



**Università degli Studi di Padova**

---

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE  
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Elettrica

# IDENTIFICAZIONE DI POSIZIONE E DI ORIENTAMENTO DI MAGNETI PER APPLICAZIONI MEDICALI

**Relatore:** Prof. Piergiorgio Alotto

**Laureanda:** Tognetto Chiara



## Sommario

1 - Il Problema .....	1
1.1 - Il modello matematico .....	3
1.2 - Configurazione geometrica dei sensori .....	5
1.3 - Risultati numerici della simulazione .....	7
2 - Strumentazione .....	10
2.1 - Il magnete .....	11
2.2 - Lo strumento per la definizione della posizione .....	12
2.2.1 - Assi M-403 Precision Translation Stage .....	13
2.1.2 - C-663 Mercury Step Motor Controller .....	15
2.3 - La scheda di acquisizione dati: National Instruments .....	17
2.3.1 - LabVIEW .....	17
2.3.2 - NI myRIO .....	20
2.4 - I sensori .....	24
2.4.1 - 3-Axis Digital Compass IC HMC5883L .....	26
2.4.2 - L'I2C e il protocollo di comunicazione .....	33
2.5 - BeagleBone Black .....	35
3 - Misure .....	36
3.1 - Come eseguire la misura: COMPASS.VI .....	36
3.2 - Il controllo e la movimentazione degli assi .....	40
3.3 - Verifica dei sensori .....	43
3.4 - Misure con 9 sensori. ....	54
Caso 1: magnete posizionato sopra il sensore A posto a 50 [mm] da esso. ....	56
Caso 2 magnete posizionato sopra il sensore B posto a 50 [mm] da esso.....	57
Caso 3: magnete posizionato sopra il sensore C posto a 50 [mm] da esso.....	59
Caso 4: magnete posizionato sopra il sensore D posto a 50 [mm] da esso .....	60
Caso 5: magnete posizionato sopra il sensore E posto a 50 [mm] da esso.....	61
Caso 6: magnete posizionato sopra il sensore F posto a 50 [mm] da esso .....	62
Caso 7: magnete posizionato sopra il sensore G posto a 50 [mm] da esso .....	63
Caso 8: magnete posizionato sopra il sensore H posto a 50 [mm] da esso .....	64
Caso 9: magnete posizionato sopra il sensore I posto a 50 [mm] da esso.....	65
Caso 10: magnete posizionato sopra il sensore A posto a 10 [mm] da esso .....	66
Caso 11: magnete posizionato sopra il sensore B posto a 10 [mm] da esso.....	67
Caso 12: magnete posizionato sopra il sensore C posto a 10 [mm] da esso.....	68
Caso 13: magnete posizionato sopra il sensore D posto a 10 [mm] da esso .....	69
Caso 14: magnete posizionato sopra il sensore E posto a 10 [mm] da esso.....	70

Caso 15: magnete posizionato sopra il sensore F posto a 10 [mm] da esso .....	71
Caso 16: magnete posizionato sopra il sensore G posto a 10 [mm] da esso .....	72
Caso 17: magnete posizionato sopra il sensore H posto a 10 [mm] da esso .....	73
Caso 18: magnete posizionato sopra il sensore I posto a 10 [mm] da esso.....	74
5 - Conclusioni .....	75
Appendice.....	77
Appendice 1: codice per la valutazione preventiva del campo magnetico. ....	77
Appendice 2: codice per la valutazione del campo magnetico registrato dai 9 sensori e confronto con le misure raccolte:.....	80
Bibliografia.....	85

## 1 - Il Problema

L'individuazione della posizione attraverso lo studio del campo magnetico di un oggetto può avere una particolare applicazione in campo medico, in particolare nella cura delle fratture ossee mediante chiodi endomidollari.

Durante questa procedura (Figura 1), si inserisce un'asta di metallo appositamente progettata nel canale del midollo osseo. L'asta passa attraverso la frattura per tenerla in posizione. Un chiodo intramidollare viene quindi inserito alle estremità attraverso una piccola incisione e viene avvitato all'osso, in modo da mantenerlo nella corretta posizione durante la guarigione.

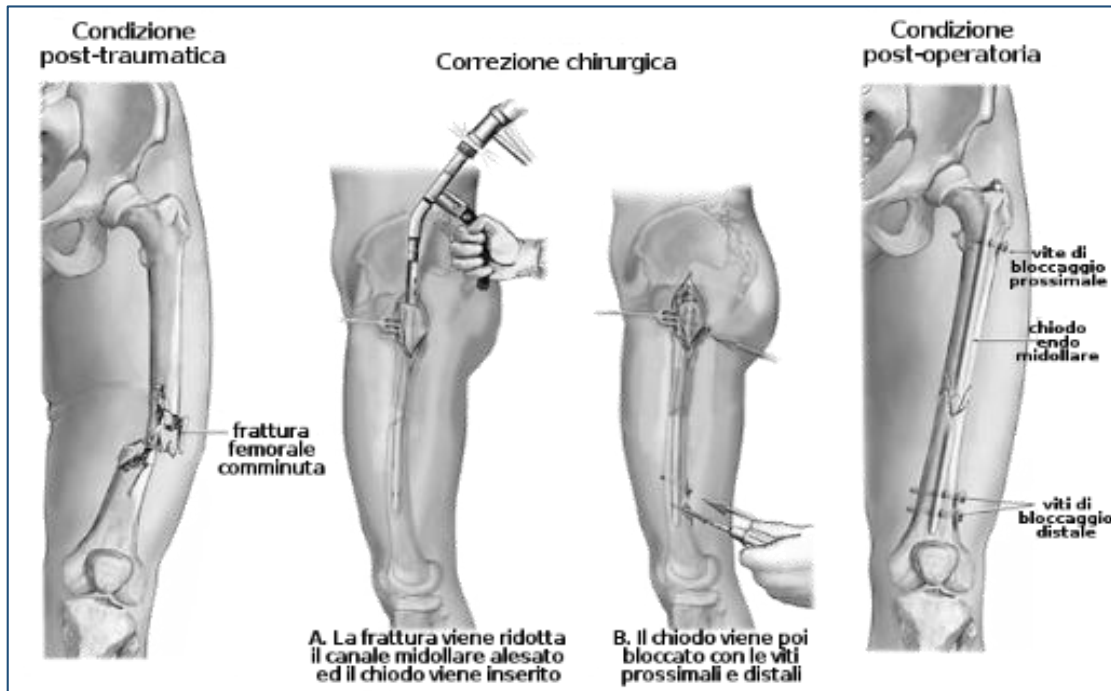


Figura 1 – Schema della procedura per la cura di una frattura diafisaria del femore

Attualmente l'individuazione della posizione e dell'orientamento dei fori su cui avvitare i chiodi è fatta tramite raggi X, e quindi comporta vari svantaggi.

Si propone quindi di studiare un metodo per ricercare la posizione di tali fori attraverso l'uso di un magnete permanente localizzato al loro interno (Figura 2) usando un dato numero di sensori che ne misurano il campo magnetico generato.



Figura 2 – Stelo di un chiodo endomidollare.

L'obiettivo sarà quello di verificare se, partendo dai risultati delle misure, eseguite in diverse posizioni (Figura 3), è possibile ricavare la posizione e l'orientamento del magnete, attraverso la soluzione di un problema inverso. Questo sistema risulterebbe molto più economico e più veloce rispetto all'uso di raggi X, senza considerare l'effetto positivo della riduzione delle radiazioni a cui sono soggetti sia i pazienti che i medici.

Il primo obiettivo sarà di verificare se attraverso una data configurazione di sensori che rilevano il campo magnetico è possibile ricavare la posizione e l'orientamento di un magnete con un errore accettabile.

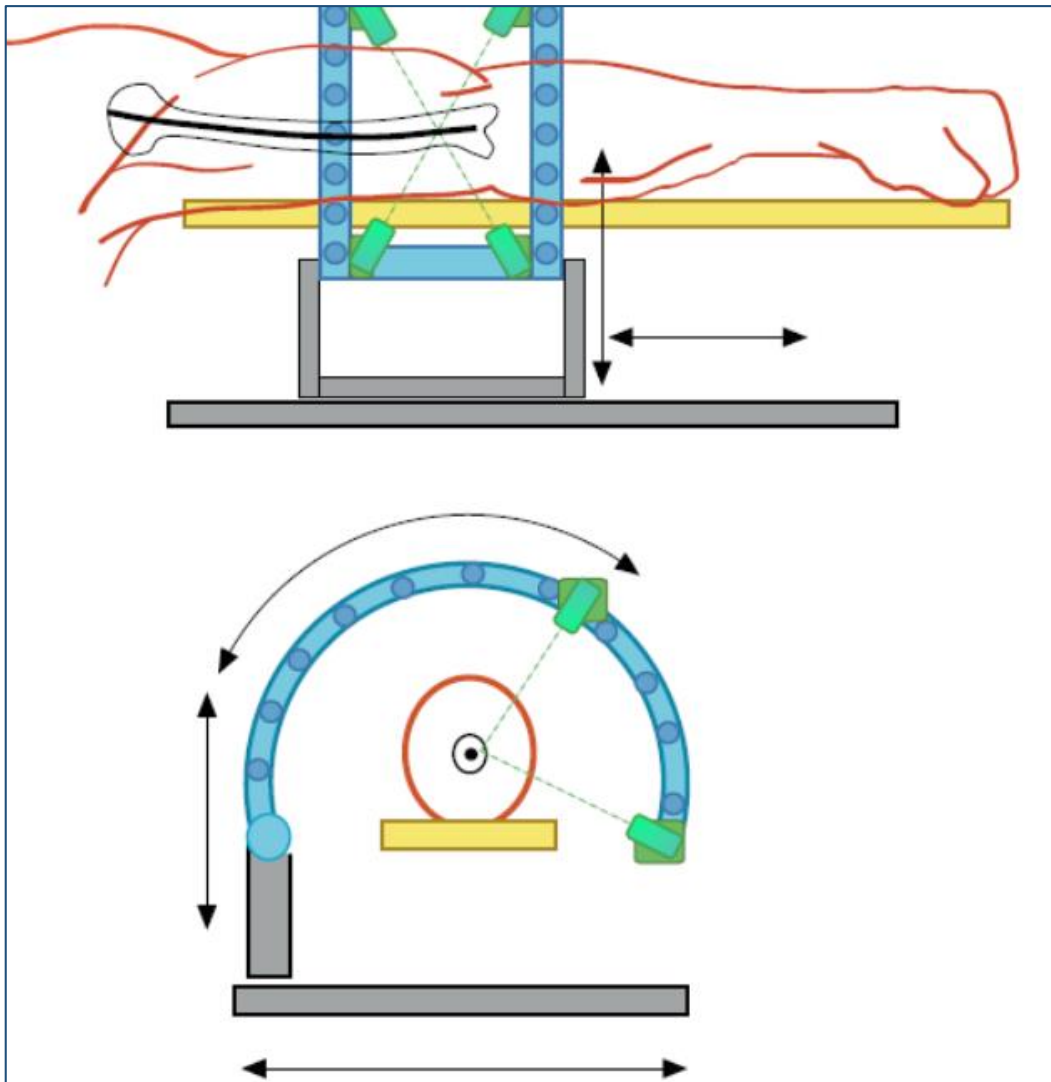


Figura 3 – Configurazione del magnete per la determinazione della posizione

## 1.1 - Il modello matematico

La ricostruzione della posizione e dell'orientamento del foro partendo dalle misure del campo magnetico è, come già detto, un problema inverso che si risolve attraverso un algoritmo di ottimizzazione che si basa sul seguente modello matematico. In particolare in seguito viene descritto il modello usato nel calcolo del campo magnetico prodotto dal magnete permanente che viene usato dalla funzione di minimizzazione nel processo di ottimizzazione. Questo calcola le componenti assiali e trasversali dell'intensità del campo magnetico di anelli di correnti e di solenoidi [1].

Per prima cosa si consideri un anello di corrente planare di forma qualunque (Figura 4).

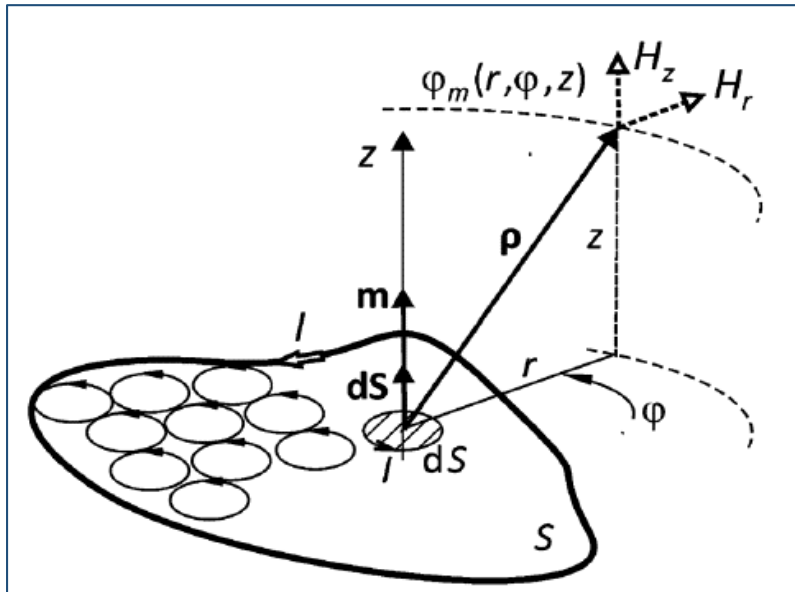


Figura 4 – Anello di corrente planare

Per la definizione del problema si usa un potenziale magnetico scalare  $\varphi_m$ , in modo da poter calcolare le componenti del campo magnetico:

$$\mathbf{H} = -\nabla\varphi_m \quad (1.1)$$

Le espressioni delle componenti dell'intensità del campo magnetico ( $H_x$ ,  $H_y$ ,  $H_z$ ) in coordinate cartesiane possono essere scritte come:

$$H_x = -\frac{\partial\varphi_m}{\partial x}, H_y = -\frac{\partial\varphi_m}{\partial y}, H_z = -\frac{\partial\varphi_m}{\partial z} \quad (1.2)$$

Allo stesso modo si possono ricavare espressioni simili che descrivono le componenti radiali e assiali in un sistema di coordinate cilindriche. In questo caso, se il problema è a simmetria cilindrica (come accade nel nostro caso visto che il magnete permanente è un cilindro) la componente tangenziale sarà nulla e si avrà:

$$H_r = -\frac{\partial\varphi_m}{\partial r}, H_\varphi = 0, H_z = -\frac{\partial\varphi_m}{\partial z} \quad (1.3)$$

Considerando che il potenziale scalare di un campo magnetico generato da un anello di corrente elementare in un punto definito dal raggio vettore è  $\rho$ , vale:

$$\varphi_{mdip}(\rho) = \frac{m\rho}{4\pi\rho^3} + cost \quad (1.4)$$

Dove  $\mathbf{m} = I \cdot d\mathbf{S}$  è il momento del bipolo magnetico.

Il potenziale scalare di un bipolo magnetico orientato lungo l'asse  $z$  è:

$$\varphi_{mdip} = \frac{1}{4\pi} \frac{z}{(r^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} (IdS) + cost \quad (1.5)$$

Attraverso una superficie di integrazione si può considerare anche i potenziali di tutti i dipoli presenti nell'area dei influenza dell'anello e calcolare:

$$\varphi_{loop}(x, y, z) = \frac{1}{4\pi\pi} \iint_S \frac{z}{(r^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} (IdS) \quad (1.6)$$

Considerando il caso di un anello di corrente circolare e un solenoide circolare come quelli presentati in Figura 5 e in Figura 6

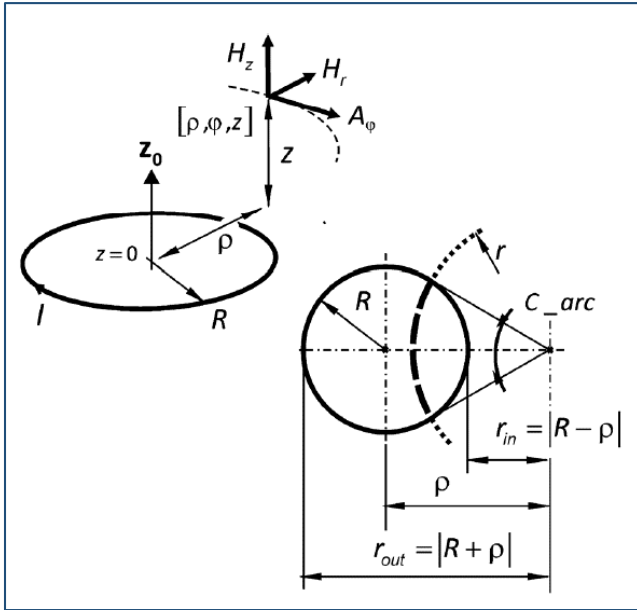


Figura 5 - Anello di corrente circolare

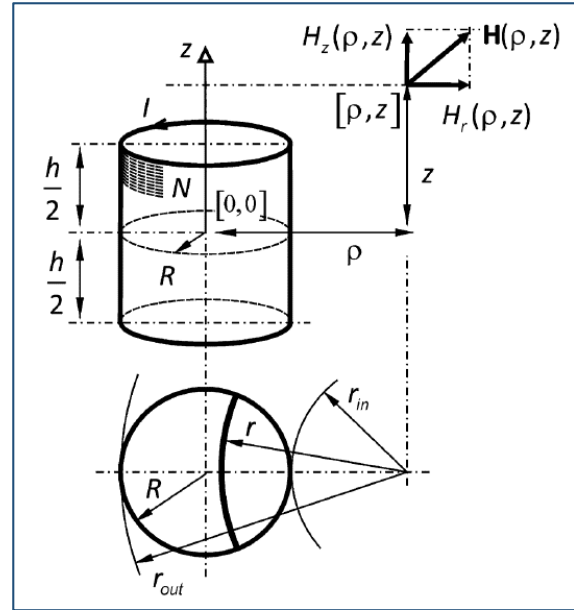


Figura 6 - Solenoide circolare

Si vuole, quindi, calcolare il campo magnetico usando un metodo basato su integrali ellittici per anelli circolari e solenoidi. Questo metodo prevede la risoluzione delle equazioni che descrivono il potenziale vettore in un sistema a coordinate cilindriche. Il potenziale vettore dell'anello circolare di corrente è:

$$A_\varphi(R, I, \rho, z) = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{R \cos(\varphi)}{\sqrt{R^2 + \rho^2 - 2R \cos(\varphi) + z^2}} d\varphi \quad (1.7)$$

Mentre il potenziale vettore di un solenoide circolare è:

$$A_\varphi(R, h, I, \rho, z) = \frac{NI}{4\pi h} \int_{-h/2}^{h/2} \int_0^{2\pi} \frac{R \cos(\varphi)}{\sqrt{R^2 + \rho^2 - 2R \cos(\varphi) + (z + \xi)^2}} d\varphi \quad (1.8)$$

Le componenti assiale e radiale dell'intensità del campo magnetico sono date dalle rispettive derivate del potenziale vettore:

$$H_r = -\frac{\partial A_\varphi}{\partial z}; \quad H_z = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho A_\varphi}{\partial \rho} \quad (1.9)$$

Essendo le equazioni (1.7), (1.8) e (1.9) non adatte a una diretta quantificazione numerica si deve introdurre la definizione generale di integrale ellittico che è valida anche per i seguenti passi:

$$cel(k_c, p, a, b) = \int_0^{2\pi} \frac{a \cos^2(\varphi) + b \sin^2(\varphi)}{\cos^2(\varphi) + p \sin^2(\varphi)} \cdot \frac{1}{\sqrt{\cos^2(\varphi) + k_c^2 \sin^2(\varphi)}} d\varphi \quad (1.10)$$

Dove il parametro  $k_c$  indica il modulo complementare dell'integrale ellittico.



Infine si può scrivere l'algoritmo da implementare per la ricerca della componente assiale  $H_z$  del campo magnetico di un solenoide circolare, che si adatta maggiormente a una quantizzazione numerica.

$$H_z(R, N, I, h, \rho, z) = \frac{NI}{h} \cdot \frac{1}{2\pi} \left[ Aux1\left(-\frac{h}{2}\right) - Aux1\left(\frac{h}{2}\right) \right]$$

$$Aux1(\xi) \begin{cases} \frac{z - \xi}{R + \rho} \cdot \sqrt{\frac{R}{\rho}} k \cdot cel\left(k_c, \left(\frac{R - \rho}{R + \rho}\right)^2, 1, \frac{R - \rho}{R + \rho}\right) & \text{if } \rho \neq 0 \\ \frac{\pi(z - \xi)}{\sqrt{R^2 + (z - \xi)^2}} & \text{if } \rho = 0 \end{cases} \quad (1.11)$$

Per il calcolo della componente radiale  $H_r$  viene implementato il seguente algoritmo:

$$H_r(R, N, I, h, \rho, z) = \frac{NI}{h} \cdot \frac{1}{2\pi} \left[ Aux2\left(-\frac{h}{2}\right) - Aux2\left(\frac{h}{2}\right) \right]$$

$$Aux2(\xi) \begin{cases} \frac{R}{\rho} k \cdot cel(k_c, 1, 1, -1) & \text{if } \rho \neq 0 \\ 0 & \text{if } \rho = 0 \end{cases} \quad (1.12)$$

Infine, per entrambe le componenti vale:

$$k = \sqrt{\frac{4R\rho}{(R + \rho)^2 + (z - \xi)^2}} ; \quad k_c = \sqrt{1 - k^2} \quad (1.13)$$

## 1.2 - Configurazione geometrica dei sensori

Poiché lo scopo è la determinazione della posizione e l'inclinazione di un magnete cilindrico attraverso le misure raccolte da una serie di sensori, la configurazione di tali sensori è uno dei principali problemi da trattare.

Durante una prima fase analitica vengono considerate due tipologie di configurazioni, una planare, in cui i sensori sono posizionati in un piano a formare una maglia e chiamando  $d$  la distanza tra il piano e il baricentro del cilindro (Figura 7), in questo caso i sensori possono essere posti solo sopra o sotto il magnete. L'alternativa è una configurazione circolare, dove i sensori sono posti in una circonferenza definita da un raggio  $r$  (Figura 8), posta attorno al magnete come se fossero un braccialeto.

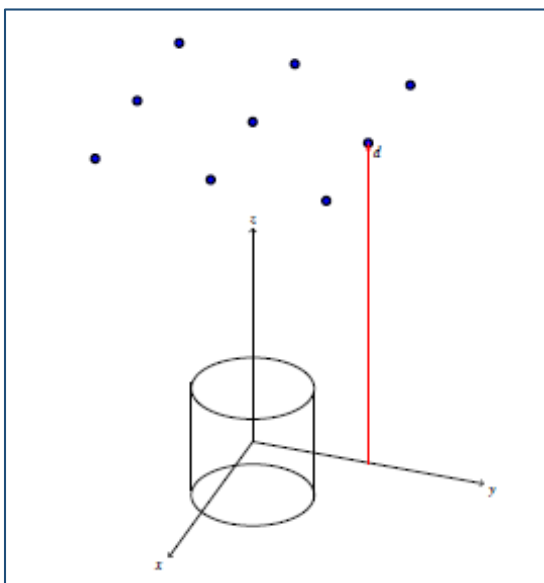


Figura 7 - Cilindro e sensori piani

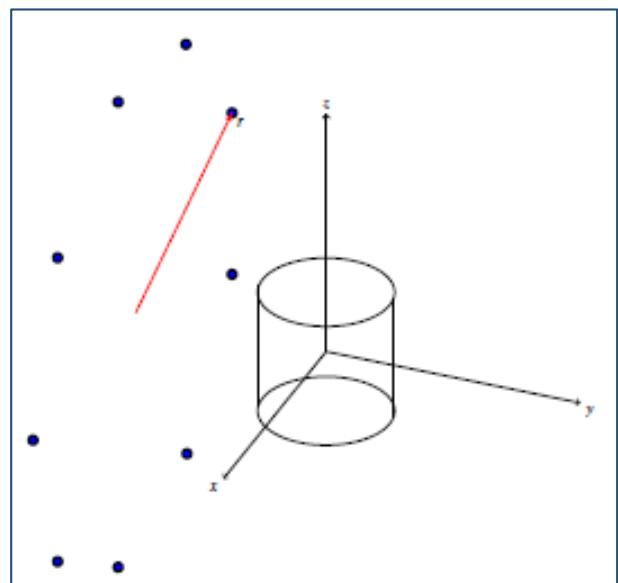


Figura 8 - Cilindro e sensori circolari

Fissate le due configurazioni si nota come le uniche variabili siano la distanza  $d$  (o il raggio  $r$ ) e il numero di sensori da utilizzare. Si vogliono confrontare le due geometrie per ricavare la configurazione più efficiente.

Il problema maggiore da considerare è la robustezza della geometria, infatti ogni misura sarà affetta da un rumore che causa errori nella localizzazione del magnete, in modo proporzionale alla geometria. Questo aspetto è fondamentale perché senza considerarlo tutte le configurazioni studiate ci permettono di ricavare la posizione del magnete e, quindi, non si è in grado di determinare quale sia quella ottimale.

Per questa ragione, ad ogni misura ideale fornita dai sensori studiata nelle sue componenti lungo gli assi cartesiani  $(B_{x,id}, B_{y,id}, B_{z,id})$  viene introdotto un rumore in media pari al 5% della misura ideale. Ne consegue che le misure reali  $(B_x, B_y, B_z)$  devono essere considerate, nell'algoritmo, nel seguente modo:

$$\begin{cases} B_x = B_{x,id} + 2(rand - 0.5) \cdot 0.005B_{x,id} \\ B_y = B_{y,id} + 2(rand - 0.5) \cdot 0.005B_{y,id} \\ B_z = B_{z,id} + 2(rand - 0.5) \cdot 0.005B_{z,id} \end{cases} \quad (1.14)$$

Dove  $rand$  è una funzione che restituisce un numero casuale tra 0 e 1.

Data l'introduzione di una componente casuale nelle misure, ogni esecuzione del processo di risoluzione fornirà come risultato una differente valutazione della posizione del magnete. Il processo va quindi ripetuto dieci volte e poi viene considerato come errore la media degli errori.

La posizione del magnete permanente viene descritta nello spazio cartesiano attraverso le coordinate del baricentro  $(x_b, y_b, z_b)$ , mentre la sua rotazione attorno agli assi  $x, y, z$  viene definita rispettivamente dagli angoli di rotazione  $\alpha, \beta$ , e  $\gamma$ , come mostrato in Figura 9. Essendo il magnete considerato un cilindro, la rotazione lungo l'asse  $z$  non è necessaria per la determinazione della posizione, quindi la si può ignorare e le coordinate che identificano il baricentro sono quindi solo cinque  $(x_b; y_b; z_b; \alpha; \beta)$

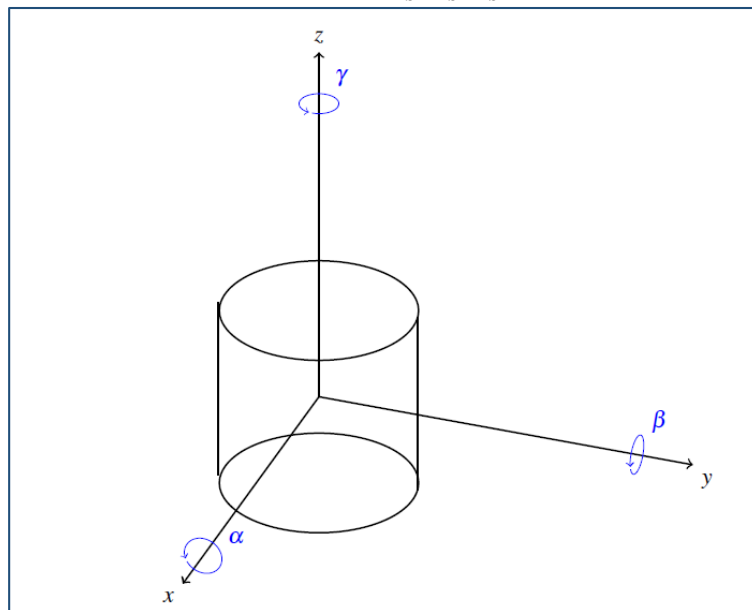


Figura 9 – Rotazioni cilindriche

Per adesso consideriamo la Figura 9 come riferimento, considerando che per essa gli angoli di rotazione  $\alpha, \beta$  siano nulli.

Infine si deve descrivere l'errore  $\epsilon$ , come indice della robustezza della configurazione, e la procedura per ricavarlo. Si considera, inoltre, la posizione del cilindro, che è determinata dalle variabili  $x_b; y_b; z_b; \alpha; \beta$ , e si considerino i seguenti range di variazione degli angoli di rotazione lungo  $x$  e  $y$ :  $\alpha \in [-20^\circ; 20^\circ]$ ;  $\beta \in [-180^\circ; 180^\circ]$ .

A questo punto usando il modello matematico presentato prima (nella sezione 1.1), si può calcolare il campo magnetico negli  $n$  sensori, definendo le  $n$  misure ideali ( $B_{x,id}^i; B_{y,id}^i; B_{z,id}^i$ ) per ogni sensori  $i$ . Dopodiché si trasformano tali misure ideali in reali attraverso la formula espressa nell'equazione 1.14.

Le misure reali ottenute in questo modo ( $B_x^i; B_y^i; B_z^i$ ) sono quelle che verranno usate come input per l'algoritmo di ottimizzazione che ricerca quale posizione del magnete produce un campo magnetico comparabile con quello misurato. Infine il risultato sarà espresso come la locazione del cilindro data da determinati valori per ognuna delle variabili ( $x_c; y_c; z_c; \alpha; \beta$ ) che definiscono il baricentro e le inclinazioni.

La prima indicazione dello spostamento del calcolo magnetico dal modello ideale è il fatto che la distanza euclidea  $\varepsilon_1$  tra i due baricentri calcolati non è nulla ma vale;

$$\varepsilon_1 = \sqrt{(x_b - x_c)^2 + (y_b - y_c)^2 + (z_b - z_c)^2} \quad (1.15)$$

In ogni caso tale distanza  $\varepsilon_1$  non tiene conto dell'inclinazione del magnete, che è cruciale e che dipende dagli angoli  $\alpha$  e  $\beta$ . Perciò si considera anche la distanza tra i centri delle due facce superiori del cilindro calcolato e di quello ideale. Questo valore è chiamato  $\varepsilon_2$  è funzione dei due angoli di rotazione.

A questo punto si può definire un unico indicatore della robustezza della configurazione e dell'accuratezza della localizzazione, dato dalla media delle due distanze:

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} \quad (1.16)$$

Ovviamente maggiore è il rumore introdotto nelle misure, maggiore è l'errore  $\varepsilon$ , quindi per poter confrontare tra di loro le varie configurazioni si deve introdurre un rumore con la stessa media, pari al 5%.

### 1.3 - Risultati numerici della simulazione

Come si è già introdotto nella sezione riguardante il modello matematico (1.1), la componente radiale e quella  $z$  del campo magnetico sono:

$$\begin{cases} B_z = \frac{J}{2\pi} \left( aux1 \left( \frac{-h}{2}, r_1, r, z \right) - aux1 \left( \frac{h}{2}, r_1, r, z \right) \right) \\ B_r = \frac{J}{2\pi} \left( aux2 \left( \frac{-h}{2}, r_1, r, z \right) - aux2 \left( \frac{h}{2}, r_1, r, z \right) \right) \end{cases} \quad (1.17)$$

Dove le funzioni  $aux1$  e  $aux2$  sono definite nelle equazione (1.11) e (1.12),  $J$  è la magnetizzazione del magnete,  $r_1$  il suo raggio e  $h$  la sua latezza.

Per la simulazione si considera un valore medio del rumore casuale sempre del 5% e un magnete permanente con le seguenti caratteristiche:

$$\begin{cases} J = 1 [T] \\ r_1 = 5 [mm] \\ h = 10 [mm] \end{cases} \quad (1.18)$$

Nella configurazione planare i sensori sono posti a formare un quadrato di lato 5[cm], perciò le posizioni perimetrali non cambiano e aumentando il numero di sensori si aumenta la densità della mesh.

Il primo risultato numerico considera l'errore medio come funzione della distanza nella configurazione planare e del raggio in quella circolare.

Durante la simulazione si è mantenuta costante la posizione del magnete permanente e il numero dei sensori fisso a quattro, ciò che viene modificato sono la distanza  $d$  o il raggio  $r$ , considerando che i loro limiti inferiori fisici sono rispettivamente di 4 e 5 [cm]. In ogni caso per ogni valore di  $d$  o  $r$  il processo di risoluzione viene eseguito dieci volte, a causa della natura casuale del rumore introdotto. Il valore medio dell'errore durante le dieci simulazioni viene presentato nelle Figura 10 e Figura 11:

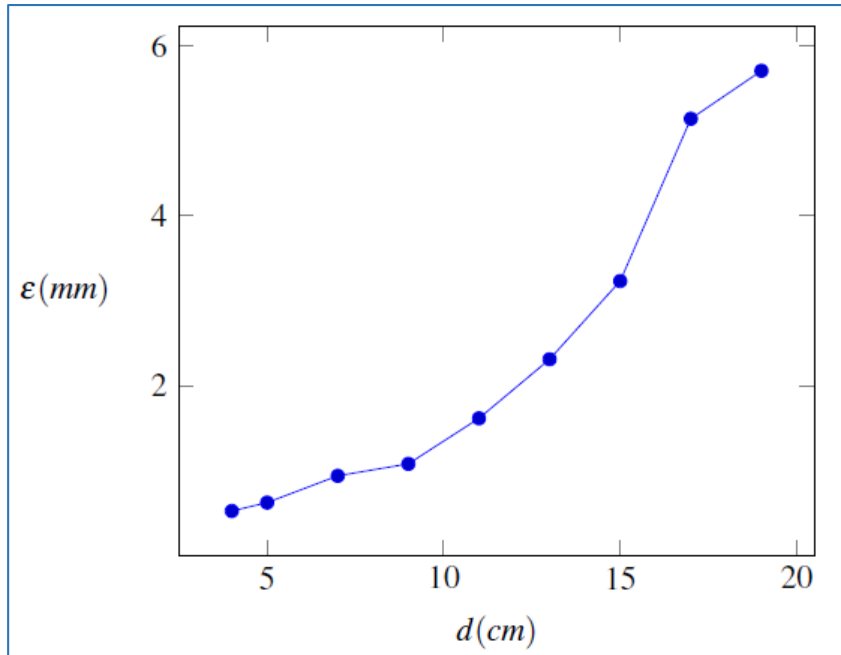


Figura 10 - l'errore espresso in funzione della distanza nella configurazione planare

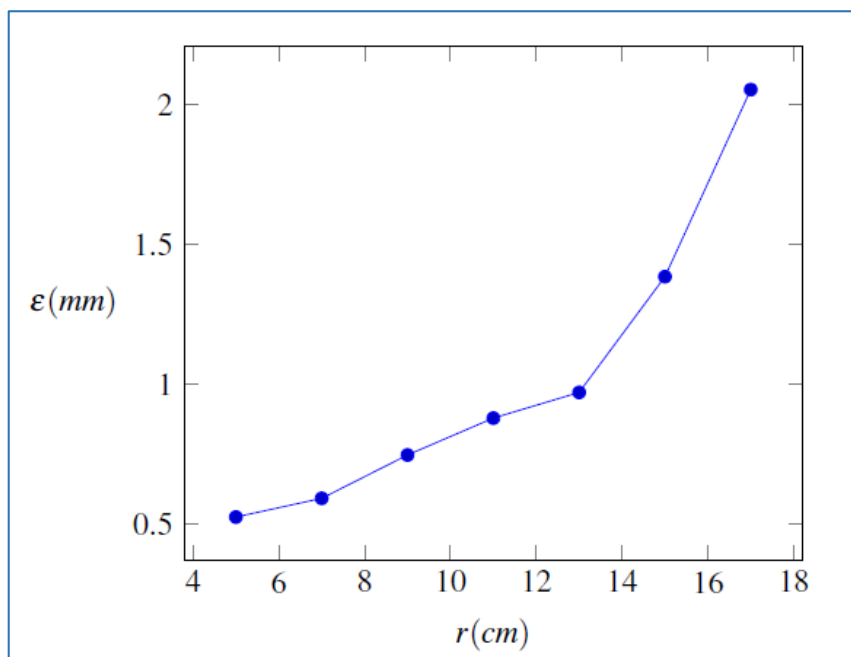


Figura 11 - l'Errore espresso in funzione del raggio nella configurazione circolare

Come ci si può aspettare l'accuratezza diminuisce all'aumentare della distanza o del raggio, imponendo una riduzione dei limiti inferiori di tali valori.

Durante la simulazione si varia il numero di sensori in modo da ricercare la configurazione più robusta.

Viene quindi eseguito l'algoritmo di ottimizzazione, impostato in modo tale da interrompersi quando un dato numero di funzioni posto a 3000 non ottiene miglioramenti.

Con tale algoritmo si cerca di minimizzare la seguente funzione:

$$\min \frac{\sum_{i=1}^n |B_{m,i} - B_{c,i}|}{n} \quad (1.19)$$

Dove per ogni sensore  $i$  si calcola la differenza tra il campo magnetico misurato  $B_{m,i}$  (ottenute attraverso l'introduzione del rumore e non attraverso delle vere misure in questa fase) e il campo magnetico  $B_{c,i}$  calcolato attraverso l'algoritmo note le variabili  $[x,y,z,\alpha,\beta]$ . Infine si divide la somma di tali differenze per il numero di sensori  $n$ , in modo da ottenere un valore medio.

Alla fine di tale simulazioni si ottiene un andamento dell'errore in funzione del numero dei sensori del tipo illustrato in Figura 12 per entrambe le configurazioni (planare e circolare):

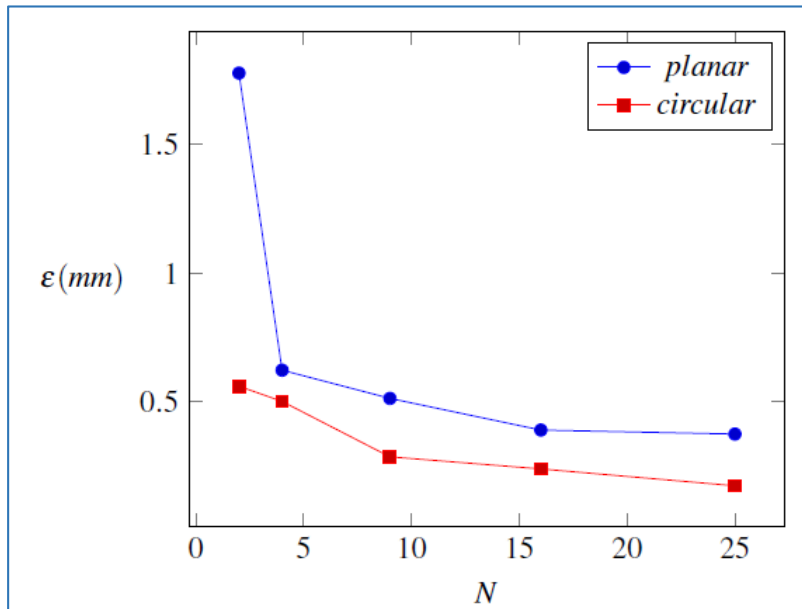


Figura 12 - Andamento dell'errore nelle due configurazioni all'aumentare del numero di sensori.

In Figura 13 si può invece osservare la percentuale di successo nella determinazione della posizione.

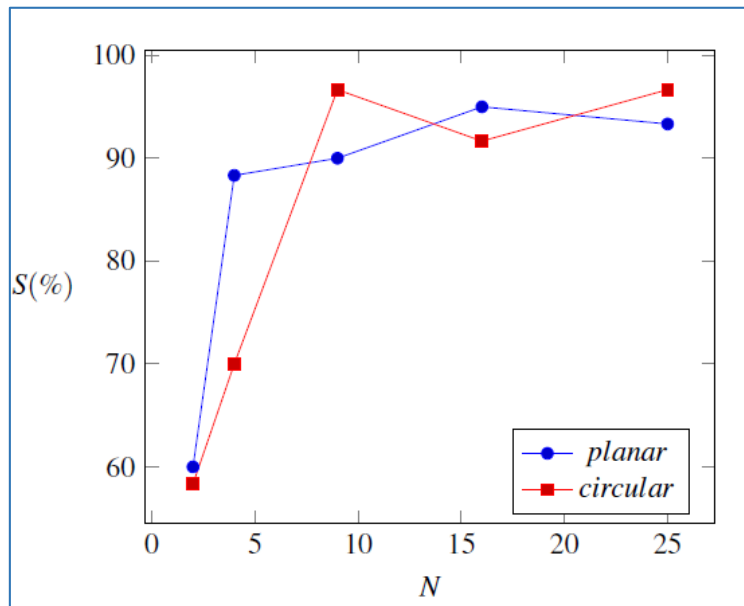


Figura 13 - Percentuale di successo nell'individuazione della posizione del magnete

Da tali grafici si nota come in entrambe le configurazioni le probabilità di successo sono maggiori del 90% se si usano almeno nove sensori e nessuna delle due configurazioni sembra prevalere sull'altra.

Lo **scopo** di questa tesi sarà di verificare quanto ricavato utilizzando i dati raccolti attraverso misurazioni reali e non ottenute dall'algoritmo introducendo il rumore.

## 2 - Strumentazione

Le prove sono state eseguite nell'ambiente rappresentato in Figura 14 dove si possono individuare:

1. Il magnete
2. Lo strumento per la definizione della posizione
3. La scheda di acquisizione dati
4. I sensori.

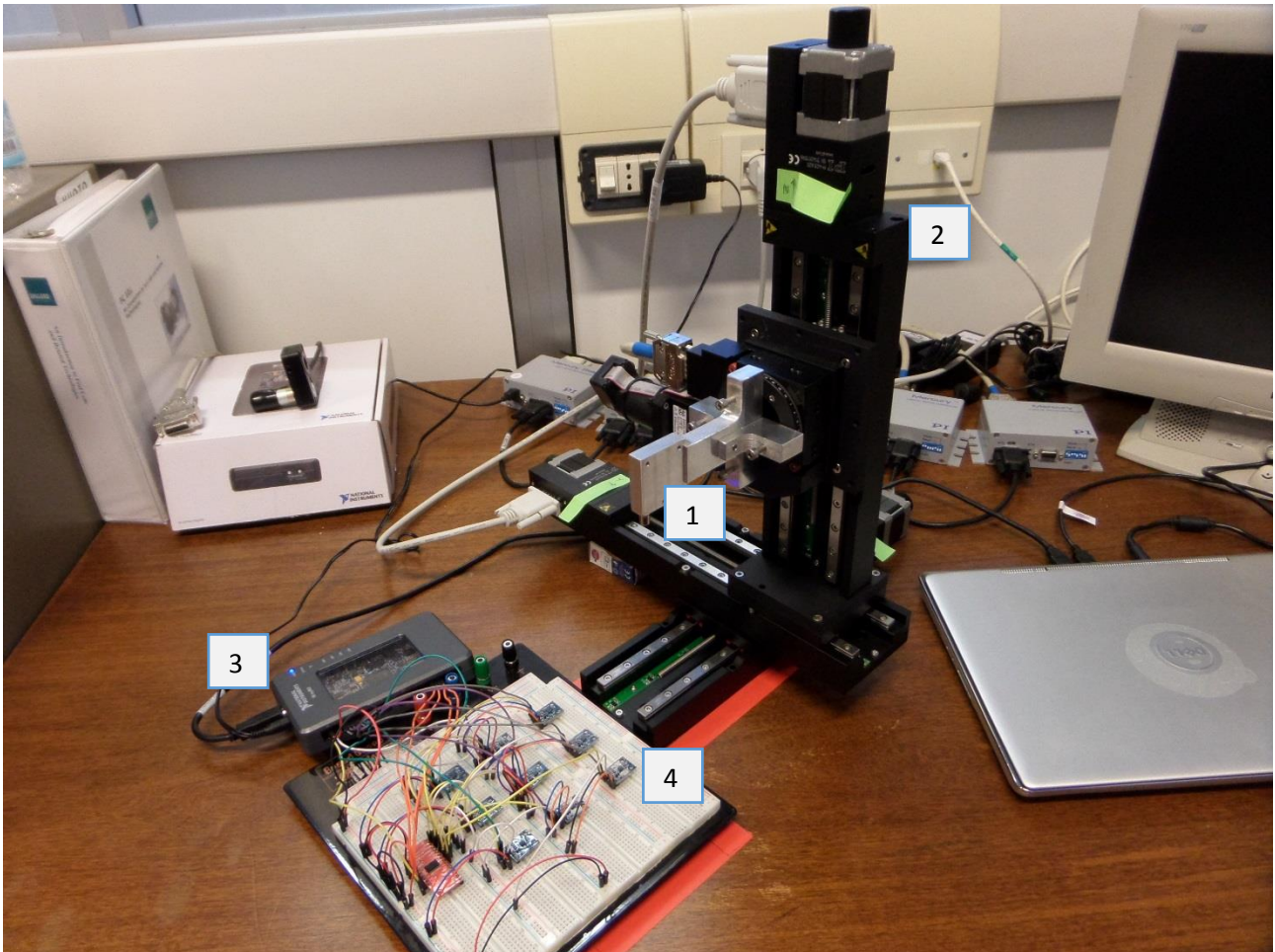


Figura 14 - Strumentazione

Inoltre per una verifica del corretto funzionamento dei sensori si è utilizzato anche i BeagleBone Black riportato in Figura 15.

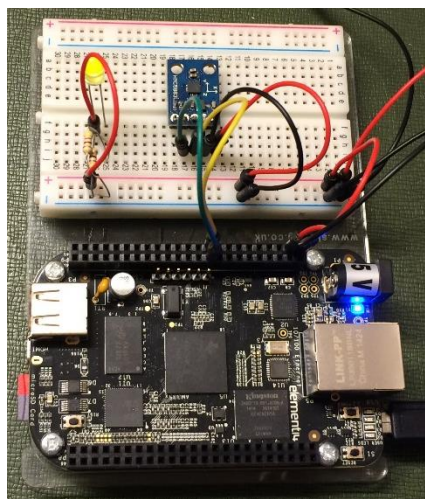


Figura 15 - BeagleBone Black

## 2.1 - Il magnete

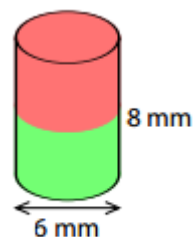
Come magnete si utilizza un magnete al neodimio (Figura 16) le cui caratteristiche sono descritte in Tabella 1 [2]:

<b>Forma</b>	Cilindro	
<b>Diametro</b>	6 mm	
<b>Altezza</b>	8 mm	
<b>Tolleranza per le dimensioni</b>	+/- 0,1 mm	
<b>Direzione di magnetizzazione</b>	Assiale (parallela all'altezza)	
<b>Materiale</b>	NdFeB (Neodimio-Ferro-Boro)	
<b>Tipo di rivestimento</b>	Nichel (Ni-Cu-Ni)	
<b>Forza di attrazione</b>	ca. 1,3 kg	ca. 12,7 N
<b>Peso</b>	1,7191 g	
<b>Modo di produzione</b>	Sinterizzato	
<b>Magnetizzazione (Qualità)</b>	N48 (B=1,37÷1,42 [T])	
<b>Temperatura massima di esercizio</b>	80°C	
<b>Temperatura di Curie</b>	310 °C	
<b>Rimanenza Br</b>	13700-14200 G	1.37-1.42 T
<b>Forza coercitiva bHc</b>	10.8-12.5 kOe	860-995 kA/m
<b>Forza coercitiva iHc</b>	≥12 kOe	≥955 kA/m
<b>Prodotto di energia (BxH)max</b>	45-48 MGOe	358-382 kJ/m <sup>3</sup>

Tabella 1 - Caratteristiche magnete



Figura 16 - Il Magnete



Tale magnete viene installato con sul sistema di posizionamento grazie a un supporto amagnetico in alluminio con il polo nord diretto verso l'alto, concorde con l'asse z.

## 2.2 - Lo strumento per la definizione della posizione

Physik Instrumente (PI) è un'azienda tedesca leader nel campo della precisione della posizione con un'accuratezza del nanometro.

La strumentazione della PI usata per questa tesi è presentata in Figura 17.

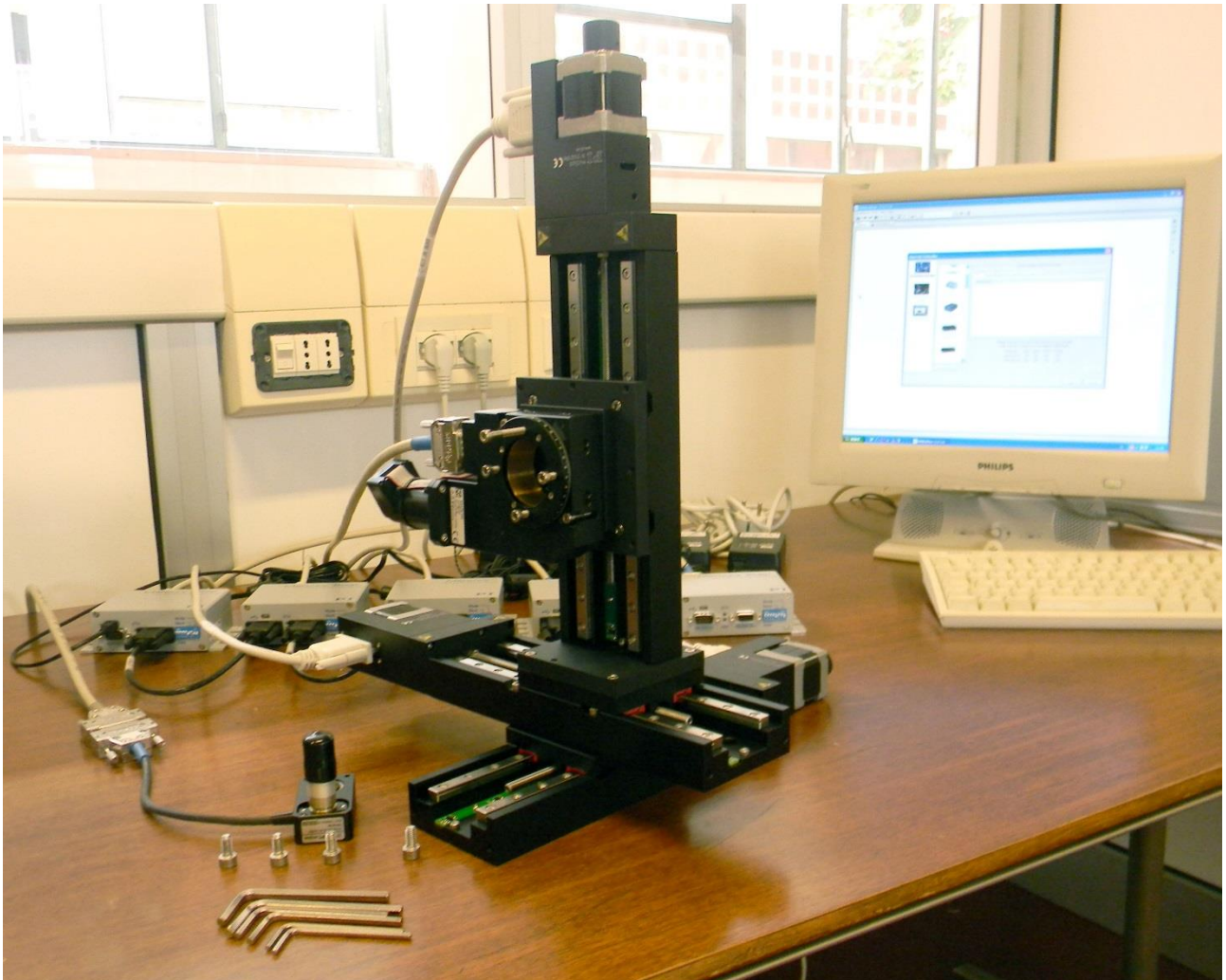


Figura 17 - Controllo 5 Assi

Esso comprende:

- PI: M – 403 Precision Translation Stage
- PI: Mercury Step Motor Controller C - 663



### 2.2.1 - Assi M-403 Precision Translation Stage

L'M-403 è il dispositivo mostrato in Figura 18 e garantisce una traslazione a stadi di precisione lungo gli assi x, y, z.



Figura 18 - M-403

Nel caso usato il range di spostamento va da 0 a 150 [mm] con un incremento minimo di 0,2 [ $\mu\text{m}$ ]. Il movimento viene eseguito da una vite-senza-fine in piombo, mentre la base è fatta in alluminio per un migliore assorbimento dello stress e quindi una maggiore stabilità.

Ulteriori specifiche sono presentate in Tabella 2 [3]

	M-403.62S	Unità di misura	Tolleranza
	Con motore a step		
<b>Motion and positioning</b>			
Travel range.	25 / 50 / 100 / 150 / 200	mm	
Digital Resolution	0.16	$\mu\text{m}$	Typ
Min. incremental motion	0.2	$\mu\text{m}$	Typ
Backlash	6	$\mu\text{m}$	Typ
Unidirectional Repeatability	1	$\mu\text{m}$	Typ
Pitch	200	$\mu\text{rad}$	Typ. Oltre i 100 mm
yaw	200	$\mu\text{rad}$	Typ. Oltre i 100 mm
Velocity	3	mm/s	max.
Reference point switch repeatability			
<b>Mechanical properties</b>			
Thread pitch	1	mm/rev	
Motor resolution	6400	Step/rev	
Stiffness in motion direction	3500	N/ $\mu\text{m}$	$\pm 20\%$
	200	N	max.
Push/pull force	50	N	max.
Lateral force	100	N	max.
<b>Drive Properties</b>			
Drive type	2-phase stepper motor		
Operating voltage	24	V	
Motor power	4.8	W	Nominale

<b>Miscellaneous</b>			
Operating temperature range	-20 to 65	°C	
Material	Al (black anodized)		
Mass	1.7 / 1.8 / 2.1 / 2.2 / 2.5	kg	±5 %
Cable length	3	m	±10 mm
Connector	Sub-D 15 (m)		
Recommended controller / driver	C-663 (single-axis)		

Tabella 2 - Caratteristiche M-403.62S

### 2.1.2 - C-663 Mercury Step Motor Controller

Il C-663 Mercury Step è il controllore del motore passo-passo degli assi mostrato in Figura 19. Esso è collegabile sia attraverso USB che attraverso RS232, caratterizzato da un encoder con input ad alta velocità che arrivano a 20 [MHz], dalla possibilità di programmare macro per funzionalità stand-alone e di registrare dati, il tutto conservabile in un EEPROM non volatili.



Figura 19 - C-663 Mercury Step Motor Controller

Le caratteristiche più dettagliate sono presentate in Tabella 3 [4]

<b>C-663.11</b>	
Function	Stepper motor controller, stand-alone capability
Drive type	2-phase stepper motor
Channels	1
<b>Motion and control</b>	
Trajectory profile modes	Trapezoidal, point-to-point
Microstep resolution	1/16 full step
Limit switches	2 × TTL, programmable
Reference point switch	1 × TTL, programmable
Motor brake	1 × TTL, programmable
<b>Electrical properties</b>	
Operating voltage	15 to 30 V
Current limitation per motor phase	1000 mA
<b>Interface and operation</b>	
Communication interfaces	USB, RS-232 (bus architecture)
Motor connector	Sub-D 15 (f)
Controller network	Up to 16 units* on single interface
I/O ports	4 analog / digital in, 4 digital out
Command set	PI General Command Set (GCS)
User software	PIMikroMove
Software drivers	LabVIEW drivers
Supported functionality	Start-up macro, data recorder for recording parameters as motor input voltage, velocity, position or position error
Manual control	Joystick, Y-cable for 2D motion, pushbutton box

<b>Miscellaneous</b>	
Operating temperature range	5 to 50 °C
Mass	0.3 kg
Dimensions	130 mm × 76 mm × 40 mm

*Tabella 3 – Caratteristiche del C-663 Mercury Step Motor Controller*

## 2.3 - La scheda di acquisizione dati: National Instruments

National Instruments è un'azienda statunitense produttrice di strumenti hardware e software per la misura e l'automazione industriale basati su personal computer. Fondata nel 1976, ha sede ad Austin nel Texas, ma è presente in molti paesi del mondo; in Italia ha sede centrale a Milano e una filiale a Roma. [5]

NI è conosciuta principalmente per aver ideato l'ambiente di sviluppo integrato per il linguaggio di programmazione visuale LabVIEW (**L**aboratory **V**irtual **I**nstrumentation **E**ngineering **W**orkbench) usato per programmi di acquisizione e analisi dati, controllo di processi, generazione di rapporti, o più generalmente per tutto ciò che concerne l'automazione industriale.

### 2.3.1 - LabVIEW

Il linguaggio di programmazione usato in LabVIEW si distingue dai linguaggi tradizionali perché la sua sintassi non è scritta ma grafica, e per questa ragione viene chiamato G-Language (Graphic Language).

Poiché gli strumenti di LabVIEW imitano l'aspetto e il funzionamento degli strumenti fisici, quali oscilloscopi e multimetri, i programmi LabVIEW sono detti **strumenti virtuali** o, più comunemente, VI. Essi sono caratterizzati da un **pannello frontale** che costituisce l'interfaccia utente e da un **diagramma a blocchi** che rappresenta la programmazione che vi sta dietro.

A differenza dei linguaggi di programmazione testuali, come C++ e Visual Basic, LabVIEW utilizza delle icone invece di linee di testo per creare le applicazioni e dei cavi per rappresentare il flusso dati. Nella programmazione testuale, infatti, le istruzioni determinano l'ordine di esecuzione del programma, mentre in LabVIEW si utilizza una programmazione a flusso di dati in cui quest'ultimo attraversa i nodi sul diagramma a blocchi che determina l'ordine di esecuzione. Quindi le principali differenze tra LabVIEW e la maggior parte degli altri linguaggi di programmazione sta nella programmazione grafica e nell'esecuzione del flusso di dati, mentre per quel che riguarda i concetti della programmazione non vi sono cambiamenti. Ciò significa che il codice G include i vari tipi di dati, cicli, la gestione di eventi, la presenza di variabili, la ricorsione e la programmazione ad oggetti tipiche dei codici testuali. Un altro vantaggio di LabVIEW deriva dal fatto che poiché i dati possono anche scorrere in parallelo attraverso blocchi non consecutivi, il linguaggio può realizzare spontaneamente il *multi-threading* senza bisogno di esplicita gestione da parte del programmatore.

Una volta scritto il programma, LabVIEW compila il codice G direttamente in codice macchina ottimizzando l'esecuzione da parte dei processori del computer, senza obbligare il programmatore a eseguire manualmente la fase di compilazione.

Il codice G, con l'eccezione di poche funzioni specifiche di una piattaforma, è portabile tra differenti sistemi LabVIEW e in diversi sistemi operativi.

### Dettagli dei VI

I VI di LabVIEW possiedono tre componenti principali: il pannello frontale (*front panel*), il diagramma a blocchi (*block diagram*) e la sua icona (*connector pane*)

**Pannello frontale:** esso è l'interfaccia utente del VI costruito da controlli ed indicatori, che sono rispettivamente i terminali di ingresso e di uscita del VI. Un esempio è rappresentato nella Figura 20

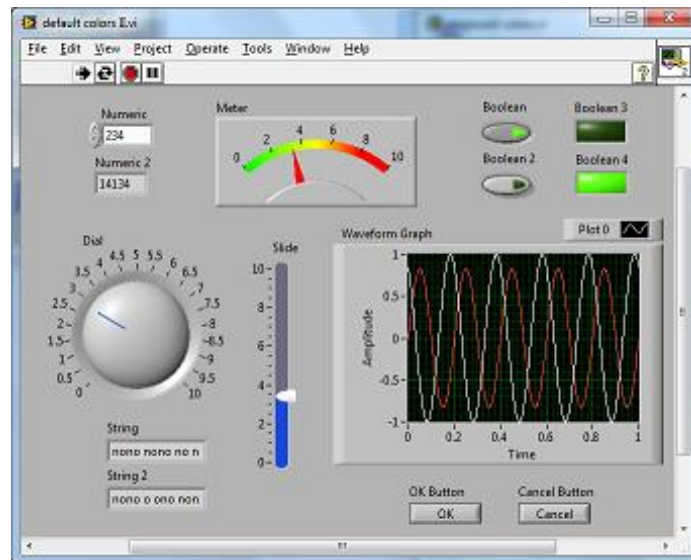


Figura 20 – Esempio di pannello frontale

**Diagramma a Blocchi:** esso è il diagramma di flusso che rappresenta il codice sorgente, in formato grafico. Gli oggetti del pannello frontale appaiono come terminali di ingresso o uscita nello diagramma a blocchi. Gli oggetti in esso comprendono: terminali, funzioni, costanti, strutture, chiamate ad altri VI (subVI), fili di collegamento, commenti testuali, ecc. Un esempio è rappresentato in Figura 21:

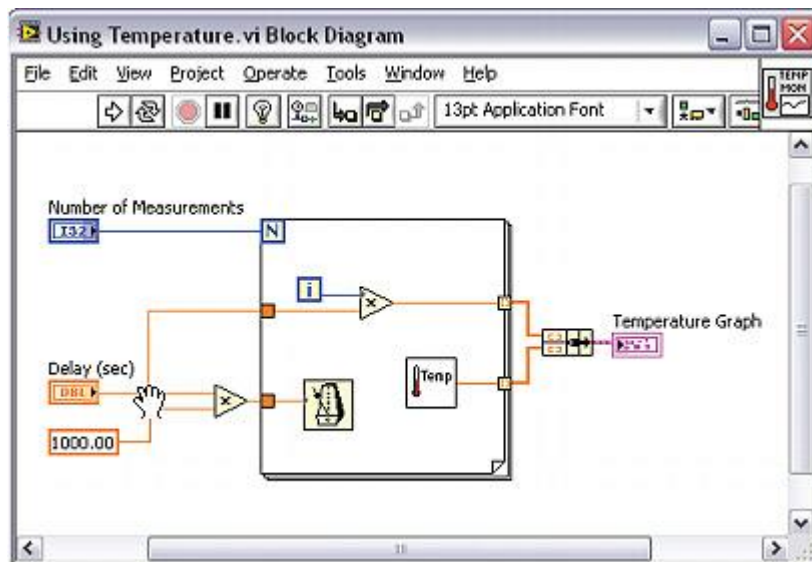


Figura 21 – Esempio di Diagramma a blocchi

Lo schema a blocchi può essere reso visibile anche durante l'esecuzione, cosa molto utile in fase di debug, in quanto esiste la possibilità di visualizzare con un'animazione al rallentatore il movimento dei dati lungo i fili e il loro valore istantaneo.

*Icona*: poiché ogni VI può essere a sua volta utilizzato come *subVI* (o *sottoVI*) e, quindi, comparire all'interno dello schema a blocchi di altri VI allo stesso modo di una qualsiasi funzione, come tale deve avere ingressi e uscite a cui collegare le linee di flusso. Il riquadro connettori serve appunto a definire qual è l'aspetto del VI quando appare come *subVI* in uno schema a blocchi di un VI più ampio; che facciata ha l'icona, ma soprattutto come e dove vanno collegate le linee per permettere il passaggio dei dati. In genere, con pochi click, ogni controllo può essere associato a un ingresso e ogni indicatore può essere associato a un'uscita.

### 2.3.2 - NI myRIO [6]

NI myRIO è lo strumento portatile e Riconfigurabile di gestione Input e Output (RIO), costruito appositamente dalla National Instruments per studenti, che viene presentato in Figura 22:

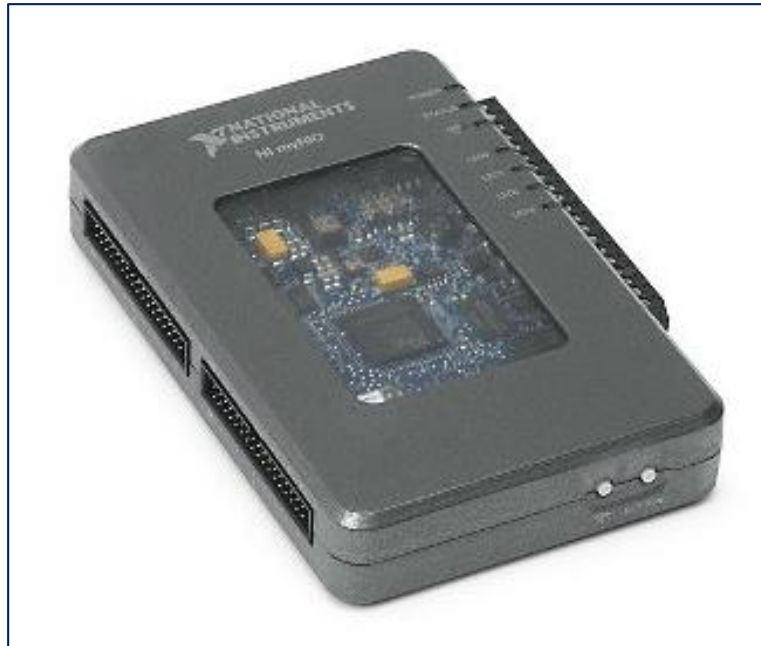


Figura 22 - Ni myRIO

Esso offre tutti i vantaggi delle prestazioni del processore real-time ARM dual-core, di un FPGA Xilinx personalizzabile, con 3 connettori I/O e WiFi, in particolare, esso è munito di input/output analogici (AI-AO) e digitali (DIO), può gestire anche segnali audio ed è in grado di fornire potenza in uscita. Per quel che riguarda le connessioni: le porte espandibili (MXP) alle morsettiere A e B hanno un set di segnali identico che viene schematizzato in Figura 23:

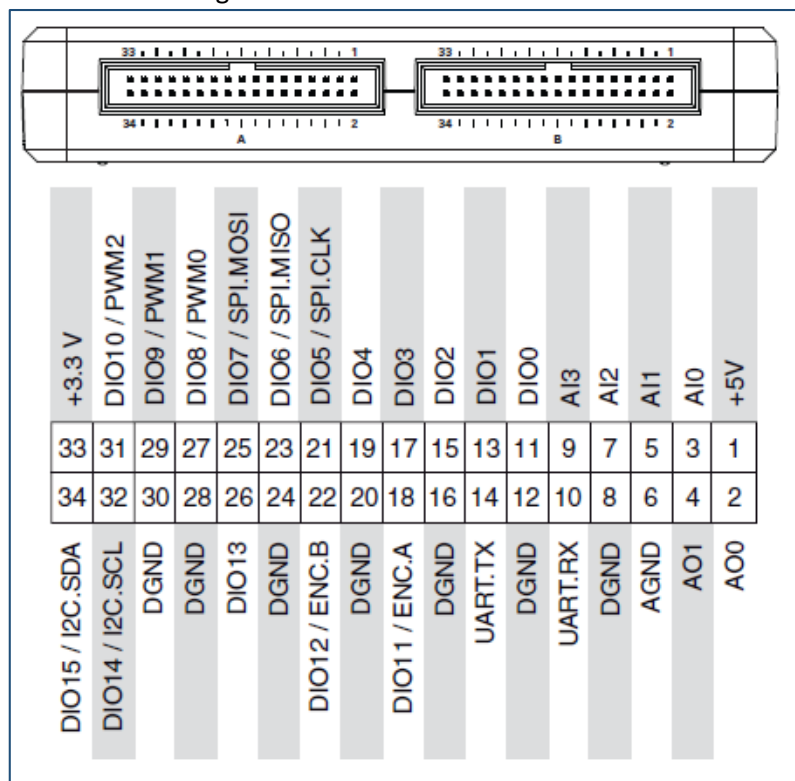


Figura 23 - Segnali Primari e secondari nella scheda MXP alle morsettiere A e B



Mentre le caratteristiche dei segnali sono indicate nella Tabella 4:

Nome del Segnale	Riferimento	Direzione	Descrizione
+5 V	DGND	Output	+5 V power output
AI <0.3>	AGND	Input	0-5 V, referenced, single-ended analog input channels
AO <0.1>	AGND	Output	0.5 V, 0-5 V referenced, single-ended analog output
AGND	N/A	N/A	Reference for analog input and output and +15 V/-15 V power output
+3.3 V	DGND	Output	+3.3 V power output
DIO <0.15>	DGND	Input or Output	General-purpose digital lines with 3.3 V output, 3.3 V/5 V-compatible input.
UART.RX	DGND	Input	UART receive input. UART lines are electrically identical to DIO lines.
UART.TX	DGND	Output	UART receive output. UART lines are electrically identical to DIO lines.
DGND	N/A	N/A	Reference for digital signals, +5 V, and +3.3 V

Tabella 4 - Descrizione dei segnali nella MXP alle morsettiere A e B

Inoltre è presente una Mini System Port (MSP) connessa alla morsettiere C i cui dettagli sui segnali sono rappresentati nella Figura 24 e nella Tabella 5.

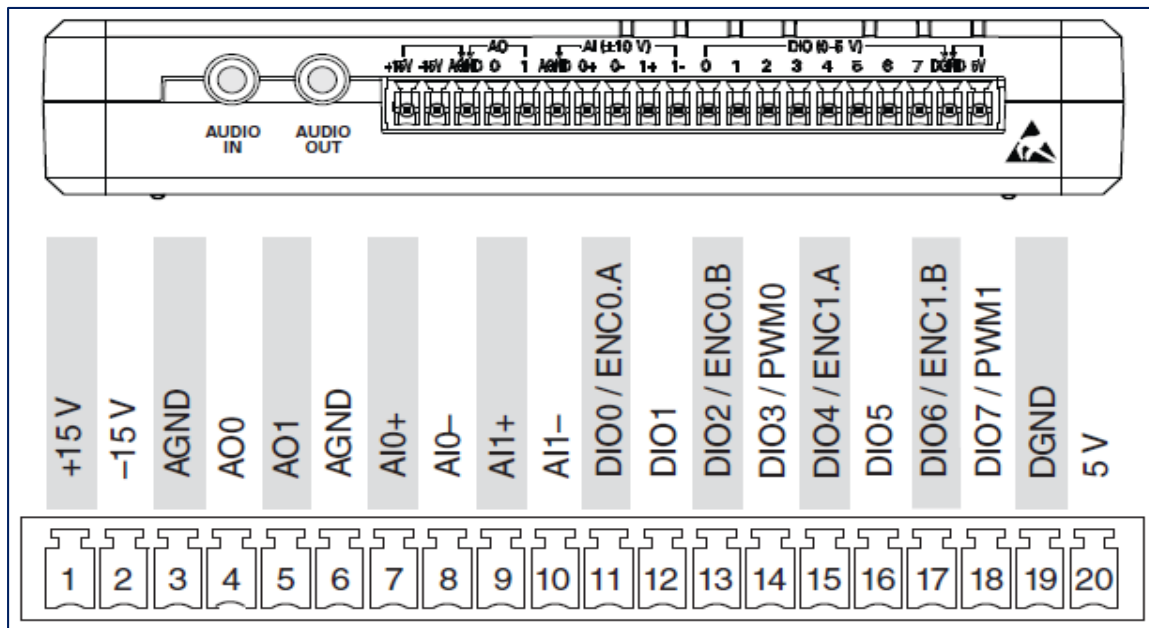


Figura 24 - Segnali primari e secondari della MSP alla morsettiere C.

Nome del segnale	Riferimento	Direzione	Destinazione
+15 V / -15 V	AGND	Output	+15 V/-15 V power output.
AI0+/AI0- AI1+/AI1-	AGND	Input	±10 V, differential analog input channels.
A0<0.1>	AGND	Output	±10 V referenced, single-ended analog output channels
AGND	N/A	N/A	Reference for analog input and output and +15 V/-15 V power output
+5 V	DGND	Output	+5 V power output.
DIO <0.7>	DGND	Input or Output	General-purpose digital lines with 3.3 V output, 3.3 V/5 V-compatible input.
DGND	N/A	N/A	Reference for digital lines and +5 V power output.

Tabella 5 - Descrizione dei segnali nella MSP alla morsettiera C

Analizzando più nel dettaglio le linee DIO si osserva che la myRIO ha delle linee DIO di scopo generale a 3.3 [V] sia nelle schede MXP che MSP. La scheda MXP che va connessa alle morsettiere A e/o B hanno sedici linee DIO ciascuna. Ogni linea DIO nelle MXP dalla 0 alla 13 ha una resistenza di pullup di 40 [kΩ] a 3.3 [V] (Figura 25), mentre le linee 14 e 15 hanno delle resistenze di pullup da 2.2 [kΩ] a 3.3 [V] (Figura 26) La scheda MSP che va inserita nella morsettiera C, invece, ha otto linee DIO, ognuna delle quali ha una resistenza di pullup da 40 [kΩ] a terra (Figura 27). Il DGND è il riferimento per tutte le linee DIO.

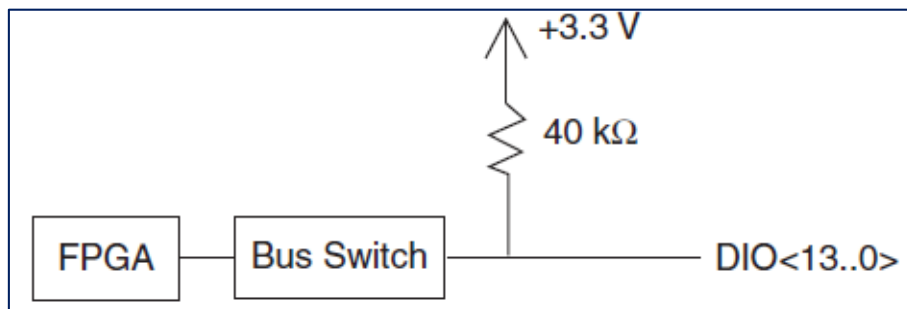


Figura 25 - Linea DIO <0 .. 13> nella MXP, Morsettiera A e B

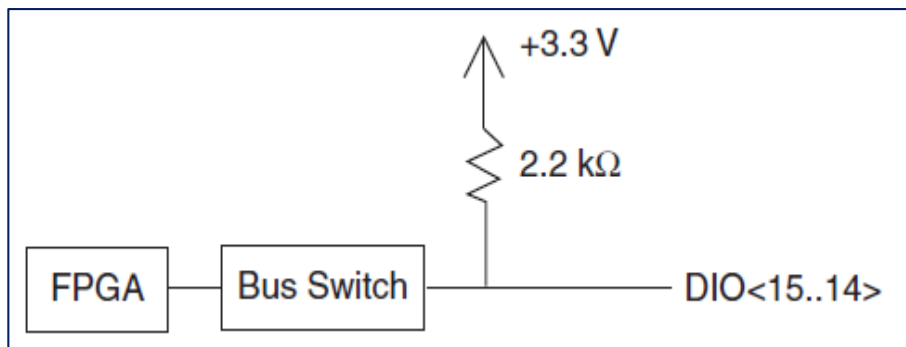


Figura 26 - Linea DIO <14 .. 15> nella MXP, Morsettiera A e B

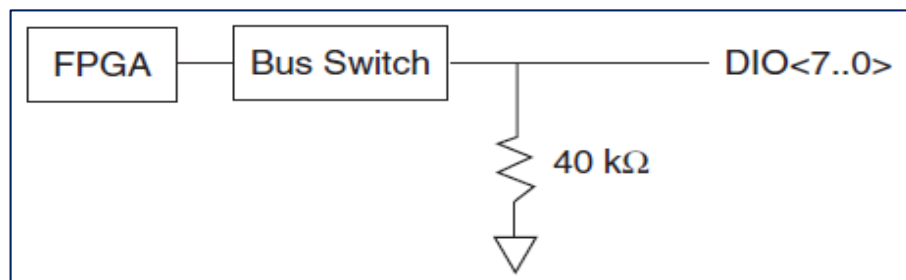


Figura 27 - Linea DIO <0 .. 7> nella MSP, Morsettiera C

Ogni linea può essere programmata individualmente come input o output indistintamente e come indicato alcune di esse hanno una seconda funzione, tre cui si cita l'I2C (Inter Integrated Circuit), SPI (Serial Peripheral Interface Bus), PWM (Pulse Width Modulation). Quando la linea è flottante, il flusso è diretto verso la resistenza di pull-up. I casi in cui questo avviene sono:

- Quando il myRIO è in accensione
- Quando la linea è configurata come input
- Quando il myRIO viene usato come alimentatore.

## 2.4 - I sensori

Per la scelta dei sensori innanzitutto si è fatta una simulazione del campo magnetico per la valutazione dei valori massimi che si dovrebbero misurare, attraverso il codice esposto nell'Appendice 1 il quale naturalmente si rifà al modello esposto nel capitolo 1. Tale codice prevede la valutazione del campo magnetico nelle seguenti due situazioni:

- **Caso 1:** in un quadrato di lato  $L = 5$  o  $10$  [cm] posto in un piano a una distanza  $d$  di 5 e 10 [cm] dal centro del magnete come mostrato in Figura 28:

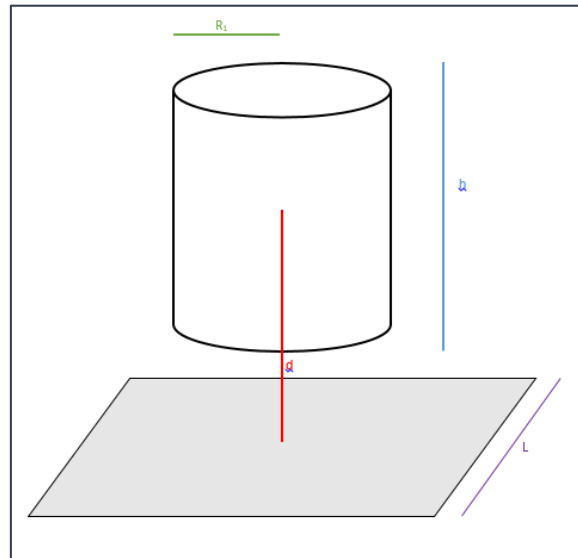


Figura 28 – Modello per la valutazione preliminare del campo magnetico nel primo caso

I risultati di questa simulazione sono rappresentati in Figura 29:

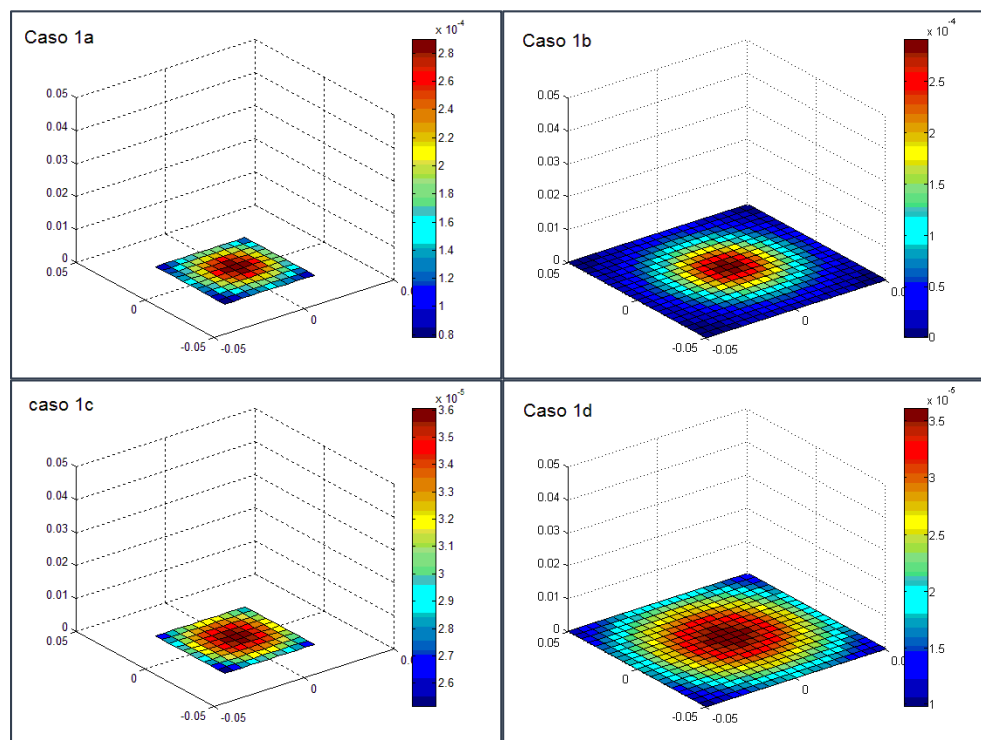


Figura 29 – Risultati della simulazione del campo magnetico prodotto dal magnete su un piano sottostante.

- **Caso 2:** in una circonferenza di raggio  $r = 5$  [cm] e il cui centro coincide con quello del magnete, o è posto a 5 [cm] dietro esso, come rappresentato in Figura 30:

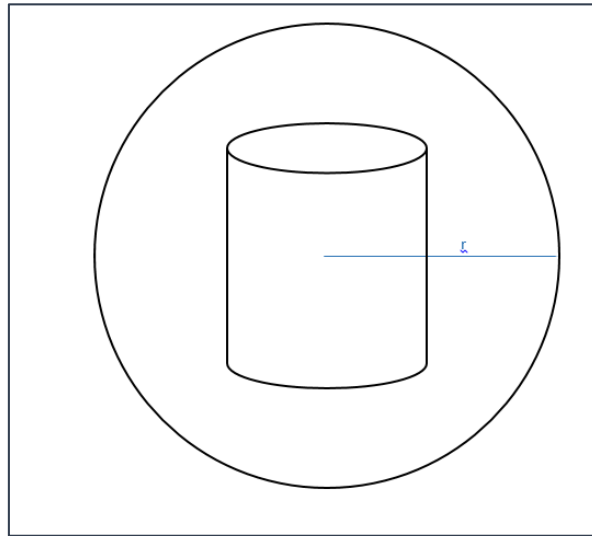


Figura 30 – Modello per la valutazione preliminare del campo magnetico nel secondo caso.

i cui risultati sono rappresentati in Figura 31:

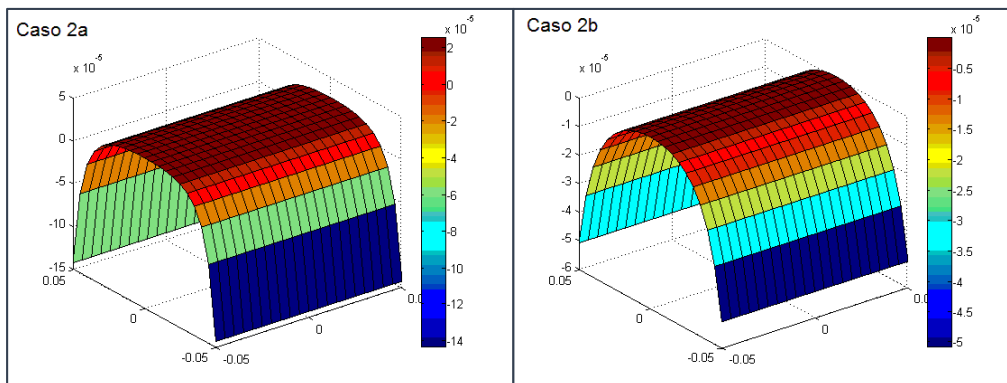


Figura 31 - Risultati della simulazione del campo magnetico prodotto dal magnete sulla circonferenza.

Dai risultati di tali simulazioni si è scelto di ricercare dei sensori con le seguenti caratteristiche:

- Alimentazione in DC
- Valori di fondo scala di circa 10 [Gauss]
- Buona selettività

Date tali specifiche si è svolta un'analisi delle proposte del mercato e si è optato per i magnetometri "3-Axis Digital Compass IC HMC5883L" della Honeywell.

### 2.4.1 - 3-Axis Digital Compass IC HMC5883L [7]

Il sensore HMC5883L della Honeywell (Figura 32) è un modulo multi-chip a montaggio superficiale progettato per la rivelazione di piccoli campi magnetici lungo i tre assi, con un interfaccia digitale. Esso è usato per applicazioni come la misura di campi magnetici e l'individuazione della loro orientazione, mantenendo i costi contenuti. Il dispositivo è caratterizzato da un sensore magneto-resistivo ad alta risoluzione affiancato da un circuito integrato ASIC contenente una parte di amplificazione, cancellazione dell'offset e un convertitore analogico-digitale a 12bit che garantisce l'accuratezza della bussola. Inoltre l'uso di un I<sup>2</sup>C come bus seriale permette un semplice interfacciamento. Nella Tabella 6 sono riportate le principali specifiche (misurate a 25°C tranne dove espresso diversamente) dello strumento:

Characteristics	Conditions	Min	Typ	Max	Units
<b>Power Supply</b>					
Supply Voltage	VDD Referenced to AGND VDDIO Referenced to DGND	2.16 1.71	1.8	3.6 VDD+0.1	Volts Volts
Average Current Draw	Idle Mode Measurement Mode (7.5 Hz ODR; No measurement average, A1:MA0 = 00) VDD = 2.5V, VDDIO = 1.8V	- -	2 100	- -	µA µA
<b>Performance</b>					
Field Range	Full scale (FS) – total applied field (Typical)	-8		+8	Gauss
Mag Dynamic Range	3-bit gain control	±1		±8	Gauss
Resolution	VDD=3.0V, GN=2		5		milli-Gauss
Linearity	±2.0 gauss input range			0.1	±% FS
Hysteresis	±2.0 gauss input range		±25		ppm
Cross-Axis Sensitivity	Test Conditions: Cross field = 0.5 gauss, Happlied = ±3 gauss		±0.2%		%FS/Gauss
Output Rate (ODR)	Continuous Measurement Mode Single Measurement Mode	0.75		75 160	Hz Hz
Measurement Period	From receiving command to data ready		6		msec
Turn-on Time	Ready for I2C commands		200		µs
Gain Tolerance	All gain/dynamic range settings		±5		%
I2C Address	7-bit address 8-bit read address 8-bit write address		0x1E 0x3D 0x3C		hex hex hex
I2C Rate	Controlled by I2C Master			400	kHz
I2C Hysteresis	Hysteresis of Schmitt trigger inputs on SCL and SDA - Fall (VDDIO=1.8V) Rise (VDDIO=1.8V)		0.2*VDDIO 0.8*VDDIO		Volts Volts
Self Test	X & Y Axes Z Axis		±1.16 ±1.08		Gauss
	X & Y Axes (GN=100) Z Axis (GN=100)		510		LSb

Characteristics	Conditions	Min	Typ	Max	Units
<b>General</b>					
ESD Voltage	Human Body Model (all pins) Machine Model (all pins)			TBD TBD	Volts
Operating Temperature					
Storage Temperature					
Reflow Classification					
Package Size	Length and Width	2.85	3.00	3.15	mm
Package Height		0.8	0.9	1.0	mm

Tabella 6 - Specifiche HMC5883L

### Absolute Maximum Ratings

Characteristics	Min	Max	Units
Supply Voltage VDD	-0.3	4.8	Volts
Supply Voltage VDDIO	-0.3	4.8	Volts

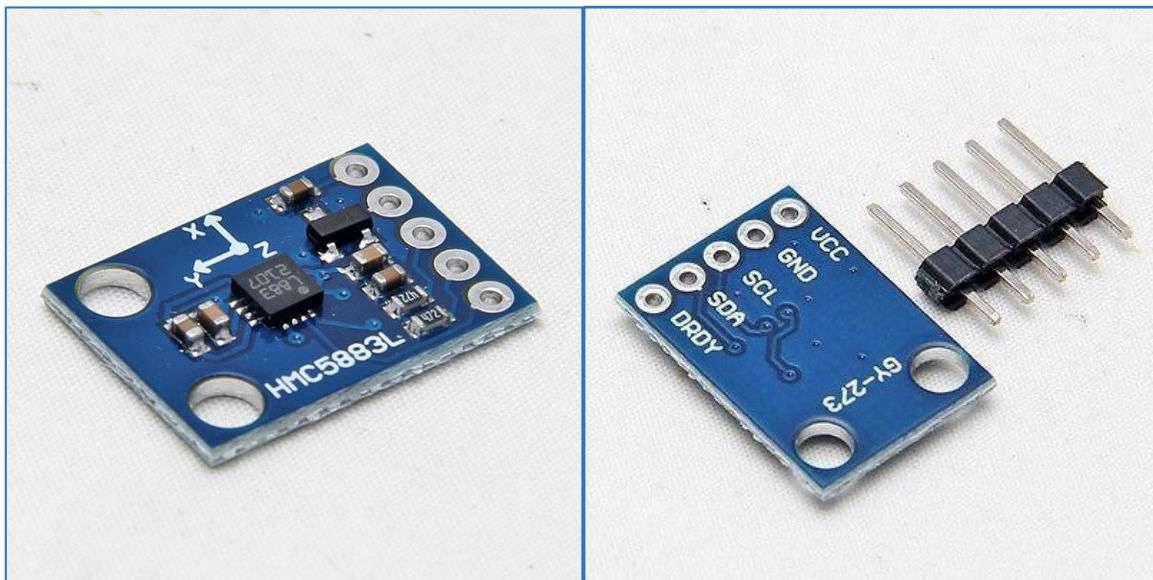


Figura 32 - Sensore HMC5883L

## PIN CONFIGURATION:

La configurazione dei PIN è descritta in Tabella 7 e presentata in Figura 33

Pin	Name	Description
1	SCL	Serial Clock – I2C Master/Slave Clock
2	VDD	Power Supply (2.16V to 3.6V)
3	NC	Not to be Connected
4	S1	Tie to VDDIO
5	NC	Not to be Connected
6	NC	Not to be Connected
7	NC	Not to be Connected
8	SETP	Set/Reset Strap Positive – S/R Capacitor (C2) Connection
9	GND	Supply Ground
10	C1	Reservoir Capacitor (C1) Connection
11	GND	Supply Ground
12	SETC	S/R Capacitor (C2) Connection – Driver Side
13	VDDIO	IO Power Supply (1.71V to VDD)
14	NC	Not to be Connected
15	DRDY	Data Ready, Interrupt Pin. Internally pulled high. Optional connection. Low for 250 $\mu$ sec when data is placed in the data output registers.
16	SDA	Serial Data – I2C Master/Slave Data

Tabella 7 - PIN Configuration

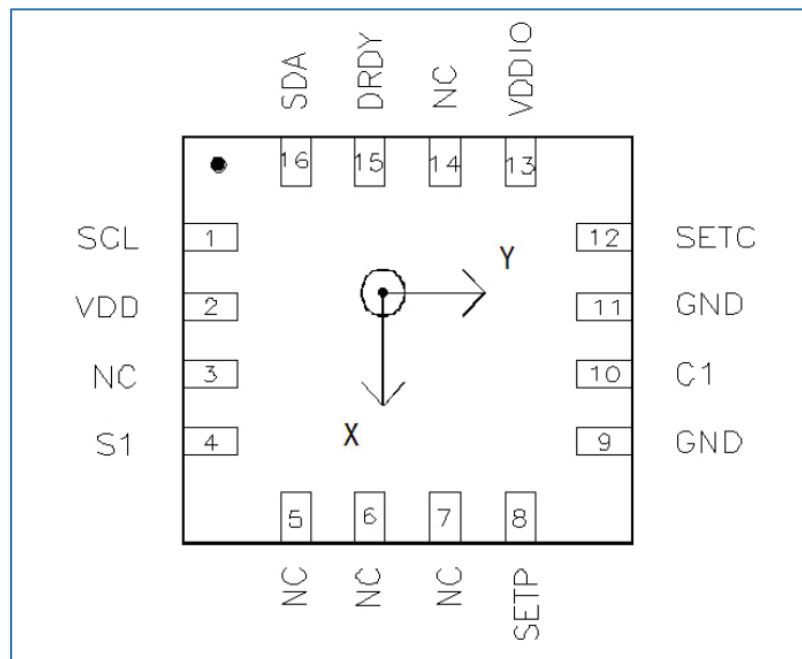


Figura 33 - PIN Configuration

Le frecce indicano il verso del campo magnetico che genera un output positivo nella configurazione di “normale misurazione”.



### Registri.

Questo componente può essere controllato e configurato attraverso dei registri on-chip che sono descritti nella Tabella 8. È da notare che nella descrizione si è considerato che *set* implementa una logica di tipo 1 mentre *reset* e *clear* implementano una logica di tipo 0, a meno che non sia espresso diversamente.

Address Location	Name	Access
00	Configuration Register A	Read/Write
01	Configuration Register B	Read/Write
02	Mode Register	Read/Write
03	Data Output X MSB Register	Read
04	Data Output X LSB Register	Read
05	Data Output Z MSB Register	Read
06	Data Output Z LSB Register	Read
07	Data Output Y MSB Register	Read
08	Data Output Y LSB Register	Read
09	Status Register	Read
10	Identification Register A	Read
11	Identification Register B	Read

Tabella 8 - Register List

### Il registro di configurazione A (CRA):

Questo registro serve per configurare la velocità di data output e la configurazione di misura del dispositivo. Esso è caratterizzato da 8 bit disposti come indicato in Tabella 9, le cui funzioni sono descritte in Tabella 10.

CRA7	CRA6	CRA5	CRA4	CRA3	CRA2	CRA1	CRA0
(0)	MA1(0)	MA0(0)	DO2 (1)	DO1 (0)	DO0 (0)	MS1 (0)	MS0 (0)

Tabella 9 - Configuration register A

Location	Name	Description
CRA7	CRA7	Bit CRA7 is reserved for future function. Set to 0 when configuring CRA.
CRA6 to CRA5	MA1 to MA0	Select number of samples averaged (1 to 8) per measurement output. 00 = 1(Default); 01 = 2; 10 = 4; 11 = 8
CRA4 to CRA2	DO2 to DO0	Data Output Rate Bits. These bits set the rate at which data is written to all three data output registers.
CRA1 to CRA0	MS1 to MS0	Measurement Configuration Bits. These bits define the measurement flow of the device, specifically whether or not to incorporate an applied bias into the measurement

Tabella 10 - Configuration Register A - Bit Designation

Per quel che riguarda il Data Output Rate i possibili valori utilizzabili sono descritti in Tabella 11, e fanno riferimento alla modalità di misura continua. Tutti le altre velocità di acquisizione sono ottenibili monitorando il DRDY pin in modalità di misura singola.

DO2	DO1	DO0	Typical Data Output Rate (Hz)
0	0	0	0.75
0	0	1	1.5
0	1	0	3
0	1	1	7.5
1	0	0	15 (Default)
1	0	1	30
1	1	0	75
1	1	1	Reserved

Tabella 11 - Data Output Rates

Infine le modalità di misura sono descritte in Tabella 12:

MS1	MS0	Measurement Mode
0	0	Normal measurement configuration (Default). In normal measurement configuration the device follows normal measurement flow. The positive and negative pins of the resistive load are left floating and high impedance.
0	1	Positive bias configuration for X, Y, and Z axes. In this configuration, a positive current is forced across the resistive load for all three axes.
1	0	Negative bias configuration for X, Y and Z axes. In this configuration, a negative current is forced across the resistive load for all three axes..
1	1	This configuration is reserved.

Tabella 12 - Measurement Mode

Il registro di configurazione B (CRB):

In questo registro si settano i parametri dell'acquisizione del sensore, e in particolare il fondo scala di misura. Anche questo registro è caratterizzato da 8 bit disposti come indicato in Tabella 13 e il cui significato è presentato in Tabella 14:

CRB7	CRB6	CRB5	CRB4	CRB3	CRB2	CRB1	CRB0
GN2 (0)	GN1 (0)	GN0 (1)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)

Tabella 13 - Configuration Register B

Location	Name	Description
CRB7 to CRB5	GN2 to GN0	Gain Configuration Bits. These bits configure the gain for the device. The gain configuration is common for all channels.
CRB4 to CRB0	0	These bits must be cleared for correct operation.

Tabella 14 - Configuration Register B - Bit Designation

Le impostazioni dell'acquisizione sono mostrati in Tabella 15, da cui si ricavano anche i valori con cui eseguire la conversione da livello digitale (LSb) a Gauss (inverso colonna quattro).

Si deve scegliere un valore del GAIN minore quando la misura causa l'overflow in uno dei data output register, ovvero in caso di saturazione. È molto importante ricordare che il nuovo settaggio sarà operativo solo dalla seconda misura che si effettua dopo il cambiamento.

GN2	GN1	GN0	Recommended Sensor Field Range [G]	Gain (LSb/Gauss)	Digital Resolution (mG/LSb)	Output Range
0	0	0	± 0.88 G	1370	0.73	0xF800–0x07FF (-2048–2047)
0	0	1	± 1.3 G	1090 (default)	0.92	0xF800–0x07FF (-2048–2047)
0	1	0	± 1.9 G	820	1.22	0xF800–0x07FF (-2048–2047)
0	1	1	± 2.5 G	660	1.52	0xF800–0x07FF (-2048–2047)
1	0	0	± 4.0 G	440	2.27	0xF800–0x07FF (-2048–2047)
1	0	1	± 4.7 G	390	2.56	0xF800–0x07FF (-2048–2047)
1	1	0	± 5.6 G	330	3.03	0xF800–0x07FF (-2048–2047)
1	1	1	± 8.1 G	230	4.35	0xF800–0x07FF (-2048–2047)

Tabella 15 - Gain Settings

Il registro di modalità di funzionamento (MR):

Anch'esso è un registro a 8 bit in cui i dati possono essere scritti o letti. Questo registro è usato per selezionare la modalità di funzionamento del sensore. La disposizione dei bit è presentata in Tabella 16, mentre il loro significato è presentato in Tabella 17:

MR7	MR6	MR5	MR4	MR3	MR2	MR1	MR0
HS(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	MD1 (0)	MD0 (1)

Tabella 16 - Mode Register

Location	Name	Description
MR7 to MR2	HS	Set this pin to enable High Speed I2C, 3400kHz.
MR1 to MR0	MD1 to MD0	Mode Select Bits. These bits select the operation mode of this device.

Tabella 17 - Mode Register - Bit Designations

Infine in Tabella 18 vengono descritte le modalità di funzionamento.

MD1	MD0	Operating Mode
0	0	Continuous-Measurement Mode. In continuous-measurement mode, the device continuously performs measurements and places the result in the data register. RDY goes high when new data is placed in all three registers. After a power-on or a write to the mode or configuration register, the first measurement set is available from all three data output registers after a period of $2/f_{DO}$ and subsequent measurements are available at a frequency of $f_{DO}$ , where $f_{DO}$ is the frequency of data output.
0	1	Single-Measurement Mode (Default). When single-measurement mode is selected, device performs a single measurement, sets RDY high and returned to idle mode. Mode register returns to idle mode bit values. The measurement remains in the data output register and RDY remains high until the data output register is read or another measurement is performed.
1	0	Idle Mode. Device is placed in idle mode.
1	1	Idle Mode. Device is placed in idle mode.

Tabella 18 - Operating Mode

## 2.4.2 - I<sup>2</sup>C e il protocollo di comunicazione

I<sup>2</sup>C sta per Inter Integrated Circuit ed è un sistema di comunicazione seriale bifilare utilizzato tra circuiti integrati che risiedono sullo stesso circuito stampato.

Il Bus è stato sviluppato dalla Philips nel 1982, da allora ha subito diversi aggiornamenti e generato alcuni bus simili ed è usabile liberamente dal 2006.

L'I<sup>2</sup>C è un canale di comunicazione molto semplice e relativamente lento ma considerando che gli integrati che convivono su una scheda elettronica devono scambiarsi informazioni di controllo senza particolari requisiti di velocità di risposta, la cosa non crea problemi. Inoltre l'adozione di un canale seriale condiviso come I<sup>2</sup>C permette di limitare notevolmente il numero di segnali elettrici che bisogna filtrare sullo stampato.

Il protocollo hardware dell'I<sup>2</sup>C richiede due linee seriali di comunicazione:

- **SDA** (Serial DATA) per i dati
- **SCL** (Serial CLOCK) per il clock, generalmente prenotato da un master e la cui presenza rende l'I<sup>2</sup>C un bus sincrono.

Ad esse va aggiunta una connessione di riferimento GND, indispensabile, e una linea di alimentazione V<sub>dd</sub>, a cui vanno connessi i resistori di pull-up e che può anche non essere condivisa da tutti i dispositivi (generalmente è a 5 [V] o 3.3[V], ma sono ammesse anche tensioni maggiori o minori).

Il Bus è detto a due fili, intendendo che la comunicazione necessita di due linee di comunicazione, ma in realtà il numero minimo delle connessioni fisiche è tre (SCL, SDA e GND).

In Figura 34 si trova un esempio di dispositivi collegati mediante I<sup>2</sup>C bus:

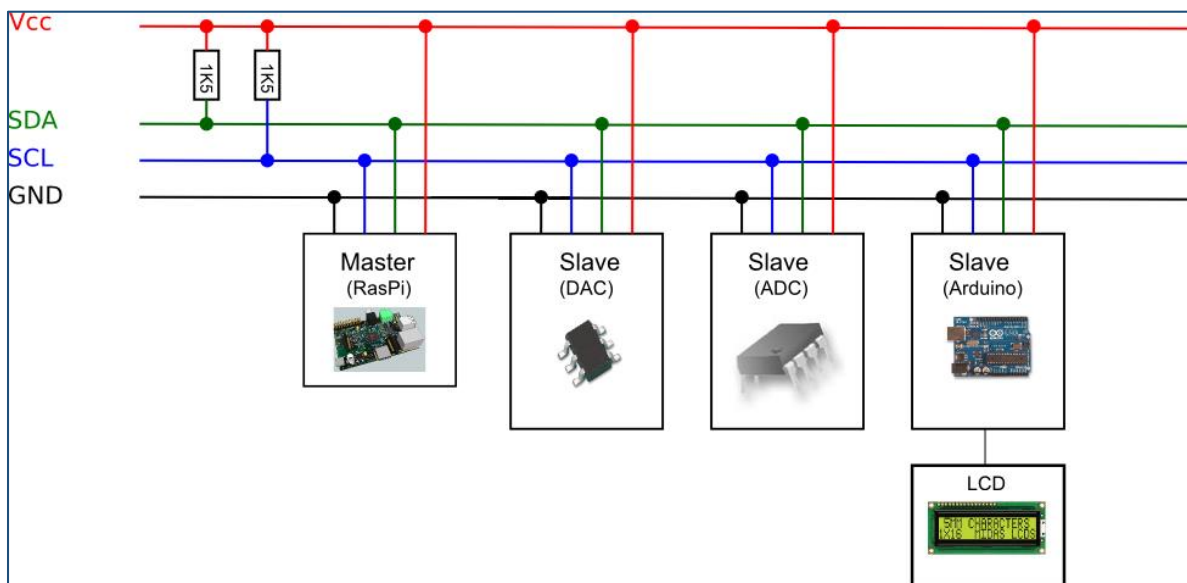


Figura 34 - Esempio di dispositivi collegati mediante I<sup>2</sup>C bus

Per quel che riguarda la temporizzazione del segnale, le velocità di trasmissione nel modo standard sono di 100[kbit/s] e di 10[kbit/s] (velocità del *low-speed mode*) ma nulla impedisce di scendere a velocità più basse. Revisioni dell'I<sup>2</sup>C hanno introdotto dispositivi con velocità di 400[kbit/s] (detto *fast mode*) e 3,4[Mbit/s] (detto *High-Speed mode*)

L'I<sup>2</sup>C ha 7 bit di indirizzo e quindi 128 possibili indirizzi diversi (detti nodi). Di questi però 16 sono riservati e quindi i dispositivi che possono essere collegati sullo stesso bus sono al massimo 112. Il numero massimo di nodi è limitato anche dalle capacità parassite introdotte da ciascun dispositivo, in particolare la capacità totale presentata da SDA e da SCL deve essere limitata a 400 [pF] (i resistori di pull-up dovranno quindi essere dimensionati su questo dato)

Un bus ha due tipi di nodi:

- Nodo *master*: il dispositivo che emette il segnale del clock
- Nodo *slave*: si sincronizza sul segnale dei clock senza poterlo controllare.

Nel bus possono essere presenti più dispositivi che possono svolgere la funzione di *master*, ma solo uno alla volta deve essere attivo. In generale ci sono quattro distinti modi in cui un nodo può operare:

- Un *master* trasmette – controlla il clock e invia dati agli *slave*
- Un *master* riceve – controlla il clock ma ricevi dati dallo *slave*
- Lo *slave* trasmette – il dispositivo non controlla il clock ma invia dati al *master*
- Lo *slave* riceve – il dispositivo non controlla il clock e riceve dati dal *master*.

Un esempio di trasferimento dati è presente in Figura 35.

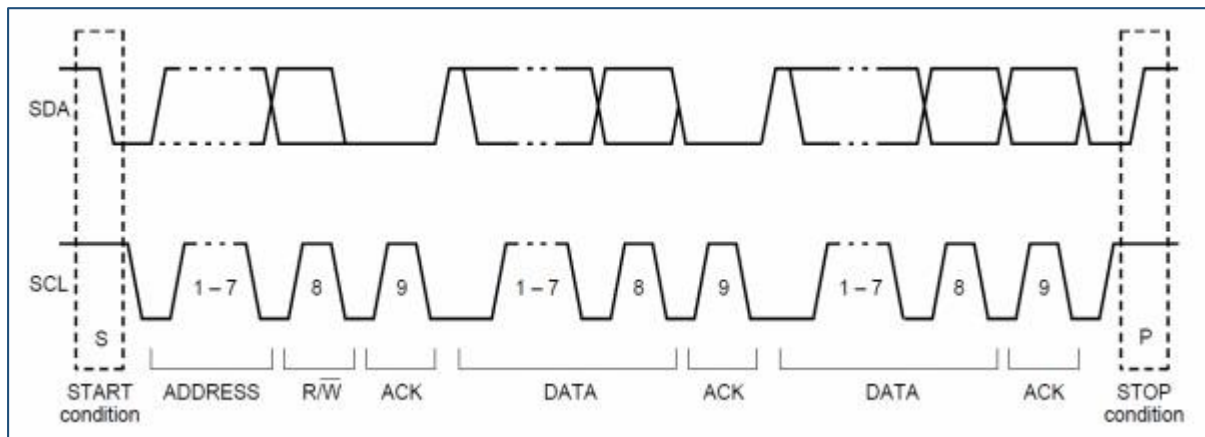


Figura 35 - Esempio di trasferimento dati su I2C

Il *master* inizia lo scambio di informazioni inviando lo start bit (S) seguito dall'indirizzo dello *slave* con cui vuole comunicare (B1, ..., B7). Segue un bit (B8) che indica se vuole trasferire informazioni allo *slave* (write) o riceverne (read). Se lo *slave* inidizzato (B1, ..., B7) esiste esso prende controllo della linea dati sul successivo impulso del clock e la forza bassa (ACK). Il *master* sa quindi che il dispositivo selezionato ha ricevuto la richiesta ed è in attesa di rispondere.

Lo start e lo stop seguono le seguenti indicazioni:

- Lo start (S) è costituito da una transazione da alto a basso del bus dati SDA mentre il clock (SCL) è alto
- Lo stop (P) è rappresentato da una transazione da basso ad alto del SDA mentre SCL è alto.

Se invece il *master* vuole ricevere informazioni dallo *slave*, invia un ACK ad ogni byte ricevuto, escluso l'ultimo. Dopo di ciò può inviare uno STOP bit (P) o uno START bit (S) se vuole mantenere il controllo del bus per un altro trasferimento.

L'I2C è usato per comunicare con i dispositivi in cui semplicità e basso costo sono prioritari rispetto alla velocità di trasmissione. Le applicazioni più comuni sono:

- Accesso alla memoria flash ed EEPROM che mantengono i dati memorizzati anche quando non sono alimentate
- Accesso a DAC a bassa velocità
- Accesso a ADC a bassa velocità
- Cambiamento del settaggio nei monitor
- Cambiamento del volume di altoparlanti intelligenti
- Controllo di display come nei cellulari
- Lettura e diagnostica di sensori,

## 2.5 - BeagleBone Black [8]

Il BeagleBone Black (Figura 36) è un mini-computer a singola scheda e a bassa potenza, tipo Arduino e Raspberry Pi, prodotto dalla Texas Instruments. Anch'esso come la NI myRIO è stato sviluppato per scopo principalmente didattico.

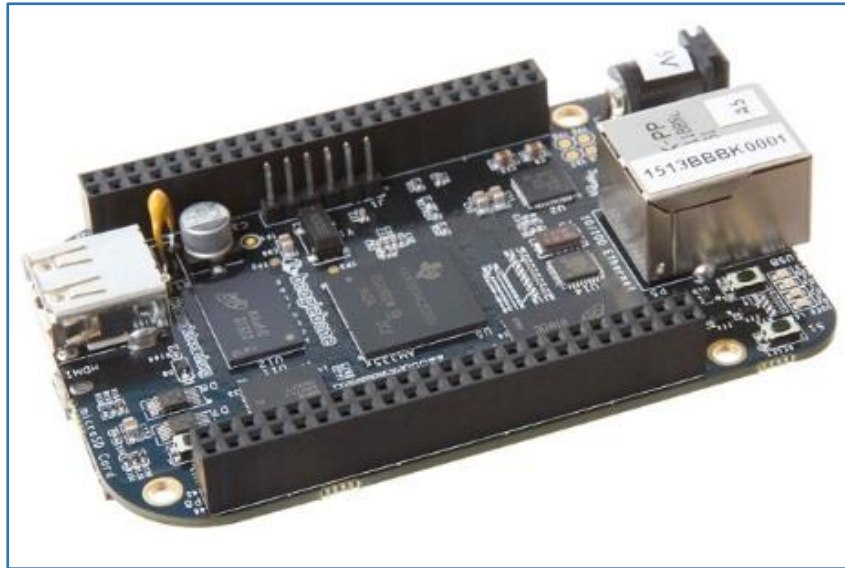


Figura 36 - BeagleBone Black

Esso è caratterizzato da un processore: AM335x 1GHz ARM® Cortex-A8, e dalle seguenti caratteristiche hardware:

- 512MB DDR3 RAM
- 4GB 8-bit eMMC on-board flash storage
- 3D graphics accelerator
- NEON floating-point accelerator
- 2x PRU 32-bit microcontrollers

Per quel che riguarda la connettività esso dispone di:

- USB client for power & communications
- USB host
- Ethernet
- HDMI
- 2x 46 pin headers

Infine per quel che riguarda il lato software il BlackBone Black è compatibile con:

- Debian
- Android
- Ubuntu
- Cloud9 IDE on Node.js w/ BoneScript library
- E molto altro

## 3 - Misure

### 3.1 - Come eseguire la misura: COMPASS.VI

All'interno del "NI myRIO Mechatronics Accessory Kit" [9] si può trovare il COMPASS.VI, un VI sviluppato dalla NI appositamente per leggere le misure eseguite dal sensore HMC5883L.

Tale dispositivo genera misurazioni a 12 bit distribuite mediante comunicazioni seriali I2C-bus a frequenze fino a 160 Hz e offre più gamme di sensibilità per l'individuazione del polo nord magnetico terrestre o per misurare campi magnetici più intensi fino a 8 Gauss.

La bussola richiede cinque connessioni alla morsettiera MXP A della piattaforma NI myRIO (Figura 37):

- Alimentazione di 3.3[V] (VDD) → pin 33
- Massa (GND) → pin 30
- Linea Dati (SDA) → pin 34
- Clock (SCL) → pin 32
- Data Ready (DRDY) → pin 11

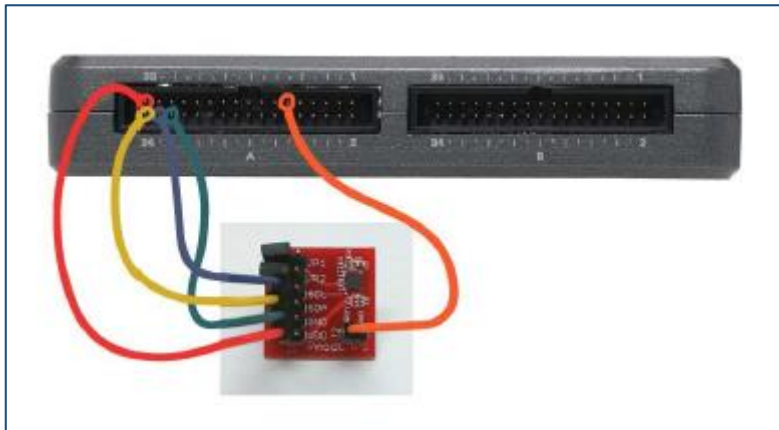


Figura 37 - Impostazioni di connessione del sensore alla morsettiera



Per quel che riguarda il VI il suo pannello frontale è presentato in Figura 38 dove si nota come i risultati del sensore siano presentati in tre formati:

- Sei byte recuperati dai registri DATA
- Tre valori interi con segno ottenuti combinando i due byte recuperati per asse
- Un grafico della forma d'onda

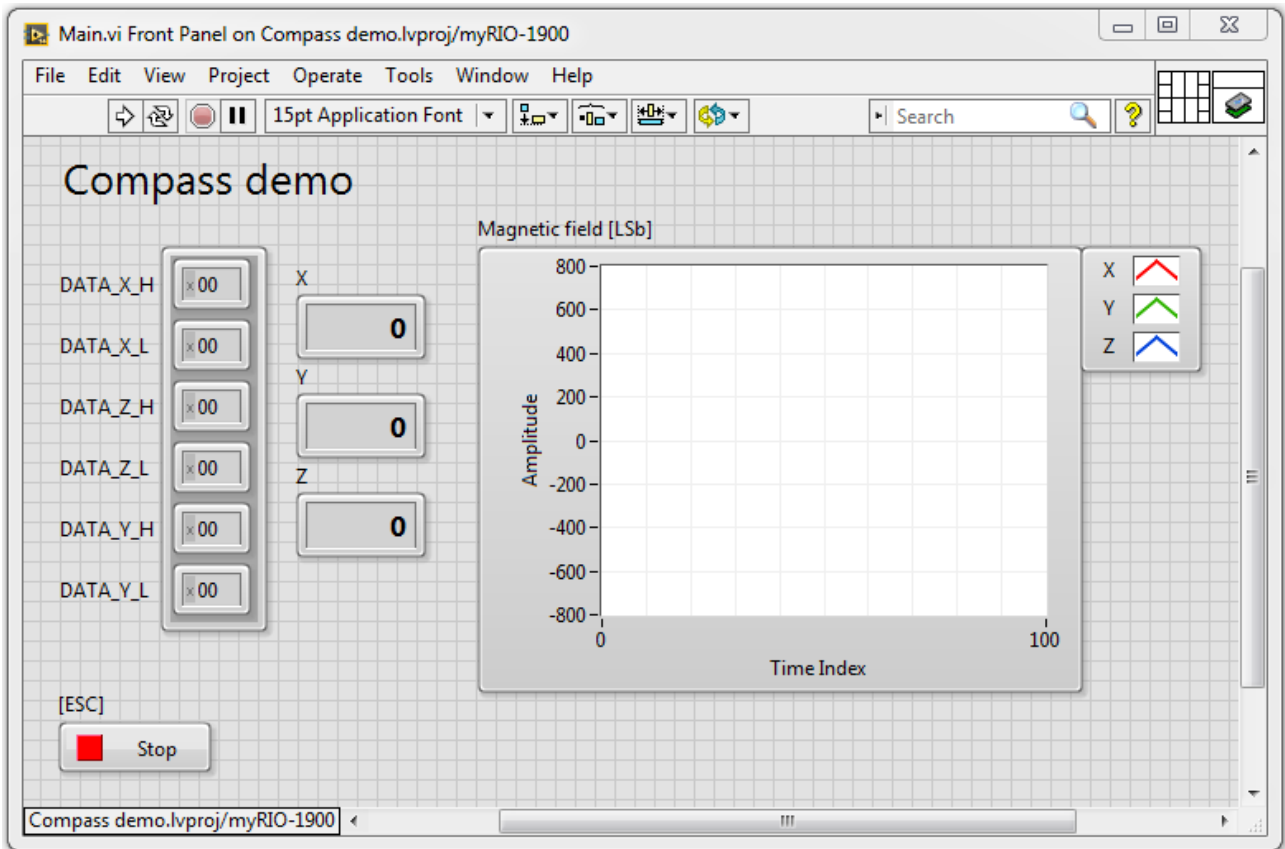


Figura 38 - Pannello Frontale del Compass.VI

Mentre il diagramma a blocchi è presentato in Figura 39

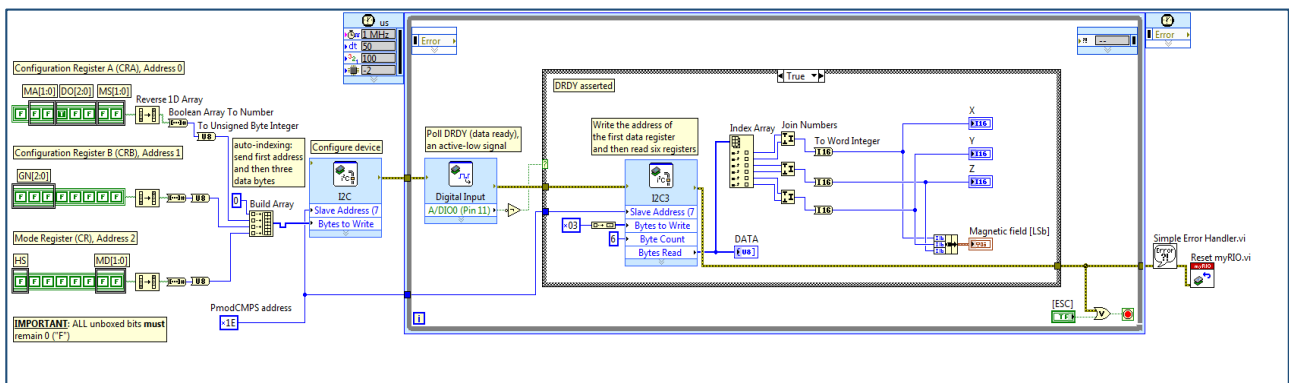


Figura 39 - Diagramma a Blocchi del Compass.VI

Per analizzare meglio il codice partiamo dalla prima parte evidenziata in Figura 40, in cui si nota come per settare le impostazioni dei registri di configurazione A e B e del Mode register sono state create tre stringhe di 8 bit ciascuna, ognuno configurabile a TRUE (1) o FALSE(0) come descritto nel paragrafo (2.4.1) e che vengono poi inviate al sensore per farlo funzionare nelle modalità volute.

Di particolare rilevanza è la configurazione del registro B, e nello specifico, le prime tre caselle il cui opportuno settaggio configura il fondo scala con cui il sensore esegue la misura (Tabella 19).

GN2	GN1	GN0	Fondo Scala [G]
0	0	0	1.49
0	0	1	1.88
0	1	0	2.49
0	1	1	3.11
1	0	0	4.64
1	0	1	5.24
1	1	0	6.20
1	1	1	8.90

Tabella 19 - Fondo Scala

Un altro aspetto che si nota in Figura 40 è come l'indirizzo del sensore sia impostato costante a 1E, questo è dovuto al fatto che tale indirizzo è preimpostato nel sensore e non modificabile dall'utente. Per ovviare a questo inconveniente quando si vogliono utilizzare più di un sensore, si deve utilizzare un multiplexer, come spiegato in seguito (paragrafo 3.4)

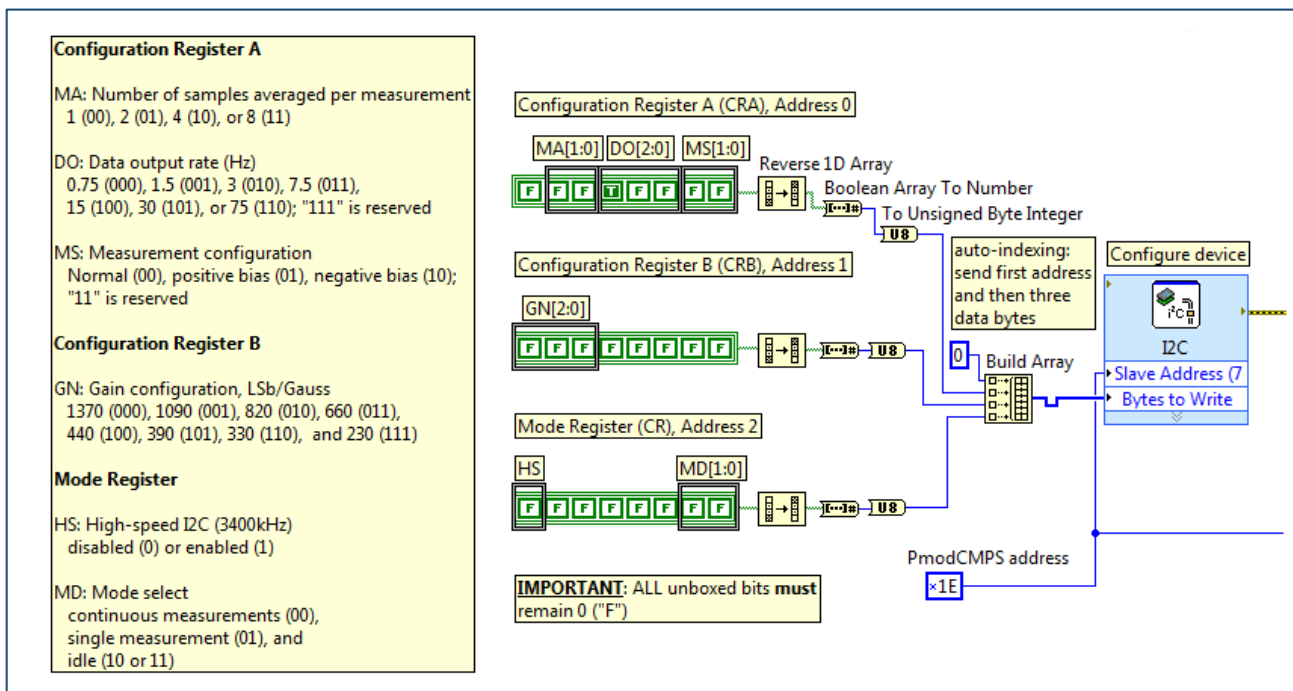


Figura 40 - Prima parte del Diagramma a Blocchi - Configurazione dei registri

Una volta configurate le impostazioni del sensore si procede alla lettura delle misure eseguite con un ciclo rappresentato in Figura 41:

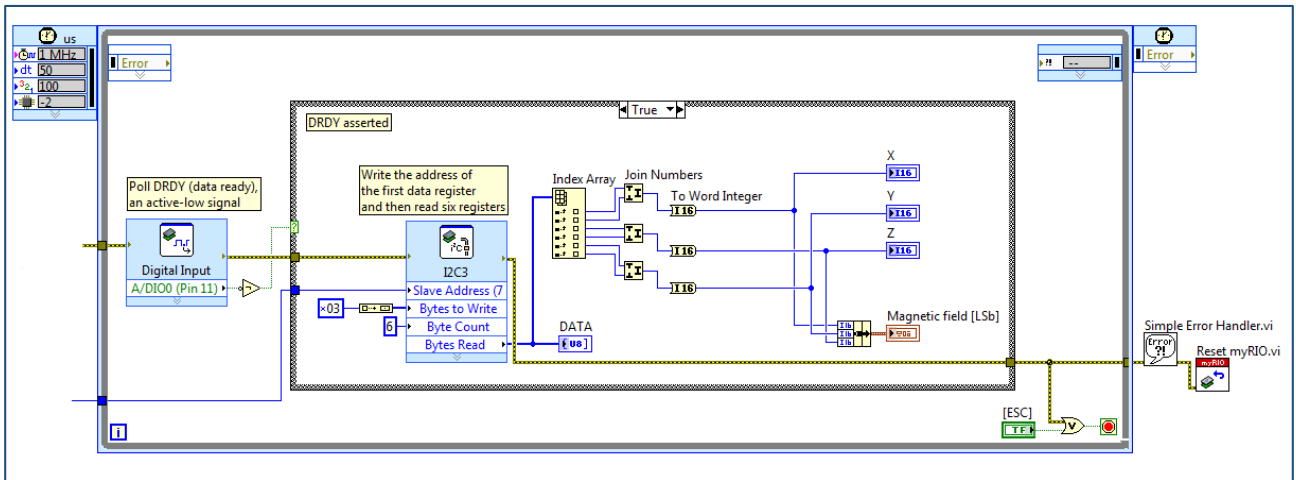


Figura 41 - Seconda parte del Diagramma a Blocchi - Misura

per prima cosa, si controlla che il sensore sia pronto per la lettura e in caso positivo si procede ad essa e alla presentazione dei risultati(Figura 41), altrimenti si riavviva la lettura(Figura 42)

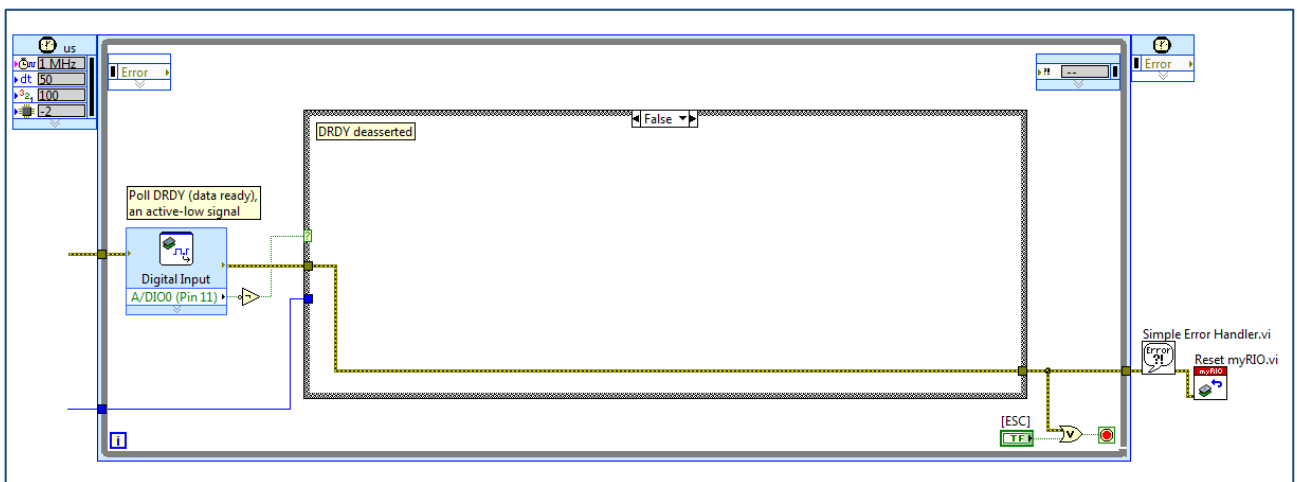


Figura 42 - Seconda parte del Diagramma a Blocchi - DRDY disinserito

infine una volta premuto il tasto STOP nel pannello frontale si esce dal ciclo, e si resetta la scheda di acquisizione.

Nel caso venga rilevato un qualunque tipo di errore esso provoca l'istantanea interruzione dell'esecuzione del VI e viene visualizzata una finestra in cui si specifica l'errore riscontrato.

### 3.2 - Il controllo e la movimentazione degli assi

Per il controllo e la movimentazione degli assi il primo passo è configurare i tre controller C663 Mercury Step Motor Controller con i tre motori M-403 Precision Translation Stage che gestiscono il movimento degli assi. Per fare ciò si usa il software **PI MikroMove®** identificando i controller connessi (Figura 43) e associandovi il modello di asse che andranno a comandare (Figura 44).

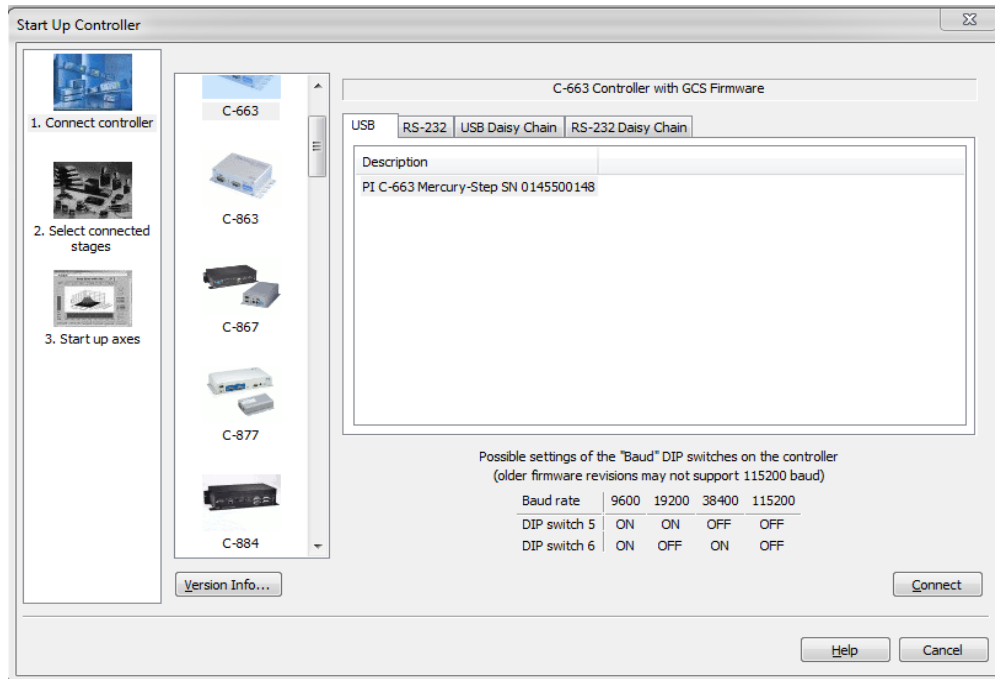


Figura 43 - Selezione del controller attraverso PI MikroMove

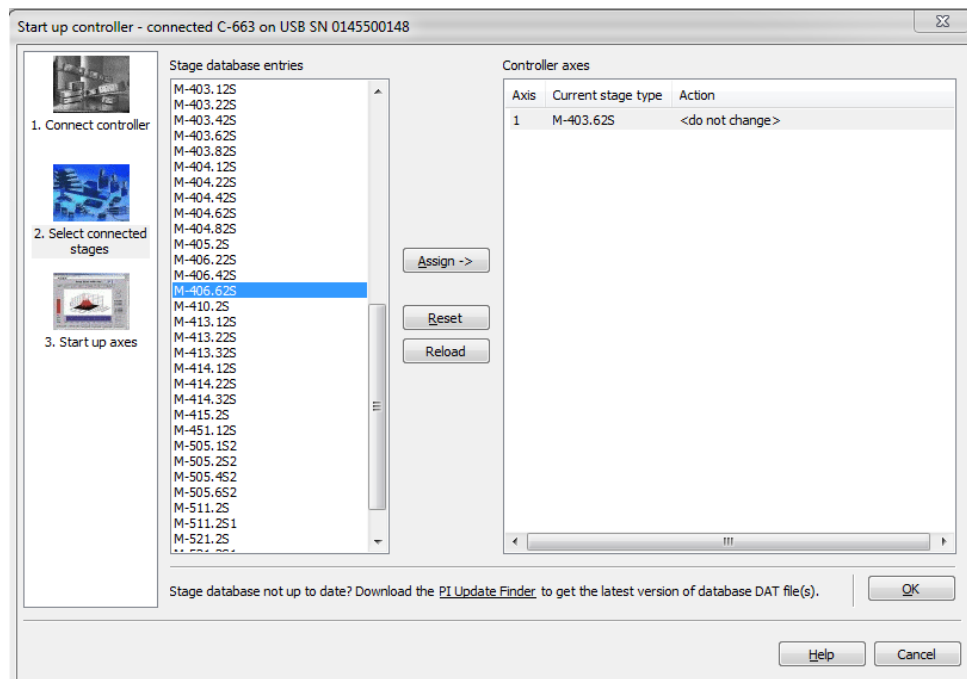


Figura 44 - Associazione del controller con gli assi

Infine, una volta eseguita la corretta connessione è consigliabile eseguire il **Ref. Switch** che allinea gli assi nella posizione centrale (Figura 45).

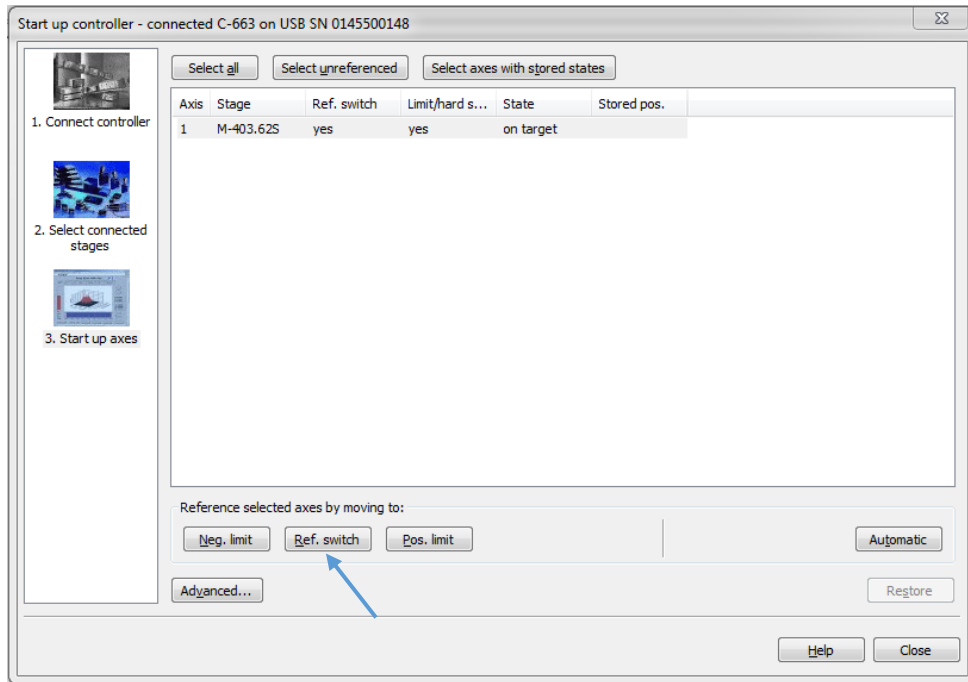


Figura 45 - Verifica dell'avvenuta corretta connessione

I successivi controlli degli assi possono essere fatti direttamente attraverso LabVIEW, infatti PI fornisce gli opportuni *drivers* e un set di VI.

Un **Configuration\_Setup.VI** (Figura 46) è stato implementato specificatamente per verificare la corretta connessione e il corretto funzionamento degli encoder e degli assi.

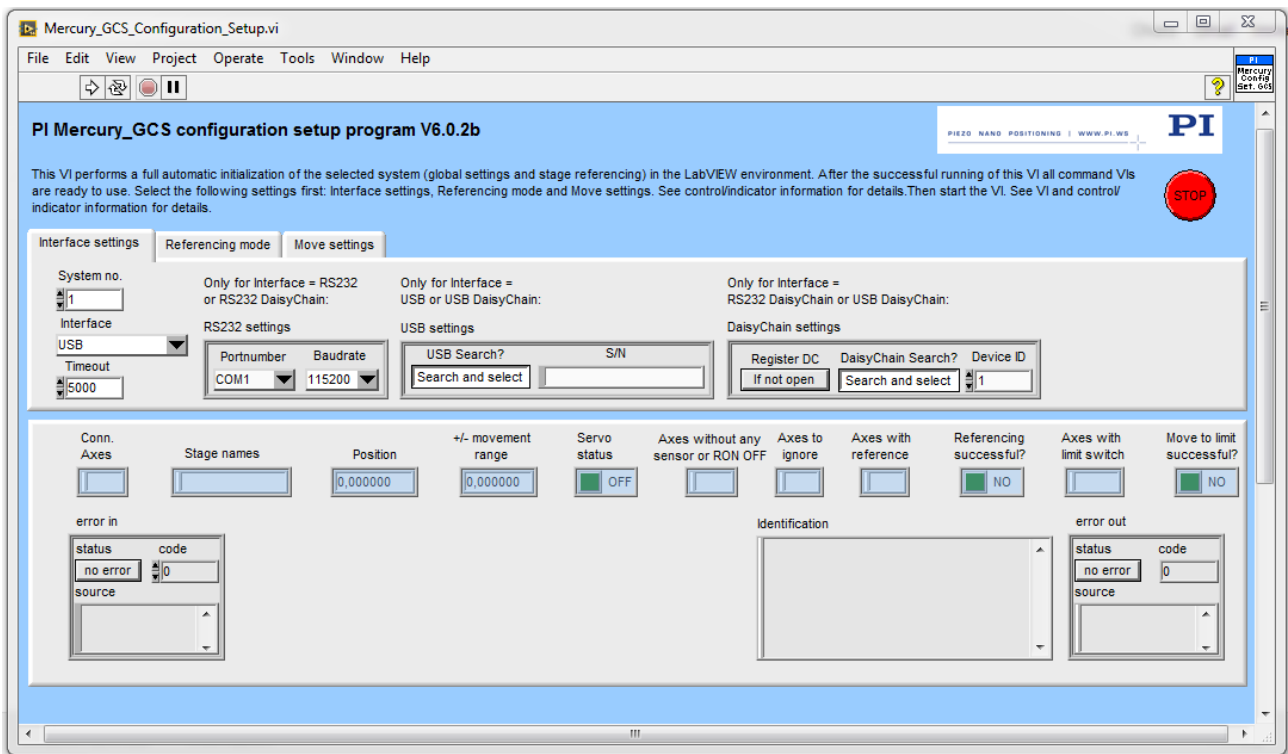


Figura 46 - Configuration-Setup.VI

Su di esso si sceglie nella sezione *interface* il tipo di protocollo con cui vengono connessi gli encoder (USB o RS232) e la presenza di un solo controller o più (Daisy Chain). Una volta settati i parametri della connessione si avvia il VI ed esso dovrebbe individuare i controllori connessi e restituire il loro stato (Figura 47).

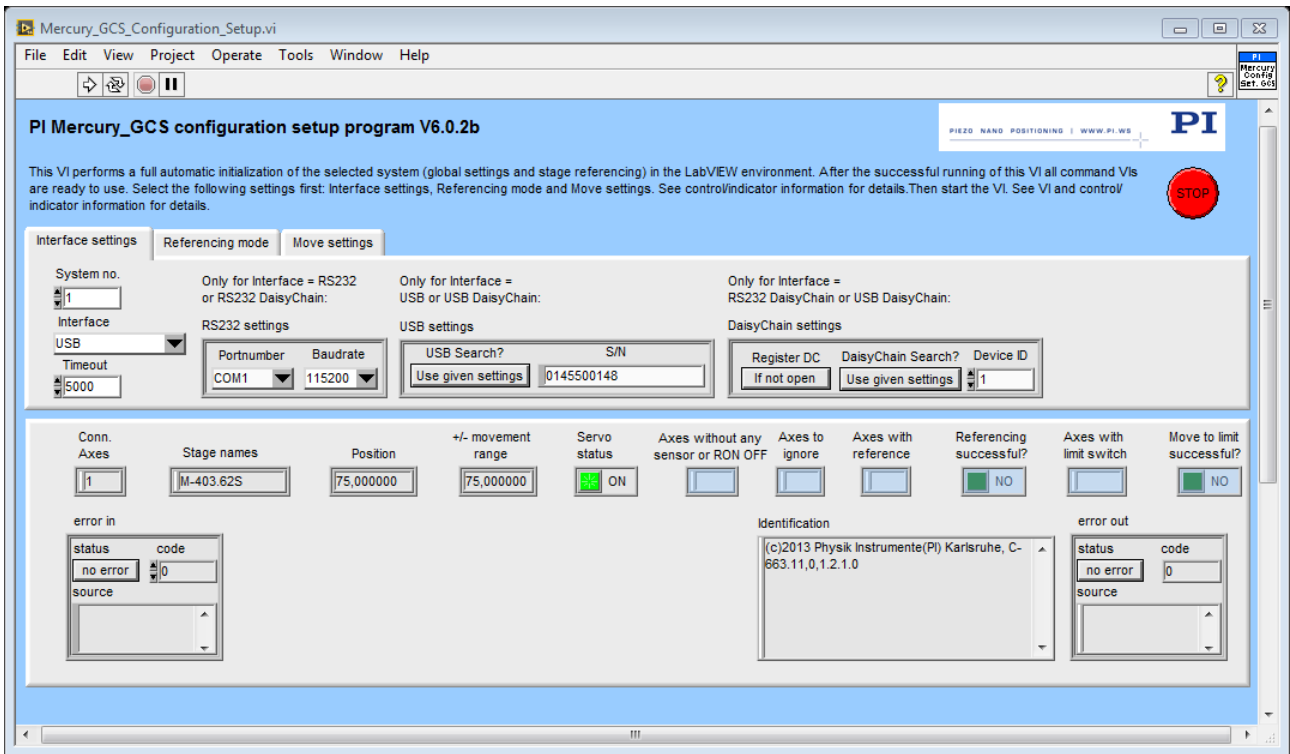


Figura 47 - Configuration Setup.vi dopo la connessione

Tale VI è l'unico fornito da PI non modificabile. Oltre a esso, infatti, l'azienda fornisce una serie di VI per il controllo e la movimentazione degli assi. Tra di essi, per il lavoro descritto in questa tesi si è usato particolarmente **MOV.VI** (Figura 48) il cui scopo è muovere gli assi selezionati nella posizione assoluta indicata.

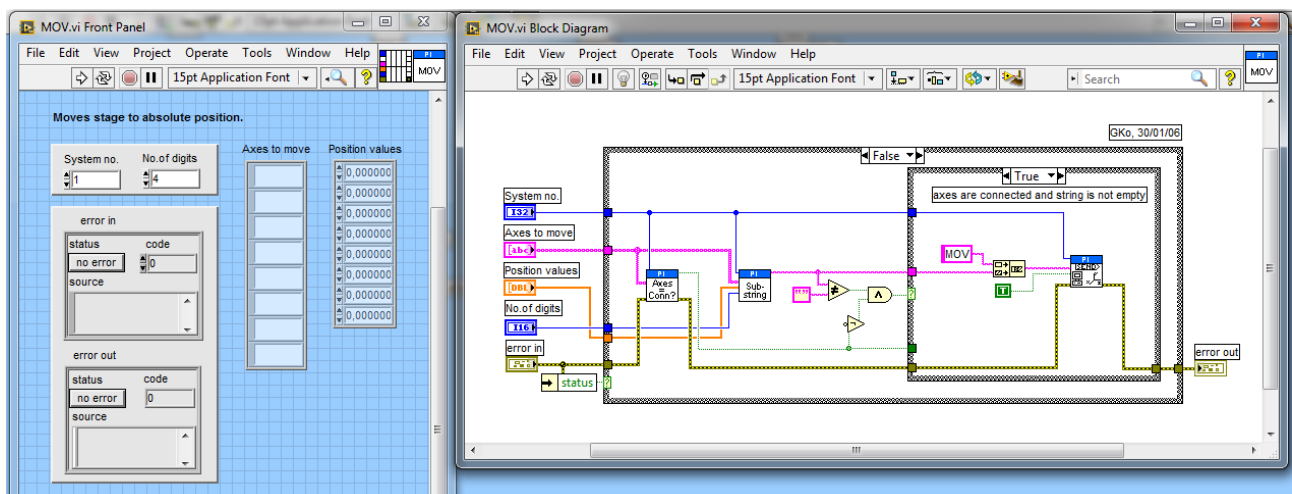


Figura 48 - MOV.VI - Front Panel and Block Diagram

### 3.3 - Verifica dei sensori

Una prima verifica sul corretto funzionamento dei sensori è stata eseguita su un campione di tre sensori, raccogliendo e confrontando le misure ottenute muovendo il magnete lungo l'asse X, dalla posizione 0 alla posizione 150, con scatti di 10[mm].

I Virtual Instruments usati per eseguire ciò sono il **Compass.vi** e il **Misura\_tra\_step.vi** presentato in Figura 49 (front panel) e in Figura 50 (block diagram)

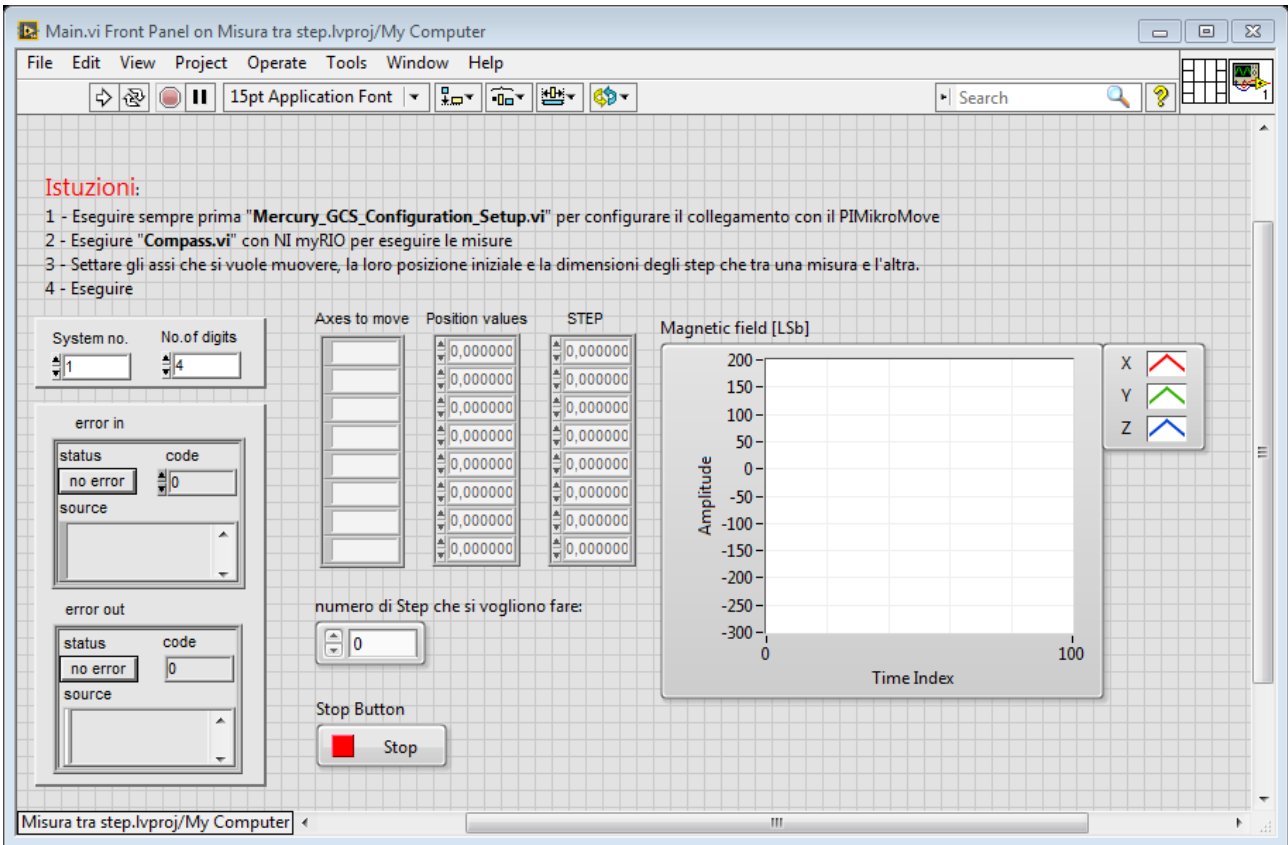


Figura 49 - Misura tra step.vi - Front Panel

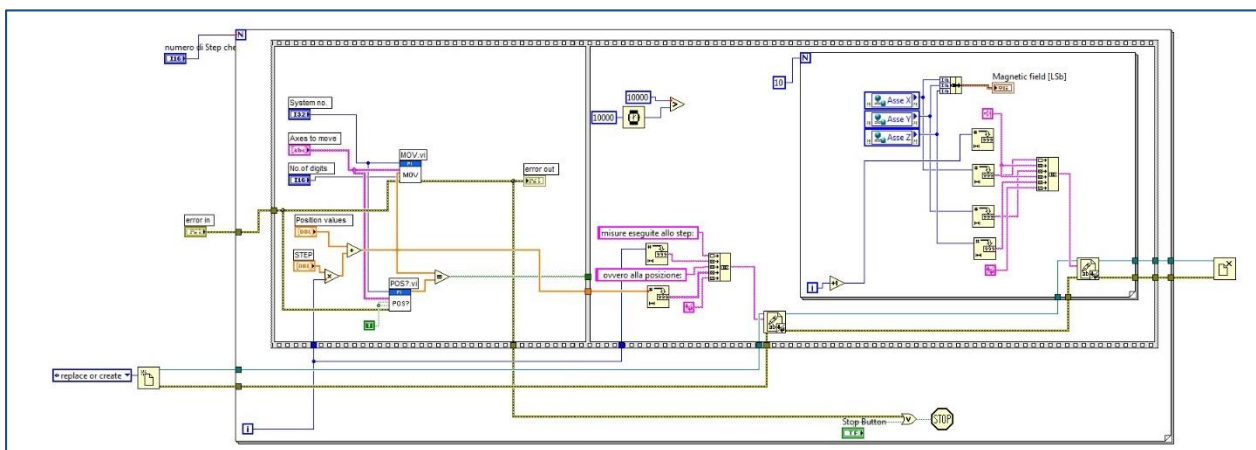


Figura 50 - Misura tra step.vi - Block Diagram

Eseguito tali misure si ottengono i risultati presenti in Tabella 20 (sensore 1) Tabella 21 (sensore 2) e Tabella 22(sensore 3)

Posizione	Sensore 1 - CARICO			Sensore 1 - VUOTO			Sensore 1 - CARICO - VUOTO		
	Asse X	Asse Y	Asse Z	Asse X	Asse Y	Asse Z	Asse X	Asse Y	Asse Z
0	0,1816	0,14301	0,35639	0,35866	0,14755	0,24062	-0,17706	-0,00454	0,11577
10	0,18387	0,14074	0,35185	0,35866	0,14755	0,24062	-0,17479	-0,00681	0,11123
20	0,17252	0,14301	0,3859	0,35866	0,14755	0,24062	-0,18614	-0,00454	0,14528
30	0,16117	0,14074	0,4313	0,35866	0,14755	0,24062	-0,19749	-0,00681	0,19068
40	0,16344	0,14074	0,47897	0,35866	0,14755	0,24062	-0,19522	-0,00681	0,23835
50	0,17933	0,13847	0,52437	0,35866	0,14755	0,24062	-0,17933	-0,00908	0,28375
60	0,21338	0,13166	0,57658	0,35866	0,14755	0,24062	-0,14528	-0,01589	0,33596
70	0,26786	0,12485	0,6129	0,35866	0,14755	0,24062	-0,0908	-0,0227	0,37228
80	0,33369	0,11577	0,63333	0,35866	0,14755	0,24062	-0,02497	-0,03178	0,39271
90	0,40179	0,11123	0,62879	0,35866	0,14755	0,24062	0,04313	-0,03632	0,38817
100	0,46535	0,09988	0,60155	0,35866	0,14755	0,24062	0,10669	-0,04767	0,36093
110	0,51756	0,0908	0,55615	0,35866	0,14755	0,24062	0,1589	-0,05675	0,31553
120	0,55388	0,07718	0,50167	0,35866	0,14755	0,24062	0,19522	-0,07037	0,26105
130	0,56296	0,06583	0,44492	0,35866	0,14755	0,24062	0,2043	-0,08172	0,2043
140	0,56523	0,04994	0,39044	0,35866	0,14755	0,24062	0,20657	-0,09761	0,14982
150	0,54707	0,03859	0,34504	0,35866	0,14755	0,24062	0,18841	-0,10896	0,10442

Tabella 20 - Risultati misure sensore 1

Posizione	Sensore 2 - CARICO			Sensore 2 - VUOTO			Sensore 2 - CARICO - VUOTO		
	Asse X	Asse Y	Asse Z	Asse X	Asse Y	Asse Z	Asse X	Asse Y	Asse Z
0	0,09761	-0,18387	-0,61971	0,26559	-0,18841	-0,73094	-0,16798	0,00454	0,11123
10	0,09988	-0,18614	-0,62198	0,26559	-0,18841	-0,73094	-0,16571	0,00227	0,10896
20	0,08626	-0,18614	-0,58566	0,26559	-0,18841	-0,73094	-0,17933	0,00227	0,14528
30	0,07491	-0,18614	-0,54707	0,26559	-0,18841	-0,73094	-0,19068	0,00227	0,18387
40	0,07945	-0,18841	-0,50167	0,26559	-0,18841	-0,73094	-0,18614	0	0,22927
50	0,09761	-0,19068	-0,44719	0,26559	-0,18841	-0,73094	-0,16798	-0,00227	0,28375
60	0,12485	-0,19749	-0,39952	0,26559	-0,18841	-0,73094	-0,14074	-0,00908	0,33142
70	0,17706	-0,2043	-0,36547	0,26559	-0,18841	-0,73094	-0,08853	-0,01589	0,36547
80	0,24062	-0,21111	-0,34731	0,26559	-0,18841	-0,73094	-0,02497	-0,0227	0,38363
90	0,31099	-0,21792	-0,35412	0,26559	-0,18841	-0,73094	0,0454	-0,02951	0,37682
100	0,37455	-0,22927	-0,37909	0,26559	-0,18841	-0,73094	0,10896	-0,04086	0,35185
110	0,42449	-0,23835	-0,42676	0,26559	-0,18841	-0,73094	0,1589	-0,04994	0,30418
120	0,45854	-0,25651	-0,48124	0,26559	-0,18841	-0,73094	0,19295	-0,0681	0,2497
130	0,46989	-0,27013	-0,53799	0,26559	-0,18841	-0,73094	0,2043	-0,08172	0,19295
140	0,46762	-0,27921	-0,59247	0,26559	-0,18841	-0,73094	0,20203	-0,0908	0,13847
150	0,45627	-0,28602	-0,63106	0,26559	-0,18841	-0,73094	0,19068	-0,09761	0,09988

Tabella 21 - Risultati misure sensore 2



Posizione	Sensore 3 - CARICO			Sensore 3 - VUOTO			Sensore 3 - CARICO - VUOTO		
	Asse X	Asse Y	Asse Z	Asse X	Asse Y	Asse Z	Asse X	Asse Y	Asse Z
0	0,12939	-0,08172	-0,26332	0,28375	-0,08626	-0,37455	-0,15436	0,00454	0,11123
10	0,1362	-0,07945	-0,26105	0,28375	-0,08626	-0,37455	-0,14755	0,00681	0,1135
20	0,12031	-0,08172	-0,22473	0,28375	-0,08626	-0,37455	-0,16344	0,00454	0,14982
30	0,1135	-0,08399	-0,18387	0,28375	-0,08626	-0,37455	-0,17025	0,00227	0,19068
40	0,11577	-0,08626	-0,13393	0,28375	-0,08626	-0,37455	-0,16798	0	0,24062
50	0,12939	-0,08853	-0,08626	0,28375	-0,08626	-0,37455	-0,15436	-0,00227	0,28829
60	0,1589	-0,0908	-0,03632	0,28375	-0,08626	-0,37455	-0,12485	-0,00454	0,33823
70	0,20657	-0,09534	0	0,28375	-0,08626	-0,37455	-0,07718	-0,00908	0,37455
80	0,26559	-0,10669	0,0227	0,28375	-0,08626	-0,37455	-0,01816	-0,02043	0,39725
90	0,32915	-0,11577	0,01589	0,28375	-0,08626	-0,37455	0,0454	-0,02951	0,39044
100	0,38817	-0,12485	-0,01135	0,28375	-0,08626	-0,37455	0,10442	-0,03859	0,3632
110	0,44038	-0,1362	-0,05448	0,28375	-0,08626	-0,37455	0,15663	-0,04994	0,32007
120	0,47216	-0,14755	-0,11123	0,28375	-0,08626	-0,37455	0,18841	-0,06129	0,26332
130	0,48578	-0,16117	-0,17025	0,28375	-0,08626	-0,37455	0,20203	-0,07491	0,2043
140	0,48578	-0,17252	-0,227	0,28375	-0,08626	-0,37455	0,20203	-0,08626	0,14755
150	0,47216	-0,1816	-0,27467	0,28375	-0,08626	-0,37455	0,18841	-0,09534	0,09988

Tabella 22 - Risultati misure sensore 3

Dati tali misure si possono graficare gli andamenti a carico, ovvero in presenza del magnete, dei tre sensori per ciascun asse: Figura 51(asse X) Figura 53(asse Y) Figura 52(asse Z):

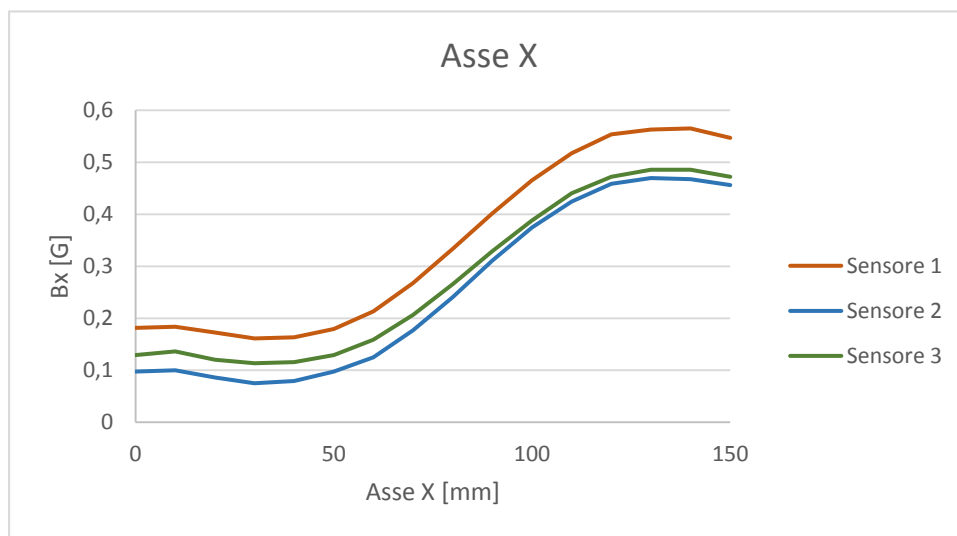


Figura 51 - Andamento delle misure a carico per l'asse X

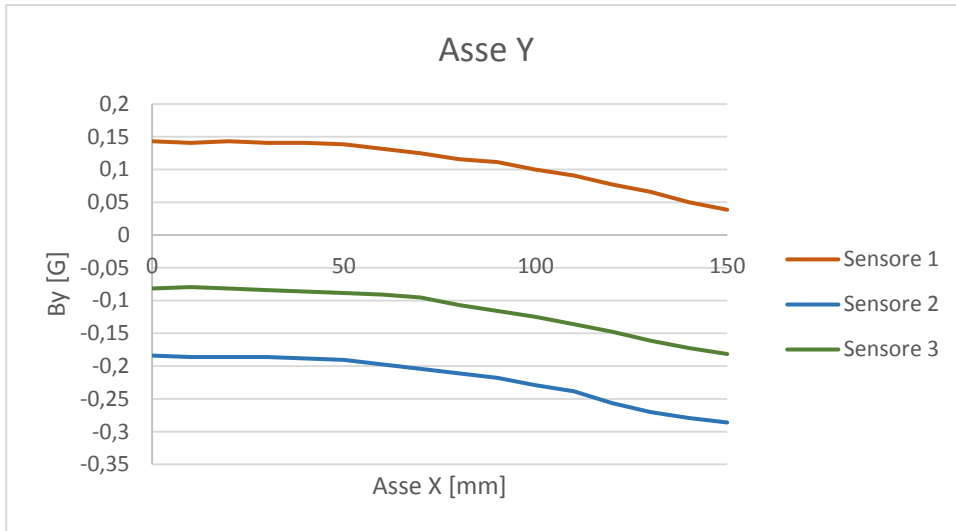


Figura 52 –Andamento delle misure a carico per l'asse Y

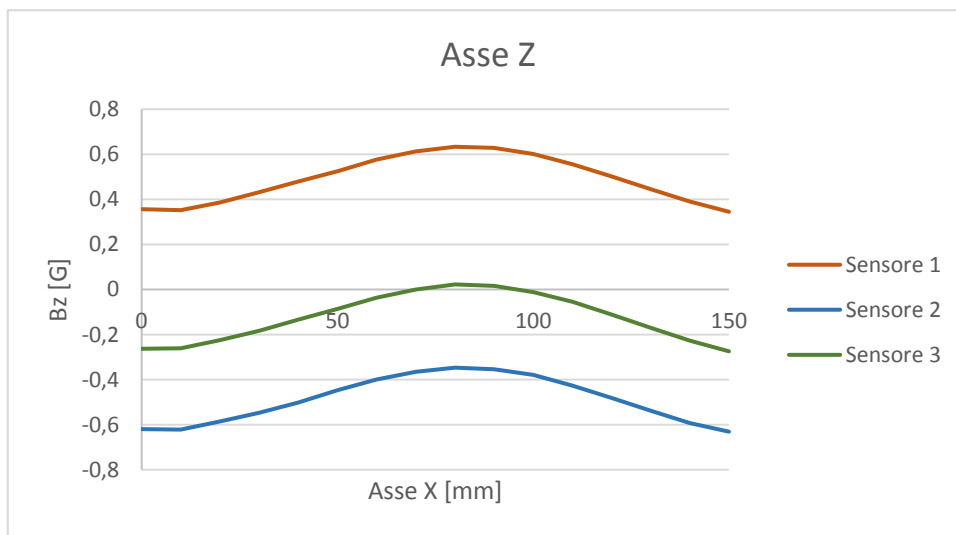


Figura 53 - Andamento delle misure a carico per l'asse Y

Visti gli offset che si registrano tra le misure è stato necessario eseguire una prova a vuoto per ogni sensore e sottrarre i risultati di essa a quelli precedentemente ottenuti. Si sono ricavati così gli andamenti mostrati in Figura 56 (Asse X) Figura 55 (Asse Y) e Figura 54 (Asse Z).

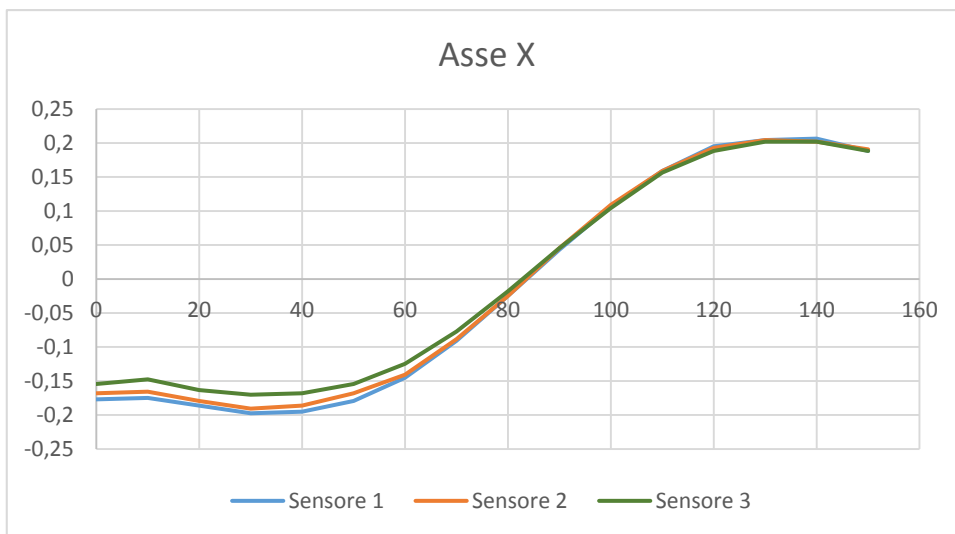


Figura 54 - Andamenti delle misure a carico meno quelle a vuoto per l'asse X

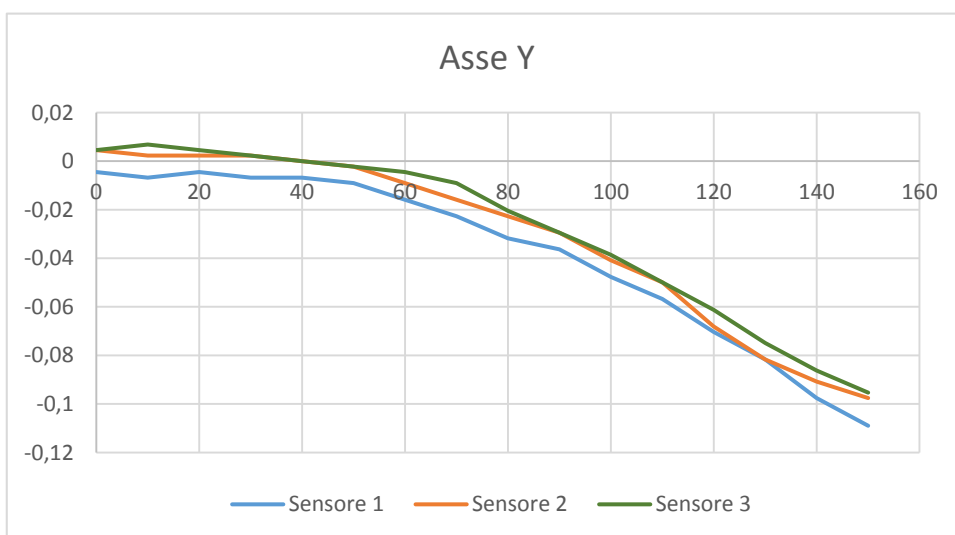


Figura 55 - Andamenti delle misure a carico meno quelle a vuoto per l'asse Y

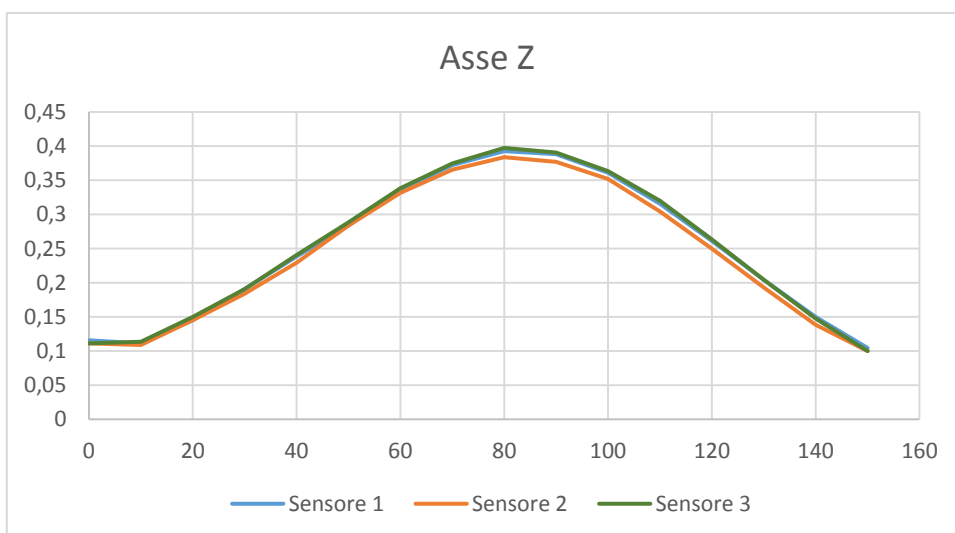


Figura 56 - Andamenti delle misure a carico meno quelle a vuoto per l'asse Z

Una volta garantita la ripetibilità della misura si procede a confrontare i valori realmente misurati con quelli generati per l'algoritmo di ottimizzazione.

Per eseguire questa prova si pone il magnete esattamente sopra il sensore e a una distanza di 50 [mm]. Si procede poi raccogliendo le misure dopo aver mosso il magnete con step di 5[mm] prima lungo l'asse Z, poi lungo l'asse X. I risultati di tali misurazioni depurati del rumore registrato con una prova a vuoto sono presenti in Tabella 23 e il confronto tra tali valori e quelli prodotti dall'algoritmo è presentato in Figura 57 e in Figura 58

Z [m]	Bx [G]	By[G]	Bz [G]	Br[G]
0	-0,20208	0,41841	4,89654	0,464654
0,005	-0,13852	0,32534	3,74111	0,353601
0,010	-0,0946	0,25615	2,88148	0,27306
0,015	-0,06438	0,20405	2,30496	0,213965
0,020	-0,04608	0,17207	1,79976	0,178133
0,025	-0,03504	0,14162	1,45416	0,14589
0,030	-0,02701	0,12191	1,19063	0,124866
0,035	-0,02044	0,10439	0,98258	0,106372
0,040	-0,01533	0,09052	0,82198	0,091809
0,045	-0,01022	0,07957	0,68912	0,080224
0,050	-0,00949	0,06935	0,57889	0,069996
0,055	-0,00949	0,06278	0,49129	0,063493
0,060	-0,0073	0,05913	0,41902	0,059579
0,065	-0,00657	0,05548	0,3577	0,055868
0,070	-0,00949	0,05183	0,30441	0,052692
0,075	-0,00876	0,04964	0,25696	0,050407
0,080	-0,00803	0,04964	0,22338	0,050285
0,085	-0,00876	0,04453	0,19272	0,045383
0,090	-0,00949	0,04526	0,16279	0,046244
0,095	-0,00949	0,04526	0,14454	0,046244
0,100	-0,01095	0,0438	0,12118	0,045148

Tabella 23 - Misure registrate al variare della distanza tra sensore e magnete

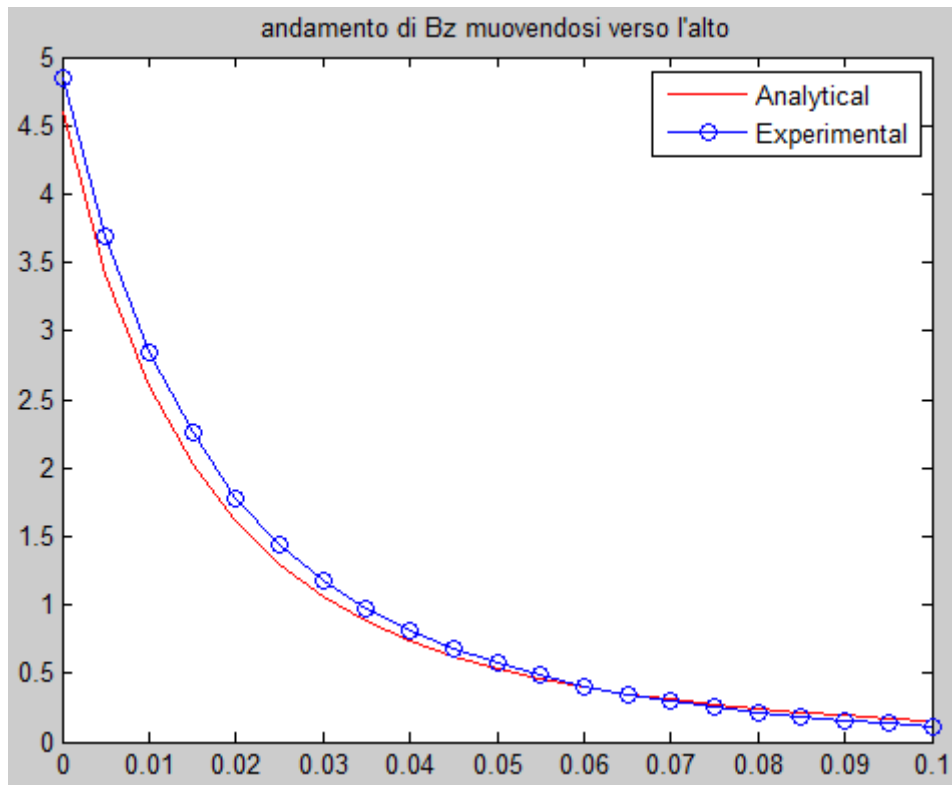


Figura 57 - Andamento di  $B_z$  [G] muovendosi lungo  $Z$  [m]

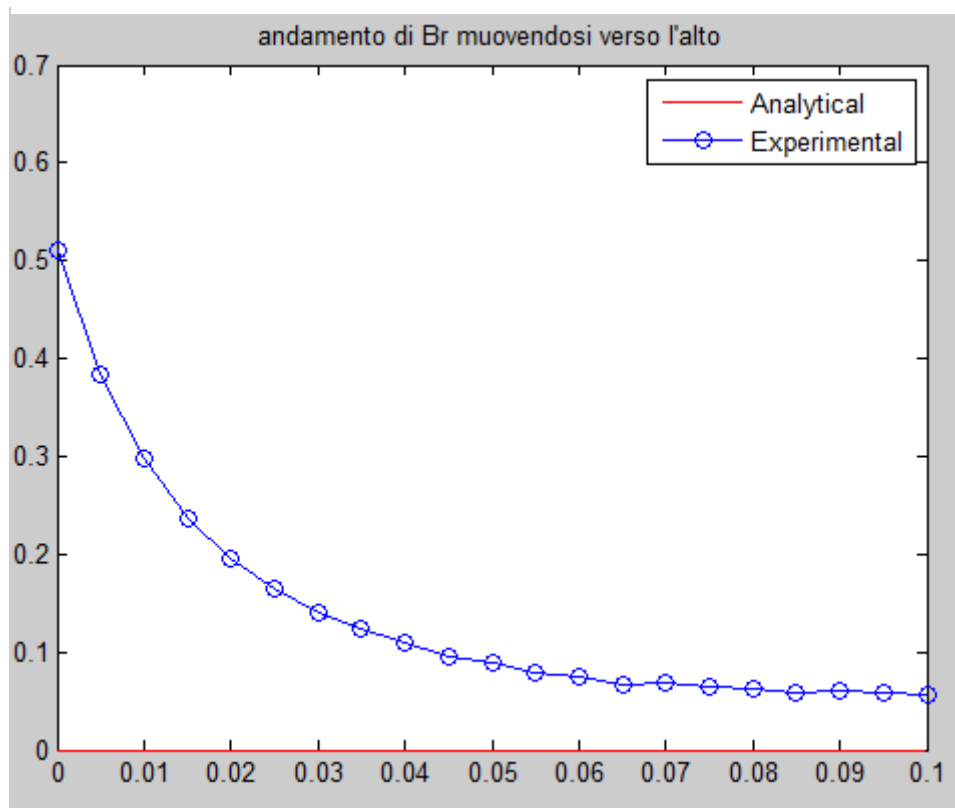


Figura 58 - Andamento di  $B_r$  [G] muovendosi lungo l'asse  $Z$  [m]

Si nota quindi che la componente  $B_z$  si adatta molto bene a quella calcolata, mentre per quel che riguarda la componente radiale la sua presenza sta ad indicare che il centro del sensore non era esattamente allineato con quello del magnete. Essa è comunque dell'ordine del 10% rispetto alla componente verticale.

Per quel che riguarda il caso in cui il magnete si muova lungo l'asse X del sensore, le misure raccolte sono presentate nella Tabella 24, e i confronti con quelle prodotte dall'algorithmo nelle Figura 59 e Figura 60:

<b>X [m]</b>	<b>Bx [G]</b>	<b>By [G]</b>	<b>Bz [G]</b>	<b>Br [G]</b>
0	-0,28137	0,44905	4,91786	0,52992
0,005	0,34288	0,44451	4,81344	0,561387
0,010	0,91946	0,41273	4,4457	1,007846
0,015	1,34622	0,36733	3,86912	1,395435
0,020	1,55934	0,30977	3,18639	1,589811
0,025	1,63924	0,24751	2,57093	1,657821
0,030	1,51446	0,19497	1,91571	1,526959
0,035	1,35926	0,14454	1,4162	1,366923
0,040	1,17238	0,10074	1,00886	1,1767
0,045	0,98404	0,07154	0,7081	0,986637
0,050	0,80811	0,04672	0,48034	0,809459
0,055	0,65627	0,02555	0,31098	0,656767
0,060	0,52633	0,01095	0,1898	0,526444
0,065	0,41683	-0,00073	0,10512	0,416831
0,070	0,33288	-0,00949	0,05183	0,333015
0,075	0,2628	-0,01606	0,00949	0,26329
0,080	0,20513	-0,02044	-0,0146	0,206146
0,085	0,16206	-0,0219	-0,0292	0,163533
0,090	0,12337	-0,02409	-0,03577	0,1257
0,095	0,09636	-0,02336	-0,03869	0,099151
0,100	0,07008	-0,02482	-0,03577	0,074345

*Tabella 24 - Misure raccolte muovendosi lungo l'asse X*

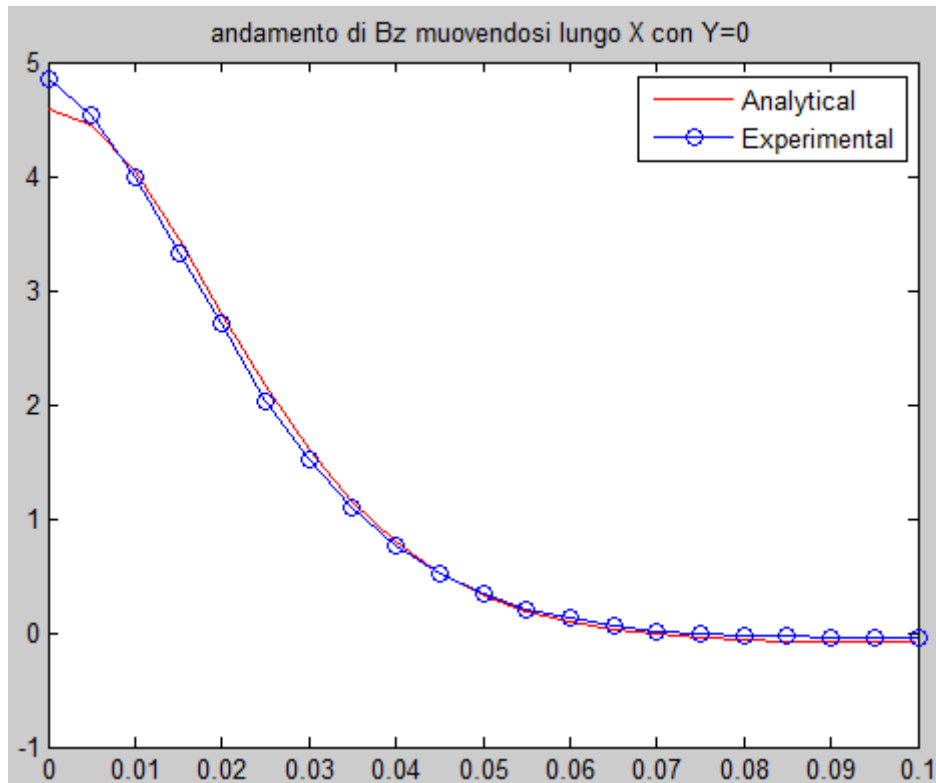


Figura 59 - Andamento di  $B_z$  [G] muovendosi lungo  $X$  [m]

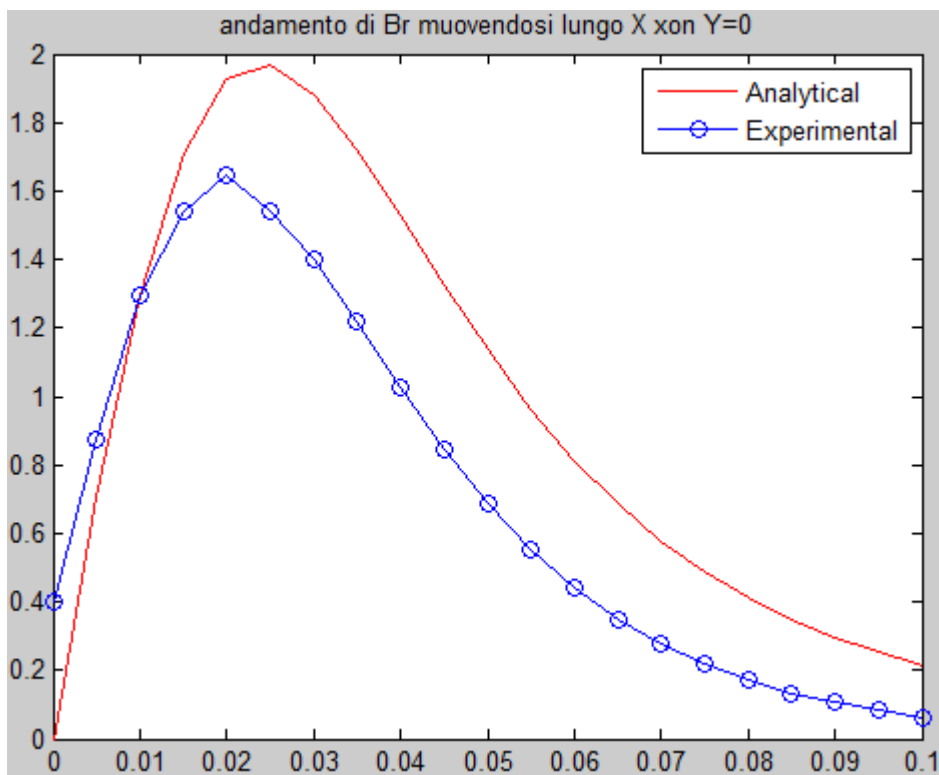


Figura 60 - Andamento di  $B_r$  [G] muovendosi lungo  $X$  [m]

Anche in questo caso l'andamento di  $B_z$  è coerente con il calcolo, mentre si riscontra un errore piuttosto marcato sulla componente radiale.

Per verificare quale sia la ragione di tale errore si procede ad assicurare l'assenza di eventuali inclinazioni nel piano del sensore e/o in quello del magnete, inoltre si procede ad eseguire le misure lungo assi paralleli all'asse X e spostati rispetto al centro del sensore di  $\pm 5$ [mm] e di  $\pm 10$ [mm] lungo Y. I risultati sono presentati in Figura 61 e in Figura 62:

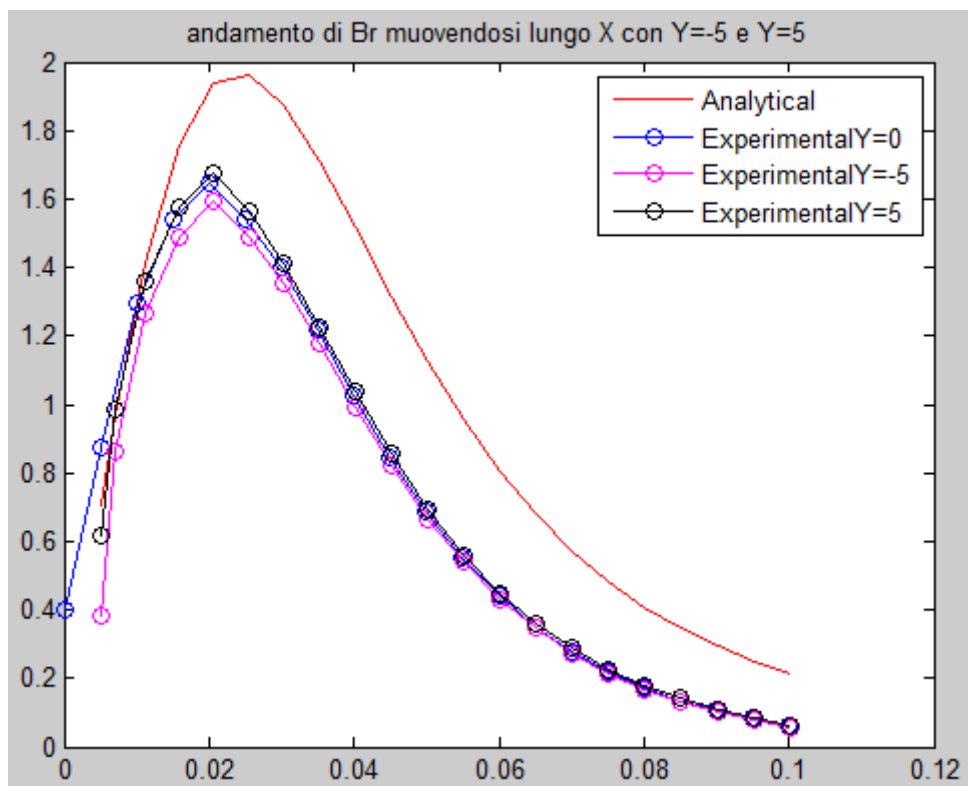


Figura 61 - Andamento di  $B_r$  [G] muovendosi di più e meno 5 [mm] dal centro del sensore

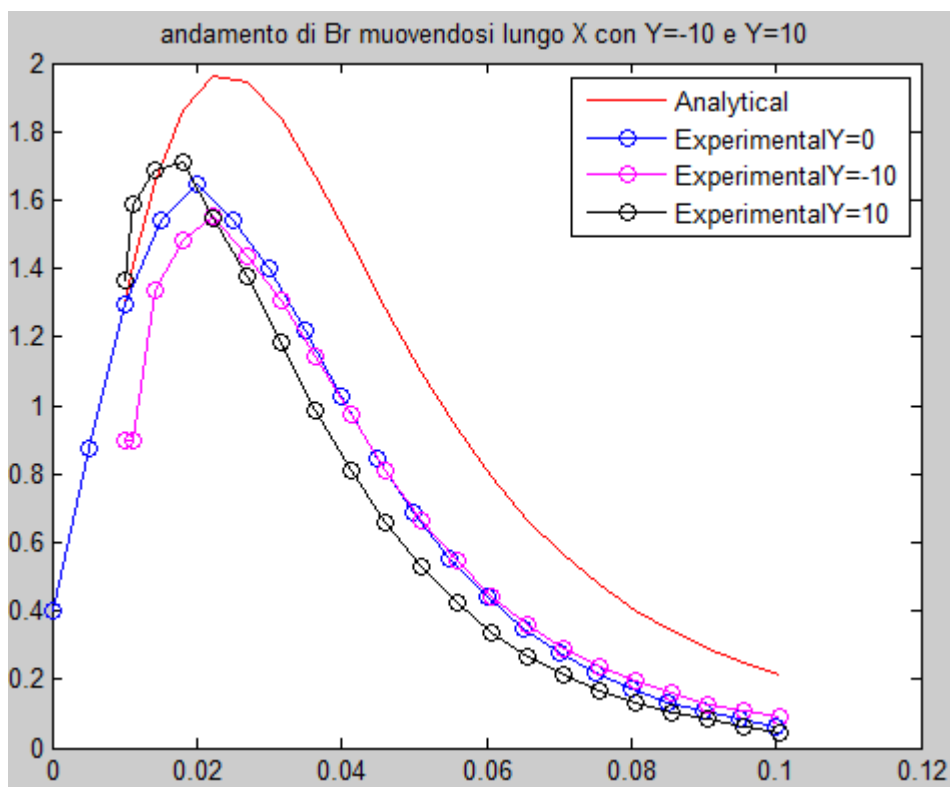


Figura 62 - Andamento di  $B_r$  [G] muovendosi di più e meno 10 [mm] dal centro del sensore



Si nota come l'errore persiste e in particolare esso si elimina solamente amplificando i risultati del 20% e inserendo uno sfasamento fisso di 0.1 (Figura 63)

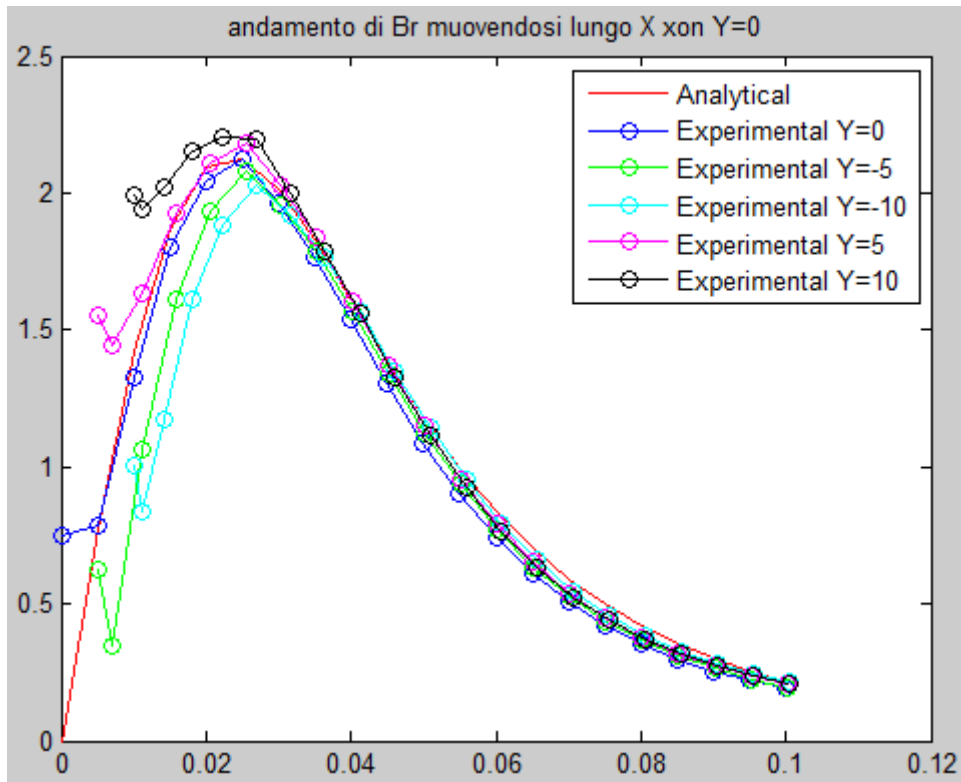


Figura 63 - Andamento di Br [G] corretto

Le cause di tale comportamento sono tuttavia da chiarire.

### 3.4 - Misure con 9 sensori.

Poiché il sensore HMC5883L è caratterizzato da un indirizzo fisso e imm modificabile è impossibile ottenere una misura contemporanea di tutti i sensori. Per ovviare a questo inconveniente si è introdotto un leggero ritardo tra le misure e si è partizionato il segnale dati del I2C attraverso un MULTIPLEXER CD74HC4067 (Figura 64) da 16 canali

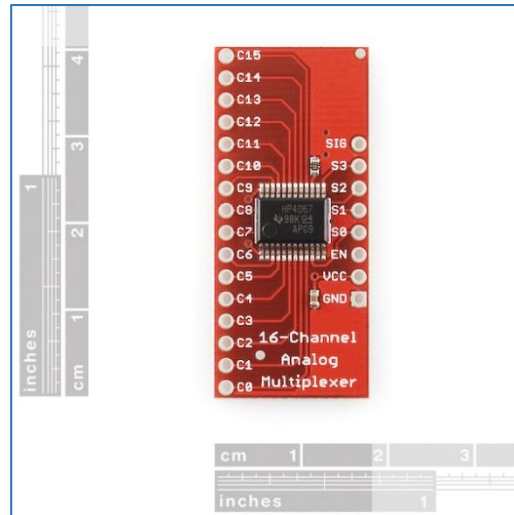


Figura 64 - Multiplexer

Il Multiplexer è un dispositivo che a seconda di come viene comandato in S0, S1, S2 e S3 collega il canale SIG all'uscita C0,C1,C2... come indicato in Tabella 25: [10]

S0	S1	S2	S3	E	SELECTED CHANNEL
X	X	X	X	1	None
0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	1
0	1	0	0	0	2
1	1	0	0	0	3
0	0	1	0	0	4
1	0	1	0	0	5
0	1	1	0	0	6
1	1	1	0	0	7
0	0	0	1	0	8
1	0	0	1	0	9
0	1	0	1	0	10
1	1	0	1	0	11
0	0	1	1	0	12
1	0	1	1	0	13
0	1	1	1	0	14
1	1	1	1	0	15

Tabella 25 - Comandi del multiplexer

Il comando dei segnali S0,...,S3 viene fornito attraverso la morsettiera MXP B del myRIO, in particolare usando le uscite DIO0, DIO1, DIO2,DIO3, mentre alla morsettiera MXP A viene collegata l'alimentazione, SDA e SCL dell'I2C e i segnali DRDY di ciascun sensore.

Le misure vengono quindi eseguite con una versione modificata del **Compass demo.vi** presentata in Figura 65 (front panel) in cui ogni 0,1 [ms] si commuta da un sensore all'altro e per prima cosa si comanda il multiplexer per selezionare l'uscita del sensore e poi si esegue la misura che viene registrata da una versione del **Misura\_tra\_step.vi** modificata per memorizzare le misure dei 9 sensori al posto di uno solo.

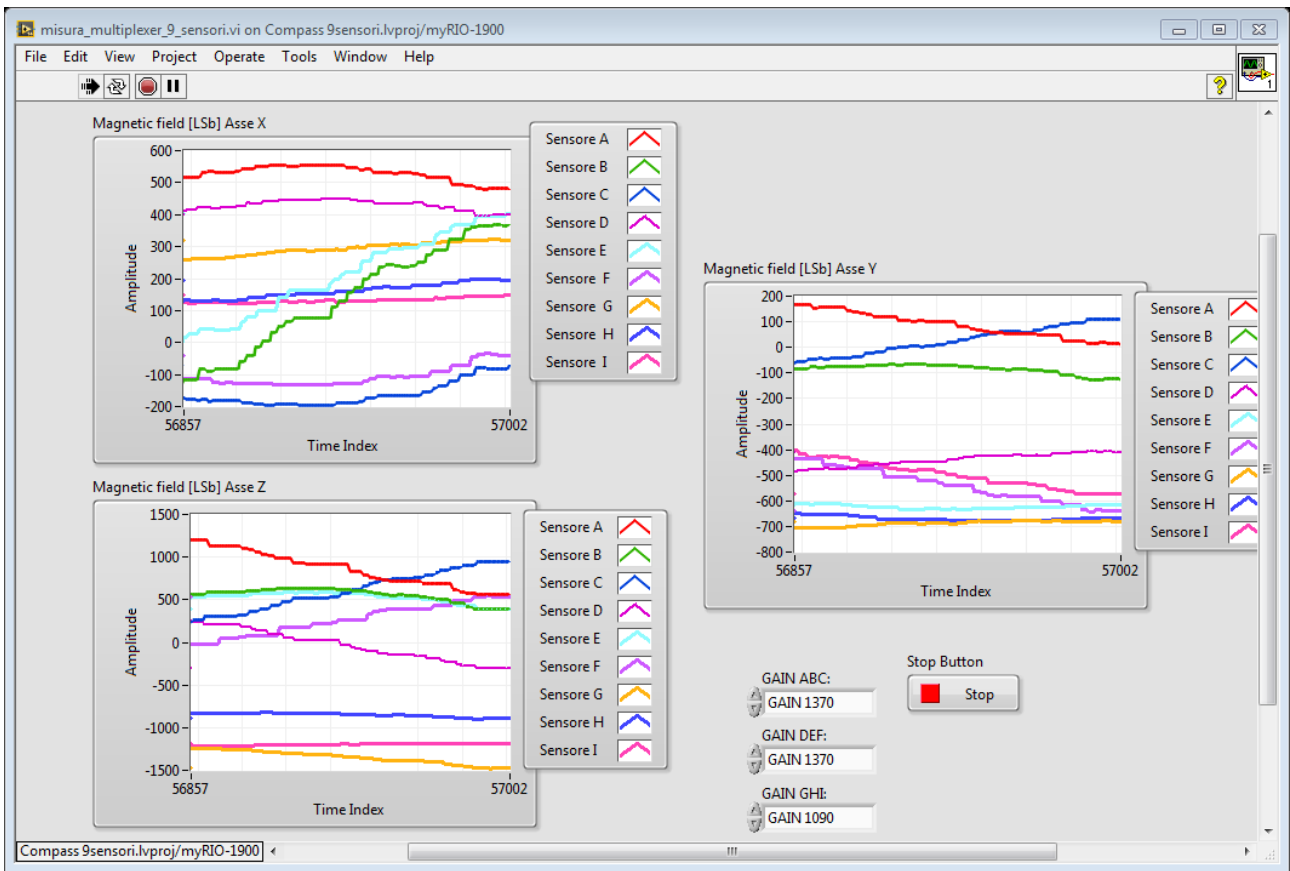


Figura 65 - Front Panel del VI Compass con 9 sensori

Una piccola nota si può fare osservando che è sono stati resi modificabili da front panel anche i valori di fondo scala con cui eseguire la misura.

Si procede quindi al confronto tra le misure raccolte per varie posizioni del magnete, con i rispettivi valori del campo calcolati. Il confronto si fa solamente per la componente  $B_z$ .

Questi confronti sono stati eseguiti con il codice presente nell'Appendice 2.

Caso 1: magnete posizionato sopra il sensore A posto a 50 [mm] da esso.

La configurazione si presenta come in Figura 66:

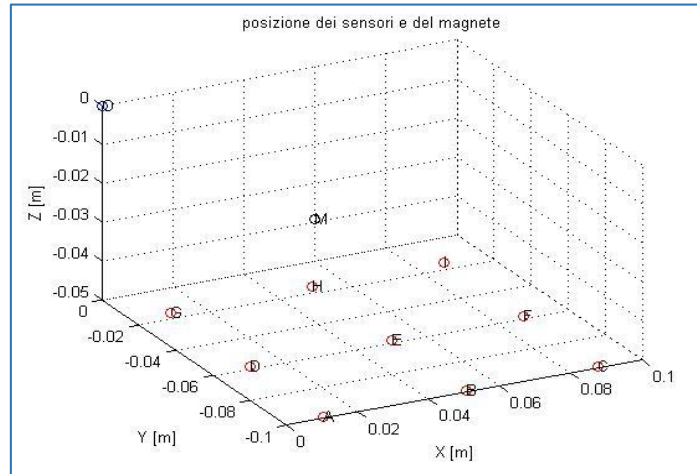


Figura 66 - Posizione dei sensori e del magnete nel caso 1

I valori di  $B_z$  misurati in queste condizioni sono presentati in Figura 67, mentre quelli calcolati sono riportati in Figura 68:

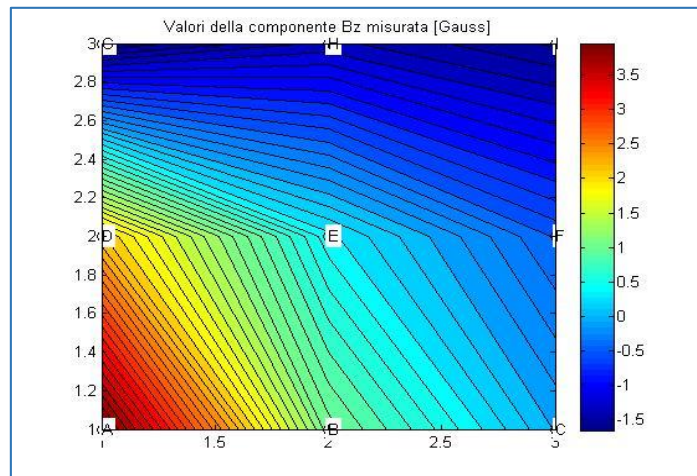


Figura 67 – Mappa della componente  $B_z$  misurata

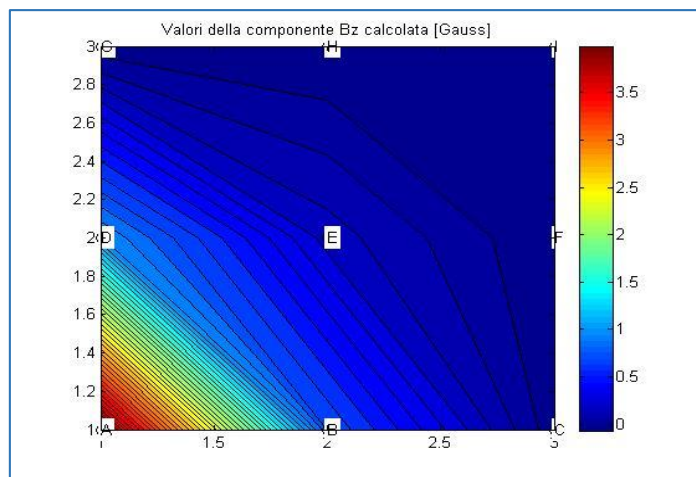


Figura 68 - Mappa di Bz calcolata

Caso 2 magnete posizionato sopra il sensore B posto a 50 [mm] da esso.

La configurazione dei sensori e del magnete si presenta come in Figura 69:

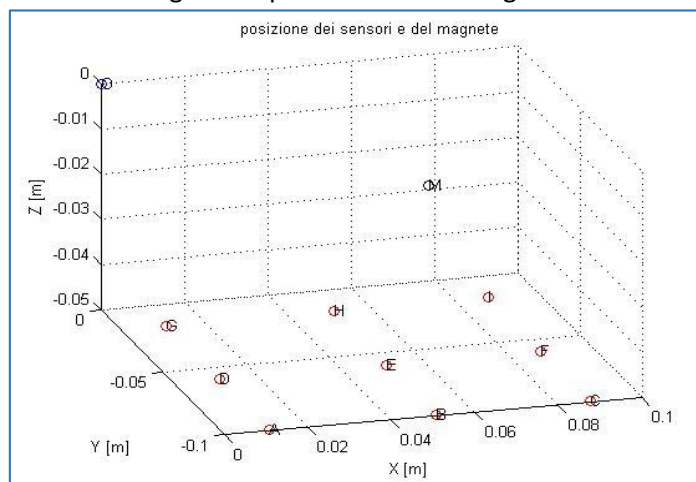


Figura 69 - Posizione dei sensori e del magnete nel caso 2

I valori di Bz misurati in queste condizioni sono presentati in Figura 70, mentre quelli calcolati sono riportati in Figura 71:

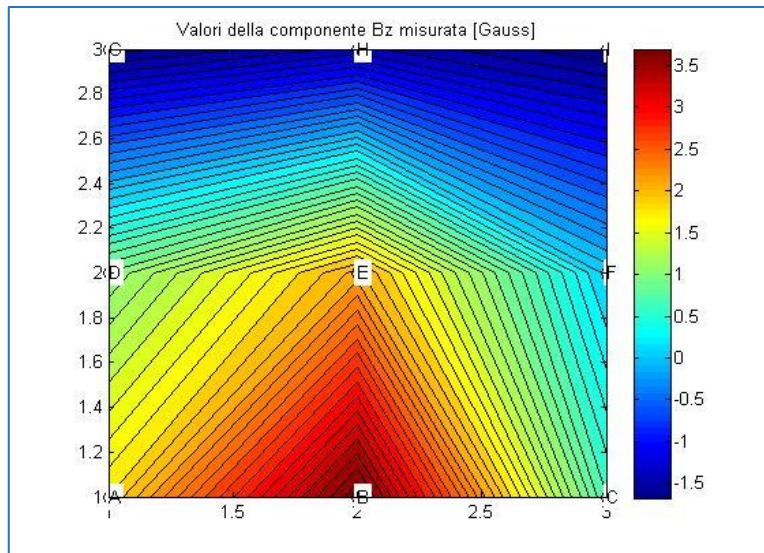


Figura 70 - Mappa della componente Bz misurata

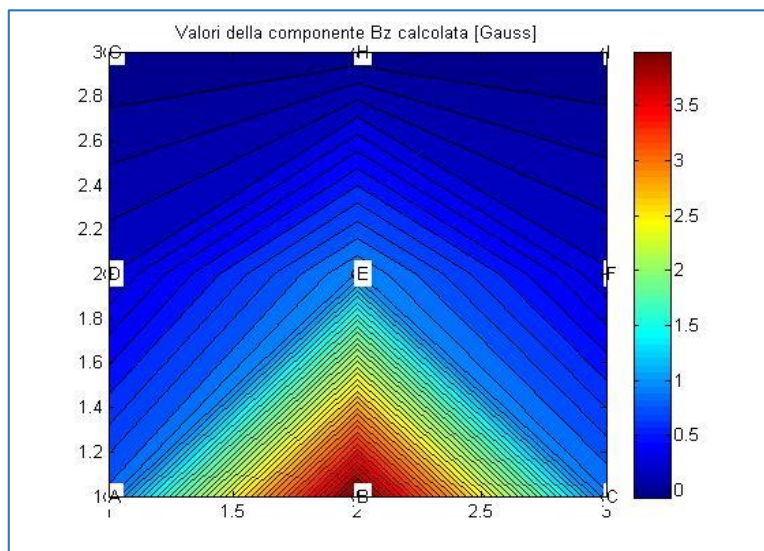


Figura 71 - Mappa di Bz calcolata

Caso 3: magnete posizionato sopra il sensore C posto a 50 [mm] da esso  
 La configurazione si presenta come in Figura 72:

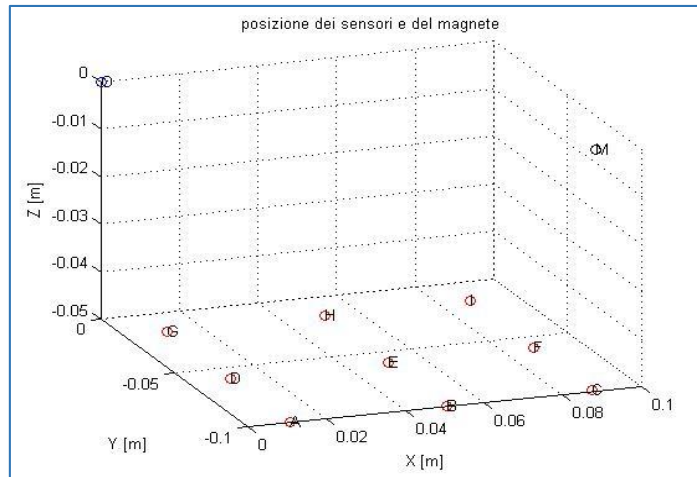


Figura 72 - Posizione dei sensori e del magnete nel caso 3

I valori di  $B_z$  misurati in queste condizioni sono presentati in Figura 73, mentre quelli calcolati sono riportati in Figura 74:

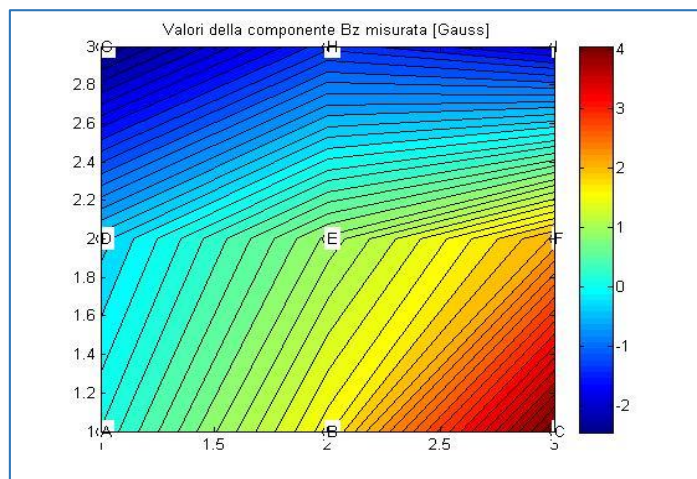


Figura 73 - Mappa di  $B_z$  misurata

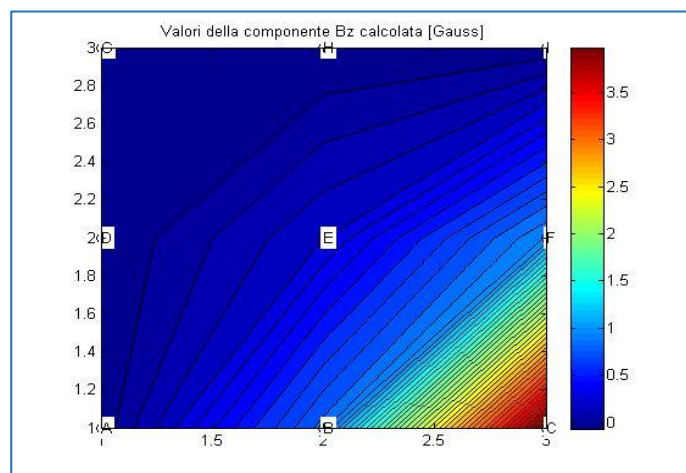


Figura 74 - Mappa di  $B_z$  calcolata

Caso 4: magnete posizionato sopra il sensore D posto a 50 [mm] da esso  
La configurazione si presenta come in Figura 75:

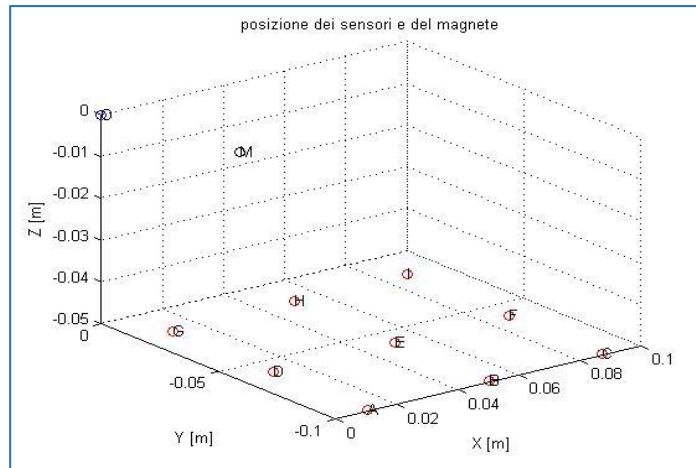


Figura 75 - Posizione dei sensori e del magnete

I valori di  $B_z$  misurati in queste condizioni sono presentati in Figura 76, mentre quelli calcolati sono riportati in Figura 77:

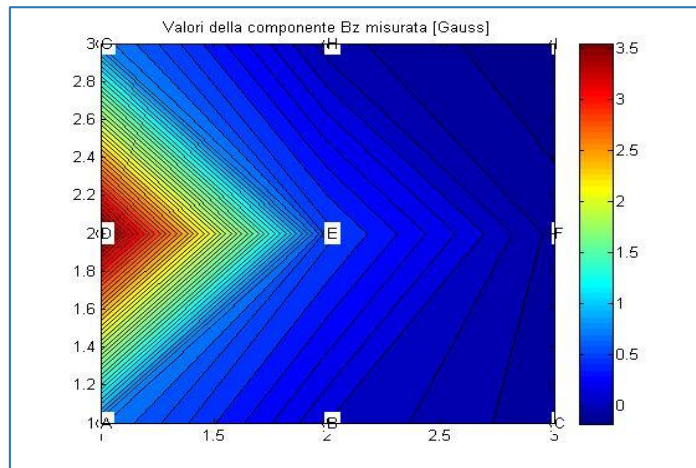


Figura 76 - Mappa di  $B_z$  misurata

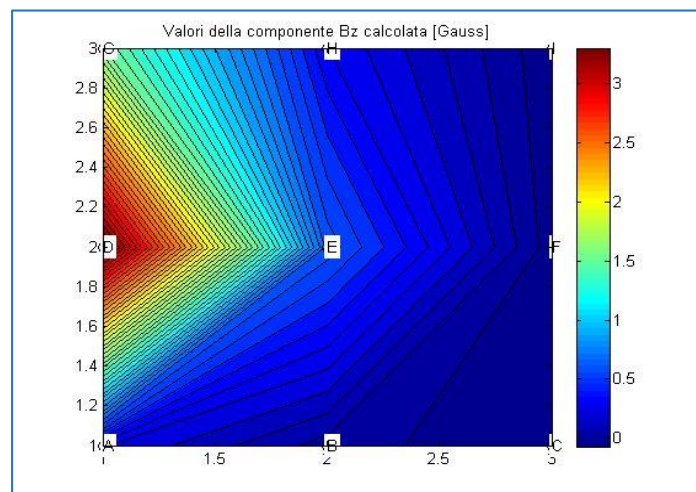


Figura 77 - Mappa di  $B_z$  calcolata



Caso 5: magnete posizionato sopra il sensore E posto a 50 [mm] da esso  
La configurazione si presenta come in Figura 78:

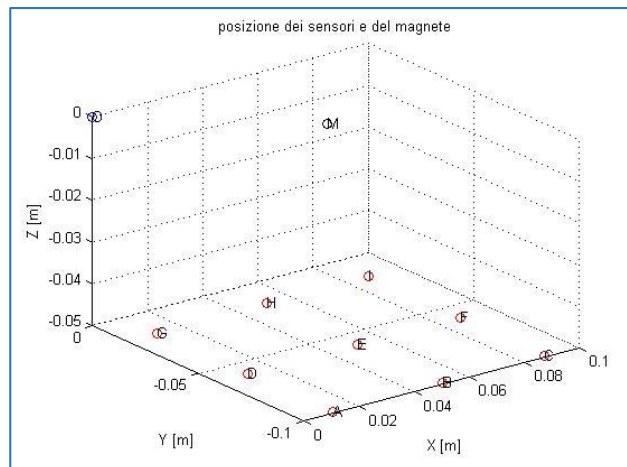


Figura 78 - Posizione dei sensori e del magnete

I valori di  $B_z$  misurati in queste condizioni sono presentati in Figura 79, mentre quelli calcolati sono riportati in Figura 80:

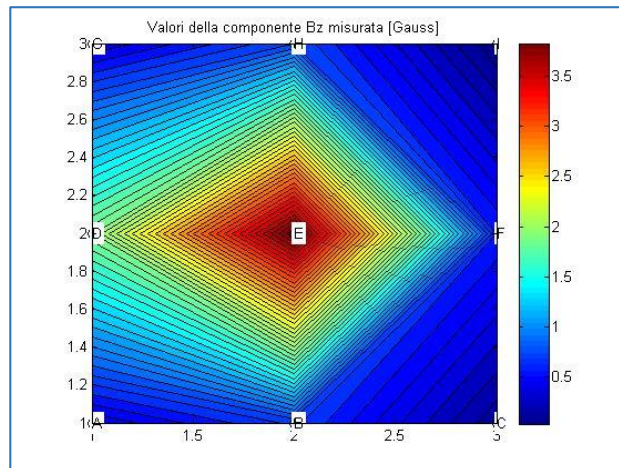


Figura 79 - Mappa di  $B_z$  misurata

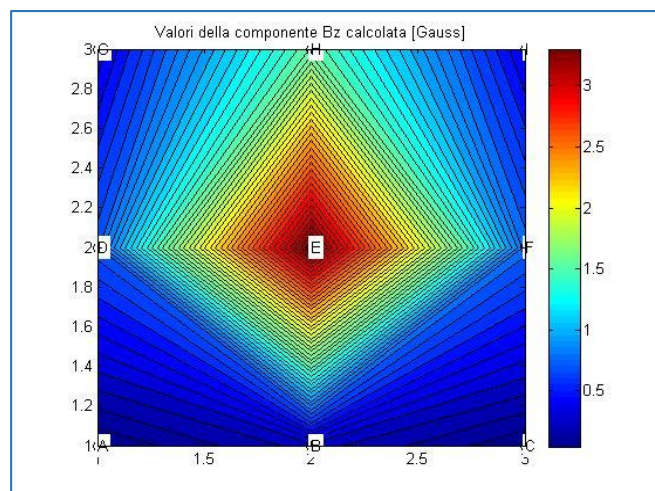


Figura 80 - Mappa di  $B_z$  calcolata

Caso 6: magnete posizionato sopra il sensore F posto a 50 [mm] da esso  
La configurazione si presenta come in Figura 81:

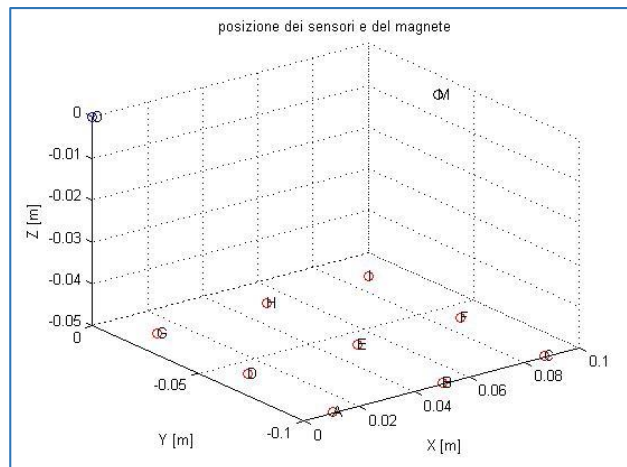


Figura 81 - Posizione dei sensori e del magnete

I valori di  $B_z$  misurati in queste condizioni sono presentati in Figura 82, mentre quelli calcolati sono riportati in Figura 83:

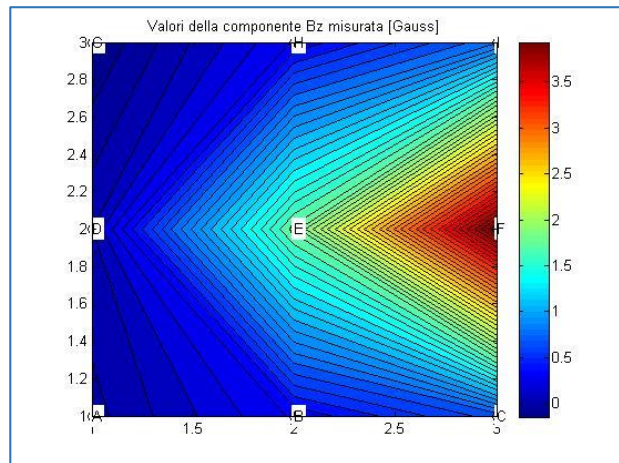


Figura 82 - Mappa di  $B_z$  misurata

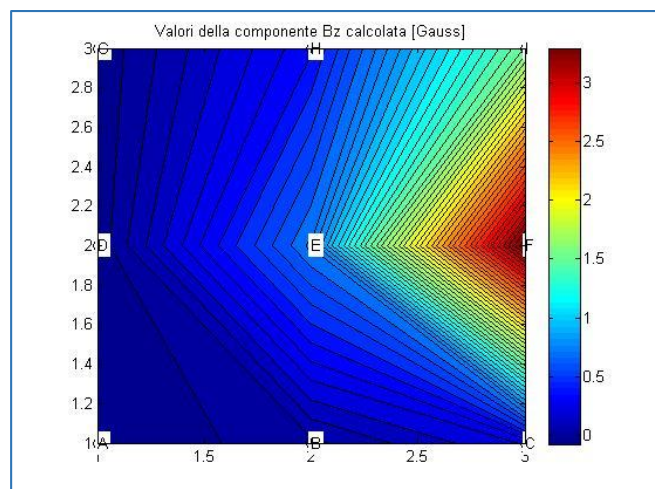


Figura 83 - Mappa di  $B_z$  calcolata

Caso 7: magnete posizionato sopra il sensore G posto a 50 [mm] da esso  
La configurazione si presenta come in Figura 84:

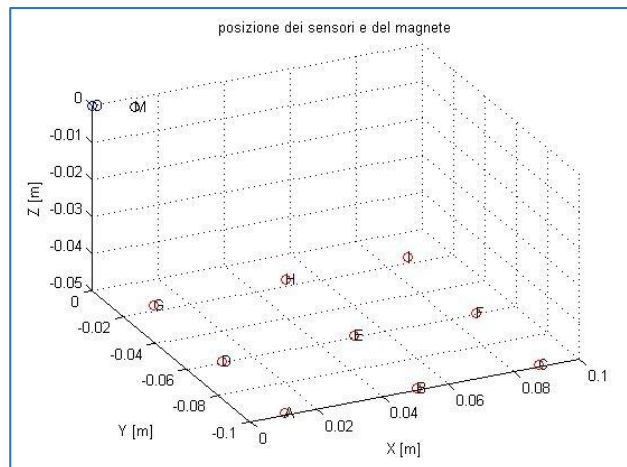


Figura 84 - Posizione dei sensori e del magnete

I valori di  $B_z$  misurati in queste condizioni sono presentati in Figura 85, mentre quelli calcolati sono riportati in Figura 86:

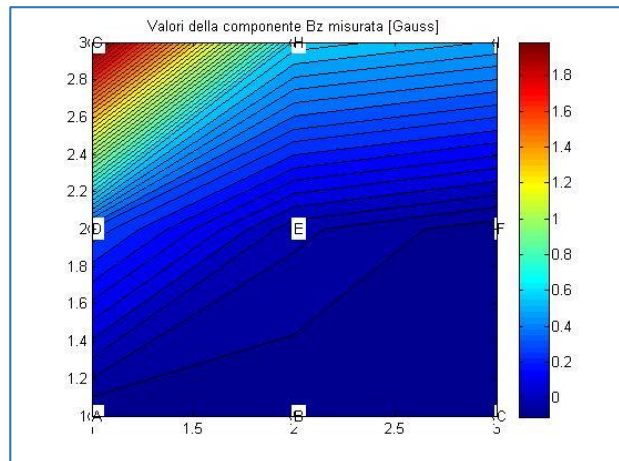


Figura 85 - Mappa di  $B_z$  misurata

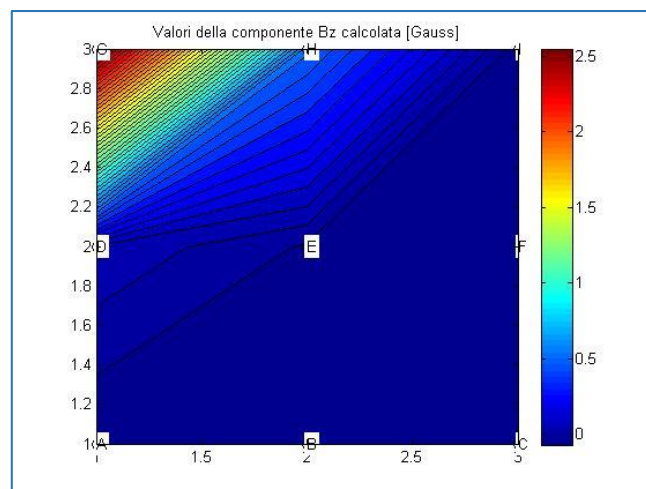


Figura 86 - Mappa di  $B_z$  calcolata

Caso 8: magnete posizionato sopra il sensore H posto a 50 [mm] da esso  
La configurazione si presenta come in Figura 87

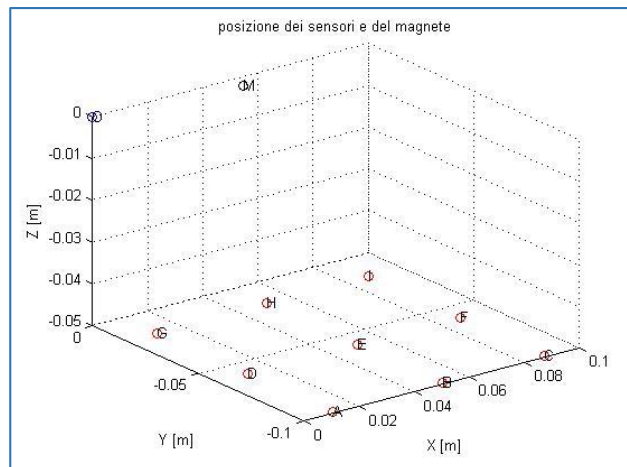


Figura 87 - Posizione dei sensori e del magnete

I valori di  $B_z$  misurati in queste condizioni sono presentati in Figura 88, mentre quelli calcolati sono riportati in Figura 89

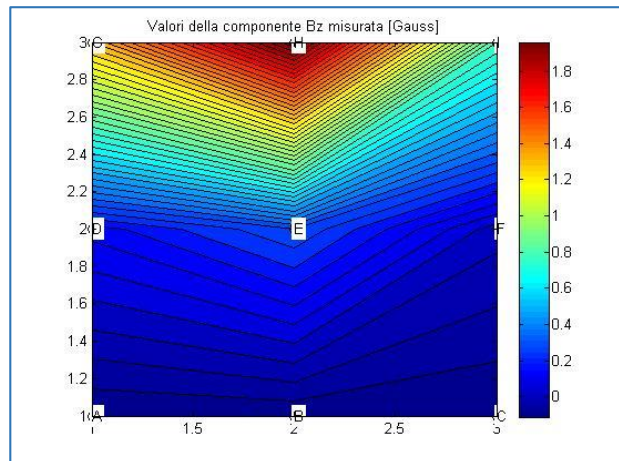


Figura 88 - Mappa di  $B_z$  misurata

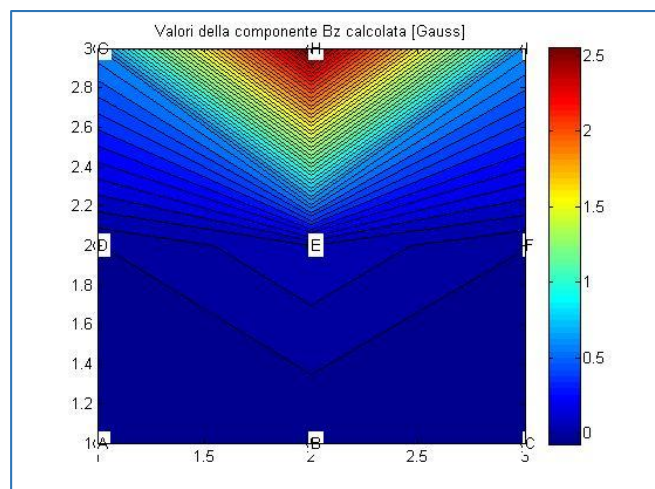


Figura 89 - Mappa di  $B_z$  calcolata

Caso 9: magnete posizionato sopra il sensore I posto a 50 [mm] da esso  
La configurazione si presenta come in Figura 90

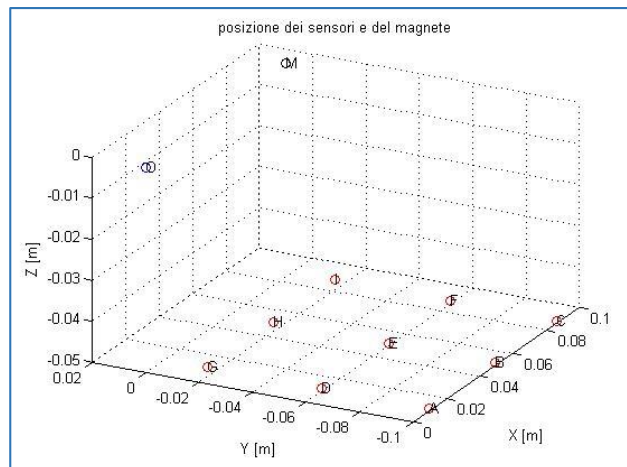


Figura 90 - Posizione dei sensori e del magnete

I valori di  $B_z$  misurati in queste condizioni sono presentati in Figura 91, mentre quelli calcolati sono riportati in Figura 92

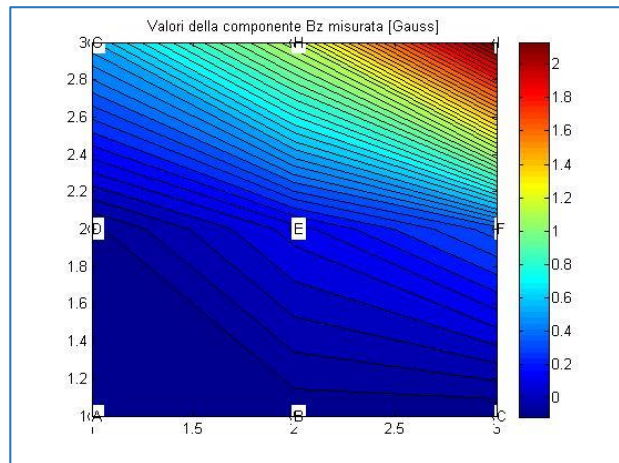


Figura 91 - Mappa di  $B_z$  misurata

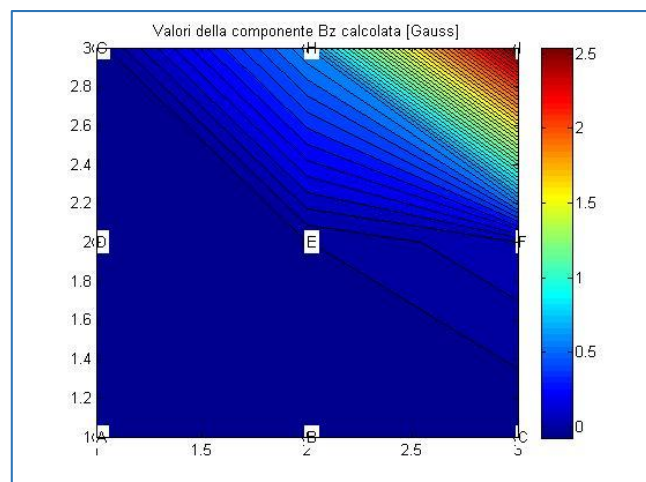


Figura 92 - Mappa di  $B_z$  calcolata

Caso 10: magnete posizionato sopra il sensore A posto a 10 [mm] da esso  
La configurazione si presenta come in Figura 93

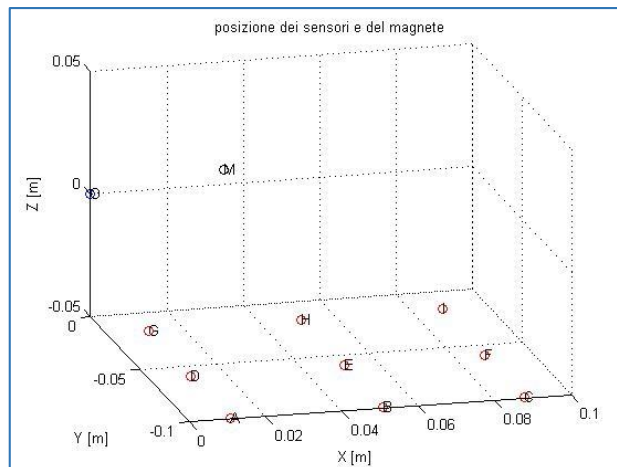


Figura 93 - Posizione dei sensori e del magnete

I valori di  $B_z$  misurati in queste condizioni sono presentati in Figura 94, mentre quelli calcolati sono riportati in Figura 95

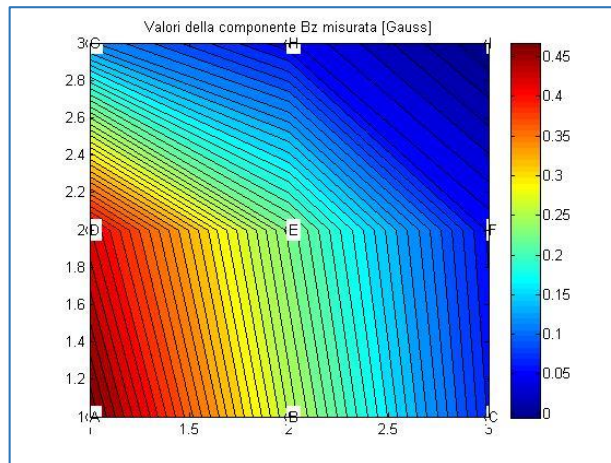


Figura 94 - Mappa di  $B_z$  misurata

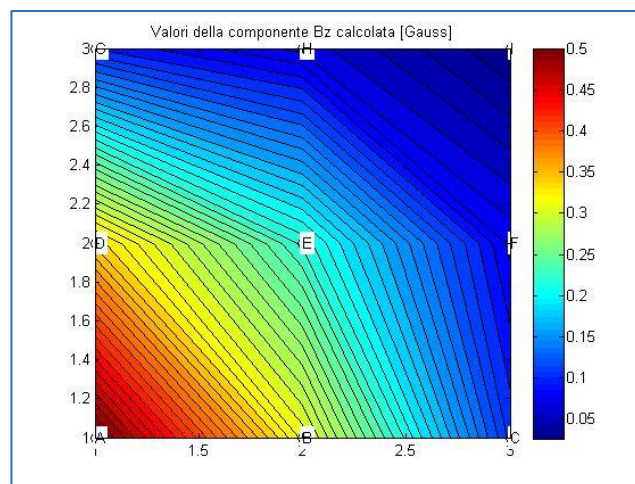


Figura 95 - Mappa di  $B_z$  calcolata

Caso 11: magnete posizionato sopra il sensore B posto a 10 [mm] da esso  
La configurazione si presenta come in Figura 96

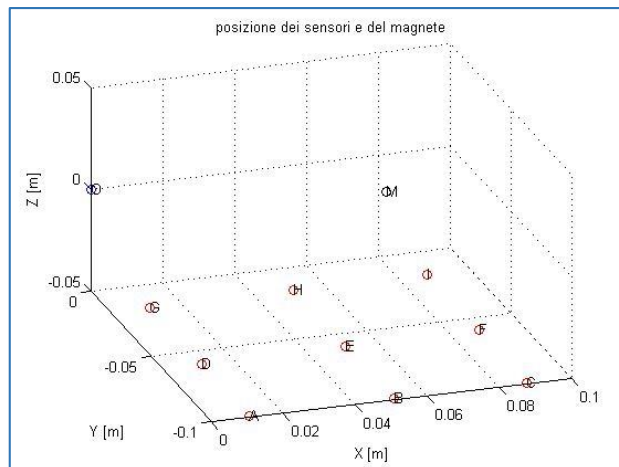


Figura 96 - Posizione dei sensori e del magnete

I valori di  $B_z$  misurati in queste condizioni sono presentati in Figura 97, mentre quelli calcolati sono riportati in Figura 98

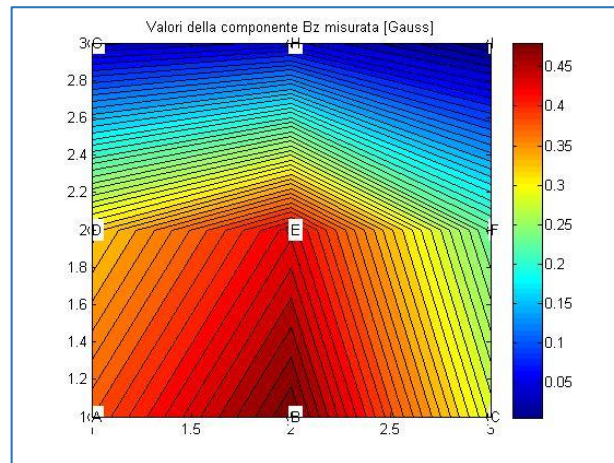


Figura 97 - Mappa di  $B_z$  misurata

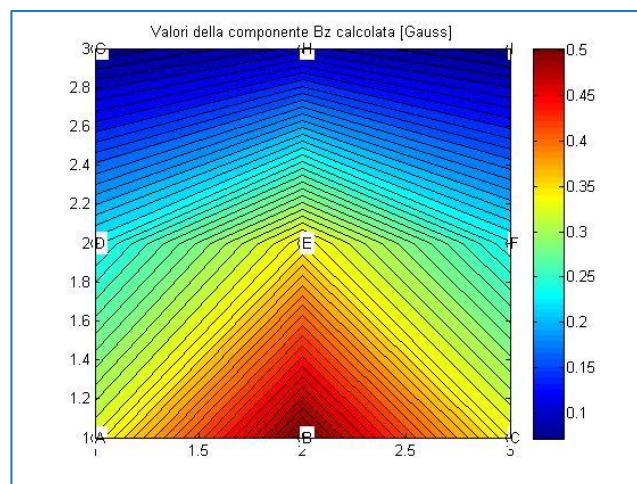


Figura 98 - Mappa di  $B_z$  calcolata

Caso 12: magnete posizionato sopra il sensore C posto a 10 [mm] da esso  
 La configurazione si presenta come in Figura 99:

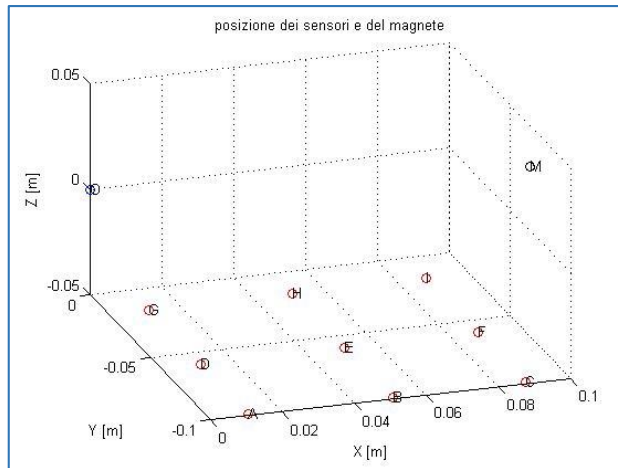


Figura 99 - Posizione dei sensori e del magnete

I valori di  $B_z$  misurati in queste condizioni sono presentati in Figura 101, mentre quelli calcolati sono riportati in Figura 100

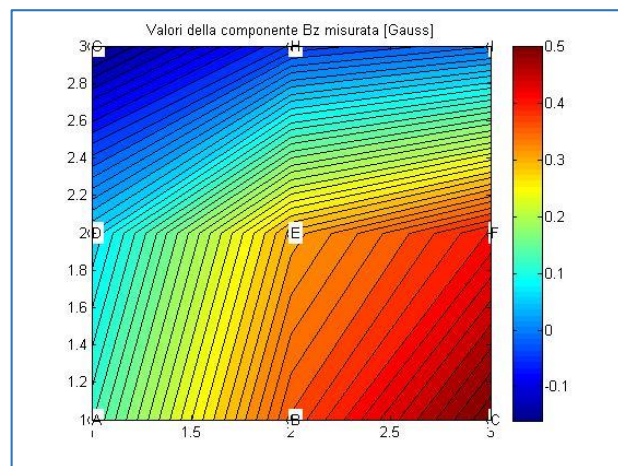


Figura 101 - Mappa di  $B_z$  misurata

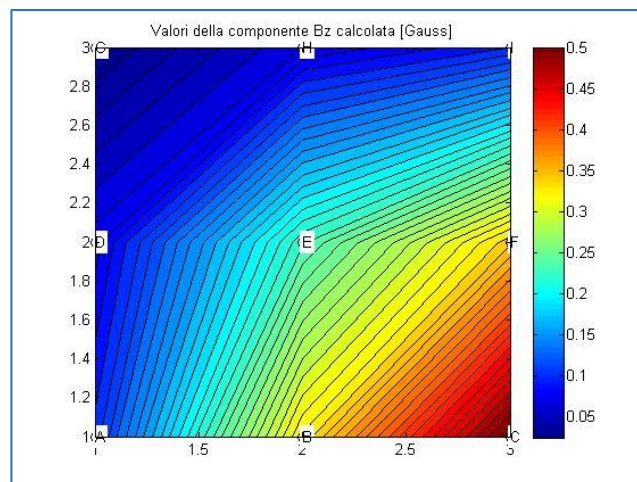


Figura 100 - Mappa di  $B_z$  calcolata



Caso 13: magnete posizionato sopra il sensore D posto a 10 [mm] da esso  
 La configurazione si presenta come in Figura 102

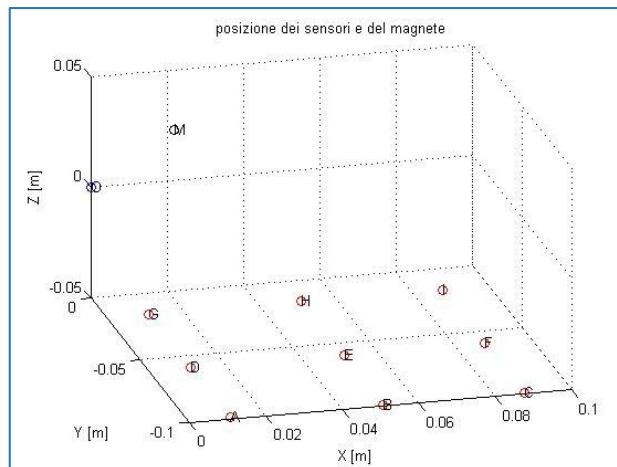


Figura 102 - Posizione dei sensori e del magnete

I valori di  $B_z$  misurati in queste condizioni sono presentati in Figura 103, mentre quelli calcolati sono riportati in Figura 104

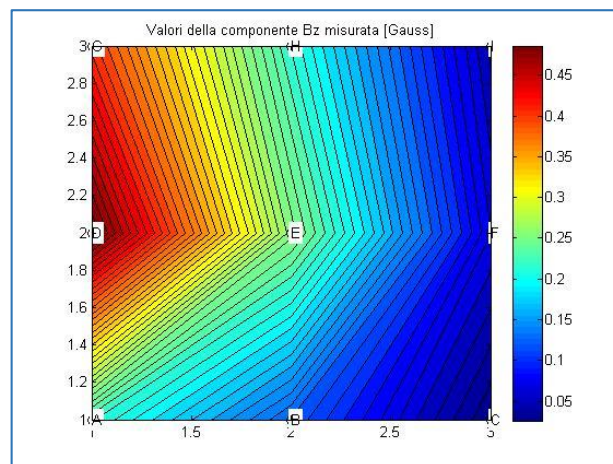


Figura 103 - Mappa di  $B_z$  misurata

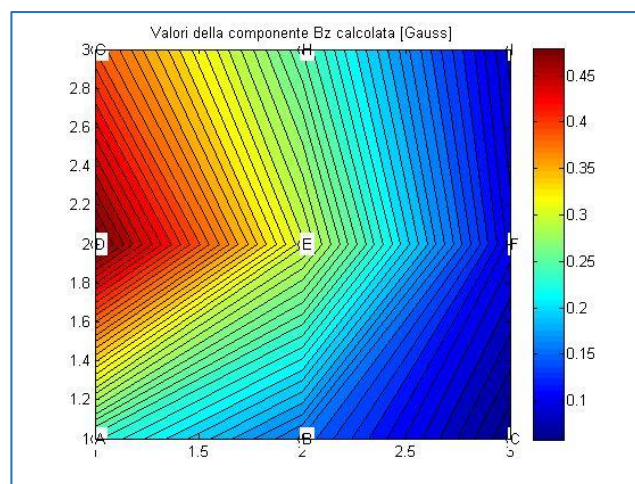


Figura 104 - Mappa di  $B_z$  calcolata

Caso 14: magnete posizionato sopra il sensore E posto a 10 [mm] da esso  
La configurazione si presenta come in Figura 105

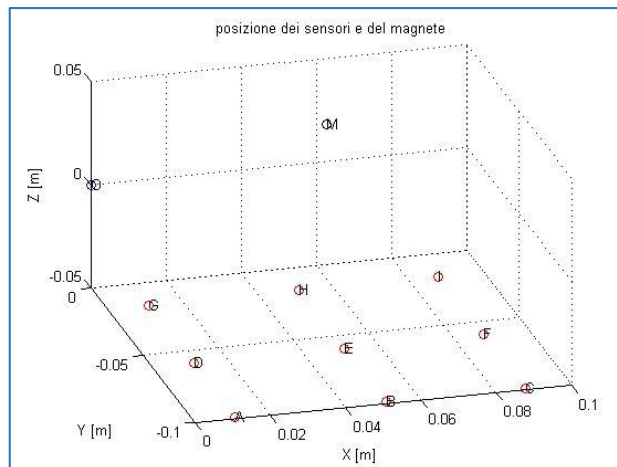


Figura 105 - Posizione dei sensori e del magnete

I valori di  $B_z$  misurati in queste condizioni sono presentati in Figura 106, mentre quelli calcolati sono riportati in Figura 107

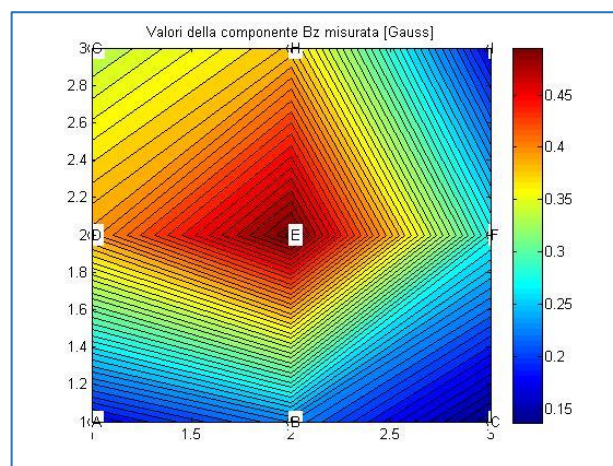


Figura 106 - Mappa di  $B_z$  misurata

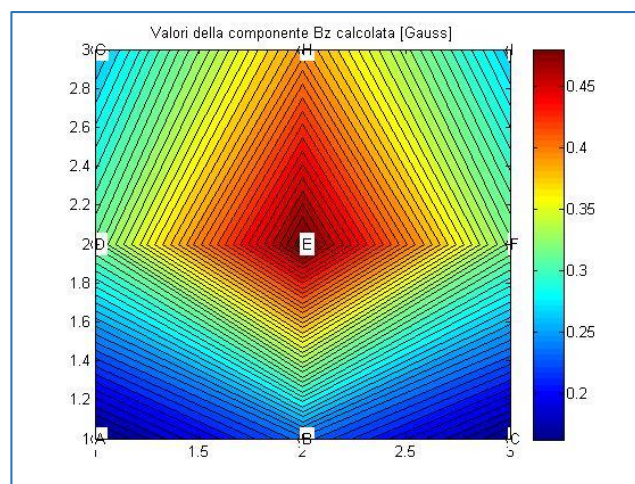


Figura 107 - Mappa di  $B_z$  calcolata

Caso 15: magnete posizionato sopra il sensore F posto a 10 [mm] da esso  
La configurazione si presenta come in Figura 108

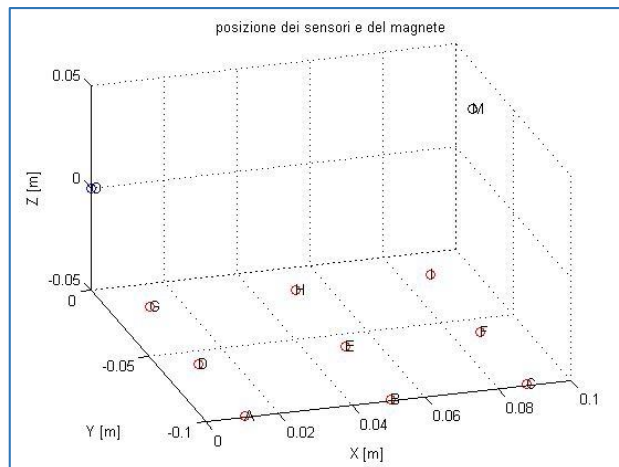


Figura 108 - Posizione dei sensori e del magnete

I valori di  $B_z$  misurati in queste condizioni sono presentati in Figura 109, mentre quelli calcolati sono riportati in Figura 110

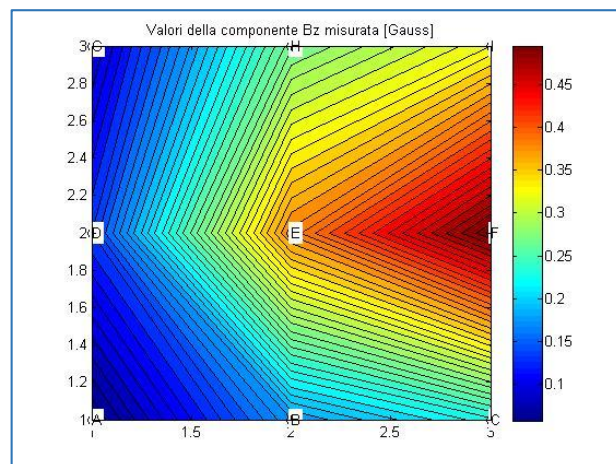


Figura 109 - Mappa di  $B_z$  misurata

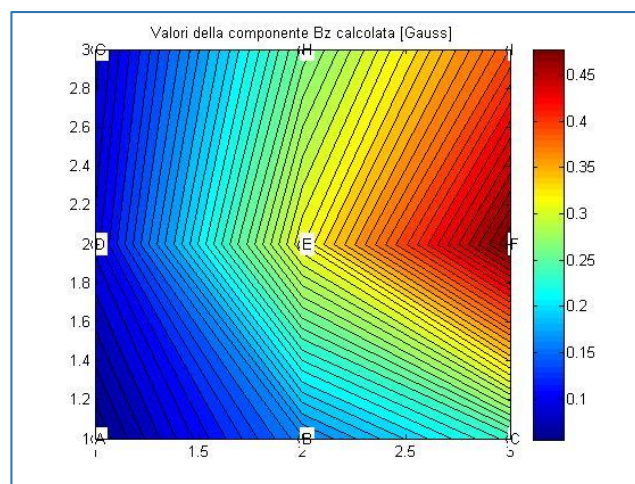


Figura 110 - Mappa di  $B_z$  calcolata

Caso 16: magnete posizionato sopra il sensore G posto a 10 [mm] da esso  
La configurazione si presenta come in Figura 111

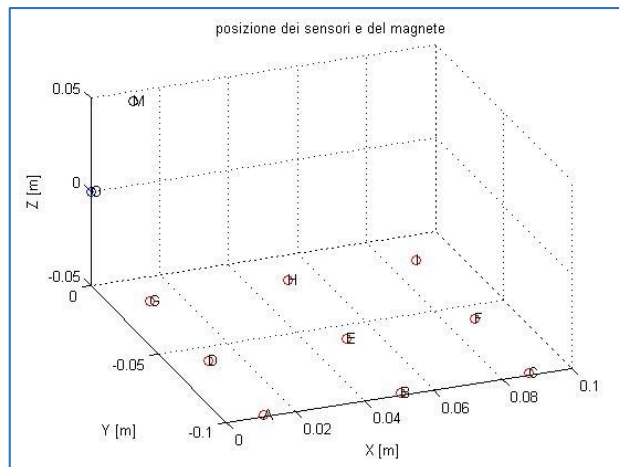


Figura 111 - Posizione dei sensori e del magnete

I valori di  $B_z$  misurati in queste condizioni sono presentati in Figura 112, mentre quelli calcolati sono riportati in Figura 113

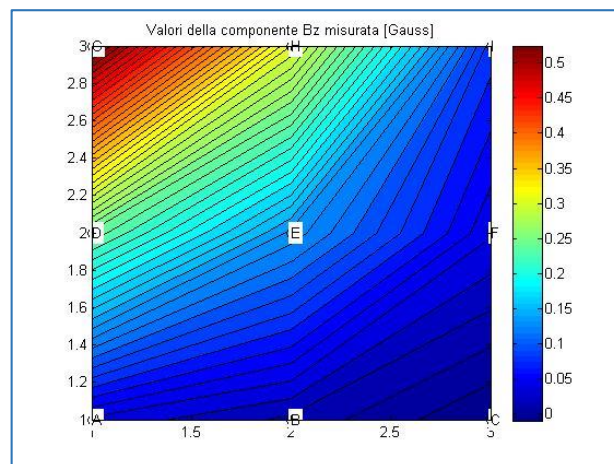


Figura 112 - Mappa di  $B_z$  misurata

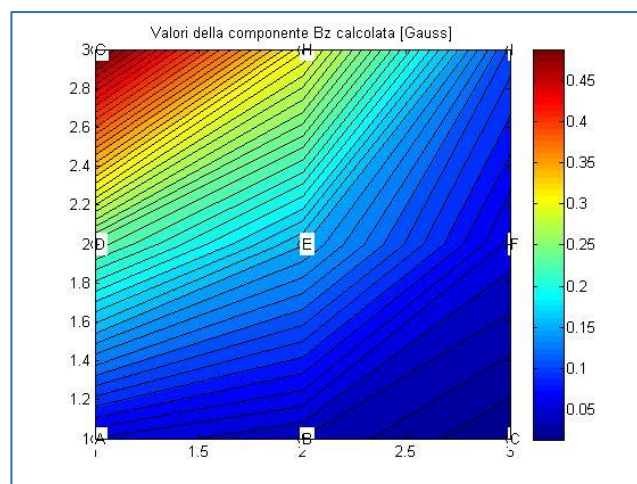


Figura 113 - Mappa di  $B_z$  calcolata

Caso 17: magnete posizionato sopra il sensore H posto a 10 [mm] da esso  
 La configurazione si presenta come in Figura 114

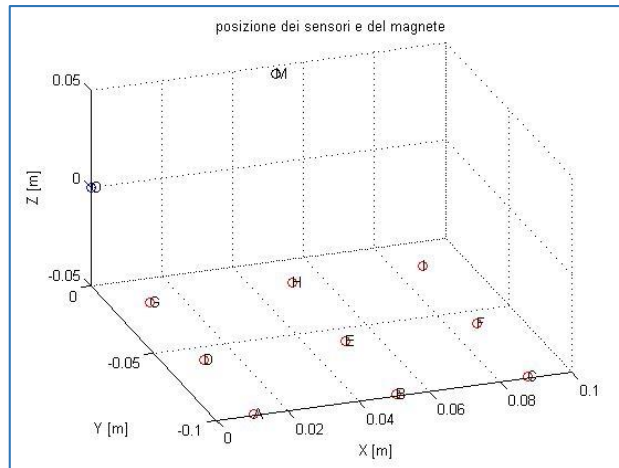


Figura 114 - Posizione dei sensori e del magnete

I valori di  $B_z$  misurati in queste condizioni sono presentati in Figura 115, mentre quelli calcolati sono riportati in Figura 116

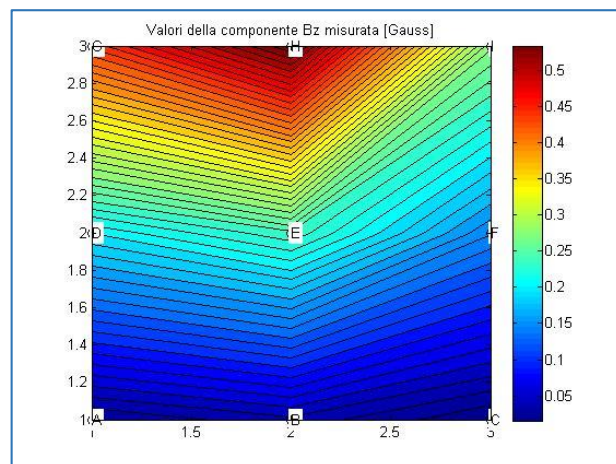


Figura 115 - Mappa di  $B_z$  misurata

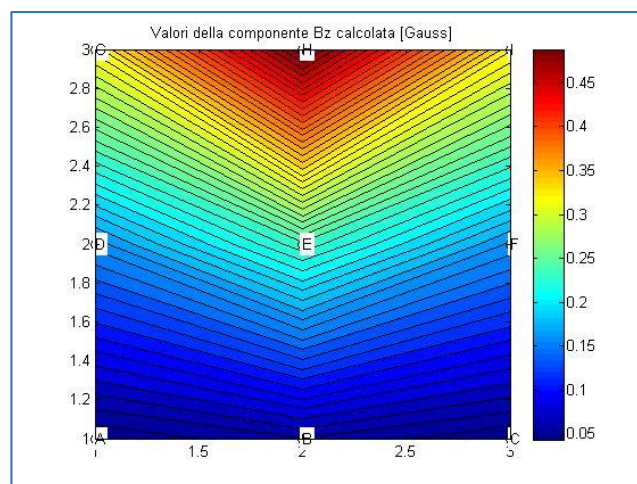


Figura 116 - Mappa di  $B_z$  calcolata

Caso 18: magnete posizionato sopra il sensore I posto a 10 [mm] da esso  
La configurazione si presenta come in Figura 117

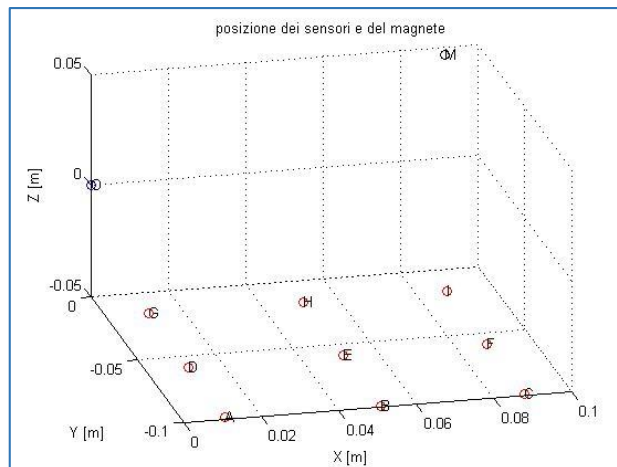


Figura 117 - Posizione dei sensori e del magnete

I valori di  $B_z$  misurati in queste condizioni sono presentati in Figura 118, mentre quelli calcolati sono riportati in Figura 119

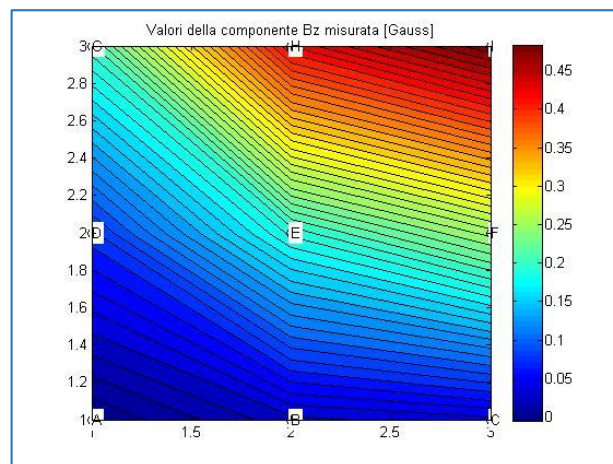


Figura 118 - Mappa di  $B_z$  misurata

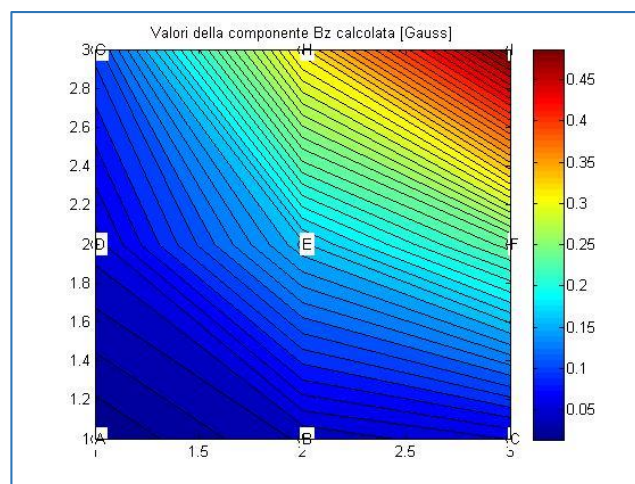


Figura 119 - Mappa di  $B_z$  calcolata

## 5 - Conclusioni

Lo scopo di questa tesi era valutare se fosse possibile determinare, al fine di applicazioni medicali, la posizione e l'orientamento di un magnete partendo da reali misure di campo.

Per raggiungere tale scopo si è utilizzato un sistema di posizionamento del magnete con accuratze micrometriche e si sono eseguite una serie di misure con un array di nove sensori, appositamente acquistati, posti in posizioni note rispetto al magnete. Durante questa fase si sono incontrate le prime difficoltà perché, nonostante la posizione del magnete rispetto al centro del sistema di assi mobili fosse determinata con un'elevata precisione, lo stesso non si può dire delle posizioni dei sensori, né rispetto al centro degli assi né rispetto al magnete. Si è cercato di ridurre il più possibile questi gradi di incertezza assicurando la planarità del sistema e misurando con opportuni strumenti le distanze ma non è stato possibile ad annullare totalmente l'errore dovuto a non conformità geometriche.

Una volta determinato il piano su cui eseguire le misure si è poi proceduto all'installazione dei sensori e alle loro connessioni con la scheda di acquisizione dati, passando attraverso il multiplexer per la ripartizione dei segnali dati, in modo da raccogliere direttamente le misure di tutti i sensori attraverso la piattaforma di acquisizione myRIO.

A questo punto si è provveduto a scrivere un codice di comando che contemporaneamente potesse sia pilotare il sistema di movimento assi che leggere i sensori. In questo modo si è proceduto alla raccolta delle misure eseguite da tutti e nove i sensori per ogni posizione del magnete muovendolo all'interno di un cubo di dieci centimetri di lato con step di un centimetro.

Il passo successivo è stato quello di confrontare i risultati di tali misure con quelle prodotte da un codice di calcolo semi-analitico, in cui era ipotizzata la posizione del magnete in modo coerente con quella delle misure. Dai risultati di tale confronto non stato ad oggi è possibile trarre una conclusione univoca poiché, se da un lato la componente  $B_z$  misurata rispecchia quella calcolata con piccole differenze dovute principalmente a irregolarità geometriche, lo stesso non si può dire della componente radiale, la quale risulta soggetta a un errore del 20% le cui cause non si è riusciti a determinare con certezza.

Alla fine di questo progetto di tesi si è quindi ottenuto un sistema automatizzato per il posizionamento di un magnete e la misura del campo magnetico da esso generato, ma non si è riusciti a confermare le ipotesi eseguite per le simulazioni numeriche di avere misure reali del campo magnetico affette da un rumore del 5% o minore, specie nei sensori più lontani dal magnete.

Per futuri sviluppi è fondamentale ridurre le cause di incertezza geometrica e non, eseguendo le misure in ambienti schermati e possibilmente anche con campo prodotto anche da correnti. Si consiglia inoltre l'uso di sensori più accurati, infatti per questa prima fase sperimentale si è scelto di limitare il costo dei singoli sensori vista l'assenza di esperienze precedenti con set-up sperimentali di questo tipo. Ora che esso è stato validato si possono scegliere sensori più accurati a cui sicuramente corrisponderà un costo maggiore.

In future sperimentazioni sarà inoltre interessante eseguire misure con il magnete posto a diverse angolazioni, sfruttando in tal modo appieno il sistema di posizionamento a 5 assi.

Infine il passo finale da compiere sarà la prova in sala operatoria per la verifica del corretto funzionamento della procedura nel suo reale ambito di utilizzo.





## Appendice

Appendice 1: codice per la valutazione preventiva del campo magnetico.

```
clear all;
close all;
clc;
%load vert
%load horz
mu0=4*pi*1E-7;

%dimensioni del magnete
h=8*0.001; % altezza: 8 [mm]
r1=3*0.001; % diametro: 6 [mm]
J=1; %magnetizzazione [T]          %equivalent to NI/h

%coordinate del campo:
z=20*0.001; %[m]
r=40*0.001; %[m]

%mappa di B su un piano distante d dal centro del magnete e di lato L

%CASISTICA
% CASO 1a---> d=5[cm] L=5[cm]
% CASO 1b---> d=5[cm] L=10[cm]
% CASO 1c---> d=10[cm] L=5[cm]
% CASO 1d---> d=10[cm] L=10[cm]

d=5*0.01; %[m]
L=10*0.01; %[m]
r=0.0; %[m]

%costruisco una griglia a passo fisso di 0.5 [cm]
[x,y] = meshgrid(-L/2:0.005:L/2,-L/2:0.005:L/2);
z=-d;
i1=1;
j1=1;
for i=-L/2:0.005:L/2
    for j=-L/2:0.005:L/2
        aa=i^2+j^2;
        r=sqrt(aa);
        [Br,Bz] = cylmagnew(r1,h,J,r,z);
        bbr(i1,j1)=Br;
        bbzz(i1,j1)=Bz;
        j1=j1+1;
    end
    i1=i1+1;
    j1=1;
end
end
```

```

figure(1)
surf(x,y,bbzz)
axis([-0.05 0.05 -0.05 0.05 0 0.05])
legend
colorbar
title('mappa di B su un piano distante d dal centro del magnete e di lato L')
hold on
%plot(vect(:,1),vect(:,2),'bo-')
%legend('Analytical','Experimental')
%legend('Analytical')

%-----

%Mappa di B su una circonferenza C di raggio rc

%CASISTICA
% CASO 2a---> rc=5[cm] il cui centro di C coincide con quello del magnete
% CASO 2b---> rc=5[cm] il cui centro di C è 5 [cm] dietro quello del magnete

rc=5*0.01; %raggio del cerchio [m]
d=0*0.01;   %distanza tra il centro di C e quello del magnete [m]

%costruisco una griglia a passo fisso di 0.5 [cm]
[x2,z2] = meshgrid(-rc:0.005:rc,-rc:0.005:rc);
n=size(x2);
y2=zeros(n);
i2=1;
j2=1;
for i=-rc:0.005:rc
    for j=-rc:0.005:rc
        r=sqrt(rc^2+d^2);
        z=sqrt(rc^2-i^2);
        [Br,Bz] = cylmagnew(r1,h,J,r,z);
        bbr2(i2,j2)=Br;
        bbz2(i2,j2)=Bz;
        modB(i2,j2)=sqrt(Br^2+Bz^2);
        j2=j2+1;
    end
    i2=i2+1;
    j2=1;
end
% figure(2)
% surf(x2,z2,modB)
% axis on
% legend
% colorbar
% title('Mappa del modulo B su una semi-circonferenza C di raggio rc')
% hold on

```

```
figure(3)
surf(x2,z2,bbzz2)
axis on
legend
colorbar
title('Mappa di Bz su una semi-circonferenza C di raggio rc')
hold on
% figure(4)
% surf(x2,z2,bbr2)
% axis on
% legend
% colorbar
% title('Mappa di Br su una semi-circonferenza C di raggio rc')
% hold on
```

Appendice 2: codice per la valutazione del campo magnetico registrato dai 9 sensori e confronto con le misure raccolte:

```
clear all
close all
clc
load Bmisurata.mat

%coordinate sensori in [m]
A=[11*0.001,-99*0.001,-50*0.001];
B=[51*0.001,-99*0.001,-50*0.001];
C=[88*0.001,-99*0.001,-50*0.001];
D=[11*0.001,-59*0.001,-50*0.001];
E=[51*0.001,-59*0.001,-50*0.001];
F=[88*0.001,-59*0.001,-50*0.001];
G=[11*0.001,-16*0.001,-50*0.001];
H=[51*0.001,-16*0.001,-50*0.001];
I=[88*0.001,-16*0.001,-50*0.001];

%ORIGINE DEGLI ASSI %[m]
O=[0,0,0];

%coordinate del magnete: %[m]
M=[0*0.001,-96*0.001,0*0.001];

%costruisco il vettore spostamento centro assi in [m]
xi=0;
yi=0;
zi=0;
SO=[xi*0.001,-yi*0.001,zi*0.001];

%posizione del magnete dopo lo spostamento: %[m]
MO=M+SO;

%costruisco la matrice coordinate dei sensori S:
S=[A;B;C;D;E;F;G;H;I];
```

```
%considerando che i sensori si trovino su un quadrato 3x3 in cui A(1,1),  
%B(1,2), C(1,3) ecc... plotto i valori del campo misurato con la funzione  
%contourf
```

```
sens=[1,1;...  
      2,1;...  
      3,1;...  
      1,2;...  
      2,2;...  
      3,2;...  
      1,3;...  
      2,3;...  
      3,3];  
name_sens=['A';...  
          'B';...  
          'C';...  
          'D';...  
          'E';...  
          'F';...  
          'G';...  
          'H';...  
          'I'];
```

```
%STAMPO LA MAPPA DELLA POSIZIONE DEI SENSORI
```

```
figure(1)  
plot3(S(:,1),S(:,2),S(:,3),'ro')  
hold on  
grid on  
xlabel('X [m]')  
ylabel('Y [m]')  
zlabel('Z [m]')  
plot3(O(1,1),O(1,2),O(1,3),'bo')  
plot3(MO(1,1),MO(1,2),MO(1,3),'ko')  
text(S(:,1),S(:,2),S(:,3),name_sens)  
text(O(1,1),O(1,2),O(1,3),'O')  
text(MO(1,1),MO(1,2),MO(1,3),'M')  
title('posizione dei sensori e del magnete')
```

```
%quindi per Br ho
```

```
c=4;  
Br= [Bmisurata(1,c),Bmisurata(2,c),Bmisurata(3,c);...  
     Bmisurata(4,c),Bmisurata(5,c),Bmisurata(6,c);...  
     Bmisurata(7,c),Bmisurata(8,c),Bmisurata(9,c)];
```

```

% figure(2)
% contourf(Br,50)
% hold on
% plot(sens(:,1),sens(:,2),'ko')
% text(sens(:,1),sens(:,2),name_sens,'BackgroundColor','w')
% title('Valori della componente Br misurata [Gauss]')
% colorbar

```

```

%per Bz ho
c=3;
Bz= [Bmisurata(1,c),Bmisurata(2,c),Bmisurata(3,c);...
     Bmisurata(4,c),Bmisurata(5,c),Bmisurata(6,c);...
     Bmisurata(7,c),Bmisurata(8,c),Bmisurata(9,c)];

```

```

figure(3)
contourf(Bz,50)
hold on
plot(sens(:,1),sens(:,2),'ko')
text(sens(:,1),sens(:,2),name_sens,'BackgroundColor','w')
title('Valori della componente Bz misurata [Gauss]')
colorbar

```

%Ricavo il campo nelle medesimi condizioni attraverso l'algorithmo:

```

%dimensioni del magnete
h=8*0.001; % altezza: 8 [mm]
r1=3*0.001; % diametro: 6 [mm]
J=1.42; %magnetizzazione [T]           %equivalent to NI/h

```

%creo i vettori magnete\_sensore:

```

SA=A-(M+SO);
SB=B-(M+SO);
SC=C-(M+SO);
SD=D-(M+SO);
SE=E-(M+SO);
SF=F-(M+SO);
SG=G-(M+SO);
SH=H-(M+SO);
SI=I-(M+SO);

```

%riporto [x;y;z] in[r;z] N.B.  $r=\sqrt{x^2+y^2}$

```

SArz=[sqrt(SA(1)^2+SA(2)^2);SA(3)];
SBrz=[sqrt(SB(1)^2+SB(2)^2);SB(3)];
SCrz=[sqrt(SC(1)^2+SC(2)^2);SC(3)];
SDrz=[sqrt(SD(1)^2+SD(2)^2);SD(3)];
SErz=[sqrt(SE(1)^2+SE(2)^2);SE(3)];
SFrz=[sqrt(SF(1)^2+SF(2)^2);SF(3)];

```

```

SGrz=[sqrt(SG(1)^2+SG(2)^2);SG(3)];
SHrz=[sqrt(SH(1)^2+SH(2)^2);SH(3)];
Slrz=[sqrt(SI(1)^2+SI(2)^2);SI(3)];

%calcolo del campo [Tesla]
[BAr,BAz] = cylmagnew(r1,h,J,SArz(1,1),SArz(2,1));
[BBr,BBz] = cylmagnew(r1,h,J,SBrz(1,1),SBrz(2,1));
[BCr,BCz] = cylmagnew(r1,h,J,SCrz(1,1),SCrz(2,1));
[BDr,BDz] = cylmagnew(r1,h,J,SDrz(1,1),SDrz(2,1));
[BEr,BEz] = cylmagnew(r1,h,J,SErz(1,1),SErz(2,1));
[BFr,BFz] = cylmagnew(r1,h,J,SFrz(1,1),SFrz(2,1));
[BGr,BGz] = cylmagnew(r1,h,J,SGrz(1,1),SGrz(2,1));
[BHr,BHz] = cylmagnew(r1,h,J,SHrz(1,1),SHrz(2,1));
[Blr,Blz] = cylmagnew(r1,h,J,Slrz(1,1),Slrz(2,1));

Brc= 10000.*[BAr,BBr,BCr;...
    BDr,BEr,BFr;...
    BGr,BHr,Blr];

% figure(4)
% contourf(Brc,50)
% hold on
% plot(sens(:,1),sens(:,2),'ko')
% text(sens(:,1),sens(:,2),name_sens,'BackgroundColor','w')
% title('Valori della componente Br Calcolata [Gauss]')
% colorbar

%per Bz ho

Bzc= 10000.*[BAz,BBz,BCz;...
    BDz,BEz,BFz;...
    BGz,BHz,Blz];

figure(5)
contourf(Bzc,50)
hold on
plot(sens(:,1),sens(:,2),'ko')
text(sens(:,1),sens(:,2),name_sens,'BackgroundColor','w')
title('Valori della componente Bz calcolata [Gauss]')
colorbar

%Errore
Err=Bz-Bzc;
[max,pos]=max(abs(Err(:)));
[pos_row,pos_col]=ind2sub(size(Err),pos);

%scrivo l'errore in un file .txt
title=strcat('z_',int2str(zi),' x_',int2str(xi),' y_',int2str(yi),'.txt');

```

```

fileOUT=fopen(title,'wt');
fprintf(fileOUT, 'riga z=%d x=%d y=%d\n', zi,xi,yi);
fprintf(fileOUT, 'l errore massimo registrato è di: ');
fprintf(fileOUT, ' %6.3f \n', max);
fprintf(fileOUT, 'ed è relativo al sensore. ');
if pos_row==1 && pos_col==1
    fprintf(fileOUT, 'A');
elseif pos_row==1 && pos_col==2
    fprintf(fileOUT, 'B');
elseif pos_row==1 && pos_col==3
    fprintf(fileOUT, 'C');
elseif pos_row==2 && pos_col==1
    fprintf(fileOUT, 'D');
elseif pos_row==2 && pos_col==2
    fprintf(fileOUT, 'E');
elseif pos_row==2 && pos_col==3
    fprintf(fileOUT, 'F');
elseif pos_row==3 && pos_col==1
    fprintf(fileOUT, 'G');
elseif pos_row==3 && pos_col==2
    fprintf(fileOUT, 'H');
elseif pos_row==3 && pos_col==3
    fprintf(fileOUT, 'I');
end
fprintf(fileOUT, '\nMentre la matrice dell errore è:\n ');
fprintf(fileOUT, ' %6.3f %6.3f %6.3f \n', Err);
fprintf(fileOUT, '\nMentre la Bz è:\n ');
fprintf(fileOUT, ' %6.3f %6.3f %6.3f \n', Bzc);
fprintf(fileOUT, '\nMentre la Br è:\n ');
fprintf(fileOUT, ' %6.3f %6.3f %6.3f \n', Brc);
fclose(fileOUT);

```



## Bibliografia

- [1] J. K. V. Pankrac, «Simple Algorithms for the Calculation of the Intensity of the Magnetic Field of Current Loops and Thin-Wall Air Coils of a General Shape Using Magnetic Dipoles,» *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 18, n. 12, pp. pp.4767-4778, December 2012.
- [2] SuperMagnete, «<http://www.supermagnete.it/>,» [Online]. Available: [http://www.supermagnete.it/cilindri-magneti-neodimio-1/cilindro-magnetico-diametro-6mm-altezza-8mm-neodimio-n48-nichelato\\_S-06-08-N?img=3](http://www.supermagnete.it/cilindri-magneti-neodimio-1/cilindro-magnetico-diametro-6mm-altezza-8mm-neodimio-n48-nichelato_S-06-08-N?img=3).
- [3] «PI Motion | Position,» [Online]. Available: <http://www.physikinstrumente.com/product-detail-page/m-403-701750.html>.
- [4] «PI Motion | Position,» [Online]. Available: <http://www.physikinstrumente.com/product-detail-page/c-663-900551.html>.
- [5] «Wikipedia,» [Online]. Available: [https://it.wikipedia.org/wiki/National\\_Instruments](https://it.wikipedia.org/wiki/National_Instruments).
- [6] National Instruments, User Guide and Specifications - NI myRIO-1900, August 2013.
- [7] Honeywell, 3-Axis Digital Compass IC HMC5883L, ©2010 Honeywell International Inc., February 2013.
- [8] BeagleBone.org Fondation, «BeagleBone,» [Online]. Available: <http://beagleboard.org/BLACK>.
- [9] National Instruments, «Manuale di progettazione con NI myRIO,» 13 Novembre 2015. [Online]. Available: [ftp://ftp.ni.com/pub/branches/italy/misc/guide/myRIO\\_project\\_essentials\\_guide.pdf](ftp://ftp.ni.com/pub/branches/italy/misc/guide/myRIO_project_essentials_guide.pdf).