

LNF-10/ 23 (IR)
19 Novembre 2010

CARATTERIZZAZIONE PRELIMINARE DEL SISTEMA DI MISURA DI CAMPO MAGNETICO DEL B-TRAIN DI CNAO

G. Franzini, D. Pellegrini, A. Stella
Laboratori Nazionali di Frascati dell'INFN, Frascati, Italy

M. Pezzetta, M. Pullia
Centro Nazionale di Adroterapia Oncologica, Pavia, Italy

1. INTRODUZIONE	2
1.1 CONSIDERAZIONI MATEMATICHE E UNITÀ DI MISURA	5
2 MISURE PRELIMINARI.....	8
3 MISURE SULLA PRECISIONE DEL SISTEMA DI LETTURA.....	12
4 RISULTATI E CONSIDERAZIONI.....	22

1. INTRODUZIONE

In queste note si presenteranno i risultati della caratterizzazione effettuata sul sistema di misura del campo magnetico che costituisce parte del sistema B-Train. Si esporranno in particolare le misure effettuate al CERN (banco di test CNAO nella zona test 876-RH-29), in gennaio 2009. Tali misure rappresentano la prima caratterizzazione dell'AD7643 utilizzando uno dei dipoli del sincrotrone del CNAO e con un flussimetro (realizzato al CERN) molto simile a quello che con ogni probabilità sarà usato al CNAO.



FIG. 1 - Dipolo del sincrotrone CNAO e flussimetro per la misura del campo magnetico

Il flussimetro utilizzato è costituito da una bobina di rame contenuta in un involucro di vetronite, le cui caratteristiche sono riportate in tabella 1.

TABELLA 1 – caratteristiche della bobina di misura del campo magnetico

Parametro	Valore
NxS nominale	2.4 m ²
Resistenza nominale	1.6 KΩ
Lunghezza nominale	2.5 m
Numero di spire	106 (*)
Area della singola spira	0.02 m ² (*)
Lunghezza dell'avvolgimento	580 m (*)
Diametro del filo	0.09 mm (*)

(*)Valori estrapolati analiticamente dai dati base.

Il dipolo utilizzato per le misure ha le caratteristiche presenti in tabella 2.

TABELLA 2 – *caratteristiche dei dipoli magnetici del sincrotrone del CNAO*

Parametro	Valore
Campo massimo	1.5 T
Corrente nominale	2800 A
Lunghezza magnetica	1677.2 mm
Slew rate	≤ 3 T/s
Superficie polare utile	0.48 m ² (*)

(*) *Estrapolato dai disegni tecnici di costruzione.*

Il sistema di misura è composto dall'AD7643 della Analog Devices, un ADC a 18 bit con $f_{\text{camp}}=1.25$ MHz di tipo SAR a redistribuzione di carica, fully-differential, montato sulla scheda di valutazione EVAL-AD76XX. Quest'ultima fornisce l'elettronica di front-end dell'ADC per i segnali analogici d'ingresso e quelli digitali di uscita.

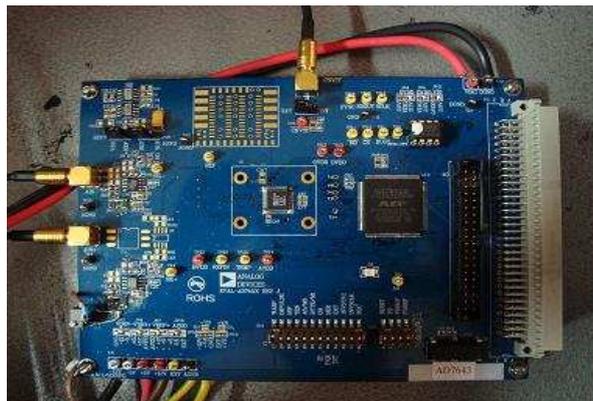


FIG. 2 - *AD7643 della Analog Devices, montato su scheda di valutazione EVAL-AD76XX*

Dal lato dell'uscita, l'ADC è collegato tramite un cavo SCSI a uno dei connettori frontali della NI-PXI 7811R, una scheda multifunzione contenente un chip FPGA programmabile con LabVIEW FPGA (Virtex-II 1M gate). La scheda 7811R è inserita in un cestello PXI a 4 slot NI-PXI-1031, dotato di controllore embedded PXI-8196. La FPGA è utilizzata per gestire, elaborare e visualizzare i segnali di uscita dell'ADC. Per quanto riguarda l'ingresso dell'ADC, i due canali di input dell'AD7643 sono a una tensione di riposo $V_{\text{ref}}/2= 1.25$ V generata sulla EVAL-AD76XX. I due ingressi sono collegati tramite uno splitter a un cavo bipolare twistato e schermato al quale è collegato il flussimetro. E' presente inoltre un circuito che ha come ingresso la tensione V_{ref}

generata sulla EVAL-AD76XX e che fornisce in uscita $V_{ref}/2$ a bassa impedenza, tensione alla quale è collegato lo schermo del cavo utilizzato.

La scheda EVAL-AD76XX e il circuito di buffer di $V_{ref}/2$ sono stati alimentati con due alimentatori Agilent E3631A.

A riguardo dei canali di ingresso dell'ADC, del flussimetro e del cavo di collegamento si può fare riferimento alla fig.3.

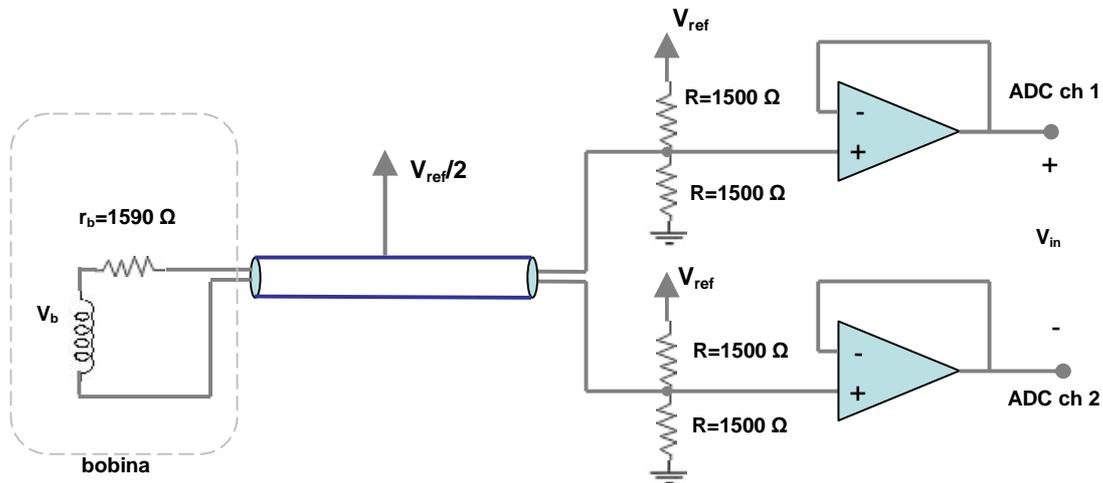


FIG. 3 - schema circuitale d'ingresso

Le $R = 1500 \Omega$ sono state montate sulla EVAL-AD76XX e costituiscono le resistenze di ingresso dell'ADC.

Riassumendo brevemente il funzionamento del circuito di ingresso: l'AD7643 misura in maniera differenziale i due canali di ingresso. Ogni canale può andare da 0 a 2.5 V ($= V_{ref}$). La tensione di riposo dei due canali è $V_{ref}/2 = 1.25$ V. Essa è fornita da un partitore resistivo, composto dalle R suddette, che dimezzano V_{ref} . In totale si può applicare in ingresso una ΔV_{in} compresa fra -2.5 V e +2.5V.

Complessivamente il circuito di ingresso può essere rappresentato con lo schema equivalente in fig.4.

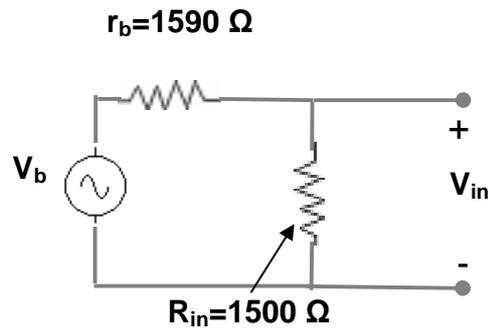


FIG. 4 - *schema equivalente per letture differenziali dei segnali provenienti dal flussimetro*

Effettuando misure differenziali, si può considerare la R_{in} complessiva dell'ADC pari a 1500Ω . La resistenza del flussimetro (r_{bobina}) è di 1590Ω . Le tensioni sviluppate dal flussimetro sono misurate su R_{in} che forma un partitore con la r_{bobina} e sono, quindi, all'incirca dimezzate. Si sono inoltre montati sulla EVAL-AD76XX, dopo i buffer di ingresso, due condensatori $C = 109 \text{ nF}$ a formare un filtro passa basso sui segnali di ingresso dell'ADC ($f_{3db} = 97 \text{ kHz}$) con $R = 15 \Omega$ già presente.

Nella prima parte della relazione si descriveranno le caratteristiche dei segnali provenienti dal flussimetro sotto diverse condizioni di funzionamento.

Nella seconda parte, si procederà con la descrizione delle prove effettuate per stabilire la precisione del sistema di misura.

Molte delle misure che si presenteranno fra quelle effettuate al CERN verranno messe a confronto con quelle eseguite nei Laboratori Nazionali di Frascati, in presenza di diverse sorgenti di segnale. Dal confronto con queste ultime, infatti, si evidenzieranno alcune caratteristiche del sistema di misura.

1.1 CONSIDERAZIONI MATEMATICHE E UNITÀ DI MISURA

La grandezza che si intende misurare con il B-Train è l'integrale di campo magnetico generato dai dipoli lungo il tragitto percorso dal fascio:

$$\int_{Dip} B(s) \cdot ds \quad (1)$$

dove $B(s)$ è il campo magnetico prodotto da un dipolo in funzione dell'ascissa curvilinea s utilizzata per descrivere la traiettoria del fascio e Dip è genericamente la parte di tragitto affetta dal campo magnetico generato da un dipolo.

Si può definire:

$$\int_{Dip} B(s) \cdot ds = B_{max} \cdot L_{magn} \quad [T \cdot m] \quad (2)$$

dove B_{max} è il massimo valore di campo magnetico in funzione di s e L_{magn} la lunghezza magnetica del dipolo relativa a B_{max}

Per la legge di Lenz si ha che:

$$V(t) = - \frac{d\Phi(t)}{dt} \quad (3)$$

dove $\Phi(t)$ è il flusso magnetico (in Weber) attraverso la bobina del flussimetro e $V(t)$ la tensione (in Volt) generata ai capi del flussimetro.

Per quanto riguarda il flusso magnetico, ipotizzando che il campo si mantenga costante per diversi raggi all'interno della bobina, si può approssimare:

$$\Phi \cong N \cdot A \cdot \int_{Dip} B(s) \cdot ds = N \cdot A \cdot B_{max} \cdot L_{magn} \quad (4)$$

dove N è il numero di spire che compongono il flussimetro e A la sua larghezza. Quest'ultimo passaggio è reso possibile dalla geometria del flussimetro, la cui bobina è più lunga della zona utile di campo del dipolo ed è incurvata in maniera analoga ai dipoli magnetici, con larghezza costante A per tutta la sua lunghezza.

Si ha, quindi:

$$V(t) = -N \cdot A \cdot \frac{dB_{max}(t)}{dt} \cdot L_{magn} \quad (5)$$

in cui $B_{max}(t)$ (in Tesla), che in queste note indicheremo come $B(t)$, è il campo magnetico all'interno del dipolo (massimo rispetto all'ascissa curvilinea) e N è il numero delle spire che compongono la bobina.

Ne segue che misurando la tensione ai capi della flussimetro, integrandola e conoscendo il valore di campo B_0 in un istante iniziale t_0 , è possibile misurare il campo magnetico.

$$B(t) = B_0 - \frac{1}{N \cdot A \cdot L_{magn}} \cdot \int_0^t V(\tau) d\tau \quad (6)$$

Nel caso specifico del B-Train si utilizza l'AD7643 per digitalizzare la tensione ai capi della flussimetro. Si può scrivere in prima approssimazione, escludendo l'introduzione di rumore e distorsioni:

$$Dig_{out}(n\Delta t) = K \cdot V_{in}(n\Delta t) \quad \text{con } n \in \mathbb{N} \quad (7)$$

dove $Dig(n\Delta t)$ sono le acquisizioni dell'ADC con $\Delta t_{camp} = 800$ nsec e K (conteggi/V) è la costante di proporzionalità fra ingresso analogico (in Volt) e uscita digitale (in conteggi). L'integrale della tensione viene in realtà effettuato sui dati numerici, si ha quindi:

$$\int_0^t V(\tau) d\tau \Leftrightarrow \frac{1}{K} \cdot \Delta t_c \cdot \sum_{n=0}^{\frac{t}{\Delta t_c}} Dig(n\Delta t_c) \quad (8)$$

Nel corso di queste note, quando si menzionerà l'operazione di integrazione della tensione proveniente dal flussimetro, si vorrà in realtà indicare l'operazione di sommatoria sui dati numerici esposta in (8). Mettendo infine in relazione l'uscita dell'ADC con il campo magnetico si ha:

$$B(t) - B_0 = \frac{1}{N \cdot A \cdot L_{magn}} \cdot \frac{1}{K} \cdot p \cdot \Delta t_c \cdot \sum_{n=0}^{\frac{t}{\Delta t_c}} Dig(n\Delta t_c) \quad (9)$$

dove p è una costante, all'incirca pari a 2, che tiene conto del partitore resistivo già descritto all'ingresso dell'ADC. Si ricorda che la conoscenza di B_0 , ovvero la conoscenza del campo magnetico a un dato istante iniziale è legata ad altri sotto-sistemi del B-Train rispetto a quello caratterizzato in queste note.

Facendo riferimento a (9), si sono estrapolati dai dati raccolti i valori delle costanti di proporzionalità in gioco.

Le conversioni delle unità di misura (esprese in Gauss per comodità) sono:

$$\begin{aligned} 1 \text{ conteggio} &\leftrightarrow 19 \mu\text{V} (V_{in}) && (K \approx 52631.58 \text{ conteggi/V}) \\ 1 \text{ Gauss/sec} &\leftrightarrow 3.71 \text{ conteggi} && \left(\frac{1}{NAL_{magn}} \cdot \frac{1}{K} \cdot p \approx 0,26954 \cdot 10^{-4} \frac{\text{V}}{\text{m}^2 \cdot \text{cont.}} \right) \\ 1 \text{ Gauss} &\leftrightarrow 3.71 \text{ conteggi} \times \text{sec} \\ 1 \text{ conteggi} \times \text{sec} &\leftrightarrow 0.27 \text{ Gauss} \end{aligned}$$

Infine si è estrapolata la costante di proporzionalità che lega la corrente di alimentazione del dipolo al campo magnetico effettivamente generato.

1 Gauss \leftrightarrow 0.18 A (corrente dell'alimentatore)

1 A \leftrightarrow 5.55 Gauss

2 MISURE PRELIMINARI

Come prima cosa si è osservata l'uscita dell'ADC con i canali in corto circuito.

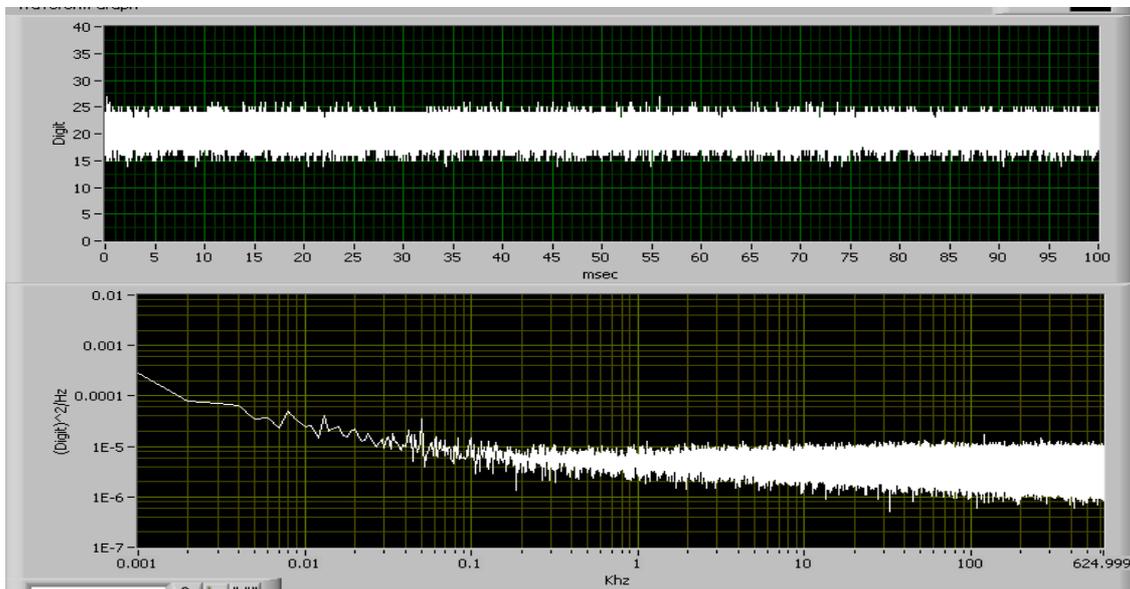


FIG. 5 - canali in cortocircuito. (a) Dati in uscita in conteggi (LSB), $T_{\text{acquisizione}} = 100$ msec. Valor medio (offset) e deviazione standard dei conteggi in uscita indicati in figura. (b) Densità spettrale (in conteggi²/Hz)

Nel grafico di fig.5 sono visualizzate per un tempo di 100 msec le acquisizioni dell'ADC ($\Delta t_{\text{camp}} = 800$ nsec). I valori di rumore (Std dev=1.54 conteggi \rightarrow 30 μ V) e offset (pari a 20.13 conteggi \rightarrow 382 μ V) sono in linea con i valori misurati presso i Laboratori di Frascati (Std dev= 1.66 conteggi) e rappresentano la soglia di rumore minimo a cui è soggetto il setup di misura. Osservando la densità spettrale dei dati precedenti si può osservare che lo spettro del rumore è piatto da ~ 100 Hz in su e aumenta con $1/f$ dai 100 Hz in giù.

Un'altra misura preliminare è stata quella di osservare il segnale proveniente dal flussimetro inserito nel dipolo disalimentato.

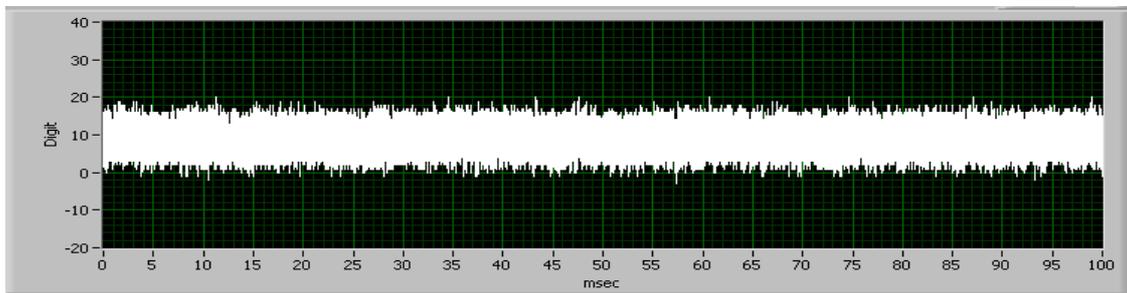


FIG. 6 - *segnale proveniente dalla flussimetro inserito nel dipolo disalimentato, $T_{acquisizione}=100\text{ msec}$*

La Std dev aumenta sensibilmente (= 2.70 conteggi) e l'offset passa da 20.13 conteggi a 8.32 conteggi. L'aumento della std deviation è con ogni probabilità da imputare a rumore ambientale intercettato dal flussimetro.

Si è poi alimentato il dipolo con diversi valori di corrente. Ad esempio, alimentando il dipolo con una corrente di 110 A, si è avuto il risultato presentato in fig.7.

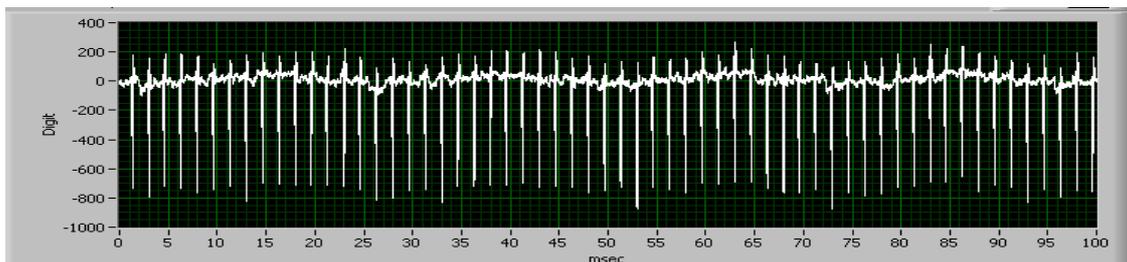


FIG. 7 - *segnale proveniente dalla flussimetro inserita nel dipolo alimentato con 110 A circa. La scala è circa 10 volte più grande dei precedenti grafici.*

Si può notare la presenza di picchi che si ripetono a una frequenza di 600 Hz, nonchè oscillazioni ad altre frequenze, fra le quali la più pronunciata è sui 43 Hz come è possibile vedere dalla densità spettrale in fig.8 e fig.9.

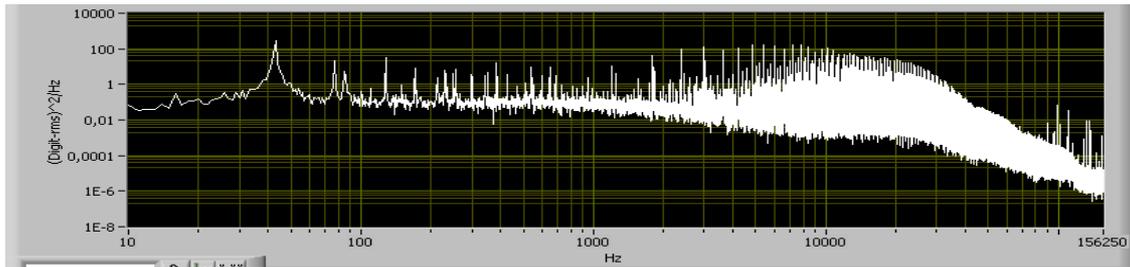


FIG. 8 - densità spettrale del precedente grafico. I dati sono stati mediati (1 media ogni 4 campioni).

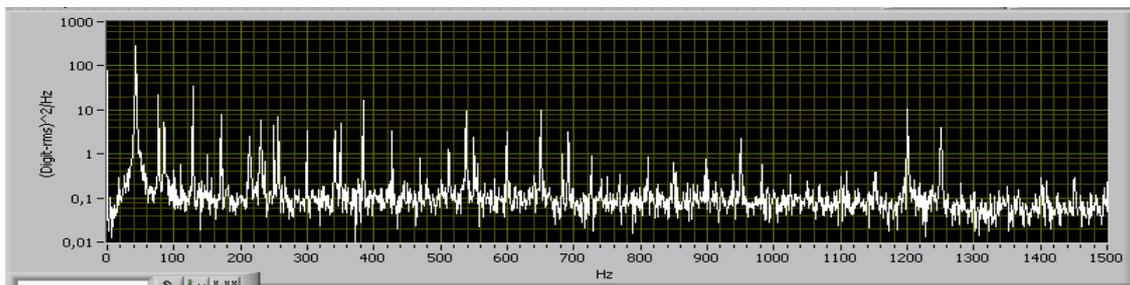


FIG. 9 - zoom del grafico di fig.8 con scala delle frequenze lineare

Trascurando le frequenze dai 10 kHz in su, il cui contenuto è di difficile interpretabilità a causa della presenza di armoniche, si possono vedere dei picchi nel range 10-1000 Hz.

Osservando l'uscita del flussimetro con il dipolo alimentato a 2500 A si ha il risultato presente in fig.10.

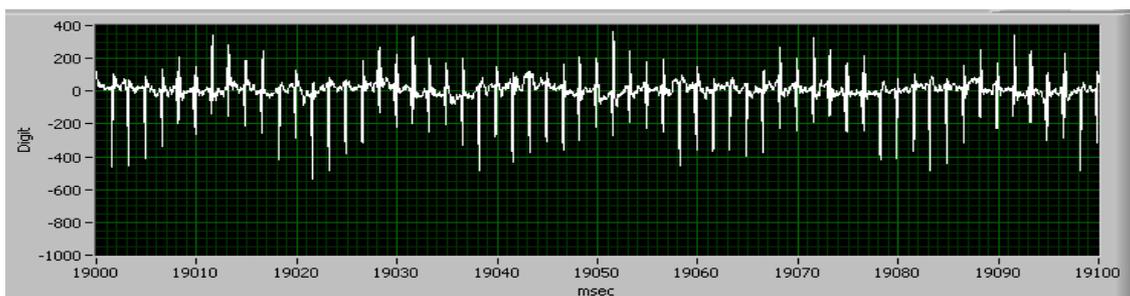


FIG. 10 - segnale proveniente dal flussimetro inserito nel dipolo alimentato con 2500 A circa.

Si può notare che sebbene i disturbi siano dello stesso tipo e dello stesso ordine di grandezza, le frequenze alle quali si manifestano sono diverse. Osservando la densità

spettrale, si ha che in questo caso il picco più alto è all'incirca a 68 Hz.

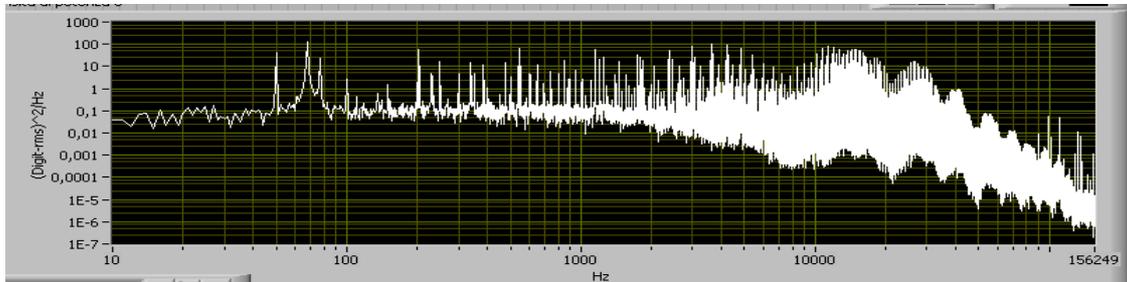


FIG. 11 - densità spettrale del precedente grafico (1 media ogni 4 campioni).

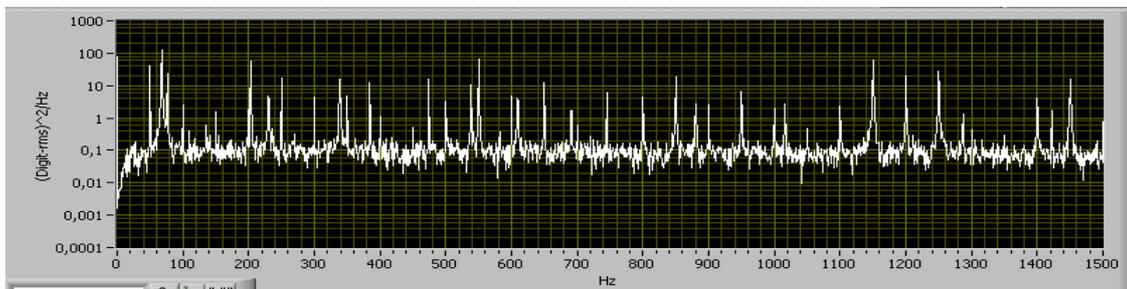


FIG. 12 - zoom del grafico di fig.11 con scala delle frequenze lineare

Questo tipo di oscillazioni è stato riscontrato anche per valori di corrente di alimentazione compresi fra 110 A e 2500 A. Integrando le tensioni provenienti dal flussimetro si hanno, come già detto, dei segnali proporzionali al campo magnetico generato dal dipolo.

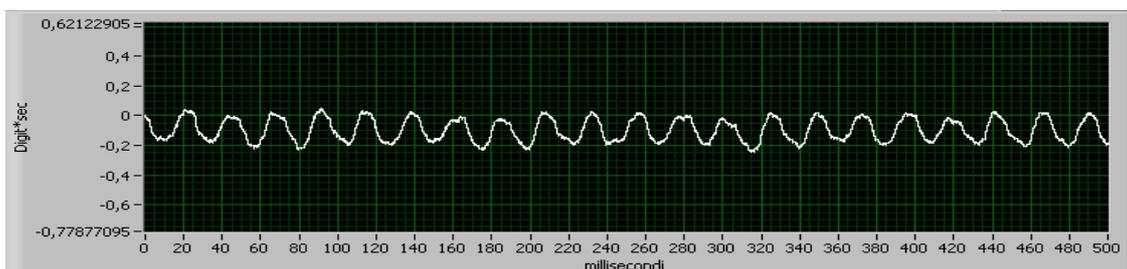


FIG. 13 - Integrale del segnale di fig.7 (plateau a 112 A). $0.37 \text{ conteggi} \times \text{sec} = 0.1 \text{ G}$
 $T = 500 \text{ msec}$, 1 media ogni 4 campioni. Offset = 8.8 conteggi

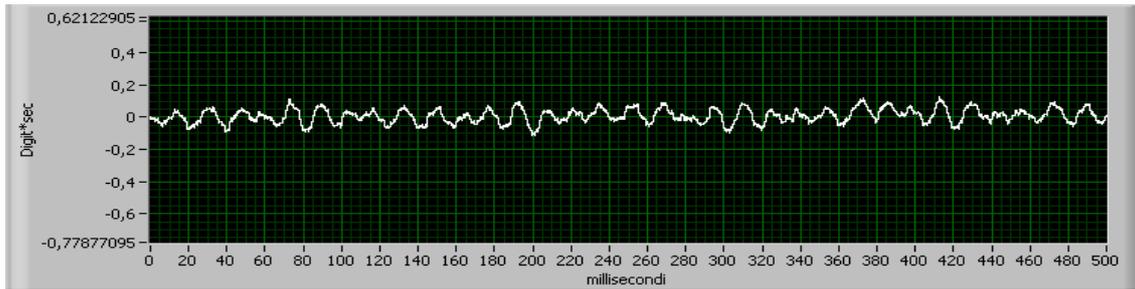


FIG. 14 - *Integrale del segnale di fig.10 (plateau a 1500 A). 0.37 conteggi x sec= 0.1 G
T= 500 msec, 1 media ogni 4 campioni. Offset= 8.9 conteggi*

Come è possibile vedere in fig.13 e fig.14, i disturbi sopra discussi si riflettono sull'integrale. L'operazione di integrazione mette ovviamente in risalto le basse frequenze. Ad esempio, nel caso della fig.10 è infatti molto evidente la fluttuazione a 43 Hz, mentre i picchi a 600 Hz sono trascurabili.

C'è da sottolineare il fatto che questi disturbi si mantengono su ampiezze di 0.2 conteggi x sec, ovvero all'incirca di 0.05 G. Non costituiscono quindi un grave problema in riferimento alle specifiche del B-Train (0.1 G di precisione richiesta) e possono inoltre essere imputate a un setup (alimentatore+dipolo) che non è quello finale.

3 MISURE SULLA PRECISIONE DEL SISTEMA DI LETTURA

Il set di misure che si presenta è basato sulla ripetibilità dei cicli. Si è provveduto infatti a registrare e integrare l'uscita dell'ADC in presenza di cicli magnetici ripetitivi. Dopodichè, avendo ipotizzato che i cicli operati dal magnete siano identici fra loro, si sono ricavate informazioni sulla precisione del sistema di misura osservando le differenze sui cicli registrati.

Nella fig.15 è mostrato un esempio dell'uscita dell'ADC e del suo integrale in presenza di un ciclo magnetico.

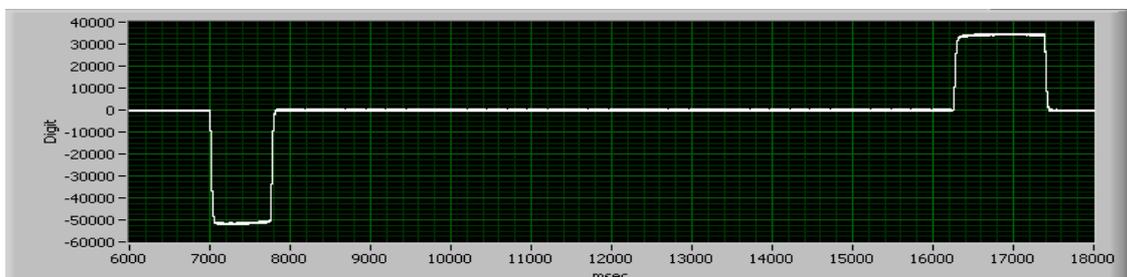


FIG. 15 - *Conteggi dell'ADC in presenza di un ciclo magnetico. 1 media ogni 25 campioni. 52450 conteggi = 1 V. Offset= -8.5 conteggi*

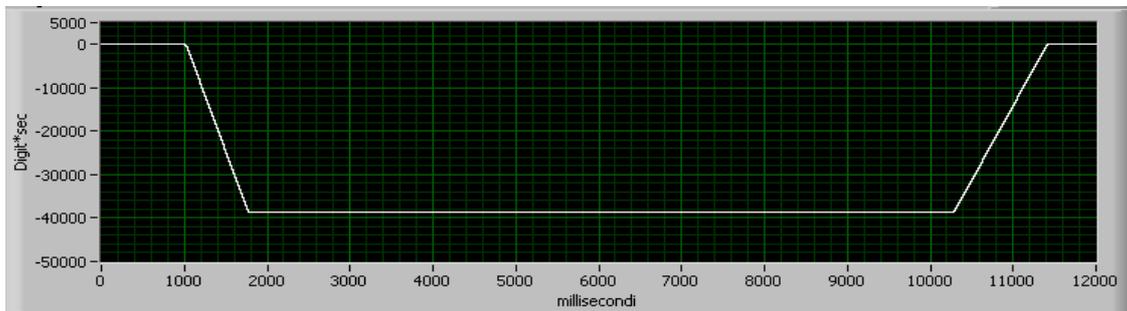


FIG. 16 - *Integrale precedente grafico. Media su 25 campioni. 1 conteggi x sec = 0.27 G. Offset= -8.5 conteggi*

Si noti che i conteggi hanno segno negativo. Ciò dipende anche dalla scelta dei terminali del flussimetro. Il ciclo visualizzato ha ampiezza massima di circa 1.1 T (circa 2000 A di corrente di alimentazione), pendenza massima di circa 13500 Gauss/sec e una durata di circa 10.5 sec. A riguardo delle acquisizioni sui cicli magnetici, si sono osservate due caratteristiche, visualizzate nelle fig.17 e fig.18.

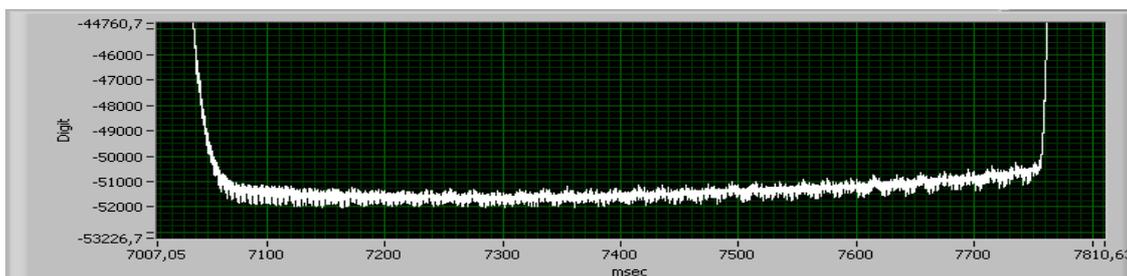


FIG.17 - *Particolare della fig 15*

In fig.17 si può notare che i conteggi (rappresentativi delle rampe di campo magnetico) non si mantengono costanti. In altre parole, le rampe magnetiche non mantengono la loro pendenza costante per tutta la loro durata. La seconda caratteristica è più visibile sui dati integrati (vedi fig.18).

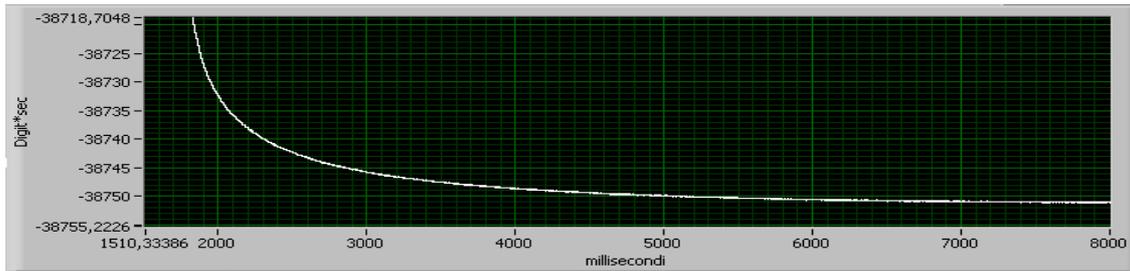


FIG. 18 – Particolare della fig. 16

In figura è presente lo “spigolo” formato dalla rampa di salita (che sul grafico è in discesa, a causa dell’inversione di segno) e il plateau a 1.1 T. Come si può vedere, il passaggio da rampa di salita a plateau è seguito da una coda con tempi caratteristici dell’ordine dei secondi. Ingrandendo tale grafico è possibile osservare che il valore di campo si “stabilizza” entro 0.1 G in circa 5 secondi. Tali caratteristiche per parametri di ciclo identici (ovvero ampiezza, pendenza e durata) rimangono sostanzialmente uguali. Sono quindi probabilmente legate ai tempi di risposta del magnete in presenza di variazioni di corrente di alimentazione. Ai fini delle misure effettuate, esse sono trascurabili a causa della loro ripetibilità.

Per effettuare le misure basate sulla ripetibilità dei cicli, si è impostato il sistema alimentatore+dipolo in modo tale da ripetere ogni 30 secondi, un ciclo magnetico della durata di circa 11 secondi. Si è provveduto quindi a registrare nel tempo questi cicli e a osservarne le differenze.

La fig. 19 mostra un ciclo magnetico letto e ricostruito tramite il setup di misura. In fig. 20 sono presentati i grafici differenze fra cicli consecutivi. In una situazione ideale, tali differenze dovrebbero essere costantemente zero.

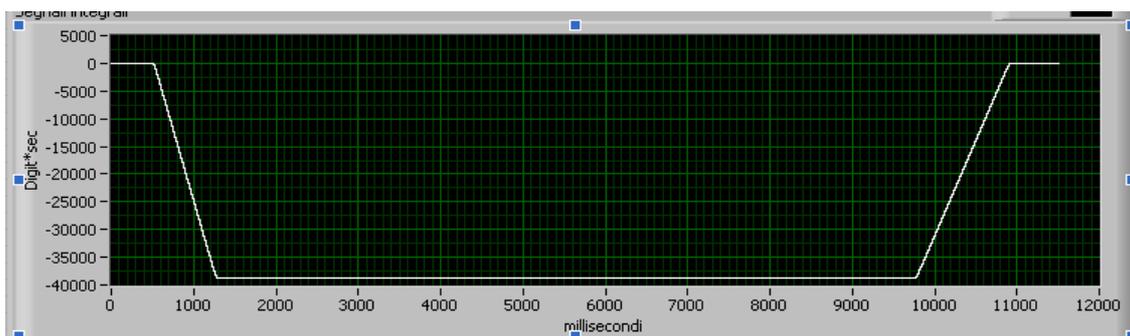


FIG. 19 - Esempio di ciclo magnetico

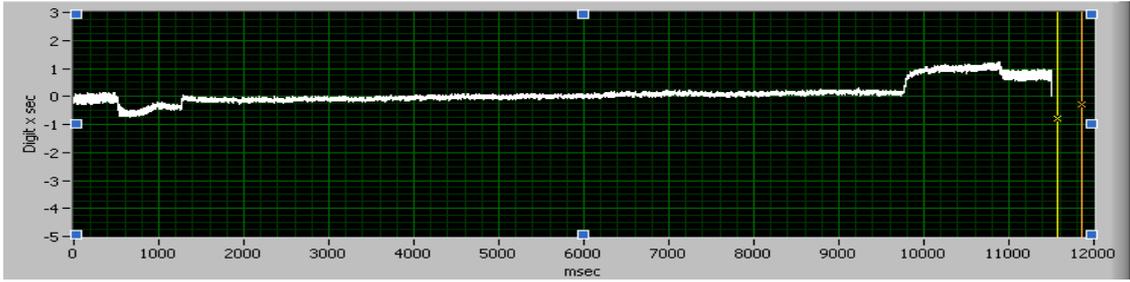


FIG. 20(a) - *Differenza fra primo ciclo e secondo ciclo*

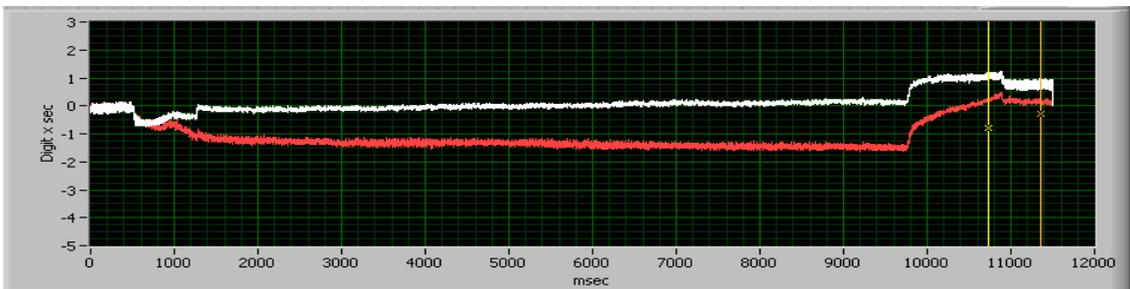


FIG. 20(b) - *Differenza primo ciclo e secondo ciclo (in bianco),
differenza primo ciclo e terzo ciclo (in rosso)*

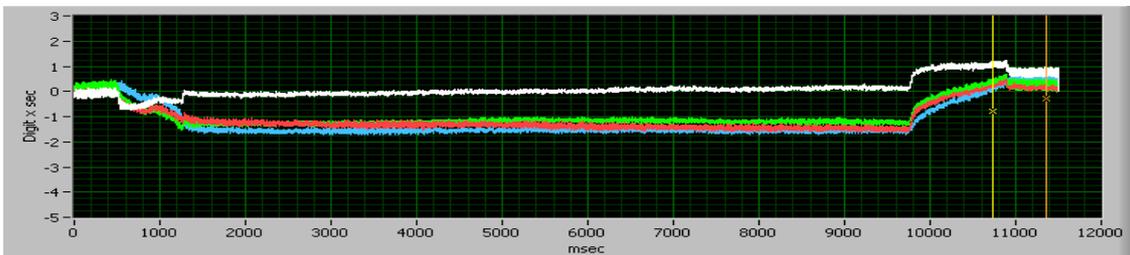


FIG. 20(c) - *Differenze 1-2 ciclo (bianco), 1-3 ciclo (rosso),
1-4 ciclo (verde), 1-5 ciclo (azzurro)*

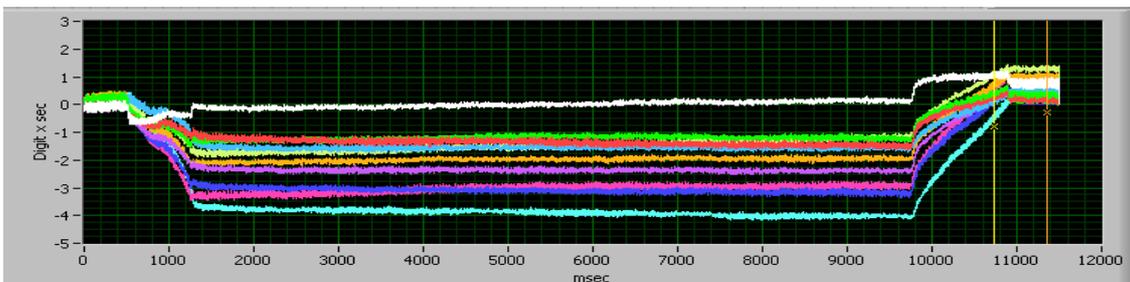


FIG. 20(d) - *Tutte le differenze da 1-11 ciclo a 1-2 ciclo*

Osservando il grafico fig.20(a), si può subito osservare che la differenza fra I e II ciclo è dell'ordine di circa 1 conteggi x sec= 0.3 Gauss, per tutta la sua durata. Si può inoltre osservare sul grafico differenza fra I e II ciclo che in corrispondenza delle rampe di salita e discesa sono presenti due impulsi (il primo negativo, il secondo positivo). Questi sono rappresentativi di una non perfetta sincronizzazione in fase di costruzione del grafico differenza fra i due set di dati rappresentanti i due cicli (da parte della routine scritta in LabVIEW) e sono quindi distorsioni "artificiali" prive di significato.

Osservando i grafici fig.20(b),(c),(d), si può osservare che nel plateau di campo massimo (la parte centrale dei grafici, da 1200 msec a 9800 msec), con lo scorrere del tempo, la differenza fra il primo ciclo, preso come riferimento, e i successivi aumenta. Questa caratteristica è da imputare a una variazione di guadagno del sistema di acquisizione. In altre parole, col passare del tempo e per cicli magnetici identici, l'ADC registra cicli di ampiezza minore (per essere più precisi, si ricorda che i dati registrati dall'ADC vanno integrati per avere informazioni sul campo). La causa di ciò è probabilmente da imputare a una deriva termica della resistenza della bobina di lettura.

Riassumendo brevemente, si ricorda che la tensione di ingresso dell'ADC è presa su una $R_{in} \approx 1500 \Omega$ che forma un partitore con la $r_{bobina} \approx 1590 \Omega$. Considerando uguali le due resistenze, si può dire che una variazione percentuale $x\%$ della r_{bobina} si riflette in una variazione percentuale dimezzata ($x/2\%$) (a causa del partitore) della tensione di ingresso dell'ADC.

La variazione relativa della r_{bobina} è data da:

$$\frac{\Delta r_{bobina}}{r_{bobina}} = \alpha \cdot \Delta T \quad (10)$$

dove α è il coefficiente termico della resistività del rame, col quale le spire del flussimetro sono costruite, ed è pari a $\alpha=0.004 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Se, ad esempio, la temperatura salisse di 1°C , la r_{bobina} aumenterebbe dello 0.4%, di conseguenza la tensione di ingresso dell'ADC scenderebbe di $0.4/2 = 0.2\%$.

E' possibile calcolare la variazione di guadagno nel tempo dai precedenti grafici. Si osservi la pendenza del tratto che va da 500 msec a 1200 msec di fig.16. Al passare del tempo, tale pendenza, in valore assoluto, aumenta. In altre parole, il grafico differenza fra il ventesimo ciclo e il primo ciclo ha una pendenza maggiore che il grafico differenza del secondo ciclo meno il primo. Graficando la pendenza di questo tratto al passare del tempo si ha l'andamento presente in fig. 21.

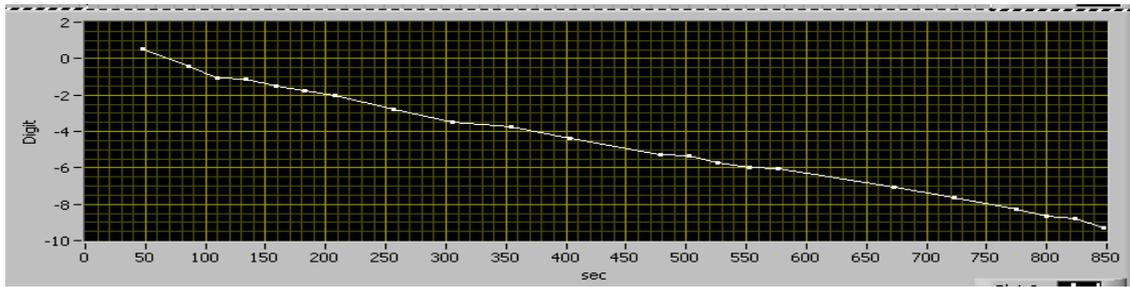


FIG. 21 - Pendenza dei grafici differenza (vedi fig.20) nel tratto 500 msec-1200 msec. La pendenza si misura in conteggi ed è rappresentativa di una variazione di guadagno

In altre parole: visualizzando il primo ciclo è possibile calcolare che la sua rampa di salita ha pendenza, in valore assoluto, circa uguale a 34000 conteggi (12580 G/sec). Il secondo ciclo registrato, a 50 sec dal primo, ha una pendenza leggermente diversa, circa 0.25 conteggi in più.

Il terzo ciclo, a 80 sec di distanza, ha pendenza inferiore, circa 0.5 conteggi in meno.

Il quarto ciclo, a 110 sec di distanza, ha pendenza inferiore, circa 1.2 conteggi in meno.

Il 22esimo ciclo, a 650 sec di distanza, ha pendenza inferiore circa 9.5 conteggi in meno.

Calcolando la variazione percentuale si ha che: $9.5 \text{ conteggi} / 34000 \text{ conteggi} \approx 0.03\%$. Si ha quindi una variazione di guadagno di 0.03% in 650 sec. In base ai precedenti calcoli, basterebbero 0.15 °C di innalzamento di temperatura della bobina per produrre tale diminuzione di guadagno. Dai grafici differenza appena mostrati, è possibile dedurre anche le variazioni di offset. Osservando la variazione di pendenza sul plateau centrale (da 1200 a 9800 msec), possiamo calcolare quanto è cambiato l'offset da ciclo a ciclo.

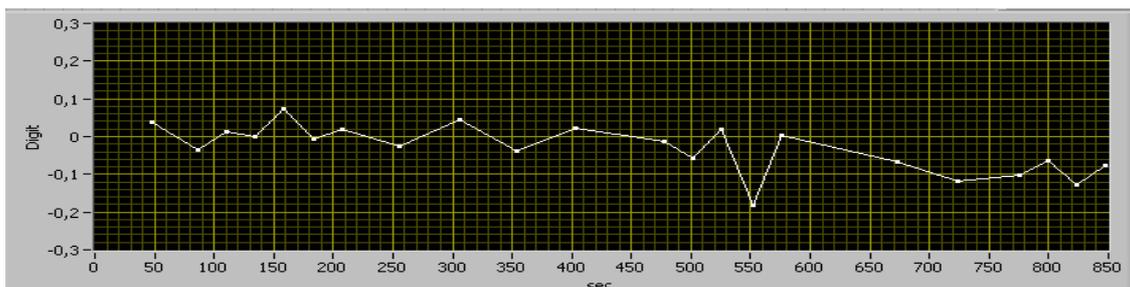


FIG. 22 - Pendenza dei grafici differenza nel tratto 1200-9800 msec di fig.20. La pendenza si misura in conteggi (LSB) ed è rappresentativa di una variazione di offset

Le considerazioni sono analoghe a quelle fatte per calcolare le variazioni di guadagno. In questo caso stiamo osservando se c'è una differenza di pendenza in un "plateau" fra i cicli registrati. Tale pendenza è dovuta a una differenza di offset del nostro

sistema. Bisogna infatti ricordare che i grafici rappresentativi dei cicli magnetici (dei quali ne stiamo osservando le differenze) sono gli integrali dei segnali provenienti dal flussimetro e digitalizzati dall'ADC. Un diverso offset sull'ADC si manifesta su tali grafici come una diversa pendenza. Se il plateau del ciclo al tempo X ha diversa pendenza del plateau del ciclo al tempo X+100 sec, ciò significa che l'offset è cambiato.

Come è possibile vedere in fig.22 nel quale son presenti le pendenze dei grafici differenza dei cicli in funzione del tempo, l'offset varia all'incirca di 0.1-0.2 conteggi nell'arco di 850 sec. L'ordine di grandezza delle variazioni di offset e pendenza fin qui riportati sono confermate in tutte le misure effettuate.

Riassumendo le misure fin qui esposte si può dire che:

- Si è osservata una variazione di guadagno del sistema di acquisizione. Tale variazione di guadagno si è manifestata con la registrazione di cicli (che alla sorgente si sono considerati identici) di minore ampiezza al passare del tempo. Come ordine di grandezza si ha che in 10 min si ha una diminuzione di guadagno di circa lo 0.03%. Tale fenomeno è probabilmente dovuto a una variazione della resistenza della bobina, per effetti termici. Sarà quindi necessario aggiungere uno stadio di buffer fra il flussimetro e la EVAL-AD76XX.
- Si è osservata una variazione dell'offset del sistema di acquisizione. Tale variazione di offset si manifesta con la presenza di una deriva sui cicli registrati via via più grande col passare del tempo. Come ordine di grandezza si ha che in 15 min si hanno variazioni dell'offset di circa 0.1 conteggi (pari all'incirca a 0.25 G/sec).

Il passo successivo è stato quello di valutare quanto fosse preciso il sistema di acquisizione, al netto delle variazioni di offset e di guadagno. Si è già visto che i dati integrali, rappresentativi dei cicli magnetici, sono affetti da disturbi a varie frequenze (vedi fig.9 e fig. 11). Tali disturbi non comportano fluttuazioni maggiori di 0.05 G, non sono quindi critici. Si è passati quindi a valutare i fenomeni di deriva (cioè di rumore a bassa frequenza e in continua) sui grafici integrali, dovuti al rumore che complessivamente affligge il sistema di acquisizione. Per far ciò, si è posta l'attenzione sul plateau di campo massimo (facendo riferimento alla fig.16, da 1200 msec a 9800 msec). Come si è visto, nel grafico differenza del primo ciclo con i cicli consecutivi, si ritrovano plateau a varie altezze, a causa di una diminuzione del guadagno nel tempo. Eliminando matematicamente tali differenze di altezza, si ottengono le differenze fra i cicli al netto delle variazioni di guadagno. Sottraendo inoltre un fit lineare da ciascuno dei precedenti grafici si eliminano anche le differenze causate dalla variazione di offset.

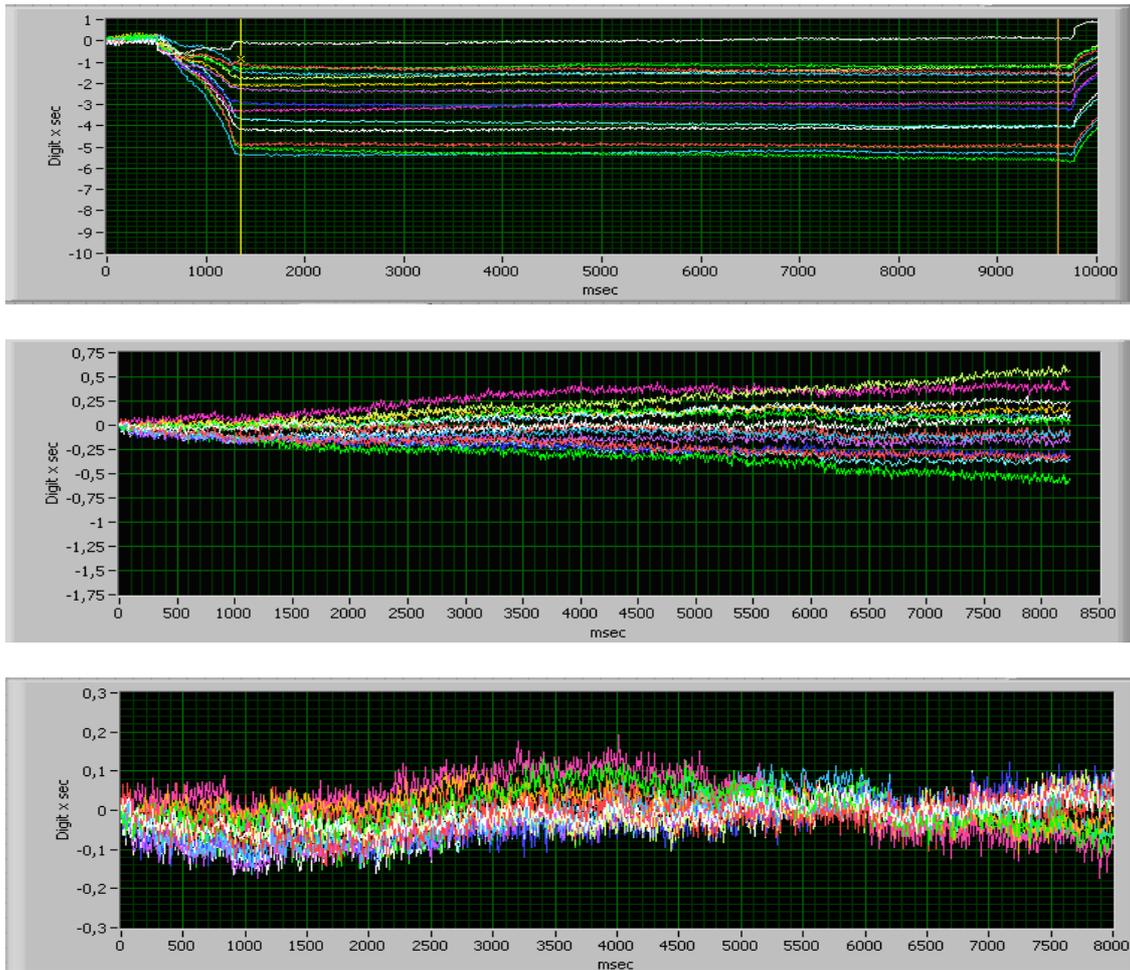


FIG. 23(a) - Grafici differenza (vedi fig.20) fra il primo ciclo e i consecutivi.
(b): Plateau da 1400 msec a 9600 msec dei precedenti grafici,, il cui punto iniziale è stato posto a zero (azzeramento differenze guadagno).
(c): Plateau da 1400 msec a 9600 msec, il cui punto iniziale è stato posto a zero e la cui pendenza è stata matematicamente azzerata con un fit (azzeramento differenze guadagno e offset).

Si sono messi a confronto tali risultati con un test effettuato ai Laboratori Nazionali di Frascati, in cui si è utilizzato un piccolo magnete quadrupolo (vedi fig.24), i cui poli sono stati alimentati (corrente massima = 1 A) in modo da simulare il campo magnetico di un dipolo. Nei test ai Laboratori Nazionali di Frascati si è utilizzata una bobina di lettura (vedi fig.25) costruita in laboratorio con $r_{bobina} = 318 \Omega$ e $NS = 17.25 \text{ m}^2$

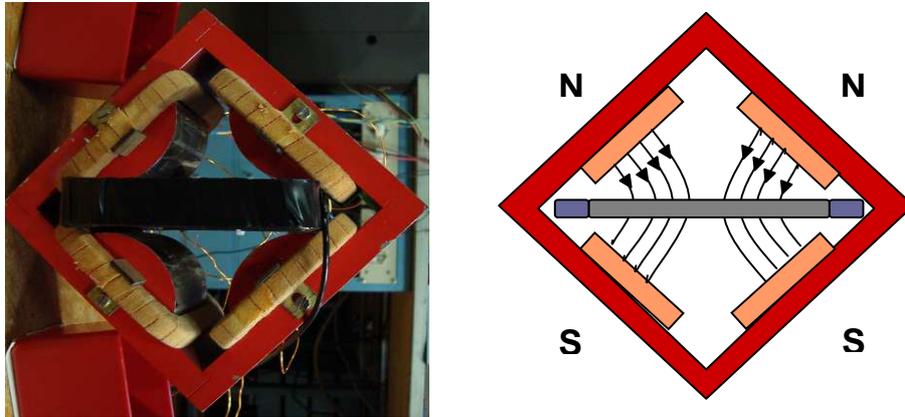


FIG. 24(a) - *Quadrupolo utilizzato ai LNF per le misure di campo magnetico.*
(b) *schema equivalente delle linee di campo*



FIG. 25 - *Bobina costruita in laboratorio per effettuare letture di campo magnetico ai LNF*

E' possibile confrontare le misure osservando le fig. 26 (a)(b),(c).

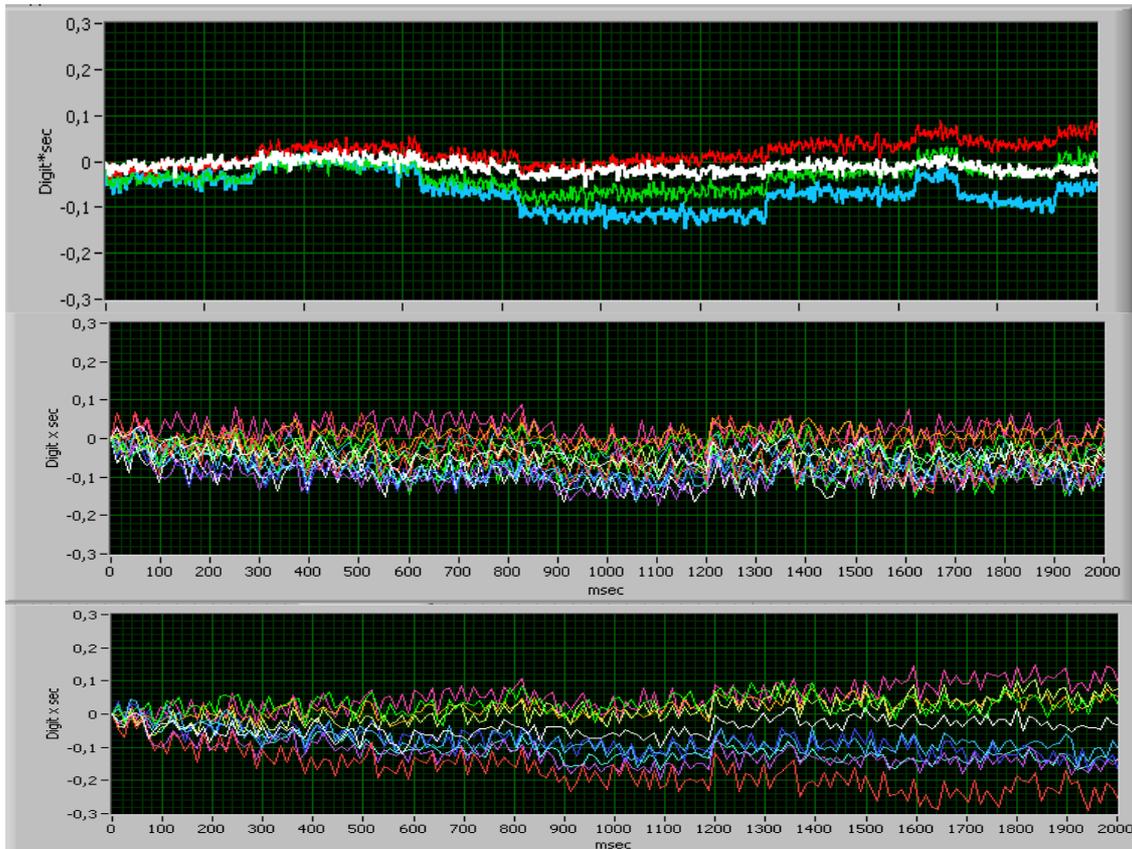


FIG. 26 – (a) Differenze fra primo ciclo e successivi nei test effettuati ai LNF con un magnete alimentato fino a un massimo di 1A che effettua un ciclo magnetico ogni 2 sec. La scala temporale è la stessa di fig.26(b)
 (b) Stesso grafico di fig.26(a), "zoomato" sui primi 2 sec (differenza del primo ciclo dai consecutivi con correzione di offset)
 (c) Stesso grafico di fig.26(a) "zoomato" sui primi 2 sec, (differenza del primo ciclo dai consecutivi senza correzione dell'offset)

Si può vedere dal confronto dei due grafici fig.26(a) e fig.26(b) che i risultati ottenuti sul rumore in bassa frequenza e in continua sono sostanzialmente uguali a quelli che si erano trovati nei test effettuati ai LNF, tenendo conto però che si è corretta matematicamente la differenza di guadagno fra un ciclo l'altro e che si è corretta matematicamente la variazione di offset fra un ciclo e l'altro.

Tutte le caratteristiche finora esposte sono state confermate in tutte le prove effettuate, anche per cicli con caratteristiche diverse (sia in ampiezza che in pendenza).

4 RISULTATI E CONSIDERAZIONI

In linea generale, le misure effettuate al CERN danno piena conferma dei risultati ottenuti ai LNF (con sorgenti di segnale diverse) sulle caratteristiche di funzionamento del sistema di acquisizione (AD7643 + integrazione numerica).

Riassumendo i risultati trovati, si è evidenziata la presenza sulle tensioni digitalizzate di disturbi la cui frequenza cambia in base alla corrente di alimentazione del dipolo. Tali disturbi sono probabilmente dovuti al setup alimentatore-dipolo (che non costituisce il setup finale per il CNAO) e comunque producono oscillazioni non critiche, al di sotto dello 0.1 G, sulle letture di campo magnetico.

Dalle misure effettuate sulla ripetibilità dei cicli magnetici, si sono osservate variazioni di guadagno del sistema di acquisizione (diminuzione costante) dell'ordine dello 0.03% in 10 min. Tale effetto è probabilmente dovuto a variazioni della resistenza della bobina, a causa della temperatura, e possono in tal caso essere facilmente eliminate aggiungendo uno stadio di buffer ad alta impedenza d'ingresso dell'AD7643. In questo modo, l'alta impedenza di ingresso del buffer renderebbe trascurabili le variazioni di resistenza della bobina.

Si sono inoltre osservate variazioni sull'offset, di minor impatto sulla precisione del sistema rispetto alle variazioni di guadagno (e il cui andamento, come per il guadagno, risulta essere decrescente). Non considerando le variazioni di guadagno e di offset, rimangono confermati i limiti trovati sulla precisione del sistema nei test effettuati ai LNF.

In altre parole, il sistema "AD7643 + integrazione numerica" è in grado di ricostruire e digitalizzare i valori di campo con una precisione di 0.1 Gauss, per un tempo non superiore a pochi secondi (2-5 sec). Si rende quindi necessaria una calibrazione, per mezzo di una sonda NMR, di Hall o altro sistema, ogni pochi secondi. Come si è visto infatti, ciò non solo garantisce che il sistema di acquisizione venga riportato a un valore noto di campo (dal quale si è ad esempio allontanato per fenomeni di deriva, dovuti al rumore), ma permette anche di ricalcolare e correggere i fattori di guadagno e di offset che variano sensibilmente nel tempo.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia il dott. Mario Serio per il supporto costantemente fornito e la preziosa guida nel corso dei lavori.

Si desidera ringraziare Oscar Coiro, Eugenio Gaspari, Claudio Mencarelli, e tutto il personale del Servizio Elettronica e Diagnostica dei Laboratori Nazionali di Frascati, per l'assistenza fornita nella preparazione dei lavori.

Si desidera inoltre ringraziare il dr. Marco Buzio, Regis Chritin e Jacques Dutour

per l'assistenza e la disponibilità offerte nel corso delle misure effettuate presso il CERN.