

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

FACOLTÀ DI SCIENZE MM. FF. NN.

CORSO DI LAUREA SPECIALISTICA IN FISICA

STRUMENTI DI MISURA E SOFTWARE DI CALCOLO PER CAMPI DI INDUZIONE MAGNETICA A FREQUENZA INDUSTRIALE

SEMINARIO DI TIROCINIO

LAUREANDO:	MORENO COMELLI
RELATORE:	PROF. LUCIANO BERTOCCHI
CORRELATORI:	DOTT. RENATO VILLALTA DOTT. MASSIMILIANO BENES

Premessa

Il presente seminario intende riassumere ed esporre le conoscenze acquisite nei primi mesi di lavoro presso l'Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente, nell'ambito dello svolgimento di una Tesi di Laurea concernente la valutazione e le misure di campi di induzione magnetica a frequenza industriale generati da elettrodotti ad altissima tensione.

Dei tre capitoli redatti, il primo definisce il concetto di ELF e fornisce alcune definizioni che saranno utili nel seguito. Il secondo descrive gli strumenti di misura, le sonde ed i software con essi integrati che vengono comunemente impiegati in questo tipo di attività. Il terzo infine è rivolto alla descrizione di un particolare software sviluppato per il calcolo dell'induzione magnetica generata da linee aeree.

I – Definizione del problema

1.1 - Definizione di ELF

A seconda della loro frequenza, le onde elettromagnetiche possono essere classificate come "radiazioni ionizzanti" o "radiazioni non ionizzanti" (NIR): quest'ultimo termine indica la parte dello spettro elettromagnetico in cui l'energia fotonica è troppo bassa per rompere i legami atomici. Convenzionalmente il limite si fissa a 12 eV, corrispondenti ad una frequenza di circa $2 \cdot 10^6$ GHz; i campi ELF (Extremely Low Frequency) sono definiti come quelli di frequenza fino a 300 Hz. A frequenze così basse corrispondono lunghezze d'onda in aria molto grandi (6000 km a 50 Hz) e, in situazioni pratiche, il campo elettrico e quello magnetico agiscono in modo indipendente l'uno dall'altro. Le sorgenti legate alla trasmissione e all'uso dell'energia elettrica in Italia emettono ELF alla frequenza industriale di 50 Hz.

1.2 - Campo vicino reattivo

Si può suddividere lo spazio intorno ad una sorgente di onde elettromagnetiche in tre zone:

- **campo lontano:** in questa regione il campo elettromagnetico ha le caratteristiche di un'onda piana; generalmente si ha per una distanza dalla sorgente superiore a $\max\{3\lambda; 2D^2/\lambda\}$, ove D sono le dimensioni massime della sorgente, λ la lunghezza d'onda;
- **campo vicino radiativo:** compresa tra le regioni di campo lontano e campo vicino reattivo, è caratterizzata da campo elettrico e magnetico che non sono rappresentabili come onda piana, ma variano notevolmente da punto a punto;
- **campo vicino reattivo:** regione vicina alla sorgente nella quale i campi elettrico e magnetico sono considerabili disaccoppiati e non sono presenti fenomeni di trasporto di energia. Si estende dalla superficie della sorgente fino ad una distanza dell'ordine di grandezza di λ .

Per il caso d'interesse le misure sono sempre effettuate in condizione di campo vicino reattivo, quindi campo elettrico e magnetico sono indipendenti e misurati separatamente.

1.3 - Definizioni

Nelle figure seguenti vengono riportati dei grafici esplicativi delle definizioni qui riportate; saranno inoltre utili nelle definizioni relative alla parte riguardante il software CMagnetico (Capitolo III).

Elettrodotta: l'insieme costituito da una o più linee elettriche aventi in comune gli stessi sostegni.

Linea: una tratta di elettrodotta senza diramazioni, delimitata ad entrambi gli estremi da una stazione, da una sottostazione, da una cabina oppure da un punto di diramazione da cui si dipartono altre (due o più) linee. Una linea è caratterizzata da un unico valore di tensione e di corrente nominali. Una linea è formata in tutto il suo percorso dallo stesso numero di conduttori attivi.

Campata: una tratta di linea comprese tra due sostegni successivi. Per definizione, una campata può appartenere ad una ed una sola linea.

Sostegni: le strutture a cui sono appesi i conduttori. Rientrano tra i sostegni non solo i piloni ed i tralicci lungo la linea, ma anche le strutture (che chiameremo porte o sostegni terminali) a cui

sono appesi i conduttori all'inizio ed al termine della linea stessa. Non è detto, ovviamente, che tutti i sostegni di una stessa linea siano dello stesso tipo, anzi questa situazione costituisce una eccezione. I conduttori vengono ancorati ai sostegni tramite gli isolatori in appositi punti di attacco posti alle estremità di bracci denominati di seguito mensole.

Punto di sospensione: il punto estremo della catenaria formata dal conduttore lungo la campata.

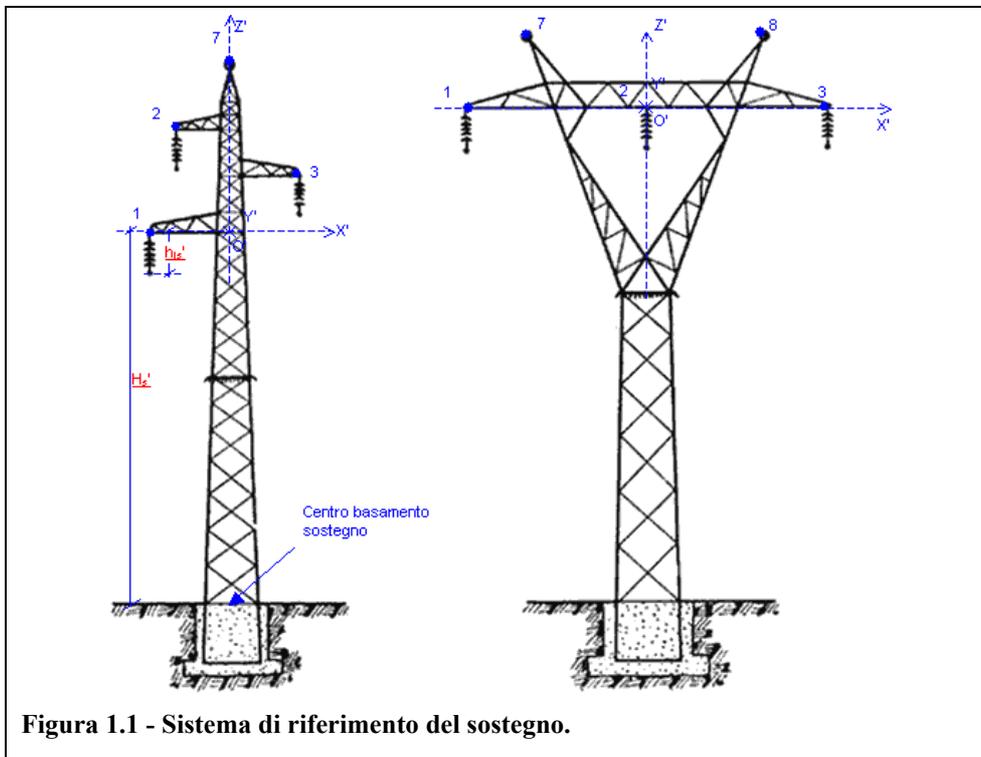


Figura 1.1 - Sistema di riferimento del sostegno.

Centro elettrico del sostegno O' : il punto giacente nell'intersezione tra l'asse di simmetria verticale del sostegno e la linea orizzontale passante per il punto di attacco della mensola più basso.

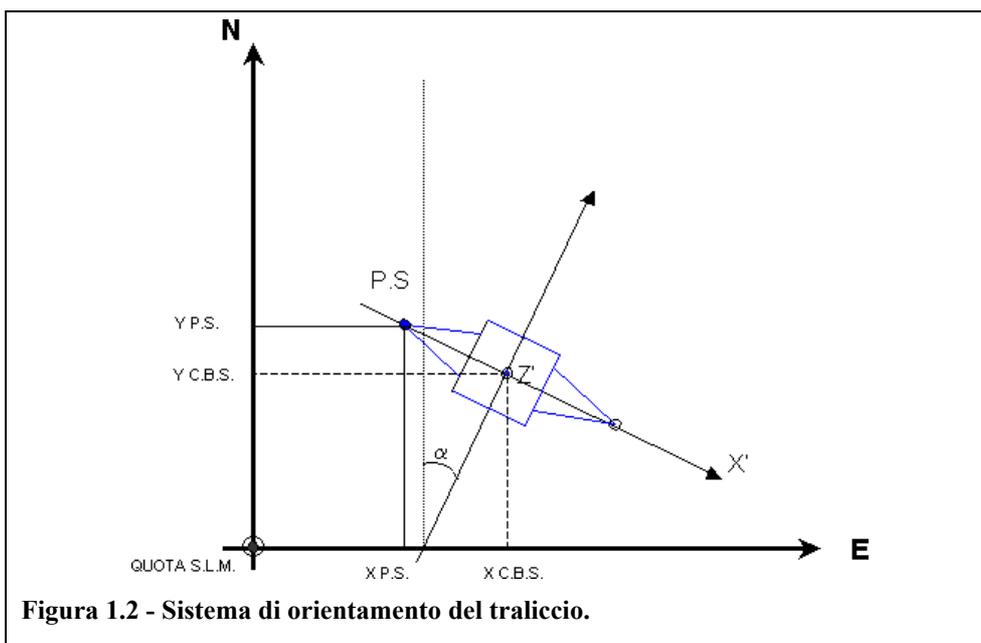


Figura 1.2 - Sistema di orientamento del traliccio.

Normale al sostegno: il versore ortogonale al piano individuato dai punti di attacco degli isolatori alle mensole, (ovvero al piano su cui giacciono i punti di attacco degli isolatori alle mensole ed il centro del basamento del sostegno) e avente come verso positivo quello convenzionalmente associato alla vista frontale del tipo di sostegno. Rispetto a questa vista vanno anche individuati e numerati in modo univoco i punti di attacco.

Orientamento del sostegno: l'angolo formato dalla normale al sostegno con il Nord geografico (un valore compreso tra -180° e $+180^\circ$ con verso positivo nel senso antiorario).

Sistema di riferimento del sostegno: il sistema di riferimento cartesiano levogiro $O'X'Y'Z'$, con origine giacente sul centro elettrico O' del sostegno, l'asse Z' orientato lungo la verticale del sostegno e asse Y' lungo la normale allo stesso (vedi Figura 1.1).

1.4 - Bibliografia

- [1.1]. Vincenzo Cataliotti, "Impianti elettrici" Vol. I e Vol. II, S. F. Flaccovio Editore, Palermo 1988
- [1.2]. Isabella Concina, Manuel Dall'Osto, Alberto Gasparotto, Paolo Pangrazzi, Matteo Borella Venturini, Andrea Trevisan, "Campi elettromagnetici: stato dell'arte", Dipartimento di Medicina Ambientale e Sanità Pubblica, Università di Padova, 2001
- [1.3]. Daniele Andreuccetti, Laura Anglesio, Luca Cristoforetti, Salvatore Curcuruto, Giovanni D'Amore, Paolo D'Atanasio, Tina Fabozzi, Fabio Francia, Gaetano Licitra, Giorgio Alfonso Lovisolo, Angelo Lozito, Alberto Moro, Carla Malacarne, Alessandro Polichetti, Rolando Pontalti, Maila Strappini, Renzo Tommasi, Alessandro Zambotti, "Specifiche tecniche per la realizzazione del Catasto Elettromagnetico Nazionale e dei Catasti Elettromagnetici Regionali", Gruppo di Lavoro cEr/CeN, Rev. 3.1/ENEA, 2 agosto 2001

II - Strumenti di misura

2.1 - Gli strumenti di misura dell'induzione magnetica a 50 Hz

Le sonde di campo magnetico, costituite da una bobina di filo elettricamente schermato, sono usate in combinazione con un voltmetro che rileva la f.e.m. indotta dalla componente di campo ortogonale alla sonda. Per risalire al valore efficace di campo servono tre misure lungo tre orientamenti ortogonali.

I misuratori di campo magnetico triassiali forniscono direttamente il valore efficace del campo, e possono essere commutati o sintonizzati in modo da indicare i valori efficaci della componente a frequenza industriale e di una o più componenti armoniche del campo.

Per caratterizzare le componenti armoniche del segnale nel circuito del rivelatore viene inserito uno stadio integratore (attivo o passivo) in modo da conservare la forma d'onda del campo magnetico.

Per misure a lungo termine è più adatto uno strumento che registri le letture in un sistema di immagazzinamento dati a intervalli di tempo prefissati.

Esistono anche misuratori di campi magnetici con sonde a effetto Hall che possono essere usati per misurare le induzioni magnetiche con frequenze da 0 a diverse centinaia di Hz. Non risultano tuttavia adatti per gli ambienti con campi alternati a basso livello, per via della bassa sensibilità e dei problemi di saturazione dovuti al campo terrestre [2.1].

È necessario considerare la risposta in frequenza della sonda. A causa dell'induttanza della bobina L , della capacità parassita C , della resistenza intrinseca r e dell'impedenza d'ingresso R , il rapporto tra la tensione V indotta nella bobina e la tensione che entra nel rivelatore v_p deve essere considerato in funzione della frequenza.

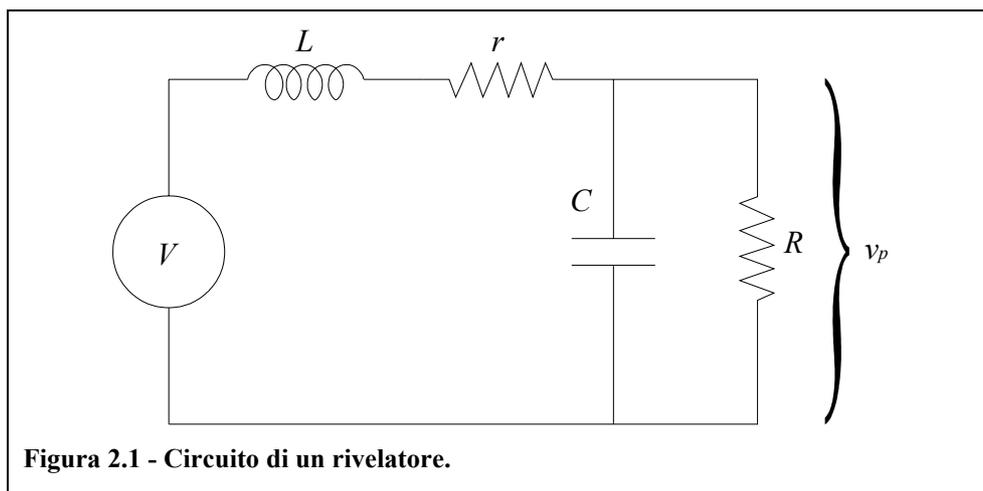


Figura 2.1 - Circuito di un rivelatore.

Dal circuito schematizzato in Figura 2.1 si può risalire al rapporto tra tensione della sonda e tensione indotta:

$$\left| \frac{v_p}{V} \right| = \left\{ \left(\frac{R+r}{R} - \omega^2 LC \right)^2 + \left[\omega \left(\frac{L}{R} + Cr \right) \right]^2 \right\}^{-\frac{1}{2}} \quad 2.1$$

Tale valore dovrebbe restare prossimo all'unità e non avere picchi prima di diminuire rapidamente all'aumentare della frequenza. Valori elevati di R possono causare dei picchi vicino alla frequenza di risonanza della sonda, valori troppo bassi causano un'attenuazione più rapida e una riduzione non voluta nella risposta in frequenza.

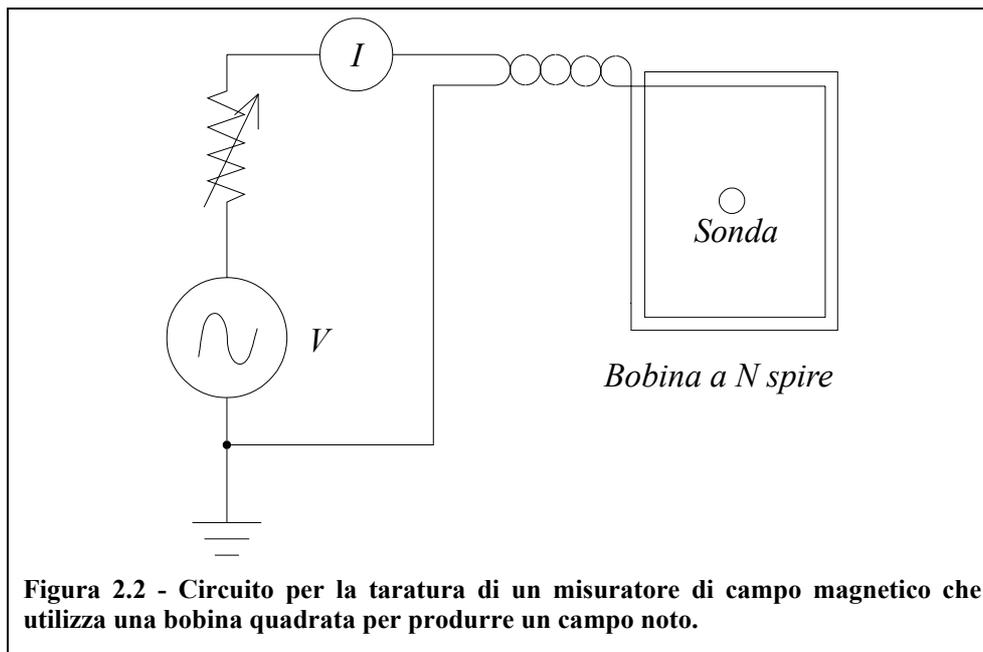
Nel caso di sonde contenenti nuclei ferromagnetici la teoria si complica, a causa della dipendenza della permeabilità del materiale del nucleo da frequenza ed ampiezza del campo.

2.2 - Taratura degli strumenti

L'equivalenza e l'affidabilità delle misure del campo magnetico sono assicurate dalla riferibilità della strumentazione utilizzata, intesa come la proprietà che uno strumento acquisisce quando viene sottoposto a taratura, applicando grandezze le cui misure sono state assegnate con riferimento a campioni riconosciuti a livello nazionale e internazionale.

La taratura del rivelatore di campo magnetico, effettuata una volta dal costruttore, va ripetuta a intervalli di tempo durante la vita dello strumento e in caso di modifiche o riparazioni.

Esistono vari metodi di taratura, uno dei quali consiste nell'introduzione della sonda in un campo magnetico calcolabile, generato da un sistema di bobine con geometria circolare o rettangolare.

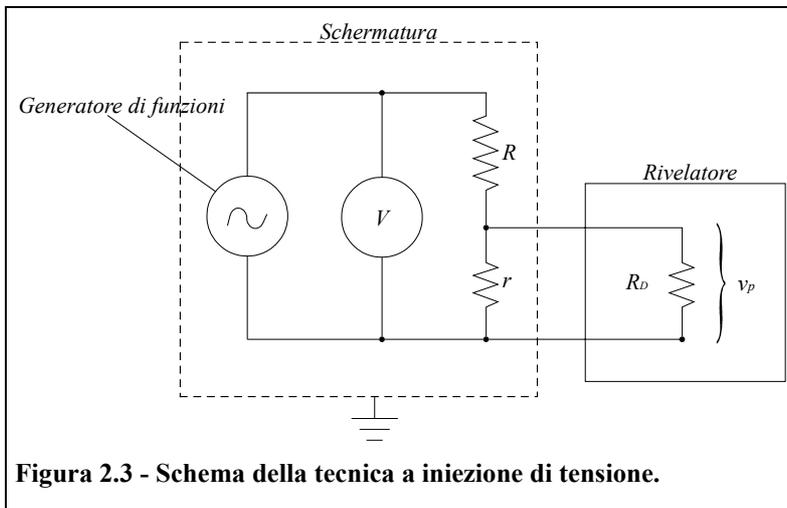


Il fattore di taratura C è ottenuto dal rapporto tra il valore del campo di riferimento applicato al sensore e l'indicazione fornita dallo strumento:

$$C = \frac{H_r}{H_m} \quad 2.2$$

La tecnica a iniezione di tensione, utile per tarare le gamme molto elevate (ad esempio superiori a 10 mT) è applicabile solo durante la fase di progettazione o di costruzione dello strumento. La tensione in funzione dell'induzione magnetica misurata in uscita da una sonda a bobina può essere riferita ad ogni frequenza di interesse tramite l'utilizzo di un voltmetro collegato all'ingresso del rivelatore e un campo magnetico il cui ordine di grandezza sia almeno il doppio di quello del campo parassita. Quindi le tensioni più piccole sono iniettate nel circuito del rivelatore (con la sonda scollegata) per tarare le scale più sensibili del misuratore del campo magnetico. Per iniettare le tensioni conosciute per la gamma di frequenza interessata, è possibile usare un divisore di tensione

con un rapporto conosciuto quando questo è collegato al rivelatore, una sorgente di tensione in c.a. (per es. un generatore di funzioni), un voltmetro preciso e una schermatura adeguata di campo elettrico.

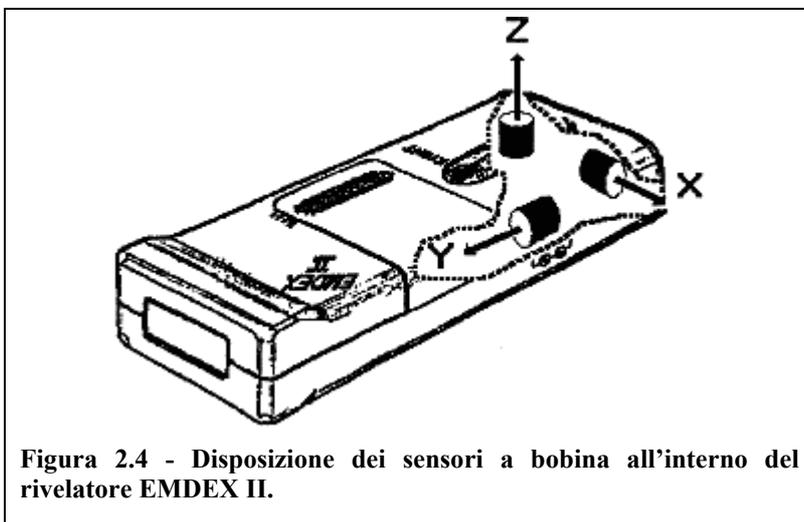


Con riferimento alla Figura 2.3, la tensione V proveniente da un generatore di funzioni è ridotta ai fini dell'iniezione usando un divisore resistivo. La tensione iniettata v è data da $V_r/(R+r)$ se la frequenza non ha effetti sul rapporto del divisore (tipicamente $R \gg r$). L'impedenza di ingresso del rivelatore è approssimata a una resistenza R_D . La relazione $r \ll R_D$ deve essere soddisfatta per evitare di influenzare significativamente il valore del rapporto del divisore.

Tale tecnica potrebbe non essere applicabile alle sonde con nucleo ferromagnetico, poiché la permeabilità del nucleo può variare con l'induzione magnetica e influenzare la sensibilità della sonda.

Si può infine confrontare il rivelatore con un sistema di misura di riferimento, precedentemente tarato.

2.3 - EMDEX



EMDEX (Electric and Magnetic Field Digital Exposure System) è un sistema hardware e software per la misura, la memorizzazione e l'analisi di campi elettrici e magnetici a frequenza industriale prodotto dalla Enertech Consultants. È costituito da un misuratore di campo (EMDEX II), dal sistema LINDA (Linear Data Acquisition System) per la misura di campi in funzione dello spostamento, e dal sistema di software EMCALC.

Il funzionamento dell'EMDEX II

L'EMDEX II è un misuratore programmabile per l'acquisizione dati che può rilevare le componenti del campo magnetico con delle sonde interne, posizionate lungo assi ortogonali, e l'ampiezza del campo elettrico tramite un sensore esterno.

Consiste di un computer a 8 bit con sistema operativo interno su EPROM, una scheda per l'elaborazione del segnale, tre sensori per la misura del campo magnetico, e da una memoria interna CMOS (fino a 512 KB) per l'immagazzinamento temporaneo dei dati. Tre pulsanti consentono la regolazione delle impostazioni, visualizzate su uno schermo LCD.

Tramite i pulsanti di controllo (e in alcuni casi avvalendosi della comunicazione con un computer su cui sia installato il software EMCALC) l'operatore può stabilire:

- se registrare i dati o semplicemente visualizzare le misure sul display;
- la frequenza di campionamento (impostando qualunque valore tra 1.5 e 327 s);
- l'ampiezza di banda di frequenza potendo scegliere tra "broadband only" e "broadband and harmonic". La risposta broadband misura i segnali da 40 a 800 Hz, la harmonic da 100 a 800 Hz. La frequenza fondamentale del campo non è misurata direttamente, ma calcolata usando le quantità harmonic e broadband;
- se memorizzare solo l'ampiezza di campo o anche le componenti.

Alla fine della misura i dati vengono trasferiti, tramite comunicazione su porta seriale, su di un computer dotato dell'apposito software per la memorizzazione a lungo termine. I dati vengono salvati in un file con estensione MDX, dal quale è possibile ricavare una prima visualizzazione grafica ed un'analisi statistica, e una conversione in formato ASCII che li renda disponibili su qualunque piattaforma per analisi successive.

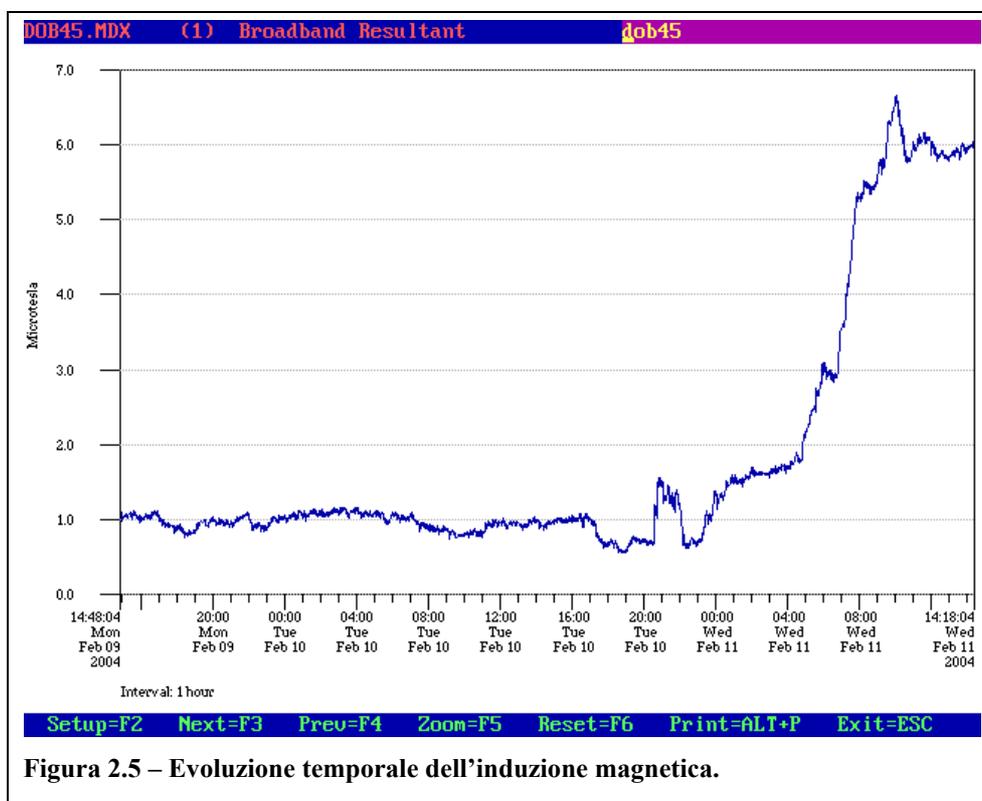


Figura 2.5 – Evoluzione temporale dell'induzione magnetica.

L'intensità del campo magnetico alternato è determinata misurando le correnti indotte in tre sensori a spirale disposti ortogonalmente. I tre segnali del campo magnetico, il segnale proveniente dal connettore ausiliario, e una serie di segnali auto-diagnostici sono diretti in un interruttore multiplo 8 a 1. Questo dispositivo, sotto il controllo del computer interno, seleziona uno degli otto segnali e lo manda al pre-amplificatore. Il segnale selezionato è quindi introdotto in un amplificatore a guadagno variabile che ha tre differenti intervalli. Il computer legge il livello del segnale e regola l'intervallo del guadagno per mantenere il segnale prodotto al livello dell'accuratezza ottimale.

L'amplificatore regolabile alimenta due canali separati, definiti broadband e harmonic.

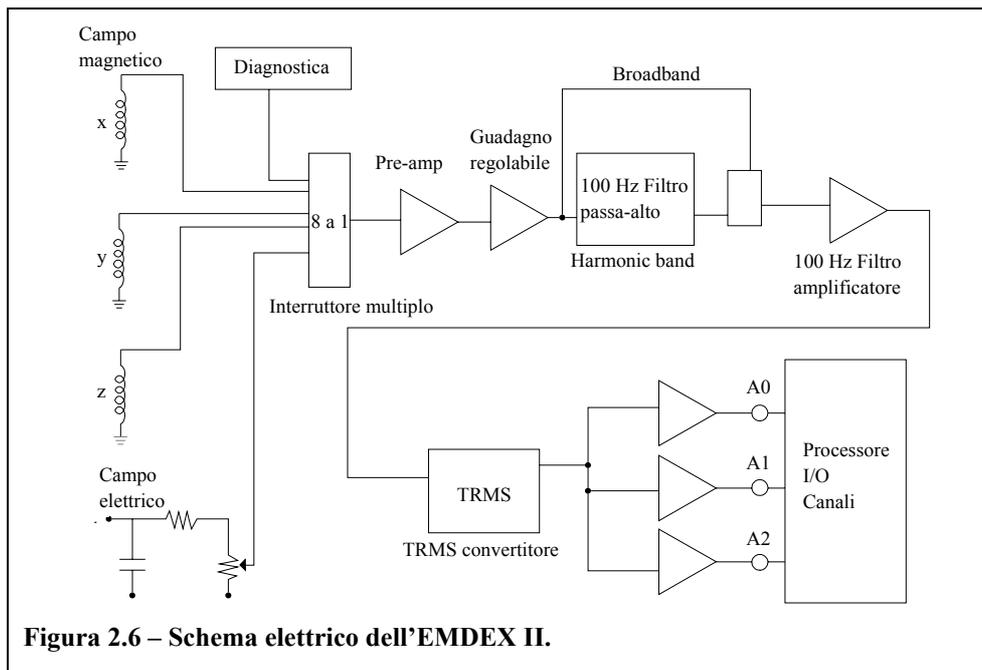


Figura 2.6 – Schema elettrico dell’EMDEX II.

Il canale broadband si connette direttamente all’amplificatore finale. Il canale harmonic contiene un filtro passa alto che attenua fortemente il segnale sotto i 100 Hz. L’uscita del filtro si connette, attraverso un interruttore, agli amplificatori finali dello strumento.

L’amplificatore finale aumenta il livello del segnale e attenua i segnali sotto i 40 e sopra gli 800 Hz. Il segnale in uscita è quindi introdotto in un convertitore TRMS (true root-mean-square) che trasforma i complessi segnali alternati in tensioni continue. La tensione continua risultante è proporzionale all’energia totale del segnale alternato. Queste caratteristiche fanno sì che il tempo minimo di campionamento del segnale sia 1.5 s: 0.4 s richiesti dal convertitore TRMS per rispondere ad un cambiamento di livello nel segnale in ingresso (per ognuno dei tre assi), più 0.3 s richiesti dal software.

Va notato che, dato l’intervallo di frequenze, il campo magnetico terrestre, quasi statico, viene filtrato e non è misurato anche nel caso di bruschi movimenti dello strumento.

L’uscita dall’amplificatore finale è introdotta in tre resistori regolabili separati e canali di input ADC sul computer interno. I canali di ingresso all’ADC sono contrassegnati in Figura 2.6 con A₀, A₁ e A₂: A₀ è usato per i segnali del campo elettrico e della componente sull’asse x del campo magnetico, A₁ e A₂ per i segnali delle componenti y e z del campo magnetico.

Al momento dell’accensione del rivelatore parte un contatore interno; questo si incrementa fino al momento della connessione al PC per una comunicazione o trasmissione dati: in quel momento vengono comunicate data e ora attraverso il collegamento seriale, in modo da rendere possibile l’elaborazione del campo in funzione del tempo.

Nel corso di una misura è possibile segnare un particolare punto con l’immissione di un MARKER, ossia di un marcatore di evento: questi, progressivamente numerati, vengono riportati con una breve descrizione nei file salvati su PC, per essere eventualmente utilizzati in una successiva analisi dati.

Alla fine di una misura, l’invio di uno STOP manda lo strumento in stand-by con risparmio di batteria. In questo modo è possibile effettuare più misure distinte in successione, senza dover scaricare ogni volta i dati su PC.

Risoluzione dello strumento

L’intervallo di misura è compreso tra 0.01 e 300 μ T, con un’accuratezza tipica di $\pm 3\%$, nel caso peggiore di $\pm 10\%$.

Induzione magnetica [μT]	Risoluzione [μT]
0.01-1.1	0.01
0.8-17.8	0.02
12.8-300	0.32

Tabella 2.1 - Risoluzione dello strumento al variare dell'induzione.

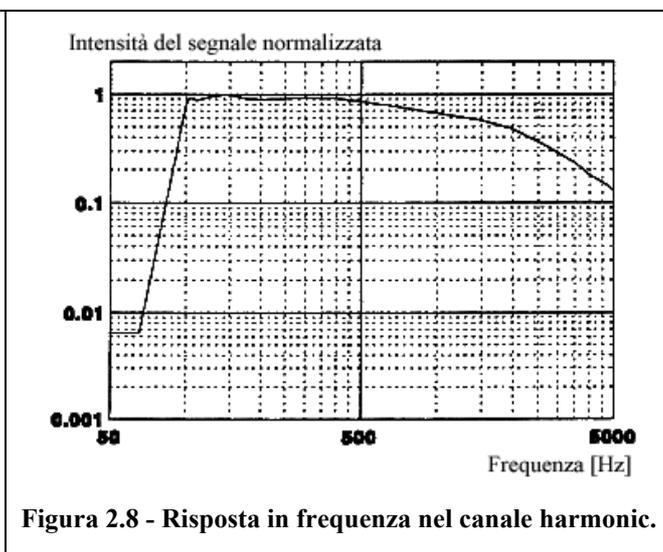
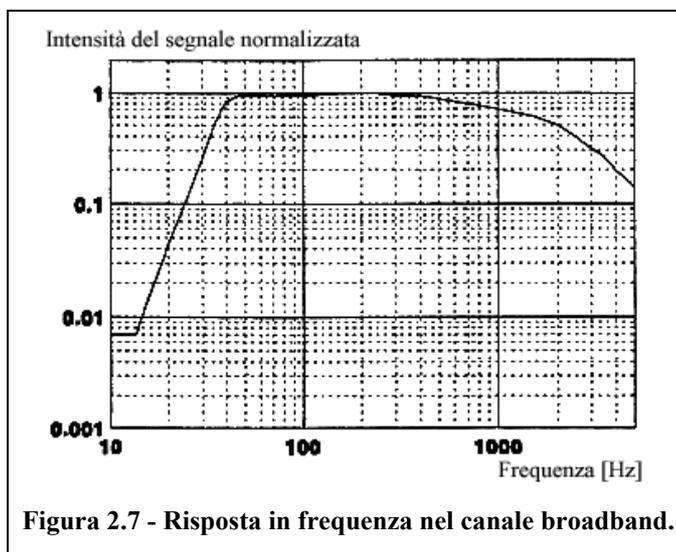
Risposta in frequenza

Le specifiche tecniche dello strumento riportano, per una misura in modalità broadband, una variazione di $\pm 30\%$ su tutto l'intervallo di frequenze (da 40 a 800 Hz), mentre per la modalità harmonic si ha una dipendenza dalla frequenza, come riportato nella Tabella 2.2:

Frequenza [Hz]	Variazione della risposta in frequenza
100	da +10% a - 45%
120	da +25% a - 30%
150	da +25% a - 0%
180-800	da +25% a - 25%

Tabella 2.2 - Variazione della risposta in funzione della frequenza.

Nelle figure 2.7 e 2.8 è visualizzata la risposta in frequenza nelle due modalità.



La modalità LINDA



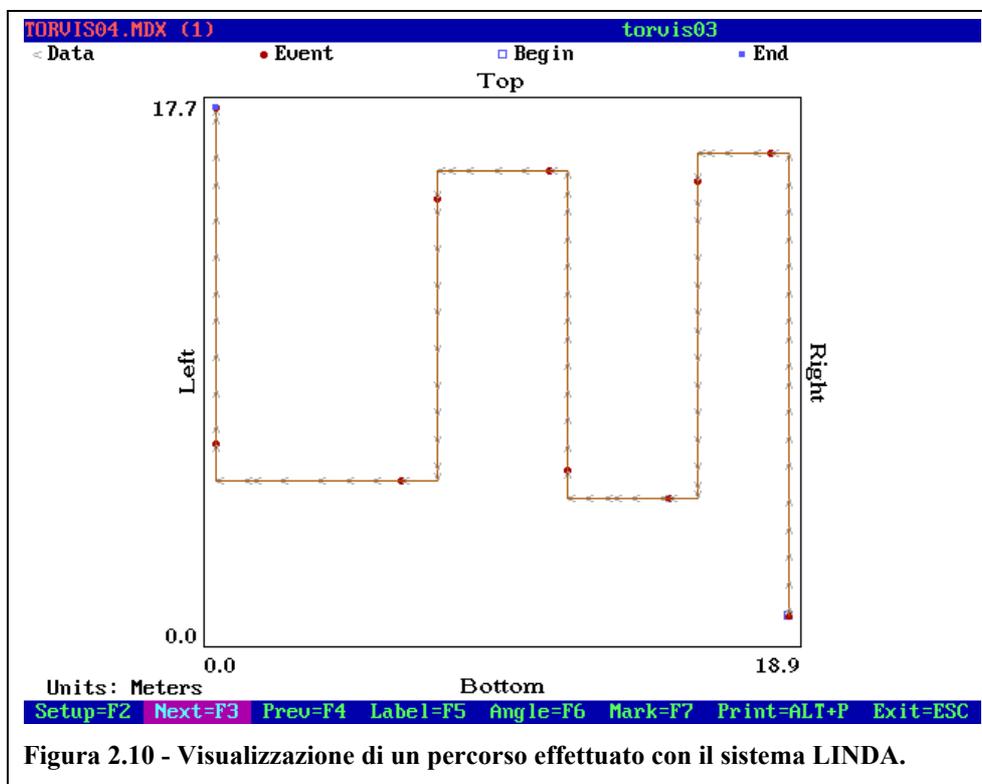
Figura 2.9 - Il sistema LINDA.

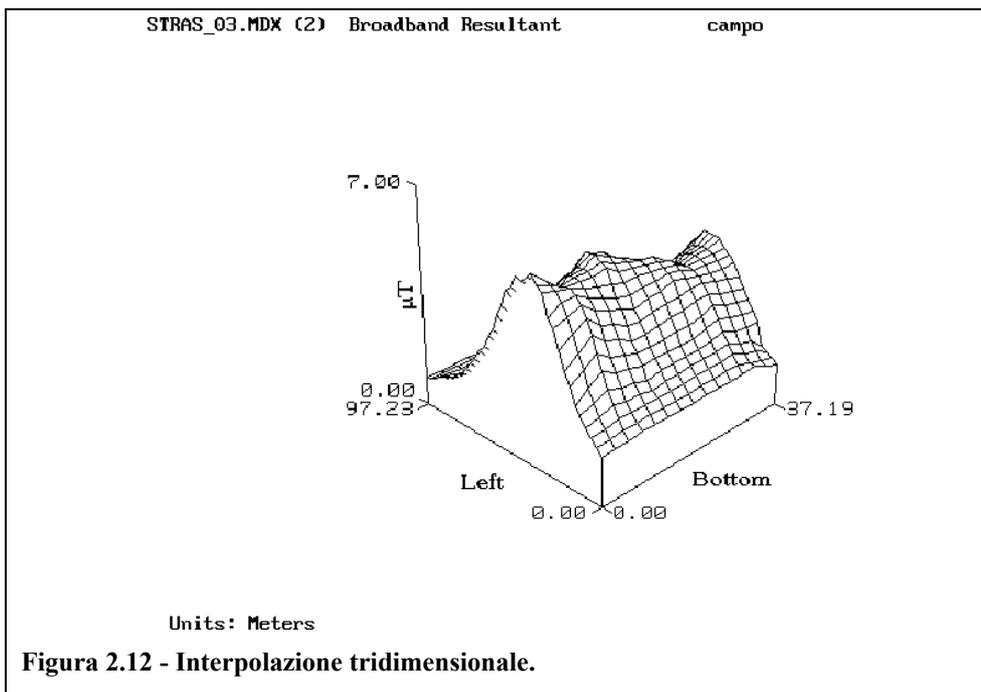
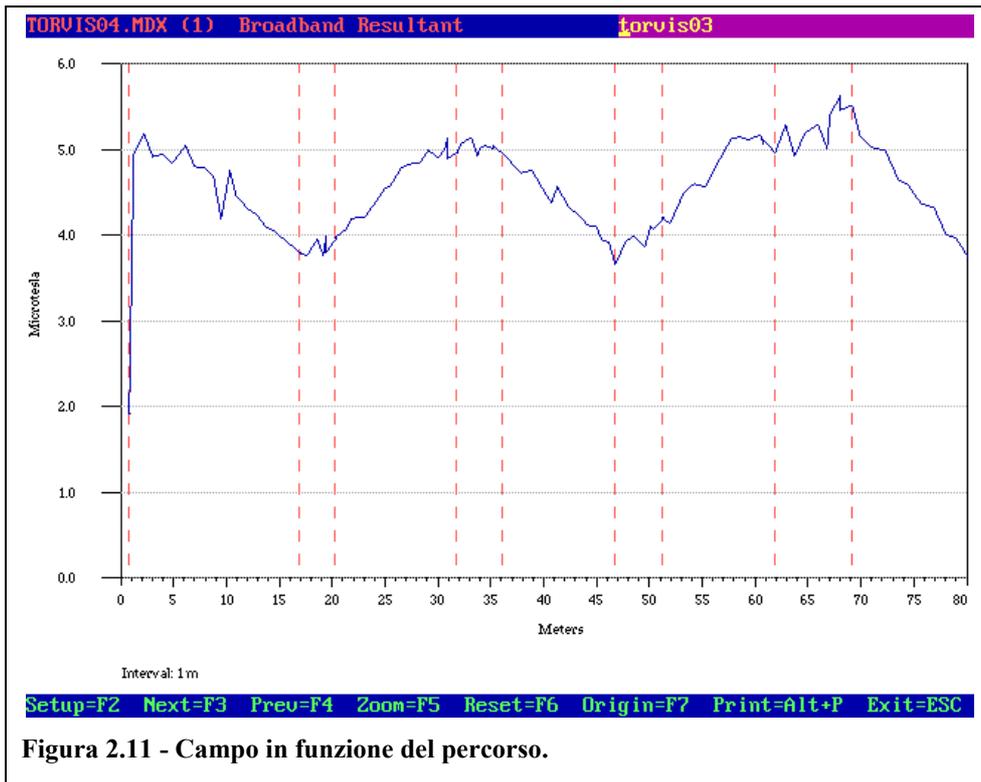
Nella configurazione LINDA (Linear Data Acquisition System) l'EMDEX II viene fissato su di un supporto mobile munito di odometro, bussola e speciali sensori che rendono possibile registrare anche la distanza e la direzione in una misura di induzione magnetica. Affinché questo sia possibile è necessario installare nella memoria del rivelatore un apposito programma.

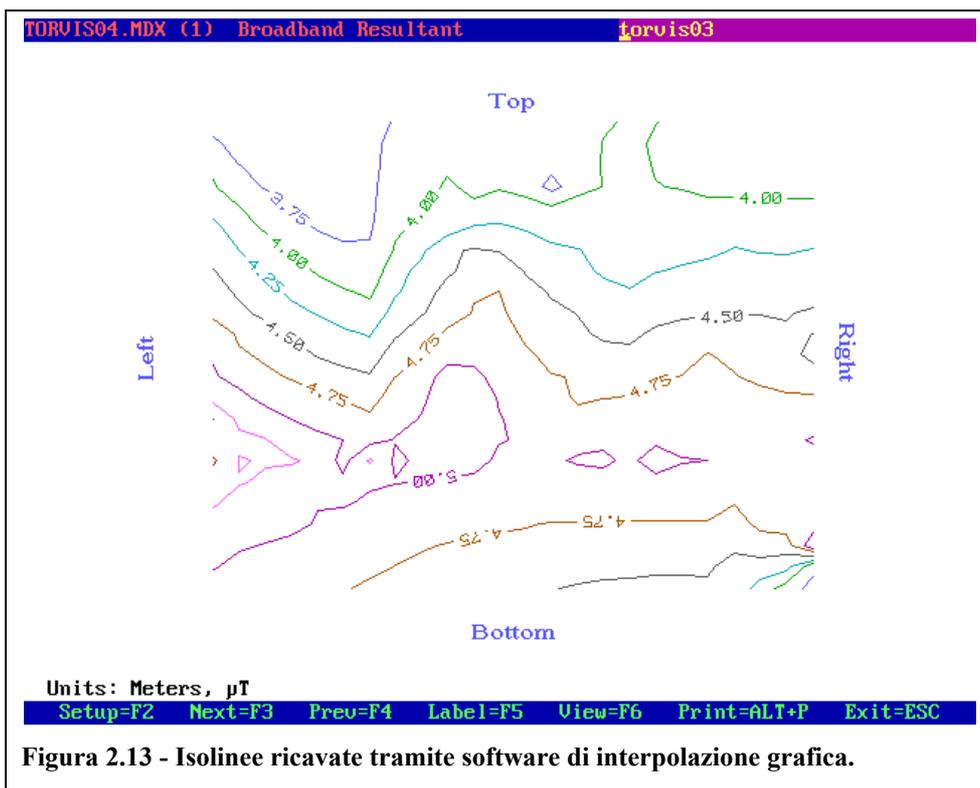
Tutti i dati memorizzati vengono quindi trasferiti su di un computer; qui il software EMCALC permette di visualizzare il percorso effettuato (Figura 2.10), il profilo dell'induzione (Figura 2.11), e tramite un procedimento di interpolazione l'andamento del campo su una superficie, in un grafico tridimensionale (Figura 2.12).

Le variazioni di direzione devono essere multipli di 45° , visualizzabili tramite la bussola ed impostabili tramite pulsantiera.

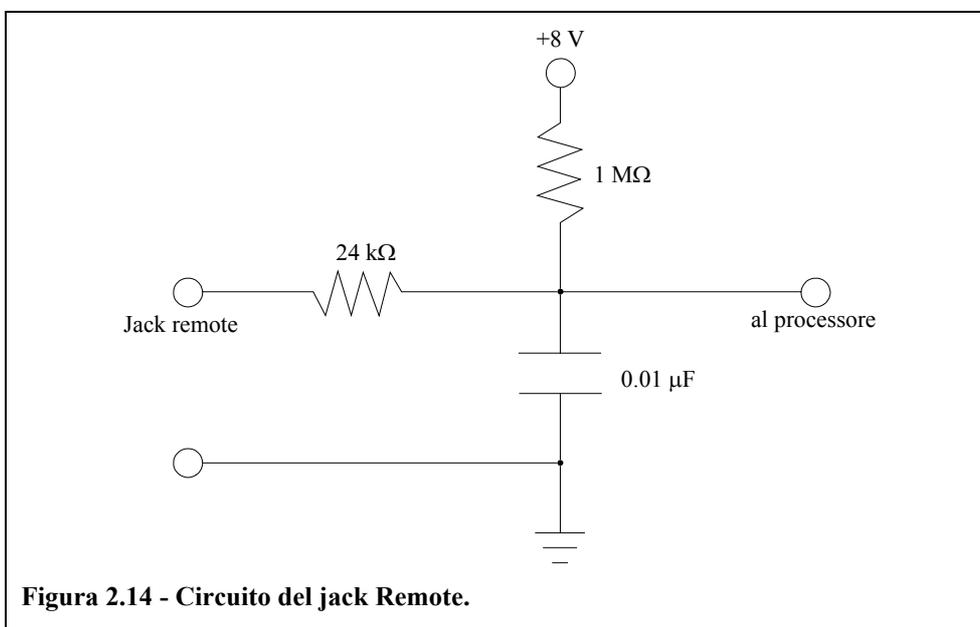
Oltre alla conversione dei dati in file ASCII, esiste la possibilità di esportare i grafici così ottenuti in file di tipo IMG o ART: è quindi possibile visualizzarli tramite opportuni programmi presenti su computer su cui non sia stato installato il software EMCALC. Per il grafico in Figura 2.12, ad esempio, è stato utilizzato ImageMagick, reperibile sul sito <http://www.imagemagick.com>.







Il programma installato imposta la frequenza di campionamento, in modalità broadband. La ruota dello strumento fa scattare un interruttore ogni qualvolta viene percorsa la distanza di un piede, riducendo la resistenza del jack Remote sotto i 50 k Ω . Quando l'interruttore si riapre, la resistenza risale sopra i 1000 k Ω , e la transizione da basso ad alto è contata dal computer interno.



Le misure si fermano se non giungono segnali per tre secondi, per ripartire al successivo segnale. La risoluzione (numero di misurazioni per unità di distanza) dipende dalla velocità di avanzamento dello strumento.

In questa maniera è possibile memorizzare simultaneamente nella RAM dello strumento i valori di campo, le distanze percorse e i cambiamenti di direzione (multipli di 45°, impostati tramite pulsantiera dello strumento).

2.4 - PMM 8053



Figura 2.15 - Il PMM 8053.

Il PMM 8053 è un misuratore di campi elettrici e magnetici. È utilizzato con una sonda esterna, connessa tramite fibra ottica. In questo modo si evitano effetti di accoppiamento con l'operatore che risultano importanti soprattutto nel caso di misure di campo elettrico.

Opzioni di visualizzazione

Tramite la pulsantiera ed il display l'operatore può selezionare diverse modalità di visualizzazione dei dati. In modalità "ABS/%" vengono mostrate le componenti vettoriali del campo misurato in valore assoluto o in percentuale. In modalità "MIN-MAX/AVG" (o "MIN-MAX/RMS") vengono visualizzati i valori massimo e minimo oltre al valore medio espresso come media aritmetica (o quadratica) trascinata della lettura:

$$AVG = \frac{1}{T} \int_0^T |B(t)| dt \quad 2.3$$

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T |B(t)|^2 dt} \quad 2.4$$

In modalità "PLOT" i dati sono acquisiti e visualizzati sul display in funzione del tempo. In modalità "DATA logger" i dati vengono immagazzinati in un file, che potrà poi essere trasportato su PC.

Specifiche tecniche

Il rivelatore è progettato per lavorare nell'intervallo di frequenze tra 5 Hz e 40 GHz, con un range di misura di campo magnetico tra 10 nT e 10 mT ed un'accuratezza dell'1%. Nella memoria interna è possibile immagazzinare sino a 8100 misure.

Al momento di effettuare una misura si fissa lo SPAN, valore che indica la frequenza massima dello spettro entro cui lo strumento effettua la misura, tra i valori riportati in Tabella 2.3:

SPAN	Tempo di acquisizione	Risoluzione [Hz]
100 Hz	4.1 s	0.24
200 Hz	2.0 s	0.49
500 Hz	0.8 s	1.22
1k kHz	0.4 s	2.44
2 kHz	0.2 s	4.88
10 kHz	40.96 ms	24.41
100 kHz	4.096 ms	244.14

Tabella 2.3 – Valori selezionabili dello SPAN, e corrispondenti tempi di acquisizione e risoluzioni.

La frequenza minima misurabile corrisponde a circa l'1.2% dello SPAN (in ogni caso non è mai inferiore a 5 Hz): per misure a 50 Hz si sceglie lo SPAN a 1 kHz, che garantisce una maggiore sensibilità tra quelli possibili ($<0.2 \mu\text{T}$). In questa maniera resta fissato un filtro passa-alto a 20 Hz, che ripulisce le misure dal rumore di fondo, ed il tempo di acquisizione, secondo la Tabella 2.4:

Frequenza filtro [Hz]	Tempo di acquisizione [ms]
10	900
20	450
40	250
80	150

Tabella 2.4 Tempo di campionamento e filtro passa-alto.

La misura può essere effettuata in due modalità: WIDEBAND, in cui vengono misurate le componenti relative a tutto lo spettro (Span) selezionato, o HIGHEST, in cui viene misurata solo la componente con intensità di campo maggiore all'interno dello Span. L'intervallo di campionamento può essere fissato in 1, 2, 3, 6, 10, 15, o 30 minuti, oppure la media (trascinata) viene effettuata sugli ultimi 32 campionamenti.

È possibile un utilizzo, solo con la sonda EHP-50A per misure di campi a 50 Hz, in modalità Low Power (LP): in tale configurazione le rilevazioni avvengono ogni 60 secondi, e lo strumento rimane in stand-by tra una misura e la successiva. In modalità Low Power la sonda ha un'autonomia di 50 ore, maggiore di quella del PMM 8053 che deve essere alimentato esternamente per poterlo utilizzare per intervalli di tempo così lunghi. Il collegamento tramite fibra ottica allontana l'alimentazione dalla sonda, in modo da non alterarne il funzionamento.

Il rivelatore può essere utilizzato con più sonde. I parametri di taratura sono memorizzati in un chip contenuto nella testa della sonda. Il riconoscimento della sonda e la lettura della curva di taratura avvengono al momento dell'accensione dello strumento o al momento dell'innesto della sonda.

Sonda EHP-50A

Il rivelatore PMM 8053, per le misure di campi a frequenza industriale, ha bisogno di una sonda di tipo EHP-50A: è un sensore-analizzatore isotropico di campi elettrici e magnetici a bassa frequenza, di cui sono riportate nella tabella successiva le specifiche tecniche.

Campo di frequenza	5 Hz – 100 kHz
Portata	10 nT – 10 mT
Risoluzione	1 nT
Sensibilità	10 nT
Errore assoluto	$\pm 0.8 \text{ dB}$ (=9.6%)
Piattezza (40 Hz – 10 kHz)	$\pm 0.5 \text{ dB}$ (=5.9%)
Isotropicità	$\pm 1 \text{ dB}$ (=12.2%)
Errore totale (massimo)	16.6%

Tabella 2.5 - Specifiche tecniche della sonda EHP-50A.



Figura 2.16 - Visualizzazione su display dell'analisi di spettro.

Permette l'analisi di spettro dei segnali per mezzo di un DSP (Digital Signal Processor), che viene effettuata sui sette SPAN possibili e visualizzata sul display del misuratore; la misura precisa delle frequenza e del livello è ottenuta per mezzo di un marker (figura a lato).

Riportiamo una nota infine su come si determina l'errore totale dello strumento. L'errore espresso in decibel è correlabile ad un rapporto tra tensioni tramite la relazione:

$$dB = 10 \log \frac{P_m}{P_0} = 20 \log \frac{V_m}{V_0} \quad 2.4$$

$$\frac{V_m}{V_0} = 10^{\frac{dB}{20}} \quad 2.5$$

ove m e 0 sono indici riferiti a quantità misurata e di riferimento, rispettivamente. L'errore totale si ottiene tramite somma in quadratura.

Nelle figura seguente è riportata la risposta in frequenza per le misure di campo magnetico:

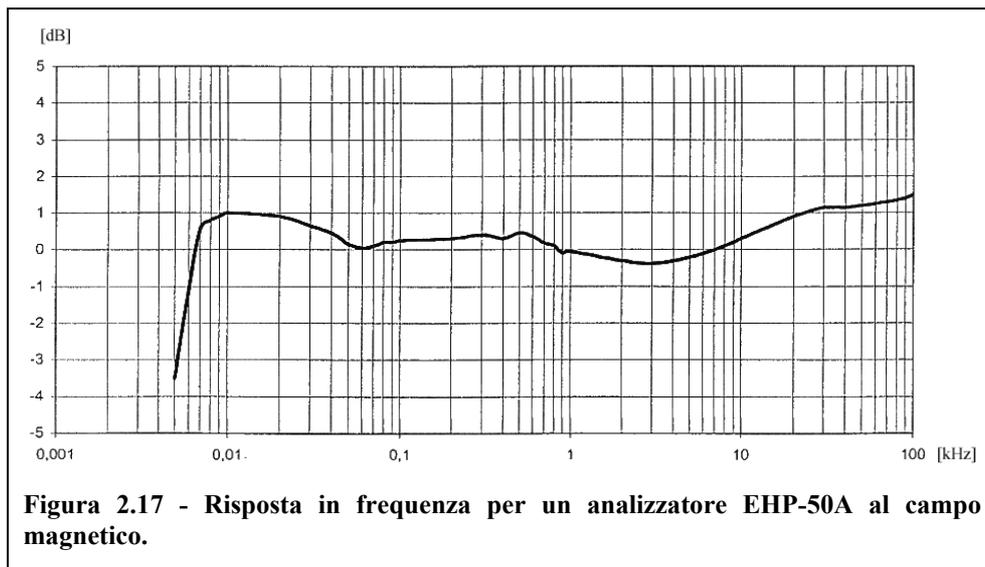


Figura 2.17 - Risposta in frequenza per un analizzatore EHP-50A al campo magnetico.

2.5 - PMM 8055S

Il sistema PMM 8055S utilizzato per il monitoraggio continuo e remoto dei campi elettromagnetici. La centralina, alimentata da batterie interne, è collegata a due pannelli solari che consentono un'autonomia praticamente illimitata, in normali condizioni di luce solare.

Tramite un cellulare GSM incorporato nella centralina e dotato di scheda telefonica SIM-DATI, comunica attraverso la rete GSM con un Modem montato su PC in remoto per l'immediata archiviazione a lungo termine delle misure effettuate.

La centralina ha un'autonomia di una settimana in assenza di luce; all'esaurimento della carica i dati raccolti rimangono in memoria.



Figura 2.18 - Centralina PMM 8055S dotata di sonda HP-050.

Ci sono vari tipi di allarmi e controlli visualizzabili in remoto:

- case open;
- low-battery;
- diagramma di irraggiamento solare.

Ogni 2 ore la stazione radiobase interroga il cellulare (come avviene per tutti i cellulari), e tali eventi sono opportunamente segnati nel file in cui vengono acquisite le misure: posso utilizzare l'informazione per rigettare eventualmente il dato raccolto in concomitanza con la comunicazione remota. Il tempo massimo di acquisizione può arrivare a 18 mesi, dipendentemente dal campionamento e dai dati acquisiti.

Campo di frequenza	5 Hz – 40 GHZ
Campo di lavoro	(10±0.1) nT-(10±0.1) mT
Campo misurato	X, Y, Z, totale, massimo e medio (trascinato su 1 e 6 minuti)
Campionamento	1 misura/s
Intervallo di memorizzazione	5, 10, 15, 30s, 1, 2, 6 minuti
Memoria	256 kB

Tabella 2.6 - Specifiche tecniche della centralina PMM 8055S.

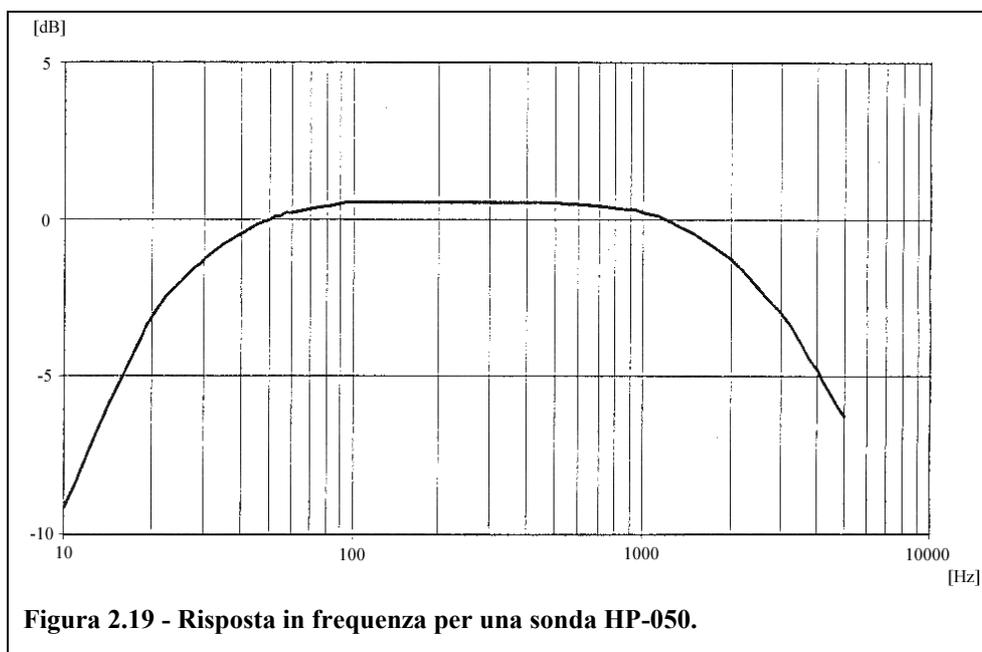
Sonda HP-050

La centralina è utilizzata con una sonda (visibile nel riquadro in basso a sinistra di Figura 2.10) di tipo HP-050, di cui vengono qui riportate le specifiche tecniche:

Campo di frequenza	10 Hz – 5 kHz
Portata	10 nT – 40 μ T
Risoluzione	1 nT
Sensibilità	10 nT
Errore assoluto @ 50 Hz 200 nT 25 °C	± 0.4 dB (=4.7%)
Piattezza (40 Hz – 1 kHz)	± 1 dB (=12.2%)
Isotropicit� @ 50 Hz 200 nT	± 0.3 dB (=3.5%)
Errore totale (massimo)	13.5%

Tabella 2.7 - Specifiche tecniche della sonda HP-050.

Viene riportato infine il grafico che visualizza la risposta in frequenza della sonda:



2.6 - Interconfronto tra gli strumenti

Nessuno tra quelli appena descritti   lo strumento ideale per qualunque tipo di misura: la scelta deve essere effettuata a cura dell'operatore a seconda delle condizioni e delle necessit  che si presentano di volta in volta.

L'EMDEX II   sicuramente da preferirsi per misure con bassi valori di campo per la migliore sensibilit , e nei casi in cui si renda necessario operare in modalit  LINDA per acquisire i valori di campo lungo un percorso o su una superficie estesa. Inoltre, essendo pi  maneggevole,   utile per uno screening preliminare della zona e per l'individuazione veloce dei punti di posizionamento di una centralina o per l'esecuzione di una misura a lungo termine.

Diventa molto meno affidabile per quanto riguarda le misure di campo elettrico, nel qual caso richiede, oltre all'installazione dell'apposito software, una sonda esterna non isotropa (un condensatore piano).

I rivelatori e le sonde PMM sfruttano invece appieno le loro caratteristiche nel caso di misure in continua. Questo è dovuto alla possibilità di comunicare i dati in remoto, alla maggiore quantità di dati memorizzabili, ad un'autonomia di gran lunga superiore (praticamente illimitata in particolari condizioni ambientali nel caso della centralina) ed infine alla caratteristica non trascurabile di mantenere i dati in memoria anche nel caso di un'interruzione dell'alimentazione, condizione che nel caso dell'EMDEX II comporta la perdita totale dei dati acquisiti.

2.7 - Bibliografia

- [2.1]. M. Borsero, G. Crotti, L. Anglesio, G. d'Amore, "Calibration and evaluation of uncertainty in the measurement of environmental electromagnetic fields", *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 97, No 4, pp. 363-368 (2001)
- [2.2]. PMM Costruzioni Elettroniche – Centro Misure Radioelettriche s.r.l., "Manuale Operativo PMM 8053 – Misuratore portatile di campi elettromagnetici", 1999
- [2.3]. Enertech consultants, "EMDEX II Linear Data Acquisition System - LINDA User Manual Version 2.2", Palo Alto (California), Ottobre 1994
- [2.4]. Enertech consultants, "EPRI EMDEX Electric and Magnetic Field Digital Exposure System - EMDEX Technical Reference Manual - Version 2.2", Palo Alto (California), Ottobre 1994
- [2.5]. Enertech consultants, "EPRI Electric and Magnetic Field Digital Exposure System - EMDEX II User Manual Version 2.2", Palo Alto (California), Novembre 1994
- [2.6]. Enertech consultants, "EPRI Electric and Magnetic Field Digital Exposure System – EMCALCTM95 User Manual", Palo Alto (California), Dicembre 1994
- [2.7]. Norma Italiana CEI 211-6, gennaio 2001, Prima Edizione, Fascicolo 5908, "Guida per la misura e per la valutazione dei campi elettrici e magnetici nell'intervallo di frequenza 0Hz – 10kHz, con riferimento all'esposizione umana"
- [2.8]. PMM Costruzioni Elettroniche – Centro Misure Radioelettriche s.r.l., "Manuale Operativo PMM 8055S – Sistema di monitoraggio distribuito di campi elettromagnetici ambientali", 2002

III - Il software di calcolo CMagnetico

3.1 - CMagnetico

CMagnetico è un software sviluppato dall'ITC – irst (Istituto Trentino di Cultura – Istituto di Ricerca Scientifica del Trentino) per il calcolo dell'induzione magnetica generata da una linea elettrica. Riferimenti al sito <http://www.itc.it>.

Metodo di calcolo

Integrazione numerica della legge di Biot-Savart sulla catenaria della campata. Utilizza l'approssimazione agli elementi finiti, suddividendo la regione di campionamento di celle all'interno delle quali viene calcolato il campo.

Sistema di riferimento

Viene definito un sistema di riferimento *OXYZ* rispetto al quale si precisano i dati geometrici relativi alla linea:

- l'asse *X* trasversale alla linea rispetto al quale misurare gli "spiazzamenti" dei fili;
- l'asse *Y* lungo la direzione di sviluppo della linea rispetto al quale misurare l'angolo di inclinazione delle campate;
- l'asse *Z* verticale rispetto al quale fissare l'altezza dal suolo identificato con il piano *OXY*.

The screenshot shows the 'CMAGNETICO - Inserimento dati di linea' window. It contains several data entry sections:

- 1) Nr. Punti del Campionamento:** A table with columns 'Lungo X', 'Lungo Y', and 'Lungo Z'.
- 2) Passo del Campionamento:** A table with columns 'Lungo X (m)', 'Lungo Y (m)', and 'Lungo Z (m)'. The 'Lungo X (m)' column is highlighted in yellow.
- 3) Origine del Campionamento:** A table with columns 'Lungo X (m)', 'Lungo Y (m)', and 'Lungo Z (m)'. The 'Lungo X (m)' column is highlighted in yellow.
- 4) Dati Elettrici della Linea:** A table with columns 'Corrente eff. (amp)', 'Fase: R, S, T', 'Offset (grad)', and 'Ascissa X (m)'. It has rows labeled F.1 through F.12.
- 5) Dati Geometrici della Linea:** A table with columns: 'C1 : L (m)', 'U_0 (m)', 'H_0 (m)', 'H_1 (m)', 'H_2 (m)', 'INCL (grad)', 'C2 : L (m)', 'U_0 (m)', 'H_0 (m)', 'H_1 (m)', 'H_2 (m)', and 'INCL (grad)'. It has rows labeled F.1 through F.12.

Figura 3.1 - Griglia di inserimento dati.

Regione di campionamento

La regione entro cui si vuole calcolare il campo H è un parallelepipedo che può essere posizionato arbitrariamente rispetto alla linea elettrica; i punti in esso contenuti forniscono i valori di campo magnetico, nella regione di spazio prescelta, fittamente quanto si vuole. È necessario specificare:

- il numero di punti di campionamento lungo i tre assi X, Y, Z ;
- il passo di campionamento lungo i tre assi;
- l'origine del campionamento.

Dati elettrici in ingresso

I dati elettrici della linea devono essere specificati solo per la campata centrale che interseca la zona di spazio in cui si vuole calcolare il campo magnetico; in particolare per ogni conduttore si deve inserire:

- la corrente effettiva;
- la fase (R, S, T);
- l'offset di ogni fase (in gradi) che misura di quanto una singola fase si discosta dal suo valore standard di riferimento;
- l'ascissa del conduttore (cioè il suo "spiazzamento" rispetto all'asse della linea se tale asse coincide con l'asse Y).

Dati geometrici in ingresso

È possibile considerare fino a 5 campate comunque orientate rispetto ad una direzione presa come riferimento (l'asse Y); una volta immessi i dati per più campate, il programma determina la campata centrale automaticamente come l'intermedia fra quelle che la precedono e la seguono e a questa assegna il valore di coordinata $Y=0$.

Per ogni campata e per ogni conduttore devono essere specificati:

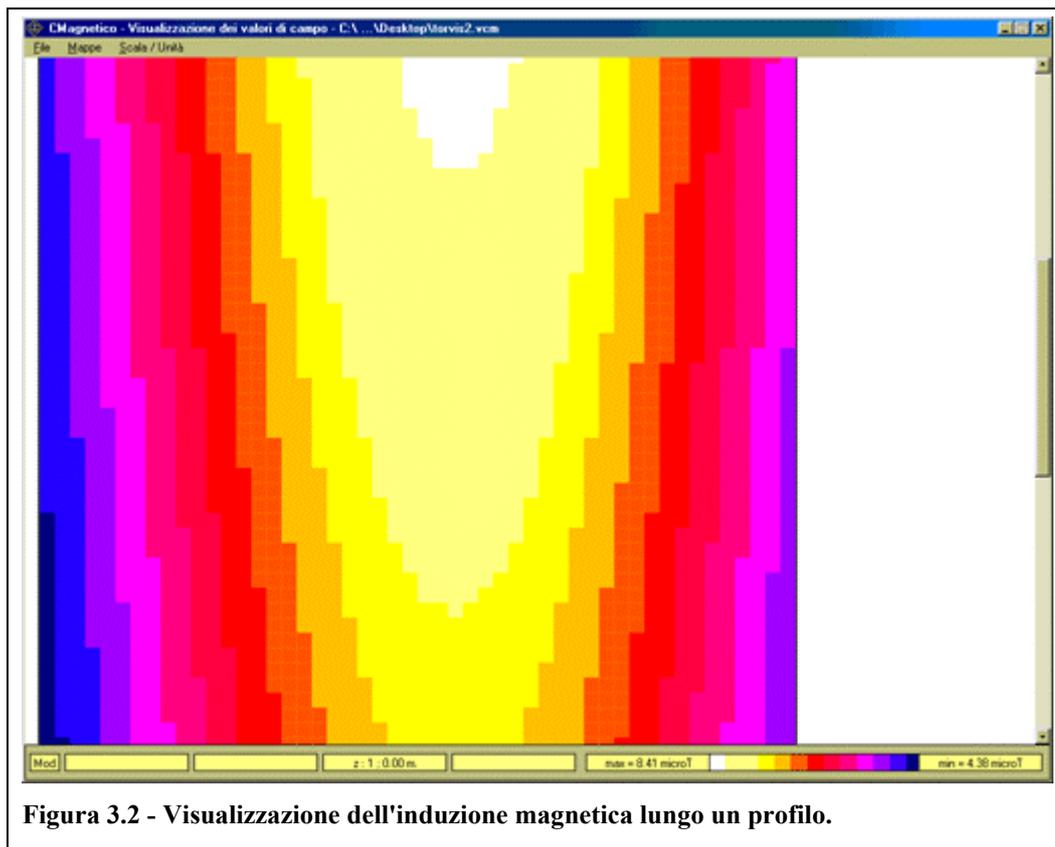
- la lunghezza della campata;
- la distanza dal traliccio di sinistra del punto minimo della catenaria lungo cui si dispone il conduttore;
- l'altezza dal suolo del punto minimo;
- l'altezza dal suolo del punto di attacco del conduttore sul sostegno di sinistra;
- l'altezza dal suolo del punto di attacco del conduttore sul sostegno di destra;
- l'inclinazione in gradi della campata rispetto ad una direzione presa come riferimento.

Opzioni

Scelta del numero di punti di campionamento e del passo di campionamento.

Presentazione dei dati in output

Visualizzazione di piani (lungo X, Y, Z), del profilo trasversale del campo e di mappe bidimensionali. Possibilità di salvare i dati in una tabella Excel.



Requisiti software-hardware

Sistema operativo Windows

Osservazioni e commenti

Il calcolo non tiene conto delle funi di guardia perché non essendo percorsi da corrente non contribuiscono al campo magnetico generato dai conduttori attivi.

Nell'inserimento dati non vengono accettate quote negative o nulle.

Nell'apertura di file salvati in precedenza si sono presentati problemi riguardanti la perdita delle cifre decimali.

Non è possibile il calcolo nel caso di più linee indipendenti.

A causa dell'approssimazione utilizzata nell'implementazione del programma (elementi finiti) il campo non viene calcolato in un punto, ma in un volume, e a tutti i punti entro quel volume viene assegnato lo stesso valore di campo.

3.2 - Bibliografia

- [3.1]. Norma Italiana CEI 211-4, luglio 1996, Prima Edizione, Fascicolo 2840, "Guida ai metodi di calcolo dei campi elettrici e magnetici generati da linee elettriche"
- [3.2]. Roberto Turri, Maurizio Albano, "Calcolo previsionale dei campi elettromagnetici generati da elettrodotti", Associazione Elettrotecnica ed Elettronica Italiana, Padova 2000
- [3.3]. Elena Gambato, Maria Rosa, "Studio dei modelli per il calcolo dei campi elettromagnetici generati da elettrodotti", Direzione Tecnico Scientifica ARPAV, Venezia 2000
- [3.4]. D. Manco, L. Bruzzi, A. Soloni, D. Valbonetti, S. Fabbri, S. Violanti, "Electric and magnetic fields generated by AC power lines: an application of advanced modelling tools in order to predict exposure levels", Radiation Protection Dosimetry, 97(4), pp 359-362 (2001)

- [3.5]. G. Licitra, M. Magnoni, G. D'Amore, A. Poggi, S. Adda, M.C. Losana, A. Jacoponi, T. Gabrieli, "Rassegna dei modelli per il rumore, i campi elettromagnetici e la radioattività ambientale", ANPA, RTI CTN_AGF 1/2001
- [3.6]. G. D'Amore, L. Anglesio, S. Adda, A. Bonino, G. Licitra, F. Francia, "Standard per la realizzazione delle banche dati delle sorgenti di inquinamento elettromagnetico (alte e basse frequenze)", ANPA - Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente, Dipartimento Stato dell'Ambiente, Controlli e Sistemi Informativi, RTI CTN_AGF 4/2001
- [3.7]. G. Licitra, N. Colonna, C. Chiari, "Evaluation of long-term exposure to the magnetic field produced from power lines", Radiation Protection Dosimetry, Vol. 97, No 4, pp. 401-404 (2001)
- [3.8]. Silvia Violanti, "Cem nelle aree urbane, a Bologna uno studio per valutare i campi a basse frequenze", ARPA Rivista N. 1, ARPA Emilia-Romagna, Gennaio-Febbraio 2003
- [3.9]. Benes M., Comelli M., Drigo A., Giovani C., Montanari F., Villalta R.. "Strumenti per una mappatura degli elettrodotti: database, software di simulazione e monitoraggio", ARPA Friuli Venezia Giulia, 2003