

# Esperimenti di fisica

Laboratorio di Fisica

Liceo Alberti di Cagliari

---

Massimiliano Viridis



# Indice

---

1	Introduzione	1
1.1	Premessa . . . . .	1
1.2	Licenza e Copyright . . . . .	1
<b>I</b>	<b>Meccanica</b>	<b>3</b>
2	Legge di Hooke	5
2.1	Introduzione . . . . .	5
2.2	Descrizione dell'esperienza . . . . .	5
2.3	Apparecchi utilizzati . . . . .	5
2.4	Montaggio . . . . .	6
2.5	Procedimento . . . . .	6
2.6	Dati sperimentali . . . . .	7
2.7	Elaborazione dei dati sperimentali . . . . .	8
2.8	Conclusione . . . . .	9
3	Secondo principio della dinamica I	11
3.1	Il principio . . . . .	11
3.2	Descrizione dell'esperienza: Moto di un corpo su un piano inclinato . . . . .	11
3.3	Apparecchi utilizzati . . . . .	12
3.4	Montaggio apparecchi . . . . .	12
3.5	Procedimento . . . . .	12
3.6	Dati sperimentali . . . . .	13
3.7	Elaborazione Dati . . . . .	14
3.8	Conclusioni . . . . .	14

<b>II</b>	<b>Calorimetria e gas</b>	<b>15</b>
4	Legge di Boyle	17
4.1	Introduzione . . . . .	17
4.2	Descrizione dell'esperienza . . . . .	17
4.3	Apparecchi utilizzati . . . . .	17
4.4	Montaggio apparecchi . . . . .	18
4.5	Procedimento . . . . .	18
4.6	Dati sperimentali . . . . .	19
4.7	Elaborazione dati sperimentali . . . . .	20
4.8	Note . . . . .	21

<b>III</b>	<b>Onde e Acustica</b>	<b>23</b>
5	Misura e analisi di un suono	25
5.1	Introduzione . . . . .	25
5.2	Installazione e settaggio . . . . .	25
5.3	Analisi spettrale . . . . .	26
5.4	Analisi della frequenza . . . . .	27
5.5	Generatore di funzioni (di suoni) . . . . .	28

<b>IV</b>	<b>Elettricità e magnetismo</b>	<b>29</b>
6	Generatore di Van de Graaff	31
7	Resistenze	35
7.1	Materiale utilizzato . . . . .	35
7.2	resistenze in serie . . . . .	35
7.3	resistenze in parallelo . . . . .	36
7.4	resistenze in serie e parallelo . . . . .	37
8	Esperimento di Oersted	39
8.1	Introduzione . . . . .	39
8.2	Modalità economica . . . . .	39
8.2.1	Apparecchi utilizzati . . . . .	39
8.3	Montaggio apparecchi . . . . .	39
8.4	Procedimento . . . . .	39
9	Motore elettrico	41
9.1	Introduzione . . . . .	41
9.2	Apparecchi utilizzati . . . . .	41
9.3	Montaggio apparecchi . . . . .	41
9.4	Procedimento . . . . .	41
9.5	Intepretazione del fenomeno . . . . .	42
10	Studio del campo magnetico di un solenoide	43
10.1	Introduzione . . . . .	43
10.2	Apparecchi utilizzati . . . . .	43
10.3	Montaggio apparecchi . . . . .	44
10.3.1	Codice per l'utilizzo . . . . .	45
10.4	Procedimento . . . . .	46
10.5	Dati sperimentali . . . . .	47
10.6	Elaborazione dati sperimentali . . . . .	48
10.7	Note . . . . .	48

<b>V</b>	<b>Appendici</b>	<b>49</b>
A	Misure di campo magnetico	51
A.1	Introduzione . . . . .	51
A.2	Sunfounder - magnetic sensor . . . . .	52
A.2.1	Schema di montaggio . . . . .	52
A.2.2	Codice per l'utilizzo . . . . .	53
A.3	Az-delivery KY-024 . . . . .	55
A.3.1	Schema di montaggio . . . . .	55
B	Multimetro	57
B.1	Introduzione . . . . .	57
B.2	Voltmetro . . . . .	57
B.3	Amperometro . . . . .	57
B.4	Misure di resistenza . . . . .	58
C	Breadboard	59
C.1	Introduzione . . . . .	59
C.2	Inserimento di elementi nei fori . . . . .	59

*INDICE*

## 1

## Introduzione

## 1.1 Premessa

Caro lettore,

questo manuale è stato scritto come supporto ai docenti di fisica del Liceo Alberti di Cagliari. Tutto il materiale descritto si trova in quel laboratorio, ma le esperienze sono facilmente realizzabili anche in altri laboratori.

Il seguente testo è rivolto espressamente agli insegnanti di fisica delle superiori che abbiano l'esigenza di un manuale che dia loro delle ampie e dettagliate indicazioni su come svolgere alcuni tra i più comuni esperimenti di fisica che si possono svolgere a scuola. Il materiale su l'argomento oggi disponibile in Italia è costituito prevalentemente da documenti sparsi e di varia natura disponibili in internet; sono rari i libri che affrontino in maniera sistematica l'argomento. Diffusi sono i testi sull'elaborazione dei dati sperimentali e sulla propagazione degli errori; molto più rari quelli sulle tecniche sperimentali e gli aspetti pratici.

La seguente dispensa è ancora minimale, ma si procede a piccoli passi.

Spero che quanto riportato in quest'opera sia se non di aiuto almeno non dannoso. Per migliorare quanto scritto e evidenziare qualsiasi errore non esitate a scrivermi.

*email: prof.virdis@tiscali.it*

## 1.2 Licenza e Copyright

**Questo file e documento viene concesso con licenza Creative Commons. CC BY-NC-ND.**

- Devi attribuire la paternità dell'opera nei modi indicati dall'autore o da chi ti ha dato l'opera in licenza e in modo tale da non suggerire che essi avallino te o il modo in cui tu usi l'opera.
- Non puoi usare quest'opera per fini commerciali.
- Non puoi alterare o trasformare quest'opera, né usarla per crearne un'altra.



δωρεὰν ἐλάβετε, δωρεὰν δότε (Mt. 7.8)

## 1.2 Licenza e Copyright

**Parte I**  
**Meccanica**



# 2

## Legge di Hooke

---

### 2.1 Introduzione

La legge di Hooke è una legge elementare che può riguardare i corpi elastici, in particolare le molle. La legge lega la forza esercita sul corpo elastico con il suo schiacciamento o allungamento.

Essa si presta abbastanza bene ad essere applicata ad una molla: afferma che la forza  $F$  di richiamo della molla, quando viene allungata dalla sua posizione di equilibrio, è direttamente proporzionale all'allungamento  $\Delta x$  della stessa: la costante di proporzionalità  $k$  è detta costante elastica della molla.

$$F = -k\Delta x \quad (2.1)$$

Nella relazione compare solitamente un segno meno ad indicare che la forza va dalla parte opposta all'allungamento.

### 2.2 Descrizione dell'esperienza

La classica verifica sperimentale della legge di Hooke (quando applicata ad una molla) consiste nel porre la molla in posizione verticale, appesa ad una sua estremità, e con l'altra estremità collegata ad una serie di pesetti. Si vuole verificare che al variare della forza applicata il rapporto tra questa forza e l'allungamento è costante. La legge non vale quale che sia l'allungamento imposto alla molla: se l'allungamento supera una certa soglia la forza richiesta per allungare la molla non è più proporzionale all'allungamento. Inoltre può capitare che la molla non sia più capace di tornare alla sua posizione di equilibrio iniziale: abbiamo una classica molla "smollata".

### 2.3 Apparecchi utilizzati

L'esperienza qui illustrata è stata compiuta con più di una molla presente in laboratorio: alcune molle sono ormai rovinate, altre ancora del tutto nuove e con una linguetta di plastica per poterne meglio valutare l'allungamento.

1. Tre molle metalliche di varia qualità.
2. Un'asta di sostegno con un supporto per la molla nella parte superiore.
3. Un righello millimetrato da 50 cm.
4. Una bilancia di precisione (portata 2,00 kg, accuratezza 0,1 kg).
5. Un set di pesetti con una massa compresa tra 10 g e 50 g.
6. Un sostegno per i pesetti, da appendere alla molla.

## 2.4 Montaggio



Nelle foto precedenti le tre molle utilizzate, da sinistra a destra la molla 1, 2 e 3. A destra i due sostegni per i pesetti.

## 2.4 Montaggio

L'asta di sostegno, di piccole dimensioni, si trova già montata in laboratorio. Ad essa va collegato nella parte superiore un sostegno per la molla. La molla viene appesa ad esso. Le molle più recenti hanno un segnaposizione di plastica che va posizionato in basso; le altre molle non hanno un verso privilegiato. I pesetti disponibili non si possono inserire in tutti i sostegni. In particolare il sostegno più robusto, la cui massa è 50 g, ha l'asta troppo larga per permettere il passaggio del foro presente in alcuni pesetti.



Nella foto a sinistra l'asta montata con il sostegno per la molla e una molla appesa. Nella foto a destra il tutto posizionato accanto al righello usato per le misurazioni.

## 2.5 Procedimento

Una volta posizionata la molla senza pesi e senza sostegno per i pesetti (come possiamo vedere nelle foto successive) misuriamo la posizione della sua parte più bassa allineando a mano libera il righello poggiato sul tavolo: questa è la lunghezza che chiameremo  $x_0$ . Nel caso della molla numero 3 è presente una linguetta di plastica rossa che facilita l'osservazione dell'allineamento col righello.

Successivamente aggiungiamo prima il solo sostegno per i pesi e rieffettuiamo la lettura della nuova posizione: sarà la lunghezza  $x_1$ . Poi aggiungiamo via via altri pesetti con nuove letture di posizione. Possiamo svolgere la pesatura di quanto posto sulla molla di volta in volta o alla fine delle misure di lunghezza.



## 2.6 Dati sperimentali

Molla 1		Molla 2		Molla 3	
lunghezza (mm)	massa (g)	lunghezza (mm)	massa (g)	Lunghezza (cm)	Massa (kg)
$x_0 = 223$	0	$x_0 = 234$	0	$x_0 = 224$	0
$x_1 = 216$	10,0	$x_1 = 229$	50,2	$x_1 = 214$	10,0
$x_2 = 210$	20,0	$x_2 = 226$	70,2	$x_2 = 205$	20,0
$x_3 = 206$	30,3	$x_3 = 224$	90,3	$x_3 = 195$	30,3
$x_4 = 202$	40,2	$x_4 = 220$	120,5	$x_4 = 185$	40,2
$x_5 = 198$	50,3	$x_5 = 217$	150,6		

## 2.7 Elaborazione dei dati sperimentali

### 2.7 Elaborazione dei dati sperimentali

L'allungamento della molla è  $\Delta x = x_i - x_0$ , differenza tra la lunghezza istantanea con una data forza e la lunghezza a riposo. L'errore associato lo quantifichiamo per tutte le misure con  $\Delta(\Delta x) = 1 \text{ mm}$ .

La forza è il peso applicato alla molla. Questo peso e l'errore ad esso associato sono:

$$F = mg \quad ; \quad \Delta F = g\Delta m \quad (2.2)$$

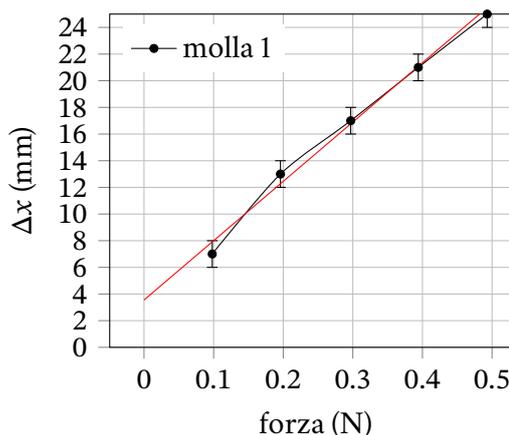
Per tutte le misure di massa  $\Delta m = 0,1 \text{ g}$  e  $\Delta F = 0,001 \text{ N}$ .

La costante elastica e l'errore ad essa associato sono:

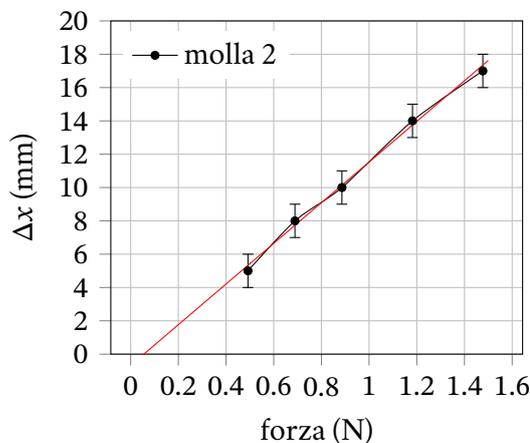
$$k = \frac{F}{\Delta x} \quad ; \quad \Delta k = k \left( \frac{\Delta(\Delta x)}{\Delta x} + \frac{\Delta F}{F} \right) \quad (2.3)$$

Nel seguito mostriamo i dati elaborati per ogni molla e di fianco il grafico forza/allungamento. Nel grafico compare in rosso la retta dei minimi quadrati che interpola i dati ottenuti, per meglio valutarne la linearità, sebbene non sia proponibile né il suo calcolo né la sua indicazione per uno studente del biennio. Sempre nel grafico si è indicato l'errore associato all'allungamento; quello relativo alla forza sarebbe comunque piccolissimo e non è stato riportato.

Molla 1			
$\Delta x$ (mm)	$F$ (N)	$k$ (N/mm)	$\Delta k$ (N/mm)
7	0,098	0,014	0,002
13	0,196	0,015	0,001
17	0,297	0,018	0,001
21	0,394	0,0188	0,0009
25	0,493	0,0197	0,0008

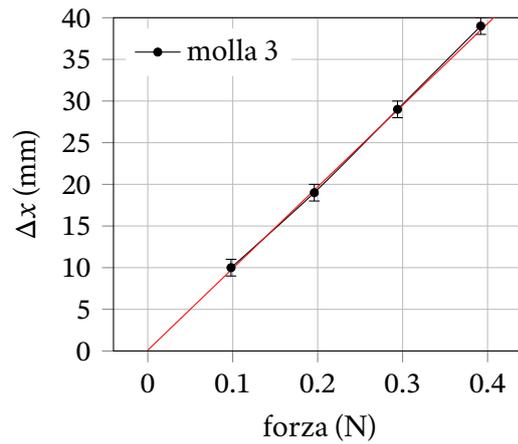


Molla 2			
$\Delta x$ (mm)	$F$ (N)	$k$ (N/mm)	$\Delta k$ (N/mm)
5	0,492	0,10	0,02
8	0,689	0,09	0,01
10	0,886	0,089	0,009
14	1,182	0,084	0,006
17	1,477	0,087	0,005



**Molla 3**

$\Delta x$ (mm)	$F$ (N)	$k$ (N/mm)	$\Delta k$ (N/mm)
10	0,098	0,010	0,001
19	0,196	0,0103	0,0006
29	0,297	0,0102	0,0004
39	0,394	0,0101	0,0003



## 2.8 Conclusione

I valori di  $k$  ottenuti per la prima molla non sono del tutto compatibili con la legge di Hooke e la costanza della costante elastica. Per le altre due molle si ha invece una buona corrispondenza. Il grafico della prima molla evidenzia un comportamento non uniforme. Al contrario l'ultima molla, la più nuova, ha un comportamento del tutto lineare.

## 2.8 *Conclusione*

## 3

## Secondo principio della dinamica I

### 3.1 Il principio

Il secondo principio della dinamica stabilisce che un corpo di massa  $m$  quando sottoposto ad una forza  $\vec{F}$  accelera con una accelerazione:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} \quad (3.1)$$

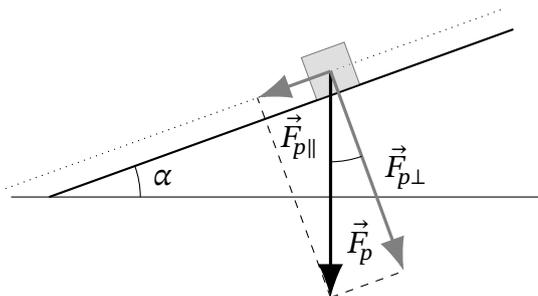
Le esperienze consistono nel misurare la posizione di un corpo, sottoposto ad una forza nota, in funzione del tempo. Dalla conoscenza delle successive posizioni possiamo ricavare la velocità media tra due istanti successivi; a sua volta dalle successive velocità possiamo ricavare le accelerazioni. Se il corpo parte da fermo possiamo anche ricavare l'accelerazione media dalla sola posizione nel tempo.

*Se il corpo è sottoposto ad una forza costante allora dovremmo osservare un'accelerazione costante (se la massa del corpo si conserva).*

### 3.2 Descrizione dell'esperienza: Moto di un corpo su un piano inclinato

Il nostro corpo è un carrello capace di scivolare su una rotaia senza attrito. Il peso di un corpo, in prossimità della superficie terrestre, è costante e non dipende né dalla velocità né dall'accelerazione del corpo. La rotaia è inclinata leggermente: la forza peso che agisce sul corpo si scompone in due componenti. Il componente normale al piano è bilanciata dalla reazione vincolare del piano e non contribuisce a far muovere il corpo. Il componente parallelo alla rotaia lo spinge con una forza costante e questa è l'unica forza che fa muovere il corpo.

Siamo interessati solo ad appurare che se la forza è costante (in questo caso la forza peso che agisce sul corpo) allora l'accelerazione è costante. L'esperienza consiste nel misurare il tempo per percorrere distanze via via crescenti con il carrello che scivola sempre sulla stessa rotaia. La forza peso non contribuisce direttamente a far muovere il corpo: essa si scompone in un componente perpendicolare al piano e uno parallelo. Il componente perpendicolare è equilibrato dalla forza di reazione vincolare del piano stesso e non contribuisce al moto; il componente parallelo al piano è la forza che fa muovere il carrello. L'attrito, in questo esperimento, è supposto trascurabile.



### 3.3 Apparecchi utilizzati

Di conseguenza il moto è uniformemente accelerato. Se facciamo partire il corpo al tempo  $t = 0$  s dalla posizione  $x = 0$  m con velocità nulla allora la legge di moto è:

$$x(t) = \frac{1}{2}at^2 \quad (3.2)$$

dove  $a$  è l'accelerazione risultante dal componente della forza peso parallelo al piano.

Lo strumento per studiare il moto è la rotaia a cuscino d'aria. Solitamente è fornita di due traguardi ottici e un sistema elettronico che consente di determinare con grande accuratezza il tempo che il carrello impiega per andare da un traguardo all'altro; la posizione dei traguardi è leggibile su una apposita scala graduata posta a fianco della rotaia.

In questa maniera possiamo considerare come istante iniziale del moto quello in cui il carrello transita sotto il primo traguardo; la posizione iniziale è quella del primo traguardo.

### 3.3 Apparecchi utilizzati

- Rotaia a cuscino d'aria, con elettromagnete ad una estremità.
- Carrello
- Due fototraguardi con centralina di gestione (sensibilità  $t = 0,1$  ms)
- Supporto per rialzare la rotaia

### 3.4 Montaggio apparecchi

Rialziamo la rotaia di dieci o venti centimetri rispetto al tavolo in cui è appoggiata, dalla parte in cui è posto l'elettromagnete. Collochiamo i fototraguardi inizialmente a poche decine di centimetri dalla parte più alta.

La posizione del secondo fototraguardo sia prossima alla prima, ma la sua esatta collocazione non avrà rilevanza sperimentale, ma solo pratica. Infatti la centralina di gestione prende il tempo sul primo fototraguardo solo dopo aver visto il passaggio sul secondo. Quindi da ora in poi parleremo solo del primo fototraguardo.

Facciamo attenzione che i fototraguardi siano ben infilati nella loro guida e che la piccola asta posta sopra il carrello intercetti il fascio di luce del fototraguardo al suo passaggio.



### 3.5 Procedimento

Accendiamo il ventilatore che insuffla aria nella rotaia. La potenza sia regolata a valori inferiori al massimo possibile, in modo da evitare che il motorino si surriscaldi, ma garantendo che il cuscino d'aria sotto il carrello dia un attrito trascurabile.

Accendiamo la centralina di gestione dei fototraguardi (il pulsante è sul retro dell'apparecchio): comparirà una scritta con la marca dell'apparecchio.

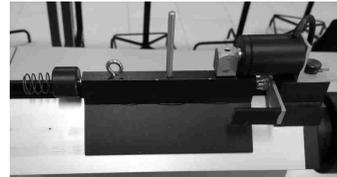
Con il carrello posizionato all'inizio della rotaia, attaccato all'elettromagnete, misuriamo qual è la posizione dell'asta posizionata sul carrello stesso rispetto alla scala graduata della rotaia: quella distanza è la posizione iniziale valida per tutta l'esperienza.

Adesso posizioniamo il fototraguardo alla prima distanza dall'elettromagnete. Faremo cinque misure di tempo mantenendolo sempre nella stessa posizione.

Misuriamo la distanza indicata dall'indicatore del fototraguardo sulla scala graduata della rotaia. La distanza percorsa è la differenza tra questa distanza e quella iniziale.

1. Pigiama il tasto "function" finché non compare la scritta "gravity acceler."
2. Pigiama il tasto "start" e il sistema ci chiederà di pigiare il tasto "magnet", facendo comparire la scritta "press magnet on".
3. Facciamolo (se non lo abbiamo già fatto): allora il tasto si illumina e compare la scritta "Press magnet off".

4. Posizioniamo il carrello all'inizio della rotaia con il suo blocco metallico attaccato al magnete.



5. Pigiama il tasto "magnet" e l'elettromagnete si spegne, il carrello comincia a scivolare e parte il conteggio del tempo.
6. Dopo che il carrello ha attraversato i due fototraguardi tratteniamolo delicatamente in modo che non vada a sbattere alla fine della sua corsa.
7. A questo punto possiamo pigiare il tasto "memory" col quale comparirà l'intervallo di tempo per arrivare al primo traguardo con la scritta "1" alla fine dello schermo: è il nostro dato sperimentale.
8. Pigiama il tasto "reset" e possiamo ottenere altri dati sperimentali partendo dal punto 1.

A questo punto posizioniamo il fototraguardo ad un'altra distanza, ripetendo le cinque misure precedenti con la nuova distanza: useremo cinque o sei posizioni diverse, preferibilmente poste a distanze regolari.

### 3.6 Dati sperimentali

Le misure di tempo sono state ripetute cinque volte per ogni distanza scelta. L'errore associato alla distanza è 1 mm; quello associato al tempo  $t = 0,1$  ms, lo stesso della sensibilità dello strumento.

Distanza (m)	Tempo (s)	Distanza (m)	Tempo (s)	Distanza (m)	Tempo (s)
0,3	1,0196	0,6	1,4439	0,9	1,7685
	1,0181		1,4423		1,7590
	1,0219		1,4378		1,7643
	1,0190		1,4410		1,7683
	1,0221		1,4430		1,7596

Distanza (m)	Tempo (s)	Distanza (m)	Tempo (s)
1,2	2,0387	1,5	2,2677
	2,0350		2,2699
	2,0369		2,2692
	2,0318		2,2764
	2,0354		2,2763

### 3.7 Elaborazione Dati

Le misure di tempo per l'ultima distanza sono state più fluttuanti di quanto riportato. Sporadicamente il tempo è stato superiore di tre centesimi di secondo: queste misure sono state scartate.

### 3.7 Elaborazione Dati

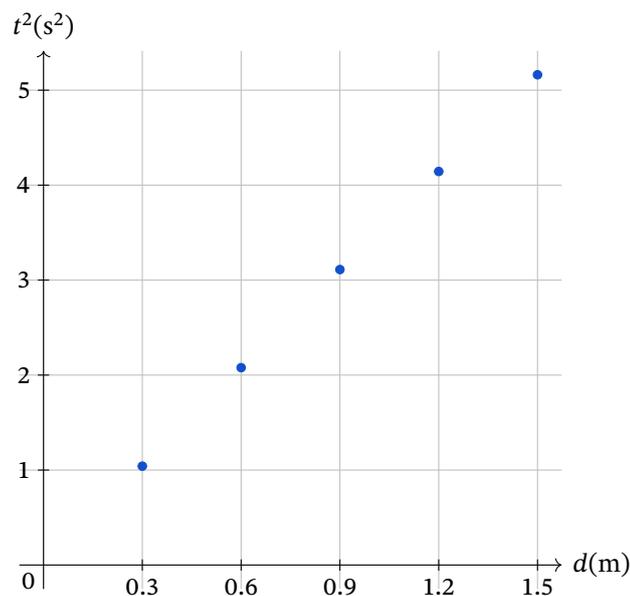
Per il tempo è stata calcolato il valore medio  $\bar{t}$  delle misure effettuate e la deviazione standard  $\sigma(t)$ . L'accelerazione  $a$  è:

$$a = \frac{2d}{t^2} \quad (3.3)$$

L'errore associato:

$$\Delta a = a \left( \frac{\Delta d}{d} + 2 \frac{\Delta t}{t} \right) \quad (3.4)$$

$d$ (m)	$\bar{t}$ (s)	$\sigma(t)$ (s)	$a$ (m/s <sup>2</sup> )	$\Delta a$ (m/s <sup>2</sup> )
0,3	1,020	0,001	0,577	0,004
0,6	1,442	0,002	0,577	0,002
0,9	1,764	0,004	0,579	0,003
1,2	2,036	0,002	0,579	0,002
1,5	2,272	0,004	0,581	0,002



### 3.8 Conclusioni

Nei limiti degli errori sperimentali l'accelerazione ottenuta è costante. Il valore ottenuto aumenta leggermente all'aumentare dello spazio percorso. I tempi hanno errori associati disuniformi ovvero alcuni tratti della rotaia potrebbero evidenziare delle piccole disuniformità che si ripercuotono sulla scala dei tempi.

**Parte II**

**Calorimetria e gas**



# 4

## Legge di Boyle

---

### 4.1 Introduzione

La legge di Boyle riguarda i gas perfetti e afferma che, per una data quantità di gas mantenuto a temperatura costante in un recipiente chiuso, la pressione e il volume sono inversamente proporzionali:

$$PV = cost \quad (4.1)$$

Se usiamo la legge dei gas perfetti possiamo anche scrivere:

$$PV = nRT \quad (4.2)$$

dove  $n$  è il numero di moli del gas e  $R$  la costante dei gas perfetti. Pressione, volume e temperatura vanno indicate preferibilmente nelle unità di misura del sistema internazionale; altrimenti la costante  $R$  deve essere adeguata di conseguenza.

### 4.2 Descrizione dell'esperienza

In questa esperienza utilizzeremo un apparecchio appositamente realizzato per lo studio della legge di Boyle e dal costo relativamente contenuto. Il nostro apparecchio è di dimensioni contenute e quindi il volume di gas a disposizione è limitato. Possiamo variare il volume tra 20 ml e 65 ml. Con questi limiti potremo fare un'unica raccolta di dati che, partendo da un volume intermedio, preveda sia la compressione che l'espansione del gas, ma l'intervallo di letture della pressione sarebbe piuttosto limitato. Per cui ho preferito dividere la raccolta dati in due parti: nella prima partiamo dal volume massimo disponibile e comprimiamo il gas; nell'altra partiamo dal volume minimo e lo espandiamo. Le letture sono fatte ad intervalli di volume tali da poter osservare una sensibile variazione di pressione.

### 4.3 Apparecchi utilizzati

Abbiamo un cilindro ermeticamente chiuso con un pistone mobile. Connesso all'interno del cilindro abbiamo un barometro e un termometro digitale.

Il sensore di temperatura ha la sensibilità di  $0,1$  °C. Non sappiamo quanto sia l'accuratezza: per analogia con altri sensori digitali analoghi potrebbe essere  $0,5$  °C. In pratica siamo interessati a controllare che la temperatura rimanga costante piuttosto che al suo valore: per cui possiamo trascurare l'accuratezza.

Il manometro segna zero pascal quando la pressione è quella atmosferica. Il sensore è tarato in ettopascal. La scala è divisa in venti tacche per un aumento di pressione di 1000 hPa: per cui ogni tacca corrisponde a circa 5000 Pa ( $101300/20 = 5065$ ).

#### 4.4 Montaggio apparecchi

#### 4.4 Montaggio apparecchi

L'apparecchio, mostrato nella figura qui accanto, in pratica non necessita di alcuna preparazione. L'interruttore serve ad attivare il sensore digitale di temperatura (ricordiamoci di spegnerlo alla fine dell'esperienza!).

La maniglia rossa serve per chiudere ermeticamente o aprire all'aria il cilindro graduato: nella figura è in posizione di apertura e così lo lasciamo alla fine dell'esperienza.

Il manometro, con la valvola dell'aria aperta, segna zero pascal.



#### 4.5 Procedimento

Facciamo in modo preventivamente che la temperatura dello strumento sia stabilizzata, cioè evitiamo di usarlo immediatamente alla temperatura troppo bassa con cui si trovava nell'armadio in cui era conservato.

Con la valvola dell'aria aperta giriamo la sbarra sulla sommità del cilindro in modo da portare il pistone nella posizione di partenza voluta e chiudiamo la valvola dell'aria.

Possiamo cominciare a prendere le misure del volume e della pressione corrispondente. Per quanto riguarda il volume posizioniamo la guarnizione del pistone sulla tacca serigrafata nel cilindro: è un modo come un altro per avere una indicazione precisa e uniforme per le letture di volume. Per quanto riguarda la pressione leggiamo la posizione dell'indicatore sulla scala graduata *sempre dopo avere dato qualche colpetto al manometro* per stabilizzare l'indicatore stesso. Infine leggiamo la temperatura.

Variamo la posizione del pistone mobile al nuovo volume e ripetiamo le misure come al punto precedente.

Maneggiamo tutto lo strumento evitando di scaldarlo con le nostre mani.

## 4.6 Dati sperimentali

Il valori di volume e temperatura sono nelle unità di misure indicate dallo strumento. Per la pressione ho preferito indicare nei dati sperimentali la tacca indicata dal manometro, mentre i corrispondenti valori in pascal sono indicati nell'elaborazione dei dati. Ho indicato la pressione misurata anche con mezza tacca, altrimenti i valori di pressione sarebbero stati troppo spaziosi.

### Compressione

Volume (ml)	Pressione	temperatura (°C)
60	0	20,9
55	2	21,0
50	4,5	21,1
45	7	21,2
40	10,5	21,2
35	15	21,3
30	20,5	21,4
25	28,5	21,5
20	40	21,7

### Espansione

Volume (ml)	Pressione	temperatura (°C)
20	0	21,5
25	-4	21,5
30	-7	21,5
35	-8,5	21,6
40	-10	21,7
45	-11,5	21,8
50	-12,5	21,8
55	-13	21,8
60	-13	21,8

L'ultima misura nella fase di espansione si è scontrata con la perdita di sensibilità del manometro per valori così bassi di pressione.

L'errore associato al volume è 1 ml; quello associato alla pressione è 2500 Pa, corrispondente a mezza tacca nella scala del manometro.

## 4.7 Elaborazione dati sperimentali

### 4.7 Elaborazione dati sperimentali

L'errore associato al prodotto  $PV$  è dato da:

$$\Delta(PV) = PV \left( \frac{\Delta P}{P} + \frac{\Delta V}{V} \right) \quad (4.3)$$

#### Compressione

$V$ ( $10^{-6} \text{ m}^3$ )	$P$ (kPa)	$T$ (K)	$PV$ ( $\text{Pa m}^3$ )	$\Delta(PV)$ ( $\text{Pa m}^3$ )
60	101	294,8	6,1	0,4
55	111	294,7	6,1	0,3
50	124	294,6	6,2	0,3
45	138	294,5	6,2	0,3
40	155	294,4	6,2	0,3
35	177	294,4	6,2	0,3
30	205	294,3	6,2	0,3
25	246	294,2	6,1	0,3
20	304	294,1	6,1	0,3

#### Espansione

$V$ ( $10^{-6} \text{ m}^3$ )	$P$ (kPa)	$T$ (K)	$PV$ ( $\text{Pa m}^3$ )	$\Delta(PV)$ ( $\text{Pa m}^3$ )
20	101	294,7	2,0	0,2
25	81	294,7	2,0	0,1
30	66	294,7	2,0	0,1
35	58	294,8	2,0	0,1
40	51	294,9	2,0	0,2
45	43	295,0	1,9	0,2
50	38	295,0	1,9	0,2
55	35	295,0	2,0	0,2
60	35	295,1	2,1	0,2

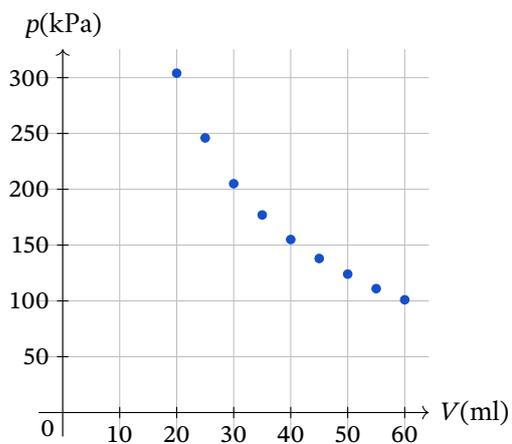


Tabella 4.1: compressione

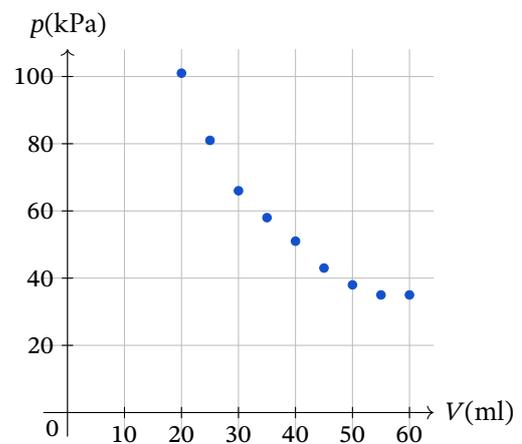


Tabella 4.2: espansione

**Nei limiti dell'errore sperimentale il prodotto della pressione per il volume si è mantenuto costante e la legge è stata verificata.**

La temperatura si è mantenuta ragionevolmente costante nelle due sessioni di misura. Il leggero aumento della temperatura in compressione è compatibile con il comportamento del gas per una trasformazione che non è né adiabatica né realmente isoterma per mancanza di un bagno termico a contatto con il cilindro d'aria. L'aumento, sia pur di pochi decimi di grado, osservato nella fase di espansione è legato al riscaldamento dello strumento nel suo maneggiamento da parte dello sperimentatore.

## 4.8 Note

Facciamo attenzione a maneggiare l'apparato sperimentale il meno possibile per evitare di riscaldarlo con le mani.

Quando finiamo l'esperienza ricordiamoci di spegnere il termometro e di lasciare aperta la valvola dell'aria.

Posizioniamo il pistone sempre ad altezze differenti per evitare che si formi qualche tipo di residuo della gomma del pistone alla stessa altezza dentro il cilindro.

## 4.8 *Note*

**Parte III**

**Onde e Acustica**



## 5

## Misura e analisi di un suono

## 5.1 Introduzione

Il modo fondamentale per studiare i suoni è attraverso un microfono, una scheda audio e un computer. Per l'analisi dei suoni si usava tradizionalmente un oscilloscopio. Le funzionalità dell'oscilloscopio, più quelle di un analizzatore di spettro e di un generatore di funzioni si ritrovano riunite in programmi oramai di facile reperibilità. Uno dei programmi per Windows più noti degli ultimi anni è Visual Analyser: è un programma sviluppato da circa vent'anni da un ingegnere del software un tempo all'università Tor Vergata di Roma, Alfredo Accattatis. Il programma non ha mai raggiunto una versione definitiva, ma le sue funzionalità sono tantissime e perfettamente usabili.

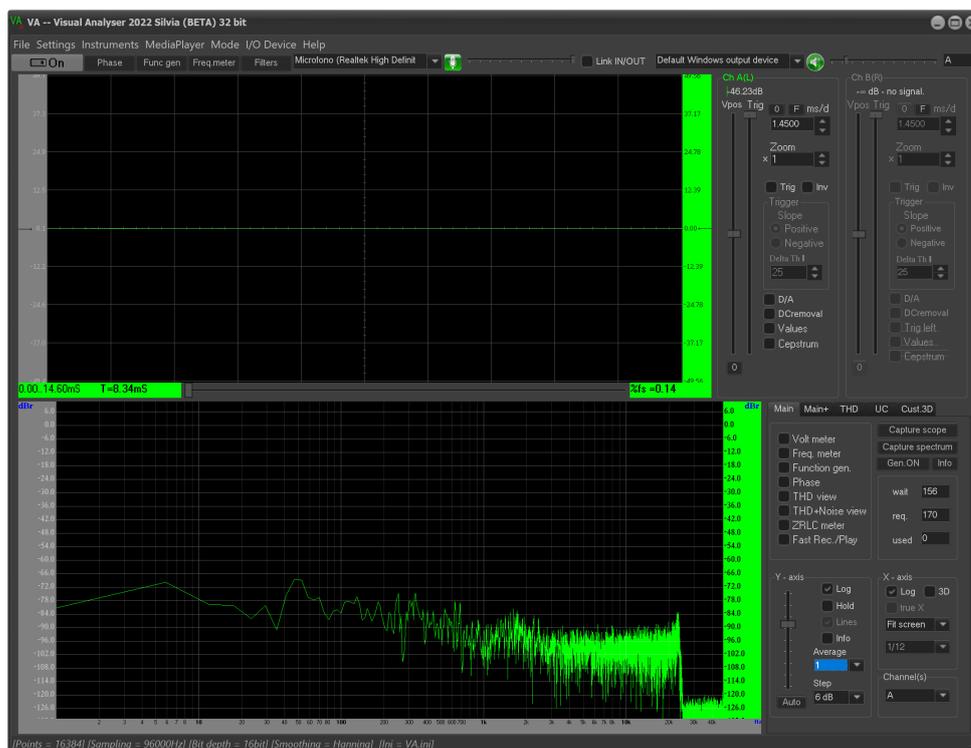
## 5.2 Installazione e settaggio

Il programma può essere scaricato da

[https://www.sillanumsoft.org/Italiano/scarica\\_programma.htm](https://www.sillanumsoft.org/Italiano/scarica_programma.htm).

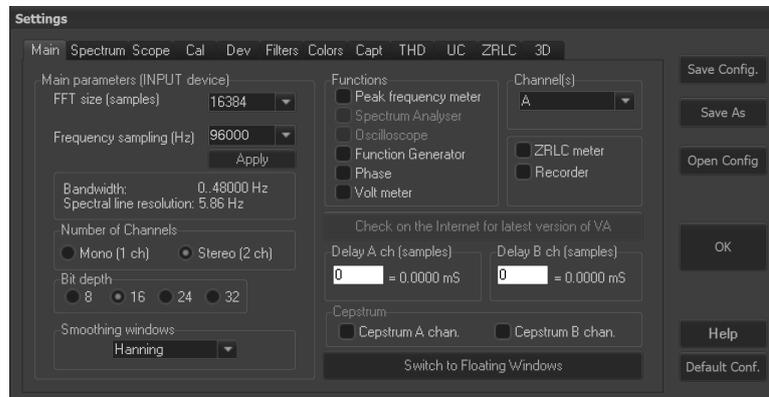
L'ultima versione presente è la 2022 Silvia.

Per l'installazione basta aprire il file zip in una cartella. Per l'avvio clicchiamo sul programma: alla prima installazione verrà creato un file .ini nella stessa cartella in cui verranno salvate le impostazioni.



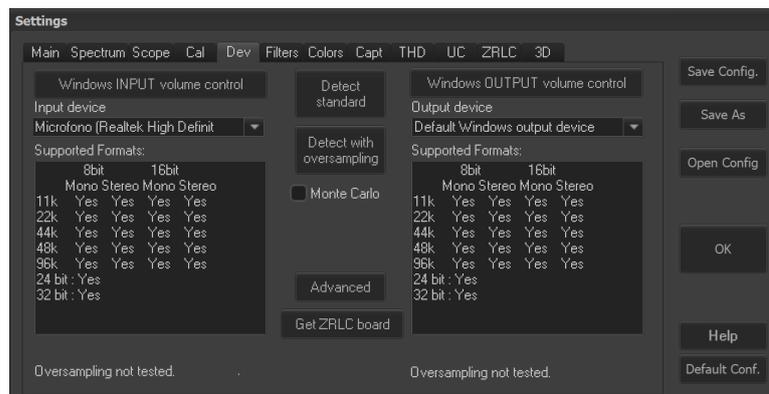
### 5.3 Analisi spettrale

Nella finestra sono presenti due grandi sezioni: quella superiore rappresenta un oscilloscopio e quella inferiore un analizzatore di spettro. L'interfaccia è solo in inglese. Il programma non fa nulla finché non si pigia il pulsante in alto a sinistra **ON**. Prima di procedere settiamo alcuni parametri iniziali andando su **Settings** **»** **Main**.



La prima scheda che appare è relativa alle impostazioni dell'analizzatore di spettro. Trai i parametri principali abbiamo *FFT size*, che regola la risoluzione dell'analisi fatta sul suono: 16384 mi sembra un buon compromesso. Invece *Frequency sampling* regola la risposta in frequenza presa dalla scheda audio: conviene scegliere la stessa frequenza con cui è impostata la scheda audio in quanto dovrebbe esserci una maggiore velocità di elaborazione. Gli altri parametri li lasciamo come sono.

Possiamo poi andare alla scheda **Settings** **»** **Dev**.



Qui possiamo indicare qual è la sorgente standard che useremo (quale ingresso microfonico) e quale output. Normalmente non va cambiato niente, altrimenti è qui che possiamo fare i cambiamenti.

### 5.3 Analisi spettrale

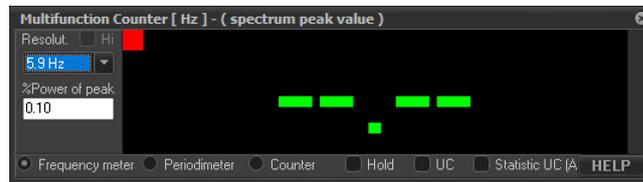
Il programma, appena avviato su **ON**, ci fornisce continuamente l'analisi spettrale del segnale in ingresso. L'impostazione predefinita è per una scala logaritmica sia sull'asse *x* che su l'asse *y*, come possiamo immediatamente controllare in basso a sinistra sulle due caselle di spunta **Log**. Normalmente viene analizzato solo il segnale sul canale A, ovvero su quello sinistro. Sempre in basso a sinistra, nel riquadro **Channels**, possiamo settare quale canale o combinazione di essi vogliamo analizzare e proiettare.

Se la scala di visualizzazione è troppo schiacciata si può posizionare il mouse sulla grande colonna verde dei dBr e schiacciando il tasto sinistro spostare la scala stessa. I dBr sono i decibel

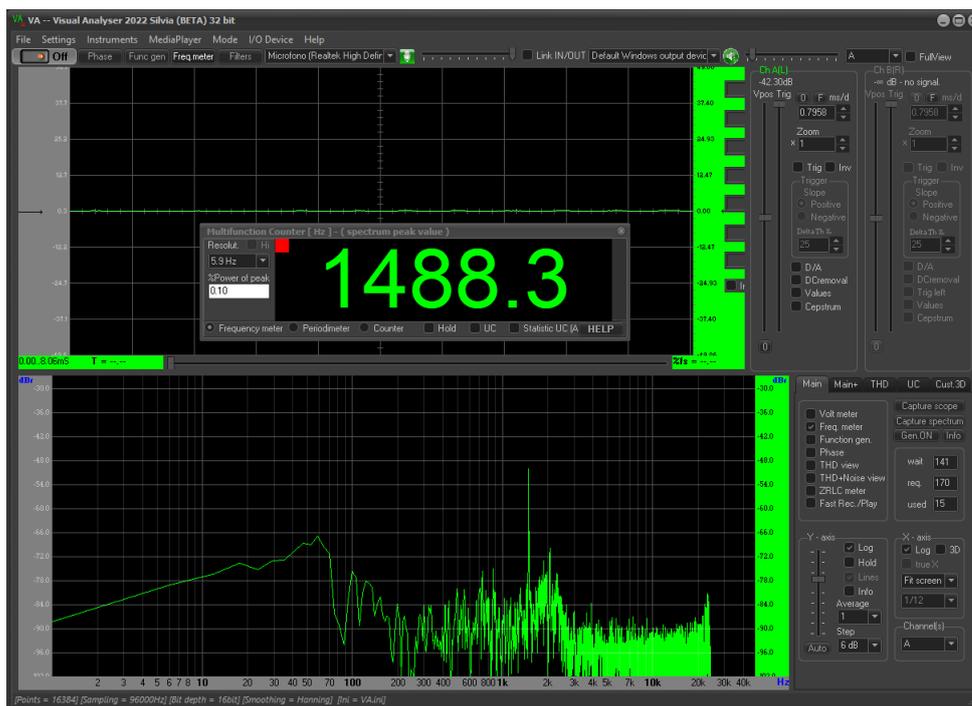
relativi al fondo scala della scheda audio. Per tradizione 0 dBr è il valore massimo in ingresso della scheda (solitamente circa 1 volt), mentre gli altri valori inferiori sono in decibel negativi.

## 5.4 Analisi della frequenza

Una funzionalità leggermente più complessa è il frequenzimetro. Possiamo richiamarlo con il pulsante sotto il menu alla voce `Freq.meter` oppure dal menu da `Instruments` `>>` `Frequency meter`.

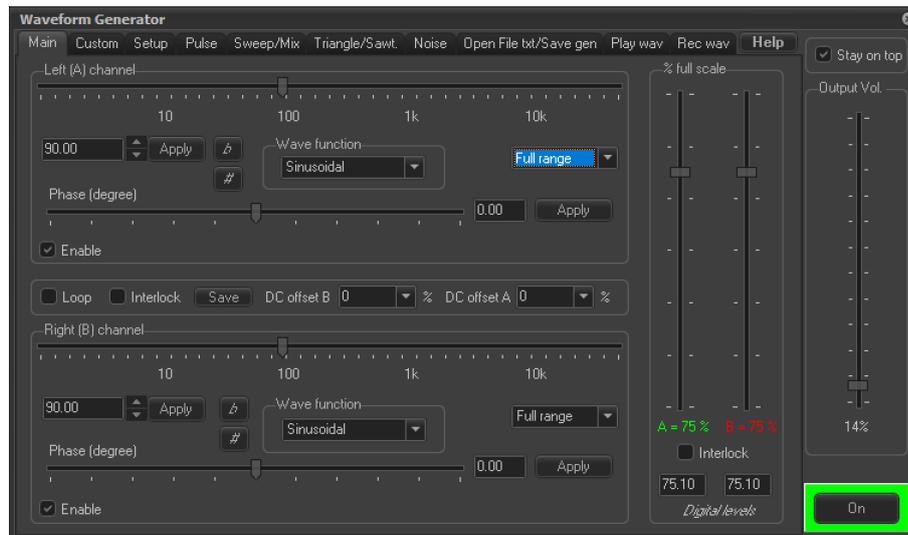


Abbiamo il parametro *Resolut.* che indica la risoluzione con cui misuriamo la frequenza: non ci sono problemi ad indicare un valore molto piccolo, per quanto possa essere inutile. Un parametro essenziale per misurare qualcosa è il *%Power of peak*. Da questo parametro dipende la possibilità di misurare o meno una frequenza di picco in un segnale composito. Se ad esempio voglio misurare la frequenza di una vocale emessa da un alunno o di un fischio il frequenzimetro non misurerà niente a meno che il parametro non scenda almeno al 0,1%. Nell'immagine successiva la misura della frequenza di un fischio, in cui si vede il picco estremamente esile dello stesso rispetto al resto dello spettro.



## 5.5 Generatore di funzioni (di suoni)

### 5.5 Generatore di funzioni (di suoni)



Il programma ha un insieme completo di funzionalità proprie di un generatore di funzioni. L'aspetto per noi più interessante è tuttavia generare dei segnali e quindi dei suoni sinusoidali. Nella pagina principale di questa sezione abbiamo la possibilità di generare due distinti suoni, uno per canale, con intensità, forma d'onda e frequenza date.

La sezione emette il segnale solo quando pigiamo il tasto output **ON** in basso a destra. Il primo parametro numerico sulla sinistra, relativo ad ogni canale è la frequenza; possiamo regolarlo anche con il cursore posto in alto che scorre lungo tutta la sezione. Anche i due canali possono essere abilitati o meno con la casella di spunta **Enable**.

Sulla destra abbiamo due scale. La prima, indicata come *% full scale*, indica l'ampiezza del segnale rispetto al massimo della scala. Se si spunta l'*interlock* le scale scorrono assieme. Invece il cursore dell'*Output Vol* indica ciò che viene amplificato dalla scheda audio. Sembrano funzioni simili, ma per regolare il suono in uscita dagli altoparlanti andrebbe regolato solo quest'ultimo cursore.

**Parte IV**

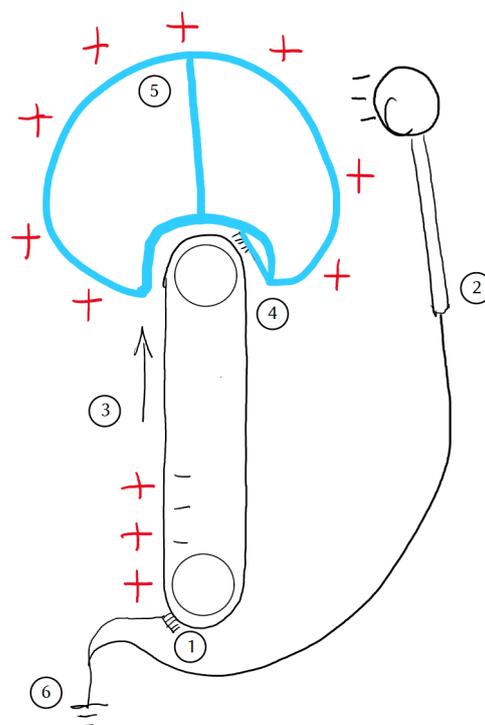
**Elettricità e magnetismo**



## 6

## Generatore di Van de Graaff

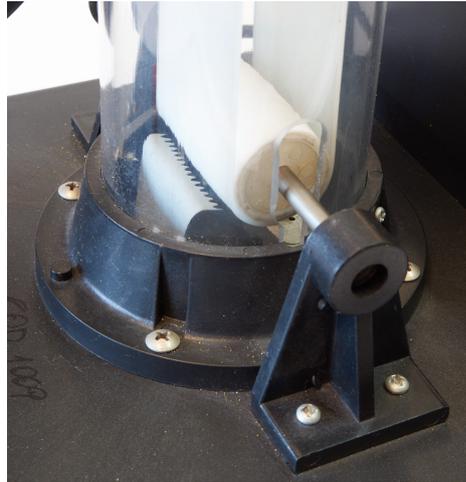
Il generatore di Van de Graaff è uno strumento che serve per generare sia elevate differenze di potenziale che cariche elettriche. Esso è costituito da una sfera cava metallica sulla cui superficie vengono accumulate cariche elettriche trasportate, all'interno della sfera, da un nastro isolante (solitamente di caucciù) il quale viene a sua volta elettrizzato per strofinio o per induzione. L'apparecchio venne realizzato da Robert Van de Graaff nel 1929.



Nel disegno e nella foto seguente della base dell'apparecchio possiamo osservare che il nastro di caucciù è teso tra due rulli, uno posto alla base dell'apparecchio e uno alla base della sfera metallica. Nell'apparecchio presente in laboratorio il nastro è caricato dallo strofinio del nastro stesso con il rullo vetroso della base. Il movimento del nastro può avvenire perché trascinato dalla manovella o perché trascinato dal motorino posto alla base dell'apparecchio: solitamente preferiamo usare la manovella.

Col movimento del nastro il vetro si carica positivamente, la parte nel nastro a contatto col vetro si carica negativamente e l'altra faccia del nastro positivamente (3). Sempre nella foto seguente vediamo un pettine (1) evidenziato alla base del precedente disegno: esso può essere posto in tensione con una batteria e generare delle cariche per il potere dispersivo delle punte, cariche che poi vengono trasferite al nastro. Nel nostro caso invece il pettine è collegato a massa e da qui, con

un cavo terminante con un'asta metallica posta preferibilmente sul pavimento, a terra (6). Nella prima foto si intravede l'asta in basso a sinistra.



La parte esterna del nastro (3) porta le cariche positive fino al centro della sfera, dove un pettine (4) posto in prossimità del nastro attira a sé le cariche del nastro stesso, come visibile nella foto successiva. Il pettine è connesso con il sostegno metallico della sfera (5) e trasferisce ad essa le cariche prelevate.



La sfera ha un foro nella sommità. In quel foro va infilata l'asta di sostegno (5) che si intravedeva nella foto precedente. Tuttavia possiamo osservare col nostro apparecchio che infilando l'asta come nella foto successiva per essa si disperde una quantità sensibile di carica e l'apparecchio non è in grado di generare scintille d'effetto. L'alternativa è poggiare solamente la sfera, senza farla passare per il foro: sarà un po' instabile, ma raggiungerà potenziali maggiori.



Le cariche giunte alla sfera metallica si ridistribuiscono sulla sfera al suo esterno. Fino a che la differenza di potenziale tra sfera e ambiente circostante non supera la rigidità dielettrica dell'aria la sfera continua a caricarsi. La scarica della sfera può avvenire silenziosamente, come attraverso l'asta di sostegno: in questo caso, anche continuando a girare la manovella non avviene nessun fenomeno apparente.

Quello che sperimentalmente vogliamo osservare è delle belle scariche tra la sfera e la piccola sfera posta all'estremità di un bastone isolante (2) che vediamo nella prima foto. In pratica ponendo questa piccola sfera a circa 5 cm dalla grande sfera osserviamo ogni qualche secondo una scenografica e rumorosa scarica luminosa. Considerando tale distanza e la rigidità dielettrica dell'aria possiamo dire che in tale condizione la d.d.p. tra le sfere è di circa 150000 V. Ponendo le sfere ancora più lontano è molto difficile che scocchi la scintilla.

Prima di toccare l'apparecchio nella sua parte metallica scarichiamo completamente la carica della sfera grande ponendola a contatto con la sfera piccola.



## 7

## Resistenze

In questa esperienza verificheremo le leggi che regolano la resistenza equivalente a insiemi di resistenze in serie e in parallelo.

### 7.1 Materiale utilizzato

1. Breadboard.
2. Quattro o più resistenze di diverso valore.
3. Due cavi maschio-maschio Dupont.
4. Multimetro.

### 7.2 resistenze in serie

La resistenza totale di tre resistenze in serie è equivalente alla somma delle resistenze.

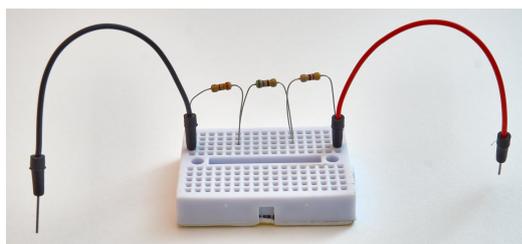
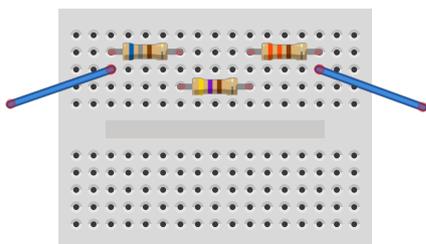
$$R_{tot} = R_1 + R_2 + R_3 \quad (7.1)$$

Studiamo la resistenza totale di tre resistenze in serie.



Le resistenze riportano con delle strisce colorate o comunque nella loro confezione un valore nominale. Il valore reale si discosta in media da questo valore secondo una percentuale, solitamente del 5 % o del 1 % per quelle migliori.

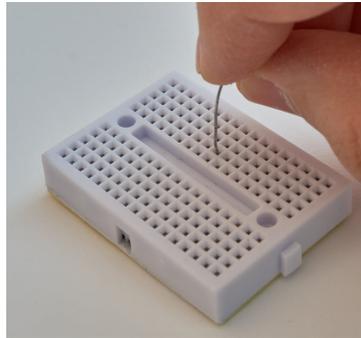
Misuriamo la resistenza reale dei nostri tre esemplari stringendo con le dita i terminali della resistenza ai terminali del multimetro usato per misurarle. Per metterle in serie usiamo una breadboard, inserendo alle estremità un cavo maschio-maschio Dupont, secondo lo schema qui di seguito indicato.



Per inserire le resistenze nella breadboard facciamo attenzione al fatto che i fili delle resistenze sono abbastanza esili. I pin della breadboard oppongono una certa resistenza all'inserimento di

### 7.3 resistenze in parallelo

qualsiasi cosa; per inserire la resistenza teniamo il filo in verticale sul pin con due dita e spingiamo delicatamente, evitando che il filo si pieghi. Se ci sembra che il filo non entri allarghiamo il pin con un terminale del connettore Dupont, solitamente ben più robusto.



Riportiamo nel nostro caso le resistenze nominali ( $R_n$ ), quelle sperimentali ( $R_s$ ) e quella totale delle tre resistenze in serie:

	$R_n$ (ohm)	$R_s$ (ohm)
1	680	665
2	470	462
3	330	323
$R_{tot}$	1483	1444

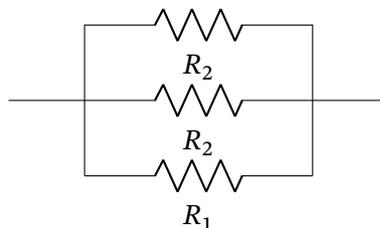
I risultati sperimentali concordano con la teoria, nel limite degli errori sperimentali.

### 7.3 resistenze in parallelo

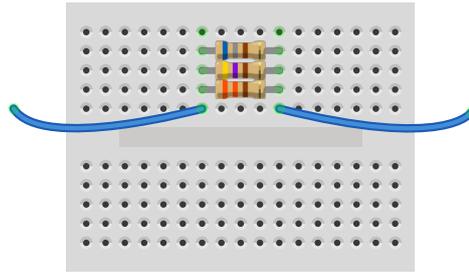
Il reciproco della resistenza totale di tre resistenze in parallelo è equivalente alla somma dei reciproci delle singole resistenze.

$$\frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \quad (7.2)$$

Studiamo la resistenza totale di tre resistenze in parallelo.



Misuriamo la resistenza reale dei nostri tre esemplari stringendo con le dita i terminali della resistenza ai terminali del multimetro usato per misurarle. Per metterle in parallelo usiamo una breadboard, inserendo alle estremità un cavo maschio-maschio Dupont, secondo lo schema qui di seguito indicato.



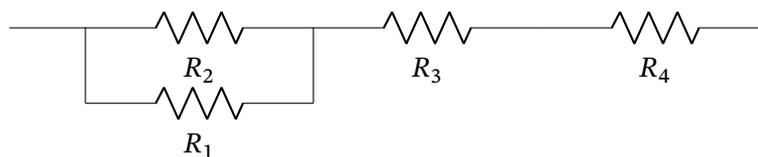
Riportiamo nel nostro caso le resistenze nominali ( $R_n$ ), quelle sperimentali ( $R_s$ ) e quella totale delle tre resistenze in parallelo:

	$R_n$ (ohm)	$R_s$ (ohm)
1	680	665
2	470	462
3	330	323
$R_{tot}$	151	137

I risultati sperimentali concordano con la teoria, ma meno di quanto ci si aspetterebbe. Le letture non si stabilizzano facilmente.

## 7.4 resistenze in serie e parallelo

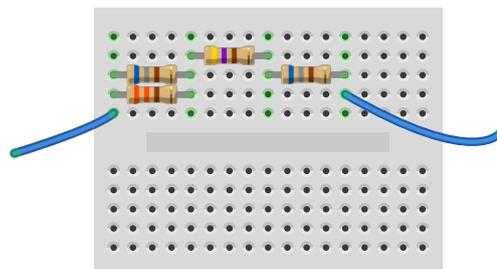
Prendiamo infine una configurazione mista come quella qui di seguito rappresentata.



Le resistenze  $R_1$  e  $R_2$  sono in parallelo; la resistenza equivalente  $R_{12}$  è in serie con  $R_3$  e  $R_4$ . Per cui la resistenza equivalente totale vale:

$$R_{tot} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} + R_3 + R_4 \quad (7.3)$$

Per le misure procediamo come prima, posizionando le resistenze sulla breadboard come qui rappresentato.



#### 7.4 resistenze in serie e parallelo

Riportiamo le resistenze nominali ( $R_n$ ), quelle sperimentali ( $R_s$ ) e quella totale.

	$R_n$ (ohm)	$R_s$ (ohm)
1	680	665
2	470	462
3	330	323
4	680	662
$R_{tot}$	1372	1347

I risultati sperimentali concordano con la teoria, nel limite degli errore sperimentali.

# 8

## Esperimento di Oersted

---

### 8.1 Introduzione

L'esperienza di Oersted consiste nella produzione di un campo magnetico tramite un filo percorso da corrente e nella individuazione della forma di questo campo. Possiamo replicare l'esperimento in due modi.

### 8.2 Modalità economica

La prima modalità di svolgimento fa uso di strumenti molto poveri e può essere facilmente svolta in classe.

#### 8.2.1 Apparecchi utilizzati

1. filo elettrico schermato lungo 50 cm
2. pila di qualsiasi voltaggio, ma possibilmente ad alta capacità.
3. una piccola bussola

### 8.3 Montaggio apparecchi

Poniamo la bussola in orizzontale sul tavolo e poniamo il filo sulla bussola in modo che sia allineato all'ago magnetico. I terminali del filo devono essere spellati e vanno schiacciati con le dita ai capi della pila.

Nella figura qui accanto il cavo ha delle piccole pinze nei terminali. Di solito in laboratorio possiamo trovarli facilmente. Il cavo è inoltre tenuto fermo con del nastro adesivo: è solo una comodità.



### 8.4 Procedimento

Dobbiamo chiudere il circuito per produrre una corrente elettrica che produca un campo magnetico che faccia girare l'ago della bussola. Il problema è che la corrente necessaria per un campo

#### 8.4 Procedimento

adeguato è abbastanza alta. Per cui chiudiamo il circuito solo per un secondo alla volta, il tanto da osservare la rotazione dell'ago e il verso raggiunto. Quello che stiamo facendo con la pila è propriamente cortocircuitarla. La conseguenza è che produciamo una corrente intensa, ma stiamo anche facendo riscaldare velocemente sia il filo (che non è un problema), ma soprattutto la pila. Questa, se tenuta in corto troppo a lungo potrebbe anche bruciare.

In ogni caso il fenomeno della rotazione dell'ago è del tutto evidente. Esso tende a porsi perpendicolarmente al filo, parallelamente al campo magnetico generato dal filo.

## 9

## Motore elettrico

## 9.1 Introduzione

Un motore elettrico è un apparecchio che trasforma energia elettrica in movimento. In qualsiasi motore elettrico abbiamo un circuito percorso da corrente, immerso in un campo magnetico. Sul circuito agiscono delle forze che lo mettono in movimento.

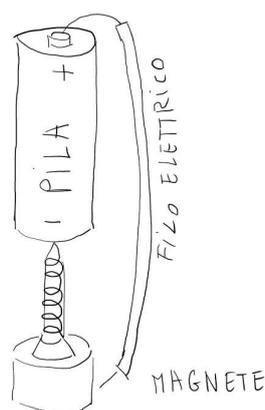
Esistono infinite varietà di motore. Uno dei più semplici da realizzare e da far funzionare è della tipologia detta “unipolare”, in quanto la corrente nella singola fase ha sempre lo stesso verso.

## 9.2 Apparecchi utilizzati

1. filo elettrico schermato lungo 20 cm, spellato alle estremità.
2. pila di qualsiasi voltaggio, a stilo.
3. una magnete cilindrico, possibilmente di buona intensità.
4. una vite con un grosso capello e di materiale ferromagnetico.

## 9.3 Montaggio apparecchi

Poniamo la vite col suo cappello al centro del magnete.  
*Poniamo il magnete con il polo nord verso l'alto:* il motore, in quanto tale, funzionerà anche col magnete capovolto, ma l'interpretazione del fenomeno sarà diversa.  
 Avviciniamo la punta della vite magnetizzata al polo negativo della pila, in modo che rimanga attaccata al suo centro.  
 Con una mano teniamo un capo del filo elettrico sul polo positivo della pila. Con l'altro capo del filo tocchiamo la parte laterale del magnete.

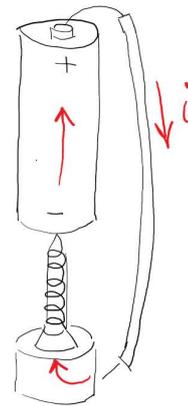


## 9.4 Procedimento

Basta toccare leggermente la parte laterale del magnete che esso e la vite cominceranno a ruotare vorticosamente. Per rendere più evidente la rotazione possiamo attaccare un piccolo pezzo di carta adesiva sul fondo del magnete. Se tocchiamo con il filo elettrico la vite non succede niente. Analogamente se poniamo il filo sul fondo del magnete al suo centro.

## 9.5 Interpretazione del fenomeno

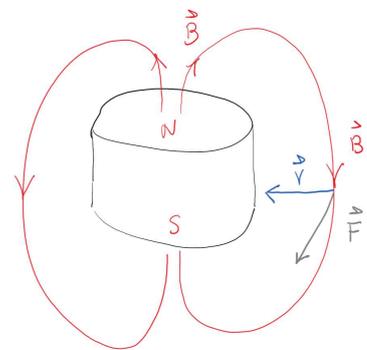
Quando chiudiamo il circuito col filo elettrico le cariche positive si muovono dal polo positivo della pila al polo negativo, passando attraverso il magnete, come indicato in figura. Seguiamo il verso delle cariche positive perché è il verso convenzionale della corrente. Il filo è poggiato lateralmente al magnete e in quel punto il movimento delle cariche avviene verosimilmente in orizzontale.



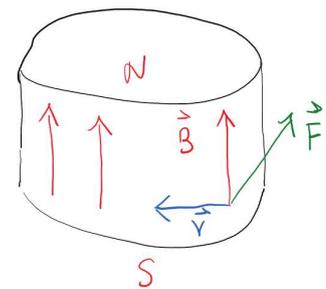
Il campo magnetico, all'esterno del magnete, esce dal polo nord e rientra nel polo sud. Lateralmente al magnete, osservando sulla destra come in figura, le cariche positive si stanno muovendo verso sinistra, come il verso della corrente. Il campo magnetico è diretto verso il basso. Sulle cariche agisce una forza di Lorentz diretta perpendicolarmente al piano della figura verso di noi.

$$\vec{F} = q\vec{v} \wedge \vec{B} \quad (9.1)$$

Si potrebbe obiettare che le cariche che effettivamente si muovono dovrebbero essere elettroni negativi. In realtà poco importa: al verso convenzionale delle cariche positive può corrispondere una corrente di cariche negative in verso opposto. Poiché anche il segno delle cariche è opposto di conseguenza la forza di Lorentz è la stessa.



Il campo magnetico, all'interno del magnete, va dal polo sud verso il polo nord. Lateralmente al magnete, osservando sulla destra come in figura, le cariche positive si stanno muovendo ancora verso sinistra, come il verso della corrente. Il campo magnetico è diretto verso l'alto. Sulle cariche agisce una forza di Lorentz diretta perpendicolarmente al piano della figura verso l'interno del piano.



**Quello che si osserva con la figurazione del primo disegno è una rotazione, per un osservatore che osserva il magnete dalla pila, in verso antiorario.**

Se invertiamo la polarità del magnete il verso di rotazione sarà opposto. Ugualmente se invertiamo i poli della pila, invertendo con essi il verso della corrente.

L'interpretazione che diamo è che il moto del magnete sia determinato dalle cariche che si muovono o all'interno di esso o esternamente, come comunemente avviene in un conduttore metallico (il magnete è rivestito da una camicia di acciaio-nickel), ma comunque sulla faccia superiore del magnete.

# 10 Studio del campo magnetico di un solenoide

## 10.1 Introduzione

Intorno a un filo percorso da corrente si forma un campo magnetico: l'intensità del campo è proporzionale alla corrente. Per produrre un campo abbastanza intenso, ma con la minima corrente, possiamo usare un filo avvolto in spire come quello detto *solenoid*e. Nel solenoide ideale, di lunghezza infinita, il campo è uniforme all'interno del solenoide e nullo all'esterno. Se il solenoide ha  $N$  spire per una lunghezza  $l$  e siamo nel vuoto allora il campo all'interno vale:

$$B = \mu_0 \frac{N}{l} i \quad (10.1)$$

dove  $i$  è l'intensità di corrente che circola nel solenoide e  $\mu_0$  è la permeabilità magnetica del vuoto. Dalla formula qui scritta si può osservare che **il campo magnetico presente all'interno del solenoide è direttamente proporzionale alla corrente che lo attraversa**. In questa esperienza vogliamo studiare, mediante un sensore di campo magnetico, la validità di questa affermazione.

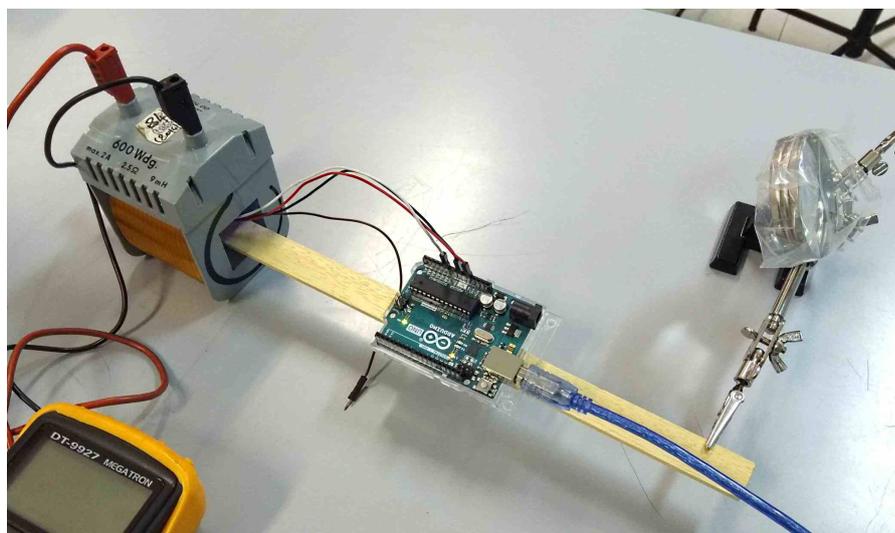
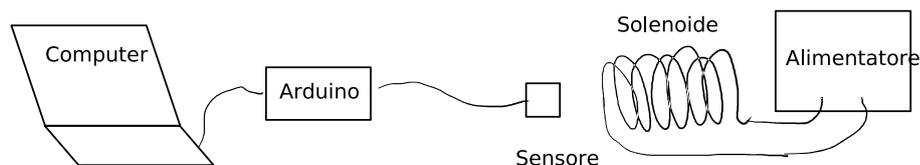
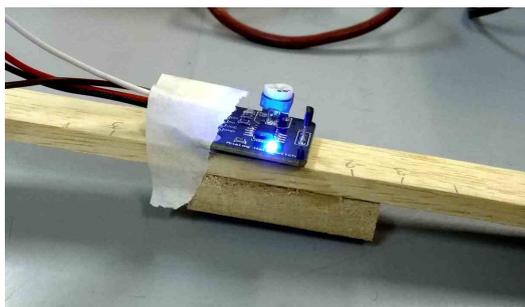
## 10.2 Apparecchi utilizzati

1. solenoide con 600 spire, lungo 6,5 cm;
2. righello millimetrato;
3. alimentatore in corrente continua da 300 VA in grado di erogare almeno 1 A;
4. sensore di campo magnetico Sunfounder ad effetto Hall per Arduino;
5. scheda Arduino Uno;
6. computer con il monitor seriale dell'IDE di Arduino;
7. cavi per il collegamento di Arduino e del sensore e del solenoide;
8. amperometro integrato nell'alimentatore:  
accuratezza 0,01 A o  $\pm 1\%$  a fondo scala, portata 10 A;
9. asta di legno lunga circa 30 cm;
10. nastro adesivo;
11. terza mano o supporto per l'asta di legno.

## 10.3 Montaggio apparecchi

Il sensore di campo magnetico utilizzato misura il campo magnetico in asse con la piccola scheda su cui è montato: lo poniamo all'interno del solenoide in asse con solenoide stesso. Tuttavia, per avere un posizionamento in asse e possibilmente al centro del solenoide, lo poggiamo su un'asta di legno (e quindi diamagnetica) su cui lo fermiamo con una striscia di nastro adesivo.

L'essere al centro del solenoide non è essenziale ai fini della proporzionalità che vogliamo osservare. Tuttavia è importante tenere il sensore fermo e in asse per tutta l'esperienza dal momento che esso misura il campo magnetico orientato solo perpendicolarmente al suo piano.



Dopo aver collegato il sensore di campo magnetico e la scheda Arduino al computer avviamo l'IDE di Arduino e apriamo il monitor seriale. In esso leggeremo i valori del campo magnetico misurato indirettamente, tramite una porta analogica di Arduino: leggeremo quindi un numero che, per un campo magnetico nullo è circa 500.

### 10.3.1 Codice per l'utilizzo

Questa è una versione semplificata del codice che abbiamo presentato per il sensore Sunfounder. Non utilizziamo il pin legato al led del sensore e stampiamo il valore letto dalla porta analogica di Arduino in modo che con un campo nullo dia un valore nullo.

---

```
1 int sensorPin = A0;
  int sensorValue = 0;
3 void setup()
  {
5   Serial.begin(9600);
  }
7 void loop()
  {
9   sensorValue = analogRead(sensorPin);
  Serial.print("Valore del sensore ");
11  Serial.print(sensorValue-511);
  Serial.print(" ");
13  Serial.println(sensorValue);
  delay(200);
15 }
```

---

- La riga 2 seleziona il pin di input per il potenziometro.
- La riga 3 nomina la variabile che contiene il valore letto dalla porta A0.
- La riga 5 seleziona la velocità di comunicazione tra Arduino e l'esterno.
- La riga 8 legge il valore di A0.
- La riga 11 stampa sulla porta seriale il valore del segnale inviato dal sensore riscaldato. Il valore qui sottratto (511) è specifico dell'esemplare di sensore in mio possesso. Ognuno deve inserire il valore specifico per il proprio apparecchio
- La riga 14 mette Arduino in pausa per 200 ms.

## 10.4 Procedimento

Iniziamo col leggere il campo magnetico fuori dal solenoide, lontano da fonti di campo: il sensore deve segnare zero o un valore fluttuante intorno allo zero. Se così non fosse modifichiamo il programma installato su Arduino o al limite riscaldiamo tutte le misure successive tenendo conto di questo valore base indicato dal sensore, valore che può essere positivo o negativo.

Successivamente poniamo il sensore dentro il solenoide quando questo non è ancora collegato all'alimentatore: il sensore deve indicare ancora zero. Se così non fosse controlliamo la qualità del collegamento elettrico del sensore: ci sono sicuramente dei contatti laschi o traballanti. Qualche colpo ai fili nei punti di contatto o dei piccoli movimenti alla scheda Arduino o al sensore normalmente risolvono il problema.

Volendo possiamo orientare il solenoide perpendicolarmente con il campo magnetico terrestre in modo che il sensore non venga influenzato nelle misurazioni. Tuttavia, come abbiamo già detto, la sensibilità del sensore è inferiore al valore del campo magnetico terrestre.

Adesso accendiamo l'alimentatore, assicurandoci che tutti i suoi potenziometri siamo a zero: l'alimentatore appena acceso non deve erogare alcuna corrente.

Dopodiché portiamo la corrente a 0,1 A e rimisuriamo il campo magnetico. Proseguiamo fino a raggiungere 0,8 A a passi di 0,1 A. Potrebbe succedere che la misura del campo magnetico indicata dal sensore non sia del tutto stabile: è normale. In quel caso prendiamo la misura che compare più spesso: in ogni caso le fluttuazioni sono dell'ordine della sensibilità dello strumento.

Una volta finito con queste coppie di valori azzeriamo nuovamente la corrente, spegniamo l'alimentatore per sicurezza e invertiamo i cavi ai capi del solenoide. Cominciamo nuovamente a prendere una nuova serie di coppie di valori corrente / campo magnetico fino ad arrivare a 0,8 A. In questa nuova serie la corrente circola in verso opposto rispetto alla serie precedente; il campo magnetico prodotto dal solenoide ha anch'esso verso opposto; il sensore dovrebbe segnare valori simili ai precedenti, ma di segno opposto.

Infine determiniamo la retta dei minimi quadrati con i valori ottenuti e verificiamo che sono linearmente correlati.

## 10.5 Dati sperimentali

$$N = 600 \quad l = 65 \text{ mm} \quad \Delta l = 1 \text{ mm} \quad \Delta i = 0,01 \text{ A}$$

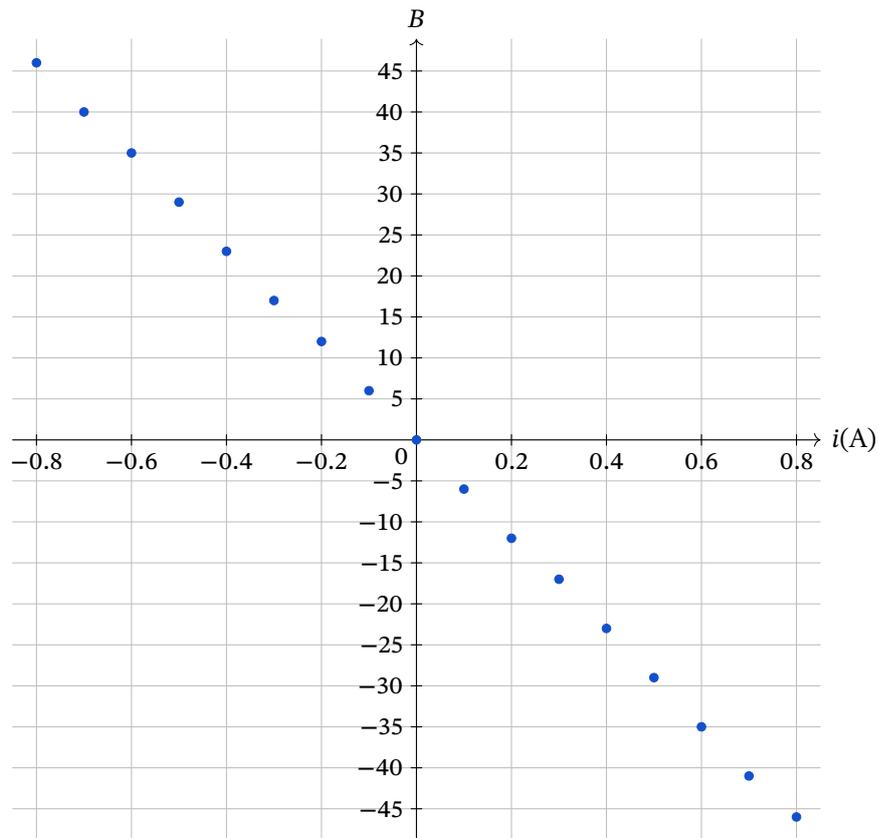
<b>I Serie</b>	
i (A)	B
0,00	0
0,10	-6
0,20	-12
0,30	-17
0,40	-23
0,50	-29
0,60	-35
0,70	-41
0,80	-46

<b>II Serie</b>	
i (A)	B
0,00	0
-0,10	6
-0,20	12
-0,30	17
-0,40	23
-0,50	29
-0,60	35
-0,70	40
-0,80	46

I valori indicati per il campo magnetico non hanno unità di misura: sono i valori letti direttamente dalla porta analogica di Arduino.

Nella seconda serie l'intensità di corrente è negativa perché abbiamo invertito il suo verso rispetto alla prima serie. Il campo magnetico è negativo se la parte anteriore del sensore è posta in prossimità di un polo nord magnetico, positivo altrimenti.

## 10.6 Elaborazione dati sperimentali



Il grafico ottenuto è una retta passante per l'origine: ciò conferma l'ipotesi fatta. Determiniamo anche la retta dei minimi quadrati e il coefficiente di correlazione associato ai dati sperimentali per confermare quantitativamente l'ipotesi della diretta proporzionalità.

La retta interpolatrice è  $y = mx + q$ , dove ad  $x$  associamo l'intensità di corrente  $i$  e a  $y$  associamo il campo magnetico misurato  $B$ .

$m$ (1/A)	$\Delta m$ (1/A)	$q$	$\Delta q$	$r$
-57,8	0,2	-0,06	0,08	0,9998

L'indice di correlazione dato indica che, con grande confidenza, il campo magnetico è linearmente dipendente dalla corrente applicata. Il valore molto piccolo del parametro  $q$  indica che anche la retta interpolatrice passa per lo zero.

**Quindi campo magnetico e corrente sono direttamente proporzionali.**

## 10.7 Note

Inizialmente avevo provato a determinare anche il valore in tesla del campo magnetico, ma i risultati sperimentali non erano in linea con quanto atteso. Approfondendo la validità della relazione che ci indica l'intensità del campo magnetico in un solenoide ideale e acquistando anche un sensore che mi desse i valori del campo direttamente ho potuto appurare quando il modello del solenoide ideale si discosti dalla realtà. A quel punto ecco le ragioni per studiare solo la linearità del campo rispetto all'intensità di corrente.

**Parte V**  
**Appendici**



## A

# Misure di campo magnetico

---

## A.1 Introduzione

Il campo magnetico (o induzione magnetica) può essere definito come il campo che può esercitare una forza su una carica elettrica in moto e che è in relazione alla velocità della carica. Se la carica è ferma non sentirà alcuna forza dovuta al campo magnetico.

I sensori di campo magnetico oggi in commercio sono essenzialmente basati su quello che è detto “Effetto Hall”. Se un conduttore attraversato da corrente  $i$  si trova in una regione di spazio in cui è presente un campo magnetico perpendicolare alla velocità di propagazione dei portatori di carica, in generale, alle estremità del conduttore, si manifesterà una differenza di potenziale:

$$\Delta V_H = ivd \quad (\text{A.1})$$

dove  $v$  è la velocità dei portatori di carica e  $d$  è la larghezza del conduttore.

## A.2 Sunfounder - magnetic sensor

Il nostro sensore è realizzato con il sensore Hall SS49E e con l'integrato LM393 (amplificatore lineare). Il sensore Hall emette un tensione direttamente proporzionale al campo magnetico, purché questo abbia un'intensità massima di circa 100 mT. La sensibilità tipica è 1,4 mV/Gauss con alimentazione a 5 V (1 Gauss = 0,0001 T). Se il campo è solo quello terrestre la tensione in uscita è centrata su circa 2,5 V. È possibile alimentare il sensore anche a 3,3 V diminuendo portata e sensibilità.

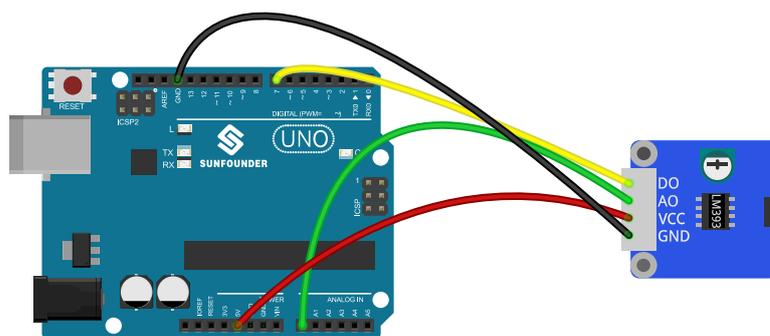
Per quanto riguarda l'interpretazione dei dati osserviamo che non otteniamo direttamente un valore per il campo magnetico, ma solo una tensione ad esso proporzionale. Se poniamo un polo nord di un magnete di fronte alla faccia marchiata del sensore esso emetterà una tensione inferiore a quello di riferimento; viceversa se siamo in presenza di un polo sud. Inoltre il sensore misura l'intensità di un campo magnetico perpendicolare alla faccia marchiata del sensore, ovvero il flusso del campo che attraversa il piano del sensore.

Nei grafici allegati all'integrato SS49E si osserva che il segnale in uscita vale circa 2,5 V con un campo pressoché nullo e circa 4,0 V per un campo di 0,1 T. Arduino Uno può discriminare tra 1024 livelli per un segnale di valore massimo 5,0 V. Il nostro segnale può variare di  $\pm 1,5$  V; Arduino vedrà circa 307 livelli e quindi una sensibilità di circa  $3,2 \times 10^{-4}$  T. Per trasformare il valore di tensione letto in tesla possiamo moltiplicare il valore numerico della porta analogica di Arduino (che si ha rispetto al valore di equilibrio) per la sensibilità. La sensibilità è superiore al campo magnetico terrestre, che quindi non è rilevante ai fini delle misure con tale sensore.

Nell'uso si trova che quando il sensore opera oltre la sua portata va in saturazione; per valori di campo vicini alla portata il segnale non è più direttamente proporzionale al campo.

Questo tipo di sensori è soggetto ad isteresi. La documentazione del nostro sensore non riporta nulla a riguardo, ma teniamo conto dell'eventuale presenza di questo comportamento.

### A.2.1 Schema di montaggio



Il sensore è dotato di quattro pin:

1. Il pin denominato GND va messo a terra e collegato al pin GND su Arduino;
2. Il pin VCC va collegato all'alimentazione; lo colleghiamo al pin a 5,0 V;
3. Il pin D0 fornisce un'indicazione sulla presenza o meno di un campo magnetico; può assumere solo due stati; lo colleghiamo al pin D7 di Arduino;
4. Il pin A0 fornisce un valore analogico correlato all'intensità del campo magnetico; lo colleghiamo al pin A0 di Arduino.

## A.2.2 Codice per l'utilizzo

---

```

1  const int ledPin = 13;
   int sensorPin = A0;
3  int digitalPin = 7;
   int sensorValue = 0;
5  boolean digitalValue = 0;

7  void setup()
   {
9   pinMode(digitalPin, INPUT);
   pinMode(ledPin, OUTPUT);
11  Serial.begin(9600);
   }
13
15 void loop()
   {
17   sensorValue = analogRead(sensorPin);
   digitalValue = digitalRead(digitalPin);
   Serial.print("Valore del sensore ");
19   Serial.print(sensorValue);
   Serial.println("");

21   if( digitalValue==HIGH )
23   {
       digitalWrite(ledPin, LOW);
25   }
   if( digitalValue==LOW)
27   {
       digitalWrite(ledPin, HIGH);
29   }
   delay(200); //delay 200ms
31 }

```

---

- La riga 1 dice che il led del sensore è collegato al pin 13.
- La riga 2 seleziona il pin di input per il potenziometro.
- La riga 3 seleziona il pin di input digitale della porta D0.
- La riga 4 nomina la variabile che contiene il valore letto dalla porta A0.
- La riga 5 nomina la variabile che contiene il valore letto dalla porta D0.
- La riga 9 seleziona il pin 7 (D0) come input.
- La riga 10 seleziona il pin 13 (led) come output.
- La riga 11 seleziona la velocità di comunicazione tra Arduino e l'esterno.
- La riga 16 legge il valore di A0.
- La riga 17 legge il valore di D0.
- La riga 19 stampa sulla porta seriale il valore del segnale inviato dal sensore.

## *A.2 Sunfounder - magnetic sensor*

- La righe 22-29 accendono il led sul sensore se viene misurato un segnale che supera una soglia di riferimento. Se se il valore di D0 è HIGH spegne il led; altrimenti accende il led.
- La riga 30 mette Arduino in pausa per 200 ms.

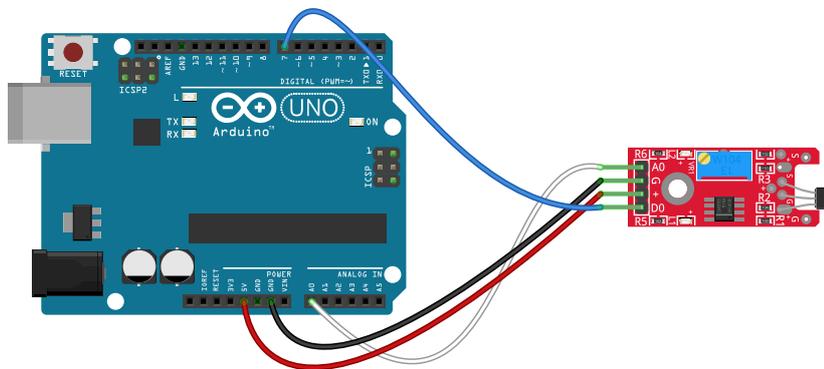
### A.3 Az-delivery KY-024

Anche questo sensore è realizzato con l'integrato LM393 (amplificatore lineare) e il sensore Hall SS49E. A differenza dell'altra realizzazione questa è di molto più facile reperibilità e con un costo inferiore. Avendo gli stessi componenti base valgono le considerazioni fatte prima. Anche il codice per il suo utilizzo può essere lo stesso.

Una differenza con il sensore precedente è nella vite presente sulla scheda, che si intravede nello schema di montaggio sul componente azzurro presente sulla scheda. L'utilità della vite, per me limitata nell'uso nel laboratorio di fisica, è quella di variare la sensibilità del sensore: questo è quel che indica il manuale. Da quel che ho potuto capire la rotazione della vite cambia il comportamento della scala dei valori per valori di campo positivi rispetto a quelli negativi. A seconda della rotazione prevalente della vite in senso antiorario piuttosto che orario prevale la sensibilità per valori del campo di un certo segno rispetto all'altro. Sarebbe opportuno trovare il punto di equilibrio tra le due sensibilità in modo da avere una scala che non dipende dal verso del campo, ottenendo un comportamento del tutto simile a quello del sensore Sunfounder.

Purtroppo il sensore è montato, come si vede nella figura, sullo stesso piano della scheda. Nell'uso pratico ho trovato più utile avere il piano del sensore perpendicolare al piano della scheda. Si può cercare di ovviare a questo inconveniente inclinando delicatamente (e definitivamente) il sensore in quel modo con le mani o delle pinzette: questa operazione è da intendersi quasi definitiva perché i piedini del sensore sicuramente si romperebbero dopo pochissimi aggiustamenti.

#### A.3.1 Schema di montaggio



Il sensore è dotato di quattro pin:

1. Il pin denominato G va messo a terra e collegato al pin GND su Arduino;
2. Il pin + va collegato all'alimentazione; lo colleghiamo al pin a 5,0 V;
3. Il pin D0 fornisce un'indicazione sulla presenza o meno di un campo magnetico; può assumere solo due stati; lo colleghiamo al pin D7 di Arduino;
4. Il pin A0 fornisce un valore analogico correlato all'intensità del campo magnetico; lo colleghiamo al pin A0 di Arduino.



# B

## Multimetro

---

### B.1 Introduzione

Qualsiasi multimetro digitale o analogico presente in laboratorio consente di misurare sia differenze di potenziale che correnti con un unico apparecchio. I multimetri digitali consentono anche la misura di resistenze ed in alcuni casi di capacità. Illustriamo qui di seguito delle piccole indicazioni su come utilizzarli.

Osserviamo in generale che molti multimetri dispongono di tre ingressi: uno è considerato il terminale con potenziale zero o quello comune ai vari tipi di misurazioni selezionabili. Un altro è utilizzabile per piccole correnti e uno per correnti più elevate. Alcuni apparecchi dispongono poi di ingressi diversificati per misure di tensione e corrente.

### B.2 Voltmetro

Il multimetro è in grado di misurare differenze di potenziale continue ed alternate. Ricordiamo che la differenza di potenziale si misura mettendo i terminali del voltmetro *in parallelo* all'oggetto da misurare. Per poterlo utilizzare:

1. Colleghiamo i terminali agli appositi ingressi: il colore dei terminali non ha alcuna rilevanza fisica, ma solo pratica.
2. Partiamo selezionando la scala di misura opportuna scegliendo una scala *più grande* del valore della misura che dobbiamo misurare: nel dubbio partiamo dalla scala maggiore del nostro strumento.
3. Quando cominciamo a rilevare qualcosa passiamo poi alla scala maggiore più prossima alla grandezza da misurare.

### B.3 Amperometro

Il multimetro è in grado di misurare correnti continue ed alternate. Ricordiamo che la corrente si misura mettendo i terminali del amperometro *in serie* al tratto di circuito da misurare. Per poterlo utilizzare:

1. Colleghiamo i terminali agli appositi ingressi facendo attenzione alla portata richiesta: il colore dei terminali non ha alcuna rilevanza fisica, ma solo pratica.
2. Partiamo selezionando la scala di misura opportuna scegliendo una scala *più grande* del valore della misura che dobbiamo misurare: nel dubbio partiamo dalla scala maggiore del nostro strumento.
3. Quando cominciamo a rilevare qualcosa passiamo poi alla scala maggiore più prossima alla grandezza da misurare.

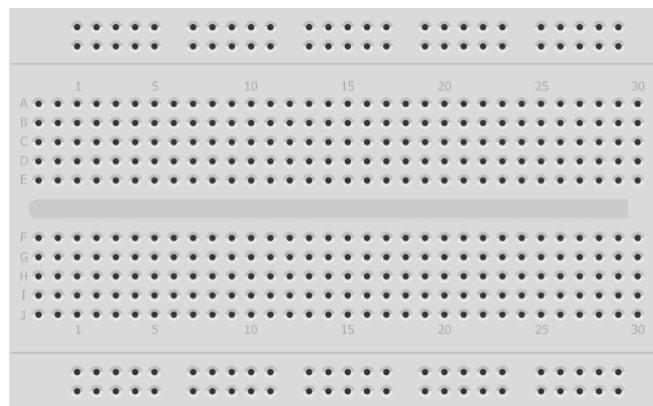
## B.4 Misure di resistenza

Il multimetro è in grado di misurare resistenze. Ricordiamo che la resistenza si misura mettendo i terminali del multimetro *in parallelo* all'oggetto da misurare quando questo è separato dal circuito in cui verrà inserito. In pratica, per misurare il valore di una resistenza, basta tenere con le dita i terminali della resistenza appoggiati ai terminali del multimetro.

Oppure inseriamo la resistenza e i terminali del multimetro in parallelo in una breadboard: con questo sistema non si hanno dispersioni, ma la breadboard stessa introduce una qualche resistenza.

## C.1 Introduzione

La breadboard è una struttura in plastica con decine con centinaia di fori interconnessi elettricamente. Analizziamo l'esempio qui proposto.



Abbiamo innanzi due righe di fori nella parte superiore ed inferiore. In molte breadboard di questo tipo su queste due coppie di righe è serigrafato un più e un meno: è un suggerimento per usare queste righe come linea comune per il polo positivo e negativo dell'alimentazione. I fori all'interno di ogni riga sono interconnessi; le righe sono isolate tra loro. La resistenza di isolamento tra i pin è elevata, ma comunque dell'ordine dei 10 megaohm e non infinita.

Nella parte centrale abbiamo dieci righe indicate con lettere e 32 colonne indicate con numeri. In questo caso sono in comune i fori delle colonne in gruppi di cinque: cinque nelle righe più in alto e cinque in quelle più in basso.

## C.2 Inserimento di elementi nei fori

## *C.2 Inserimento di elementi nei fori*

# Indice analitico

---

amperometro, 57  
breadboard, 59  
campo magnetico, 43, 51  
gas perfetti, 17  
Generatore di Van de Graaff, 31  
legge dei gas perfetti, 17  
legge di Boyle, 17  
legge di Hooke, 5  
misure di resistenza, 58  
motore elettrico, 41  
multimetro, 57  
Oersted, esperimento di, 39  
principi della dinamica: secondo, 11  
resistenze, 35  
solenoidi, 43  
solenoidi, campo al suo interno, 43  
SS49E, 52, 55  
suono, sua analisi e misura, 25  
voltmetro, 57