

# Rapporti tecnici

# INGV

Taratura del magnetometro LEMI 025

# 318



Istituto Nazionale di  
Geofisica e Vulcanologia

## **Direttore Responsabile**

Stefano Gresta

## **Editorial Board**

Luigi Cucci - Editor in Chief (INGV - RM1)

Andrea Tertulliani (INGV - RM1)

Nicola Pagliuca (INGV - RM1)

Umberto Sciacca (INGV - RM2)

Alessandro Settimi (INGV - RM2)

Aldo Winkler (INGV - RM2)

Salvatore Stramondo (INGV - CNT)

Milena Moretti (INGV - CNT)

Gaetano Zonno (INGV - MI)

Viviana Castelli (INGV - BO)

Antonio Guarnieri (INGV - BO)

Mario Castellano (INGV - NA)

Mauro Di Vito (INGV - NA)

Raffaele Azzaro (INGV - CT)

Rosa Anna Corsaro (INGV - CT)

Mario Mattia (INGV - CT)

Marcello Liotta (INGV - PA)

## **Segreteria di Redazione**

Francesca Di Stefano - Referente

Rossella Celi

Tel. +39 06 51860068

redazionecen@ingv.it

in collaborazione con:

Barbara Angioni (RM1)



# Rapporti tecnici INGV

## TARATURA DEL MAGNETOMETRO LEMI 025

Manuele Di Persio, Giovanni Benedetti, Achille Zirizzotti

INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Geomagnetismo, Aeronomia e Geofisica Ambientale)

# 318



## **Indice**

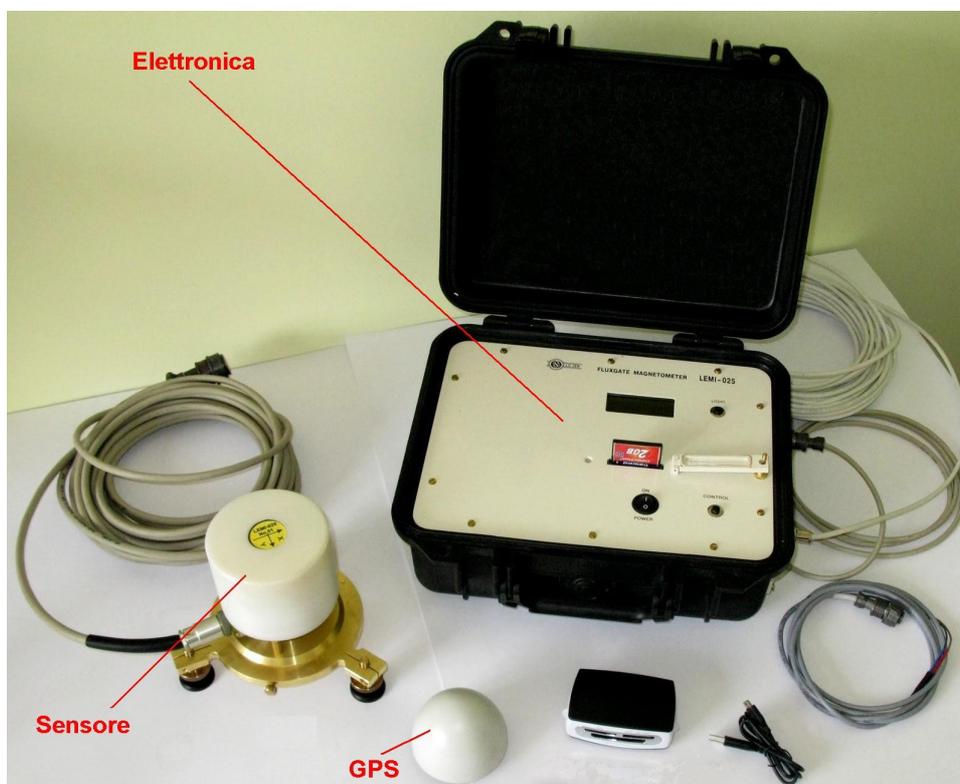
Introduzione	7
1. Il magnetometro LEMI-025	8
2. Funzionamento del magnetometro	10
3. Procedura di taratura del LEMI 025	11
4. Test del LEMI 025 con il metodo del confronto	17
5. Conclusioni	17



## Introduzione

Le misure delle grandezze geofisiche sono tanto più significative quanto più sono continue e sistematiche nel tempo. Pertanto gli strumenti di misura devono avere una risposta corretta, che sia anche riproducibile e stabile. In particolare gli strumenti di misura devono assicurare le tre condizioni che sono sensibilità, precisione e giustezza. Assicurare la qualità dei dati significa avere una misura quanto più veritiera possibile della grandezza fisica. Rivestendo un ruolo così importante e delicato si intuisce subito che lo strumento di misura deve essere sempre mantenuto efficiente. Ogni strumento subisce un peggioramento del proprio errore di misura con l'usura. Ma anche senza utilizzo, uno strumento può perdere le proprie caratteristiche, per il deterioramento naturale al passare del tempo. Urti, cadute, sostituzione di parti, riparazioni e/o aggiustamenti vari richiedono sicuramente una verifica della sua funzionalità. Esiste, una ragione tecnica per cui va effettuata una taratura ("calibration" in inglese) della strumentazione, a garanzia della produzione e dell'inalterabilità metrologica nel tempo. È opportuno evitare di confondere la taratura con la calibrazione ("adjustment" in inglese): mentre la taratura è un'operazione che permette di definire le caratteristiche metrologiche di uno strumento e di capire con quale incertezza le misure sono attendibili, la calibrazione ha come obiettivo di rendere lo strumento più preciso e di migliorare la sua incertezza strumentale riducendone gli errori. La taratura, non "aggiusta" l'apparecchiatura ma valuta l'esattezza della misura e quanto le misure effettuate si discostano da quelle reali. La taratura è il procedimento di valutazione della risposta impulsiva, nel dominio del tempo, o della funzione di trasferimento, nel dominio della frequenza. Questo può avvenire, tramite un confronto di misure con uno strumento di riferimento definito campione. La calibrazione, interviene per rendere le misure strumentali esatte, modificando i parametri di controllo dello strumento. È una procedura di misurazione accurata che permette una riduzione dell'errore di misura. Alla taratura iniziale di uno strumento può seguire una operazione di calibrazione con una successiva verifica degli errori attraverso una nuova taratura di controllo.

Il magnetometro LEMI-025 è uno strumento di buone caratteristiche utilizzato per le misure del campo magnetico terrestre negli osservatori geomagnetici. È attualmente utilizzato presso l'osservatorio di Duroni (CB) e diverrà presto uno strumento di riferimento e verrà installato anche negli altri osservatori geomagnetici italiani: Castello Tesino (TN), Lampedusa (AG).



**Figura 1.** La strumentazione completa del magnetometro.

## 1. Il magnetometro LEMI-025

Il magnetometro fluxgate LEMI-025 è stato sviluppato dalla LEMI, specificamente per la misura delle 3 componenti del vettore induzione magnetica della Terra e delle sue variazioni in accordo con il nuovo standard INTERMAGNET per le misure a 1 secondo. La LEMI (“Laboratory of Electromagnetic Innovations”) è stata fondata nel 2008 come una collaborazione tra “Lviv Centre of Institute of Space Research” LCISR (<http://www.isr.lviv.ua/>) Lviv, Ukraine e la KMS (<http://www.kmstechnologies.com/>) Technologies di Houston, Texas. La collaborazione è stata realizzata per sviluppare commercialmente la grande quantità di sensori elettro-magnetici studiati e realizzati presso il centro di ricerche LCISR. La LEMI è di base in Ucraina ed è specializzata nella progettazione e realizzazione di magnetometri a induzione (search coil) e magnetometri fluxgate, oltre a elettrodi per la misura di potenziali spontanei per le misure di magneto-tellurica e rilievi geofisici, così come, per la realizzazione di strumentazione da utilizzare nella ricerca spaziale. Vengono anche realizzati stazioni di calibrazione dei sensori e registrazione dei dati. Nella tabella 1 sono visibili alcuni dei magnetometri fluxgate realizzati dalla LEMI per specifiche applicazioni e con differenti sensibilità e accuratezze, utilizzati dall’INGV per varie applicazioni.

Magnetometer	<a href="#">LEMI-008</a>	<a href="#">LEMI-017</a>	<a href="#">LEMI-018</a>	<a href="#">LEM-025</a>
<b>Application</b>	Measurement of the Earth's magnetic field variations in laboratory and land conditions as well as in geomagnetic observatory	Autonomous weather stations with the purpose of magnetic field, atmospheric pressure and temperature correlation study	Deposits exploration using the sounding of Earth's crust in land conditions and in observatories as basic magnetometer as well as for magnetic repeat stations survey	Super stable 3-component measurements of Earth magnetic field induction and their variations in accordance with new 1-second INTERMAGNET standard
<b>Measurement range</b>	Range1 100.000 nT Range2 3 200.0 nT	+/- 68.000 nT	+/- 70.000 nT	+/- 4000 nT
<b>Offset compensation band</b>	/	/	/	+/- 70.000 nT
<b>Resolution along each component</b>	Range1 10 nT Range2 0.1 nT	0.01 nT	0.01 nT	0.001 nT
<b>Temperature drift</b>	5 nT/°C	< 0.2 nT/°C	< 0.2 nT/°C	< 0.2 nT/°C
<b>Orthogonality error</b>	< 30 min of arc	< 30 min of arc	< 30 min of arc	< 30 min of arc
<b>Orthogonality error after calibration</b>	/	/	< 2 min of arc	< 2 min of arc
<b>Frequency band</b>	DC - 1 Hz	0 – 03 HZ	DC - 1 Hz	DC – 3.5 Hz
<b>Level noise-1Hz</b>	< 20 pTrms	< 15 pTrms	< 10 pTrms	< 10 pTrms
<b>Flash memory volume</b>	8 MB	<= 2GB	<= 2GB	<= 2GB
<b>Power</b>	2.4 W	0.8 W	< 1 W	< 4 W
<b>Operating temperature</b>	-5°C +40°C	-30°C +40°C	-20°C +40°C	-10°C +50°C
<b>Atmospheric pressure range</b>	/	300 – 1200 mbar	/	/
<b>Tilt measurement range</b>	/	+/- 15 arc degree	/	/
<b>Weight</b>	Electronic 3.6 Kg Sensor 1.7 Kg	Electronic 4 Kg Sensor 2.5 Kg	Electronic 1.2 Kg Sensor 1.8 Kg	Electronic 3.8 Kg Sensor 3.3 Kg

**Tabella 1.** Caratteristiche dei magnetometri flux-gate LEMI utilizzati dall’INGV.

Il magnetometro LEMI-025 per le sue caratteristiche (tabella 2), è particolarmente adatto all'utilizzo presso gli osservatori geomagnetici (<http://www.isr.lviv.ua/lemi025.htm>). In questi casi infatti, si possono acquisire i segnali magnetici con periodi da 1 a 100'000 secondi e più, con grande accuratezza, permettendo di analizzare precisamente la gran parte dei fenomeni associati al magnetismo terrestre. Risulta chiaro quindi che la strumentazione utilizzata presso gli osservatori, deve avere le caratteristiche adatte. Questo è stato fatto dalla LEMI, prestando molta attenzione alla risposta in frequenza dello strumento, all'accuratezza della sincronizzazione del campionamento oltre ai buoni materiali utilizzati e alla precisione con cui sono stati realizzati i sensori. In particolare per avere una risposta veloce (quindi una grande larghezza di banda) e nello stesso tempo un basso livello di sensibilità al rumore ambientale è stata applicata una combinazione di filtri analogici e digitali. Il sensore fluxgate, a cui sono associate le caratteristiche di stabilità e livello di rumore dello strumento, è stato realizzato con materiali di ceramica vetrosa che ha un fattore di espansione termica prossimo allo zero. Le bobine di compensazione sono inglobate in un unico blocco di materiale per aumentarne la stabilità e il supporto del sensore ha due livelle e viti per la corretta messa in bolla. L'ortogonalità degli assi del sensore è una caratteristica costruttiva che dipende dalla precisione con cui viene realizzato meccanicamente il sensore, la precisione delle lavorazioni, i materiali utilizzati e il metodo di assemblaggio. Questa caratteristica può comunque essere migliorata con una operazione di calibrazione che ne rivela le non ortogonalità e introduce dei parametri correttivi sulle misure acquisite. Questa operazione viene effettuata in fabbrica al momento della sua assemblaggio e vengono definiti i parametri di correzione associati alla non ortogonalità del sensore.

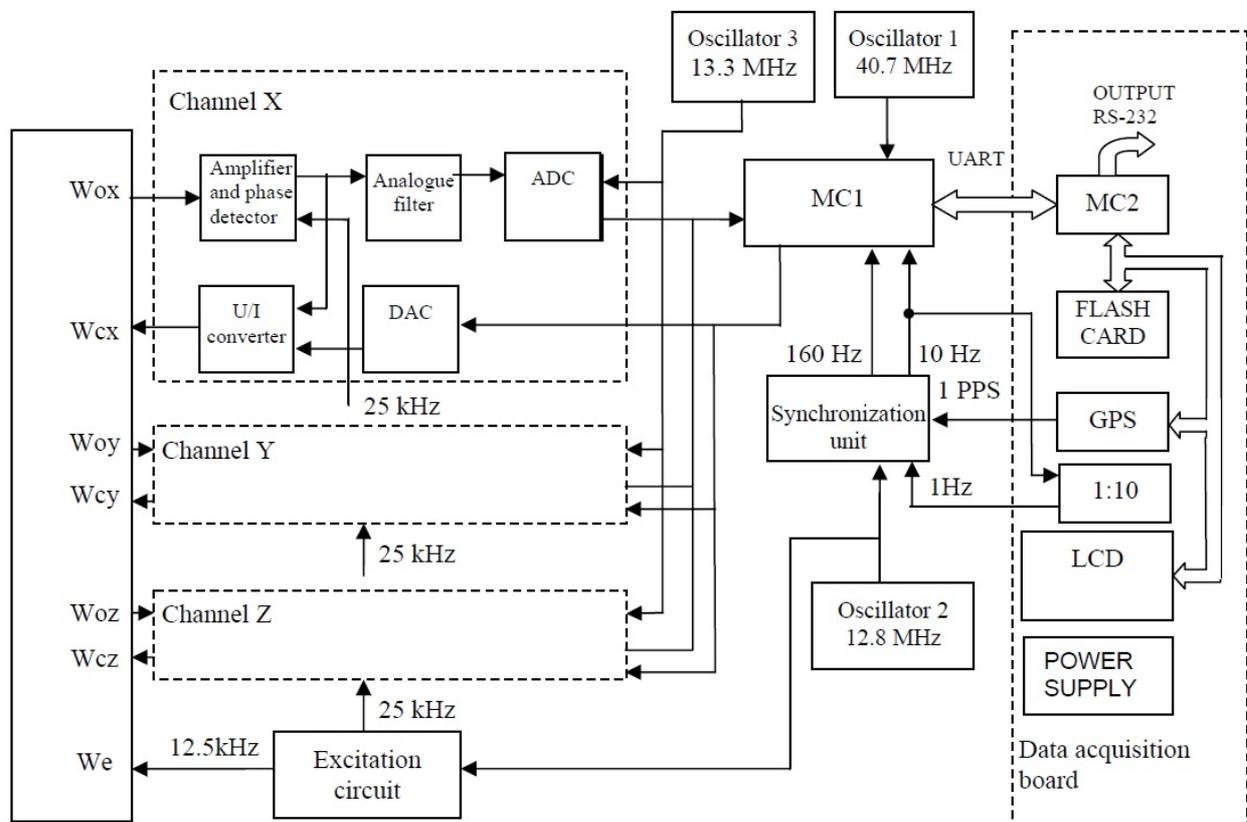
Lo strumento, nelle normali operazioni di osservatorio, richiede un PC esterno per la memorizzazione e la trasmissione dei dati acquisiti continuamente. È inoltre possibile memorizzare i dati direttamente nello strumento su di una memoria estraibile Compact Flash (fino a 2 Gb), visibile in figura 1. Questa risulta particolarmente utile per le misure temporanee in campagna o come backup di dati. Lo strumento ha anche un ricevitore GPS per la sincronizzazione dei dati e la localizzazione attraverso la determinazione delle coordinate geografiche del luogo d'installazione.

Measured range of magnetic field variations	± 4000 nT
Offset compensation band along each magnetic component	± 70 000 nT
Resolution along each component: at the display, 1-second and 1-minute data files at 0.1-second file and Flash card data	0.01 nT 0.001 nT
Temperature drift	< 0.2 nT/°C
Noise level at 1 Hz	< 10 pTrms
Components orthogonality error	< 30 min of arc
Components orthogonality error after calibration	< 2 min of arc
Sample rate	
at the magnetometer digital output and FLASH card after PC software digital filtration	10 per second 1 per second 1 per minute
Frequency band for 10 per second data output	DC – 3.5 Hz
Volume of the removable Compact FLASH memory card (CF FAT16)	≤ 2 GB
Digital output	RS 232
GPS timing and co-ordinates determination	
Operating temperature range	minus 10 to +50° C
Power supply	12 <sup>+3</sup> <sub>-2</sub> V
Power consumption	< 4 W
Weight	
sensor with 10 m cable	3.3 kg
electronic unit with cables	3.8 kg
GPS antenna with 15 m cable	0.7 kg

**Tabella 2.** Caratteristiche dettagliate del magnetometro LEMI-025.

## 2. Funzionamento del magnetometro

Il diagramma funzionale del magnetometro LEMI 025 è illustrato in figura 2. Il sensore fluxgate, visibile sulla sinistra della figura, è pilotato attraverso la bobina di eccitazione “We” alla frequenza di 12.5 kHz. Un segnale di riferimento al doppio di questa frequenza è anche inviato ai tre circuiti di misura, uno per ogni componente del sensore, lungo i tre assi di misura. Descriviamo adesso in dettaglio il canale x lo stesso vale anche per le altre due componenti dello strumento. Il segnale proveniente dalla bobina di misura Wox è collegato all’ingresso di un amplificatore selettivo con frequenza centrale a 25 kHz (II<sup>a</sup> armonica della frequenza di eccitazione). La sua uscita è amplificata e rettificata dal rivelatore di fase. L’uscita di questo rivelatore passando attraverso un convertitore tensione-corrente torna alla bobina di compensazione Wcx del sensore, generando così un campo magnetico di feedback nella bobina. I parametri del circuito di feedback sono scelti in modo che il range di misura vari da  $\pm 4000$  nT e con una frequenza di taglio di circa 20 Hz. L’uscita del rivelatore di fase è collegato all’ingresso di un filtro analogico il quale provvede ad una alta attenuazione alla frequenza di 60 Hz e con una pendenza di -40dB/decade per le frequenze maggiori di 100 Hz. Il ritardo di fase totale della sezione analogica è di circa 12ms nell’intervallo di frequenze da 0 a 10 Hz.



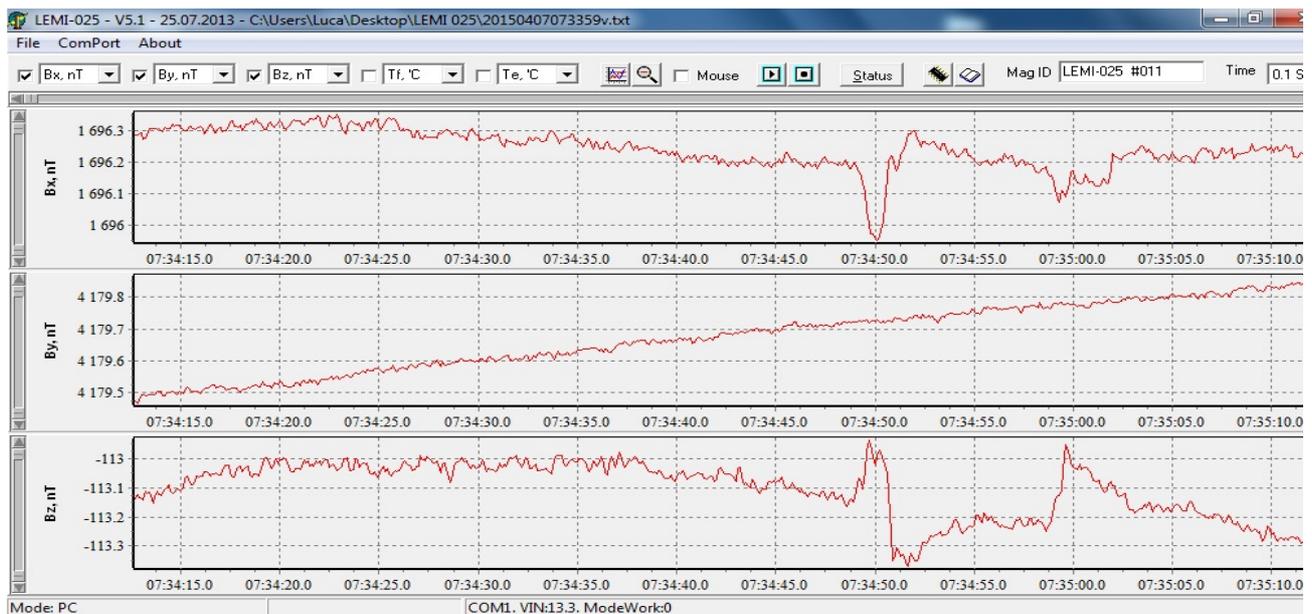
**Figura 2.** Diagramma a blocchi del magnetometro LEMI-025.

Tre convertitori  $\Sigma\Delta$  (sigma delta), uno per ogni canale, lavorano simultaneamente utilizzando un comune oscillatore di riferimento alla frequenza di 13.3 MHz con intervallo di campionamento di 6.157 ms. I dati in uscita dai convertitori sono letti ogni 6.25 ms, intervallo determinato dalla frequenza di interrupt del microprocessore MC1 di 160 Hz, generata dall’unità di sincronizzazione. Il processore MC1 applica ai dati acquisiti, un filtro digitale a risposta d’impulso finita, con una frequenza di taglio di 3.72 Hz. Il filtro è centrato al secondo 0.1 UTC per mezzo del segnale a 10 Hz, sempre della unità di sincronizzazione controllata dal segnale 1 PPS del GPS dello strumento.

### 3. Procedura di taratura del LEMI-025

Come mostrato nella tabella 2, l'ortogonalità del sensore è minore di 30 minuti d'arco. Dopo la calibrazione questo parametro scende a 2 minuti di arco con un netto miglioramento. In questo modo si riescono a migliorare le caratteristiche meccaniche del sensore attraverso la calibrazione del sensore. La taratura invece, che verrà discussa in questo paragrafo, è una operazione di regolazione del magnetometro e permetterà di verificare l'esattezza delle misure magnetometro. Questo verrà fatto attraverso il confronto con uno strumento campione installato presso l'osservatorio di Preturo a L'Aquila. In particolare verranno definiti i parametri (costanti moltiplicative) che applicati ai dati grezzi acquisiti dallo strumento, effettueranno l'operazione di correzione. Questi parametri sono legati a tutto lo strumento, elettronica compresa, ed è necessario ripetere questa operazione di taratura periodicamente per verificare le caratteristiche dello strumento o ogni volta che si interviene sull'elettronica per una riparazione.

L'operazione di taratura dello strumento coinvolge in modo particolare il sensore e attraverso specifici allineamenti lungo particolari direzioni è possibile tarare ogni singolo asse del magnetometro. Il sensore del magnetometro, visibile in figura 1, presenta al suo interno, su ogni asse, un elemento a simmetria cilindrica sensibile al campo magnetico. Durante la normale operatività dello strumento, l'orientazione del sensore, con l'asse x lungo il meridiano magnetico, proietta sui suoi assi xyz i valori del campo magnetico terrestre separandoli nelle componenti HDZ. Nell'operazione di taratura l'orientazione del sensore viene fatta allineando il vettore di induzione del campo magnetico terrestre con l'asse del sensore che si sta tarando, parallelamente e antiparallelamente ruotando il sensore di 180°.



**Figura 3.** Il programma di visualizzazione e configurazione del magnetometro.

I parametri di taratura dello strumento misurati dalla LEMI vengono mantenuti in una memoria non volatile e utilizzati dal software dello strumento per la trasformazione dei valori numerici misurati dall'ADC e dal DAC, per calcolare i valori misurati del campo magnetico terrestre e le temperature del sensore e dell'elettronica dello strumento. Il programma permette di salvare questi coefficienti in un file "\*.def" sul disco del PC e ricaricarli nello strumento in caso di bisogno. Questi coefficienti sono molto importanti per il funzionamento dello strumento e sono calcolati e impostati dalla fabbrica ed è buona norma averne una copia di sicurezza. Un esempio dei valori dei coefficienti e del formato del file di taratura è illustrato qui di seguito.

Ax1= 0.00000000000000E+0000	K1x= 2.11668395996094E+0000
Ay1= 0.00000000000000E+0000	K1y= 2.17790079116821E+0000
Az1= 0.00000000000000E+0000	K1z=-2.14964461326599E+0000
Ax2= 0.00000000000000E+0000	K2x=-9.33269984670915E-0005
Ay2= 0.00000000000000E+0000	K2y=-9.61365149123594E-0005
Az2= 0.00000000000000E+0000	K2z= 9.48717788560316E-0005
Kxy= 0.00000000000000E+0000	KTF= 7.51599948853254E-0003
Kyz= 0.00000000000000E+0000	KTE= 7.51599948853254E-0003
Kxz= 0.00000000000000E+0000	KTF0=-2.36000000000000E+0002
	KTE0=-2.37000000000000E+0002
	KVBAT= 1.23275101184845E+0000

I coefficienti Ax1,Ay1,Az1 sono relativi al DAC mentre Ax2,Ay2,Az2 sono relativi all'ADC di ciascun canale. Kxy, Kyz, Kxz espressi in radianti sono relativi all'ortogonalità del sensore. Tutti questi sono impostati a 0 nel nostro esempio. I sei valori K1 e K2 x,y,z sono relativi alla pendenza della funzione di trasferimento del magnetometro e sono espressi in nT/bit. I quattro coefficienti KTF e KTE (pendenza e offset della funzione lineare) sono relativi ai sensori di temperatura dell'elettronica e del sensore. Nella figura 4 sono visibile le equazioni che legano questi coefficienti con i valori misurati, così come mostrato dal software dello strumento.

Il software di acquisizione a corredo del LEMI è visibile in figura 3 nella schermata iniziale. Permette di comandare e leggere lo strumento tramite la porta seriale del PC. È possibile configurarne l'acquisizione, selezionare il tipo di file da creare, memorizzare i dati (memoria flash o PC) e visualizzare l'andamento nel tempo del campo magnetico misurato lungo i suoi tre assi. In figura 4 sono indicate le equazioni che descrivono la risposta degli elementi del sensore al campo magnetico e le equazioni correttive dovute a un disassamento tra gli elementi. La taratura richiede prima di tutto di individuare i tre coefficienti K1x, K1y e K1z di proporzionalità del campo e poi successivamente i tre coefficienti K2x, K2y e K2z di correzione.

Contemporaneamente alla taratura e nelle vicinanze del magnetometro da tarare, occorre disporre di un magnetometro che misura il vettore di campo totale da utilizzare come riferimento. La valutazione dei valori K1 va ripetuta su tutte e tre le componenti. Vediamo in dettaglio quali sono le operazioni da eseguire, supponendo di voler calibrare per prima la componente Z. Bisogna installare il LEMI 025 in un ambiente magneticamente adeguato e nella sua configurazione completa. Collegare la porta di comunicazione del magnetometro alla seriale di un PC ed avviare il software di acquisizione.

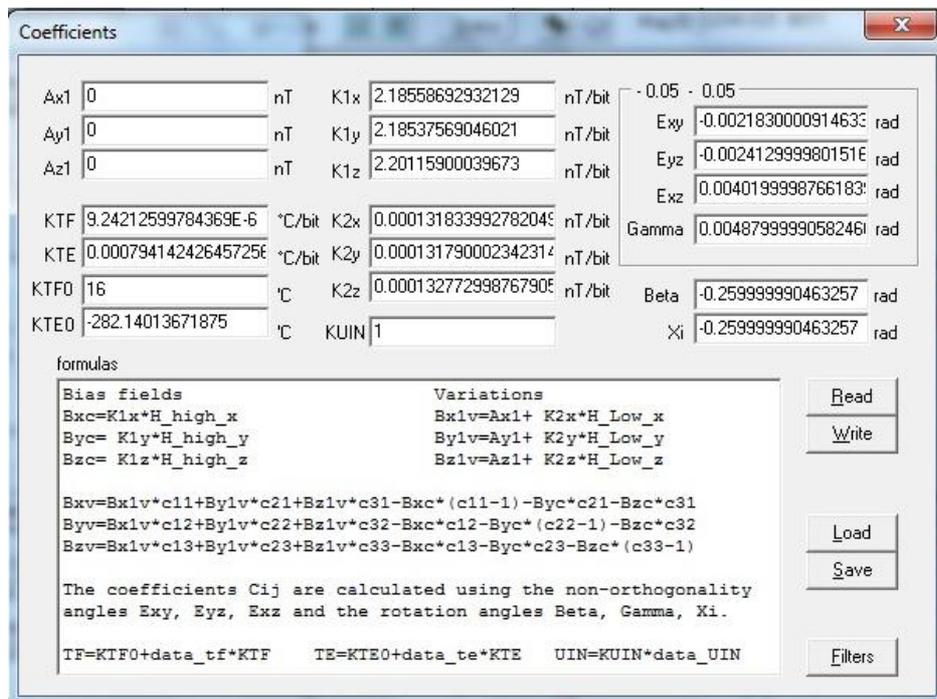
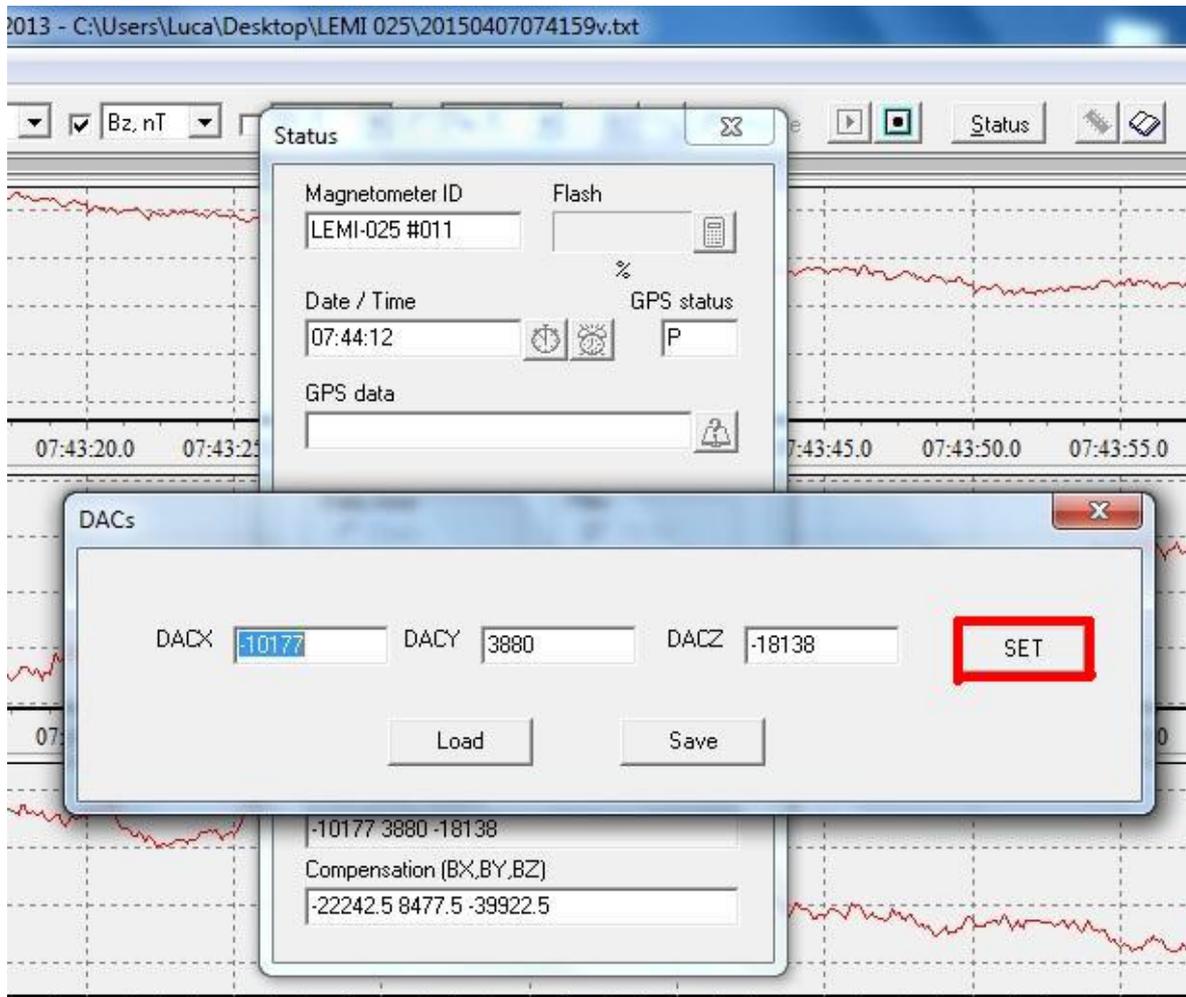


Figura 4. Parametri ed equazioni del magnetometro.

Premendo il pulsante “STATUS” visibile in alto nella figura 3 è possibile aprire una finestra informativa sullo stato del magnetometro. Da questa finestra premendo il pulsante DAC si può entrare nella finestra di visualizzazione dei coefficienti di compensazione ossia i valori numerici inseriti nel DAC per la generazione della corrente di feedback. Premendo il pulsante “DAC” si apre la finestra di modifica come in figura 5. Da notare che questo pulsante è attivo solo quando il sistema è in acquisizione e soltanto in questo caso è possibile modificare i coefficienti di compensazione. Una volta scritti i valori dei DAC, è possibile inviarli all’elettronica di controllo tramite il pulsante “SET”. Per calibrare la componente Z bisogna come prima operazione impostare inizialmente  $DACX=0$  e  $DACY = 0$ .



**Figura 5.** Parametri ed equazioni del magnetometro.

A questo punto occorre posizionare il sensore in modo che la componente da calibrare, nel nostro caso la Z, risulti allineata parallelamente al vettore di campo magnetico totale F, come illustrato nelle figure 6 a e b. Tale operazione può essere svolta utilizzando un supporto adatto al quale fissare il sensore, nelle figure è visibile il supporto costruito nei laboratori INGV, realizzato in plexiglass con le viti in ottone per la regolazione fine. In mancanza di un supporto adeguato si possono utilizzare degli spessori non magnetici da inserire sotto il sensore per l’orientazione, ma l’operazione risulta notevolmente più complessa. In queste operazioni le letture di campo della componente X ed Y devono essere all’interno di  $\pm 100\text{nT}$ , ciò implica un preciso e attento allineamento del sensore, considerando anche che per ogni grado di spostamento si ha una variazione della componente della F proiettata lungo il sensore di circa  $800\text{nT}$ . Affinché tutta l’operazione di taratura vada a buon fine è necessario che i valori del vettore campo totale non varino più di  $\pm 2000\text{nT}$ . È bene quindi controllare che non ci siano tempeste magnetiche in atto.

a)



b)

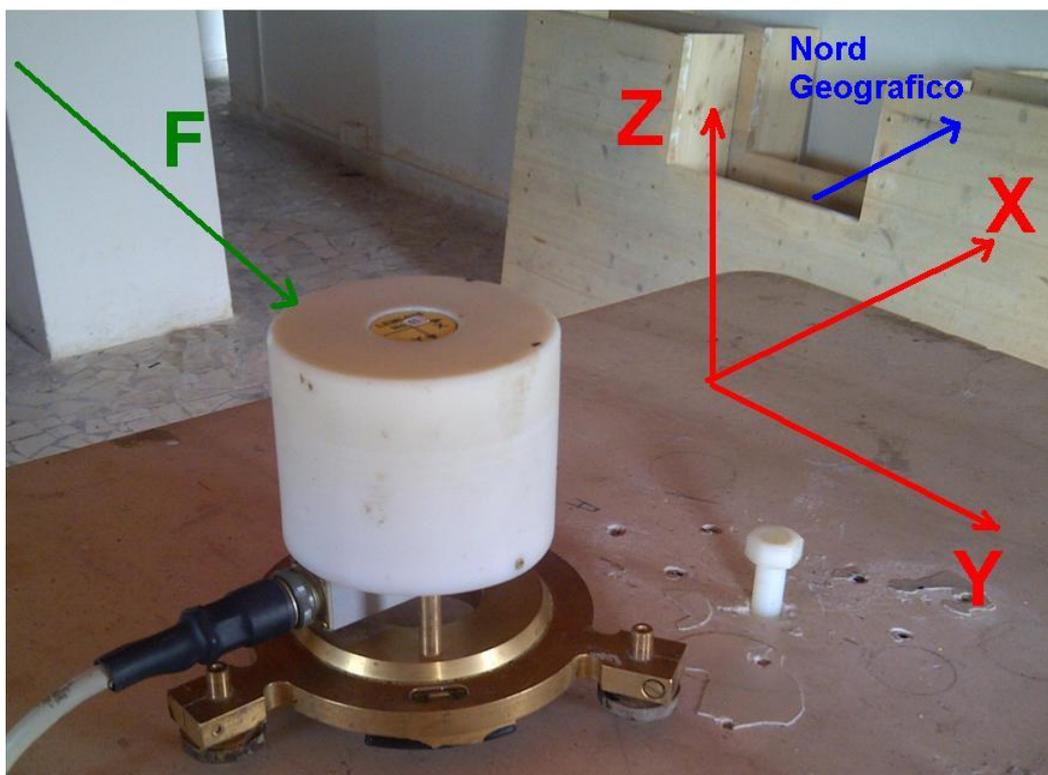


**Figura 6.** a) e b) posizionamento del sensore sulla struttura per la calibrazione.

Una volta finita la procedura di allineamento occorre individuare il valore del  $DAC_Z$  tale per cui la lettura del magnetometro lungo la componente  $Z$  sia ridotta a  $\pm 1$ nT. A questo punto bisogna prendere nota di tale valore di  $DAC_Z$  insieme all'ora esatta in  $UT$ . Definiamo tale valore di  $DAC_Z$  come  $DAC_{Z1}$ . Si posiziona successivamente il sensore in modo che la componente  $Z$  risulta allineata antiparallelamente al vettore di campo totale  $F$  come in figura 6b. Ripetendo la procedura descritta precedentemente si ottiene il parametro  $DAC_{Z2}$ . Terminata questa prima fase si calcolano i valori medi di campo totale durante minuti di misurazione, chiamandoli  $F_{t1}$  ed  $F_{t2}$ . Si può determinare il coefficiente  $K_{1Z}$  effettuando questo semplice calcolo:

$$K_{1Z} = -\frac{F_{t1} + F_{t2}}{DAC_{Z1} - DAC_{Z2}}$$

espresso in [nT/bit]. L'intera procedura va ripetuta similmente per le altre due componenti  $X$  ed  $Y$  fino ad ottenere i valori  $K_{1X}$  e  $K_{1Y}$ . Con il magnetometro non in acquisizione diventa attivo il pulsante "COEFFICIENTS", sempre nella finestra "Status", che permette di accedere alla finestra di settaggio dei coefficienti (figura 4). I tre valori di  $K_1$  vanno scritti nelle rispettive celle visibili in figura 4 e tramite il pulsante "WRITE", vanno memorizzati sul magnetometro.



**Figura 7.** Posizionamento del sensore per la calibrazione.

Il passo successivo è quello di valutare i coefficienti  $K_2$ . Occorre posizionare il sensore del magnetometro orientativamente nel meridiano magnetico con la componente  $X$  orientata nella direzione Nord Geografico, come illustrato nella figura 7e livellarlo accuratamente. Questa operazione si ottiene semplicemente ruotando il sensore nel piano fino ad annullare la componente  $Y$ . In questa fase non è necessario un allineamento molto preciso come nella prima fase di taratura. Una volta acceso il magnetometro e lanciata da software l'acquisizione, è possibile leggere i valori di  $DAC_X$ ,  $DAC_Y$  e  $DAC_Z$  che sono assegnati automaticamente dal software di compensazione. Le letture delle tre componenti magnetiche devono restare al di sotto di  $\pm 100\text{nT}$ . Se così non è bisogna correggere i valori dei tre  $DAC$  manualmente. Si ottengono così tre valori  $DAC_X^0$ ,  $DAC_Y^0$  e  $DAC_Z^0$  che azzerano il campo in lettura. Prendiamo nota di tali valori ed individuiamo per tutte e tre le componenti i due valori  $DAC^+$  e  $DAC^-$  nel seguente modo:

$$\begin{aligned} DAC^+ &= DAC^0 + 1700 \\ DAC^- &= DAC^0 - 1700 \end{aligned}$$

Il coefficiente  $DAC$  è un parametro di compensazione, modificarlo significa aggiungere algebricamente al campo misurato un campo addizionale costante. Questo non pregiudica il valore della componente misurata. Infatti, il LEMI 025 è un magnetometro vettoriale di tipo variografico e non uno scalare. Modificando il  $DAC$  abbiamo semplicemente delle letture variografiche diverse di uno stesso valore assoluto di campo. I due valori  $DAC^+$  e  $DAC^-$  identificano rispettivamente due letture di campo,

$$\begin{aligned} \text{Campo}^{0+} &= K_1 * (DAC^0 + 1700) \\ \text{Campo}^{0-} &= K_1 * (DAC^0 - 1700) \end{aligned}$$

A questi due valori di campo, durante la calibrazione, si sovrappone quello terrestre. Il  $DAC^0$  è stato scelto in modo che il valore del campo naturale, lungo la componente in esame, viene totalmente compensata. Potendo eliminare il contributo  $K_1 * DAC^0$ , le due letture del magnetometro si riducono semplicemente alla lettura di due campi fittizi del tipo:

$$\begin{aligned} \text{Campo}^+ &= K_1 * 1700 \\ \text{Campo}^- &= -K_1 * 1700 \end{aligned}$$

dove ovviamente risulta  $\text{Campo}^+ = -\text{Campo}^-$ . Settiamo il  $DAC^+$  nel magnetometro e prendiamo nota del valore di campo misurato dallo strumento sul canale corrispondente alla componente in considerazione, chiamiamolo  $B^+$ . Successivamente settiamo il  $DAC^-$  nel magnetometro. Con  $B^-$  indichiamo il corrispondente valore di campo misurato. È possibile individuare i coefficienti correttivi  $K$  del coefficienti  $K_2$  utilizzando la seguente semplice formula:

$$K = \frac{\text{Campo}^+ - \text{Campo}^-}{B^+ - B^-} = \frac{2|\text{Campo}^+|}{B^+ - B^-}$$

che in pratica significa

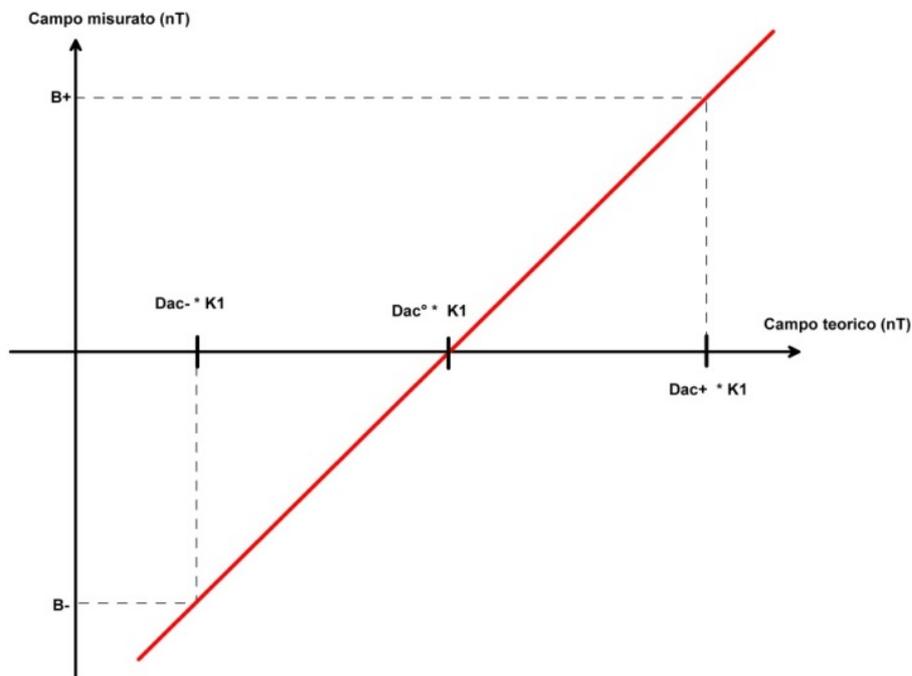
$$K = \frac{\Delta \text{Campo fittizio}}{\Delta \text{Campo misurato}}$$

Per una buona calibrazione si richiede che i valori dei coefficienti  $K$  si discostino dall'unità di  $\pm 0.0005$ . I nuovi valori dei coefficienti  $K_2$  saranno ottenuti secondo la seguente semplice relazione:

$$K_{2 \text{ new}} = K_{2 \text{ old}} * K$$

È consigliabile ripetere la valutazione dei coefficienti  $K$ , e quindi dei coefficienti  $K_2$ , al fine di garantire la corretta calibrazione del magnetometro. Nella figura 4, che mostra la finestra di configurazione del magnetometro, sono indicate le caselle dove vanno inseriti i nuovi valori dei coefficienti  $K_2$ .

Generalmente per ogni componente è possibile anche dare una spiegazione grafica della procedura di calibrazione appena descritta. Il grafico in figura 8 sintetizza la procedura di calibrazione. I tre valori di  $DAC$  usati per la valutazione dei coefficienti  $K_2$  individuano, nel piano di misura di ogni componente magnetica, tre punti. Con la procedura di calibrazione si tenta di allineare tali punti lungo una retta. L'inclinazione di tale retta, la cui tangente rappresenta il coefficiente  $K$ , deve essere il più possibile vicina a  $45^\circ$ . Infatti, dovendo essere il campo teorico uguale al campo misurato, il coefficiente  $K$  deve risultare prossimo all'unità.



**Figura 8.** Posizionamento del sensore per la calibrazione.

#### 4. Test del LEMI 025 con il metodo del confronto

Terminata la calibrazione, il LEMI 025 è stato installato all'interno della cassetta (amagnetica) dei variografi dell'osservatorio di Preturo a L'Aquila. Per il confronto si è utilizzato il magnetometro vettoriale, un fluxgate modello FGE della DMI Danese. La figura 9 rappresenta i grafici di confronto tra le componenti dei due strumenti del giorno 11 e 25 Marzo 2015, prima e dopo la procedura di taratura. Si può affermare che la procedura di calibrazione è andata a buon fine, vista la buona sovrapposibilità delle tracce nel secondo gruppo di grafici.

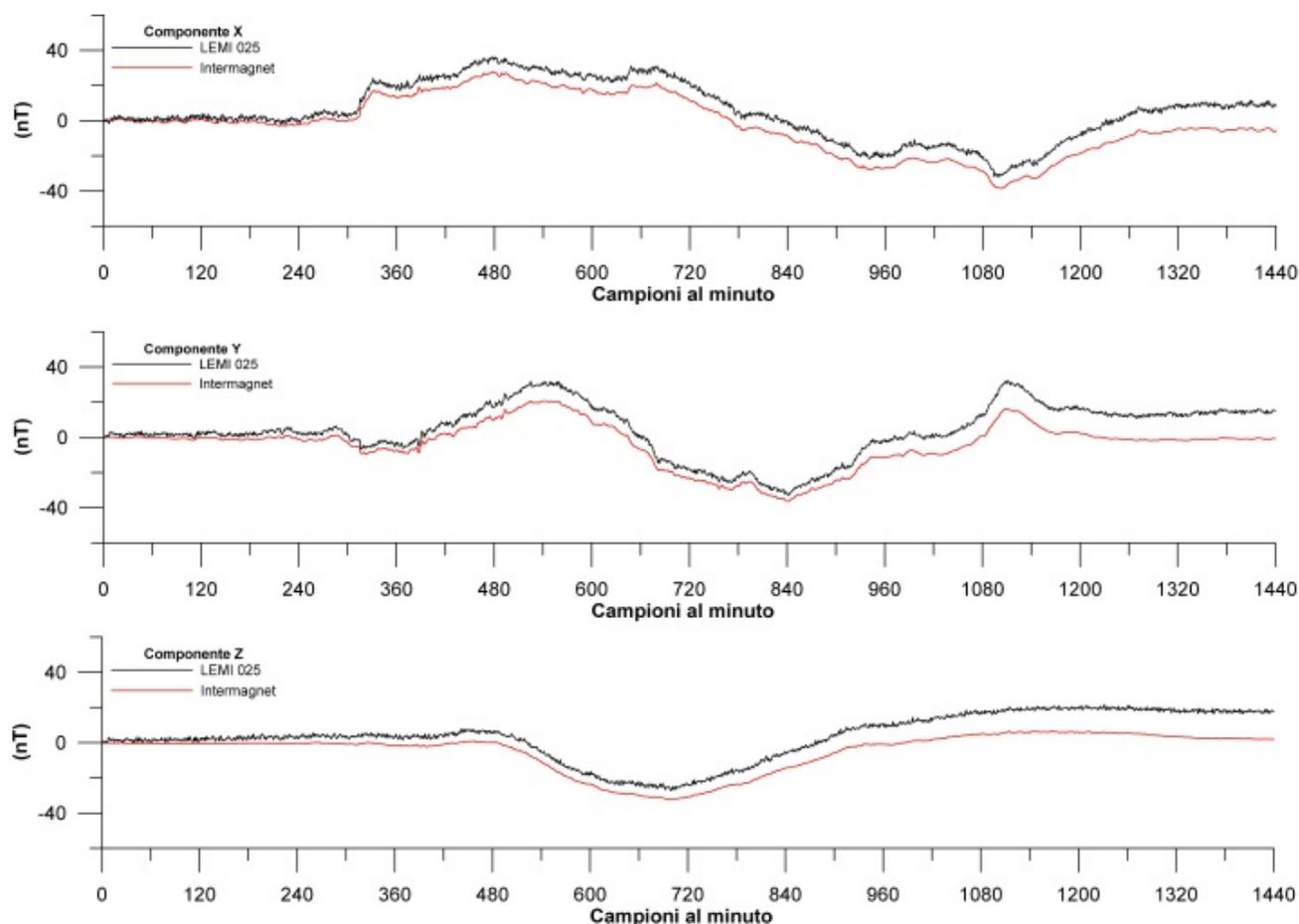
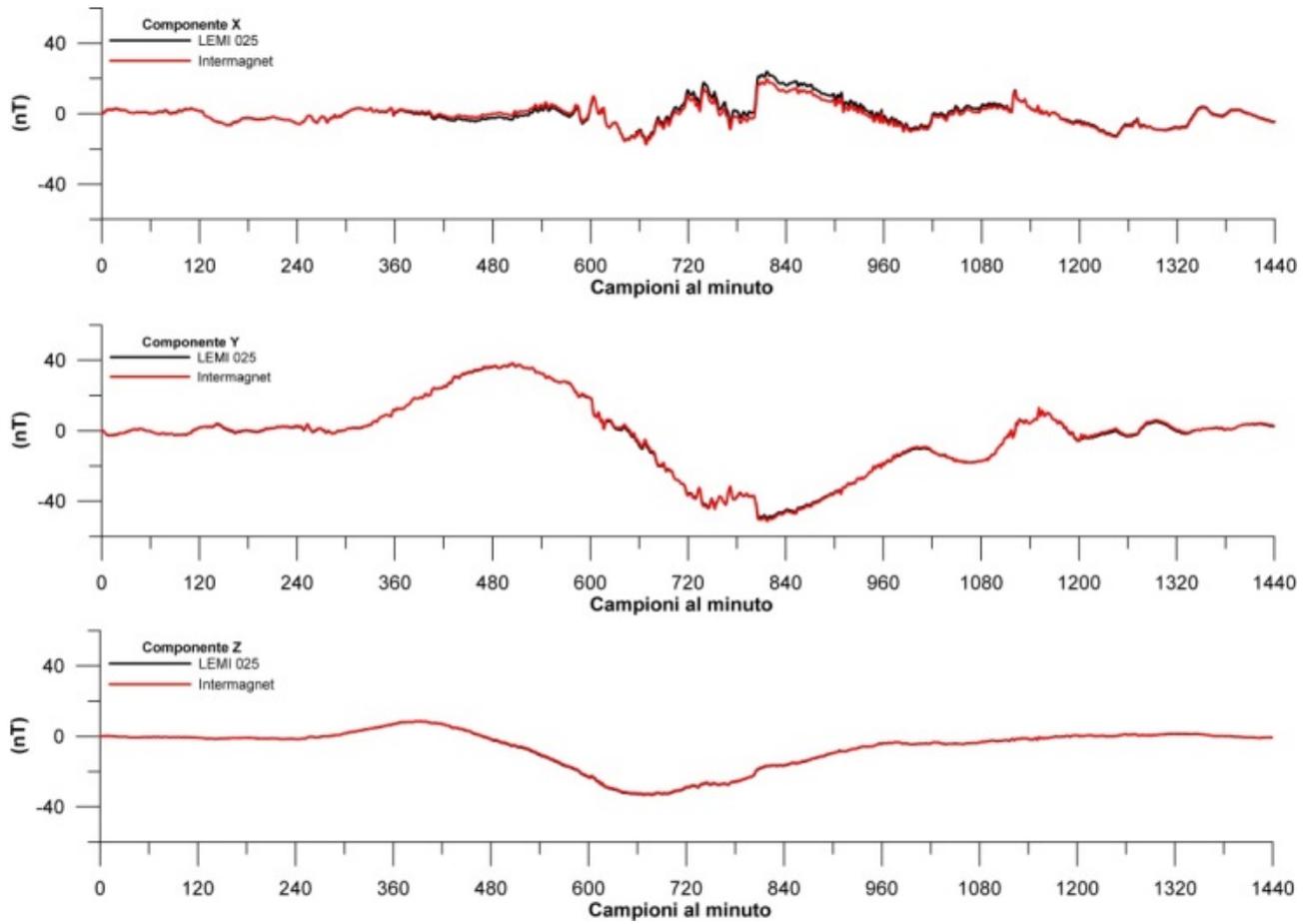


Figura 9. Confronto dei dati prima della calibrazione.

#### 5. Conclusioni

Al fine di mantenere la strumentazione geomagnetica degli osservatori sempre in efficienza e in particolare dopo un intervento di riparazione dei magnetometri è necessario effettuare una operazione di taratura per la verifica dell'esattezza dei valori misurati. Questa elaborata operazione permette attraverso dei particolari allineamenti del sensore del magnetometro, di ricavare i coefficienti moltiplicativi che applicati ai dati misurati dallo strumento, permettono di misurare correttamente il campo, grazie al confronto con uno strumento di riferimento. Questa operazione è stata realizzata presso l'osservatorio di Preturo per la taratura di un magnetometro LEMI 25. Questo magnetometro per le sue ottime caratteristiche di misura stabilità e precisione sarà il magnetometro di riferimento degli osservatori Italiani. La procedura di taratura delle strumentazione di misura del campo magnetico eseguita è stata descritta in dettaglio in questo rapporto e i buoni risultati ottenuti sono illustrati nella figura 10. Questo rapporto costituisce un utile riferimento vista l'importanza di ripetere periodicamente questa procedura per valutare lo stato di funzionamento della strumentazione.



**Figura 10.** Confronto dei dati dopo la calibrazione.



# Quaderni di Geofisica

ISSN 1590-2595

<http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/quaderni-di-geofisica/>

I Quaderni di Geofisica coprono tutti i campi disciplinari sviluppati all'interno dell'INGV, dando particolare risalto alla pubblicazione di dati, misure, osservazioni e loro elaborazioni anche preliminari, che per tipologia e dettaglio necessitano di una rapida diffusione nella comunità scientifica nazionale ed internazionale. La pubblicazione on-line fornisce accesso immediato a tutti i possibili utenti. L'Editorial Board multidisciplinare garantisce i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi.

# Rapporti tecnici INGV

ISSN 2039-7941

<http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/rapporti-tecnici-ingv/>

I Rapporti Tecnici INGV pubblicano contributi, sia in italiano che in inglese, di tipo tecnologico e di rilevante interesse tecnico-scientifico per gli ambiti disciplinari propri dell'INGV. La collana Rapporti Tecnici INGV pubblica esclusivamente on-line per garantire agli autori rapidità di diffusione e agli utenti accesso immediato ai dati pubblicati. L'Editorial Board multidisciplinare garantisce i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi.

# Miscellanea INGV

ISSN 2039-6651

<http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/miscellanea-ingv/>

La collana Miscellanea INGV nasce con l'intento di favorire la pubblicazione di contributi scientifici riguardanti le attività svolte dall'INGV (sismologia, vulcanologia, geologia, geomagnetismo, geochimica, aeronomia e innovazione tecnologica). In particolare, la collana Miscellanea INGV raccoglie reports di progetti scientifici, proceedings di convegni, manuali, monografie di rilevante interesse, raccolte di articoli ecc..

**Coordinamento editoriale e impaginazione**

Centro Editoriale Nazionale | INGV

**Progetto grafico e redazionale**

Daniela Riposati | Laboratorio Grafica e Immagini | INGV

© 2015 INGV Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Via di Vigna Murata, 605

00143 Roma

Tel. +39 06518601 Fax +39 065041181

**<http://www.ingv.it>**



**Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia**