe, collegio docenti, ecc...). Le presenze hanno tuttavia consentito la formazione di volta in volta di sei gruppi di lavoro, in modo da poter svolgere attivamente le esercitazioni di laboratorio proposte.

La struttura degli incontri prevedeva:

una prima parte di introduzione all'argomento trattato (mediamente ½ h)

una seconda parte di esecuzione dell'esperimento e di raccolta dati (mediamente 1 h)

una terza parte di elaborazione dei dati sperimentali mediante l'utilizzo di P.C. (mediamente 1 ½ h).

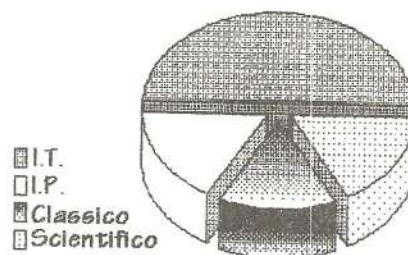
I docenti coordinatori oltre a predisporre il materiale introducevano all'esperienza, la illustravano, e seguivano i vari gruppi durante il lavoro discutendo i risultati ottenuti.

Le attività pratiche sono state eseguite grazie alla disponibilità dei Presidi prof. Riccardo Freddi dell'I.T.I.S. "Fermi" di Mantova e prof. Amilcare Riccò dell'I.P.S.I.A. "Vinci" di Mantova, che hanno concesso in uso i laboratori di Fisica ed Informatica dei rispettivi Istituti. Si ringraziano in particolar modo i tecnici Stefano Grecchi e Alberto Roncaglia che hanno fornito la loro competente collaborazione a livello assolutamente volontario.

Per ogni incontro è stato individuato un gruppo incaricato di stendere una scheda dell'esperimento svolto: il frutto di tale raccolta è il presente "quaderno". Come scelta editoriale abbiamo voluto mantenere stili, caratteri, impaginazioni, tipi di stampa propri di ciascun gruppo estensore delle relazioni, a testimoniare la coralità del lavoro svolto.

Nella fase di raccolta e revisione del materiale prodotto è stata particolarmente utile l'attività di coordinamento svolta dalla collega Lina Mantovani.

Per curiosità statistica si riporta un diagramma a torta che rappresenta il numero degli insegnanti presenti al corso in funzione della scuola d'appartenenza.



Il collega Maurizio Francesio, in occasione della presentazione del precedente volume "Triangoli e molle", lo definì: «Il prodotto del lavoro di insegnanti, per altri insegnanti». Vorrei ripetere oggi le stesse parole aggiungendo soltanto: «...nonostante tutto e malgrado tutto!».

Mantova, 9 settembre 1994

Il direttore del corso
(prof. Riccardo Govoni)

Riccardo Govoni

Primo incontro

MOTO UNIFORMEMENTE ACCELERATO

(a cura di Giuliana Antonini, Teresa Zecca, Roberta Campi, Tiziana Morrea e Nicoletta Testa)

1. L'esperimento

Si vuole studiare un moto rettilineo uniformemente accelerato, partendo da un'analisi cinematica e arrivando a considerazioni di tipo dinamico, presumendo di aver già studiato e analizzato moti uniformi dal punto di vista cinematico.

L'attrezzatura utilizzata è la seguente:

- **rotaia a cuscano d'aria**, con relativo carrello da $(372,5 \pm 0,5)g$, per ridurre al minimo l'attrito dovuto al contatto tra le superfici del carrello e della rotaia.

Descrizione: la rotaia a cuscano d'aria è costituita da una barra, cava al suo interno, lunga circa 2 m. La barra presenta nelle pareti laterali, dei piccoli fori. Una delle due estremità è chiusa mentre l'altra è collegata ad un compressore.

L'aria spinta dal compressore all'interno della rotaia, ha come unica via d'uscita i fori laterali. Dopo aver azionato il compressore, un carrello di forma triangolare, che si adagia perfettamente alla barra, viene appoggiato sulla rotaia. Grazie all'aria che esce dai fori si forma un cuscano d'aria tra rotaia e carrello, che impedisce il contatto tra le due superfici, riducendo la forza d'attrito che frenerebbe il moto del carrello.

- **marcatempo** (nel nostro caso con frequenza di 100 Hz) con relativa striscia di carta.

Descrizione: dispositivo munito di una punta che vibra alla frequenza di 100 Hz. A ogni vibrazione, cioè ogni 0,01 s, la punta lascia un segno su una striscia di carta che può scorrere sotto essa. Facendo scorrere il nastro di carta, si ottengono tanti punti distinti, uno per ogni vibrazione completa. La distanza tra due punti consecutivi è proporzionale alla velocità di scorrimento del nastro, mentre l'intervallo di tempo tra due battute consecutive corrisponde al periodo del marcatempo. L'utilizzo di questo strumento permette di rilevare posizioni ad intervalli di tempo regolari di $1/100$ di secondo, chiamati, per semplicità, "tic". Cio' consente anche di sottolineare ai ragazzi come la scelta dell'unità di misura sia arbitraria.

- **portapesi** da $(10,0 \pm 0,1)g$
- **filo inestensibile**
- **9 rondelle** da $(10,0 \pm 0,1)g$ ciascuna
- **carrucola fissa**

Schema e funzionamento dell'apparecchiatura

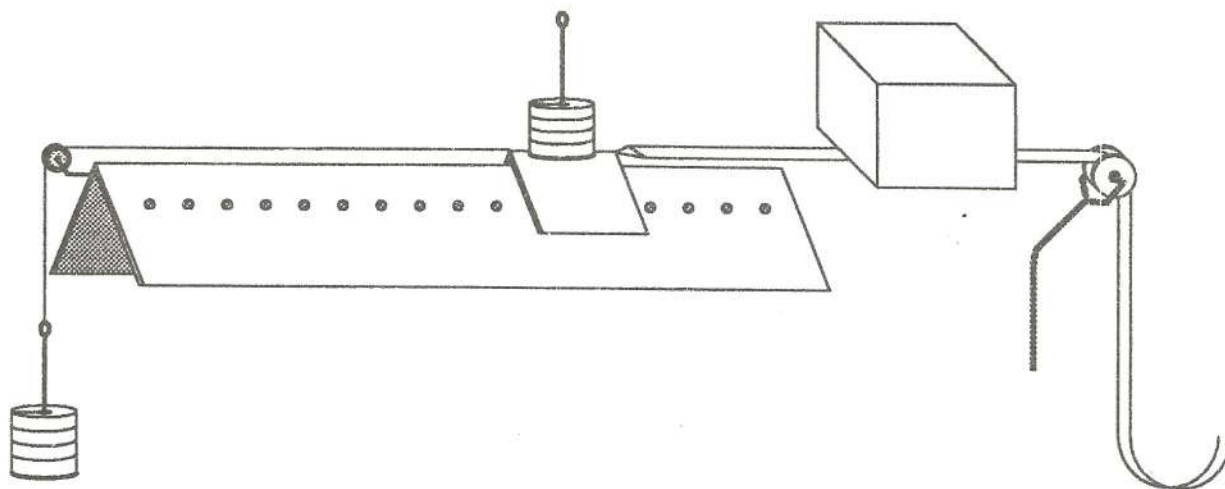


fig.1

Si collega il carrello da un lato al portapesi, attraverso il filo che scorre nella carrucola, dall'altro alla striscia di carta che viene impressa, durante il moto del carrello, dal marcatempo.

Prima di iniziare l'esperimento è necessario assicurarsi che la rotaia si trovi su un piano perfettamente orizzontale. Per ottenere questo si colloca il carrello sulla rotaia in posizioni diverse azionando contemporaneamente il compressore: se il carrello resta sempre fermo vuol dire che la rotaia si trova su un piano orizzontale e consente l'equilibrio tra forza peso e reazione vincolare.

Si mettono le rondelle sul portapesi e sul carrello, in quantità diverse per ciascun gruppo di lavoro. Per considerazioni dinamiche che verranno fatte in seguito, si fa in modo che la massa in movimento (carrello-portapesi-filo-rondelle) sia costante per i vari gruppi e nelle singole esperienze.

| GRUPPO di lavoro | n°rondelle sul portapesi | n°rondelle sul carrello |
|------------------|--------------------------|-------------------------|
| 1 | 1 | 8 |
| 2 | 3 | 6 |
| 3 | 5 | 4 |
| 4 | 7 | 2 |
| 5 | 9 | 0 |

tab.1

In questo modo la massa totale in movimento è sempre la stessa in ogni gruppo e vale $(472,5 \pm 1,5)g = (473 \pm 2) \cdot 10^{-3}kg$

Si azionano il compressore e il marcatempo: in queste condizioni il carrello si muove trascinato dal portapesi con le rondelle, facendo scorrere la carta sulla quale vengono impressi i puntini. A questo punto si analizza la striscia. Lo spazio tra due tracce successive corrisponde allo spostamento effettuato dal carrello in un intervallo di tempo pari ad un tic.

Per semplificare la raccolta dei dati, si considerano come Δx le distanze relative ad un intervallo di tempo pari ad un multiplo di tic opportunamente scelto.

Per misurare gli spostamenti si fissa la striscia di carta al tavolo parallelamente ad un metro a nastro. Si escludono le prime tracce che risultano molto vicine e quindi non ben distinguibili. Si può far notare a questo proposito che per analizzare il tipo di moto non è necessario far corrispondere il primo segnale rilevato allo "zero" del metro, in quanto interessano le variazioni di posizione e non le posizioni assolute.

Ogni gruppo completa la seguente tabella:

| t (s) | x (cm) | Δt (s) | Δx (cm) | $v = \Delta x / \Delta t$ (cm/s) |
|------------|-------------|-------------------|--------------------|-------------------------------------|
| | | | | |

2. Analisi dei dati

Seguono i dati relativi al gruppo n°1 che ha scelto come $\Delta t = 10 \text{ tic} = 1 \text{ toc} = 0,1 \text{ s}$ (altri gruppi in cui la distanza tra le tracce era maggiore hanno scelto $\Delta t = 5 \text{ tic}$).

La scelta dell'incertezza nella colonna delle posizioni deriva dalla sensibilità del metro adoperato che nel nostro caso corrisponde a 4 mm di incertezza su Δx ; quella sul tempo è così piccola che si può considerare trascurabile.

L'incertezza assoluta sulle velocità medie si calcola con la regola della propagazione delle incertezze, se lo sviluppo del programma lo permette, altrimenti si esprimeranno le velocità con il corretto numero di cifre significative.

| t (s) | x (cm) | Δt (s) | Δx (cm) | $v = \Delta x / \Delta t$ (cm/s) |
|------------|-------------|-------------------|--------------------|-------------------------------------|
| 0,00 | 16,0±0,2 | 0,10 | 1,0±0,4 | 10±4 |
| 0,10 | 17,0±0,2 | 0,10 | 1,4±0,4 | 14±4 |
| 0,20 | 18,4±0,2 | 0,10 | 1,6±0,4 | 16±4 |
| 0,30 | 20,0±0,2 | 0,10 | 2,1±0,4 | 21±4 |
| 0,40 | 22,1±0,2 | 0,10 | 2,4±0,4 | 24±4 |
| 0,50 | 24,3±0,2 | 0,10 | 2,7±0,4 | 27±4 |
| 0,60 | 27,3±0,2 | 0,10 | 3,0±0,4 | 30±4 |
| 0,70 | 30,2±0,2 | 0,10 | 3,4±0,4 | 34±4 |
| 0,80 | 33,6±0,2 | 0,10 | 3,8±0,4 | 38±4 |
| 0,90 | 37,4±0,2 | 0,10 | 4,1±0,4 | 41±4 |
| 1,00 | 41,5±0,2 | 0,10 | 4,4±0,4 | 44±4 |
| 1,10 | 45,9±0,2 | 0,10 | 4,8±0,4 | 48±4 |
| 1,20 | 50,7±0,2 | 0,10 | 5,2±0,4 | 52±4 |
| 1,30 | 55,9±0,2 | 0,10 | 5,5±0,4 | 55±4 |
| 1,40 | 61,4±0,2 | 0,10 | 5,8±0,4 | 58±4 |
| 1,50 | 67,2±0,2 | 0,10 | 6,2±0,4 | 62±4 |
| 1,60 | 73,4±0,2 | 0,10 | 6,6±0,4 | 66±4 |
| 1,70 | 80,0±0,2 | 0,10 | 6,9±0,4 | 69±4 |
| 1,80 | 86,9±0,2 | 0,10 | 7,2±0,4 | 72±4 |
| 1,90 | 94,1±0,2 | 0,10 | 7,6±0,4 | 76±4 |
| 2,00 | 101,7±0,2 | 0,10 | 7,8±0,4 | 78±4 |
| 2,10 | 109,5±0,2 | 0,10 | 8,3±0,4 | 83±4 |
| 2,20 | 117,8±0,2 | 0,10 | 8,6±0,4 | 86±4 |
| 2,30 | 126,4±0,2 | 0,10 | 8,9±0,4 | 89±4 |
| 2,40 | 135,3±0,2 | 0,10 | 9,3±0,4 | 93±4 |
| 2,50 | 144,6±0,2 | 0,10 | 9,7±0,4 | 97±4 |
| 2,60 | 154,3±0,2 | 0,10 | 10,0±0,4 | 100±4 |
| 2,70 | 164,3±0,2 | 0,10 | | |

tab. 2

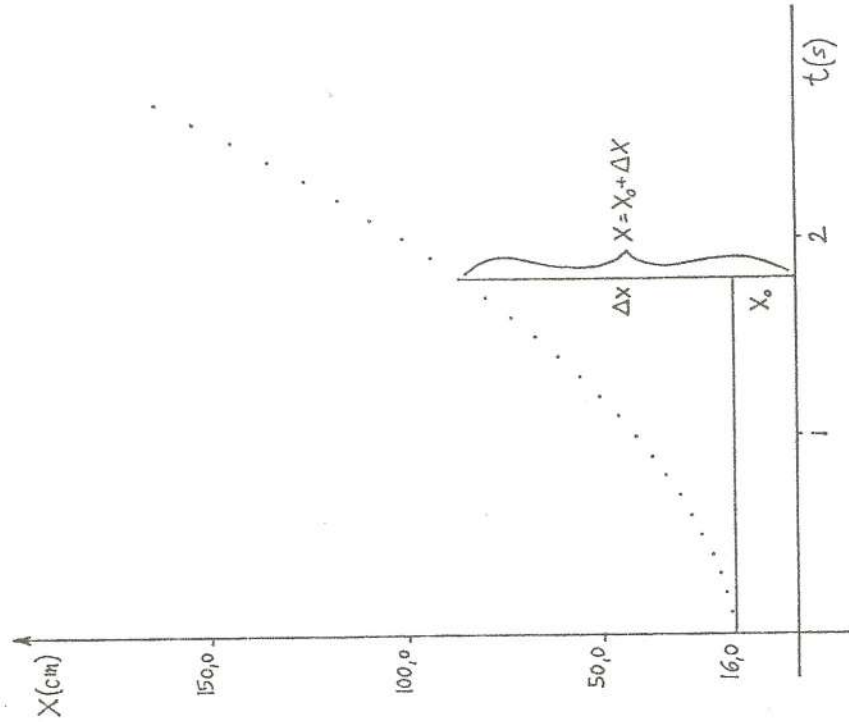


fig. 2

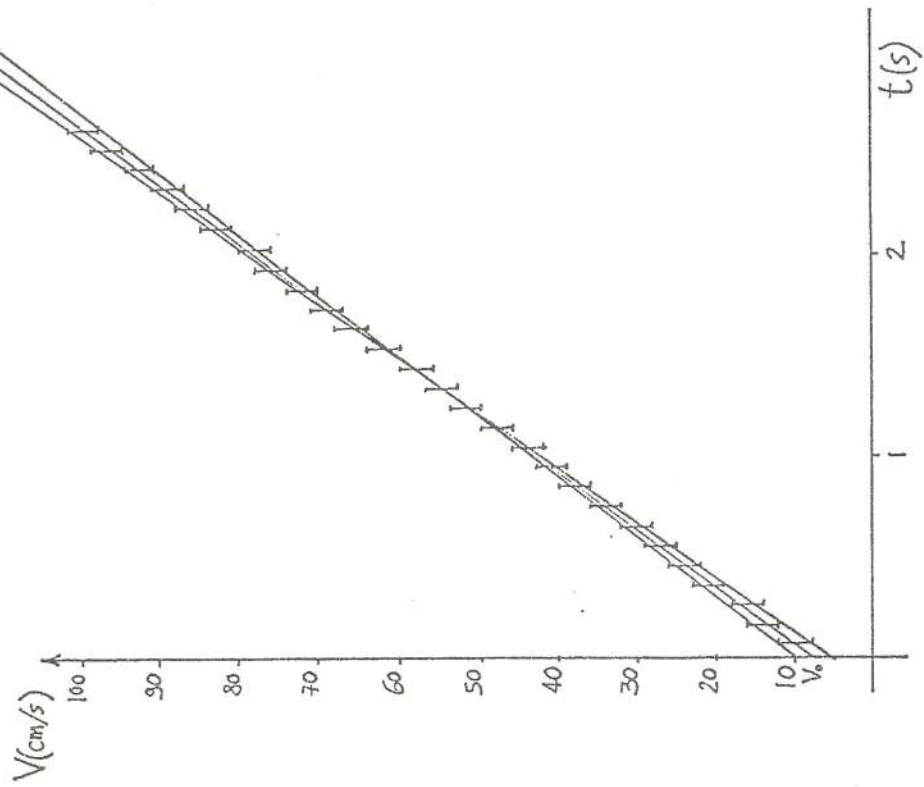


fig. 4

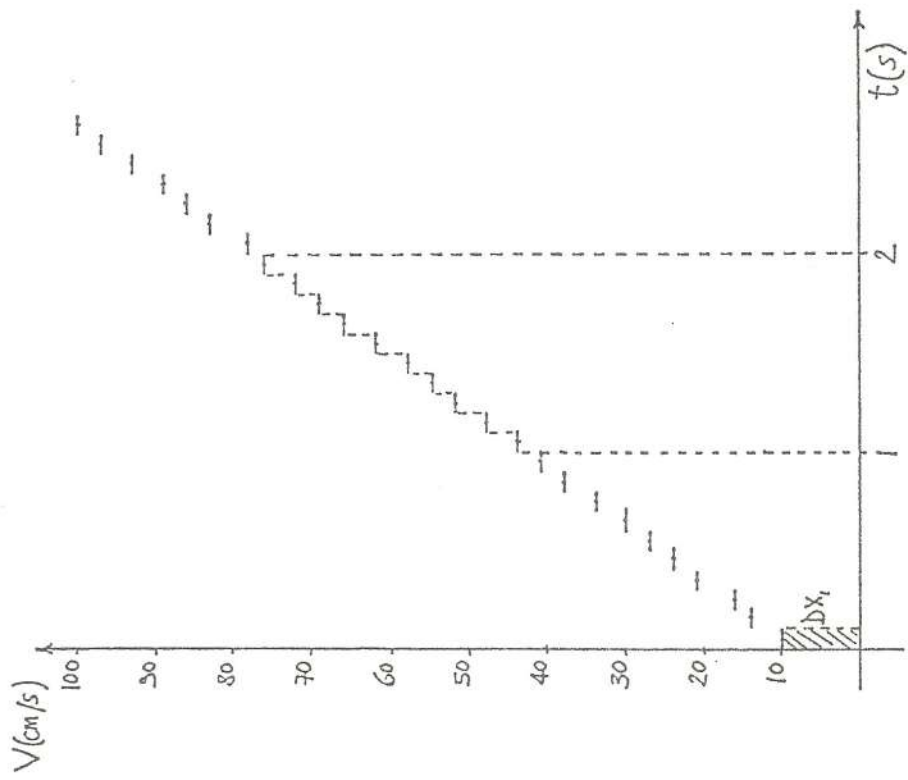


fig. 3

Il passaggio dal grafico n°3 (a gradini) a quello n°4 (continuo) si può giustificare in modo intuitivo (senza ricorrere al teorema della media) attribuendo il valore della velocità media, ricavato per un toc, all'istante intermedio dell'intervallo.

Dopo aver definito l'accelerazione si fa notare che questa coincide con la pendenza della retta nel grafico di fig.4. Poichè nell'ambito delle incertezze si potrà tracciare un fascio di rette che passa per i punti sperimentali, si considerano le rette di massima e di minima pendenza per poter calcolare l'accelerazione massima (a_{max}) e minima (a_{min}) e poter esprimere in questo modo l'accelerazione con la sua incertezza. Il valore dell'accelerazione corrisponderà alla pendenza della retta centrale di questo fascio (N.B. Tale pendenza si potrebbe trovare direttamente facendo la media aritmetica dell'accelerazione massima e minima).

Sempre relativamente ai dati riportati dal gruppo n°1 si ottiene:

$$\text{pendenza massima} = a_{max} = 36,25 \text{ cm/s}^2 \quad (1)$$

$$\text{pendenza minima} = a_{min} = 33,09 \text{ cm/s}^2 \quad (2)$$

$$\text{pendenza centrale} = a = 35,00 \text{ cm/s}^2 \quad (3)$$

$$\text{(N.B. } a = \frac{a_{max} + a_{min}}{2} = 34,67 \text{ cm/s}^2 \text{)}$$

$$\text{Da } = \frac{a_{max} - a_{min}}{2} = 1,58 \text{ cm/s}^2 \quad (4)$$

$$a = (0,35 \pm 0,02) \text{ m/s}^2 \quad (5)$$

Seguono i dati relativi a tutti i gruppi:

massa in movimento = $(473 \pm 2) \cdot 10^{-3}$ kg

| m rondelle portapesi (10^{-3} kg) | I% | Fapplicata (N) | I% | a (m/s^2) | I% | F/a (kg) | I% |
|--------------------------------------|----|----------------|----|---------------|----|-----------|----|
| 20,0±0,2 | 1 | 0,196±0,002 | 1 | 0,35±0,02 | 6 | 0,56±0,04 | 7 |
| 40,0±0,4 | 1 | 0,392±0,004 | 1 | 0,80±0,06 | 8 | 0,49±0,05 | 9 |
| 60,0±0,6 | 1 | 0,588±0,006 | 1 | 1,11±0,04 | 4 | 0,53±0,03 | 5 |
| 80,0±0,8 | 1 | 0,785±0,008 | 1 | 1,5 ±0,1 | 7 | 0,52±0,04 | 8 |
| 100,0±1,0 | 1 | 0,98 ±0,01 | 1 | 2,0 ±0,2 | 10 | 0,49±0,05 | 11 |

tab. 3

Questi dati permettono di introdurre facilmente lo studio del moto dal punto di vista dinamico.

Aggiungendo alla tabella la penultima colonna, si può infatti far notare ai ragazzi che il rapporto tra la forza F che provoca il moto [forza peso = massa rondelle (kg) \cdot 9,81 (m/s^2)] e l'accelerazione ricavata a , è costante nell'approssimazione delle incertezze: questo significa che le due grandezze sono direttamente proporzionali; esse sono quindi legate da una relazione del tipo $F = k \cdot a$, dove la costante di proporzionalità è la massa totale in movimento.

Rappresentando in un grafico la forza F in funzione dell'accelerazione a , si ottiene una retta passante per l'origine dalla cui pendenza si può ricavare la costante di proporzionalità.

Se succede che la retta sperimentale non passa per l'origine, ma ha un'intercetta positiva, tale intercetta rappresenta la forza di resistenza dell'aria che si fa sentire sul carrello.

E' inoltre importante fare un'analisi delle forze agenti sul carrello e far "scoprire" agli studenti che F è la risultante delle forze applicate (a meno della resistenza dell'aria).

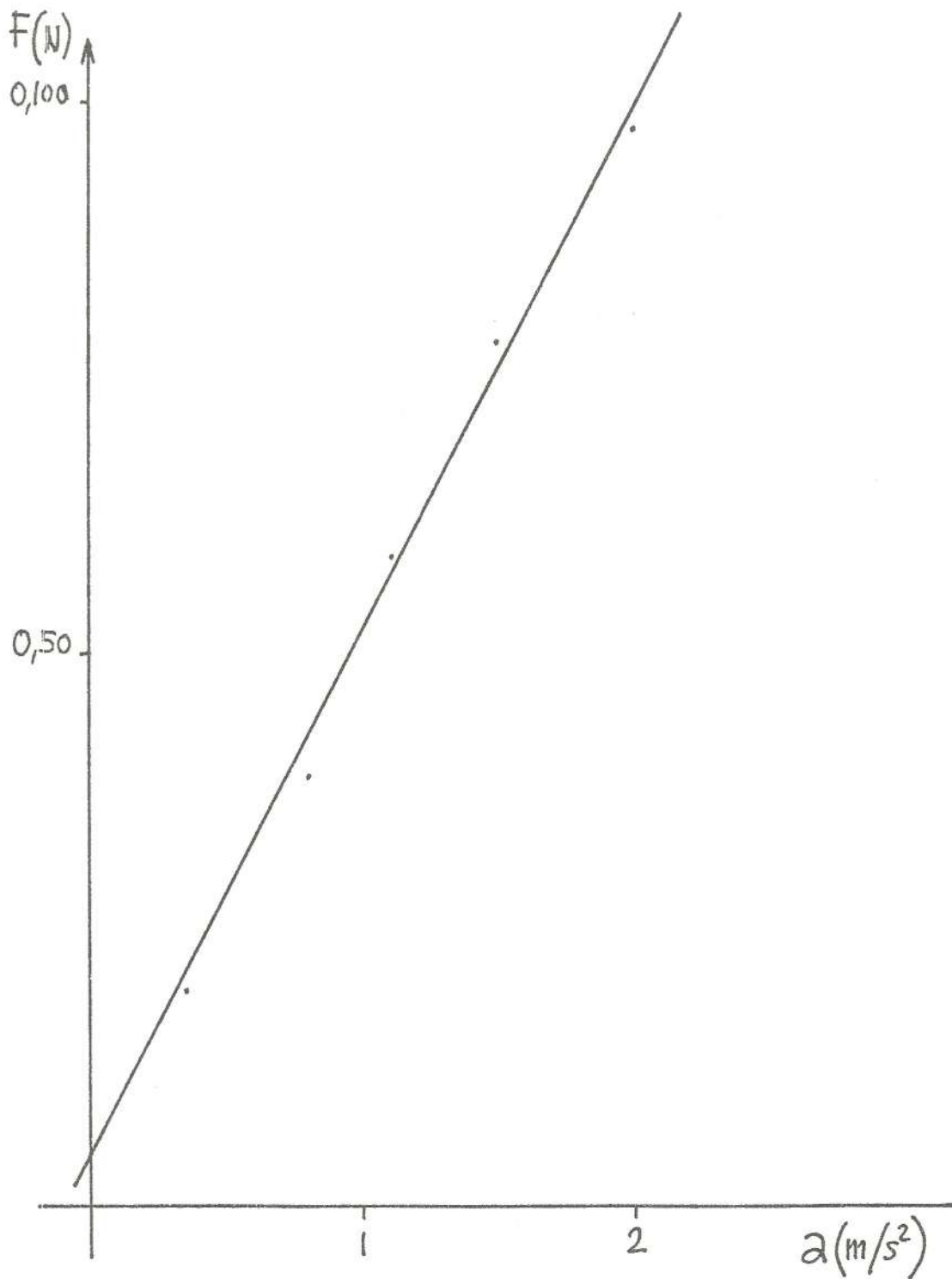


fig. 5

3. La legge oraria del moto

Si può infine sottolineare come lo spostamento in un toc, ad esempio nel primo, si può ricavare dall'area sottesa dal diagramma v-t in corrispondenza di quell'intervallo (fig.2 e fig.3):

$$\begin{aligned} \Delta x_1 &= (t_1 - t_0) \cdot v_1 & (6) \\ &= 0,1 \text{ s} \cdot 10 \text{ cm/s} \\ &= 1 \text{ cm} \end{aligned}$$

In particolare lo spostamento effettuato durante un qualsiasi intervallo di tempo è dato dalla somma delle aree di fig.3. (equivalente all'area del trapezio di fig.4).

Si è pronti ora per dimostrare la legge oraria del moto:

$$\Delta x = v_0 \cdot \Delta t + 1/2 \Delta v \cdot \Delta t \quad (7)$$

$$\Delta v = a \cdot \Delta t \quad (8)$$

sostituendo la (8) nella (7) si ottiene

$$\begin{aligned} \Delta x &= v_0 \cdot \Delta t + 1/2 a \cdot \Delta t \cdot \Delta t & (9) \\ &= v_0 \cdot \Delta t + 1/2 a \cdot \Delta t^2 \end{aligned}$$

La posizione x al passare del tempo è

$$x(t) = x_0 + \Delta x \quad (10)$$

perciò

$$x(t) = x_0 + v_0 \cdot \Delta t + 1/2 a \cdot \Delta t^2 \quad (11)$$

posizione iniziale

velocità iniziale

costante del moto

LEGGE ORARIA DEL MOTO
struttura che compare
sempre in un moto uni-
formemente accelerato

La relazione precedente rappresenta l'equazione generale di un moto rettilineo uniformemente accelerato: nel caso di un moto in cui il punto iniziale coincida con l'origine del sistema di riferimento $x_0 = 0$; il secondo termine non compare nel caso di un oggetto che parte da fermo ($v_0 = 0$).

Va osservato, infine, che se l'accelerazione è nulla la (11) si riduce alla relazione del moto rettilineo uniforme.

Secondo incontro

PROPORZIONALITA' DIRETTA: CONDUTTORI OHMICI

(a cura di Mauro Bellei e Patrizio Bigi)

Premessa

Per studiare i fenomeni che si verificano ogni giorno in natura, dobbiamo schematizzare le situazioni facendo ricorso a modelli matematici per scoprire, di volta in volta, quali relazioni leghino fra loro le grandezze che siamo riusciti a misurare.

In questa esperienza, che prende in esame il fenomeno studiato da Ohm della conducibilità elettrica nei metalli, incontreremo la più semplice delle relazioni, la proporzionalità diretta; essa è già stata trattata da tempo a scuola, quando si affronta tale argomento, ma si presta, per la sua semplicità, a un primo utilizzo dell'elaboratore nell'analisi dei dati sperimentali.

Si userà il Lotus 123, un tabellone o foglio elettronico che consente di predisporre tabelle, operare sui dati inseriti, costruire grafici. Si acquisisce facilmente familiarità con il programma perchè è dotato di una guida all'uso sempre in linea, che può essere richiamata dall'operatore in qualsiasi momento premendo semplicemente il tasto F1.

Il risparmio di tempo nel condurre uno studio completo su una legge fisica è notevole e porta a indubbi vantaggi nell'apprendimento dei concetti da parte dello studente.

Prerequisiti richiesti

- Conoscere e riconoscere una proporzionalità diretta,
- saper calcolare la pendenza di una retta.

Elenco degli strumenti usati

- Alimentatore stabilizzato (intensità massima di corrente = 2 A; se non fosse stabilizzato bisognerebbe comunque livellarlo con un condensatore da 1000 μ F)
- due morsetti da tavolo,
- due supporti isolanti,
- filo di costantana di diametro 0,2 mm
- due tester ICE,
- cavi di collegamento.

Schema di montaggio

Il montaggio dell'apparecchiatura viene eseguito come da schema.

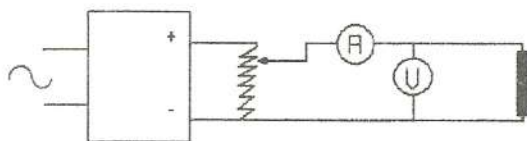


Fig. 1

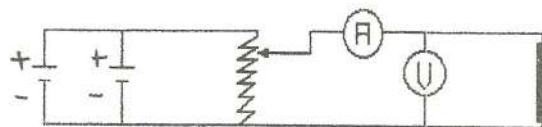


Fig. 2

Si mettono in evidenza i seguenti punti :

1. E' consigliabile che ogni gruppo usi una lunghezza diversa del filo di constantana; si suggeriscono i seguenti valori: 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130 centimetri. In tal modo si avrà un maggiore numero di dati per studiare la dipendenza della resistenza dalla lunghezza del filo .
2. Vi sono degli alimentatori stabilizzati a prezzo contenuto che hanno un range di tensioni che va da 1,2 a 12 V con corrente massima di 2 A.
In parallelo all'alimentatore occorre mettere una resistenza regolabile da 10 ohm (vedi schema di montaggio).
Tale sistema è valido anche se vengono usate pile (Fig. 2).
3. Per evitare perturbazioni elevate è consigliabile inserire il voltmetro a valle dell'amperometro (Fig. 3) piuttosto che a monte (Fig. 4). Infatti inserendo il voltmetro a monte la caduta di tensione misurata è la somma delle cadute di tensione sulla resistenza interna dell'amperometro e sulla resistenza esterna. Nel nostro caso tali cadute sono dello stesso ordine di grandezza.

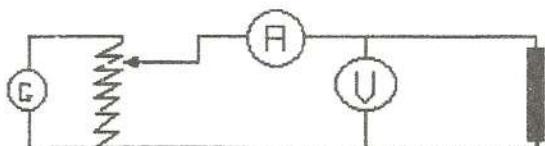


Fig. 3

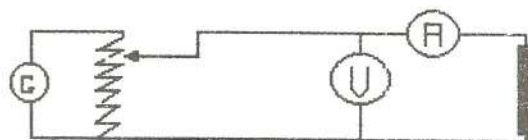


Fig. 4

(A questo proposito va ricordato che gli strumenti usati nell'esperienza erano :

- un voltmetro analogico con fondo scala di tensione pari a 10 V, di classe 1 e resistenza interna 20 kohm/volt, per cui, con tale fondo scala, la sua resistenza interna era pari a 200 kohm
- un amperometro analogico con fondo scala pari a 500 mA, di classe 1 e resistenza interna che può variare da 1 a 1,5 ohm, aumentando al diminuire del fondo scala).

Si deve tenere presente che gli strumenti digitali hanno resistenze interne maggiori e quindi a maggior ragione l'inserimento degli strumenti deve essere fatto nel modo illustrato.

4. Nell'inserire gli strumenti occorre fare attenzione alla loro polarità.

Elaborazione e analisi dei dati

Una volta raccolti, i dati vengono elaborati mediante il computer con il foglio elettronico Lotus 123. Essi vengono inseriti in una tabella completa di intestazioni e unità di misura (vedi tabella 2); le incertezze non vengono riportate, limitandosi a indicare le cifre significative.

Dai dati misurati si può ipotizzare una proporzionalità diretta; per una conferma dell'ipotesi si può calcolare in un'altra colonna il rapporto V/I. Se tale rapporto può essere considerato costante entro gli errori di misura, l'ipotesi è confermata.

L'incertezza sul rapporto V/I viene calcolata con le formule della propagazione degli errori:

$$\Delta(V/I) = (\Delta V/V + \Delta I/I) \cdot (V/I)$$

dove il simbolo Δ indica l'incertezza assoluta sulla grandezza che segue.

| V (volt) | I (ampere) | V/I (ohm) | $y = m \cdot x$ (volt) |
|-------------|---------------|--------------|---------------------------|
| 0,0 | 0,000 | -- | 0,000 |
| 0,4 | 0,025 | 16,0 | 0,412 |
| 0,8 | 0,045 | 17,8 | 0,741 |
| 1,2 | 0,070 | 17,1 | 1,152 |
| 1,6 | 0,095 | 16,8 | 1,564 |
| 2,0 | 0,120 | 16,7 | 1,975 |
| 2,4 | 0,145 | 16,6 | 2,387 |
| 2,8 | 0,170 | 16,5 | 2,798 |
| 3,2 | 0,195 | 16,4 | 3,210 |
| 3,6 | 0,220 | 16,4 | 3,621 |
| 4,0 | 0,245 | 16,3 | 4,033 |
| 4,4 | 0,270 | 16,3 | 4,444 |
| 4,8 | 0,290 | 16,6 | 4,774 |
| 5,2 | 0,315 | 16,5 | 5,185 |

NOTE

Si può calcolare il valor medio e la semidispersione massima dei valori ottenuti nella colonna V/I utilizzando le seguenti funzioni matematiche di Lotus 123:

- @media(zona), che esegue il calcolo del valor medio della zona indicata;
- @max(zona), che ricerca il valore massimo della zona indicata;
- @min(zona), che ricerca il valore minimo della zona indicata.

| | | |
|------------------|------|-----|
| valore medio V/I | 16,6 | ohm |
| semidispers. V/I | 0,9 | ohm |

| Regressione: | |
|-------------------|----------|
| Costante | 0 |
| Err std di val Y | 0,031068 |
| R quadrato | 0,999655 |
| N.o di elementi | 14 |
| Gradi di liberta' | 13 |
| Coefficiente(i) X | 16,46074 |
| Err std di coef. | 0,044677 |

TABELLA 2

Interpretando la differenza di potenziale e l'intensità di corrente misurate come coordinate di un piano cartesiano è possibile costruire un grafico rappresentato da una sequenza di simboli. A questo scopo si riportano in ascisse (Zona X) i valori di I e in ordinate (Zona A) quelli di V ; per rappresentare solo i dati sperimentali si usa la sequenza di comandi: **Grafici Opzioni Formato A Simboli**. La figura va infine completata aggiungendo i diversi titoli nell'intestazione, in ascisse e in ordinate mediante i comandi: **Grafici, Opzioni, Titoli, Primo, Secondo, X-Asse, Y-Asse**. Il risultato che si ottiene è quello di figura 5.

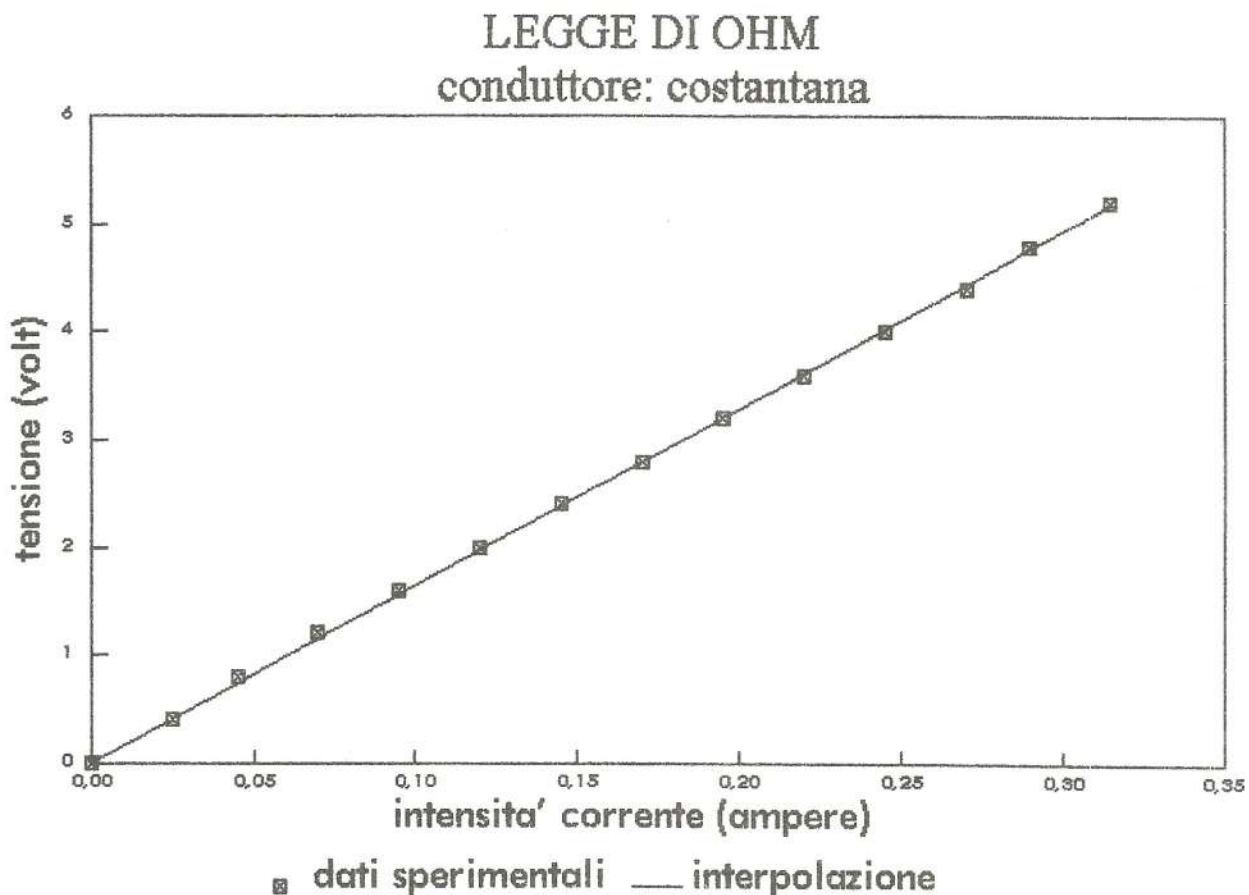


Fig. 5

Dall'analisi del grafico si può dedurre che i punti sono con buona approssimazione allineati su una retta uscente dall'origine e questo conferma la tesi della proporzionalità diretta.

Retta di interpolazione

L'interpolazione dei dati si basa sulla regressione lineare partendo dall'ipotesi, suggerita dal grafico precedente, che le grandezze siano direttamente proporzionali. La regressione riesce utile quando si vuole dare continuità a una serie di dati.

Vengono riportati i comandi da attivare per l'elaborazione:

- Dati
- Statistica

- X-Zona (bisogna indicare la zona dei dati che sono riportati in ascisse: nel nostro caso i valori di corrente)
- Y-Zona (bisogna indicare la zona dei dati che sono riportati in ordinate: nel nostro caso i valori di tensione)
- Zona Emissione (bisogna indicare la zona in cui si vuole che vengano scritti i risultati del calcolo)
- Intercetta/Azzera (con questa voce si forza l'intercetta a zero: questo equivale a dire che la retta deve passare per l'origine e quindi che tra le due grandezze vi è una proporzionalità diretta)
- Via (si dà inizio all'elaborazione)

Dopo aver effettuato i calcoli l'elaboratore emette i risultati nella zona stabilita sotto la voce "Regressione:"
Esaminiamo alcune voci (Tab. 2):

| | |
|-------------------|---|
| Costante | esprime il valore dell'intercetta: tale valore ovviamente sarà zero, |
| Coefficiente(i) X | esprime il coefficiente angolare della retta (tale valore deve essere confrontato con il valore medio del rapporto V/i calcolato precedentemente) |

Per tracciare il grafico della retta si calcolano le ordinate dei suoi punti che hanno per ascissa i valori sperimentali dell'intensità di corrente: esse sono ottenute dall'equazione della retta:

$$V = 16,46073 * I$$

dove I rappresenta l'intensità della corrente nel filo conduttore e V la differenza di potenziale ai suoi estremi.

Viene infine tracciato il grafico, riportando le ordinate dei punti in zona B del sotto menu di Grafici; per rappresentare la linea che li congiunge, e non i simboli come prima, si attiva la sequenza di comandi: **Grafici Opzioni Formato B Righe**. Il risultato è mostrato nella figura 6. Le legende "dati sperimentali" e "interpolazione" sono state introdotte usando i comandi: **Grafici, Opzioni, Legende, A, B**.

OSSERVAZIONI

I rettangoli non rappresentano gli intervalli di incertezza.

La retta di regressione rappresenta la retta che ogni studente traccerebbe "a occhio" per interpolare i dati.

Il confronto fra la posizione dei punti che rappresentano i dati sperimentali e quella dei punti della retta di regressione ottenuta con l'elaboratore evidenzia una differenza trascurabile. Ciò conferma la validità dell'ipotesi di una proporzionalità diretta fra la differenza di potenziale ai capi del filo conduttore e l'intensità della corrente che lo attraversa.

Relazione tensione-corrente per il filamento di una lampadina e per un diodo a semiconduttore

(a cura di: Cecilia Dal Fiore e Alessandro Franzetti)

La presente esperienza si propone di determinare sperimentalmente le caratteristiche tensione-corrente del filamento di una lampadina e di un diodo al silicio.

Materiale utilizzato:

- alimentatore stabilizzato con tensione d'uscita variabile 0V÷20V DC;
- n°2 multimetri digitali;
- lampadina da 12V;
- diodo al silicio;
- cavetti di collegamento.

Lo schema circuitale adottato per le misure è rappresentato in figura 1.

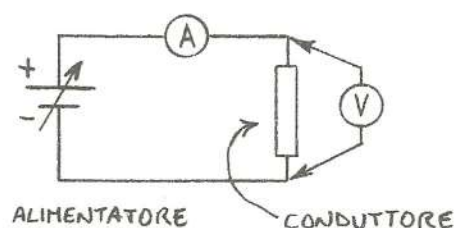


fig.1

La tensione fornita dall'alimentatore viene applicata ai capi del conduttore in esame e misurata con un voltmetro digitale, mentre la corrente circolante è rilevata da un amperometro digitale.

La realizzazione circuitale del generatore di tensione variabile può essere ottenuta anche tramite tre pile da 4.5V poste in serie e collegate ad un potenziometro da 1k Ω , come da schema seguente (fig.2).

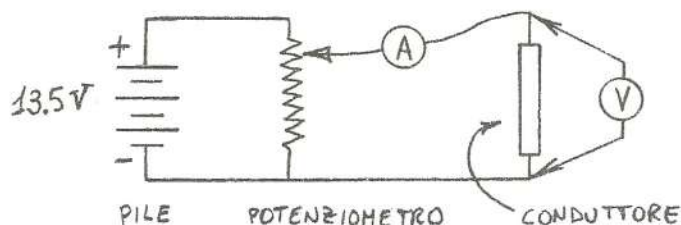


fig.2

Per quanto riguarda la lampadina in esame, si è adottata la scelta di una spia luminosa del tipo comunemente montato nelle autoradio e quindi facilmente reperibile. Il basso assorbimento di queste lampadine (max. 20mA) costituisce un aspetto particolarmente importante nel presente esperimento dato l'impiego di un amperometro avente resistenza interna non trascurabile (con una corrente di 0.5A la caduta di tensione sull'amperometro sarebbe dell'ordine di 10V, impedendo pertanto l'accensione della lampadina).

L'incertezza assoluta in misure ottenute con multimetri digitali

L'incertezza associata alla lettura di uno strumento digitale è dovuta a due componenti: una è legata alla parte analogica dello strumento e l'altra al processo di quantizzazione ed all'errore di linearità connessi alla conversione analogico-digitale (A/D). L'accuratezza dello strumento è solitamente fornita dal costruttore nella forma

$$\% \text{ dl} + n \text{ dgt}$$

dove il primo termine (percentuale della lettura) è più propriamente legato alla parte analogica dello strumento, mentre il secondo è prevalentemente originato dal processo di conversione A/D. La scrittura "n dgt" sta ad indicare un'incertezza pari a n volte la quantità di informazione più piccola apprezzabile sul display (in pratica n volte la cifra meno significativa del dato letto). E' utile osservare inoltre che la percentuale di errore ed il numero "n" che compaiono nell'espressione dell'accuratezza, relativamente ad uno stesso strumento, possono variare a seconda del fondo scala selezionato.

Nella presente esperienza si sono utilizzati multimetri a 3digit e 1/2, cioè strumenti il cui display visualizza 3 cifre reali più una quarta cifra (la più significativa) che può assumere solamente due valori: 0 o 1. La massima lettura ottenibile è quindi pari a 1999, mentre la posizione del punto decimale si sposta al variare del fondo scala impostato.

Si conclude questa breve parentesi sugli strumenti digitali con un semplice esempio numerico.

Esempio:

Si vuole determinare l'incertezza assoluta sulla massima lettura di un multimetro utilizzato come voltmetro con fondo scala impostato a 200mV, nell'ipotesi che l'accuratezza sia pari a

$$0.5\% \text{ dl} + 2 \text{ dgt.}$$

$$V_{\text{max}} = 199.9\text{mV}$$

| | |
|-----------------|-------|
| 0.5% dl | 1.0mV |
| 2 dgt | 0.2mV |
| | <hr/> |
| errore assoluto | 1.2mV |

Si può pertanto concludere che $V_{\text{max}} = (199,9 \pm 1.2) \text{ mV}$.

Si osservi che nel caso in questione può essere considerata corretta l'indicazione dell'incertezza assoluta con due cifre significative in quanto, per gli strumenti digitali, è nullo l'errore di lettura dovuto all'operatore che priverebbe di significato la seconda cifra dell'incertezza.

L'accuratezza dei due multimetri utilizzati nella presente esperienza è rispettivamente uguale a (0.8% dl + 1dgt) per il voltmetro, e pari a (1.0% dl + 1dgt) per l'amperometro, indipendentemente dai fondo scala adottati.

Si passa ora alla presentazione dei dati raccolti che sono stati elaborati tramite Lotus 1-2-3. I punti dei grafici sono rappresentati con le rispettive incertezze sperimentali.

Lampadina

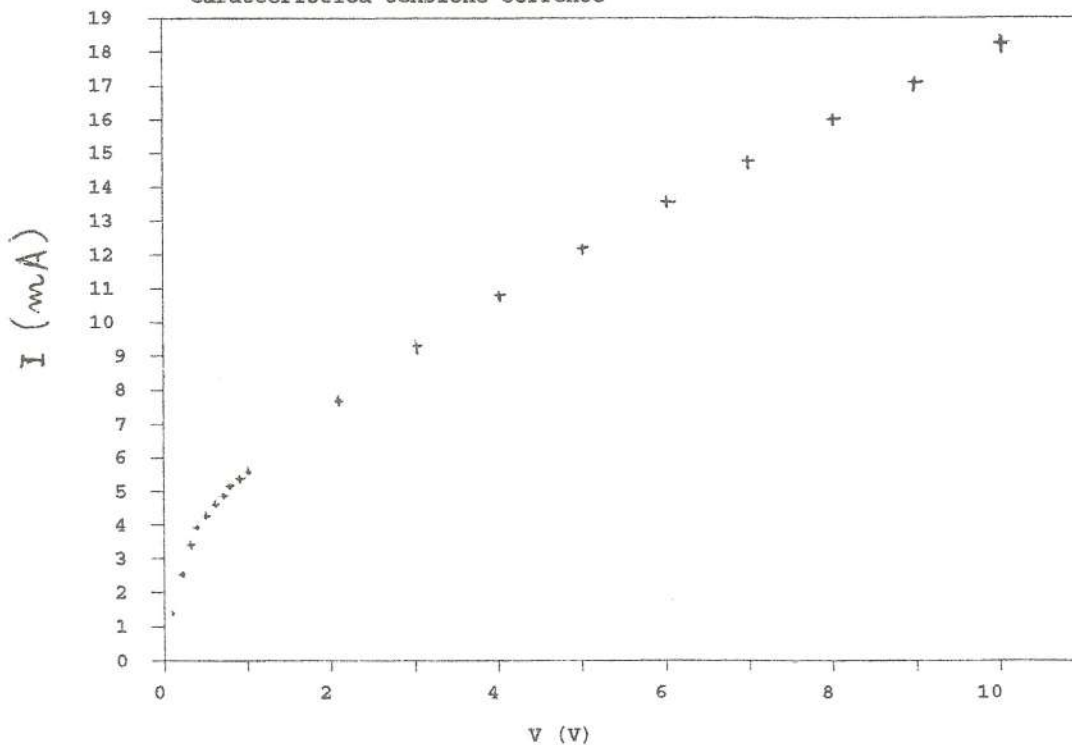
Tabella 1

Le misurazioni sono state raccolte a passi di 0.1V nell'intervallo 0V-1V e a passi di 1V nell'intervallo 1V-10V.

| Tensione (V) | Corrente (mA) |
|---------------|---------------|
| 0,000 ± 0,001 | 0,00 ± 0,01 |
| 0,101 ± 0,002 | 1,42 ± 0,02 |
| 0,203 ± 0,003 | 2,57 ± 0,04 |
| 0,317 ± 0,004 | 3,47 ± 0,04 |
| 0,407 ± 0,004 | 3,94 ± 0,05 |
| 0,503 ± 0,005 | 4,32 ± 0,05 |
| 0,608 ± 0,006 | 4,65 ± 0,06 |
| 0,703 ± 0,007 | 4,92 ± 0,06 |
| 0,810 ± 0,007 | 5,19 ± 0,06 |
| 0,905 ± 0,008 | 5,42 ± 0,06 |
| 1,009 ± 0,009 | 5,65 ± 0,07 |
| 2,09 ± 0,03 | 7,75 ± 0,09 |
| 3,03 ± 0,03 | 9,32 ± 0,10 |
| 4,01 ± 0,04 | 10,81 ± 0,12 |
| 5,01 ± 0,05 | 12,19 ± 0,13 |
| 6,01 ± 0,06 | 13,57 ± 0,15 |
| 6,99 ± 0,07 | 14,77 ± 0,16 |
| 8,02 ± 0,07 | 16,00 ± 0,17 |
| 9,00 ± 0,08 | 17,09 ± 0,18 |
| 10,05 ± 0,09 | 18,26 ± 0,19 |

Lampadina

Caratteristica tensione-corrente



La rappresentazione grafica permette di osservare la non linearità della caratteristica tensione-corrente della lampadina. Più precisamente si nota che per piccoli valori della tensione la lampadina presenta un basso valore di resistenza, mentre per tensioni superiori a 2V l'andamento della curva è approssimativamente lineare. Tale risultato è da attribuire alle variazioni di temperatura a cui è soggetto il filamento della lampadina quando varia la tensione di alimentazione. E' noto infatti che molti metalli hanno una resistività ρ che dipende in maniera non trascurabile dalla temperatura t in base alla relazione empirica

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha t)$$

dove ρ_0 è la resistenza specifica del materiale alla temperatura di riferimento di 0°C e α è un coefficiente di temperatura anch'esso caratteristico della sostanza in esame (cfr. PUGLIESE JONA, *Fisica e laboratorio*, vol.2, Loescher Editore, pagg.88-90).

Si può concludere osservando che il materiale costituente il filamento della lampadina ha resistività crescente all'aumentare della tensione di alimentazione e quindi della temperatura ($\alpha > 0$), ma che esistono altre sostanze nelle quali un aumento della temperatura è accompagnato da una diminuzione della resistività ($\alpha < 0$).

Diodo

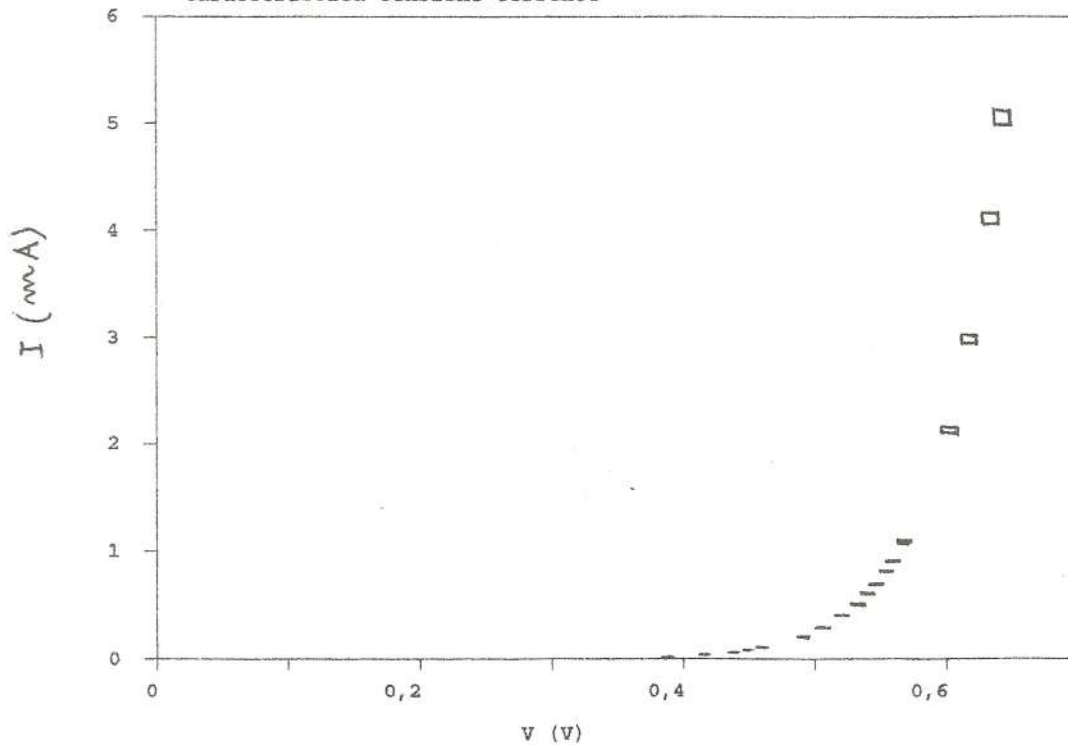
Tabella 2

Le misurazioni sono state raccolte a passi di 0.02mA nell'intervallo 0mA-0.1mA, a passi di 0.1mA nell'intervallo 0.1mA-1mA e a passi di 1mA nell'intervallo 1mA-5mA.

| Corrente (mA) | Tensione (V) |
|-----------------|---------------|
| 0,0000 ± 0,0001 | 0,000 ± 0,001 |
| 0,0196 ± 0,0003 | 0,387 ± 0,004 |
| 0,0386 ± 0,0005 | 0,416 ± 0,004 |
| 0,0637 ± 0,0007 | 0,438 ± 0,005 |
| 0,0837 ± 0,0009 | 0,449 ± 0,005 |
| 0,1068 ± 0,0012 | 0,460 ± 0,005 |
| 0,214 ± 0,003 | 0,491 ± 0,005 |
| 0,290 ± 0,004 | 0,505 ± 0,005 |
| 0,405 ± 0,005 | 0,520 ± 0,005 |
| 0,516 ± 0,006 | 0,532 ± 0,005 |
| 0,608 ± 0,007 | 0,540 ± 0,005 |
| 0,693 ± 0,008 | 0,546 ± 0,005 |
| 0,819 ± 0,009 | 0,554 ± 0,005 |
| 0,911 ± 0,010 | 0,559 ± 0,005 |
| 1,098 ± 0,012 | 0,568 ± 0,006 |
| 2,14 ± 0,03 | 0,601 ± 0,006 |
| 2,99 ± 0,04 | 0,617 ± 0,006 |
| 4,12 ± 0,05 | 0,633 ± 0,006 |
| 5,06 ± 0,06 | 0,643 ± 0,006 |

Diode al silicio

Caratteristica tensione-corrente



Anche per il diodo si osserva che la caratteristica tensione-corrente non è lineare. Per tensioni inferiori a 0.5V il diodo si comporta come un circuito aperto, mentre per tensioni superiori il dispositivo diventa fortemente conduttore.

Ci si propone ora di verificare se i dati ottenuti sperimentalmente sono correttamente interpretabili in base all'equazione teorica della caratteristica di un diodo. Tale relazione assume la forma

$$I = I_0 \cdot (e^{V/\eta VT} - 1) \quad (1)$$

dove I_0 è la corrente inversa di saturazione del dispositivo, η è un coefficiente legato al tipo di semiconduttore di cui è fatto il diodo, e VT è la tensione termica definita come

$$VT = k \cdot T / e$$

essendo k la costante di Boltzman, e la carica dell'elettrone e T la temperatura ambiente in gradi Kelvin che, nel presente caso, è stata misurata in 293 K.

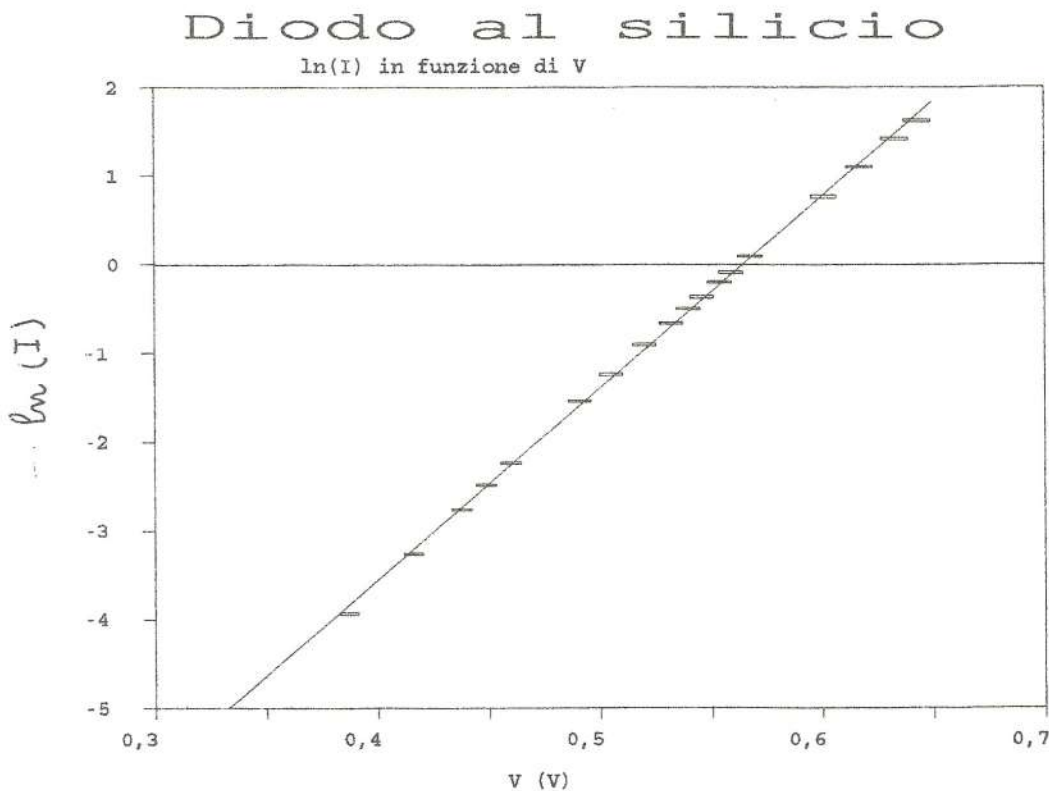
Tipicamente, per un diodo al silicio come quello in esame, il parametro I_0 è dell'ordine di alcuni nA ed il coefficiente η vale circa due (cfr. MILLMAN E HALKIAS, *Dispositivi e circuiti elettronici*, Boringhieri, pagg.169-172).

Per determinare i valori di I_0 e η originanti la curva teorica che meglio interpola i nostri dati sperimentali, si è studiata la relazione tra la tensione V ed il logaritmo naturale della corrente I

$$\ln(I) = (1/\eta VT)V + \ln(I_0) \quad (2)$$

Si può osservare come l'equazione così ottenuta sia lineare nelle variabili $\ln(I)$ e V . Ciò ha consentito di adottare il metodo della regressione lineare come criterio di ottimizzazione, e di eseguire l'elaborazione dei dati con notevole semplicità tramite Lotus 1-2-3.

Nel grafico seguente sono rappresentati, in sovrapposizione, l'andamento sperimentale di $\ln(I)$ in funzione di V , e la retta di regressione lineare che, come si può osservare, passa per tutti i punti e conferma quindi l'ipotesi di linearità espressa dalla (2).



Una volta calcolati per mezzo della regressione lineare il coefficiente angolare m e l'intercetta n della retta (2), è stato possibile risalire ai parametri I_0 e η tramite le relazioni

$$I_0 = e^n$$

$$\eta = 1/mVT$$

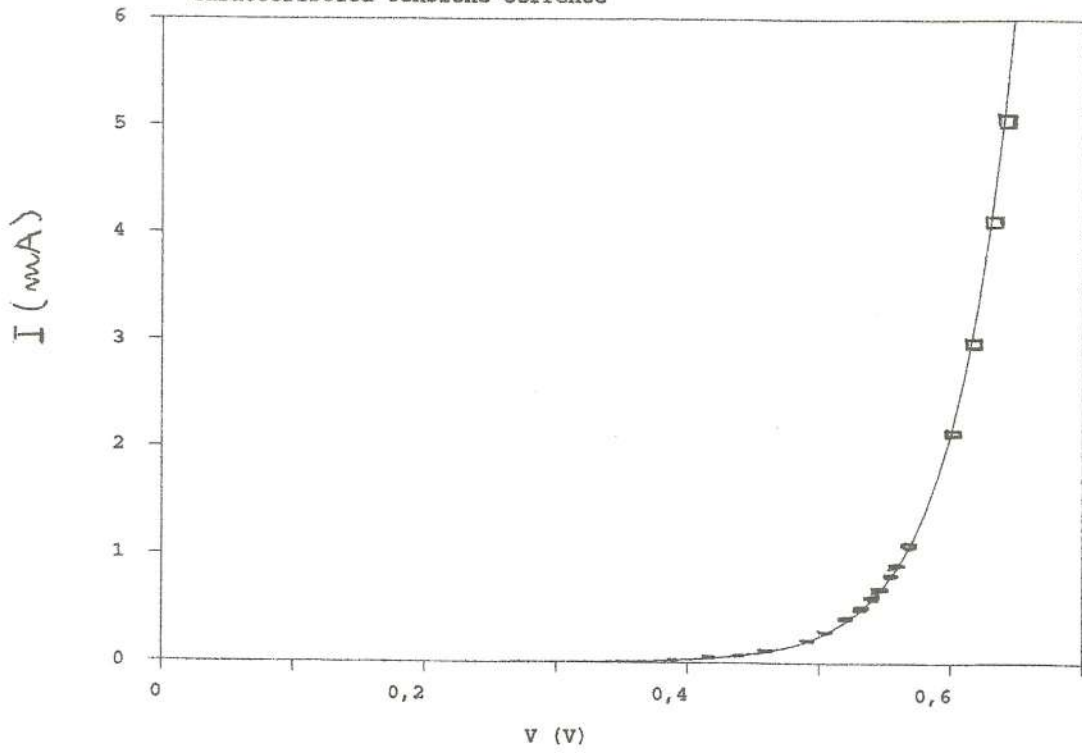
che hanno fornito i risultati $I_0 = 5.1 \text{ nA}$ e $\eta = 1.84$

E' possibile osservare quindi che, per il dispositivo in esame, i due parametri, valutati a partire dai dati raccolti, sono conformi ai valori tipici relativi ai diodi al silicio.

Per concludere, si riporta di seguito l'andamento della curva teorica (1), corrispondente ai parametri $I_0 = 5.1 \text{ nA}$, $\eta = 1.84$ e $T = 293 \text{ K}$, che, come si può notare, ben interpreta i punti sperimentali.

Diode al silicio

Caratteristica tensione-corrente



Quarto incontro

PROPORZIONALITA' INVERSA: RESISTENZA INTERNA DI UNA PILA

(a cura di Antonella Dall'Oglio e di Stefano Parolini)

Scopo dell' esperienza

Fare un' indagine sperimentale per verificare se la resistenza di un circuito alimentato con una pila è quella che appare effettivamente inserita.

Fasi dell' esperienza

- Misurazione e raccolta dati .
- Elaborazione dei dati mediante PC .

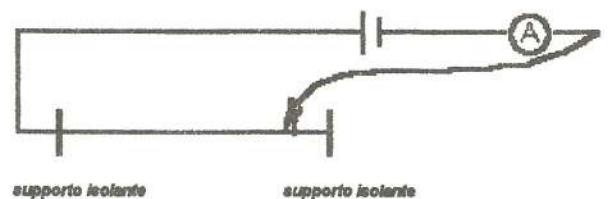
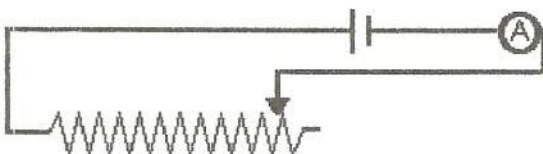
Prerequisiti

- Conoscenza e utilizzo di un multimetro analogico (Tester) .
- Conoscenza della proporzionalità diretta P.D. ed inversa, P.I. .
- Conoscenza delle leggi di Ohm.

Materiale occorrente

- N° 1 pila commerciale da 4,5 volt
- N° 1 Tester ICE tipo 680 R
- N° 2 supporti isolanti con morsetti
- Filo di costantana lungo 1 m del diametro di 0,2 mm
- Cavi elettrici di collegamento e "coccodrillo" per il contatto
- Asta metrica millimetrata

Schema del circuito e collegamenti



Modalità di esecuzione dell' esperienza

- Misurazione della d.d.p. della pila, a vuoto, utilizzando il tester come voltmetro (con fondoscala 10 V in cc).
- Misurazione della corrente, usando il tester come amperometro collegato in serie al circuito, in cui è inserita la resistenza esterna, rappresentata dal filo di costantana di lunghezza iniziale 1 m . Nelle successive misurazioni escludere, mediante il cursore-coccodrillo, ogni volta 10 cm del filo ottenendo in tutto dieci misurazioni.

Avvertenze sulla rilevazione dei dati

- Precisione nel fare il contatto tra "coccodrillo" e filo.
- Eseguire le misurazioni nel minor tempo possibile per evitare un calo della d.d.p. della pila.
- Cominciare inserendo la massima lunghezza del filo (1 m) e procedere con lunghezze decrescenti, per evitare che la pila si scarichi sensibilmente e che circolino subito correnti elevate con conseguente aumento di temperatura del filo .
- Usare l'asta metrica millimetrata, posta in corrispondenza al filo di costantana sul piano di lavoro, unitamente ad una squadra, per una lettura più accurata della lunghezza del filo.

Raccolta ed elaborazione dei dati

I dati rilevati sono riportati in tabella secondo il seguente ordine :

- colonna A: V (volt) = d.d.p. misurata a vuoto, costante per tutte le misure
- colonna B: l (m) = lunghezza misurata del filo
- colonna C: I (ampere) = corrente misurata nel circuito
- colonna D: Re (ohm) = resistenza esterna calcolata del filo
- colonna E: $1/I$ (1/ampere) = reciproco dell' intensità di corrente (colonna C), calcolato
- colonna F: R (ohm) = resistenza del circuito calcolata, rapporto tra d.d.p. e i .
- colonna G: Rint (ohm) = differenza tra la resistenza del circuito R e la resistenza esterna del filo

| A | B | C | D | E | F | G |
|-------------|---------------|---------------|-------------|-------------------|----------------|--------------------|
| V (volt) | l (metri) | I (ampere) | Re (ohm) | 1/I (1/ampere) | R=V/I (ohm) | Rint=R-Re (ohm) |
| 4,5 ± 0,1 | 1,000 ± 0,002 | 0,240 ± 0,005 | 17,0 ± 0,3 | 4,17 ± 0,09 | 18,8 ± 0,8 | 1,8 ± 1,1 |
| 4,5 ± 0,1 | 0,900 ± 0,002 | 0,250 ± 0,005 | 15,3 ± 0,3 | 4,00 ± 0,08 | 18,0 ± 0,8 | 2,7 ± 1,1 |
| 4,5 ± 0,1 | 0,800 ± 0,002 | 0,285 ± 0,005 | 13,3 ± 0,3 | 3,51 ± 0,06 | 15,8 ± 0,6 | 2,5 ± 0,9 |
| 4,5 ± 0,1 | 0,700 ± 0,002 | 0,310 ± 0,005 | 11,9 ± 0,3 | 3,23 ± 0,05 | 14,5 ± 0,6 | 2,6 ± 0,9 |
| 4,5 ± 0,1 | 0,600 ± 0,002 | 0,355 ± 0,005 | 10,2 ± 0,3 | 2,82 ± 0,04 | 12,7 ± 0,5 | 2,5 ± 0,8 |
| 4,5 ± 0,1 | 0,500 ± 0,002 | 0,410 ± 0,005 | 8,5 ± 0,3 | 2,44 ± 0,03 | 11,0 ± 0,4 | 2,5 ± 0,7 |
| 4,5 ± 0,1 | 0,400 ± 0,002 | 0,475 ± 0,005 | 6,8 ± 0,3 | 2,11 ± 0,02 | 9,5 ± 0,3 | 2,7 ± 0,6 |
| 4,5 ± 0,1 | 0,300 ± 0,002 | 0,60 ± 0,05 | 5,1 ± 0,3 | 1,67 ± 0,14 | 7,5 ± 0,8 | 2,4 ± 1,1 |
| 4,5 ± 0,1 | 0,200 ± 0,002 | 0,80 ± 0,05 | 3,4 ± 0,3 | 1,25 ± 0,08 | 5,6 ± 0,5 | 2,2 ± 0,8 |
| 4,5 ± 0,1 | 0,100 ± 0,002 | 1,25 ± 0,05 | 1,7 ± 0,3 | 0,80 ± 0,03 | 3,6 ± 0,2 | 1,9 ± 0,5 |

Osservazioni sulle misure indirette e sulla valutazione degli errori :

- il calcolo della resistenza esterna è stato facilitato dall'utilizzo del filo di costantana di cui è nota con buona precisione la resistenza in funzione della lunghezza; la resistenza misurata di un filo di costantana, del diametro di $0,2 \cdot 10^{-3}$ m e resistività = $5 \cdot 10^{-7}$ ohm·m , è risultata $(17,0 \pm 0,3)$ ohm per la lunghezza di 1 metro. I successivi valori sono stati ottenuti moltiplicando il valore iniziale per le lunghezze corrispondenti.
- la resistenza del circuito è stata calcolata in base ai dati misurati secondo la legge di Ohm : $V = R \cdot I$.
- l'errore associato alla d.d.p. ed alla corrente misurate con il tester è stato calcolato secondo la relazione : classe·portata/100. Poichè la classe dello strumento è 1, l'errore sulla misura della d.d.p. eseguita con la portata (fondo scala) di 10 volt risulta uguale a 0.1 volt; sulle misure di corrente eseguite con fondo scala di 500 mA l'errore strumentale è 0.005 A e su quelle eseguite con fondo scala di 5 A l'errore è 0.05 A.
- sulle misure di lunghezza del filo l'errore è stato fissato pari a 0.002 m .

Analisi ed interpretazione dei risultati

Dal confronto tra la resistenza R_e (colonna D) calcolata in base alla resistività ed alla lunghezza del filo di costantana, inserito nel circuito, e la resistenza R (Colonna F) calcolata mediante la legge di Ohm $V = R \cdot I$, utilizzando le misure di d.d.p. e corrente eseguite, emerge che la seconda risulta maggiore della prima, grosso modo sempre della stessa quantità. Essa può essere interpretata come una resistenza presente nel circuito non derivante dal filo. Facendo la differenza tra R e R_e , si può risalire quindi alla resistenza interna del circuito che, in effetti, è giustificata dalla presenza della pila e dell'amperometro :

$$R_{int} = r(\text{pila}) + r(\text{amperometro})$$

Questa prima analisi può essere completata dalla trattazione grafica, riportando in un diagramma cartesiano la resistenza R del circuito in funzione della lunghezza del filo di costantana. Il grafico 1 evidenzia una proporzionalità diretta che non ha origine nell'intersezione degli assi: in corrispondenza di un valore nullo per la lunghezza del filo è presente nel circuito una resistenza residua, il cui valore corrisponde all'intercetta, che può essere interpretata come somma della resistenza interna della pila e della resistenza dell'amperometro. Nello stesso diagramma può essere tracciato anche il grafico relativo alla resistenza esterna R_e , visualizzando il confronto tra la resistenza dovuta al filo R_e e la resistenza complessiva del circuito R , a conferma delle osservazioni fatte in precedenza.

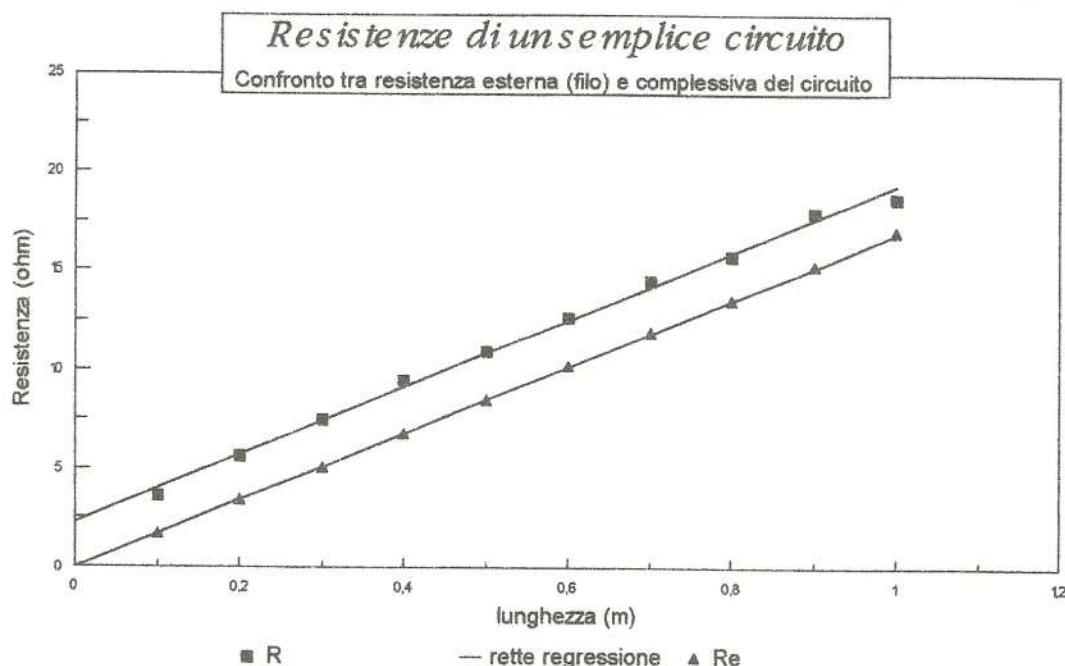


Grafico 1

La discussione dei dati può essere affrontata seguendo anche un altro metodo, un po' più lungo, ma sicuramente più completo perchè permette di discutere e riconoscere una proporzionalità inversa e interpretare una dipendenza lineare. L'analisi prende spunto dal fatto che poichè il filo è un conduttore ohmico, deve valere la legge di Ohm $V = R_e \cdot I$, se l'esperienza è eseguita rapidamente e la V fornita dalla pila non varia. Da questa relazione si deduce che R_e e I dovrebbero essere inversamente proporzionali; per verificare tale ipotesi basta tracciare il grafico di R_e in funzione di I , per ricavare informazioni sulle resistenze presenti nel circuito, anche se sarebbe più corretto rappresentare la variabile dipendente I in ordinate. Il diagramma ottenuto dall'elaborazione dei dati con LOTUS fa pensare a una proporzionalità inversa, ma non sempre è facile riconoscere da una curva un'iperbole equilatera, perchè a volte l'indagine sperimentale avviene in un campo di valori per i quali può risultare sul grafico solo un tratto della curva (vedi grafico 2).

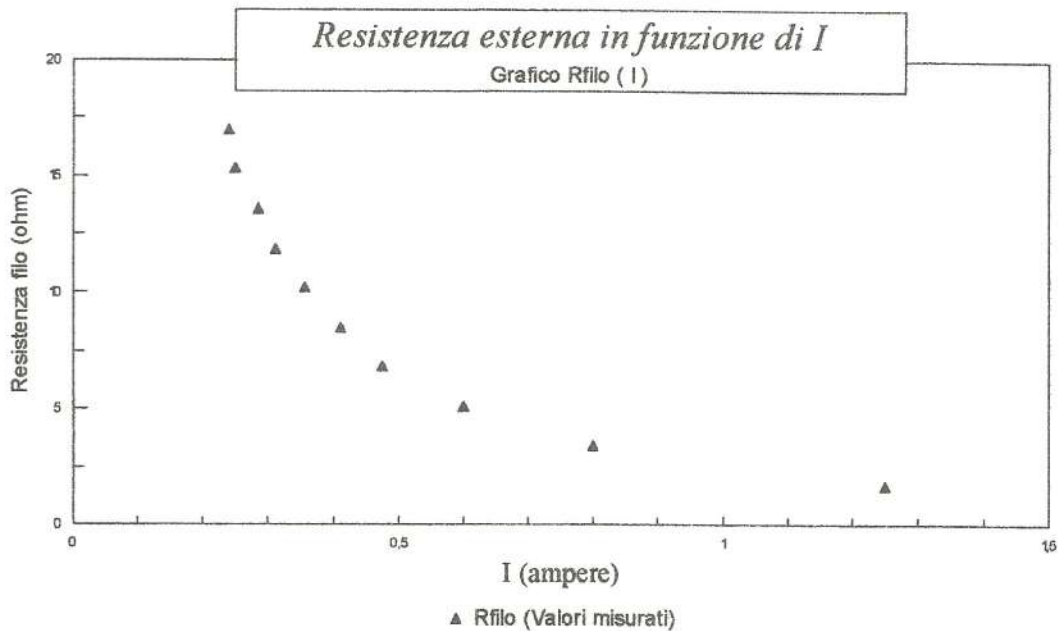


Grafico 2

La conferma di questa ipotesi può essere ottenuta studiando la relazione tra R_e e l' inverso di I : se R_e ed I sono inversamente proporzionali, R_e deve essere direttamente proporzionale a $1/I$. Il grafico 3 è ottenuto riportando R_e in funzione di $1/I$; oltre ad evidenziare la proporzionalità diretta esistente tra le grandezze, mette in crisi la legge di Ohm perchè al valore nullo della resistenza R_e non corrisponde un valore infinito della corrente (l'inverso di I risulta diverso da zero), ma un valore finito che può essere interpretato come la corrente di cortocircuito della pila. Il valore nullo dell' inverso della corrente si trova traslando l' asse delle ascisse di una quantità corrispondente ad una resistenza aggiuntiva che rappresenta la resistenza interna del circuito, equivalente alla somma della resistenza interna della pila e di quella dell' amperometro:

$$R_{int} = r \text{ (pila)} + r \text{ (amperometro)} .$$

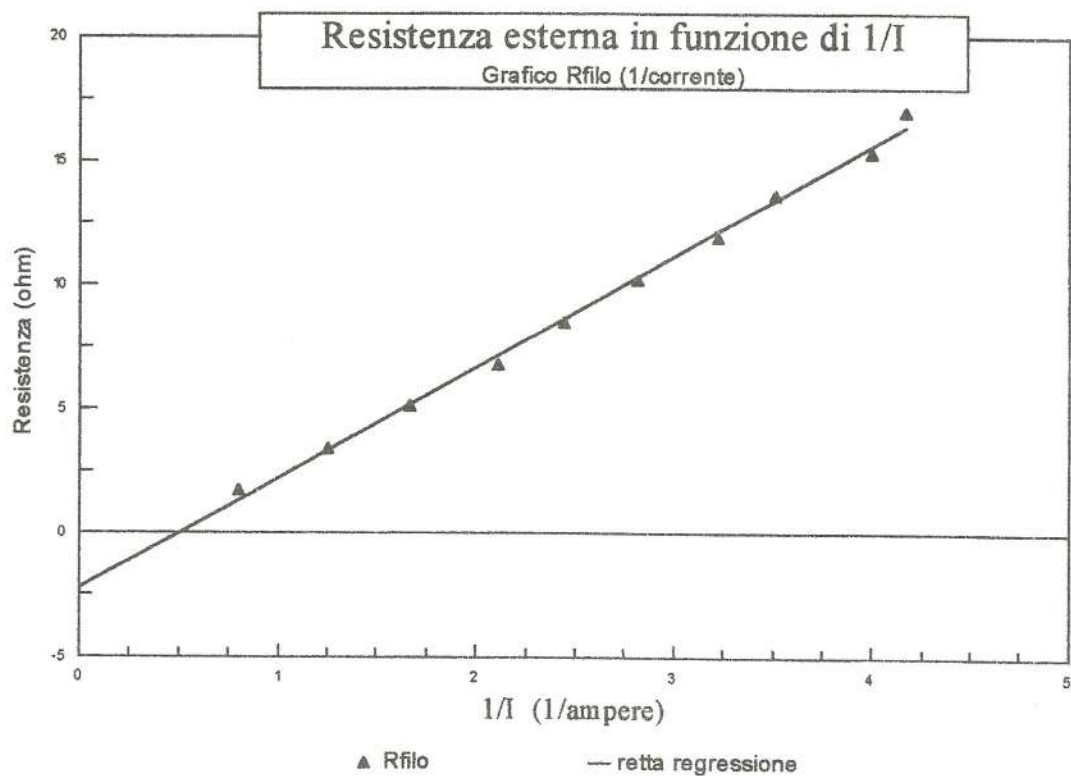


Grafico 3

La validità della legge di Ohm pertanto non deve essere messa in dubbio, basta modificarla considerando come resistenza non solo quella inserita esternamente ma anche quella interna:

$$V = R \cdot I \quad \text{con } R = R_e + R_{int}$$

o meglio, in un circuito reale vale la legge di Ohm generalizzata:

$$\text{f.e.m.} = R_e \cdot I + R_{int} \cdot I$$

Usando questa relazione e l'intercetta del grafico 3, si possono calcolare i valori teorici che interpolano i dati sperimentali visibili nel grafico 2 con la formula:

$$R_e = \frac{4,5V}{I} - 2,3\Omega$$

Il risultato è visibile nel grafico 4.

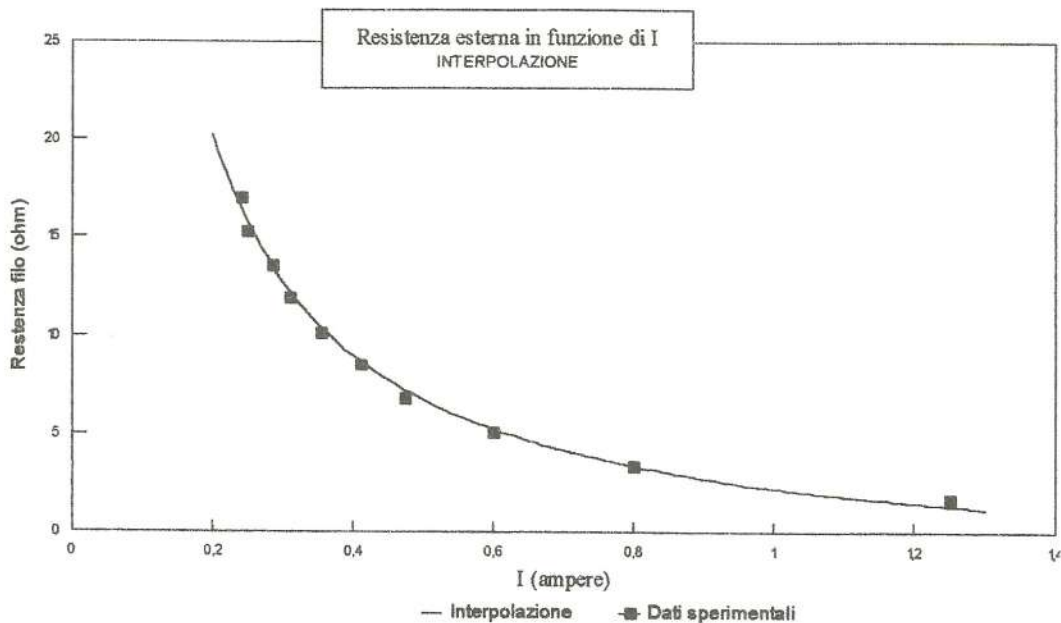
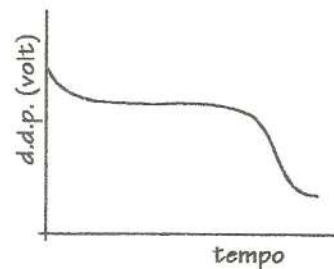


Grafico 4

Nota

La differenza di potenziale erogata da una pila in funzione del tempo, a parità di carico, ha un andamento caratteristico simile a quello riportato nella figura a fianco. È allora facilmente intuibile che le condizioni migliori per condurre l'esperienza si hanno adoperando delle pile già utilizzate almeno una volta, in modo che la tensione a vuoto sia entro il 2% quella nominale.



Quinto incontro

LEGGE DELL'INVERSO DEL QUADRATO DELLA DISTANZA: RELAZIONE INTENSITA' LUMINOSA - DISTANZA DA SORGENTE PUNTIFORME

(a cura di Piero Barbieri, Leo Vioni e Teresa Zecca)

Lo scopo di questo esperimento è duplice: da una parte possiamo misurare una grandezza fisica (la corrente di corto circuito di una cella solare) che varia proporzionalmente all'inverso del quadrato della distanza; dall'altra possiamo verificare se la corrente di cortocircuito di una cella solare è direttamente proporzionale all'intensità luminosa incidente.

Materiale usato

- 1 Proiettore da 6 V e 5 A (alimentato con un piccolo trasformatore direttamente collegato alla rete).
- 1 Lente convergente.
- 1 Schermo con foro avente $\varnothing = 2$ mm.
- 1 Cella solare di area ≈ 2 cm².
- 1 Tester digitale (con bassa resistenza interna).
- 1 Metro a nastro.
- Fili di collegamento.

Previsioni teoriche

Se la distanza tra la sorgente S e il ricevitore di area A raddoppia, il ricevitore intercetta solamente 1/4 dell'energia che intercettava prima. Infatti se raddoppia la distanza, raddoppia pure il lato della base della piramide, quindi l'area diventa 4 volte più grande. Concludendo, l'energia che il ricevitore intercetta è inversamente proporzionale al quadrato della distanza della sorgente (nell'ipotesi di una sorgente puntiforme).

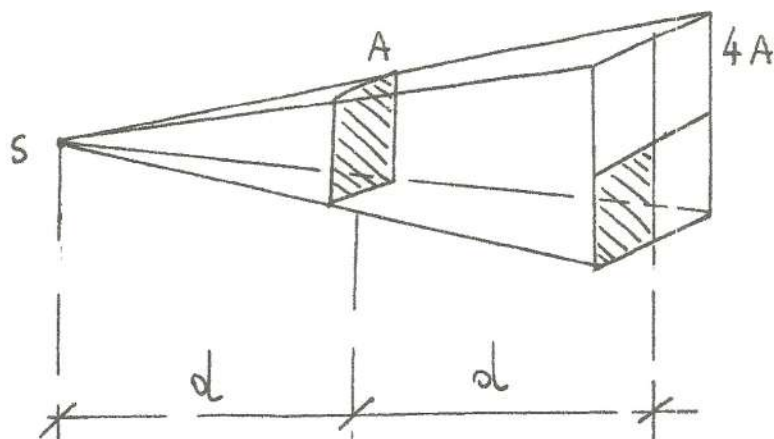


Fig.1

Esecuzione dell'esperimento

Disposta la cella nel fascio luminoso, si procede alla lettura della corrente indicata dal tester, si misura poi la distanza tra il foro e la cella. Si procede quindi ad una nuova lettura e così via in un intervallo di distanze tra 20 cm e 100 cm. Per determinare l'incertezza sulla corrente è sufficiente controllare i valori della corrente tornando indietro e verificare se coincidono o meno con i valori precedenti.

I valori così determinati possono essere riportati in un grafico corrente-distanza da cui è possibile verificare se raddoppiando la distanza la corrente diventa quattro volte più piccola e così via.

Un'analisi dei dati sperimentali più accurata può essere fatta costruendo un grafico corrente-distanza al quadrato o un grafico corrente-inverso del quadrato della distanza. Da questi ultimi è facile constatare che i è direttamente proporzionale a $\frac{1}{d^2}$ e quindi verificare l'ipotesi di partenza. Mediante l'uso del pacchetto 123 LOTUS è possibile velocemente costruire questi tre grafici.

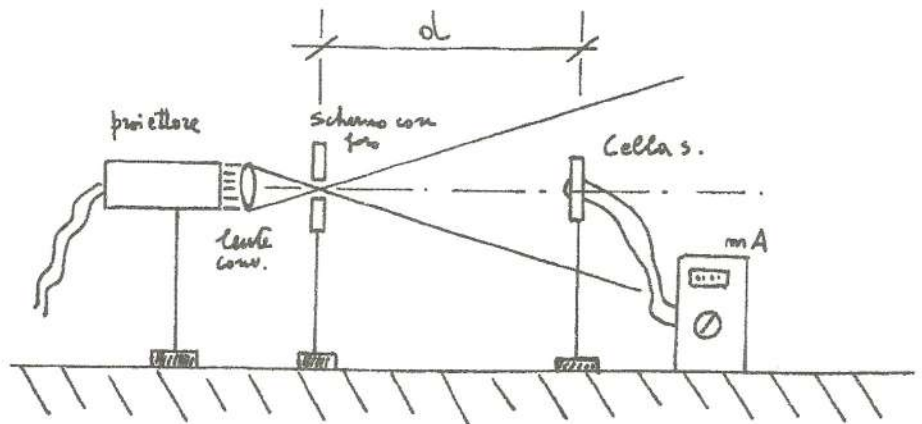


Fig. 2

Cenni sul funzionamento di una giunzione P-N. (Effetto fotovoltaico).

Quando in un cristallo semiconduttore vi sono una regione di tipo n e una di tipo p, nella zona di contatto fra esse, che prende il nome di giunzione p-n, si verificano fenomeni assai importanti da cui dipende il funzionamento di molti dispositivi elettronici a stato solido usati oggi (diodi, transistori, ecc.).

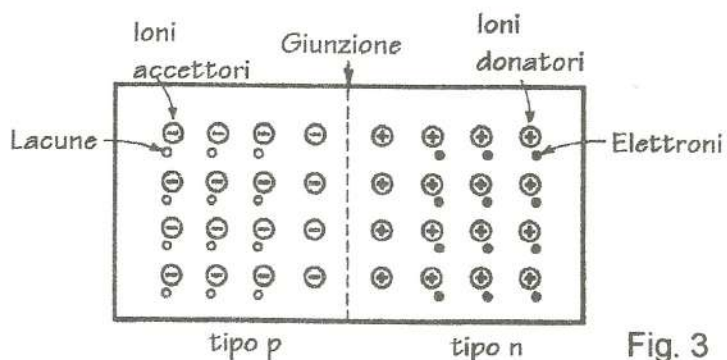


Fig. 3

Una giunzione p-n si realizza creando in un cristallo semiconduttore due zone, una di tipo p (con eccesso di lacune) e l'altra di tipo n (con eccesso di elettroni liberi). Il moto di agitazione termica dei portatori condurrà alcuni di essi ad attraversare la giunzione: le lacune, giunte nella zona n, vi incontreranno degli elettroni liberi, mentre gli elettroni liberi incontreranno, nella zona p, delle lacune. I due tipi di portatori si annullano a vicenda perchè gli elettroni vanno a occupare i posti vacanti costituiti dalle lacune.

Nella regione dove le cariche libere si neutralizzano (uno strato assai sottile, avente uno spessore di 1 - 10 μm) rimangono le cariche fisse, dovute agli atomi di impurità (positive nella regione n, negative in quella p), che costituiscono un doppio strato di cariche elettriche di segno opposto. Queste cariche generano un campo elet-

trico, che impedisce l'ulteriore passaggio di lacune dalla zona p a quella n e di elettroni liberi dalla zona n a quella p. In altre parole, fra le due regioni si crea una barriera di potenziale.

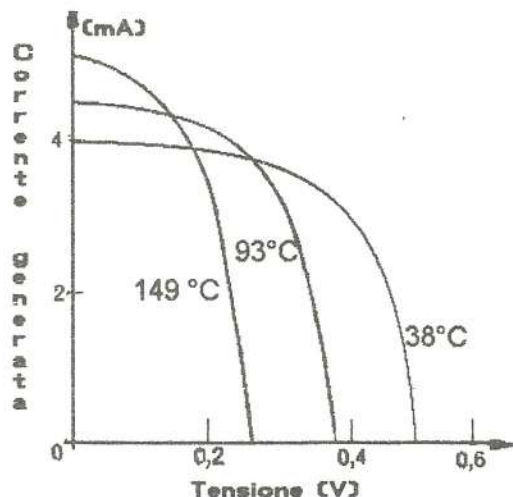
Se applichiamo una tensione esterna ai capi della giunzione, questa, a seconda del suo segno, potrà ridurre oppure innalzare la barriera di potenziale. Nel primo caso (polarizzazione diretta) ($V_p > V_n$), le lacune della regione p potranno superare la giunzione e attraversare la regione n, mentre gli elettroni della regione n compiranno il cammino opposto: nel circuito, pertanto, fluirà una corrente. Nel secondo caso (polarizzazione inversa) ($V_n > V_p$), invece, non si avrà passaggio di corrente.

DIODO A GIUNZIONE: il diodo a giunzione è un dispositivo che funziona basandosi sulle proprietà della giunzione p-n.

Se la giunzione di un diodo viene illuminata, l'energia di radiazione libera degli elettroni dal reticolo cristallino, generando coppie di portatori, elettroni-lacune, che vengono separati dal campo elettrico della giunzione; le lacune vengono attratte dalla regione p, e gli elettroni dalla regione n: si crea così, ai capi del diodo, una d.d.p. chiamata **TENSIONE FOTOVOLTAICA**.

Collegando il diodo a un resistore di carico, si osserva un passaggio di corrente chiamata fotocorrente. Il diodo trasformando energia luminosa in energia elettrica, si comporta come un generatore di corrente. Gli speciali diodi costruiti per questo impiego si chiamano **CELLE SOLARI** o **FOTOVOLTAICHE**.

Il comportamento di una cella solare è descritto dalla sua curva caratteristica, riportata nella figura a fianco. Quando la cella è collegata in cortocircuito, la corrente raggiunge il valore massimo I_c , la cui intensità è proporzionale alla illuminazione. Al crescere della resistenza esterna, la d.d.p. aumenta mentre l'intensità della corrente diminuisce. A circuito aperto, poi, la tensione raggiunge il valore massimo V_o .



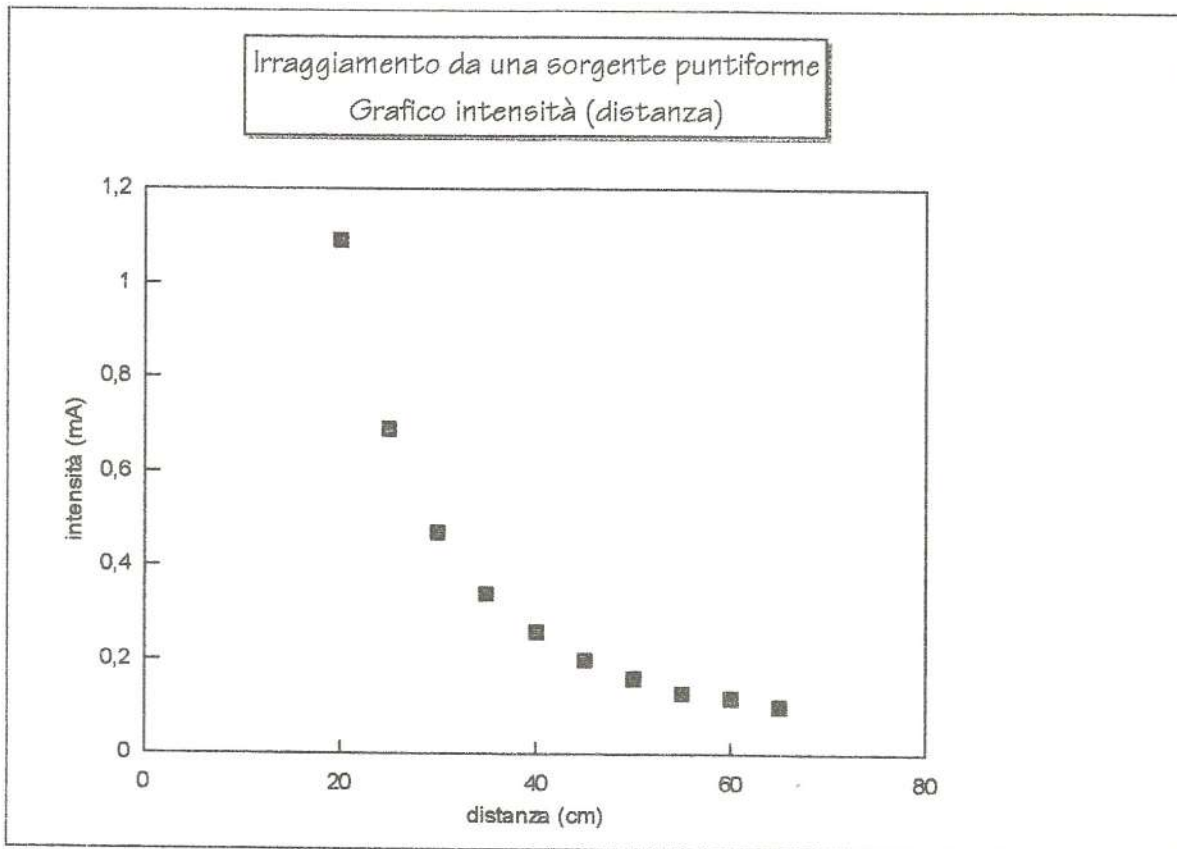
CELLA ELEMENTARE

Una caratteristica molto importante di una cella solare è il rendimento, cioè il rapporto fra la potenza elettrica disponibile in uscita e la potenza della radiazione luminosa che cade sulla sua superficie. Con le celle al silicio si hanno rendimenti fra il 10% e il 20%.

Le prime celle solari furono utilizzate in particolare per l'alimentazione elettrica dei veicoli spaziali. Oggi verso di esse si appunta un crescente interesse per la possibilità che esse offrono di sfruttare l'energia solare per la produzione di elettricità.

Tabella dei dati sperimentali.

| d (cm) | i (mA) allont. | i (mA) avvicin. | i (mA) |
|------------|-------------------|--------------------|-------------|
| 20,0 ± 0,5 | 1,14 ± 0,02 | 1,04 ± 0,02 | 1,09 ± 0,05 |
| 25,0 ± 0,5 | 0,71 ± 0,01 | 0,66 ± 0,01 | 0,69 ± 0,03 |
| 30,0 ± 0,5 | 0,48 ± 0,01 | 0,45 ± 0,01 | 0,47 ± 0,02 |
| 35,0 ± 0,5 | 0,34 ± 0,01 | 0,33 ± 0,01 | 0,34 ± 0,01 |
| 40,0 ± 0,5 | 0,26 ± 0,01 | 0,25 ± 0,01 | 0,26 ± 0,01 |
| 45,0 ± 0,5 | 0,19 ± 0,01 | 0,20 ± 0,01 | 0,20 ± 0,01 |
| 50,0 ± 0,5 | 0,16 ± 0,01 | 0,16 ± 0,01 | 0,16 ± 0,01 |
| 55,0 ± 0,5 | 0,13 ± 0,01 | 0,13 ± 0,01 | 0,13 ± 0,01 |
| 60,0 ± 0,5 | 0,11 ± 0,01 | 0,12 ± 0,01 | 0,12 ± 0,01 |
| 65,0 ± 0,5 | 0,10 ± 0,01 | 0,10 ± 0,01 | 0,10 ± 0,01 |



Elaborazione dei dati sperimentali.

Con una formula costruiamo le colonne d^2 , $1/d^2$ e $i \cdot d^2$. Calcoliamo la media dei prodotti $i \cdot d^2$ con la funzione media di LOTUS :

Es: @MEDIA(D3...D10)

e la poniamo alla base della colonna dei prodotti. Otteniamo così la tabella seguente:

| i (mA) | d (cm) | d^2 (cm^2) | $1/d^2$ ($1/\text{cm}^2$) | $i \cdot d^2$ ($\text{mA} \cdot \text{cm}^2$) |
|-----------|-----------|----------------------------|--------------------------------|--|
| 1,09 | 20,0 | 400 | 0,002500 | 436 |
| 0,69 | 25,0 | 625 | 0,001600 | 428 |
| 0,47 | 30,0 | 900 | 0,001111 | 419 |
| 0,34 | 35,0 | 1225 | 0,000816 | 410 |
| 0,26 | 40,0 | 1600 | 0,000625 | 408 |
| 0,20 | 45,0 | 2025 | 0,000494 | 395 |
| 0,16 | 50,0 | 2500 | 0,000400 | 400 |
| 0,13 | 55,0 | 3025 | 0,000331 | 393 |
| 0,12 | 60,0 | 3600 | 0,000278 | 414 |
| 0,10 | 65,0 | 4225 | 0,000237 | 423 |

Valor medio di $i \cdot d^2 = 413 \text{ mA} \cdot \text{cm}^2$

Scarto quad medio = 7 $\text{mA} \cdot \text{cm}^2$

$K = i \cdot d^2 = (413 \pm 7) \text{ mA} \cdot \text{cm}^2$

Verificato che il prodotto $i \cdot d^2$ rimane costante entro il 2% circa, per poter interpolare i dati sperimentali e costruire i grafici desiderati procediamo nel modo seguente. In un'altra zona del foglio, riempiamo una colonna con circa 50 valori della distanza, partendo da un valore poco minore del valore minimo sperimentale fino a un valore poco oltre il valore massimo. Accanto a questa colonna poniamo, in corrispondenza dei valori sperimentali, i valori sperimentali della corrente. Aggiungiamo poi la colonna delle distanze al quadrato e dell'inverso del quadrato delle distanze.

Con la formula:

$$i = \frac{K}{d^2}$$

costruiamo la colonna corrispondente ai valori teorici delle correnti. Otteniamo così la seguente tabella:

| d (cm) | i (mA) | d ² (cm ²) | 1/d ² (1/cm ²) | i teor (mA) |
|-----------|-----------|--------------------------------------|--|----------------|
| 15,0 | | 225 | 0,004444 | 1,833611 |
| 16,0 | | 256 | 0,003906 | 1,611572 |
| 17,0 | | 289 | 0,00346 | 1,427552 |
| 18,0 | | 324 | 0,003086 | 1,273341 |
| 19,0 | | 361 | 0,00277 | 1,142832 |
| 20,0 | 1,09 | 400 | 0,0025 | 1,031406 |
| 21,0 | | 441 | 0,002268 | 0,935516 |
| 22,0 | | 484 | 0,002066 | 0,852402 |
| 23,0 | | 529 | 0,00189 | 0,779891 |
| 24,0 | | 576 | 0,001736 | 0,716254 |
| 25,0 | 0,69 | 625 | 0,0016 | 0,6601 |
| 26,0 | | 676 | 0,001479 | 0,6103 |
| 27,0 | | 729 | 0,001372 | 0,565929 |
| 28,0 | | 784 | 0,001276 | 0,526228 |
| 29,0 | | 841 | 0,001189 | 0,490562 |
| 30,0 | 0,47 | 900 | 0,001111 | 0,458403 |
| 31,0 | | 961 | 0,001041 | 0,429305 |
| 32,0 | | 1024 | 0,000977 | 0,402893 |
| 33,0 | | 1089 | 0,000918 | 0,378845 |
| 34,0 | | 1156 | 0,000865 | 0,356888 |
| 35,0 | 0,34 | 1225 | 0,000816 | 0,336786 |
| 36,0 | | 1296 | 0,000772 | 0,318335 |
| 37,0 | | 1369 | 0,00073 | 0,30136 |
| 38,0 | | 1444 | 0,000693 | 0,285708 |
| 39,0 | | 1521 | 0,000657 | 0,271244 |
| 40,0 | 0,26 | 1600 | 0,000625 | 0,257852 |
| 41,0 | | 1681 | 0,000595 | 0,245427 |
| 42,0 | | 1764 | 0,000567 | 0,233879 |
| 43,0 | | 1849 | 0,000541 | 0,223127 |
| 44,0 | | 1936 | 0,000517 | 0,2131 |
| 45,0 | 0,20 | 2025 | 0,000494 | 0,203735 |
| 46,0 | | 2116 | 0,000473 | 0,194973 |
| 47,0 | | 2209 | 0,000453 | 0,186764 |
| 48,0 | | 2304 | 0,000434 | 0,179064 |
| 49,0 | | 2401 | 0,000416 | 0,171829 |
| 50,0 | 0,16 | 2500 | 0,0004 | 0,165025 |
| 51,0 | | 2601 | 0,000384 | 0,158617 |
| 52,0 | | 2704 | 0,00037 | 0,152575 |
| 53,0 | | 2809 | 0,000356 | 0,146872 |
| 54,0 | | 2916 | 0,000343 | 0,141482 |
| 55,0 | 0,13 | 3025 | 0,000331 | 0,136384 |
| 56,0 | | 3136 | 0,000319 | 0,131557 |
| 57,0 | | 3249 | 0,000308 | 0,126981 |
| 58,0 | | 3364 | 0,000297 | 0,12264 |
| 59,0 | | 3481 | 0,000287 | 0,118518 |
| 60,0 | 0,12 | 3600 | 0,000278 | 0,114601 |
| 61,0 | | 3721 | 0,000269 | 0,110874 |
| 62,0 | | 3844 | 0,00026 | 0,107326 |
| 63,0 | | 3969 | 0,000252 | 0,103946 |
| 64,0 | | 4096 | 0,000244 | 0,100723 |
| 65,0 | 0,10 | 4225 | 0,000237 | 0,097648 |
| 66,0 | | 4356 | 0,00023 | 0,094711 |
| 67,0 | | 4489 | 0,000223 | 0,091905 |
| 68,0 | | 4624 | 0,000216 | 0,089222 |
| 69,0 | | 4761 | 0,00021 | 0,086655 |
| 70,0 | | 4900 | 0,000204 | 0,084196 |

Costruzione dei grafici.

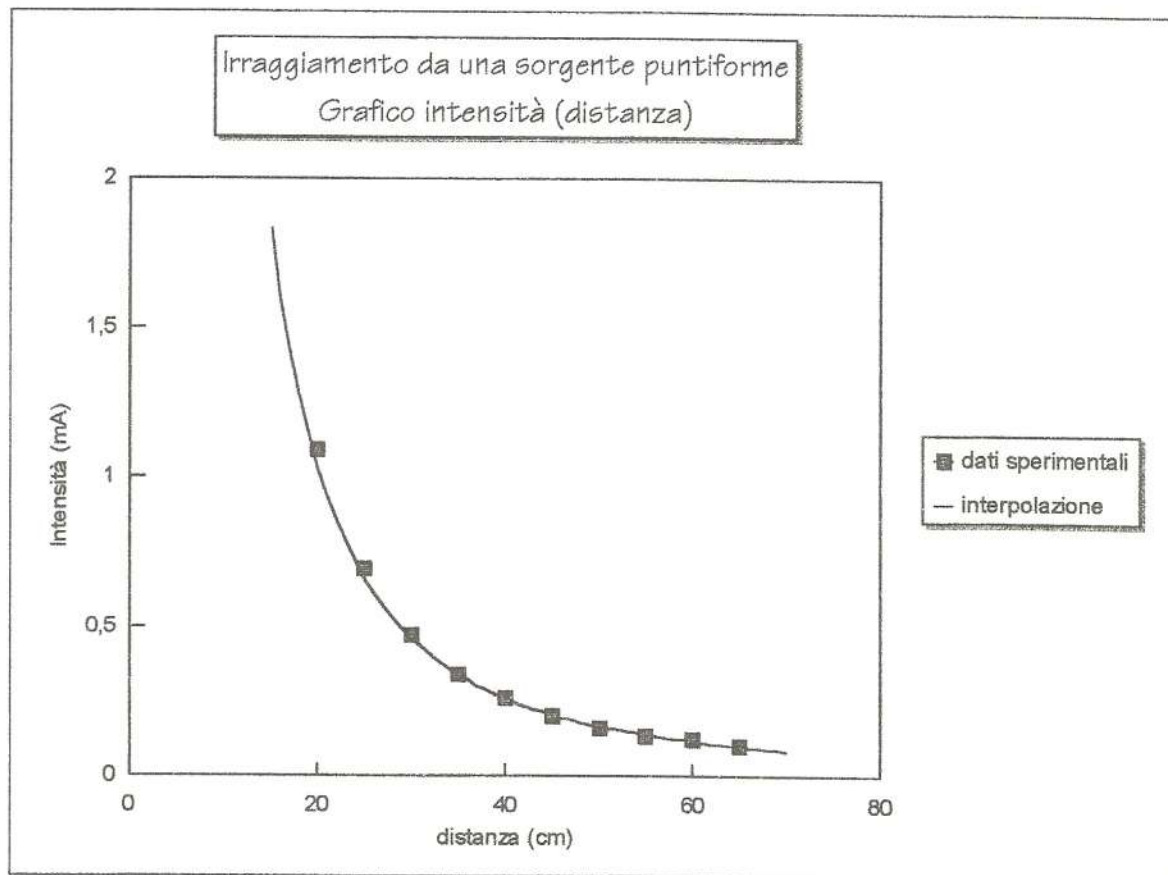
Si costruiscono i tre grafici: (d,i) , (d^2,i) e $(1/d^2,i)$.

Nel primo grafico viene riportata in X la colonna delle distanze; in A la colonna delle i sperimentali e in B la colonna delle i teoriche. Poi con OPZIONI si sceglie GRAFO - (zona) A - SIMBOLI e successivamente GRAFO - (zona) B - RIGHE e si VISUALIZZA. In questo modo si hanno i punti sperimentali interpolati dalla curva teorica costruita con la legge del prodotto costante.

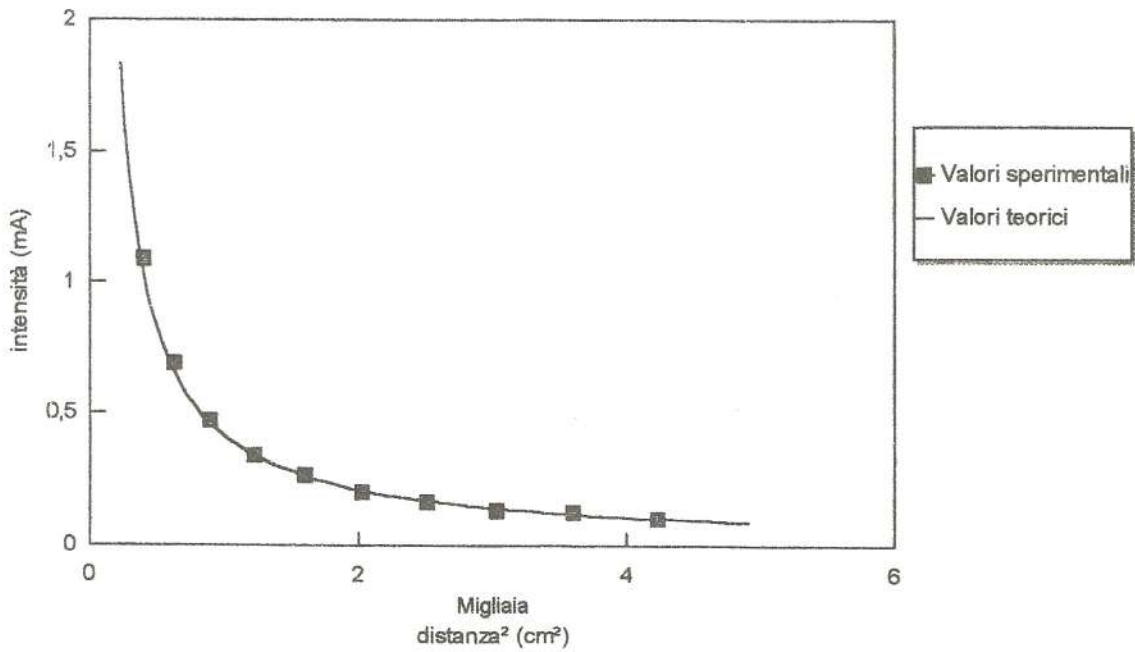
Per la costruzione degli altri due grafici: $(1/d^2,i)$ e (d^2,i) si opera con lo stesso procedimento.

Dopo la costruzione di ogni grafico è necessario dar loro un nome con GRAFICI - NOME ed eventualmente salvarli con GRAFICI - SALVA se si vuole stamparli utilizzando PRINTGRAF; con il comando RIPRISTINA si ricomincia per la costruzione del grafico successivo.

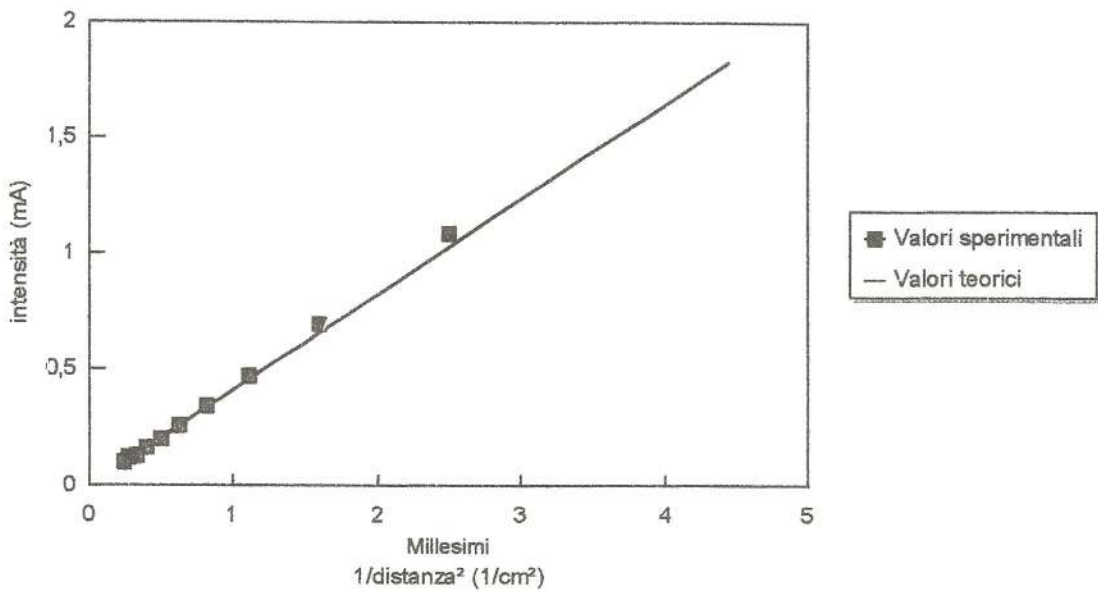
Si hanno così i seguenti tre grafici:



Irraggiamento da una sorgente puntiforme
 Grafico intensità (distanza²)



Irraggiamento da una sorgente puntiforme
 Grafico intensità (1/distanza²)



Infine si salva tutto con ARCHIVI - SALVA.

SVUOTAMENTO DI UN SERBATOIO D'ACQUA ATTRAVERSO UN TUBO CAPILLARE

(a cura di G. Antonini e M. Francesio)

1. Descrizione e costruzione del dispositivo

L'apparecchiatura è costituita da un tubo di plastica trasparente, fissato ad un'asta verticale, al quale è collegato, mediante un tappo forato a tenuta, un tubicino sottile, pure di plastica, disposto su un piano orizzontale.

Per la sua costruzione occorrono:

- un'asta di legno lunga due metri, spessa un paio di centimetri e larga circa quattro;
- tre mollette da bucato, di legno;
- una cordella metrica di metallo, da due metri;
- un tubo di plastica trasparente, lungo due metri, del diametro di circa un centimetro;
- un tappo di sughero o di altro materiale;
- un cavo elettrico unifilare, lungo almeno un metro, il cui filo metallico abbia un diametro inferiore al millimetro.

Le mollette da bucato servono per sostenere il tubo di plastica e vanno fissate all'asta con delle viti, a ottanta centimetri una dall'altra a partire da una ventina di centimetri dall'estremità. Per il fissaggio occorre smontare la molletta e avvitare una delle due branche in modo che la parte da cui la si impugna sporga per circa metà dall'asta.

La cordella metrica, tolta dal suo contenitore, va disposta sull'asta con l'origine della scala in corrispondenza di una delle estremità, infilandola in parte sotto le mollette, e fermandola con del nastro adesivo trasparente.

Il tappo deve essere sagomato in modo da chiudere bene il tubo di plastica; se di sughero, va reso impermeabile immergendolo per mezz'ora in un bagno di Vinavil diluito e lasciandolo seccare per una notte; infine va forato per lasciare passare, senza sforzo, il cavo elettrico.

Dal cavo si tolga il filo metallico interno in modo che la guaina rimanga intatta: essa costituirà il pezzo più importante del dispositivo, un lungo tubicino sottile attraverso cui far scorrere molto lentamente l'acqua. Per togliere il filo metallico bisogna procedere con delicatezza onde evitare rotture: si scopre il rivestimento a un'estremità per una decina di centimetri, si lega il filo ad un gancio, o a una maniglia, e si tira lentamente la guaina tenendola in prossimità del punto in cui il filo metallico va via via scoprendosi. Occorre far scorrere lungo il cavo un panno tenuto stretto con due dita, per facilitare il distacco del rivestimento di plastica dal metallo; con un po' di attenzione e di pazienza si riesce nell'intento.

Una estremità del tubicino va poi infilata nel foro del tappo, dalla parte di sezione maggiore, fino a farla sporgere di un paio di centimetri dalla parte opposta, e fissata con del collante al silicone.

Per eseguire l'esperimento si dispone l'asta verticalmente vicino a un sostegno e la si fissa in modo che l'inizio della scala metrica

si trovi su un piano orizzontale, realizzato con uno sgabello o una sedia. Usando le mollette si fissa all'asta il tubo di plastica in modo che la parte inferiore possa raccordarsi al piano dello sgabello, o della sedia, con una curva; l'estremità, chiusa dal tappo, dovrà toccare il bordo dello sgabello, lasciando il capillare appena al di sopra di esso, disposto in modo qualsiasi, ma senza sovrapposizioni; per mantenerlo aderente al piano lo si fisserà con del nastro adesivo, lasciando sporgere l'estremità libera dal bordo dello sgabello di un paio di centimetri.

Dopo avere provvisoriamente chiuso l'estremità libera del capillare inserendo un pezzetto di filo metallico piegato ad L, con un imbuto si riempie d'acqua il tubo di plastica. E' importante che l'acqua sia alla temperatura ambiente per evitare variazioni di viscosità che potrebbero influire negativamente sulle misure: a questo scopo è consigliabile prepararla in un becker qualche ora prima dell'esperimento.

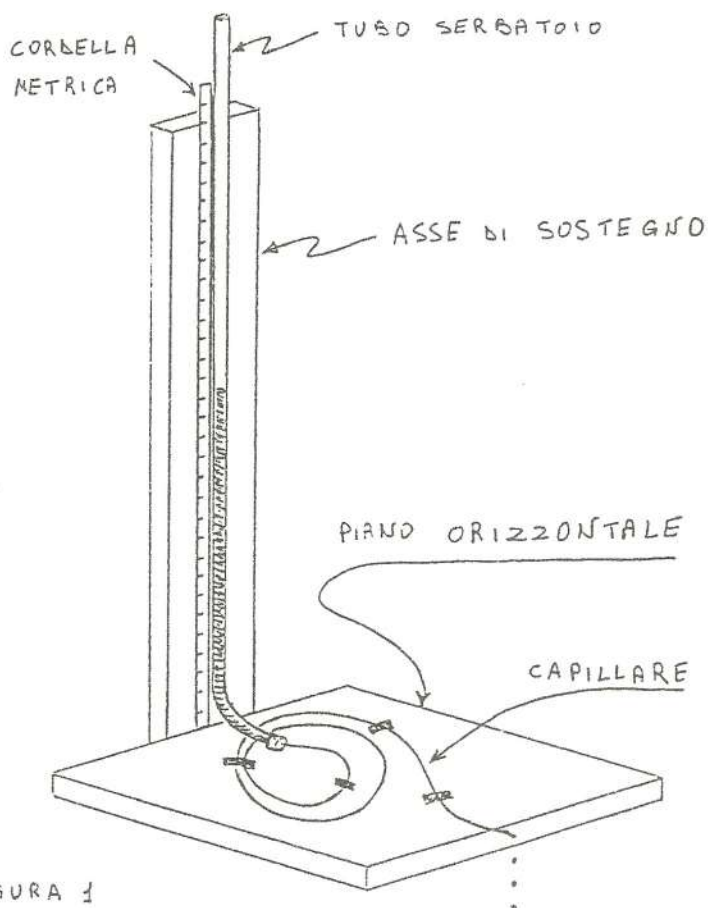


FIGURA 1

2. Esperimento e analisi dei dati

Dopo avere posto un recipiente per raccogliere l'acqua sotto l'estremità del capillare sporgente dal piano su cui poggia, si toglie il pezzetto di filo di rame e si lascia scorrere l'acqua per una decina di secondi prima di iniziare le misurazioni. Quindi, a intervalli regolari di tempo, per esempio ogni mezzo minuto, si legge sulla scala metrica il livello dell'acqua nel tubo.

Poiché, soprattutto all'inizio, l'acqua scende abbastanza rapidamente, per effettuare misure accurate è bene essere almeno in due: uno controlla l'orologio e dà ogni volta il via per la lettura, l'altro legge sulla scala il livello del menisco entro il tubo. Le misurazioni devono cessare prima che il pelo del liquido raggiunga il tratto in cui il serbatoio è incurvato: in tale zona la sezione orizzontale non è più costante e i risultati verrebbero alterati.

Le incertezze sono rispettivamente di circa un secondo sulla misura del tempo e di un paio di millimetri sulla misura di lunghezza.

L'eventuale analisi dei dati può essere fatta all'elaboratore con il foglio elettronico LOTUS-123, calcolando i logaritmi naturali dei valori dell'altezza e determinando la retta di regressione lineare.

In grafico si rappresentano i dati sperimentali e la linea che li interpola, tracciata in base alla relazione

$$h(t) = h_0 \cdot e^{-k \cdot t}$$

La costante di tempo t_0 , corrispondente all'intervallo in cui l'altezza della colonna d'acqua si riduce di un fattore e , è data da $t_0 = 1/k$, mentre il tempo di dimezzamento, in cui la colonna si riduce a metà, è dato da $t_{1/2} = \ln 2 \cdot t_0$.

3. Teoria e confronto con i dati sperimentali

La teoria del fenomeno si basa sulla legge di Poiseuille che governa il flusso di un liquido attraverso un tubo capillare in condizioni di regime viscoso.

La portata, ossia il volume di liquido che esce al secondo, dipende dalle caratteristiche geometriche del capillare, dalla viscosità del fluido e dalla differenza di pressione alle estremità secondo la relazione seguente

$$Q = \frac{\pi \cdot r^4 \cdot \Delta P}{8 \cdot \eta \cdot L} \quad (1)$$

dove

- Q : è la portata; essa è uguale alla rapidità di diminuzione, $-dV/dt$, del volume del liquido nel serbatoio,
- r : è il raggio del capillare,
- ΔP : è il salto di pressione agli estremi del capillare,
- η : è la viscosità del fluido,
- L : è la lunghezza del capillare.

Nel nostro caso la differenza di pressione agli estremi è dovuta al dislivello tra il pelo del liquido nel tubo verticale che funge da serbatoio e il piano di appoggio del tubo capillare. Risulta

$$\Delta P = \delta \cdot g \cdot h \quad (2)$$

dove

- δ : densità del liquido,
- g : intensità del campo gravitazionale,
- h : altezza della colonna di liquido, pari al dislivello indicato.

Dalla (1) e dalla (2) si ottiene

$$dV/dt = - \frac{\pi \cdot r^4 \cdot \delta \cdot g \cdot h}{8 \cdot \eta \cdot L} \quad (3)$$

e, poiché la variazione di volume del liquido nel serbatoio è dato da $dV = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D^2 \cdot dh$, con D diametro del tubo, si ricava la seguente equazione differenziale

$$dh/dt = - k \cdot h \quad (4) \quad \text{con } k = \frac{r^4 \cdot \delta \cdot g}{2 \cdot \eta \cdot D^2 \cdot L} \quad (4')$$

La (4) ammette come soluzione la funzione

$$h(t) = h_0 \cdot e^{-k \cdot t} = h_0 \cdot e^{-t/t_0} \quad (5)$$

dove

h_0 : altezza iniziale del liquido nel serbatoio,
 $t_0 = 1/k$: costante di tempo.

Per controllare l'accordo tra teoria ed esperienza si potrebbe pensare di confrontare il valore della costante di tempo ottenuto dall'esperimento con quello previsto teoricamente in base alla relazione

$$t_0 = \frac{2 \cdot \eta \cdot D^2 \cdot L}{r^4 \cdot \delta \cdot g} \quad (6)$$

Risulta dalla (6) che t_0 dipende criticamente dal raggio del capillare poiché questo compare a denominatore elevato alla quarta potenza; ne deriva che piccole variazioni di r comportano sensibili variazioni di t_0 . Non è quindi opportuno prendere come raggio del tubicino quello del filo metallico tolto da esso perché, visto anche il procedimento seguito per l'estrazione, c'è da aspettarsi che esso sia più piccolo.

E' preferibile effettuare un controllo indiretto: ricavare il diametro medio del capillare dalla relazione (6) in base al valore sperimentale di t_0 e degli altri dati e confrontarlo poi con quello del filo metallico estratto.

4. I risultati di un gruppo di lavoro

La tabella 1 raccoglie i dati, ottenuti da uno dei gruppi di lavoro che hanno eseguito l'esperimento, elaborati con Lotus-123.

In alto sono riportati i parametri caratteristici del materiale utilizzato, più sotto si trovano le colonne dei dati sperimentali e di quelli calcolati per l'analisi teorica e l'interpolazione. Sulla destra sono i risultati del calcolo della retta di regressione per i valori del logaritmo naturale dell'altezza h e del calcolo del diametro del capillare d_{cap} in base alla relazione (6).

Il grafico 1 rappresenta l'andamento dei dati sperimentali relativi all'altezza della colonna d'acqua nel serbatoio in funzione del tempo, con tracciati i punti corrispondenti ai valori di riduzione a metà, a un quarto, a un ottavo del valore iniziale. Risulta evidenziato il tempo di dimezzamento $t_{1/2}$ che si aggira intorno a 7,7 minuti, come si nota anche nelle prime due colonne di tabella 1.

Il grafico 2 riporta l'andamento del logaritmo naturale dell'altezza in funzione del tempo, evidenziandone il carattere pressoché lineare.

SVUOTAMENTO DI UN SERBATOIO D'ACQUA ATTRAVERSO UN CAPILLARE
 esperimento di laboratorio svolto il 25 febbraio 1993

| | |
|-------------------------|---|
| diametro serbatoio | $D = (8,2 \pm 0,2) \text{ mm}$ |
| lunghezza capillare | $L = (106,3 \pm 0,2) \text{ cm}$ |
| diametro filo metallico | $d = (0,75 \pm 0,01) \text{ mm}$ |
| temperatura acqua | $T = (20,6 \pm 0,1) \text{ [C]}$ |
| viscosità acqua | $\eta = (0,99 \pm 0,01) 10^{-3} \text{ Ns/m}^2$ |
| densità acqua | $\rho = (0,998 \pm 0,001) 10^3 \text{ kg/m}^3$ |

| tempo t (minuti) | altezza h (cm) | ln(h) | $y=mt+q$ | $h=h_0 \exp(-kt)$ (cm) |
|---------------------|-------------------|-------|----------|---------------------------|
| 0,00 ± 0,02 | 160,0 ± 0,1 | 5,075 | 5,087 | 160,0 |
| 0,50 ± 0,02 | 153,0 ± 0,1 | 5,030 | 5,042 | 152,9 |
| 1,00 ± 0,02 | 146,4 ± 0,1 | 4,986 | 4,997 | 146,1 |
| 1,50 ± 0,02 | 139,9 ± 0,1 | 4,941 | 4,951 | 139,6 |
| 2,00 ± 0,02 | 133,9 ± 0,1 | 4,897 | 4,906 | 133,4 |
| 2,50 ± 0,02 | 128,2 ± 0,1 | 4,854 | 4,860 | 127,5 |
| 3,00 ± 0,02 | 122,7 ± 0,1 | 4,810 | 4,815 | 121,8 |
| 3,50 ± 0,02 | 117,3 ± 0,1 | 4,765 | 4,770 | 116,4 |
| 4,00 ± 0,02 | 112,4 ± 0,1 | 4,722 | 4,724 | 111,3 |
| 4,50 ± 0,02 | 107,6 ± 0,1 | 4,678 | 4,679 | 106,3 |
| 5,00 ± 0,02 | 102,9 ± 0,1 | 4,634 | 4,633 | 101,6 |
| 5,50 ± 0,02 | 98,5 ± 0,1 | 4,590 | 4,588 | 97,1 |
| 6,00 ± 0,02 | 94,2 ± 0,1 | 4,545 | 4,543 | 92,8 |
| 6,50 ± 0,02 | 90,1 ± 0,1 | 4,501 | 4,497 | 88,7 |
| 7,00 ± 0,02 | 86,2 ± 0,1 | 4,457 | 4,452 | 84,7 |
| 7,50 ± 0,02 | 82,4 ± 0,1 | 4,412 | 4,406 | 81,0 |
| 8,00 ± 0,02 | 78,7 ± 0,1 | 4,366 | 4,361 | 77,4 |
| 8,50 ± 0,02 | 75,2 ± 0,1 | 4,320 | 4,316 | 73,9 |
| 9,00 ± 0,02 | 71,9 ± 0,1 | 4,275 | 4,270 | 70,7 |
| 9,50 ± 0,02 | 68,8 ± 0,1 | 4,231 | 4,225 | 67,5 |
| 10,00 ± 0,02 | 65,6 ± 0,1 | 4,184 | 4,179 | 64,5 |
| 10,50 ± 0,02 | 62,7 ± 0,1 | 4,138 | 4,134 | 61,7 |
| 11,00 ± 0,02 | 60,0 ± 0,1 | 4,094 | 4,089 | 58,9 |
| 11,50 ± 0,02 | 57,4 ± 0,1 | 4,050 | 4,043 | 56,3 |
| 12,00 ± 0,02 | 54,9 ± 0,1 | 4,006 | 3,998 | 53,8 |
| 12,50 ± 0,02 | 52,5 ± 0,1 | 3,961 | 3,952 | 51,4 |
| 13,00 ± 0,02 | 50,1 ± 0,1 | 3,914 | 3,907 | 49,1 |
| 13,50 ± 0,02 | 47,9 ± 0,1 | 3,869 | 3,862 | 47,0 |
| 14,00 ± 0,02 | 45,8 ± 0,1 | 3,824 | 3,816 | 44,9 |
| 14,50 ± 0,02 | 43,8 ± 0,1 | 3,780 | 3,771 | 42,9 |
| 15,00 ± 0,02 | 41,8 ± 0,1 | 3,733 | 3,725 | 41,0 |
| 15,50 ± 0,02 | 40,0 ± 0,1 | 3,689 | 3,680 | 39,2 |
| 16,00 ± 0,02 | 38,2 ± 0,1 | 3,643 | 3,634 | 37,4 |
| 16,50 ± 0,02 | 36,4 ± 0,1 | 3,595 | 3,589 | 35,8 |
| 17,00 ± 0,02 | 34,8 ± 0,1 | 3,550 | 3,544 | 34,2 |
| 17,50 ± 0,02 | 33,1 ± 0,1 | 3,500 | 3,498 | 32,7 |
| 18,00 ± 0,02 | 31,6 ± 0,1 | 3,453 | 3,453 | 31,2 |
| 18,50 ± 0,02 | 30,2 ± 0,1 | 3,408 | 3,407 | 29,8 |
| 19,00 ± 0,02 | 28,8 ± 0,1 | 3,360 | 3,362 | 28,5 |
| 19,50 ± 0,02 | 27,5 ± 0,1 | 3,314 | 3,317 | 27,2 |
| 20,00 ± 0,02 | 26,3 ± 0,1 | 3,270 | 3,271 | 26,0 |
| 20,50 ± 0,02 | 25,1 ± 0,1 | 3,223 | 3,226 | 24,9 |
| 21,00 ± 0,02 | 23,9 ± 0,1 | 3,174 | 3,180 | 23,8 |
| 21,50 ± 0,02 | 22,8 ± 0,1 | 3,127 | 3,135 | 22,7 |
| 22,00 ± 0,02 | 21,8 ± 0,1 | 3,082 | 3,090 | 21,7 |
| 22,50 ± 0,02 | 20,8 ± 0,1 | 3,035 | 3,044 | 20,7 |
| 23,00 ± 0,02 | 19,9 ± 0,1 | 2,991 | 2,999 | 19,8 |
| 23,50 ± 0,02 | 18,9 ± 0,1 | 2,939 | 2,953 | 18,9 |
| 24,00 ± 0,02 | 18,1 ± 0,1 | 2,896 | 2,908 | 18,1 |

Regressione:
 Costante 5,087412
 Err std di val Y 0,007055
 R quadrato 0,999884
 N.o di elementi 49
 Gradi di liberta 47
 Coefficiente(i) X -0,09080
 Err std di coef. 0,000142

$$r^4 = \frac{2 * \eta * D^2 * L}{\rho * d^4 * g}$$

$$= 2,2E-14 \text{ mm}^4$$

$$IR = 0,063436$$

$$r = 0,000384 \text{ mm}$$

$$IR = 0,015859$$

$d_{cap} = (0,77 \pm 0,01) \text{ mm}$
 diametro medio del capillare

Tabella 1

SVUOTAMENTO ATTRAVERSO UN CAPILLARE
grafico altezza colonna - tempo

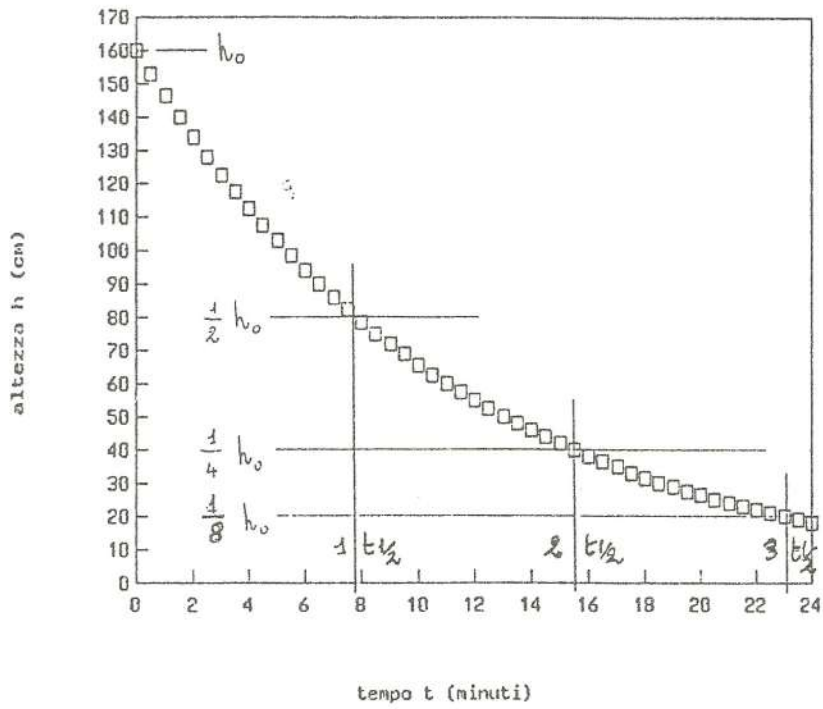


GRAFICO 1

SVUOTAMENTO ATTRAVERSO UN CAPILLARE
grafico logaritmico altezza - tempo

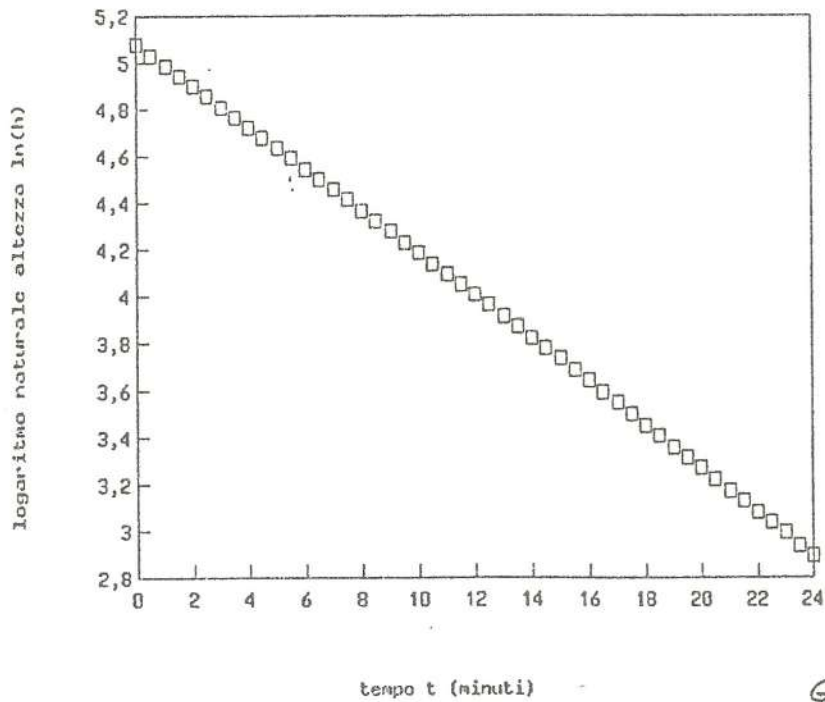


GRAFICO 2

SVUOTAMENTO ATRAVERSO UN CAPILLARE
grafico logaritmo altezza - tempo

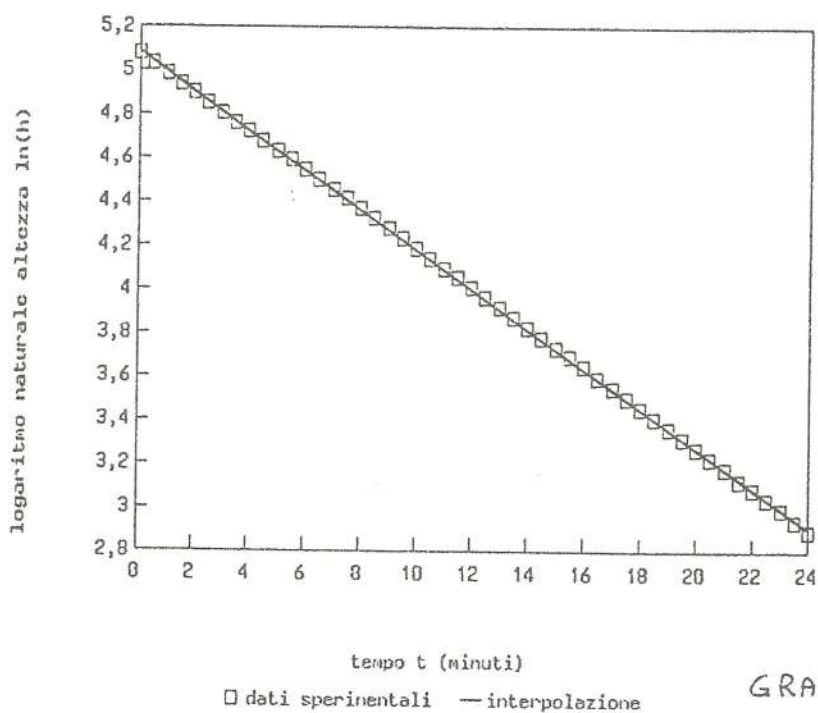


GRAFICO 3

SVUOTAMENTO ATTRAVERSO UN CAPILLARE
grafico altezza colonna - tempo

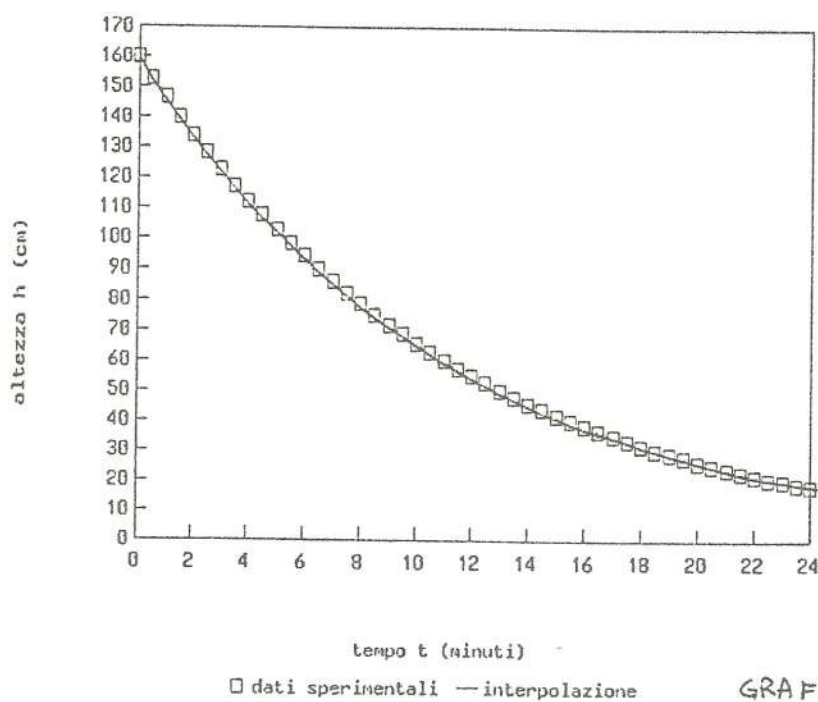


GRAFICO 4

Il grafico 3 rappresenta lo stesso andamento di quello precedente con sovrapposta la retta di regressione lineare.

Infine, il grafico 4 riporta i dati sperimentali rappresentati nel grafico 1 con sovrapposta la curva di interpolazione corrispondente alla relazione (5).

I grafici 3 e 4 mostrano il buon accordo tra esperienza e teoria.

Un ulteriore controllo, fatto calcolando in base alla (6) il diametro del capillare utilizzato per l'esperimento, ha fornito:

$$d_{cap} = (0,77 \pm 0,01) \text{ mm}$$

in ottimo accordo con il valore del diametro

$$d = (0,75 \pm 0,01) \text{ mm}$$

del filo metallico estratto dal cavo elettrico usato per realizzare il tubicino capillare.

5. Aspetti didattici per il biennio

L'analisi dei dati sperimentali e il confronto con la teoria descritti nei paragrafi precedenti possono essere trattati, in modo più o meno approfondito, a livello di triennio della scuola secondaria superiore.

Diverso, invece, deve essere il discorso a livello di biennio. Qui di seguito vengono proposti una linea di approccio più semplice e un approfondimento che ci sembrano adeguati a un tale livello scolastico.

A.

Dopo avere raccolto i dati sperimentali rappresentati dalle prime due colonne di tabella 1, tracciato il grafico 1 e messo in evidenza il tempo di dimezzamento come proprietà caratteristica della curva, e quindi anche del fenomeno, se ne determina il valore utilizzando soprattutto la tabella dei dati.

Nel caso attuale risulta che $t_{1/2}$ è quasi un terzo di 23,0 minuti, perché in tale intervallo l'altezza h si è ridotta, entro gli errori di misura, a un ottavo del valore iniziale; considerando che il livello dell'acqua ha sicuramente raggiunto la quota di 20,0 cm nell'intervallo fra 22,75 e 23,25 minuti, risulta

$$t_{1/2} = (7,7 \pm 0,1) \text{ minuti} \quad (1,3 \%).$$

Se si prendono $t_{1/2}$, tempo di dimezzamento, e h_0 , altezza iniziale della colonna d'acqua, rispettivamente come unità di tempo e di lunghezza, si possono raccogliere i dati iniziali e quelli corrispondenti alle riduzioni a metà, a un quarto, a un ottavo di h_0 in una tabellina come la seguente

| tempo t ($t_{1/2}$) | altezza h (h_0) |
|----------------------------|--------------------------|
| 0 | $1 = 2^0$ |
| 1 | $1/2 = 2^{-1}$ |
| 2 | $1/4 = 2^{-2}$ |
| 3 | $1/8 = 2^{-3}$ |

Tabella 2

dove, sostanzialmente, la prima colonna rappresenta i successivi valori del rapporto $t/t_{1/2}$, la seconda colonna quelli del rapporto h/h_0 .

Per ciascuna riga della tabella 2, allora, vale la relazione seguente

$$h/h_0 = 2^{-t/t_{1/2}} \quad (7)$$

ovvero

$$h = h_0 \cdot 2^{-t/t_{1/2}} \quad (8)$$

Con una calcolatrice tascabile, di tipo scientifico, si può controllare se la relazione (8) vale non solo per i quattro valori considerati, ma anche per tutti gli altri di tabella 1 e quindi, in definitiva, per qualsiasi valore del tempo. Si utilizza la funzione x^y , calcolando prima l'esponente $y = -t/t_{1/2}$ e memorizzandolo, poi trovando 2^y e infine moltiplicando il risultato per h_0 . Vediamo un esempio.

Consideriamo $t = 12,5$ minuti e calcoliamo l'intervallo di misura di y :

$$-12,5/7,8 < -t/t_{1/2} < -12,5/7,6$$

ossia:

$$-1,603... < -t/t_{1/2} < -1,645...$$

per cui

$$0,3293... > 2^{-t/t_{1/2}} > 0,3198...$$

e quindi

$$52,7 \text{ cm} > h > 51,2 \text{ cm}.$$

Il dato corrispondente in tabella 1 risulta in accordo con l'intervallo di misura trovato per h .

Dopo avere verificato la validità della (8) per diversi valori del tempo, per esempio affidandone uno ciascuno ad ogni alunno, si può concludere che essa è adatta a descrivere il fenomeno studiato.

B.

Si può approfondire la conoscenza del fenomeno, e della curva esponenziale, calcolando la velocità con cui scende, in istanti successivi, il livello dell'acqua nel serbatoio.

La velocità in un determinato istante non è calcolabile direttamente, ma è possibile conoscerne approssimativamente il valore calcolando la velocità media su un intervallo sufficientemente piccolo centrato nell'istante che si considera.

Come illustra la figura 2, ciò equivale a conoscere la pendenza della retta tangente alla curva nell'istante t' calcolando la pendenza $(h_2 - h_1)/(t_2 - t_1)$ della retta secante la curva nei punti corrispondenti agli estremi dell'intervallo $\Delta t = t_2 - t_1$.

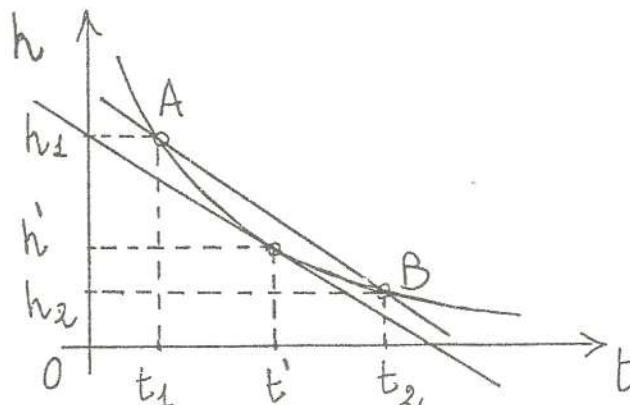


FIGURA 2

SVUOTAMENTO DI UN SERBATOIO D'ACQUA ATTRAVERSO UN CAPILLARE
 esperimento di laboratorio svolto il 25 febbraio 1993

| tempo t (minuti) | altezza h (cm) | $v = Dh/Dt$ (cm/s) | v/h (l/s) |
|---------------------|-------------------|-----------------------|--------------|
| 0,00 ± 0,02 | 160,0 ± 0,1 | | |
| 0,50 ± 0,02 | 153,0 ± 0,1 | -13,60 | -0,0889 |
| 1,00 ± 0,02 | 146,4 ± 0,1 | -13,10 | -0,0895 |
| 1,50 ± 0,02 | 139,9 ± 0,1 | -12,50 | -0,0893 |
| 2,00 ± 0,02 | 133,9 ± 0,1 | -11,70 | -0,0874 |
| 2,50 ± 0,02 | 128,2 ± 0,1 | -11,20 | -0,0874 |
| 3,00 ± 0,02 | 122,7 ± 0,1 | -10,90 | -0,0888 |
| 3,50 ± 0,02 | 117,3 ± 0,1 | -10,30 | -0,0878 |
| 4,00 ± 0,02 | 112,4 ± 0,1 | -9,70 | -0,0863 |
| 4,50 ± 0,02 | 107,6 ± 0,1 | -9,50 | -0,0883 |
| 5,00 ± 0,02 | 102,9 ± 0,1 | -9,10 | -0,0884 |
| 5,50 ± 0,02 | 98,5 ± 0,1 | -8,70 | -0,0883 |
| 6,00 ± 0,02 | 94,2 ± 0,1 | -8,40 | -0,0892 |
| 6,50 ± 0,02 | 90,1 ± 0,1 | -8,00 | -0,0888 |
| 7,00 ± 0,02 | 86,2 ± 0,1 | -7,70 | -0,0893 |
| 7,50 ± 0,02 | 82,4 ± 0,1 | -7,50 | -0,0910 |
| 8,00 ± 0,02 | 78,7 ± 0,1 | -7,20 | -0,0915 |
| 8,50 ± 0,02 | 75,2 ± 0,1 | -6,80 | -0,0904 |
| 9,00 ± 0,02 | 71,9 ± 0,1 | -6,40 | -0,0890 |
| 9,50 ± 0,02 | 68,8 ± 0,1 | -6,30 | -0,0916 |
| 10,00 ± 0,02 | 65,6 ± 0,1 | -6,10 | -0,0930 |
| 10,50 ± 0,02 | 62,7 ± 0,1 | -5,60 | -0,0893 |
| 11,00 ± 0,02 | 60,0 ± 0,1 | -5,30 | -0,0883 |
| 11,50 ± 0,02 | 57,4 ± 0,1 | -5,10 | -0,0889 |
| 12,00 ± 0,02 | 54,9 ± 0,1 | -4,90 | -0,0893 |
| 12,50 ± 0,02 | 52,5 ± 0,1 | -4,80 | -0,0914 |
| 13,00 ± 0,02 | 50,1 ± 0,1 | -4,60 | -0,0918 |
| 13,50 ± 0,02 | 47,9 ± 0,1 | -4,30 | -0,0898 |
| 14,00 ± 0,02 | 45,8 ± 0,1 | -4,10 | -0,0895 |
| 14,50 ± 0,02 | 43,8 ± 0,1 | -4,00 | -0,0913 |
| 15,00 ± 0,02 | 41,8 ± 0,1 | -3,80 | -0,0909 |
| 15,50 ± 0,02 | 40,0 ± 0,1 | -3,60 | -0,0900 |
| 16,00 ± 0,02 | 38,2 ± 0,1 | -3,60 | -0,0942 |
| 16,50 ± 0,02 | 36,4 ± 0,1 | -3,40 | -0,0934 |
| 17,00 ± 0,02 | 34,8 ± 0,1 | -3,30 | -0,0948 |
| 17,50 ± 0,02 | 33,1 ± 0,1 | -3,20 | -0,0967 |
| 18,00 ± 0,02 | 31,6 ± 0,1 | -2,90 | -0,0918 |
| 18,50 ± 0,02 | 30,2 ± 0,1 | -2,80 | -0,0927 |
| 19,00 ± 0,02 | 28,8 ± 0,1 | -2,70 | -0,0937 |
| 19,50 ± 0,02 | 27,5 ± 0,1 | -2,50 | -0,0909 |
| 20,00 ± 0,02 | 26,3 ± 0,1 | -2,40 | -0,0913 |
| 20,50 ± 0,02 | 25,1 ± 0,1 | -2,40 | -0,0956 |
| 21,00 ± 0,02 | 23,9 ± 0,1 | -2,30 | -0,0962 |
| 21,50 ± 0,02 | 22,8 ± 0,1 | -2,10 | -0,0921 |
| 22,00 ± 0,02 | 21,8 ± 0,1 | -2,00 | -0,0917 |
| 22,50 ± 0,02 | 20,8 ± 0,1 | -1,90 | -0,0913 |
| 23,00 ± 0,02 | 19,9 ± 0,1 | -1,90 | -0,0955 |
| 23,50 ± 0,02 | 18,9 ± 0,1 | -1,80 | -0,0952 |
| 24,00 ± 0,02 | 18,1 ± 0,1 | | |
| | | media | -0,0909 |

Tabella 3

Le due rette non sono esattamente parallele, ma tenderanno a esserlo quanto più l'intervallo Δt è piccolo.

Per calcolare la velocità media su intervalli sufficientemente brevi rispetto alla durata del fenomeno in studio, considereremo intervalli di un minuto ciascuno. Ad ogni istante di tempo, che figura nella prima colonna della tabella dei dati, assegneremo come valore della velocità quello della velocità media, calcolato sull'intervallo che va da mezzo minuto prima a mezzo minuto dopo l'istante considerato. Faremo questa operazione per tutti i valori del tempo, ad eccezione del primo e dell'ultimo per i quali non è possibile effettuare il calcolo. Usando Lotus-123 l'operazione è semplicissima e i valori ottenuti sono riportati nella terza colonna di tabella 3.

E' interessante confrontare il valore della velocità con quello dell'altezza della colonna. Il grafico 5 mostra la relazione tra v e h , una proporzionalità diretta. Ciò risulta evidenziato anche dal calcolo di v/h , i cui valori sono riportati nella quarta colonna di tabella 3.

Dunque il fenomeno studiato è caratterizzato dal fatto che, per tutta la sua durata, la velocità con cui il pelo del liquido scende è direttamente proporzionale all'altezza della colonna nel serbatoio.

Ciò equivale a dire che la pendenza della tangente alla curva, che descrive l'andamento di h al variare di t , è direttamente proporzionale all'ordinata del punto di tangenza, per tutti i valori considerati della variabile indipendente.

Tale caratteristica è una proprietà esclusiva della curva esponenziale.

La costante di proporzionalità altro non è che il coefficiente angolare della retta di regressione ottenuto nel paragrafo 4: ma questa è un'informazione da non dare ai ragazzi che frequentano ancora il biennio della scuola secondaria superiore.

SVUOTAMENTO ATTRAVERSO UN CAPILLARE
grafico velocità menisco - altezza

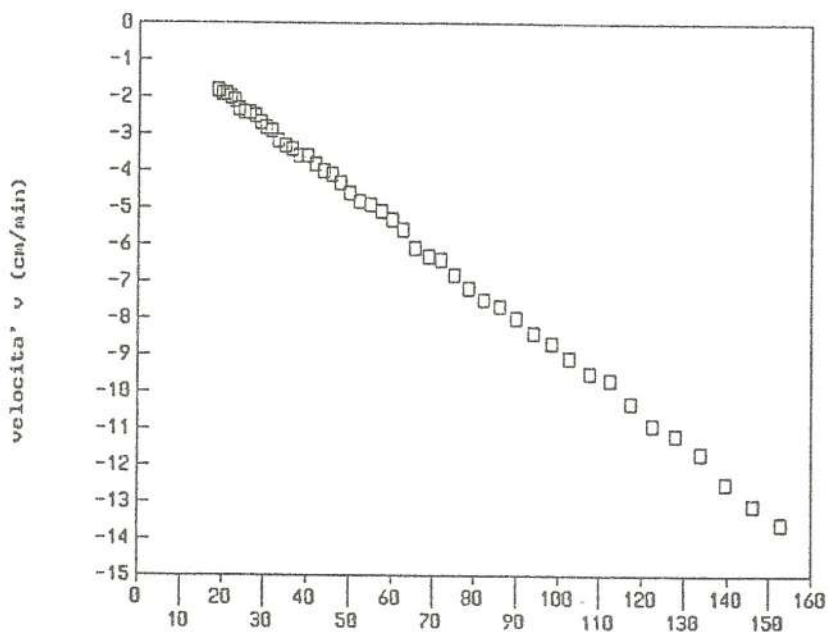


GRAFICO 5

Relazione resistenza-temperatura in un termistore N.T.C.

(a cura di Riccardo Govoni e Lina Mantovani)

È noto che la resistenza elettrica di un solido dipende in buona misura dalla temperatura e normalmente aumenta con l'aumentare di quest'ultima. Esistono tuttavia dei resistori particolari, detti N.T.C. (Negative Temperature Coefficient), che presentano invece un marcato coefficiente di temperatura negativo, ovvero diminuiscono la loro resistenza all'aumentare della temperatura. Un semplice esperimento basato su questi componenti, analizzato alla luce di un modello microscopico di conduzione ci porterà ad ottenere dei dati quantitativi su alcune grandezze microscopiche strettamente legate alla struttura della materia.

1. DESCRIZIONE DI UN TERMISTORE N.T.C. E SUA TECNOLOGIA COSTRUTTIVA.

I materiali di cui sono fatti questi componenti sono costituiti da ossidi di cromo (Cr), manganese (Mn), ferro (Fe), cobalto (Co) e nickel (Ni). Allo stato puro, questi ossidi posseggono resistività molto elevata; l'aggiunta di piccole quantità di ioni di differente natura (per es. di titanio (Ti), di litio (Li), ecc.), aventi differente valenza, consente di trasformarli in materiali semiconduttori. Così per es.:

- a) nell'ossido di ferro (Fe_2O_3), alcuni ioni Fe^{3+} possono essere sostituiti con ioni Ti^{4+} . Perchè il materiale rimanga elettricamente neutro, un ugual numero di ioni ferro deve passare dallo stato Fe^{3+} allo stato Fe^{2+} . Alle basse temperature, gli elettroni in più degli ioni Fe^{2+} si trovano negli ioni di ferro vicino agli ioni Ti^{4+} ; a temperature più elevate questi elettroni tendono invece a "staccarsi" a poco a poco da questi posti, contribuendo ad aumentare la conduttività del materiale. In questo caso, abbiamo ottenuto un materiale semiconduttore di tipo n la cui maggiore o minore conduttività viene a dipendere dalla temperatura.
- b) nell'ossido di nickel NiO, oppure nell'ossido di cobalto CoO, gli ioni Ni^{2+} oppure Co^{2+} possono essere sostituiti principalmente con ioni Li^+ . In questo caso perchè il materiale rimanga elettricamente neutro gli ioni Li^+ sono compensati con eguali quantità di ioni Ni^{3+} oppure Co^{3+} . A basse temperature, le lacune (e cioè i posti lasciati liberi dagli elettroni) degli ioni trivalenti vengono a trovarsi vicino agli ioni del materiale aggiunto; a temperature più elevate tendono ad allontanarsi da questi posti e a muoversi più liberamente attraverso il cristallo.

Molte volte, per ottenere una migliore riproducibilità e stabilità delle caratteristiche del materiale, vengono aggiunti ossidi che funzionano da stabilizzatori. L'impiego o meno di un particolare tipo di ossido stabilizzante dipenderà esclusivamente dal coefficiente di temperatura e dalla resistenza specifica che si desiderano ottenere.

I processi per la realizzazione dei termistori N.T.C. possono essere paragonati a quelli normalmente impiegati per la formazione dei materiali ceramici. I materiali impiegati vengono infatti assoggettati ad un continuo processo di miscelazione durante il quale viene aggiunto anche un collante plastico. Dopo di che, il materiale è pronto per essere stampato nelle forme definitive desiderate, per esempio, dischi, bastoncini, perline, ecc.

Le varie esecuzioni subiscono un processo di cottura a temperatura molto elevata, tale in ogni caso da produrre un fissaggio stabile dell'ossido. I contatti elettrici alle estremità del componente sono aggiunti con sistemi usuali: saldatura mediante pasta all'argento oppure ricorrendo a sistemi elettrolitici oppure alla spruzzatura metallica.

I termistori N.T.C. in miniatura vengono realizzati facendo cadere una "goccia" di ossidi tra le estremità di due fili paralleli di una lega di platino. L'essiccamento farà amalgamare i componenti. I fili in lega di platino hanno un diametro di $60 \mu\text{m}$ e distano l'uno dall'altro $0,25 \text{ mm}$. Nella maggior parte delle applicazioni, questa minuscola perlina di materiale semiconduttore viene inserita in un contenitore di vetro, onde impedire che possa essere aggredita da gas o da liquidi.

Dalla manualistica messa a disposizione dalle ditte costruttrici si ha che la variazione della resistenza dei termistori N.T.C. in funzione della temperatura è fornita, entro un ampio campo di variazione della temperatura, dalla seguente espressione:

$$R_T = R_0 e^{B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}$$

$B =$ Costante che dipende dal materiale con cui è costruito il termistore
 $R_0 =$ Resistenza alla temperatura T_0 (298 K)
 $R_T =$ Resistenza ad una certa temperatura T in K

Da questa espressione, di cui più avanti daremo una giustificazione teorica, si deduce che B è espresso in K.

2. MODELLI TEORICI

L'esperimento sulla relazione tra temperatura e resistenza negli N.T.C. può costituire un valido aggancio alla teoria microscopica della conduzione nei solidi ed un collegamento con un modello termodinamico per giustificare l'andamento esponenziale.

Prendiamo in considerazione:

- metalli, ove i portatori di carica (elettroni) sono non localizzati nella struttura cristallina
- semiconduttori ove i portatori di carica (elettroni e lacune) sono sostanzialmente localizzati.

Analizziamo il comportamento di una carica e in un tratto di conduttore in cui è presente un campo elettrico \vec{E} trattando per semplicità una situazione monodimensionale. La forza che agisce sulla carica è:

$$F = -e \cdot E = -e \cdot \frac{\Delta V}{l}$$

e contemporaneamente (siamo in piena fisica classica) vale:

$$F = m \cdot a$$

per cui l'accelerazione diventa

$$a = \frac{-e \cdot \Delta V}{m \cdot l}$$

Occorre ora introdurre l'ipotesi che gli elettroni si muovano all'interno dei conduttori costituendo un sorta di gas ideale, di nuvola all'interno della quale avvengono delle interazioni che portano le singole particelle ad un moto casuale, browniano. Ed ancora per semplicità ipotizzeremo che dopo ogni "urto" (che avviene mediamente in un tempo τ) la particella "perda memoria" della situazione precedente; cioè dopo "l'urto" il vettore velocità si trovi orientato nella direzione opposta a quella che aveva prima dell'interazione.

Si possono allora individuare due velocità. Quella di diffusione esprimibile come:

$$v = a \cdot t \quad \text{dove } t \text{ è l'intervallo di tempo considerato}$$

e la velocità media di deriva, calcolata tra un urto e l'altro, ovvero:

$$\bar{v}_d = a \cdot \tau$$

Poiché quest'ultima è una velocità media tra la velocità iniziale, che nel nostro modello vale zero, e la velocità al momento della collisione dopo l'intervallo di tempo τ , allora supponendo l'accelerazione costante potremo calcolarla come

$$\bar{v}_d = \frac{0 + a \cdot \tau}{2} = \frac{e \cdot \Delta V \cdot \tau}{2 \cdot m \cdot l} \quad (i)$$

Con riferimento alla figura a fianco che rappresenta un pezzo di conduttore solido con "finestra" sull'interno, il numero di elettroni che attraversano la sezione S nel tempo t è: $N \cdot S \cdot \bar{v}_d \cdot t$ dove N rappresenta la densità volumica di elettroni.

Allora la corrente che attraversa il nostro conduttore è

$$i = \frac{-e \cdot N \cdot S \cdot \bar{v}_d \cdot t}{t}$$

Se ora sostituiamo al valore della velocità di deriva quello ricavato dalla relazione (i) si ottiene

$$i = \frac{e^2}{2 \cdot m} \cdot N \cdot \tau \cdot \frac{S}{l} \cdot \Delta V$$

Ricaviamo ora la resistenza

$$\frac{\Delta V}{i} = \left(\frac{2 \cdot m}{e^2} \cdot \frac{1}{N} \cdot \frac{1}{\tau} \right) \cdot \frac{l}{S} \quad (ii)$$

ove è facilmente riconoscibile la legge di Ohm generalizzata in cui

$$\rho = \frac{2 \cdot m}{e^2} \cdot \frac{1}{N} \cdot \frac{1}{\tau}$$

rappresenta la resistività.

Possiamo quindi suddividere i conduttori solidi in base a due parametri che compaiono in questa relazione e che sono intimamente legati con la struttura del materiale considerato.

⇒ I conduttori la cui resistività (e quindi di fatto la resistenza) è principalmente legata a $\frac{1}{\tau}$ come i metalli e i P.T.C. (termistori a coefficiente di temperatura positivo);

⇒ I conduttori la cui resistività (e quindi di fatto la resistenza) è principalmente legata a $\frac{1}{N}$ come gli N.T.C., i fotoresistori, i varistori (componenti che variano la loro resistenza al variare della tensione applicata).

Siamo così giunti a mettere in evidenza il fatto che negli N.T.C., all'aumentare della temperatura, aumenta la densità di carica volumica e quindi diminuisce la resistenza. Non abbiamo ancora un'idea però di come vari.

Per trovare la relazione matematica che collega la densità di carica volumica con la temperatura, ci serviremo dell'analogia con la pressione esercitata da un gas perfetto su un'area di sezione unitaria, quando è sottoposto alla sola forza di gravità. Questa agirà, nel nostro modello, in analogia con la forza dovuta al campo elettrico E .



Le molecole del gas collideranno con le pareti del sistema a temperatura T . Ciò che cercheremo è la frazione di molecole che si trovano nell'intervallo $z, z+dz$, che corrispondono in qualche misura con la densità di carica volumica già vista.

Consideriamo la pressione alla base del cilindro e siano:
 $n(z)$ = il numero di molecole per unità di volume all'altezza z ;
 m = la massa di ciascuna molecola;
 g = l'accelerazione di gravità ;
 ρ = la densità.

Allora:

$$dP = -\rho \cdot g \cdot dz = -n \cdot m \cdot g \cdot dz \quad (1)$$

Ricorrendo alla legge dei gas perfetti possiamo trovare un'altra relazione tra $P(z)$ e $n(z)$

$$PV_M = RT \quad (2)$$

dove V_M è il volume di una mole di gas ideale e R è la costante dei gas perfetti ($R = 8,31 \text{ J/mole K}$).

Se chiamiamo N_0 il numero di Avogadro, la relazione con V_M sarà:

$$V_M = \frac{N_0 m}{\rho} = \frac{N_0}{n} \quad (3)$$

Dalle ultime due equazioni si ricava:

$$P = n \cdot \left(\frac{R}{N_0} \right) T = nkT \quad (4)$$

con la sostituzione della costante di Boltzman al posto di R/N_0 .

Ponendo ora che T sia indipendente da z , possiamo differenziare l'equazione (4) rispetto a z :

$$\frac{dP}{dz} = kT \cdot \frac{dn}{dz} \quad (5)$$

sostituendo dP/dz nella (1) si ottiene:

$$-\frac{dn}{n} = \frac{mg}{kT} dz \quad (6)$$

integrando la (6) si ricava

$$n = A e^{-\frac{mgz}{kT}} \quad (7)$$

dove A è una costante indipendente da z e, possibilmente, da T e n . Poichè mgz è un'energia, in questo caso gravitazionale, possiamo sostituirla con la corrispondente $E(z)$

$$n = A e^{-\frac{E(z)}{kT}} \quad (8)$$

Dalla (8) possiamo vedere che la densità di carica volumica varia, rispetto alla temperatura, come $e^{-1/T}$ poichè dalla (ii) si era trovato che la resistenza di un N.T.C. dipende principalmente dall'inverso della carica volumica, allora possiamo affermare che la resistenza di un N.T.C. varia come $e^{1/T}$ e quindi non sarà una variazione molto "rapida".

Sempre nella (8) compare anche un altro termine ad esponente, oltre alla costante di Boltzman: $E(z)$, un'energia potenziale. Ovviamente se tutte le particelle di gas si trovassero ad altezza 0 non si potrebbe parlare di densità di carica volumica; occorre quindi che vi sia un certo numero di particelle che stia ad un'altezza z perchè la nostra relazione abbia significato. Per il campo gravitazionale questa variabile può assumere un valore qualunque; non così per l'analogo elettrico. Poichè i materiali costituenti gli N.T.C., lo ricordo, sono semiconduttori, solamente quelle cariche che avranno un'energia tale da saltare dalla banda di valenza a quella di conduzione, saranno disponibili per la conduzione. Quindi, calcolato ΔE , avremo il valore del gap energetico tra banda di valenza e banda di conduzione per il semiconduttore in esame.

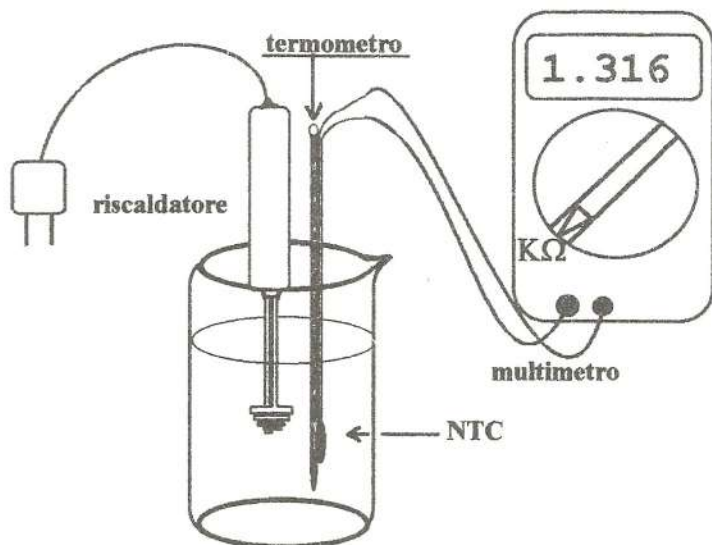
3. ESECUZIONE DELL'ESPERIMENTO ED ELABORAZIONE DATI

La conduzione dell'esperimento è, come già detto, sostanzialmente molto semplice ed eseguibile con materiale relativamente a basso costo.

Materiale occorrente:

- ⇒ un termistore NTC, uno qualunque va bene ma è consigliabile non superare una resistenza di $10\text{ k}\Omega$ a $25\text{ }^\circ\text{C}$ e di forma a pastiglia per facilitarne il montaggio
- ⇒ un termometro a mercurio con sensibilità di lettura di $0,5\text{ }^\circ\text{C}$
- ⇒ un multimetro digitale da $3\frac{1}{2}$ dgt fornito di ohmmetro (in commercio ne esistono di dignitosi a circa L. 25.000)
- ⇒ un beker da 500 ml
- ⇒ un riscaldatore ad immersione da 300 W alimentato dalla tensione di rete.

L'apparato sperimentale può essere predisposto come nella sottostante figura.



NOTA. Per motivi di sicurezza il riscaldatore è sostituibile con una resistenza da $3,9\ \Omega$ da 5 W in contenitore ceramico. Il contenitore deve essere frantumato stringendolo gradualmente in una morsa sino ad estrarre la resistenza, che deve restare integra avvolta su di un supporto anch'esso ceramico. Anche se condotta con attenzione l'operazione prevede un 10% di "mortalità" dei resistori. Il resistore usato come riscaldatore ad immersione può essere alimentato da una ddp di 9 Vcc per dissipare una potenza di circa 20 W. Ovviamente la quantità di acqua da riscaldare in questo caso sarà minore, indicativamente 200 ml. I valori del resistore e della ddp da impiegare sono indicativi, diciamo che i 20 W di dissipazione sono un buon compromesso tra tempo occorrente per il riscaldamento ed alimentazione ottenibile anche da comuni, ma dispendiose, pile da 4,5 V poste in serie (meglio avere un parallelo di due in serie). È consi-

gliabile l'impiego di un alimentatore, anche un semplice trasformatore $220 \div 9\text{ Vac}$, 3 A.

IMPORTANTE. Entrambi i tipi di riscaldatori devono essere connessi all'alimentazione SOLO quando sono immersi nell'acqua pena la loro veloce rottura.

I terminali dell'NTC non sono isolati e sono saldabili. A rigore questi si dovrebbero isolare per non misurare, di fatto, la resistenza parallela tra quelle dell'NTC e quella dell'acqua. Però la resistenza dell'acqua tra i due terminali è tale da costituire un errore trascurabile se ignorata. Misure effettuate sull'acqua di Mantova nelle condizioni di lavoro dell'NTC hanno fornito come misura della resistenza alcune centinaia di $\text{k}\Omega$. Sarà bene effettuare il montaggio dell'NTC il più vicino possibile al bulbo del termometro come raffigurato nella figura accanto.

La raccolta dati è semplicissima: dopo aver fatto scorrere l'acqua per alcuni minuti, in modo da averla ai di sotto della temperatura di $25\text{ }^\circ\text{C}$, si procede al riscaldamento, rilevando la resistenza dell'NTC ogni ΔT di $5\text{ }^\circ\text{C}$ (ovviamente la scelta è dettata unicamente dalla comodità). Si avrà cura di ottenere almeno una decina di dati sperimentali.



4. RISULTATI DI UN GRUPPO DI LAVORO

| t (°C) | R (ohm) |
|------------|-----------|
| 20,0 ± 0,5 | 1316 ± 18 |
| 25,0 ± 0,5 | 1060 ± 15 |
| 30,0 ± 0,5 | 870 ± 12 |
| 35,0 ± 0,5 | 730 ± 11 |
| 40,0 ± 0,5 | 603 ± 9 |
| 45,0 ± 0,5 | 500 ± 8 |
| 50,0 ± 0,5 | 413 ± 7 |
| 55,0 ± 0,5 | 349 ± 6 |
| 60,0 ± 0,5 | 293 ± 6 |
| 65,0 ± 0,5 | 249 ± 5 |
| 70,0 ± 0,5 | 210 ± 5 |
| 75,0 ± 0,5 | 180 ± 6 |
| 80,0 ± 0,5 | 154 ± 6 |

Il valore nominale a 25 °C del termistore utilizzato è 1 kΩ ; il multimetro un Bekman modello DM25L con accuratezza nella scala dei 2 kΩ di ±(1.2 % della lettura + 2 dgt), mentre nella scala dei 200 Ω è ±(1.2 % della lettura + 4 dgt) (ultimi due dati della tabella).

Poichè, come già detto

$$R_T = R_0 e^{B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}$$

allora

$$R_T = A e^{\frac{\Delta E}{kT}}$$

con

$$A = R_0 e^{-\frac{B}{T_0}} \quad e \quad B = \frac{\Delta E}{k}$$

Per poter usare il programma di regressione lineare presente in 123 Lotus, poniamo

$$x = \frac{1}{T} \quad e \quad y = \ln R$$

Questo passaggio è legittimo solo se R viene inteso come valore numerico e non come grandezza fisica. Si ottiene così :

$$y = \frac{\Delta E}{k} x + \ln A$$

che di fatto rappresenta l'equazione di una retta (anche per ln A vale quanto detto sopra a proposito di lnR)

Se ora applichiamo la regressione lineare ai dati "x" e "y" il coefficiente della x corrisponderà a ΔE/k, (B), mentre la costante sarà ln A .

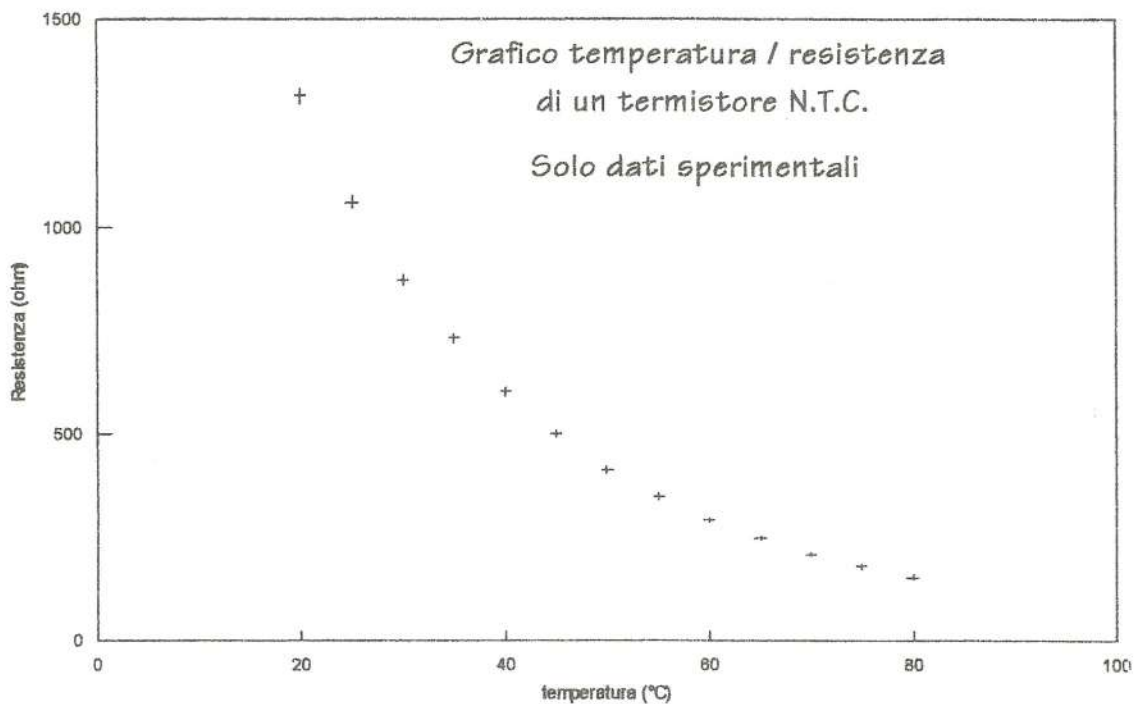
Ricordando che $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$, si può moltiplicare il prodotto B·k per $6,25 \cdot 10^{18} \text{ eV/J}$ ed ottenere così il ΔE direttamente in eV. Per i componenti normalmente in commercio questo valore è dell'ordine di 0,3 eV.

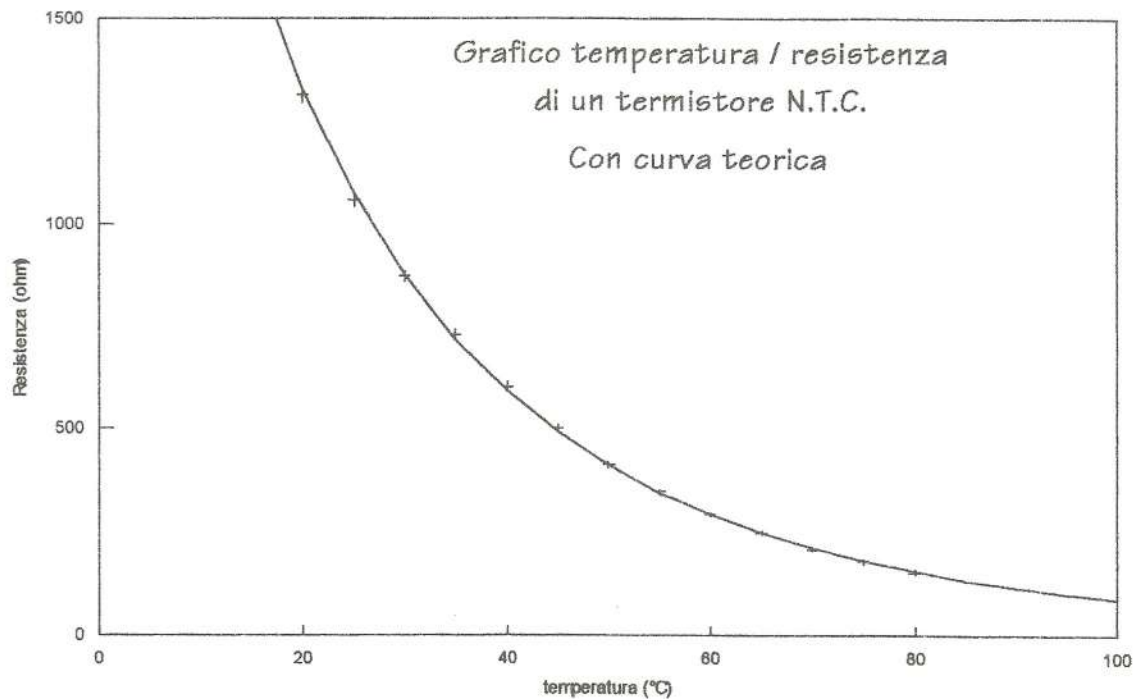
Ecco quindi l'elaborazione dei dati sperimentali secondo lo schema proposto:

| 1/T (K ⁻¹) | ln R | R = A e ^{B/T} | Regressione: | |
|------------------------|----------|------------------------|--------------------|-------------------|
| 0,003413 | 7,182352 | 1330,013 | Costante | -5,42121 |
| 0,003356 | 6,966024 | 1076,313 | Err std di val Y | 0,011068 |
| 0,0033 | 6,768493 | 877,1124 | R quadrato | 0,999768 |
| 0,003247 | 6,593045 | 719,5444 | N.o di elementi | 13 |
| 0,003195 | 6,401917 | 594,0287 | Gradi di libertà | 11 |
| 0,003145 | 6,214608 | 493,3728 | | |
| 0,003096 | 6,023448 | 412,1348 | | |
| 0,003049 | 5,855072 | 346,167 | Coefficiente (i) X | B = 3695,9477 K |
| 0,003003 | 5,680173 | 292,2852 | Err std di coef. | 16,992678 |
| 0,002959 | 5,517453 | 248,0287 | | |
| 0,002915 | 5,347108 | 211,4832 | | R σ' = 1076,313 Ω |
| 0,002874 | 5,192957 | 181,1504 | | |
| 0,002833 | 5,036953 | 155,8501 | A = | 0,0044218 Ω |
| | | | k = | 1,38E-23 J/K |
| | | | ΔE = | 0,3187755 eV |

Si nota immediatamente che il termine R quadrato, presente nella regressione è molto vicino a 1 e quindi l'adattamento tra dati sperimentali e quelli regressi è buono. Il termine Rσ' rappresenta il valore ottenuto con la regressione della resistenza dell'N.T.C. alla temperatura di 25 °C; ricordo che il valore nominale doveva essere di 1 kΩ, quello sperimentale 1060 kΩ, mentre quello teorico è risultato 1076 kΩ. La differenza tra questi ultimi due valori, che è circa del 2%, potrebbe essere un indice dell'incertezza sulla misura di ΔE.

Nella figura sottostante vediamo la rappresentazione dei soli dati sperimentali, mentre in quella immediatamente seguente viene raffigurata anche la curva teorica ottenuta mediante la regressione.





L'equazione teorica caratteristica dell'N.T.C preso in esame è

$$R_T = 4,42 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot e^{\frac{3696(k)}{T}}$$

5. ASPETTI DIDATTICI

L'intera trattazione è adatta per una classe terminale di S.M.S., ove è possibile sviluppare con la dovuta completezza i vari aspetti e riferimenti e pervenire infine ad una sintesi.

In un biennio invece (o in un triennio di Istituto Professionale) sarà opportuno soffermarsi unicamente sugli aspetti qualitativi, introducendo un componente di largo uso in campo applicativo come i termistori. Peraltro lo studio del grafico resistenza / temperatura sarà, in quest'ambito, un valido esempio di corrispondenza non "usuale" di grandezze fisiche.

**RAPPRESENTAZIONE DEI DATI SPERIMENTALI CON LE RISPETTIVE INCERTEZZE
MEDIANTE 123 DELLA LOTUS®**

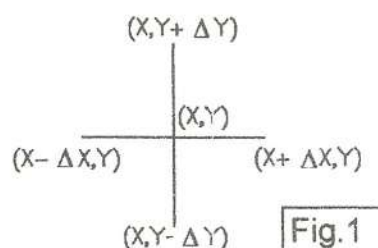
(a cura di Riccardo Govoni)

Una delle applicazioni più diffuse dei fogli elettronici nella nostra disciplina è tesa ad ottenere l'elaborazione e la rappresentazione dei dati sperimentali. Purtroppo questi strumenti di lavoro, per altro sempre più potenti e sofisticati, sono nati come ausilio del mondo tecnico finanziario più che di quello scientifico. Così uno degli aspetti che è stato trascurato da questi programmi è la visualizzazione dei dati sperimentali con il proprio intervallo d'incertezza, anche se mi risulta che con le ultime release di alcuni prodotti di questo genere si siano predisposte delle opzioni in tal senso.

In effetti è possibile ottenere la rappresentazione dei dati sperimentali con gli intervalli d'incertezza tenendo presente alcuni accorgimenti. In ambiente 123 Lotus (il foglio elettronico maggiormente diffuso in ambito scolastico) è possibile visualizzare in un grafico XY i punti sperimentali con le relative incertezze, in modo tale da formare una croce oppure un rettangolo; personalmente ho scelto la prima rappresentazione per evidenziare che tra tutti i dati possibili, rappresentanti per ciascuna misura l'intervallo d'incertezza, ve ne è uno che ha avuto la maggior probabilità di "uscita" ovvero il dato osservato, quello centrale.

La "sintassi" per tracciare delle linee in un grafico tipo XY di 123 è molto simile a quella del Basic o del Pascal: si forniscono al programma le coordinate del punto d'inizio della linea, inserendole in due celle adiacenti sulla stessa riga, poi nelle celle immediatamente sottostanti le coordinate del punto d'arrivo della linea. Il procedimento continua sino a quando il programma non incontra una coppia di celle vuote nella zona dati dichiarati al programma all'inizio della costruzione del grafico. In questo caso sul grafico non viene tracciata alcuna linea sino alla successiva coppia di valori, inclusi naturalmente nella stessa zona dati, che costituiranno le coordinate del nuovo inizio linea e così via..

Ogni punto sperimentale, con la propria incertezza è rappresentabile con una croce che avrà coordinate schematizzabili dall'immagine in figura 1. Quindi per ogni coppia di dati sperimentali (X,Y) si devono calcolare altre quattro coppie di valori, si deve includere almeno una coppia di celle vuote e ripetere l'operazione con la coppia di valori successiva sino ad esaurimento dei dati. Anche se 123 dispone di varie opzioni (come Copia, Muovi ecc..) per automatizzare la procedura, la lungaggine dell'operazione è evidente.



Ho chiamato "punti.wk1" un foglio di lavoro già predisposto per accogliere i dati da visualizzare dove è stata implementata una "macro" con cui eseguire tutte le fasi ripetitive. Le righe che servono al nostro scopo sono quelle che si possono osservare nel "LISTATO MACRO» riportato più oltre individuate dalle celle T59...T61.

Ma procediamo con ordine e vediamo come sono costruite le macroistruzioni e come sia possibile implementarle su di un foglio di lavoro.

Prima di tutto ho scelto una casella da cui partire ad inserire i dati, segnatamente la cella B 8, e da questa ho preparato delle celle per l'inserimento dei dati (figura 2). Nella colonna B vanno inseriti i dati della variabile indipendente e nella colonna D le rispettive incertezze.

Nella colonna E si inseriranno le variabili dipendenti accompagnate dalle incertezze nella colonna G. Un certo numero di celle delle colonne C e F sono state riempite con "±" per velocizzare la preparazione della tabella dati.

| | B | C | D | E | F | G |
|----|---|---|---|---|---|---|
| 7 | | | | | | |
| 8 | | ± | | | ± | |
| 9 | | ± | | | ± | |
| 10 | | ± | | | ± | |

Fig. 2

Una delle istruzioni utilizzate è quella dell'Inserimento Righe, per cui sarà bene che le regioni coinvolte dalle istruzioni sarà bene siano piuttosto lontane dalla zona dati e i dati sperimentali da graficare vengano posti sotto questa zona contenente le macro istruzioni. Per questi motivi ho collocato le istruzioni a partire dalla cella S 47 e la zona da graficare a partire dalla cella U 70.

Per l'inserimento dei dati si deve tener presente di iniziare col primo dato nella cella B8 e **di lasciare vuote le celle immediatamente sopra la zona dati (B 7..G 7)**, la ragione di ciò risiede nel come è stata scritta la "macro".

Alcune celle particolari sono "nominate" con la procedura Zona Nomi Crea e servono per lo sviluppo delle macroistruzioni. Naturalmente la collocazione è arbitraria. Nella tabella 1 riporto la collocazione di quelle che poi ho utilizzato effettivamente e sono citate nel "listato"; alcune sono precedute dal segno \ e seguite da una lettera. Esse seguono la convenzione delle passate release di 123 indicando una zona che contiene istruzioni eseguibili: questa sintassi non è più vincolante con le versioni recenti di 123, ma è comunque accettata dal programma. Anche la stesura della "macro" ha avuto diverse release nel corso del tempo e dopo prove "sul campo". Questo spiega il sovrapporsi di convenzioni delle macroistruzioni che appartengono a release diverse di 123.

| NOME | Posizione |
|------------|-----------|
| CONTATORE | X57..X57 |
| N | S47..S47 |
| RIPRISTINA | Z47..Z47 |
| \B | X58..X58 |
| \D | X62..X62 |
| \V | T49..T49 |

Tab. 1

Devo premettere che nella presentazione del "listato" ho ommesso alcune colonne, riportando solo le celle riempite nella versione originale del foglio "punti.wk1", per ottenere di conservare la leggibilità del testo e, nel contempo, dare l'idea di dove collocarlo. Ovviamente le posizioni non sono vincolanti e potranno essere modificate, magari una volta impraticati con la sintassi delle macroistruzioni.

Il "listato" segue la convenzione che le istruzioni riportate devono intendersi come digitate in una stessa cella, se non sono separate da un bordo tratteggiato, orizzontalmente o verticalmente.

"LISTATO MACRO"

| S | T | W | X | Z |
|----|---|------|------------------------|--|
| 47 | <===== numero di dati | | | {posizione}bB~{end}{b}/zS~ |
| 48 | | | | {posizione}u70~/zS{d 6}{b (n*7-3)}~ {home}~ |
| 49 | {posizione}bB~/zv{end}{b}{d 5}~ | | | /grgu |
| 50 | /c{END}{B}~u70~{END}{B 2}@cont({A}.{END}{a})~zv~n~ | | | /znax~/znadx~/znay~/znady~ |
| 51 | {posizione}bB~{d 2} | | | |
| 52 | /c{END}{B}~v70~ | | | |
| 52 | {posizione}bB~{d 3} | | | |
| 54 | /c{END}{B}~w70~ | | | |
| 55 | {posizione}bB~{d 5} | | | |
| 56 | /c{END}{B}~x70~{posizione}u71~ | | | |
| 57 | {per contatore;1;n-1;1;\b} | | | |
| 58 | {posizione}u70~ | \b-> | /fir{b 5}~{basso 7}~ | |
| 59 | /zncx~{d}~/zncdx~{d}~/zncy~{d}~/zncdy~{d 2}~+x-x{d}+y{b}{s}~+x+dx{d}+y{b}{s}~+x{d}+y{b}{s}~ +x{d}~+y+dy{b}{s}~+x{d}~+y-dy{b}{s}~ | | | |
| 60 | {end}{a}~ | | | |
| 61 | {per contatore;1;n-1;1;d} | | | |
| 62 | {posizione}x~{d 5}~ | \d-> | /c{b 4}{d}~{b 7}~{b 7} | |
| 63 | /GTxx.{B (N*7-3)}~{ESC}{ESC}{D}~ | | | |
| 64 | /GA.{B (N*7-3)}~OFGRUUU{GRAFO} | | | |
| 65 | /AS{ESC}{ESC} | | | |

Per una prova del foglio così elaborato, consiglio di ricopiare il "listato" riportato nelle celle indicate.

Alcune avvertenze per semplificare la riproduzione del "listato":

- il carattere "{" se non presente sulla tastiera e se possedete una versione di 123 per Windows, si ottiene con la combinazione di tasti Maiusc+Ctrl+Alt+è. Se possedete una versione di 123 per DOS il carattere è ottenibile con Alt+1 (quello della riga superiore della tastiera non quello del pad numerico)
- il carattere "}" se non presente sulla tastiera e se possedete una versione di 123 per Windows, si ottiene con la combinazione di tasti Maiusc+Ctrl+Alt+ + (quello sulla tastiera) Se possedete una versione di 123 per DOS il carattere è ottenibile con Alt+2 (quello della riga superiore della tastiera non quello del pad numerico)
- il carattere "@" se non presente sulla tastiera si ottiene con la combinazione di tasti Ctrl+Alt+ò.
- il carattere "~" se non presente sulla tastiera e se possedete una versione di 123 per Windows, si ottiene con la combinazione di tasti Alt+0126 (questa volta i numeri del pad numerico). Se possedete una versione di 123 per DOS il carattere è ottenibile con Alt+3 (quello della riga superiore della tastiera non quello del pad numerico).

Dopo aver anche provveduto a sistemare i nomi delle zone ed aver salvato il foglio di lavoro (non si sa mai!), si immettono coppie di dati sperimentali e si tiene premuto il tasto **Alt** e contemporaneamente il tasto **V**. In questo modo si attivano le istruzioni a partire dalla cella T 49 che inizia col posizionare il cursore in B 8 e trasforma la zona dati in valori convertendo le formule.

Le istruzioni da T 50 a T 56 impongono a 123 di copiare i dati sperimentali a partire dalla cella U 70 escludendo i "±"; li conta e quindi mette questo dato, n, nella cella S 47.

L'istruzione della cella T 57 equivale ad un ciclo FOR.....NEXT che ripete per n-1 volte la sequenza situata in X 58 (zona lb) che si comporta come una subroutine. L'effetto è quello di distanziare ciascuna coppia di dati sperimentali di cinque righe l'una dall'altra. Il programma conteggia i vari cicli ed inserisce il valore, di volta in volta, in una cella che dovremo nominare. Il nome da me attribuito alla cella è **CONTATORE** e si trova in X 57.

La cella T 59 è quella con più comandi che provvedono a nominare le quattro celle, contenenti le prime coppie di dati, rispettivamente come x, dx, y, dy, quindi inserire nelle celle di fianco i valori corrispondenti a quelli esemplificati in Fig. 1.

Le istruzioni delle celle T 60..T 62 e X 62 replicano la procedura per tutti i dati sperimentali.

Infine i comandi registrati nelle celle T 63..T65 fanno graficare a 123 i valori così ottenuti, scegliendo come opzione del formato grafico quello solo a righe.

Visualizzato il grafico, non appena si preme un tasto, i comandi di cella T 65 tendono a far salvare il foglio di lavoro con un nome diverso da quello del foglio preparato, in modo da lasciarlo sempre pronto per l'utilizzazione.

Se si sono verificati degli errori si può ritornare alla condizione originaria eseguendo la "macro" denominata "ripristinata" e collocata in Z 47. Questa ripercorre le celle riempite con la "macro" precedente e le svuota; come ultimo passo annulla anche la denominazione delle zone dati. Unico passaggio che non è possibile ripristinare è l'eventuale presenza di formule nella zona dati, irrimediabilmente convertita in valori.

Il foglio con le istruzioni implementate è stato usato e "testato" sul campo da diverse classi di studenti e per circa due anni, senza che fossero evidenziate lacune o difetti di esecuzione se non quelle derivate da un suo uso scorretto in modo eclatante. Il meccanismo è sostanzialmente compreso dagli studenti se preventivamente si sono fatti eseguire parecchi grafici con dati sperimentali e relative incertezze, naturalmente *a mano*. Il "risparmio di tempo" usando il foglio elettronico preparato può essere investito in più accurate analisi dei dati medesimi.

Ricordo per coloro che hanno meno confidenza coi comandi di 123 che se si attiva la combinazione **Alt+F2** si ha la scansione di tutti le istruzioni nella macro che si andrà ad attivare e si potrà osservarne gli effetti. Il tutto ovviamente è variabile e migliorabile....Buon lavoro.

Bibliografia.

| | | |
|--|---|---------------------|
| Pugliese Jona | Fisica e laboratorio | Loescher editore |
| Milman.Halkias. | Dispositivi e circuiti elettronici. | Boringhieri |
| A.Montanari. | Tecnologia delle costruzioni elettroniche. | Ed. Cupido Vol. 3. |
| Milman.Halkias. | Integrated circuits. | McGrow.Hill. |
| V.Zanetti | Percorsi di Fisica . | Zanichelli. |
| Robert C. Jenkins Giovanni V. Pallottino. | Fisica per tutti. | Le Monnier |
| S. Ballou Skinner | A simple experiment to illustrate exponential decay, half-life, and time constant | The Physics Teacher |
| L. Ruby | If you understand leaky buckets, you understand a lot of physics | The Physics Teacher |
| E. Perrucca | Fisica generale e sperimentale | UTET Torino |
| R.B. Adler A.C. Smith R. L. Longini. | Introduction to Semiconductor Physics. | John Wiley & Sons |
| Cotton Wilkinson | Chimica inorganica. | CEA Milano |
| Philips | Note di applicazione n 214 | sez. Elcoma |