

ESPERIENZA N.3 – MAGNETOMETRO

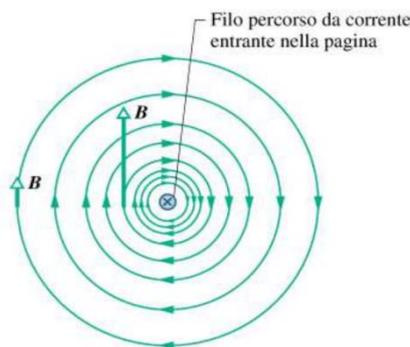
Data: 10 – 06 - 2020

1. OBIETTIVI

L'esperienza in oggetto ha lo scopo di determinare il posizionamento del sensore magnetometro all'interno di uno smartphone. Per far ciò viene utilizzato un campo magnetico da un filo percorso a corrente.

2. PREMESSA TEORICA

Si osserva che un filo rettilineo percorso da corrente genera un campo magnetico le cui linee di campo si avvolgono intorno al filo con tante linee concentriche al filo stesso. La direzione di percorrenza è individuabile tramite l'ausilio della regola della mano destra (Figura 1).



Nello specifico la legge che regola l'intensità del campo magnetico b segue quella di Biot-Savart:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

Dove

I è l'intensità della corrente [A];

r è la distanza dal filo dal sensore [m]

μ_0 è la permeabilità magnetica del vuoto il cui valore è di $4\pi \cdot 10^{-7}$ [T m/A].

Il magnetometro dello smartphone è uno strumento, basato su tecnologia MEMS, che permette di misurare l'intensità e la direzione dei campi magnetici. Nel caso in esame l'App utile a visualizzare le tre componenti del campo magnetico nonché le sue variazioni nel tempo e nello spazio prende il nome di **Phyphox** ([RWTH Aachen University](http://www.phyphox.com)).

Al fine di individuare macroscopicamente il sensore all'interno del cellulare si osserva che ponendo vicino al telefono una calamita è possibile misurare l'intensità del campo magnetico, o più

correttamente il vettore di induzione magnetico. Nello specifico ruotando la calamita si può vedere come la direzione e il segno del campo magnetico cambiano di conseguenza, allontanando la calamita il campo decresce rapidamente, ma non raggiunge mai lo zero. Il valore residuo, infatti, è dovuto alla presenza del campo geomagnetico.

3. MATERIALI E STRUMENTAZIONE

PRIMA CONFIGURAZIONE:

- Piastra sperimentale, breadboard 400 pin;
- Resistenze da 220 ohm con tolleranza del 5%;
- Multimetro digitale;
- Smartphone con app Phybox per utilizzare il magnetometro;
- Cavi di collegamento e coccodrilli, pulsante;
- Generatore di corrente: pila ricaricabile da 9V con capacità di 200 mAh;
- filo di rame di lunghezza 1m;

SECONDA CONFIGURAZIONE:

- Filo di rame di circa 3 metri (sezione $0.30 \pm 0.02 \text{ mm}^2$);
- Generatore di tensione regolabile (6-20 V);
- Multimetro digitale;
- Multimetro analogico;
- Smartphone con app Phybox per utilizzare il magnetometro;
- Lampadine da automobile che fungono da resistenze di potenza;
- Metro;
- Squadra con bolla;
- Geomag;
- Asse di legno per supporto al filo (circa 2 m)
- Morsetti;
- Lego per supporto al telefono;

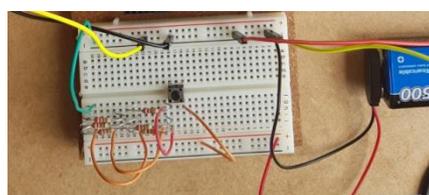
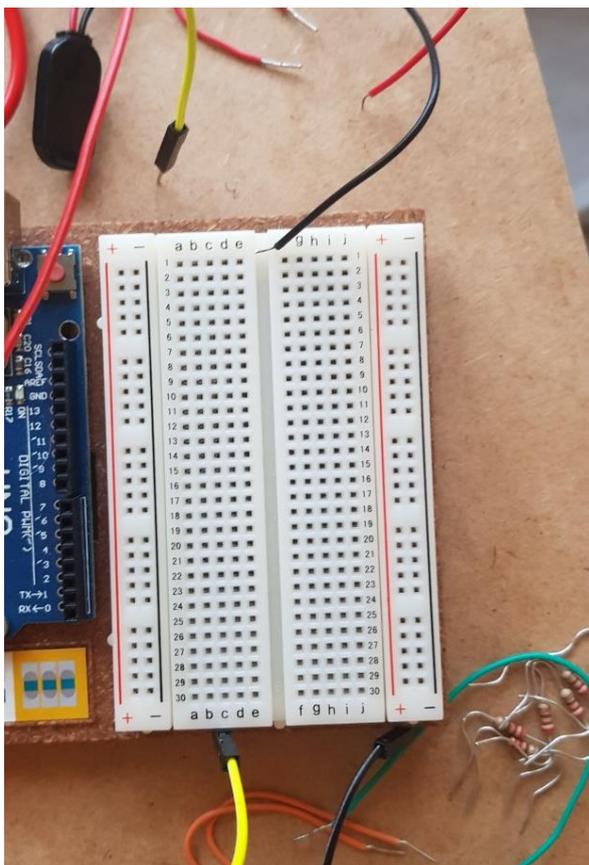


Figura 1 Apparato strumentale

4. PROCEDURA SPERIMENTALE

PRIMA CONFIGURAZIONE:

In primo luogo si è individuata approssimativamente la posizione del sensore, per far ciò si è fatto ricorso all'utilizzo di un magnete. Il magnetometro presente all'interno dello smartphone, infatti, è in grado di rilevare il campo magnetico generato da quest'ultimo, in questo modo tramite l'App Phybox si è trovata la posizione in cui il campo magnetico presenta un massimo. Si è in grado quindi di identificare sommariamente le distanze del sensore rispetto al lato lungo del telefono. Nello specifico tale distanza è stata stimata di $1,2 \pm 0,1$ cm.

Per eseguire il più correttamente possibile l'esperienza si è avuta l'accortezza di allontanarsi da qualsiasi fonte elettromagnetica quali alimentatori, cavi di alimentazione, cellulari e materiali ferromagnetici in generale. Inoltre qualsiasi supporto utilizzato si è accertato essere materiale con permeabilità magnetica prossima ad 1.

Si è proceduto quindi assemblando il circuito elettrico di Figura 2. In particolare sono state posizionate in parallelo alcune resistenze da 220 ohm, con tolleranza del 5%, variando il numero delle resistenze in parallelo ottenendo un totale un totale di sei setup sperimentali differenti.

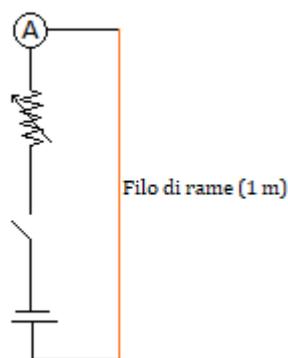


Figura 2 Circuito utilizzato

Successivamente si è posizionato il cellulare con il lato lungo appoggiato al tavolo ed accostato al filo di rame in modo che quest'ultimo passasse il più vicino possibile al magnetometro. A causa della mancanza di supporti idonei non è stato possibile escludere il rumore di fondo del campo magnetico locale. Per escludere il campo geomagnetico, infatti, si sarebbe dovuto ruotare il cellulare, rispetto agli assi x , y e z modo che le componenti del magnetometro fossero paralleli al campo stesso, annullando così il contributo del campo magnetico rispetto a quella direzione. Le misure sono state effettuate quindi sottraendo l'offset. Inoltre si osserva che durante ogni misurazione sono stati raccolti i dati simultaneamente della corrente passante, grazie all'amperometro posizionato in serie nel circuito, e del campo magnetico.

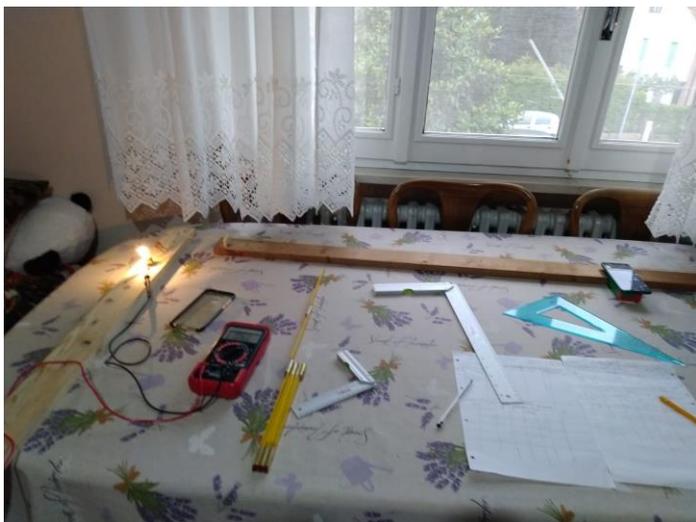
Al fine di evitare il surriscaldamento delle resistenze, conseguentemente per evitare l'effetto Joule, le misurazioni effettuate hanno avuto la durata pochi secondi avendo cura di attendere il raffreddamento delle resistenze per effettuare le misurazioni nelle diverse configurazioni. Si è verificato inoltre che la capacità della pila fosse sufficiente al fine di generare l'intensità di corrente desiderata per un tempo sufficiente ad effettuare le misurazioni prima di esaurirsi.

SECONDA CONFIGURAZIONE

Prima di effettuare le misurazioni con il magnetometro si è stimata la zona di posizionamento del magnetometro nel telefono con l'utilizzo di un geomag, per cercare di metterlo più vicino possibile al filo. Per avere meno interferenze possibile durante la misurazione, si è cercato di tenere lontano il telefono dai campi elettromagnetici generati dal resto del circuito e da dispositivi elettronici, che potevano generare campi rilevati dal magnetometro durante la misura. Per fissare il filo orizzontale si è utilizzata l'asse di legno con dei morsetti per tendere il filo, si è poi costruito utilizzando i mattoncini lego un supporto per il telefono, di altezza variabile a seconda della misurazione. Inoltre, si è fissato al telefono un piccolo post-it con un punto preso come riferimento della posizione telefono nello spazio. Prima di effettuare ogni misurazione si è allineato il telefono in modo che la componente x del campo misurato dal magnetometro non fosse influenzata dal campo generato dal filo.

Dopo un paio di misurazioni si è deciso di allineare il filo parallelo alla componente x del filo in modo che risultasse nulla, nel valore misurato dal magnetometro.

Una volta deciso il valore della tensione, quindi la corrente, e della posizione del telefono per la misurazione si è attivato il magnetometro per misurare il campo locale e, dopo aver acceso il generatore, si sono misurati i nuovi valori del campo magnetico; dopo aver spento il generatore, la misurazione è stata salvata per la successiva elaborazione.



Durante la misura di corrente si è atteso che l'intensità di corrente fosse stabile. Per ogni configurazione si sono effettuate misurazioni del campo, di qualche secondo (7-15 s), relative a ogni stato del sistema (generatore spento, acceso, dopo spegnimento) per avere dati su cui mediare e ottenere un valore statisticamente più attendibile.

5. MISURAZIONI EFFETTUATE ED ELABORAZIONE DEI DATI

CONFIGURAZIONE 1

Di seguito si riporta una figura esemplificativa della misura del campo magnetico e della corrente transitante nel circuito.

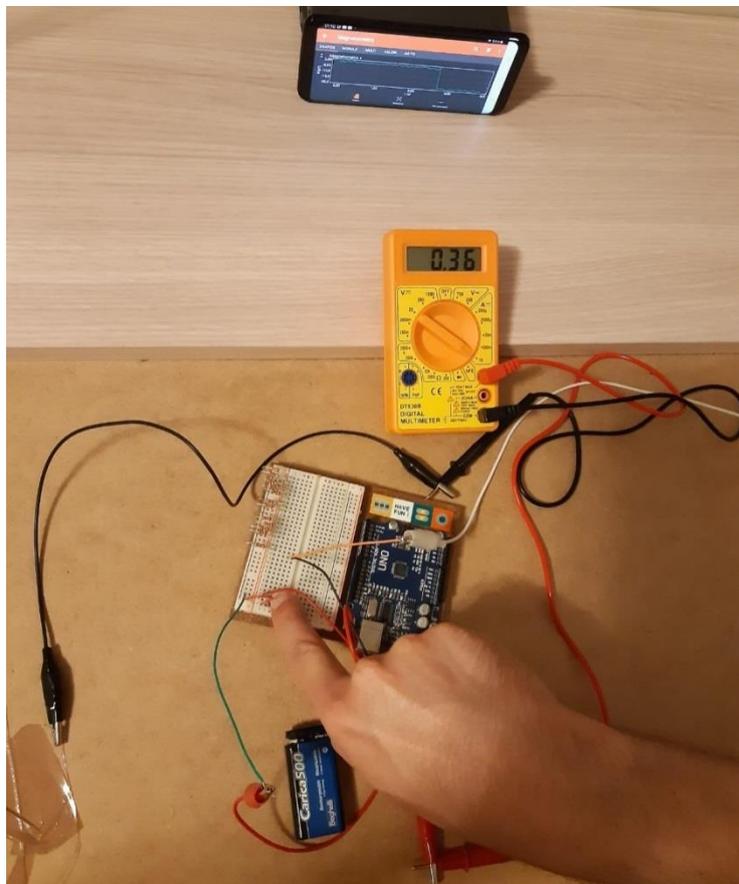


Figura 3 Esempio di misurazione del campo magnetico e dell'intensità di corrente

Viene riportato inoltre l'andamento del modulo del campo magnetico misurato in funzione del tempo in corrispondenza di quattro secondi circa si chiude il circuito facendo transitare al suo interno un'intensità di corrente I pari a 0,36 A.

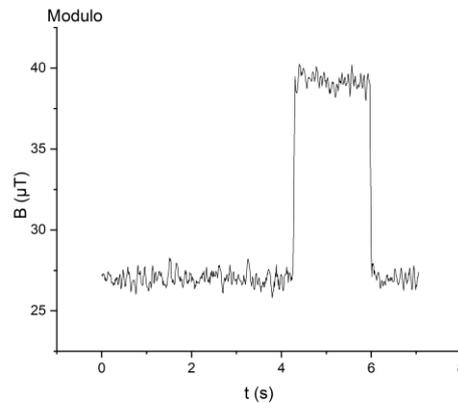


Figura 4 Variazione del campo magnetico in funzione del tempo

Tabella 1 Campo magnetico rilevato al variare dell'intensità di corrente.

Set	B [microT]	Incertezza [μT]	I [A]	Incertezza [A]
1	11,9	$\pm 0,8$	0,36	$\pm 0,01$
2	8,9	$\pm 0,8$	0,29	$\pm 0,01$
3	8,2	$\pm 0,8$	0,27	$\pm 0,01$
4	6,0	$\pm 0,8$	0,20	$\pm 0,01$
5	2,7	$\pm 0,8$	0,1	$\pm 0,01$
6	1,8	$\pm 0,8$	0,06	$\pm 0,01$

In Tabella 1 sono riportati i dati relativi al campo magnetico medio stimato, sottraendo l'offset, per ogni set sperimentale studiato.

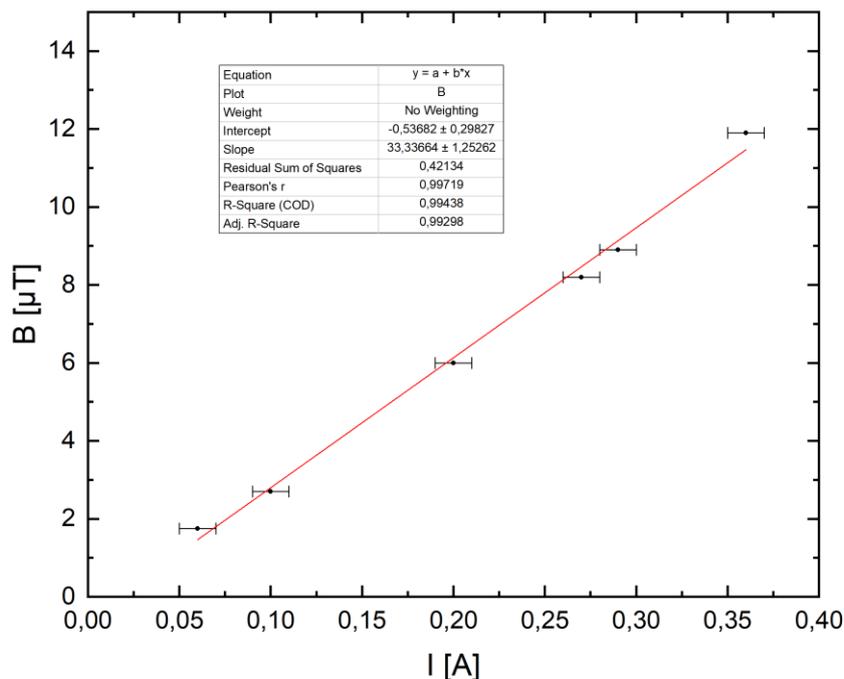


Figura 5 Fitting lineare dell'intensità di corrente rispetto al campo magnetico

Dal fitting lineare ottenuto si è in grado di ricavare la profondità r del magnetometro rispetto al fondo del cellulare (V. appendice):

$$r = 5,9 \pm 0,9 [mm]$$

CONFIGURAZIONE 2¹

Per ogni configurazione si sono misurate le componenti del campo magnetico (x, y, z), la tensione ai capi del generatore, la corrente del circuito (e quindi passante nel filo); inoltre la posizione del telefono (variabile per ogni configurazione) e quella del filo, rispetto ad un SdR fisso (figura 6).

¹. Durante i calcoli si sono considerate solo le componenti y e z del campo in quanto la componente x aveva una variazione trascurabile rispetto all'errore sulla misura.

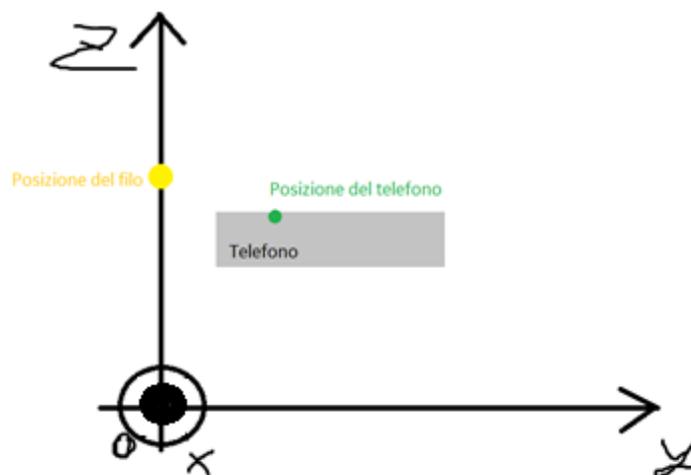


Figura 6

Dopo aver acquisito le varie misure di ogni configurazione, per trovare un valore di campo magnetico nella condizione a generatore spento e in quella a generatore acceso si sono mediati i valori forniti in un file dal magnetometro negli intervalli prima, durante e dopo l'accensione del generatore. Per fare ciò, data la quantità di configurazioni differenti (27) è stato utilizzato il programma access per l'elaborazione dei dati, altrimenti difficoltosa

Una volta ottenuti i valori del campo, per differenza componente per componente si è trovato il valore del modulo campo magnetico generato dal filo nel sensore del telefono, di cui si vuole calcolare la posizione.

Mediante l'utilizzo della legge di Biot-Savart si è trovata la distanza tra il magnetometro e il filo.

Per trovare la posizione del magnetometro è stato utilizzato un metodo simile al GPS, utilizzando le intersezioni tra circonferenze, di raggio r (calcolato precedentemente) e centro la posizione dell'origine del SdR solidale con il telefono, a triplette (intersecandone due e confrontando quale delle due intersezioni si avvicina maggiormente alla circonferenza del terzo punto). Si sono considerate solo le circonferenze che si intersecavano, poiché comunque i punti su cui mediare sono risultati circa 4000, quindi considerando tutte le posizioni, dal punto di vista dell'attendibilità, equivalenti, il risultato ottenuto è da considerarsi consistente.

Si sono esclusi alcuni punti di intersezione, poiché palesemente discostanti dal valore medio dovuto alla sensibilità nelle misure. Infatti nelle intersezioni di due circonferenze quasi concentriche, con un piccolo errore sul raggio, i punti trovati potrebbero essere dalla parte opposta rispetto alla posizione reale del filo.

Il riferimento sul telefono è situato sulla faccia superiore del telefono.

Confrontando la media dell'intersezioni prendendo come centro il riferimento sul telefono e la posizione reale del filo, si ottiene il vettore posizione del magnetometro rispetto al riferimento sul telefono.

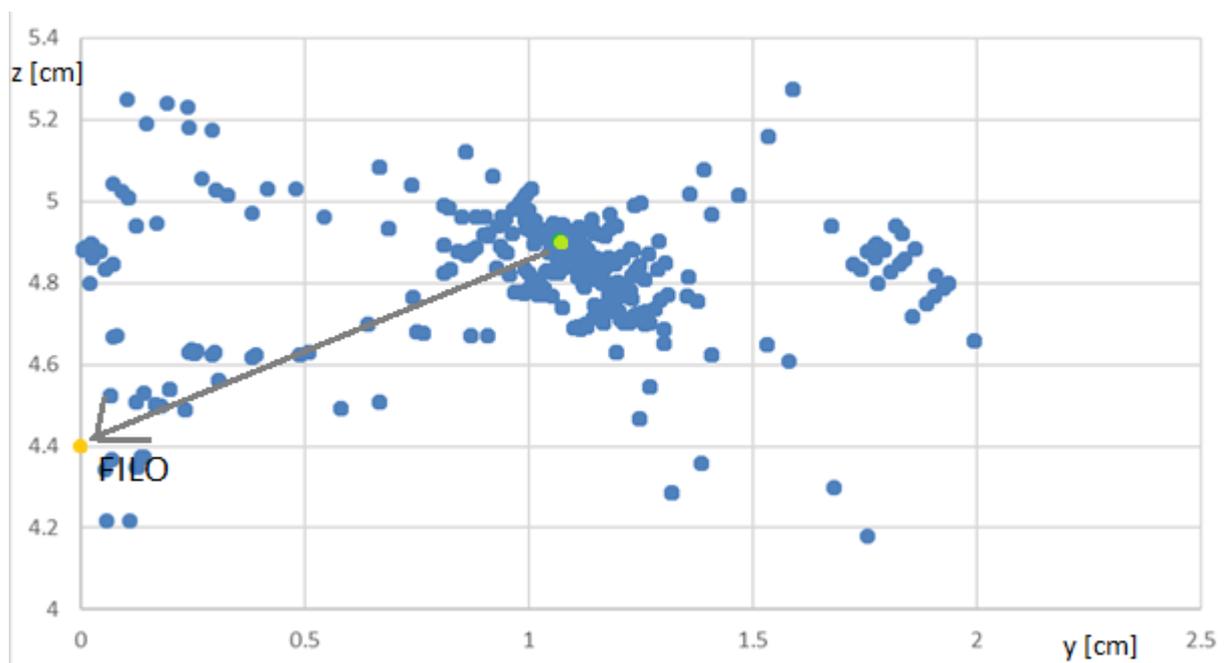


Figura 7 Il vettore rappresentato è la posizione del magnetometro rispetto al riferimento nel telefono (v. appendice)
 Il SdR utilizzato in questo grafico è quello fisso sul tavolo.

I risultati ottenuti sono i seguenti (nel SdR del telefono)

$$z_m = -0.4 \pm 0.1 \text{ cm} \text{ e } y_m = -1.1 \pm 0.3 \text{ cm}$$

Successivamente si è voluta calcolare l'inclinazione(α) del sistema di riferimento del magnetometro rispetto al SdR fisso, mediante relazioni trigonometriche tra gli angoli, sapendo che il vettore campo magnetico ha direzione perpendicolare alla congiungente tra il punto e il filo.

Durante i calcoli, valutando le componenti del campo e la direzione della corrente nel filo, si è notato che il sistema di riferimento del magnetometro è ruotato di 180° in senso antiorario attorno all'asse z. Si è verificato che gli assi del magnetometro sono paralleli a quelli del sistema fisso con un errore di circa 5 gradi.

$$\alpha = (0 \pm 5)^\circ$$

6. CONCLUSIONI

In primo luogo, si nota che il posizionamento dei due magnetometri nel telefono non è confrontabile in quanto sono stati utilizzati due modelli di telefono diversi.

Tuttavia, i risultati ottenuti sono confrontabili con quelli in letteratura, per migliorare la misura sarebbe opportuno servirsi di sistemi di ancoraggio in grado di far ruotare il telefono nello spazio in modo da eliminare due componenti del campo magnetico locale.

Appendice

Relazione lineare tra le variabili misurate e regressione lineare

Per operare una regressione lineare sulle variabili fisiche misurate è opportuno innanzitutto cercare una relazione lineare che le correla. Per l'esperienza in questione l'equazione (1) può essere riscritta, assumendo $y_0 = 0$, come

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

$$Y = B$$

$$C = \frac{\mu_0}{2\pi r}$$

$$X = I$$

anche in questo caso si giunge ad una relazione lineare del tipo $Y = A + CX$.

A e B rappresentano le costanti incognite le cui migliori stime sono quei valori per i quali è massima la probabilità $P_{A,B}(Y_1, \dots, Y_n)$, e assumendo che la misura delle y_i sia *normalmente distribuita* intorno ai valori attesi con parametro σ_Y , il cui significato non è altro che la distanza media dei punti dalla retta di interpolazione.

Nell'ipotesi che le incertezze su y siano tutte uguali e che quelle su x siano trascurabili è possibile applicare le seguenti relazioni, note anche come *metodo dei minimi quadrati*:

$$A = \frac{\sum X_i^2 \sum Y_i - \sum X_i \sum X_i Y_i}{\Delta}$$

$$C = \frac{N \sum X_i Y_i - \sum X_i \sum Y_i}{\Delta}$$

$$\Delta = N \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2$$

$$\sigma_Y^2 = \frac{1}{N-2} \sum_{i=1}^N (Y_i - A - CX_i)^2$$

$$\sigma_A^2 = \sigma_Y^2 \frac{\sum X_i^2}{\Delta}$$

$$\sigma_B^2 = \frac{N\sigma_Y^2}{\Delta}$$

Tabelle con i dati (SECONDA CONFIGURAZIONE)

set	y_c [cm]	err	z_c [cm]	err	corrente [A]	err	B_filo [μ T]	err	r [cm]	err
01	0	0,1	3,9	0,1	0,51	0,01	6,9	0,9	1,47	0,22
02	0	0,1	4,2	0,1	0,50	0,01	7,8	0,7	1,28	0,14
03	0	0,1	4,2	0,1	0,50	0,01	7,6	0,7	1,32	0,15
04	0,9	0,1	4,2	0,1	0,50	0,01	12,6	1,2	0,79	0,09
05	0	0,1	5,8	0,1	0,50	0,01	7,0	0,7	1,43	0,18
06	0,9	0,1	5,8	0,1	0,50	0,01	11,8	1,3	0,85	0,11
07	0	0,1	3,2	0,1	0,50	0,01	4,9	1,1	2,03	0,49
08	0,9	0,1	3,2	0,1	0,50	0,01	5,8	1,3	1,71	0,42
09	0,4	0,1	3,2	0,1	0,50	0,01	5,4	1,2	1,86	0,46
10	0	0,1	3,9	0,1	0,50	0,01	6,6	0,8	1,52	0,22
11	0,9	0,1	3,9	0,1	0,50	0,01	10,0	1,3	1,00	0,15
12	0,4	0,1	3,9	0,1	0,50	0,01	8,2	1,0	1,22	0,17
13	0	0,1	5,8	0,1	0,50	0,01	7,1	1,0	1,40	0,22
14	0,9	0,1	5,8	0,1	0,50	0,01	10,5	1,3	0,95	0,14
15	0,4	0,1	5,8	0,1	0,50	0,01	8,7	1,1	1,15	0,17
16	0	0,1	5,8	0,1	4,10	0,01	52,7	1,2	1,56	0,04
17	0,4	0,1	5,8	0,1	3,87	0,01	60,0	1,1	1,29	0,03
18	0,9	0,1	5,8	0,1	3,81	0,01	69,2	1,1	1,10	0,02
19	0	0,1	3,9	0,1	3,80	0,01	54,9	0,8	1,38	0,02
20	0,9	0,1	3,9	0,1	3,80	0,01	83,5	1,2	0,91	0,02
21	0,4	0,1	3,9	0,1	3,80	0,01	69,0	1,0	1,10	0,02
22	0	0,1	3,9	0,1	2,16	0,01	28,7	0,8	1,51	0,05
23	0,4	0,1	3,9	0,1	2,16	0,01	36,2	1,1	1,19	0,04
24	0,9	0,1	3,9	0,1	2,16	0,01	44,7	1,3	0,97	0,03
25	0	0,1	5,8	0,1	2,16	0,01	34,6	1,1	1,25	0,05
26	0,4	0,1	5,8	0,1	2,16	0,01	37,7	1,0	1,14	0,04
27	0,9	0,1	5,8	0,1	2,16	0,01	49,0	1,4	0,88	0,03