

## **Interconfronto di misure di campo magnetico in prossimità di cabine di trasformazione MT/bt: impostazione metodologica e risultati**

Violanti S.<sup>1</sup>, Frascchetta M.<sup>1</sup>, Adda S.<sup>2</sup>, Caputo E.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ARPA Emilia Romagna, Via XXI Aprile, 48, Piacenza (PC), [sviolanti@arpa.emr.it](mailto:sviolanti@arpa.emr.it), [mfrascchetta@arpa.emr.it](mailto:mfrascchetta@arpa.emr.it)

<sup>2</sup>Arpa Piemonte, Via Jervis, 30, 10015 Ivrea (TO), [s.adda@arpa.piemonte.it](mailto:s.adda@arpa.piemonte.it), [e.caputo@arpa.piemonte.it](mailto:e.caputo@arpa.piemonte.it)

### **RIASSUNTO**

*Nell'ambito delle attività del sistema delle Agenzie, coordinate da ISPRA, e ai fini di approfondimento delle problematiche di misura e valutazione del campo magnetico a frequenza industriale poste dall'applicazione del DPCM 08.07.2003, è stato progettato e realizzato un interconfronto di misure effettuate in prossimità di cabine di trasformazione MT/bt. Il lavoro è stato svolto con il contributo di rappresentanti delle Agenzie di: Lazio, Valle d'Aosta, Toscana, Friuli Venezia Giulia, Piemonte, Emilia-Romagna, Lombardia e ISPRA.*

*Si sono individuate cabine di tipologia standard a livello nazionale, dislocate in tre diverse regioni e si è poi predisposto un protocollo di misura e di analisi dei dati. L'analisi dei dati, effettuata conformemente allo standard ISO 13528:2005 con specifica attenzione alla valutazione delle incertezze, ha dimostrato una buona coerenza tra i risultati riscontrati dalle Agenzie partecipanti. Sono però emerse una serie di problematiche, sia in fase di predisposizione del protocollo e delle procedure di analisi dati, sia in fase di realizzazione delle misure e rielaborazione dei dati stessi, che sono legate alla variabilità spaziale e temporale del campo magnetico. Tali problematiche risultano di particolare interesse nella determinazione di una corretta metodologia di misura finalizzata al confronto con i limiti, valori di attenzione e obiettivi di qualità fissati dalla normativa vigente.*

### **PREDISPOSIZIONE DELL'INTERCONFRONTO**

La parte di pianificazione del lavoro ha previsto la determinazione della tipologia di cabine utili per l'interconfronto e la scelta di tre cabine in tre diverse regioni (Lazio, Toscana, Friuli Venezia Giulia), aventi le caratteristiche standard di cabine di nuova generazione di tipo box realizzate a livello nazionale (individuazione effettuata in collaborazione con Enel) seguita dalla predisposizione di un protocollo di misura e di analisi dei dati. Il protocollo è stato progettato con la finalità di confronto tra misure effettuate da tutte le Agenzie in una postazione fissa e misure in un punto a scelta di ciascuna Agenzia (con lo scopo di determinare il punto di massima esposizione), ed ha comportato una particolare cura nel trovare condizioni di normalizzazione, e conseguente confrontabilità dei dati, per una sorgente che presenta forti variazioni spaziali e temporali del campo magnetico. Il protocollo di misura lasciava comunque alcune libertà nella determinazione delle modalità di misura, con la finalità di testare non soltanto le efficienze strumentali della varie Agenzie, ma anche le scelte metodologiche dei singoli partecipanti. Le misure sono state effettuate nelle tre regioni dalle varie Agenzie accorpate in gruppi (6 in Lazio, 5 in Friuli Venezia Giulia e 8 in Toscana); contemporaneamente alle misure di campo, sono stati acquisiti i livelli di induzione magnetica in continuo in un punto fisso dal lato trasformatore e grazie alla presenza dei tecnici Enel, i valori di corrente in uscita dal trasformatore e in uscita dai quadri di bassa tensione nelle cabine.

### **VALUTAZIONE RISULTATI**

#### **MISURE POSTAZIONE FISSA**

Nella postazione fissa individuata in modo univoco prima dell'interconfronto ogni Agenzia partecipante doveva effettuare una misura di durata sufficiente ad avere almeno 20 campioni di misura. Il trattamento dei dati acquisiti prevedeva il calcolo della media dei 20 campioni, e la valutazione del rapporto R con la media di 20 campioni acquisiti dal misuratore in postazione fissa. L'interconfronto è stato quindi effettuato tra i rapporti R valutati sulla base dei dati dei vari partecipanti. La metodologia per l'analisi statistica è stata individuata nello standard ISO 13528 (2005-09-01), ed il "consensus value" (rif. Guida ISO/IEC n°43 a 1997) è stato calcolato come media robusta dei risultati dei vari partecipanti, in base all'algoritmo allegato al suddetto standard. Anche l'incertezza associata doveva essere determinata secondo quanto previsto dalla stessa norma.

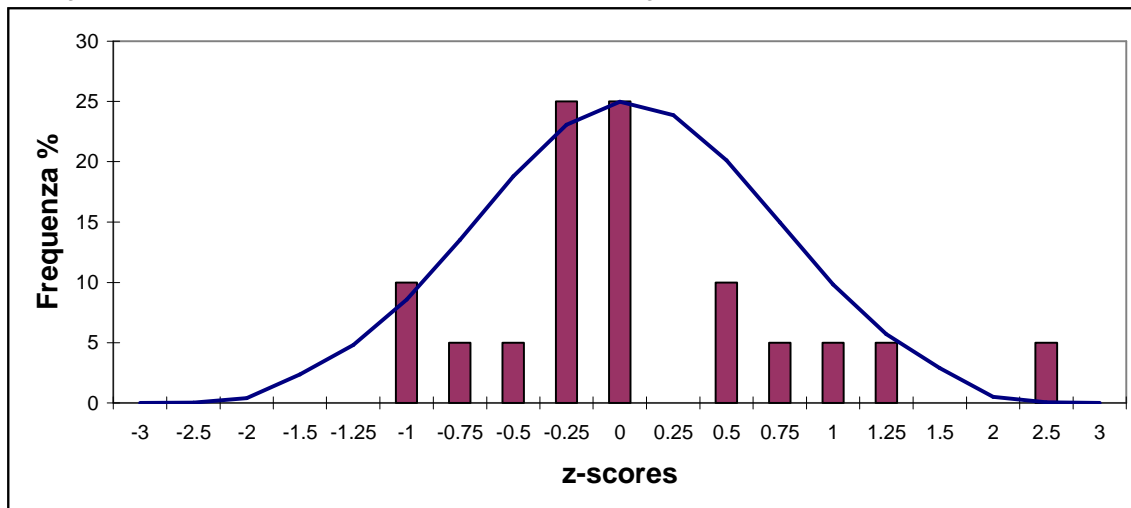
Il risultato è stato poi confrontato con il metodo statistico dei punteggi-z, con  $z=(x-X)/s$  dove X è il risultato ottenuto come "consensus value" tra tutti i partecipanti, la stima di s (ricordando che l'incertezza estesa è fornita come 2 volte la deviazione standard) è pari a metà dell'incertezza associata a tale valore e x è il risultato di ogni Agenzia in esame. I risultati delle singole Agenzie sono stati valutati attribuendo una classificazione attraverso i seguenti punteggi statistici:

Tutte le Arpa hanno realizzato punteggi soddisfacenti ( $|z| \leq 2 =$  soddisfacente), ed una sola Agenzia ricade nell'intervallo "discutibile" ( $2 < |z| < 3 =$  discutibile).

Quest'ultima ha effettuato le rilevazioni nel tardo pomeriggio, mentre tutte le altre hanno lavorato nell'intervallo orario corrispondente alla tarda mattinata: si può pensare che, data la notevole variazione delle condizioni di carico, la differenza nei risultati sia stata dovuta alla variazione del rapporto tra livelli di

campo nei due punti di riferimento tra metà giornata e tardo pomeriggio. In tal caso, lo scostamento nello z-score di questa Agenzia non dipenderebbe dalle modalità di misura o dalla strumentazione, bensì dalla mancanza di condizioni di riproducibilità della misura a causa di variazione dei parametri della sorgente. Essendo il numero di campioni per regione piuttosto limitato determinando una scarsa valenza statistica, ad integrazione dell'analisi sui singoli risultati è stato effettuato un ulteriore accorpamento dei risultati dei 19 partecipanti tramite istogramma di distribuzione dei valori Z (fig.1) .

Figura 1 – distribuzione dei valori Z ricavati per tutte le Agenzie partecipanti alle 3 sessioni di misura



Si può vedere come il 70% dei dati si attesta su valori di punteggio z compresi tra -0,5 e 0,5 (1 $\sigma$  se si assume una distribuzione gaussiana), e l'80% su valori di punteggio z compresi tra -1 e 1 (2 $\sigma$ ). Quanto detto porta a concludere che, nonostante le caratteristiche di grande complessità della sorgente e forte variabilità spaziale e temporale dei livelli di campo magnetico, la misura in una postazione fissa da parte delle Agenzie partecipanti fornisce risultati confrontabili, purché l'interconfronto venga svolto in un intervallo di tempo limitato (in modo da garantire che la distribuzione spaziale del campo rimanga relativamente costante).

#### DETERMINAZIONE PUNTO DI MASSIMA ESPOSIZIONE

Non è possibile determinare, in questa situazione, esattamente i parametri correttivi per la confrontabilità delle misure. Per poter tenere conto della variabilità spaziale del campo intrinseca alle caratteristiche della sorgente, è stato necessario fare una stima della dispersione dei dati di campo nello spazio circostante la zona del massimo; è stata delimitata una superficie di ricerca bidimensionale al fine di togliere un parametro di ulteriore variabilità come è la distanza dalla sorgente. In pratica, ogni Arpa di riferimento (Lazio, Toscana, Friuli VG ) ha effettuato una mappatura molto fitta della superficie in analisi perpendicolare al suolo (griglia di punti ogni 20 cm) in modo tale da acquisire 20 campioni da mediare e riportare alla media dei campioni nel punto che è stato utilizzato per il sistema fisso di monitoraggio durante l'interconfronto.

Per ovviare inoltre alla variabilità temporale della sorgente, anche tali dati sono stati normalizzati alle misure della centralina fissa.

L'incertezza complessiva sul dato di riferimento è stata pertanto calcolata tenendo conto dell'incertezza strumentale propagata e della deviazione standard ricavata (utilizzare 2 $\sigma$ ).

L'analisi statistica dei dati di interconfronto in questo caso è stata effettuata tramite il calcolo dell'indice di compatibilità En (secondo la ISO 13528:2005)

Questa trattazione delle incertezze ha evidenziato alcune criticità, che si riportano di seguito insieme alle motivazioni che hanno portato a mantenere questa tipologia di analisi.

La deviazione standard della serie temporale dei dati contiene al suo interno le seguenti sorgenti di incertezza: ripetibilità della misura (influita dalle scelte dell'operatore e dalla variabilità del misurando non compensata dalla normalizzazione) e un contributo legato all'incertezza strumentale. Tale ultimo contributo è in parte ridondante avendo inserito nel computo complessivo l'incertezza strumentale, ma si è ritenuto che il numero di campioni non fosse sufficiente a far sì che tutto il contributo di incertezza strumentale vi fosse ricompreso.

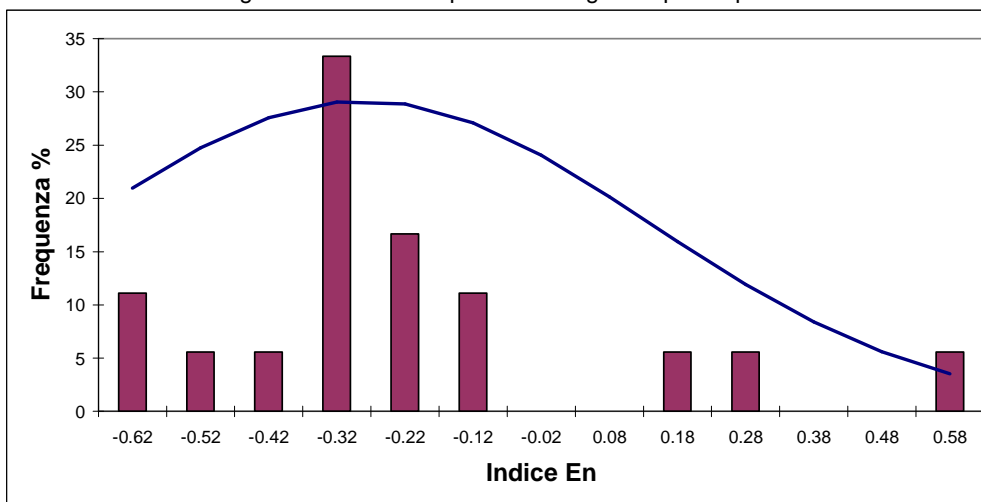
Peraltro, a compensare una possibile parziale sovrastima dell'errore fatta con questo metodo, va la scelta di effettuare la propagazione dell'incertezza strumentale nel rapporto  $R = B_i/B_{fisso}$  come se le due grandezze fossero completamente indipendenti. C'è invece tra di esse una correlazione (che può essere più o meno elevata, come si può vedere nelle conclusioni), che comporterebbe un termine aggiuntivo, funzione del

coefficiente di correlazione, nella propagazione. Si è stimato che tale termine aggiuntivo contribuisce al computo dell'incertezza con un fattore che va dal 20 al 40% del valore di incertezza strumentale relativa, e si è quindi pensato che non ricomprenderlo potesse andare a compensare l'eventuale sovrastima compiuta sommando deviazione standard e incertezza strumentale.

Valutando i risultati ottenuti e richiamando i criteri fissati dalla norma ISO per la compatibilità dei dati ( $|En| \leq 1$ ), si può osservare come tutte le Arpa abbiano realizzato punteggi all'interno di questo intervallo, pur essendoci una maggiore dispersione dei risultati rispetto alla misura nel punto fisso.

Nella figura seguente si riporta la distribuzione degli indici En sul tutti i partecipanti: si possono osservare la dispersione dei dati e l'asimmetria della distribuzione (fig.2).

Figura 2 – distribuzione degli indici En ricavati per tutte le Agenzie partecipanti alle 3 sessioni di misura



Tale dispersione è intrinseca alla complessità della sorgente e alla difficoltà di individuare un protocollo di misura che rendesse i risultati confrontabili (tali problematiche sono approfondite in particolare nel successivo paragrafo e nelle conclusioni). Ciononostante, i risultati delle Agenzie partecipanti si possono considerare ben confrontabili.

La dispersione spaziale dei punti di massimo individuati dalle diverse Agenzie è risultata piuttosto elevata. In particolare, in Lazio i punti sono contenuti in un rettangolo di (34X20)cm, in Friuli in un rettangolo di (21X20)cm, in Toscana, che è la regione con il maggior numero di partecipanti, in un rettangolo di (55X50)cm. Per quest'ultima regione, se si considerano separatamente le due giornate di misura, la dispersione spaziale si riduce un po' (rettangoli di (50X45)cm il primo giorno e di (50X20)cm il secondo giorno), ma rimane elevata. Questa variabilità spaziale era attesa, a causa del metodo di misura utilizzato e delle caratteristiche della sorgente. Infatti la ricerca del massimo veniva effettuata sulla base di una serie di misure spot di campo magnetico (con mappatura a scelta dell'Agenzia), che venivano effettuate in un intervallo di tempo in cui le condizioni di emissione della sorgente potevano variare.

Una ricerca del massimo quasi indipendente dalle condizioni della sorgente può essere effettuata solo tramite una mappatura come quella effettuata dalle Agenzie di riferimento, per cui si è eseguita una post-analisi tramite calcolo del rapporto con il campo misurato dallo strumento nel punto fisso, anche se si è verificato che tale completa indipendenza non può essere garantita per le caratteristiche intrinseche della sorgente (vedere conclusioni per un approfondimento).

Ai fini dell'interconfronto dei valori rilevati, tale fattore è stato tenuto in conto aggiungendo all'incertezza un termine legato alla deviazione standard dei valori di campo nei punti della griglia adiacenti al massimo.

## CONCLUSIONI

L'interconfronto svolto ha dimostrato una buona coerenza tra i risultati riscontrati dalle Agenzie partecipanti. Sono però emerse una serie di problematiche, sia in fase di predisposizione del protocollo e delle procedure di analisi dati, sia in fase di realizzazione delle misure e rielaborazione dei dati stessi, che sono legate alla variabilità spaziale e temporale del campo magnetico, con conseguente difficoltà di normalizzazione delle misure e confrontabilità delle stesse, e che vengono riassunte di seguito.

### VARIABILITA' TEMPORALE

A seguito dell'analisi dei dati di campo e di corrente acquisiti durante l'interconfronto si è verificata una scarsissima correlazione tra i dati di misura del campo di induzione magnetica e i dati di corrente in uscita

dal trasformatore. I motivi di tale scarsa correlazione, ipotizzati dalle Agenzie di riferimento sulla base delle esperienze effettuate durante l'interconfronto, sono: lo sbilanciamento nel tempo delle fasi (legato al fatto che le utenze della cabine analizzate erano per lo più monofase ), testimoniato anche dall'andamento della corrente sul neutro, e la variabilità temporale della distribuzione delle intensità di corrente nelle diverse parti della cabina. La normalizzare dei dati misurati rispetto a quelli rilevati da uno strumento fisso in un dato punto, ha permesso di ovviare solo in parte ai problemi succitati, in quanto l'ipotesi di costanza nel tempo dei rapporti è in ultima analisi legata all'ipotesi di dipendenza lineare dei valori di campo nei diversi punti dai parametri della sorgente.

#### VARIABILITÀ SPAZIALE

La distribuzione spaziale del campo magnetico generato da una cabina dal lato del trasformatore può variare nel tempo, principalmente a causa del fatto che le tre fasi ed il neutro sono significamene distanti tra loro (10-15cm) all'uscita dal trasformatore, ed il carico su ciascuna di esse varia in maniera indipendente dalle altre. Questo aspetto può avere avuto influenza sull'interconfronto delle misure nella postazione fissa (tanto più limitata quanto più breve è l'arco di tempo in cui le rilevazioni sono state effettuate), ma ha soprattutto influito sulla misura nel punto di massimo. Infatti la ricerca del massimo in tempi successivi comporta una dispersione nei risultati, che è stata considerata come intrinseca alla misura e non dovuta alle scelte metodologiche o strumentali delle Agenzie partecipanti e pertanto è stata "corretta" in fase di analisi dei dati aggiungendo all'incertezza sul valore di riferimento un termine di deviazione standard dei dati sulla griglia nei punti intorno al massimo. Questa correzione permette di rendere maggiormente confrontabili i dati rilevati in termini numerici, ma permane una dispersione nello spazio piuttosto accentuata. Relativamente all'aspetto della variabilità spaziale, possiamo dire in conclusione che la ricerca del massimo di campo magnetico in prossimità del trasformatore di una cabina, per dare risultati certi e ripetibili, non può essere effettuata con misure spot in un breve intervallo di tempo, ma dovrebbe essere eseguita con opportune grigliature e normalizzazioni dei dati in un opportuno intervallo di tempo .