

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria dell'Energia

# ***Relazione per la prova finale***

*Prove di funzionamento di un sensore di campo magnetico "FluxGate"  
adatto all'esperimento MITICA e all'iniettore di neutri per ITER*

Tutor universitario: Prof. Chitarin Giuseppe

Prof. Marconato Nicolò

Laureando: *Marchese Luca*

Padova, 16/07/2024

# MITICA

## Megavolt ITER Injector Concept advancement

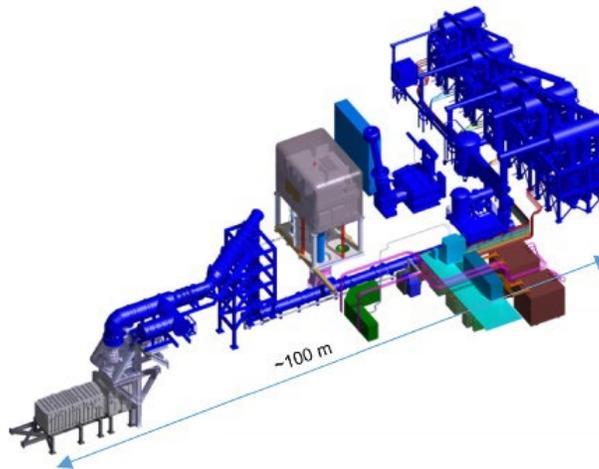
- Prototipo degli iniettori di fasci neutri riscaldanti per ITER
- Sistema completo di iniettori di fascio neutro

### Necessità

1. Sensore per misurare il campo magnetico all'interno della camera a vuoto

### Vincoli

1. Vuoto all'interno della camera
2. Flusso di neutroni prodotto dalla reazione di fusione nel Tokamak
3. Difficile accesso per eventuali manutenzioni



### Alcuni dati...

1 MeV  
17 MW  
3600 s

# Sensore di tipo Flux-Gate

## Pregi

1. Compatibile con il vuoto
2. Meccanicamente robusto
3. Immune agli effetti delle radiazioni
4. Assenza di semiconduttori e parti delicate
5. Non richiede compensazione dell'offset

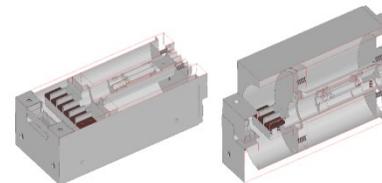
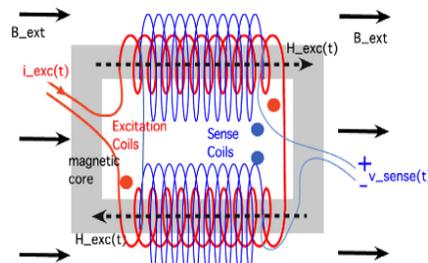
## Progettazione



## Fabbricazione prototipo



## Test di funzionamento (Obiettivo del lavoro)



Par. N#	Parameter	Value
1	measurement range	$\pm 2.0$ mT
2	measurement sensitivity	$\leq 0.01$ mT
3	absolute accuracy	$\leq 0.02$ mT
4	analog output voltage range	$\pm 10$ V
5	offset due to temperature variations	$< 500$ nT/K
6	operating temperature range	20 - 40 °C
7	time derivative of magnetic field (max)	10 mT/s
8	measurement bandwidth	DC - 10.0 Hz (-3 dB)
9	withstand voltage between sensor cables and ground (max)	1 kV for 60 s
10	alignment of sensor package with sensor reference surfaces	$\pm 0.5$ deg
11	Immunity to transverse magnetic field	$< -40$ dB

+  
Lunghezza cavo > di quella fornita

## Strumentazione

- Bobinotto (Fig.1)
- Alimentatore TTI 420W
- Multimetro HP 34401A
- Multimetro HP 3478°
- Gausmetro Lake Shore DSP455
- Supporto sensore (Fig.2)
- Termocoppia

Fig.1. Bobinotto utilizzato per generare il campo magnetico

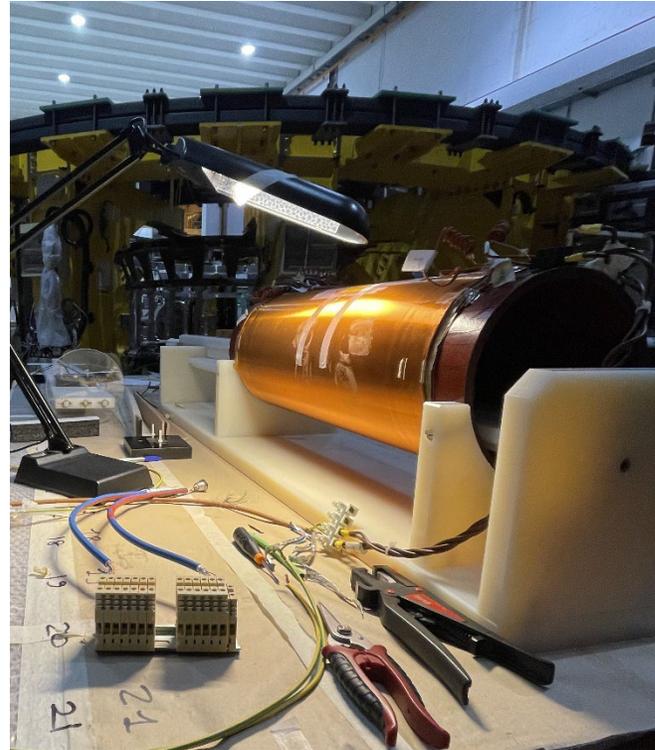


Fig.2. Sensore Flux-Gate montato sul supporto realizzato



Progettazione



Realizzazione



Collaudo

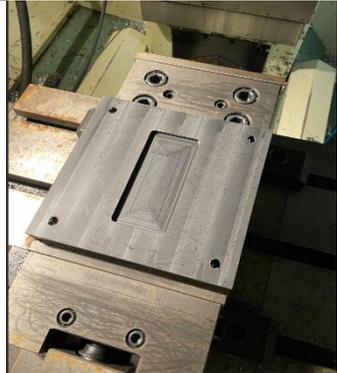
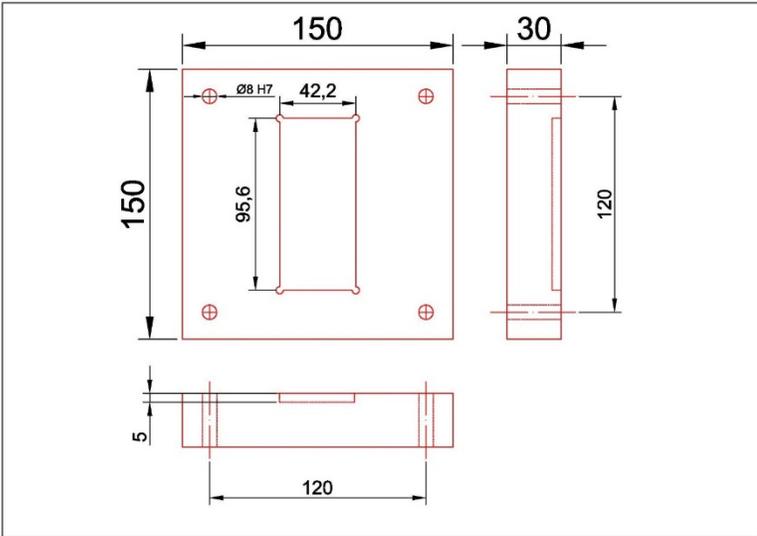


Fig.3. Schema di collegamento della strumentazione

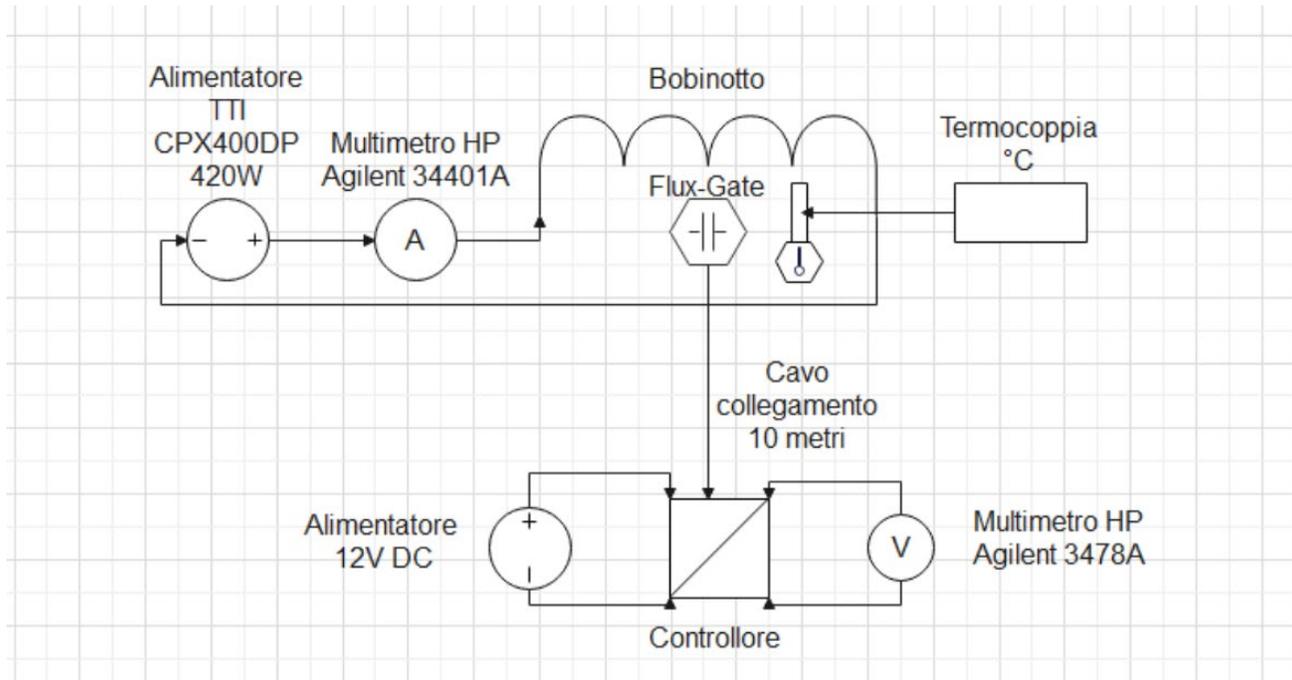
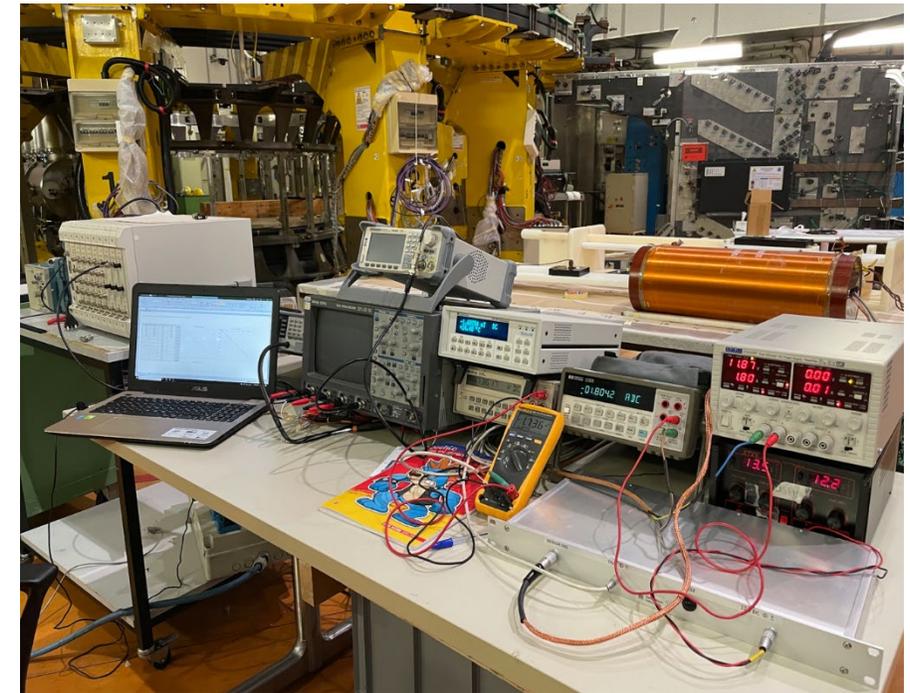


Fig.4. Particolare della strumentazione collegata e pronta per i test



## Raccolta dati

- Simulazione del campo magnetico in funzione della corrente immessa
- lettura del valore di campo magnetico restituita dal Flux-Gate

## Tabulazione dati

- Tutti i dati sono stati inseriti in tabelle excel

## Tracciamento grafici

- Realizzazione programma Matlab per il tracciamento dei grafici

$$B_{Calcolato} = 3I_{Bob.} * 0,9642 = mT$$

Fig.5. Esempio di tabella excel ricavata dalle misure

Corrente Bob. [A]	Bf Flux-Gate [mT]	Campo Calcolato [mT]	Gausmetro [mT]	Errore [mT]	Flux-Gate/Gausmetro
-3,013	-8,700	-8,715	-8,356	0,0154038	1,041
-2,705	-7,811	-7,824	-7,509	0,0134830	1,040
-2,411	-6,960	-6,974	-6,693	0,0140586	1,040
-2,117	-6,115	-6,124	-5,883	0,0086342	1,039
-1,802	-5,206	-5,212	-5,014	0,0064652	1,038
-1,500	-4,335	-4,339	-4,180	0,0039000	1,037
-1,202	-3,474	-3,477	-3,354	0,0029052	1,036
-0,902	-2,610	-2,609	-2,529	0,0008748	1,032
-0,607	-1,760	-1,756	-1,715	0,0041918	1,026
-0,302	-0,882	-0,874	-0,873	0,0084348	1,010
0,000	-0,009	0,000	-0,037	0,0090000	0,243
0,000	-0,009	0,000	-0,037	0,0090000	0,243
0,300	0,859	0,868	0,794	0,0087800	1,082
0,606	1,741	1,753	1,639	0,0119156	1,062
0,907	2,612	2,624	2,474	0,0115882	1,056
1,205	3,467	3,486	3,294	0,0185830	1,053
1,505	4,333	4,353	4,125	0,0203630	1,050
1,805	5,198	5,221	4,955	0,0231430	1,049
2,102	6,056	6,080	5,774	0,0242452	1,049
2,409	6,938	6,968	6,617	0,0302734	1,049
2,706	7,792	7,827	7,438	0,0353756	1,048
3,010	8,673	8,707	8,279	0,0337260	1,048

Prime prove realizzate all'interno del  
laboratorio elettrico di RFX

Fig.6. Prova 1 Errore in funzione del Campo Reale

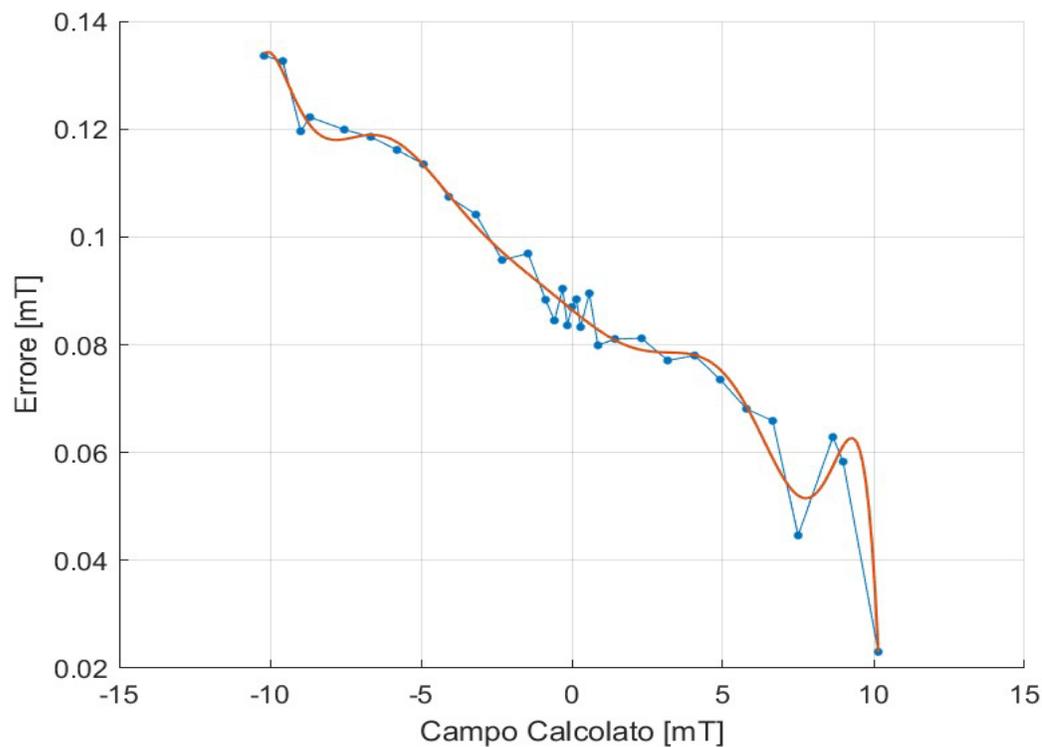
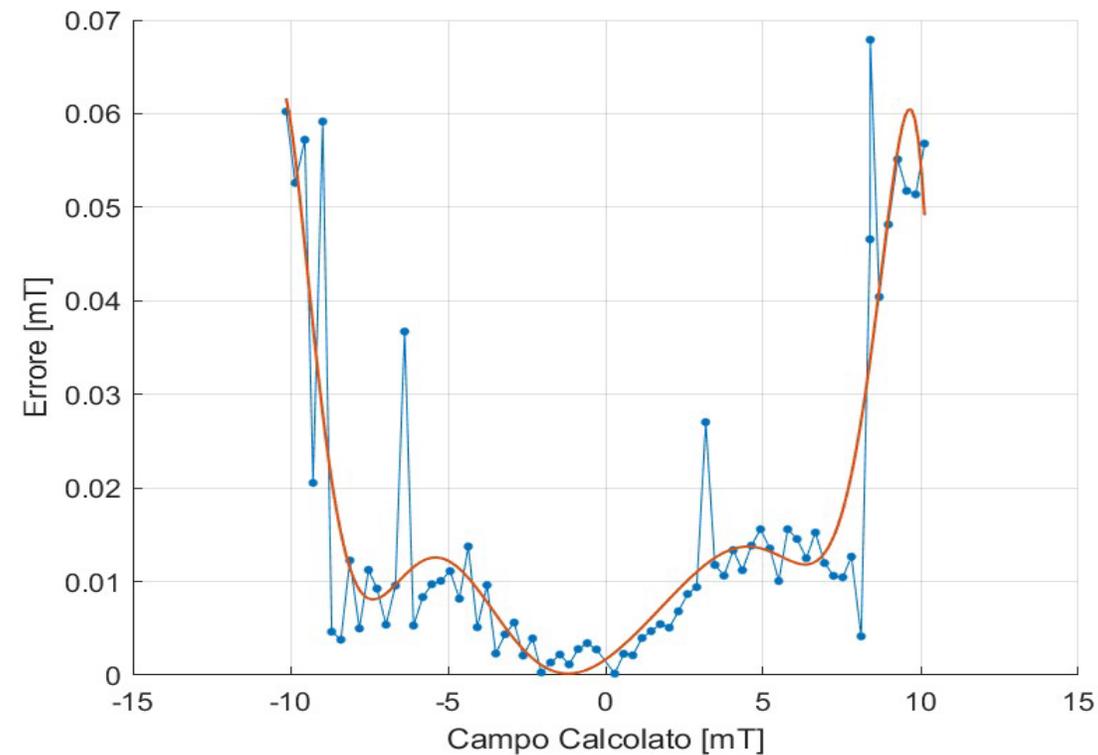
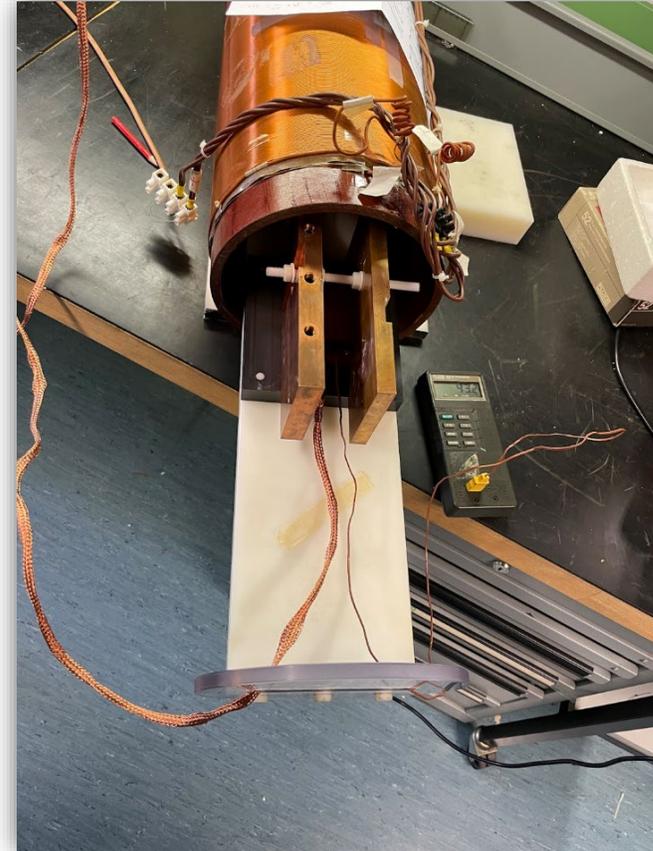
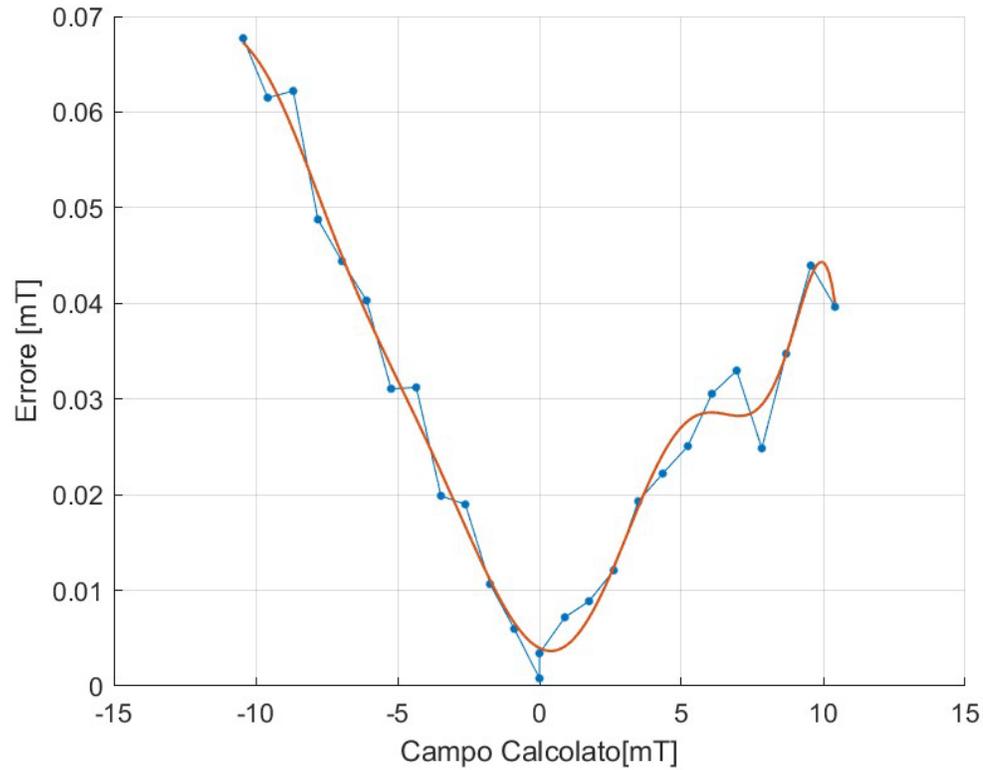


Fig.7. Prova 2 Errore in funzione del Campo Reale



Prova 3 realizzata a  $T=44^{\circ}\text{C}$   
(laboratorio elettrico)

Fig.7. Prova 3 Errore in funzione del Campo Reale



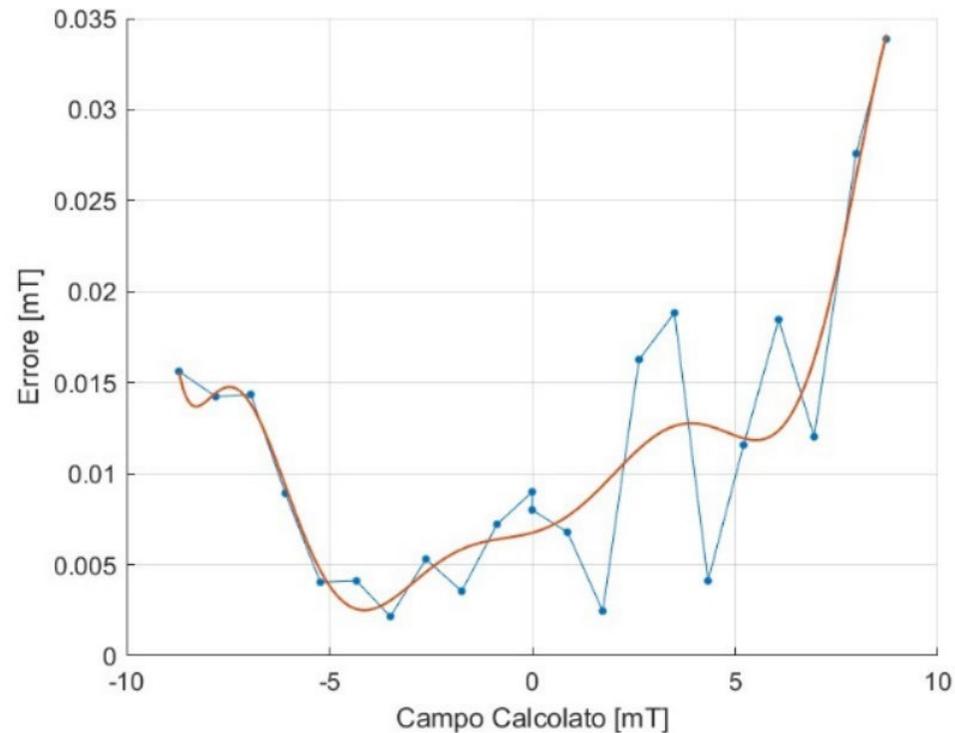


Le prove 4 5 e 6 sono state prove di «aggiustamento» il laboratorio elettrico non andava bene!

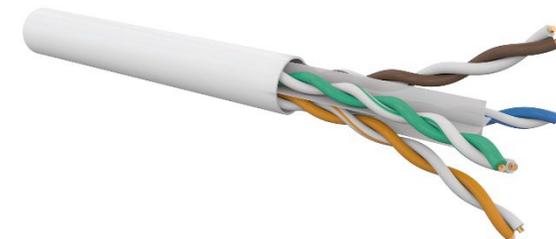


**Prova 7** Realizzata in stanza R5 di RFX allungando il cavo di collegamento di 10 metri

Fig.8. Prova 7 Errore in funzione del Campo Reale



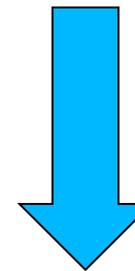
Per allungare il cavo in dotazione al sensore sono stati usati 10 metri di cavo di rete a 4 coppie di sez.  $0,205\text{mm}^2$



**Prova 8** Realizzata in stanza R5 di RFX allungando il cavo di collegamento di 100 metri

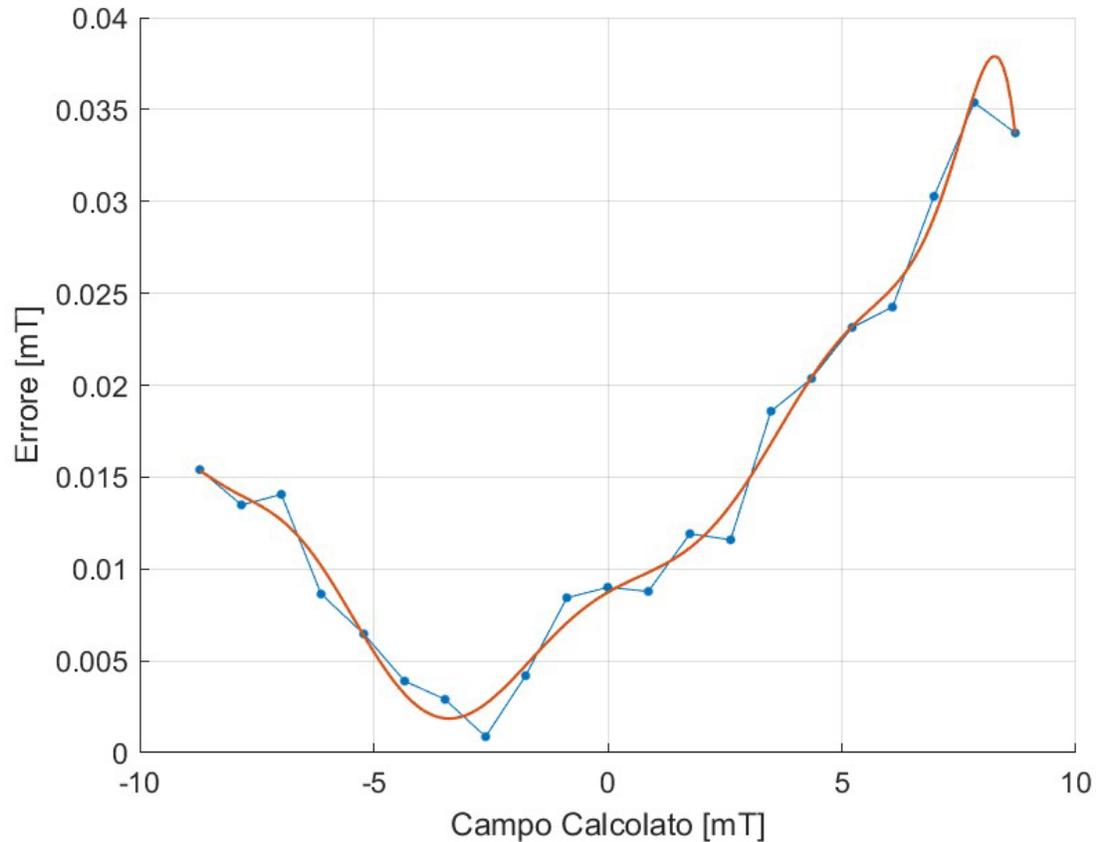


Inizialmente è stato allungato il cavo con 100m di cavo di rete usato per la prova precedente ma senza risultati, la centralina andava in errore!



Utilizzato cavo da 100 metri con sezioni:  $4 \times 0,5\text{mm}^2$  e  $4 \times 0,2\text{mm}^2$ . Sono state collegate due coppie da  $0,5\text{mm}^2$  in parallelo per il **Drive coil** e **Feedback Coil** e con una coppia da  $0,2\text{mm}^2$  è stato alimentato il **Detection Coil** (minor assorbimento)

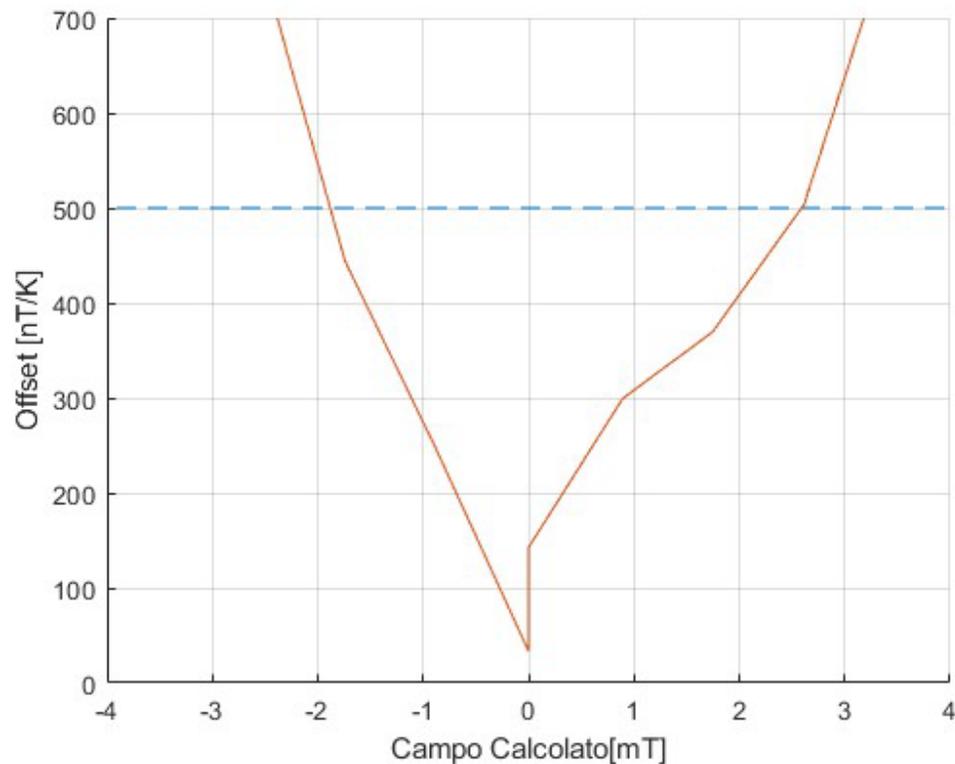
Fig.9. Prova 8 Errore in funzione del Campo Reale





Il sensore è in grado di garantire un offset di variazione di temperatura  $<500\text{nT/K}$  ?

Fig.10. Grafico Offset temperatura



Il valore  $<500\text{nT/K}$  è garantito per valori di campo magnetico in modulo  $<2\text{mT}$   
**Siamo all'interno del range di misura richiesto!**

## Possiamo confermare che il sensore:

- All'interno del range di misura di  $\pm 2\text{mT}$  l'errore è  $< 0,02\text{mT}$
- Per temperature fino a  $44^\circ\text{C}$  non si notano malfunzionamenti rilevanti
- È possibile allungare il cavo di collegamento ed ottenere una distanza tra centralina e sensore fino a  $110\text{m}$  (cavo con specifiche minime descritte)
- Per valori di campo in modulo  $< 2\text{mT}$  il sensore garantisce un offset  $< 500\text{nT/K}$

Par. N#	Parameter	Value
1	measurement range	$\pm 2.0\text{ mT}$
2	measurement sensitivity	$\leq 0.01\text{ mT}$
3	absolute accuracy	$\leq 0.02\text{ mT}$
4	analog output voltage range	$\pm 10\text{ V}$
5	offset due to temperature variations	$< 500\text{ nT/K}$
6	operating temperature range	$20 - 40^\circ\text{C}$
7	time derivative of magnetic field (max)	$10\text{ mT/s}$
8	measurement bandwidth	$\text{DC} - 10.0\text{ Hz} (-3\text{ dB})$
9	withstand voltage between sensor cables and ground (max)	$1\text{ kV for } 60\text{ s}$
10	alignment of sensor package with sensor reference surfaces	$\pm 0.5\text{ deg}$
11	Immunity to transverse magnetic field	$< -40\text{ dB}$

## Da ripetere:

- Prova a temperatura  $= 40^\circ\text{C}$  (la prova realizzata in lab. elettrico rientra nel range delle specifiche ma sicuramente è stata falsata da grandezze esterne sconosciute)

## Da realizzare:

- Prova di resistenza alla tensione fino a  $1\text{kV}$
- Prova in camera a vuoto