

Valutazione indiretta dell'induzione magnetica: verifiche su casi reali della procedura fissata dal D.M. 29/05/08

Nicola Colonna⁽¹⁾, Gaetano Licitra⁽²⁾

⁽¹⁾ ARPAT, Dip. prov. di Pisa, Via Vittorio Veneto 27 - 56123 Pisa, n.colonna@arpat.toscana.it

⁽²⁾ ARPAT, Direzione Tecnica, Via N. Porpora 22 - 50144 Firenze, g.licitra@arpat.toscana.it

RIASSUNTO

Il nuovo D.M. 29/05/08 sulle procedure di misura e di valutazione dell'induzione magnetica generata dagli elettrodotti prevede un metodo per la valutazione indiretta dell'induzione magnetica, molto utile sia per la stima del livello di esposizione, che per la verifica del rispetto dei limiti di legge presso un recettore sensibile. Al fine di verificare la validità dei criteri di selezione dei dati e di definire quanto essi incidano sul risultato finale, tale strumento operativo è stato qui confrontato con un metodo basato sulla regressione lineare semplice tra le grandezze corrente e induzione magnetica misurata, che consente di trattare in maniera più rigorosa l'incertezza associata alla procedura. E' stata in primo luogo eseguita una raccolta dei dati a disposizione delle ARPA; successivamente sono state effettuate elaborazioni e verifiche su vari casi reali. Sono presentati i risultati ottenuti che mettono in evidenza la validità della procedura indicata dal decreto ed anche i suoi limiti e sono fornite valutazioni in merito alla riduzione dell'incertezza associata alla stima dei livelli di campo.

INTRODUZIONE

Il sistema delle Agenzie (ISPRA, ARPA, APPA), coordinate da ISPRA, in questi ultimi anni ha costituito un Gruppo di Lavoro che si occupa, tra l'altro, delle problematiche relative alle misure dell'induzione magnetica prodotta da elettrodotti, in relazione a quanto stabilito dalla L.36/01 e dal DPCM 08/07/03. I lavori ed i documenti prodotti da tale GdL hanno contribuito alla stesura dei testi dei due DM 29/05/08 pubblicati nel luglio 2008. Il DM 29/05/08 "Approvazione delle procedure di misura e valutazione dell'induzione magnetica" introduce al paragrafo 5.2.1 la verifica indiretta dell'induzione magnetica. La procedura, basata sulla legge di Biot-Savart, prevede la selezione dei valori misurati superiori ad una certa soglia e il calcolo dei rapporti tra i valori sincroni di induzione magnetica e corrente. I livelli di induzione magnetica sono misurati all'interno di ambienti abitativi o destinati a permanenza prolungata superiore alle 4 ore. Il metodo è applicabile solo nei casi in cui è presente un solo elettrodotto e vi siano altre sorgenti (interne e/o esterne) non significative, in modo da poter attribuire il livello di induzione magnetica riscontrato ad un'unica sorgente.

La capacità predittiva del metodo consente, attraverso un monitoraggio limitato nel tempo (uno o più giorni di misura), di calcolare il livello atteso di induzione magnetica anche su lunghi periodi di tempo, in cui sarebbe molto oneroso effettuare misure prolungate. Nel sito in esame, una volta definita la dipendenza lineare tra induzione magnetica e corrente, è possibile mediante estrapolazione calcolare sia l'esposizione media annua (o su più anni) usando le correnti medie su lungo periodo, che calcolare la mediana massima dell'induzione magnetica nelle 24 ore in cui si è registrata la massima mediana della corrente. Tale procedura, ove ben applicata, permette quindi di verificare il rispetto del valore di attenzione e/o dell'obiettivo di qualità, previsti dal DPCM 08/07/03, senza ricorrere a monitoraggi in continua molto prolungati nel tempo. Più in generale è possibile calcolare qualsiasi parametro statistico e/o percentile dell'induzione magnetica, partendo dai rispettivi parametri della corrente, misurata agli estremi delle linee.

Ai fini di confermare la validità della procedura descritta sono stati acquisiti un certo numero di monitoraggi in continua già effettuati dalle Agenzie per i quali si disponeva anche della corrente circolante. Sono stati raccolti 75 monitoraggi (di cui 60 di ARPAT) della durata variabile da uno a più giorni, per i quali erano disponibili le coppie sincrone di corrente e di induzione magnetica misurata.

Il campione dei monitoraggi scelto è relativo alle tipologie di linee più diffuse e rappresentativo delle situazioni in cui vi siano abitazioni situate a distanza ridotta dagli elettrodotti, in modo da trattare casi con ampie variazioni di livello di induzione magnetica e tali da raggiungere livelli significativi. In particolare, i vari casi esaminati sono infatti distribuiti in ambito urbano ed extraurbano ed in modo da rappresentare tutte e tre le tipologie di tensione: 18 monitoraggi su linee a 380 kV, 8 su linee a 220 kV e 35 su quelle a 132 kV, mentre i livelli di campo misurati variano da 0.00 a 4.80 μ T.

Per tutti i monitoraggi è stato preliminarmente verificato che vi fosse effettivamente la sincronia tra corrente e induzione magnetica misurata e sono stati scartati i casi in cui ciò non avveniva. Per tutti i monitoraggi validi (61) sono stati poi calcolati i seguenti parametri al fine anche di determinare i coefficienti di correlazione e le incertezze associate: intervallo di variazione dell'induzione magnetica (min e max), la corrente media, la devianza della corrente, il coefficiente angolare **b** e l'intercetta **a** della retta ottenuta con il metodo dei minimi quadrati ed il relativo coefficiente di determinazione R^2 ; il coefficiente angolare della retta ottenuta imponendo il passaggio per l'origine ed il relativo coefficiente di determinazione R^2 ; il valore medio R_m previsto dal DM 29/05/08 (ottenuto come media dei rapporti tra i valori di induzione magnetica e quelli di

corrente corrispondente durante il periodo di misura), la devianza d'errore e l'errore standard S_b del coefficiente angolare b [1].

L'analisi di tutti i dati raccolti e dei parametri calcolati non solo ha consentito di verificare la procedura, ma anche di delimitarne l'applicabilità, mettendo in risalto i limiti e suggerendo le accortezze da seguire per ridurre l'incertezza associata alla previsione dei livelli di induzione magnetica.

PARAMETRI STATISTICI ASSOCIATI ALLA REGRESSIONE LINEARE SEMPLICE

Applicando la legge di Biot-Savart, la dipendenza della induzione magnetica dalla corrente si può esprimere secondo la relazione:

$$B = a + b \cdot I \quad (I)$$

dove B è l'induzione magnetica misurata, a l'intercetta della retta di regressione, b è il suo coefficiente angolare e I la corrente circolante sulla linea elettrica.

L'intervallo di confidenza del parametro b è definito dalla relazione (II) seguente, dove S_b è l'errore standard sul coefficiente angolare b (vedi formula III), che dipende dalla devianza della variabile indipendente X (nel nostro caso la corrente) e dalla varianza d'errore (o devianza dovuta alla regressione); t è il valore critico della distribuzione t di Student per un test unilaterale con $n-2$ gradi di libertà.

$$\beta = b \pm t_{(n-2; \alpha/2)} \cdot S_b \quad (II) \quad S_b = \sqrt{\frac{\sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{(n-2) \cdot \sum (X_i - \bar{X})^2}} \quad (III)$$

Poiché la linearità del fenomeno è garantita dalle leggi fisiche, anche fuori dell'intervallo di osservazione (periodo di monitoraggio), è possibile estrapolare un valore \hat{Y}_k (nel nostro caso l'induzione magnetica) a partire da un X_k (nel nostro caso la corrente) che si trova fuori dell'intervallo di variabilità dei campioni disponibili. Come nel caso specifico della massima mediana della corrente, che in molti casi si trova al di fuori dei valori di corrente osservati durante il monitoraggio. La formula che consente di calcolare tale intervallo di confidenza per \hat{Y}_k è la seguente:

$$\hat{Y}_k \pm t_{(n-2, \alpha/2)} \cdot S_b \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(X_k - \bar{X})^2}{\sum (X_i - \bar{X})^2}} \quad (IV)$$

LA REGRESSIONE LINEARE CONSIDERANDO GLI ERRORI SULLE DUE VARIABILI

Nel presente lavoro non si è tenuto conto degli errori con cui sono misurate le due variabili: quella indipendente X (nel nostro caso la corrente) e quella dipendente Y (nel nostro caso l'induzione magnetica). La trattazione esatta della regressione lineare tra campo misurato e corrente dovrebbe essere effettuata considerando le due variabili con i rispettivi errori, ovvero le coppie $(X_i \pm \sigma_{X_i}; Y_i \pm \sigma_{Y_i})$.

L'ipotesi più comune nell'analisi statistica è quella di considerare trascurabile il contributo, apportato dall'errore della variabile indipendente, alla varianza della variabile dipendente [2]. Per poter effettuare la *fit* in tale caso occorre che, per il singolo sensore utilizzato, sia stato definito accuratamente il *budget* dell'incertezza di misura. Una volta associata l'incertezza ad ogni valore di induzione magnetica misurata è possibile ricavare la regressione lineare e gli errori su suoi parametri a e b mediante un adeguato software per il trattamento dati.

Tuttavia, con le poche informazioni disponibili sull'accuratezza della misura della corrente agli estremi delle linee AT, non si può considerare irrilevante l'errore sulla misura della corrente nell'applicazione della procedura. Effettuare la *fit* in questo secondo caso diventa molto più complicato; infatti, il metodo dei minimi quadrati applicato alle coppie $(X_i \pm \sigma_{X_i}; Y_i \pm \sigma_{Y_i})$ diventa un problema di minimo condizionato, che si risolve applicando il metodo dei moltiplicatori di Lagrange. Si ottiene un sistema di equazioni alle derivate parziali che è risolvibile solo mediante metodi numerici approssimati [3]. Per tale scopo è necessario disporre di un software per l'analisi dei dati di livello elevato, corredato da opportune *routines* scritte per il caso specifico.

Visto che, come vedremo nei casi esaminati, l'errore standard sul coefficiente angolare b è trascurabile e, tenuto conto che gli errori percentuali diminuiscono sui valori elevati di corrente e di induzione magnetica, ci si può attendere che con la trattazione esatta, che tiene conto degli errori sia sulla corrente che sul campo misurato, si ottengano stime affette da un errore contenuto entro il 20%, come richiesto dal DM 29/05/08.

RISULTATI OTTENUTI

I valori di induzione magnetica misurati in prossimità delle linee a 380 kV e delle linee a 220 kV sono associati alle correnti circolanti fornite come dato istantaneo al quarto d'ora, come avveniva prima del 2007. Attualmente invece sono disponibili per tali linee sia il dato medio nel quarto d'ora (VALMED), che quello

istantaneo (VALIST). Dalle analisi effettuate si desume che è preferibile utilizzare, ove disponibili, i dati medi che, a parità di devianza della corrente, rendono minore la devianza d'errore e migliorano, quindi, la capacità predittiva della procedura.

Le correnti circolanti per le linee a 132 kV sono invece fornite solo come valore medio nel quarto d'ora.

Sono riportate in fondo le tabelle (tab. 2, tab. 3 e tab. 4a e 4b) con i risultati dei parametri statistici, prima indicati, calcolati per ciascun monitoraggio.

Per tutti i monitoraggi studiati è stata fatta la scelta, statisticamente corretta, di non imporre a priori il passaggio per l'origine della retta di regressione, ma di ricavare la retta e la sua intercetta e di valutare successivamente il *range* di variabilità delle intercette ottenute ed infine di esaminare come esse sono legate agli altri parametri statistici. Per tutti i casi analizzati si è riscontrato che imponendo alla retta il passaggio per l'origine si ottiene un diverso coefficiente angolare ed una riduzione del coefficiente di determinazione R^2 . Nei casi in cui R^2 è prossimo a 0.99 non vi è più differenza tra il valore di b ottenuto con intercetta nulla e quello ottenuto con intercetta diversa da zero.

Si è riscontrato, inoltre, che per circa due terzi dei casi esaminati l'intercetta della retta di regressione è compresa tra $0.00 \div 0.03 \mu\text{T}$ e nei monitoraggi in cui l'intercetta assume valori compresi tra $0.04 \div 0.14 \mu\text{T}$ questi hanno la devianza della corrente più bassa ed i valori di induzione magnetica misurata maggiori di $1.00 \mu\text{T}$.

Analizzando il *range* di variabilità del coefficiente di determinazione R^2 si desume in maniera evidente che, nei casi in cui la devianza della corrente è molto elevata, R^2 si avvicina molto a 1 e assume tipicamente valori compresi tra 0.970 e 0.997. Per tali valori elevati di R^2 , inoltre, si è verificato che R_m dà una buona stima del coefficiente angolare, con variazioni al più di una unità sull'ultima cifra decimale rispetto al valore di b ottenuto con la regressione. Invece, nei casi in cui R^2 è minore, R_m fornisce una stima meno accurata del valore di b , con possibili variazioni non trascurabili rispetto al valore ottenuto con la regressione, in particolar modo quando la devianza della corrente è molto contenuta ed i valori di campo superano $1.00 \mu\text{T}$ (vedi tabelle in fondo). Dall'analisi dei dati si ottiene, inoltre, che, per le linee a 380 kV esaminate, la devianza della corrente varia nell'intervallo $1 \div 20 \cdot 10^6$ e per le linee a 132 kV esaminate varia nell'intervallo $10^4 \div 9 \cdot 10^5$ cioè da uno a due ordini di grandezza inferiori. Come si evince dalle formule precedenti, la presenza della devianza della corrente al denominatore fa sì che, all'aumentare di questa, R^2 si avvicina a 1 e diminuiscono significativamente gli errori sul coefficiente angolare e sul valore calcolato mediante estrapolazione. La devianza della corrente assume, quindi, un'importanza fondamentale soprattutto nei casi in cui è necessario calcolare la mediana massima dell'induzione magnetica da confrontare con il valore di attenzione. La mediana massima della corrente corrisponde in linea di principio, al più, al carico massimo previsto per la linea in esame. Tale caso si verifica, generalmente in presenza della portata in corrente in servizio normale (vedi Norma CEI 11-60). In maniera più realistica e tenendo conto della gestione della specifica linea, può essere individuata verificando le correnti effettivamente circolate negli anni precedenti. In entrambi i casi tale valore di corrente risulterà assai probabilmente molto lontano da quello medio registrato durante il monitoraggio (vedi Formula IV). Ad esempio, ciò accade nel caso di misure vicino ad una linea a 380 kV, la cui corrente media è stata pari a 300 A e occorre effettuare l'estrapolazione utilizzando valori di corrente di gran lunga superiori (2000 A o 3000 A), oppure, nel caso di misure vicino ad una linea a 132 kV, la cui corrente media è stata ad esempio pari a 200 A, in cui occorre far riferimento a correnti pari a 870 A. A tale proposito nella tabella seguente (tab. 1) sono riportati gli ordini di grandezza dei parametri presenti nella formula IV, che consentono, nei casi esaminati, di stimare l'ampiezza dell'intervallo di confidenza nel caso di estrapolazione con una corrente molto elevata. È stato considerato un numero di coppie corrente-induzione magnetica $n \geq 100$ e per t sono stati utilizzati valori compresi tra 1.660 (con una probabilità del 95%) a 2.626 (con una probabilità del 99.5%) [1].

Tabella 1 – Stima dell'intervallo di confidenza di \hat{B}_{Max}

TIPOLOGIA DI ELETTRODOTTI	PARAMETRI STATISTICI			RISULTATO
	$\sum (I_i - \bar{I})^2$ <i>Devianza della corrente</i>	$\sum (B_i - \hat{B}_i)^2$ <i>Devianza d'errore</i>	$\sum (I_{Max} - \bar{I})^2$ <i>Distanza al quadrato tra I_{Max} e I_{media}</i>	<i>Stima dell'ampiezza dell'intervallo di confidenza di \hat{B}_{Max}</i>
Linee a 380 kV	$\sim 10^6$	$\sim 1 \cdot 10^{-4} \div 70 \cdot 10^{-4}$	$\sim 1 \cdot 10^6 \div 7 \cdot 10^6$	$\sim 8 \cdot 10^{-5}$
Linee a 220 kV	$\sim 10^5$	$\sim 1 \cdot 10^{-4} \div 70 \cdot 10^{-4}$	$\sim 1 \cdot 10^6 \div 2 \cdot 10^6$	$\sim 15 \cdot 10^{-5}$
Linee a 132 kV	$\sim 10^4 \div 10^5$	$\sim 1 \cdot 10^{-4} \div 70 \cdot 10^{-4}$	$\sim 5 \cdot 10^5$	$\sim 1.3 \cdot 10^{-3}$

Stima dell'intervallo di confidenza del valore di induzione magnetica estrapolato con la corrente massima circolante, per i casi esaminati, a partire dai valori dei relativi parametri statistici

Come ulteriore verifica della validità della procedura, avendo ARPAT negli anni eseguito numerosi monitoraggi prolungati (della durata di settimane, mesi e anni) su varie tipologie di linee ad alta tensione, è stato possibile scegliere a campione coppie corrente-induzione magnetica relative alla stessa linea in condizione di carico fortemente diverso. In particolare, sono stati confrontati con successo le stime ottenute a partire dai risultati delle misure in due giorni del periodo estivo e quelle relative a due giorni nel periodo invernale, in cui l'intervallo delle correnti circolanti era sensibilmente diverso dal precedente. I valori del coefficiente angolare b e dell'intercetta a , ricavati a partire dai risultati relativi ai due periodi, sono molto prossimi entro il $3 \div 5\%$.

Altri test con esito positivo sono stati eseguiti confrontando i livelli previsti, a partire dai valori di corrente registrati durante le misure eseguite nel periodo invernale, con i livelli misurati nel periodo estivo a fronte di distinti intervalli di corrente.

AFFINAMENTO DELLA PROCEDURA PER IL MIGLIORAMENTO DELL'ACCURATEZZA DELLA STIMA

Vista la rilevanza che ha la devianza della corrente, al fine di far aumentare tale quantità e, di conseguenza, far migliorare l'accuratezza della procedura, è consigliabile effettuare monitoraggi prolungati che coprano sia giorni lavorativi che festivi, considerato che le variazioni significative di corrente si riscontrano nel passaggio tra giorno e notte e tra giorni lavorativi e festivi, come ad esempio dalla mattina del venerdì alla mattina del martedì.

Altri accorgimenti possono essere adottati per migliorare l'accuratezza della stima dell'induzione magnetica che da un lato consentono di ottimizzare i periodi di campionamento e dall'altro di eliminare possibili *bias* delle misure che porterebbero ad errori nella stima dell'induzione magnetica.

FRONTE DI SALITA E/O DI DISCESA DELLA CORRENTE

Se analizzando la *time history* della corrente durante il monitoraggio si riscontra che è possibile selezionare un periodo limitato ad alcune ore in cui la corrente passa, in modo monotono crescente, da valori modesti a valori elevati (fronte di salita), può essere utile effettuare la regressione lineare in questo periodo ristretto e confrontarne i risultati con quelli ricavati con la procedura prima descritta. Questa è l'unica condizione in cui con poche coppie corrente-induzione magnetica (da 15 a 45) si può ottenere una retta di regressione con R^2 molto vicino a 1. Ciò vale allo stesso modo per il fronte di discesa della corrente. Tali situazioni si verificano tipicamente sulle linee di trasmissione dell'energia collegate direttamente alle centrali di produzione, che gradualmente aumentano o diminuiscono la fornitura di energia. Sulle generiche linee di trasmissione, in alcuni casi, si possono riscontrare andamenti della corrente meno regolari con picchi ripetuti durante il fronte di salita, per i quali è possibile applicare la procedura appena descritta, ma con risultati statisticamente meno accurati.

L'ANALISI DEI RESIDUI

Una volta ottenuta la relazione lineare tra corrente e induzione magnetica è possibile calcolare il residuo, ovvero la differenza tra il valore misurato ed il valore calcolato con la retta ($Y_i - \hat{Y}_i$). L'analisi dell'andamento dei residui rispetto al tempo, oppure dell'andamento dei residui rispetto al valore calcolato, suggerisce delle importanti informazioni aggiuntive sulla descrizione del fenomeno in esame. Nei casi in cui non vi siano eventi esterni che determinino variazioni nella risposta strumentale (alterazione del fondo dovuta a sorgente interna e/o esterna, spostamento della posizione del sensore, variazioni significative di temperatura, ecc.) e ci si trovi nelle condizioni migliori rispetto alla devianza della corrente, quindi con R^2 superiore a 0.97, tali residui sono distribuiti uniformemente intorno allo zero con un intervallo di ampiezza media pari a circa $0.02 \div 0.03 \mu\text{T}$, per valori di induzione magnetica misurata inferiori a $1.00 \mu\text{T}$. Per valori misurati superiori a $1.00 \mu\text{T}$ tale intervallo assume ampiezza media pari a circa $0.04 \div 0.07 \mu\text{T}$. Tale ampiezza ridotta e la distribuzione casuale attorno allo zero dei residui confermano che la procedura è stata applicata correttamente e che non vi è un livello di fondo significativo che va ad inficiare il risultato della misura effettuata.

Tra i vari casi analizzati si sono riscontrati esempi in cui lo studio dei residui ha permesso di individuare sia la presenza di una sorgente interna (attiva in modo discontinuo), che l'alterazione della misura dovuta presumibilmente allo spostamento della posizione del sensore. Nelle Figure 1a e 1b è mostrato ad esempio come l'analisi dei residui mostri un incremento degli stessi nell'ultimo giorno di misura, non correlato alla variazione di corrente sulla linea. È pertanto consigliabile effettuare sempre lo studio dei residui (nel tempo e rispetto al livello misurato, o predetto) per escludere in modo fondato la presenza di tali fattori.

Infine, è da notare che i residui riscontrati nei casi esaminati sono in media inferiori rispetto all'errore percentuale del 5%, a conferma dell'assenza di eventi esterni e della bontà della risposta dei sensori utilizzati, che secondo il DPCM 08/07/03 e la Norma CEI 211-6 devono garantire un errore percentuale del 10% (con incertezza estesa e fattore di copertura $k=2$).

Figura 1a – esempio, per un monitoraggio, di regressione lineare

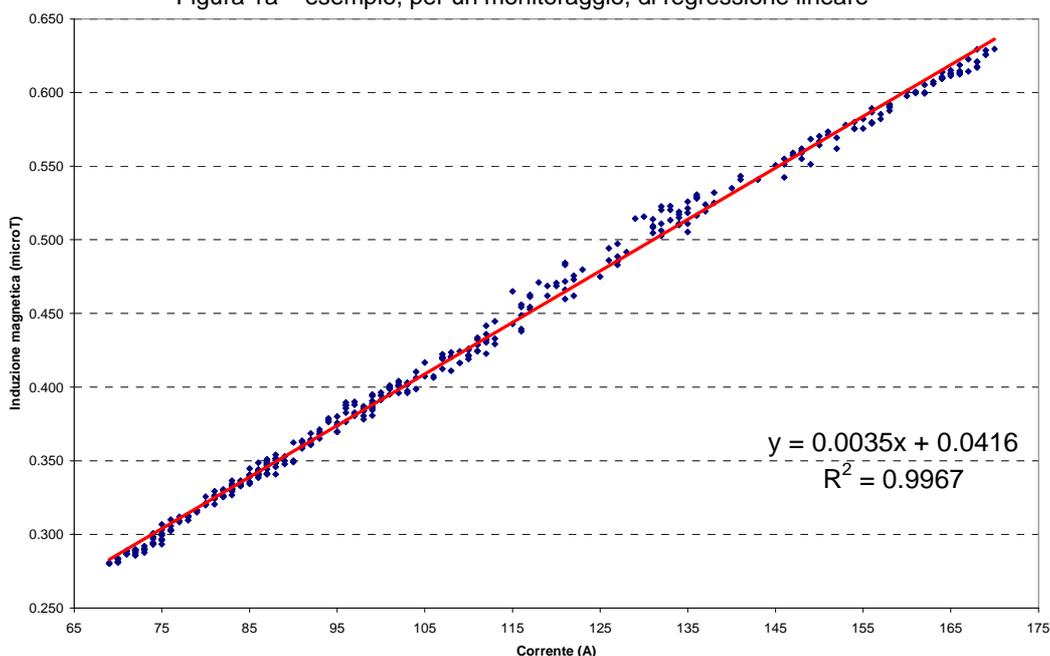
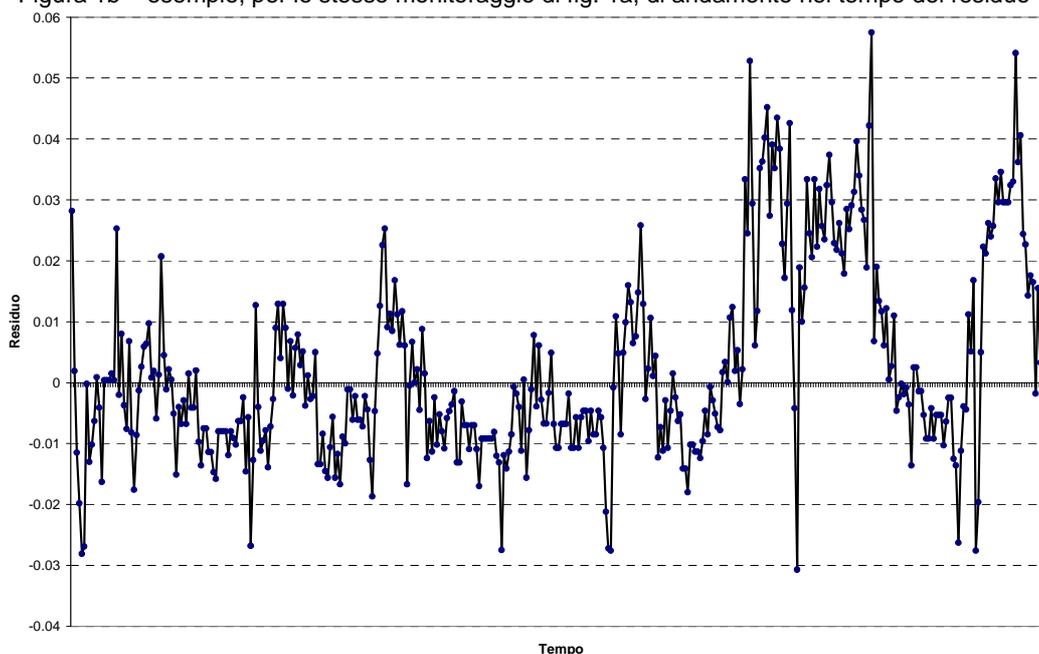


Figura 1b – esempio, per lo stesso monitoraggio di fig. 1a, di andamento nel tempo del residuo



TRATTAMENTO DEI CASI CON VALORI DI CORRENTE RIPETUTI

Si è riscontrato che è frequente trovare coppie corrente-campo con lo stesso valore di corrente a cui sono associati diversi valori di induzione magnetica misurata. Tipicamente ciò avviene per molte linee di distribuzione dell'energia durante il periodo notturno. Nei grafici a dispersione relativi alle rette di regressione, tali coppie sono riportate con una disposizione verticale dei valori di campo misurati in corrispondenza del singolo valore di corrente. Si è provato per diversi monitoraggi a sostituire a tutte le coppie con lo stesso valore di corrente una sola coppia con la stessa corrente e la media dei valori di campo misurati $[I_k, \text{media}(B_{ki})]$. Si è ottenuto che in alcuni casi questa operazione fa aumentare il coefficiente di determinazione R^2 della retta di regressione, ma vi è la controindicazione della drastica riduzione del numero delle coppie adoperate per la regressione stessa. Laddove la devianza della corrente non è molto elevata, ridurre il numero di coppie n non apporta miglioramenti rispetto alla procedura normale. È preferibile effettuare l'operazione di sostituzione delle coppie con corrente ripetuta con la sola coppia contenente la media solo nei casi di misure prolungate, in modo da avere ugualmente un numero di coppie maggiore di 100.

LIMITAZIONI ALL'UTILIZZO DELLA PROCEDURA

La procedura ovviamente non è applicabile per le linee che sono caratterizzate da un flusso di corrente pressoché costante, o con piccole variazioni di carico (devianza della corrente molto contenuta).

Studiando i monitoraggi in cui si ottengono coefficienti di determinazione inferiori a 0.90 e per i quali la procedura non è applicabile, si sono evidenziate tre cause ricorrenti legate all'andamento del flusso di energia sulla linea. La prima è l'inversione del flusso dell'energia (da $A \rightarrow B$, si passa a $A \leftarrow B$): nella fase di passaggio dal flusso in una direzione a quello nella direzione opposta è ricorrente che i valori di induzione magnetica misurata non siano correlati alla corrente. Se sono disponibili coppie corrente-induzione magnetica in numero sufficiente, è preferibile escludere le coppie registrate durante tale fase di transizione e ricavare la retta di regressione solo con quelle rimanenti. La seconda causa è la presenza di una elevata potenza reattiva: ciò avviene per periodi di tempo limitati ed in corrispondenza di alcune operazioni sull'assetto di rete. Anche in questo caso i valori di campo non sono correlati alla corrente e allo stesso modo è preferibile escludere le coppie rilevate in tale circostanza. La terza causa è la presenza di pochi valori di corrente che si ripetono molto di frequente (vedi paragrafo precedente).

INCIDENZA DELLA TEMPERATURA

Dall'analisi dei vari casi esaminati si sono riscontrate alcune evidenze circa l'incidenza della temperatura sui risultati ottenuti con la regressione lineare. Alcuni monitoraggi con i valori di S_b maggiori sono stati effettuati in periodi molto caldi, oppure in periodi freddi con il sensore posizionato in ambienti non riscaldati (temperatura inferiore a 15 C°). Le ipotesi in tal senso possono essere le seguenti: la temperatura superiore a 30 C° può incidere sull'accuratezza della misura di corrente; temperature molto inferiori a 20 C° e superiori a 30 C° possono incidere sulla risposta del sensore con cui si misura l'induzione magnetica. Visti le evidenze emerse, è opportuno approfondire l'incidenza della temperatura sull'accuratezza di misura delle due variabili.

CONCLUSIONI

Grande attenzione è stata posta dal legislatore al tema dell'esposizione ai campi magnetici a bassa frequenza a seguito dei ben noti studi in letteratura, che hanno ipotizzato possibili rischi per la salute in particolare nell'infanzia. A causa della morfologia del nostro paese, ampia è la diffusione sul territorio italiano di linee ad alta tensione che lo attraversano per migliaia di chilometri, impattando il territorio fortemente urbanizzato. Vi è quindi la necessità di poter disporre di metodiche standardizzate, facilmente utilizzabili, affidabili ed in grado di contenere per quanto possibile l'incertezza associata alla stima dei livelli di induzione magnetica.

Il lavoro si pone lo scopo di confermare la validità della procedura stabilita dal DM 29/05/08, esaminando un campione dei monitoraggi che copre un ampio spettro di casi tra quelli comunemente osservabili.

Le analisi dei dati e delle misure raccolti in ambito agenziale hanno consentito di provare che la procedura indicata dal decreto fornisce dati prossimi a quelli ottenibili attraverso la applicazione di una più rigorosa procedura di regressione lineare, che comunque anch'essa va utilizzata con attenzione.

Il lavoro ha consentito nel contempo di esaminare le criticità riscontrabili nelle misure e i loro effetti sulla stima dell'induzione magnetica, oltre che i limiti della procedura indicata dal decreto anche in termini di applicabilità rispetto alla generalità dei casi.

Sono stati presentati quindi alcuni affinamenti ed analisi ulteriori dei dati, che costituiscono uno strumento utile per l'operatore al fine di evidenziare eventuali *bias*, che portano ad una minore accuratezza della stima dell'induzione magnetica per estrapolazione.

Potrebbero essere interessanti ulteriori approfondimenti sulla dipendenza del coefficiente angolare della retta di regressione sia dal tipo di sensore utilizzato per le misure di induzione magnetica, che dalla risposta in temperatura del singolo sensore impiegato.

Un arricchimento dell'entità del campione utilizzato potrebbe consentire, inoltre, ulteriori approfondimenti nel caso di livelli di fondo più marcati, determinati da particolari condizioni di esposizione della popolazione in condomini con sorgenti interne non trascurabili e diverse dall'elettrodoto oggetto dell'indagine.

RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano per la cortese collaborazione i seguenti colleghi delle ARPA/APPA che hanno inviato i dati dei propri monitoraggi: Massimo Oggianu dell'ARPA Liguria; Silvia Violanti dell'ARPA Emilia Romagna; Luca Verdi dell'ARPA Bolzano; Daniela De Bartolo dell'ARPA Lombardia; Valeria Bottura dell'ARPA Valle d'Aosta; Lucia Tramontin dell'ARPA Friuli Venezia Giulia.

Bibliografia

[1] Soliani Lamberto, *Statistica Applicata*, 2008, UNI.NOVA

[2] Ph.R. Bevington, D. K. Robinson, *Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences*, 2003, McGraw-Hill

[3] Martinelli L., Baldini L. *Misure ed analisi di dati. Introduzione al Laboratorio di Fisica*, 2008, Edizioni ETS

Tabella 2 – Parametri statistici calcolati per i monitoraggi sulle linee a 380 kV

Prog.	Sensore	Induzione magnetica (μT)	Num. di coppie	Corrente media	Devianza corrente (10^6)	R_m (10^{-3})	b_1 (10^{-3}) con $a=0$	R_1^2 con $a=0$	a	b (10^{-3})	R^2	Devianza d'errore (10^{-4})	S_b (10^{-5})
1	Emdex Lite	0.03 ÷ 1.20	381	386	15.4	1.5	1.4	0.9904	0.0025	1.4	0.9904	4.2	0.5
2	Emdex II	0.01 ÷ 0.89	289	297	17.3	0.9	1.0	0.9835	-0.0047	1.0	0.9836	8.0	0.7
3	Emdex II	0.08 ÷ 1.00	185	553	6.4	1.0	1.0	0.9902	-0.0092	1.0	0.9905	5.8	1.0
4	Emdex Lite	0.02 ÷ 1.17	197	282	4.7	1.8	1.8	0.9965	-0.0028	1.8	0.9965	4.9	1.0
5	Emdex II	0.00 ÷ 1.14	203	359	9.3	1.4	1.4	0.9867	-0.0027	1.4	0.9867	10.7	1.1
6	Emdex Lite	0.02 ÷ 1.33	192	378	8.4	1.7	1.7	0.9871	-0.0021	1.7	0.9871	16.5	1.4
7	Emdex Lite	0.08 ÷ 0.69	174	281	1.4	1.5	1.5	0.9829	0.0136	1.5	0.9839	3.1	1.5
8	Emdex Lite	0.01 ÷ 1.86	183	353	8.9	2.5	2.4	0.9915	0.0068	2.4	0.9916	24.1	1.6
9	Emdex II	0.01 ÷ 1.94	195	360	9.1	2.5	2.4	0.9914	-0.003	2.4	0.9914	24.8	1.6
10	Emdex Lite	0.01 ÷ 1.68	203	362	9.3	2.1	2.0	0.9847	0.0015	2.0	0.9847	35.6	2.0
11	Emdex II	0.09 ÷ 1.04	39	531	3.0	0.9	0.8	0.968	0.0362	0.8	0.9738	14.4	2.2
12	Emdex Lite	0.11 ÷ 1.16	41	533	3.0	1.0	0.9	0.9586	0.0598	0.9	0.9719	23.6	2.8
13	Emdex II	0.01 ÷ 3.26	192	395	8.0	4.1	4.0	0.9887	-0.0266	4.1	0.989	79.1	3.1
14	Emdex Lite	0.16 ÷ 0.51	48	269	0.2	1.1	1.2	0.9688	-0.02	1.2	0.9722	2.2	3.4
15	Emdex II	0.06 ÷ 2.38	187	275	4.5	3.7	3.7	0.9803	-0.008	3.7	0.9804	66.2	3.8
16	Emdex II	0.04 ÷ 4.81	108	479	3.5	3.0	3.0	0.9565	0.0274	3.0	0.9568	136.4	6.2
17	Emdex II	0.54 ÷ 1.35	180	656	6.8	1.4	1.4	0.9949	0.0322	1.4	0.9961	9.9	1.2
18	Emdex II	0.25 ÷ 1.52	193	708	6.0	1.6	1.6	0.9964	0.0094	1.5	0.9965	10.8	1.3

Tabella 3 – Parametri statistici calcolati per i monitoraggi sulle linee a 220 kV

Prog.	Sensore	Induzione magnetica (μT)	Num. di coppie	Corrente media	Devianza corrente (10^5)	R_m (10^{-3})	b_1 (10^{-3}) con $a=0$	R_1^2 con $a=0$	a	b (10^{-3})	R^2	Devianza d'errore (10^{-4})	S_b (10^{-5})
19	Emdex II	0.42 ÷ 1.06	48	102	0.3	6.9	6.9	0.9894	0.0295	6.6	0.9912	2.7	9.3
20	Emdex Lite	0.30 ÷ 0.90	388	88	2.2	6.8	6.9	0.9823	0.0382	6.5	0.9865	1.5	2.6
21	Emdex II	0.34 ÷ 0.73	196	90	0.9	5.9	5.8	0.9911	0.0292	5.5	0.9943	0.9	3.2
22	Emdex Lite	0.26 ÷ 0.67	48	103	0.3	4.4	4.4	0.9828	0.00328	4.1	0.9886	7.9	15.9
23	Emdex Lite	0.68 ÷ 1.49	196	90	0.9	11.8	11.8	0.9934	0.0158	11.6	0.9936	3.5	6.3
24	Emdex II	0.33 ÷ 0.71	143	98	0.8	5.5	5.5	0.9954	0.0072	5.5	0.9956	0.9	3.5
25	Emdex II	0.11 ÷ 0.37	44	138	1.1	1.6	1.5	0.9458	0.00308	1.3	0.9708	1.4	3.5
26	Emdex Lite	0.12 ÷ 1.03	103	178	4.9	2.1	2.1	0.9965	-0.0143	2.1	0.9977	0.6	1.1

Tabella 4a – Parametri statistici calcolati per i monitoraggi sulle linee a 132 kV

Prog.	Sensore	Induzione magnetica (μT)	Num. di coppie	Corrente media	Devianza corrente (10^5)	R_m (10^{-3})	b_1 (10^{-3}) con $a=0$	R_1^2 con $a=0$	a	b (10^{-3})	R^2	Devianza d'errore (10^{-4})	S_b (10^{-5})
27	Emdex Lite	0.15 ÷ 0.55	204	229	8.3	1.7	1.7	0.9756	0.0125	1.6	0.9766	2.4	1.7
28	Emdex II	0.24 ÷ 1.07	382	174	8.8	3.6	3.6	0.9779	0.0037	3.6	0.978	7.3	2.9
29	Emdex Lite	0.38 ÷ 0.94	175	218	5.3	3.0	3.0	0.984	-0.01	3.1	0.9826	5.4	3.2
30	Emdex Lite	0.08 ÷ 0.33	383	174	8.8	1.1	1.1	0.9681	0.0038	1.1	0.9685	1.1	1.1
31	Emdex II	0.36 ÷ 1.16	189	155	3.9	4.1	4.1	0.9772	-0.0598	4.5	0.984	6.6	4.1
32	Emdex II	0.12 ÷ 0.57	180	69	0.9	6.6	5.2	0.4799	0.1372	3.4	0.6826	27.0	17.1
33	Emdex II	0.04 ÷ 0.70	155	68	0.8	6.2	6.0	0.9009	0.0486	5.3	0.9158	13.7	13.1
34	Emdex II	0.03 ÷ 0.70	235	182	8.9	2.1	2.1	0.9893	-0.0131	2.2	0.9903	1.4	1.2
35	Emdex II	0.14 ÷ 0.27	191	306	4.4	0.7	0.7	0.9672	0.0006	0.7	0.9672	1.1	1.6
36	Emdex II	0.08 ÷ 0.31	191	52	0.2	3.8	3.8	0.752	0.0283	3.2	0.7726	2.9	12.4
37	Emdex II	0.04 ÷ 0.21	184	60	0.5	2.1	2.1	0.8764	0.0114	1.9	0.8846	1.2	5.0
38	Emdex Lite	0.23 ÷ 0.86	193	154	6.4	3.4	3.4	0.9858	0.01	3.3	0.9862	4.8	2.7
39	Emdex Lite	0.01 ÷ 0.09	194	47	0.4	1.1	1.1	0.8428	-0.0071	1.2	0.8545	0.4	3.3
40	Emdex II	0.66 ÷ 1.02	180	280	1.5	3.0	3.1	0.9447	-0.1116	3.4	0.9573	5.8	6.3
41	Emdex Lite	0.03 ÷ 0.84	235	184	9.5	2.4	2.4	0.9854	0.0193	2.3	0.9872	2.2	1.5
42	Emdex Lite	0.81 ÷ 1.24	201	224	4.2	5.5	5.6	0.9818	-0.06	5.8	0.9838	10.2	4.9
43	Emdex II	1.04 ÷ 1.96	380	168	1.2	7.7	7.7	0.8988	0.0501	7.4	0.9002	7.6	7.9
44	Emdex Lite	1.02 ÷ 2.02	381	169	1.4	7.8	7.8	0.9097	-0.018	7.9	0.9099	7.9	7.6

Tabella 4b – Parametri statistici calcolati per i monitoraggi sulle linee a 132 kV

Prog.	Sensore	Induzione magnetica (μT)	Num. di coppie	Corrente media	Devianza corrente (10^5)	R_m (10^{-3})	b_1 (10^{-3}) con $a=0$	R_1^2 con $a=0$	a	b (10^{-3})	R^2	Devianza d'errore (10^{-4})	S_b (10^{-5})
45	Emdex Lite	0.24 \div 0.62	47	76	0.1	5.2	5.2	0.8443	0.0698	4.3	0.8835	3.3	23.3
46	Emdex II	0.75 \div 2.16	380	144	5.5	10.5	10.5	0.9657	0.0511	10.1	0.9668	26.0	6.9
47	Emdex Lite	0.35 \div 0.89	248	139	3.0	4.4	4.4	0.9601	0.00327	4.2	0.9657	10.6	6.0
48	Emdex II	1.68 \div 3.26	102	233	2.0	10.7	10.8	0.9719	-0.1055	11.2	0.9735	70.4	18.6
49	Emdex II	0.77 \div 2.14	164	138	2.7	10.1	10.2	0.9747	-0.0569	10.6	0.976	46.7	13.0
50	Emdex II	0.06 \div 0.32	191	98	2.8	1.8	1.8	0.9633	-0.0134	1.9	0.9675	1.4	2.3
51	Emdex Lite	0.03 \div 0.29	186	51	1.9	<u>2.5</u>	1.8	0.6035	0.0312	1.4	0.6689	10.9	7.5
52	Emdex II	0.04 \div 0.24	180	73	1.2	1.9	1.9	0.9135	-0.0021	1.9	0.9136	2.0	7.6
53	Emdex II	0.25 \div 0.41	285	197	7.9	1.5	1.6	0.9901	-0.0088	1.6	0.9908	0.5	0.8
54	Emdex II	0.28 \div 0.66	394	109	3.4	3.9	3.9	0.9858	0.0416	3.5	0.9967	0.2	0.8
55	EHP50A	0.11 \div 1.32	96	54	3.6	<u>17.3</u>	7.8	0.9808	0.0424	7.5	0.9858	20.5	7.6
56	HP051	0.14 \div 2.09	278	40	1.8	<u>22.5</u>	20.3	0.9625	0.1122	18.4	0.9787	34.3	13.7
57	HP051	0.03 \div 0.47	185	126	1.7	2.4	2.4	0.8907	-0.0329	2.6	0.899	7.5	6.6
58	HP050	0.61 \div 1.03	96	187	1.5	5.2	5.2	0.9954	0.0051	2.3	0.9954	2.7	4.2
59	HP050	0.03 \div 0.42	96	85	4.3	<u>4.3</u>	1.7	0.938	0.0327	1.5	0.9796	2.2	2.3
60	HP050	0.03 \div 0.42	94	82	0.6	<u>4.7</u>	4.4	0.7643	0.1114	3.2	0.9159	5.9	10.0
61	Emdex II	1.18 \div 3.04	376	139	1.8	13.0	13.0	0.9936	0.0131	12.9	0.9937	3.2	4.2