

MISURA E VALUTAZIONE DELL'ESPOSIZIONE DELLA POPOLAZIONE AI CAMPI MAGNETICI GENERATI DA ELETTRODOTTI AEREI A DOPPIA TERNA

M. LANDINI, G. MAZZANTI

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA ELETTRICA – UNIVERSITÀ DI BOLOGNA, VIALE RISORGIMENTO 2, 40136 BOLOGNA
e-mail: marco.landini@mail.ing.unibo.it, giovanni.mazzanti@mail.ing.unibo.it

ABSTRACT La valutazione dell'esposizione ai campi magnetici generati da elettrodotti MT in doppia terna a partire da misure di campo effettuate in loco viene qui condotta estrapolando i valori misurati ai valori di corrente di riferimento secondo una metodologia di calcolo innovativa semplice e pratica. La metodologia è di validità generale per linee a doppia terna non ottimizzate, e potenzialmente applicabile anche a linee di questo tipo in AT e AAT.

Premessa

Questo lavoro tratta la valutazione del livello di esposizione della popolazione ai campi magnetici generati da elettrodotti MT in doppia terna a partire da misure di campo effettuate in loco. In base alla conoscenza delle correnti istantanee durante il periodo di misura, i valori misurati sono estrapolati ai valori di corrente di riferimento – secondo quanto prescritto dalla normativa vigente – seguendo una metodologia di calcolo innovativa, sviluppata specificamente per questo tipo di elettrodotti, che si vale della tecnica della regressione multilineare. La metodologia è di validità generale per linee a doppia terna non ottimizzate, quindi è suscettibile di essere applicata anche a linee di questo tipo per distribuzione primaria in AT e trasmissione in AAT. Si noti che nel particolare caso applicativo esaminato la normativa nazionale e regionale (regione Emilia-Romagna) sono in disaccordo tra loro sia per quanto riguarda i limiti di esposizione, sia per quanto attiene le correnti di riferimento in base alle quali valutare il livello di esposizione della popolazione ai campi magnetici: per completezza di analisi, il lavoro considera entrambi i valori delle correnti di riferimento ed entrambi i limiti di esposizione.

Introduzione

I campi elettromagnetici prodotti da elettrodotti suscitano crescente preoccupazione nell'opinione pubblica, specie per quanto riguarda il campo magnetico a bassa frequenza (per i suoi paventati effetti sulla salute) e le linee aeree (per il loro impatto "ben visibile" sulle attività umane). In tale contesto, la determinazione dei livelli di esposizione della popolazione ai campi magnetici generati da tali linee è di grande importanza, come sancito dalla legislazione Italiana, particolarmente conservativa in questo ambito rispetto alla corrispondente legislazione e normativa europea ed internazionale. Infatti per quanto riguarda l'esposizione della popolazione ai campi elettrici e magnetici a 50 Hz generati da elettrodotti, nel nostro paese è attualmente in vigore il Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri (DPCM) 8 luglio 2003¹ [1], il quale, relativamente al valore efficace di induzione magnetica, prescrive anzitutto la verifica del non superamento del "limite di esposizione di 100 μT "; inoltre, ai fini della "protezione [della popolazione] da possibili

¹ Qui e altrove, salvo diverso avviso, ci si riferisce sempre implicitamente al DPCM 8 luglio 2003 relativo a frequenze da 0 Hz a 100 kHz, pubblicato sulla GU n. 200 del 29 agosto 2003, anche se – vedi seguito – per frequenze da 100 kHz a 300 GHz è stato emanato un altro DPCM 8 luglio 2003, pubblicato sulla GU n.199 del 28 agosto 2003.

effetti a lungo termine, eventualmente connessi con [omissis] permanenze non inferiori a quattro ore” giornaliera, esso prescrive pure che la “mediana dei valori [di induzione magnetica] nell’arco delle 24 ore nelle normali condizioni di esercizio” non superi il “valore di attenzione di $10 \mu T$ ” e, nel caso di nuove realizzazioni, “l’obiettivo di qualità di $3 \mu T$ ” [1]. La valutazione dell’esposizione continuativa della popolazione ai campi magnetici a 50 Hz generati da elettrodotti si basa dunque, a norma di legge, sulla stima del valore mediano di induzione magnetica generato in un dato punto da una linea elettrica. Esso può effettuarsi in linea di principio mediante misure in loco, come precisato in [1]. D’altra parte, le misure richiedono campagne sperimentali lunghe, complesse, costose e soggette a vari tipi di errori. Inoltre, occorre essere sicuri che il periodo di misura sia effettivamente indicativo dei valori di campo osservati nel sito di interesse nell’arco delle 24 ore nelle normali condizioni di esercizio, il che è estremamente difficile da stabilire, data la grande variabilità delle condizioni di carico delle linee. A tale riguardo, evidentemente anche in considerazione di queste difficoltà, in [1] si precisa che, oltre alle misure, gli organi preposti alla *“verifica del rispetto delle disposizioni di cui agli articoli 3 e 4”*, relativi rispettivamente a valore di attenzione e obiettivo di qualità, possono *“avvalersi di metodologie di calcolo basate su dati tecnici e storici dell’elettrodotto”*. Ed in effetti, considerate le varie difficoltà e le stesse incertezze applicative che emergono da [1], per valutare l’esposizione continuativa della popolazione ai campi magnetici a 50 Hz generati da un elettrodotto (a terna semplice) in un sito di interesse è invalso l’uso di procedere come segue [2]:

- 1) si effettuano le misure nel sito di interesse su di un periodo di misura la cui durata nasce dal compromesso tra l’esigenza di rappresentare le normali condizioni di esercizio dell’elettrodotto e quella di contenere ragionevolmente la durata delle misure (tipicamente da poche ore a qualche giorno al più [2]);
- 2) si richiedono al gestore dell’elettrodotto i valori di corrente corrispondenti al periodo di misura;
- 3) sotto l’ipotesi che la terna di correnti di fase della linea sia equilibrata, si ipotizza una legge di proporzionalità diretta tra corrente di linea e campo magnetico generato e si determina il relativo coefficiente di proporzionalità effettuando la regressione lineare dei valori di campo misurati istante per istante in funzione dei corrispondenti valori efficaci di corrente;
- 4) si individua un opportuno valore di “corrente di riferimento”, indicativo della mediana dei valori di induzione magnetica nell’arco delle 24 ore nelle normali condizioni di esercizio, o comunque del livello di esposizione continuativa della popolazione. Tale individuazione non è semplice: in taluni casi è la normativa stessa a fornire indicazioni (ad esempio in [1] si prescrive che *“Per la determinazione delle fasce di rispetto si dovrà fare riferimento all’obiettivo di qualità di cui all’art. 4 ed alla portata in corrente in servizio normale dell’elettrodotto, come definita dalla norma CEI 11-60 [3]”*). In altri ci si può riferire a serie storiche di dati dell’elettrodotto (a tal riguardo si ricorda che, come prescritto in [1], per elettrodotti a tensione non inferiore a 132 kV l’esercente dell’elettrodotto deve *“fornire agli organi di controllo [omissis], con frequenza trimestrale, 12 valori per ciascun giorno, corrispondenti ai valori medi delle correnti registrati ogni 2 ore nelle normali condizioni di esercizio”*).

In base al valore di riferimento di corrente individuato al precedente punto 4 ed al relativo coefficiente di proporzionalità di cui al punto 3, si determina il livello di esposizione continuativa della popolazione ai campi magnetici a 50 Hz generato dall’elettrodotto in questione nel sito di interesse. In sostanza, i valori di campo misurato hanno la funzione di consentire l’individuazione del coefficiente di proporzionalità in base al quale, a partire dalla corrente di riferimento, estrapolare il livello di esposizione. Questa procedura è anche detta “di normalizzazione” in quanto la corrente di riferimento rappresenta un valore

in base al quale “normalizzare” la corrente di linea. Il rapporto di normalizzazione tra corrente circolante e corrente di riferimento identifica un opportuno coefficiente di correzione da applicare ai valori di campo misurati per stimare il livello effettivo di esposizione.

Una prima difficoltà che sorge, per ogni tipo di linea, nell'applicare il procedimento sintetizzato nei precedenti punti 1-4 deriva dal fatto che, come precisato in precedenza, in [1] si stabilisce cautelativamente che, per la determinazione della fascia di rispetto degli elettrodotti nell'osservanza dell'obiettivo di qualità, si faccia riferimento alla portata in corrente in servizio normale dei conduttori [3]. Tale prescrizione appare in evidente contraddizione con quanto stabilito nella definizione stessa di obiettivo di qualità, in quanto la portata in corrente in servizio normale corrisponde quasi sempre ad un percentile estremamente elevato (tipicamente superiore al 95°) della distribuzione campionaria dei valori di corrente di esercizio desumibile dalle serie storiche fornite dall'esercente della linea: in sostanza la linea viene esercitata quasi sempre a correnti ben inferiori alla portata in corrente in servizio normale, che si configura come la “portata al limite termico” della linea. Parrebbe dunque che si dovessero usare due valori di corrente di riferimento: un valore “mediano nelle 24 ore” per la verifica del valore di attenzione e la ben più elevata portata in corrente in servizio normale dei conduttori per la verifica dell'obiettivo di qualità e delle relative fasce di rispetto nel caso di nuove realizzazioni.

Una seconda difficoltà sorge negli ambiti locali in cui vi sia contrasto tra legge Nazionale e legge Regionale (come accade nel caso della Regione Emilia Romagna, oggetto del caso applicativo trattato nel seguito). Può accadere infatti che la normativa nazionale e quella regionale siano in disaccordo tra loro sia per quanto riguarda i limiti di esposizione, sia per quanto attiene le correnti di riferimento in base alle quali valutare il livello di esposizione della popolazione ai campi magnetici. In tal caso occorre rifarsi alla sentenza n. 307 del 7 Ottobre 2003 della Corte Costituzionale [4], che si è espressa attribuendo allo Stato la determinazione dei limiti di esposizione, dei valori di attenzione e degli obiettivi di qualità intesi come valori di campo da non superare a titolo di cautela per la popolazione, mentre lascia alle Regioni la disciplina dell'uso del territorio in funzione della localizzazione degli impianti, cioè le ulteriori misure e prescrizioni dirette a ridurre il più possibile l'impatto negativo degli impianti sul territorio (in coerenza con il ruolo riconosciuto alle Regioni per quanto attiene al governo e all'uso del loro territorio): tra queste, in particolare la determinazione delle fasce di rispetto degli elettrodotti.

Una terza difficoltà sorge, più specificamente, nel caso di elettrodotti a doppia terna. Infatti, in tal caso le sorgenti di campo sono due terne A e B di correnti (in genere supposte equilibrate [5]) e quindi, per quanto attiene al punto 3 dell'elenco precedente, occorre ipotizzare una doppia legge di proporzionalità diretta tra entrambe le correnti di linea e il campo magnetico risultante generato, e determinare quindi due coefficienti di proporzionalità, effettuando una regressione multilineare dei valori di campo misurati istante per istante in funzione dei corrispondenti valori istantanei di corrente di ambo le terne (come discusso più in dettaglio nella parte teorica che segue). D'altra parte il vettore campo di induzione magnetica risultante \mathbf{B}_{tot} è la somma vettoriale di due vettori di campo \mathbf{B}_A e \mathbf{B}_B generati dalle corrispondenti terne (vedi Fig. 1) e la doppia proporzionalità di cui sopra è verificata solo quando i due vettori di campo hanno la stessa giacitura e possiedono la medesima fase elettrica, come dimostrato nella Sezione seguente. Il primo requisito resta soddisfatto ad una distanza dai conduttori sufficientemente grande rispetto alle distanze reciproche delle fasi, il secondo requisito risulta soddisfatto quando le correnti delle due terne sono in fase tra loro.

Le correnti delle due terne possono presentare diverso sfasamento nel caso delle cosiddette “doppie terne indipendenti” (o “doppie terne ammazettate”) e cioè di due linee a terna singola indipendenti, le quali – pur connettendo nodi diversi di una rete - sono

poste per un tratto più o meno lungo sugli stessi sostegni. In tal caso l'angolo di sfasamento tra le due terne di correnti varia nel tempo in modo casuale al variare dei flussi di potenza attiva e reattiva in transito sulle due linee, e di ciò occorre tener conto nel calcolo dell'esposizione della popolazione. Il calcolo diviene perciò relativamente complesso (come illustrato dettagliatamente in [6,7]) e comunque non può basarsi sulla succitata "doppia proporzionalità". Comunque, nel caso di doppie terne che collegano una stessa coppia di nodi della rete, è ragionevole che le terne di corrente siano in fase ed è quindi corretto (e comunque cautelativo) rifarsi alla "doppia proporzionalità" per il calcolo dell'esposizione media. Resta in ogni caso la difficoltà di impostare una regressione multilineare (in tal caso doppia ovvero bilineare) tra i valori delle correnti delle due terne e i valori di campo magnetico misurato per determinare i due coefficienti di proporzionalità; si estrapola così in modo corretto ed affidabile la relazione campo-correnti dai valori di corrente nel periodo di misura al valore della corrente di riferimento.

In questo lavoro, tutte e tre le difficoltà sopraelencate vengono affrontate. Infatti, esso tratta la valutazione del livello di esposizione della popolazione ai campi magnetici generati da elettrodotti in doppia terna a partire da misure di campo effettuate in loco, e riporta un caso applicativo relativo alla regione Emilia-Romagna, ove la normativa nazionale e regionale sono in disaccordo tra loro sia per quanto riguarda i limiti di esposizione, sia per quanto attiene le correnti di riferimento in base alle quali valutare il livello di esposizione della popolazione ai campi magnetici. Per completezza di analisi, nel lavoro sono considerati entrambi i valori delle correnti di riferimento ed entrambi i limiti di esposizione. In base alla conoscenza delle correnti istantanee durante il periodo di misura, i valori misurati sono estrapolati ai valori di corrente di riferimento seguendo una metodologia di calcolo innovativa, di uso semplice e pratico, sviluppata specificamente per elettrodotti aerei a doppia terna non ottimizzati in MT, che si vale della tecnica della regressione multilineare. La metodologia è di validità generale per linee a doppia terna non ottimizzate, quindi è suscettibile di essere applicata anche a linee aeree di questo tipo per distribuzione primaria in AT e trasmissione in AAT

Elementi di calcolo per la valutazione dell'esposizione al campo magnetico generato da elettrodotti

Un elettrodotto può essere approssimato come un'insieme di conduttori con giaciture imposte dalle dimensioni e quote dei sostegni. Con queste ipotesi il calcolo del campo magnetico \mathbf{H} , nonché dell'induzione magnetica \mathbf{B} nell'area adiacente alla linea può essere condotto ricorrendo alla seguente relazione vettoriale, che esprime l'integrazione della legge di Biot-Savart differenziale:

$$\mathbf{B} = (-\mu_0 / 4\pi) \sum_k \int (I_k / r^3) \mathbf{r} \times d\mathbf{l} \quad (1)$$

ove come noto:

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m è la permeabilità magnetica del vuoto;

I_k è il valore efficace della corrente relativa al conduttore k-esimo;

$d\mathbf{l}$ è il versore supportato dall'elemento infinitesimo del conduttore percorso dalla corrente I_k ;

\mathbf{r} è il vettore spiccato tra il punto di calcolo di \mathbf{B} e l'elemento infinitesimo $d\mathbf{l}$;

r è il modulo di \mathbf{r} .

La sommatoria è estesa a tutti i conduttori interessati da corrente in base al principio di sovrapposizione degli effetti, poiché l'aria è un mezzo lineare ed isotropo, ove vale la seguente relazione di legame materiale:

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} \quad (2)$$

Adottando alcune ipotesi semplificative, suggerite anche dalla norma tecnica CEI 211-4 (intitolata "Guida ai metodi di calcolo dei campi elettrici e magnetici generati da linee elettriche" [5]), la legge di Biot-Savart in forma integrale si semplifica considerevolmente. Queste ipotesi sono le seguenti: terreno piano di estensione infinita e permeabilità magnetica relativa unitaria (quindi, contributo delle correnti-immagini nel terreno trascurabile); conduttori di linea filiformi, rettilinei, paralleli ed infiniti; correnti di linea equilibrate. In particolare, adottando un sistema di coordinate cartesiane bidimensionali x - y ortogonali all'asse dell'elettrodotto, il vettore induzione magnetica \mathbf{B} relativo ad un generico istante di tempo t e ad un punto campo P identificato da un vettore \mathbf{x}_j di coordinate x_j , y_j può scriversi in termini delle sue componenti scalari istantanee $B_x(P,t)$ e $B_y(P,t)$, come segue:

$$B_x(P,t) = \frac{\mu_0}{\pi\sqrt{2}} \sum_{k=1}^M \left\{ \frac{I_k \sin \left[\omega t - \Delta_k - 2(k-1) \frac{\pi}{3} \right] (y_k - y_P)}{(x_k - x_P)^2 + (y_k - y_P)^2} \right\} \quad (3)$$

$$B_y(P,t) = \frac{\mu_0}{\pi\sqrt{2}} \sum_{k=1}^M \left\{ \frac{I_k \sin \left[\omega t - \Delta_k - 2(k-1) \frac{\pi}{3} \right] (x_j - x_P)}{(x_k - x_P)^2 + (y_k - y_P)^2} \right\} \quad (4)$$

dove: ω è la pulsazione alla frequenza di rete; $M=3$ per elettrodotti a terna semplice, $M=6$ per elettrodotti a terna doppia; I_k è il valore efficace della k^{esima} corrente di fase dell'elettrodotto, essendo $k=1,2,3$ per le correnti di fase della prima terna, detta d'ora in poi terna A (per la quale dunque $I_k=I_A$) e $k=4,5,6$ per le correnti di fase della seconda terna, detta d'ora in poi terna B (per la quale dunque $I_k=I_B$); Δ_i è una grandezza tale che:

- $\Delta_i=0$ per $k=1,2,3$, cioè per le correnti di fase della terna A (assunta come riferimento di fase);
- $\Delta_i=\Delta\varphi$ per $k=4,5,6$, cioè per le correnti di fase della terna B, essendo $\Delta\varphi$ l'angolo di sfasamento tra le correnti delle due terne, supposte come anzidetto equilibrate.

I valori efficaci di $B_x(P,t)$ e $B_y(P,t)$, detti $B_x(P)$, $B_y(P)$, si calcolano a partire dalle (3), (4), rispettivamente applicando la definizione di valore efficace.

Per una linea a terna singola, le (3) e (4) mostrano che la corrente di linea I_A può essere estratta a fattor comune e quindi [8]:

$$B_x(P) = K_{Px} I_A \quad (5)$$

$$B_y(P) = K_{Py} I_A \quad (6)$$

dove K_{Px} e K_{Py} sono opportuni coefficienti di proporzionalità derivabili dalle (3), (4) in base alla definizione di valore efficace. In tal caso, il valore efficace di induzione magnetica nel punto P , detto semplicemente d'ora in poi B_P , si ottiene banalmente come:

$$B_P = \sqrt{[B_x(P)]^2 + [B_y(P)]^2} = \sqrt{K_{Px}^2 + K_{Py}^2} I_A = K_{PA} I_A \quad (7)$$

e risulta direttamente proporzionale alla corrente di linea, come precedentemente ipotizzato.

Per una linea a doppia terna, invece, si verifica facilmente che nel caso che $\Delta\varphi=0$ – è il caso di doppie terne non ammassate e non ottimizzate [2, 8] – $B_x(P)$, $B_y(P)$ possono calcolarsi in modo assai semplice come somma dei valori efficaci dei contributi delle due terne A e B alle componenti x e y del vettore induzione magnetica nel punto campo P, rispettivamente, ovvero:

$$B_x(P) = B_{Ax}(P) + B_{Bx}(P) \quad (8)$$

$$B_y(P) = B_{Ay}(P) + B_{By}(P) \quad (9)$$

In tal caso, B_P può derivarsi come segue (Fig. 1):

$$\begin{aligned} B_P &= \sqrt{[B_x(P)]^2 + [B_y(P)]^2} = \sqrt{[B_{Ax}(P) + B_{Bx}(P)]^2 + [B_{Ay}(P) + B_{By}(P)]^2} = \\ &= \sqrt{[B_A(P) \cos\theta_1 + B_B(P) \cos\theta_2]^2 + [B_A(P) \sin\theta_1 + B_B(P) \sin\theta_2]^2} \end{aligned} \quad (10)$$

Nel caso in cui $\theta_1 = \theta_2 = \theta$ (ovvero $\Delta\theta=0$, vedi Fig. 1), dalla (10) si ottiene in virtù della (7):

$$\begin{aligned} B_P &= \sqrt{[B_A(P) + B_B(P)]^2 \cos^2\theta + [B_A(P) + B_B(P)]^2 \sin^2\theta} = \\ &= B_A(P) + B_B(P) = K_{PA} I_A + K_{PB} I_B \end{aligned} \quad (11)$$

La relazione (11) consente di affermare che sotto le ipotesi semplificative sopracitate di opportune fasi vettoriali il campo totale è esprimibile come combinazione bilineare delle correnti di ogni terna. Come si evince dalle relazioni precedenti, il calcolo del valore efficace di induzione magnetica, B , individuato in [1] come grandezza essenziale da monitorare “*per la protezione della popolazione dalle esposizioni a campi ... magnetici alla frequenza di rete (50 Hz) connessi al funzionamento e all'esercizio degli elettrodomesti*” presuppone la conoscenza delle correnti di linea, I_A ed I_B . Imponendo nel calcolo una opportuna corrente di riferimento si perviene ad un valore di B corrispondente a tale corrente. Questo valore di riferimento di B può essere confrontato con i limiti imposti dalla legge.

Quando l'approssimazione di conduttori paralleli rettilinei infiniti non può essere impiegata e si hanno anche altre tipologie di sorgenti a bassa frequenza (ad es. una cabina) e linee non parallele alla prima, il calcolo di B diviene più complesso. Può allora essere opportuno ricorrere a codici di calcolo numerici di tipo tridimensionale [2,5,9].

La metodologia innovativa proposta per la misura e valutazione dell'esposizione al campo generato da una linea a doppia terna non ottimizzata

Un metodo alternativo al calcolo numerico per la stima del campo generato da una corrente di riferimento consiste nello sfruttare il legame di proporzionalità fra campo magnetico e corrente di linea. In questo modo, misurando il campo magnetico in un dato punto campo e conoscendo il corrispondente valore di corrente, si può determinare la costante di proporzionalità tra campo e corrente, ed è poi possibile riportare il valore di campo misurato a quello che si avrebbe con una corrente di riferimento nota.

Si noti che, poiché il valore istantaneo di B dipende dalle correnti istantanee circolanti, la semplice misura del campo non fornisce sufficienti informazioni riguardo all'esposizione che sperimenta un ricettore. La misura di B e l'acquisizione congiunta del diagramma di carico della linea consentono invece di correlare il campo alla corrente e di estrapolare il valore di B corrispondente ad una opportuna corrente di riferimento significativa ai fini dell'esposizione. Si noti anche che una sola misura non è sufficiente, in quanto l'incertezza insita nei metodi di misura e la possibile presenza di altre sorgenti a bassa frequenza indipendenti dagli elettrodotti rendono incerta anche la determinazione della costante di proporzionalità. E' quindi opportuno acquisire i valori di induzione magnetica su di un periodo di durata opportuna, che sia possibilmente rappresentativo delle normali condizioni di servizio della linea e che renda la determinazione della costante di proporzionalità tra campo e corrente la meno incerta possibile.

Nel caso di elettrodotto a terna singola, misurando n valori di B su di un intervallo temporale opportuno ed acquisendo il diagramma di carico della linea, è possibile stimare accuratamente il coefficiente di proporzionalità K_m . Tale coefficiente è definito come la media dei valori K_i calcolati come rapporti tra B_i , i -esimo valore efficace di induzione magnetica misurato, ed I_i , i -esimo valore efficace di corrente relativo al medesimo istante di B_i ($i=1, \dots, n$), ovvero:

$$K_i = \frac{B_i}{I_i} \quad (12)$$

La media aritmetica K_m degli n valori K_i ottenuti rappresenta la stima del coefficiente di proporzionalità tra campo e corrente:

$$K_m = \frac{\sum_{i=1}^n K_i}{n} \quad (13)$$

Tanto i singoli K_i quanto la loro media aritmetica K_m hanno le dimensioni di induzione magnetica su corrente e pertanto, visti gli usuali ordini di grandezza di tali quantità, vengono solitamente espressi in $\mu\text{T/A}$.

Il coefficiente di proporzionalità K_m consente quindi di determinare il valore di induzione di riferimento B_r corrispondente ad una opportuna corrente di riferimento I_r . E' così possibile confrontare B_r con le soglie imposte dalle leggi vigenti.

$$B_r = K_m I_r \quad (14)$$

Nel caso di elettrodotti a doppia terna, invece, come precisato poc'anzi, le due terne di correnti, pur supposte equilibrate, sono in genere caratterizzate da un mutuo sfasamento temporale, espresso dall'angolo di sfasamento $\Delta\phi$ (vedi relazioni (3) e (4)), e da un mutuo sfasamento spaziale, espresso dall'angolo di sfasamento $\Delta\theta$ (vedi relazioni (10) e (11) (Fig. 1)). Ogni terna dunque genera un vettore induzione magnetica con proprie componenti spaziali e con una propria fase elettrica ed il campo totale risulta dalla somma vettoriale dei due campi. Il caso maggiormente cautelativo è quello in cui i due vettori presentano la medesima fase elettrica e la stessa giacitura spaziale (ovvero sono in fase e paralleli), cosicché il campo totale si ottiene sommando semplicemente i moduli dei due vettori. Ciò equivale a considerare nulli gli angoli di sfasamento temporale $\Delta\phi$ e spaziale $\Delta\theta$. Pertanto nel seguito supporremo cautelativamente che tali angoli siano nulli, sotto la

duplice ipotesi che le doppie terne siano non ammazzettate e non ottimizzate, e che i punti campo siano posti a una distanza sufficientemente elevata dai conduttori. Sotto queste ipotesi semplificative, ma di cautela, in un generico punto campo P non troppo vicino ai conduttori è possibile quindi applicare la (11) ed esprimere il valore efficace di induzione magnetica, B_P , come combinazione lineare delle correnti delle due linee, I_A ed I_B :

$$B_P = B_P(I_A, I_B) = K_{PA}I_A + K_{PB}I_B \quad (15)$$

ove (si veda la (7)):

$$K_{PA} = \frac{B_P}{I_A} \quad \text{con } I_B = 0 \quad (16)$$

$$K_{PB} = \frac{B_P}{I_B} \quad \text{con } I_A = 0 \quad (17)$$

K_{PA} e K_{PB} rappresentano i coefficienti di proporzionalità tra le singole correnti di linea ed il contributo al campo complessivo e variano al variare del punto di misura.

La stima innovativa di K_{PA} e K_{PB} proposta in questo lavoro viene ottenuta dall'elaborazione numerica dei vettori-dati dei valori di B_P (ottenuti mediante misure) e dei valori delle correnti I_A , I_B (comunicati dall'esercente l'elettrodotto) attraverso una procedura di regressione lineare multipla, basata sul metodo dei minimi quadrati. Secondo tale procedura, K_{PA} e K_{PB} rappresentano i coefficienti dell'equazione del piano di regressione. Questi coefficienti, i quali – è bene ribadirlo, in quanto assai importante - dipendono dal punto di misura P, oltre che ovviamente dalla terna presa in esame, consentono di stimare il valore di induzione di riferimento B_r corrispondente ad opportune correnti di riferimento I_{rA} e I_{rB} , secondo l'equazione seguente:

$$B_{rP} = B_{rP}(I_{rA}, I_{rB}) = K_{PA}I_{rA} + K_{PB}I_{rB} \quad (18)$$

Si noti che, qualora i conduttori delle due terne A e B avessero caratteristiche diverse - ad esempio diversa sezione conduttrice - le due correnti di riferimento potrebbero non essere le stesse.

Studiando la correlazione tra B misurato e diagrammi di carico delle linee si mostrerà per un particolare caso applicativo che la relazione innovativa (18) qui proposta consente di riprodurre con ottima approssimazione la correlazione tra induzione magnetica misurata e correnti di linea, permettendo quindi di stimare accuratamente il valore di induzione di riferimento a partire da misure effettuate sul campo.

Applicazione della metodologia proposta ad una linea a doppia terna MT esistente

Premessa

L'area di interesse (vedi Fig. 2) ospita un edificio residenziale, per il quale occorre effettuare una valutazione di esposizione, ed è limitrofa alla seguenti sorgenti di campo magnetico a bassa frequenza:

- elettrodotto aereo a doppia terna MT (15 kV) adiacente l'edificio in esame (vedi Figg. 2, 3), che costituisce la sorgente principale, composto dalla Terna A (ad

ovest) e dalla Terna B (ad est), entrambe affluenti ad una vicina cabina di derivazione;

- cabina di derivazione (vedi Fig. 2).
- altre tre linee MT derivate dalla cabina.

La Terna A e la Terna B presentano le seguenti caratteristiche:

- Terna A: linea su palificazione aerea (ad ovest rispetto all'asse dell'elettrodotto) con sezione del conduttore pari a 70 mm^2 e portata al limite termico pari a 285 A (dato comunicato dal Gestore).
- Terna B: linea su palificazione aerea (ad est rispetto all'asse dell'elettrodotto) con sezione del conduttore pari a 50 mm^2 e portata al limite termico pari 230 A (dato comunicato dal Gestore).

Quadro normativo vigente e note interpretative

L'area in esame è sita in provincia di Bologna, quindi le leggi vigenti in materia di esposizione umana ai campi magnetici generati dagli elettrodotti sono quelle nazionali e quelle regionali dell'Emilia Romagna. Purtroppo, come accennato, tali leggi sono in notevole contrasto per quanto riguarda i limiti di esposizione prescritti e i metodi per definire le distanze di rispetto dalle linee, e ciò porta a serie difficoltà interpretative. Di seguito vengono richiamate le prescrizioni unitamente alle interpretazioni ritenute più ragionevoli, peraltro supportate da considerazioni tecniche e dalla Giurisprudenza.

Leggi nazionali: è attualmente in vigore il succitato DPCM 8 luglio 2003 [1], il quale nel caso di esposizione ai campi magnetici fissa i sopradefiniti limite di esposizione ($100 \mu\text{T}$), valore di attenzione ($10 \mu\text{T}$) ed obiettivo di qualità ($3 \mu\text{T}$).

Leggi Regionali (Emilia Romagna): è attualmente in vigore la Legge Regionale 31 ottobre 2000 n.30 [10] e la relativa Direttiva applicativa n.197/2001 [11], la quale, nel caso di esposizione ai campi magnetici, fissa tre soglie:

- limite di esposizione ($100 \mu\text{T}$), definito all'art. 13, capo IV di [11] come "fissato con DPCM 23 aprile 1992" (quest'ultimo è stato abrogato dal DPCM 8 luglio 2003 [1]);
- valore di cautela ($0,5 \mu\text{T}$), definito all' art. 13, capo IV di [11] come segue: "*il Ministero ha solo fornito una indicazione nella misura di 0,5 microTesla. Detto valore, individuato sulla base delle più aggiornate conoscenze scientifiche in materia di protezione da possibili effetti a lungo termine, trova un suo riconoscimento nella disciplina regionale al comma 1 dell'art. 15*".
- obiettivo di qualità ($0,2 \mu\text{T}$); definito all' art. 13, capo IV di [11] come segue: "*l'obiettivo individuato nella misura di 0,2 microTesla di induzione magnetica da perseguire attraverso gli strumenti urbanistici tenendo conto delle particolari situazioni territoriali al fine di contemperare le esigenze di minimizzazione del rischio con quelle di sviluppo territoriale, ferma restando la tutela della salute garantita attraverso il rispetto di opportuni valori di cautela e limiti di esposizione*".

L'area di interesse rientra tra le situazioni territoriali particolari citate al p.to 13.1 di [11], alle quali resta associato un obiettivo di qualità per le nuove costruzioni pari a $0,5 \mu\text{T}$.

Inoltre, poiché in base allo studio degli elettrodotti MT installati in Italia è emerso che "*in condizioni di normale esercizio, per garantire la rialimentabilità degli impianti, esiste un limite di sfruttamento massimo dei conduttori che in genere non può eccedere il 50% della portata massima*", in [11] si assume come corrente di riferimento cautelativa, "*il valore della corrente media annua di esercizio riferita all'anno precedente incrementata del 5%, ovvero il 50% della corrente massima di esercizio normale, qualora più cautelativo*", cioè in

sostanza – visti i valori di corrente usuali - il 50% della portata al limite termico in servizio normale comunicata dal Gestore.

Si noti che le disposizioni della legge regionale impongono soglie di induzione magnetica decisamente inferiori rispetto alla legge nazionale. D'altra parte, esse considerano per la corrente di riferimento un valore più basso del 50% rispetto a quello prescritto dalla legge nazionale per la verifica del rispetto dell'obiettivo di qualità. Nel complesso si può comunque affermare che la legge regionale è decisamente più cautelativa rispetto a quella nazionale, come mostrato in [12] con riferimento ad un elettrodotto a singola terna a 132 kV. Per questo si è qui ritenuto opportuno scegliere come corrente di riferimento il 50% della portata comunicata dal Gestore.

Ad ogni modo, queste difformità normative tra legge nazionale e legge regionale possono essere risolte solo ricorrendo alla Giurisprudenza. La succitata sentenza n. 307 del 7 Ottobre 2003 della Corte Costituzionale [4] attribuisce allo Stato la fissazione dei valori di campo da non superare a titolo di cautela per la popolazione, mentre affida alle Regioni la localizzazione degli impianti e la determinazione delle fasce di rispetto. In base a questa interpretazione legislativa si avrà che:

1. la costruzione di nuovi impianti o nuove costruzioni limitrofe ad impianti esistenti attiene alla disciplina dell'uso del territorio in funzione della localizzazione degli impianti. Si avrà quindi che le reciproche distanze di rispetto saranno valutate in base alla legge regionale, più restrittiva di quella nazionale.
2. per la valutazione dell'esposizione al campo magnetico in edifici esistenti vicini ad elettrodotti (è il caso in esame) si farà riferimento alla normativa nazionale, poiché viene attribuita allo Stato la fissazione delle soglie di esposizione.

La soglia di esposizione da considerare sarà quindi il valore di attenzione di $10 \mu\text{T}$ fissato in [1], da valutarsi come mediana dei valori nell'arco delle 24 ore nelle normali condizioni di esercizio.

Descrizione delle misure effettuate

Per individuare un periodo di 24 ore che rappresenti, nell'arco di un anno, le "normali condizioni di esercizio" sarebbe necessario monitorare l'elettrodotto linea per un anno intero, oppure richiedere all'esercente i dati storici degli andamenti del carico negli anni precedenti, peraltro senza reali garanzie che l'anno in corso presenti andamenti del carico analoghi a quelli degli anni precedenti. Si è scelto pertanto di condurre le misure, per ognuno dei due punti in esame, sulle 24 ore di un giorno lavorativo invernale ritenuto ben rappresentativo delle normali condizioni di esercizio. I dati misurati sono poi stati elaborati numericamente (vedi Sezione seguente) secondo la procedura descritta alla Sezione precedente per ottenere il valore del campo magnetico corrispondente alla corrente di riferimento.

Le misure sono state eseguite secondo le Norme CEI 211-6 [13]. Lo strumento utilizzato per le misure è il misuratore di campo elettromagnetico PMM 8053, con filtro a 50 Hz e sonda EHP50B isotropa, montata su treppiede in legno, previa verifica preliminare di calibrazione dello strumento. Si rimarca che lo strumento adottato risponde a tutte le caratteristiche prescritte in [13].

Per individuare i punti più significativi ai fini dell'esposizione, si è osservato che l'elettrodotto in oggetto è con buona approssimazione parallelo al muro ovest dell'edificio residenziale in esame. Quindi i locali maggiormente esposti al campo magnetico sono quelli del lato ovest, piano primo. A riprova di ciò, sono state condotte misure "spot" nei locali la cui destinazione d'uso preveda una permanenza di persone maggiore o uguale

alle quattro ore giornaliere ed effettivamente i valori più elevati di campo sono stati rilevati al piano primo a ridosso della parete lato ovest del fabbricato.

In particolare l'indagine strumentale preliminare ha permesso di identificare due camere da letto al primo piano come luoghi particolarmente significativi ai fini dell'esposizione al campo magnetico, in quanto esse sono tra gli ambienti più vicini all'elettrodotto in esame. All'interno di queste due camere sono stati localizzati due punti - uno in ciascuna delle due - posti a ridosso della parete ovest e alla massima altezza, tangenti al soffitto, quali punti maggiormente esposti al campo perché a distanza minima dall'elettrodotto. Pertanto tali punti, denominati P_1 e P_2 ed indicati nella pianta riportata in Fig. 4, sono stati scelti come punti più significativi ai fini dell'esposizione e le misure sono state condotte posizionando lo strumento registratore in questi punti. Il rispetto del valore di attenzione (v.d.a.) in questi punti implica il rispetto del v.d.a. in tutti gli altri punti dell'edificio.

In Tabella 1 si riportano i valori mediano, B_{50} , minimo, B_{min} , e massimo, B_{max} , di B rilevati nei punti di misura P_1 e P_2 . Essi sono stati ottenuti elaborando i valori istantanei di induzione magnetica misurati ogni 15 minuti, nell'arco delle 24 ore, in una prima giornata per il punto P_1 e nella giornata successiva per il punto P_2 . I valori istantanei di B misurati nei punti P_1 e P_2 sono riportati in Fig. 5 e Fig. 6 rispettivamente.

In Tabella 2 si riportano i valori mediano, I_{50} , minimo, I_{min} , e massimo, I_{max} , delle correnti delle Terne A e B nei due giorni di misura. Essi sono stati ottenuti elaborando i valori istantanei di corrente forniti dal Gestore con letture ogni 15 minuti. I valori istantanei di corrente relativi alle Terne A e B nei due giorni di misura sono riportati in Figg. 7-10.

Elaborazione delle misure mediante la metodologia proposta

Di seguito si riportano i risultati della metodologia innovativa qui proposta per il calcolo dei coefficienti di proporzionalità K_{PA} e K_{PB} tra induzione magnetica B_P misurata nei due punti P_1 e P_2 , e correnti delle due terne, I_A , I_B (vedi equazioni (15) e (18)). Come descritto nella Sezione precedente, tale stima viene ottenuta per entrambi i punti dall'elaborazione numerica dei vettori-dati dei valori di B_P , I_A , I_B attraverso una procedura "regressione lineare multipla". Si ottengono così i valori di K_{P_1A} , K_{P_1B} e K_{P_2A} , K_{P_2B} che consentono di stimare il campo, in P_1 e P_2 rispettivamente, in regimi di carico diversi da quelli oggetto di misura, ad esempio in condizioni più gravose o in condizioni convenzionali di riferimento. I valori di tali coefficienti sono i seguenti:

$$\begin{cases} K_{P_1A} = 0,0060 \quad [\mu T / A] & \text{coeff. terna A per il punto } P_1 \\ K_{P_1B} = 0,0093 \quad [\mu T / A] & \text{coeff. terna B per il punto } P_1 \\ K_{P_2A} = 0,0060 \quad [\mu T / A] & \text{coeff. terna A per il punto } P_2 \\ K_{P_2B} = 0,0095 \quad [\mu T / A] & \text{coeff. terna B per il punto } P_2 \end{cases}$$

In Fig. 11 per il punto P_1 viene presentata l'analisi di correlazione tra i valori di B misurati e quelli calcolati secondo la (15). Come si nota, la retta di regressione si discosta ben poco dalla funzione identica e la dispersione dei valori attorno ad essa è esigua: il coefficiente angolare della retta di regressione approssima l'unità con una precisione del sei per mille circa. Pertanto i valori di K_{P_1A} , K_{P_1B} ottenuti per il punto P_1 rappresentano ottime stime dei coefficienti di proporzionalità tra campo e corrente in tale punto. Inoltre, l'esigua dispersione dei valori prova sia che le altre sorgenti a bassa frequenza forniscono un contributo trascurabile – quindi è corretto considerare l'elettrodotto MT a doppia terna come sorgente primaria di campo – sia la correttezza della duplice ipotesi che la doppia terna sia non ottimizzata e che i punti campo siano a grande distanza dai conduttori.

In Fig. 12 per il punto P_2 viene presentata l'analisi di correlazione tra i valori di B misurati e quelli calcolati secondo la (15). Anche in questo caso, la retta di regressione si discosta ben poco dalla funzione identica e la dispersione dei valori attorno ad essa è esigua: il coefficiente angolare della retta di regressione approssima l'unità con una precisione superiore al due per mille. Pertanto i valori di K_{P_2A} , K_{P_2B} ottenuti per il punto P_2 rappresentano ottime stime dei coefficienti di proporzionalità tra campo e corrente in tale punto. Inoltre, l'esigua dispersione dei valori prova anche in questo caso che le altre sorgenti a bassa frequenza forniscono un contributo trascurabile (quindi è corretto considerare l'elettrodotto MT a doppia terna come sorgente primaria di campo anche per il punto P_2) e che la duplice ipotesi che la doppia terna sia non ottimizzata e che i punti campo siano a grande distanza dai conduttori è corretta. Si osservi pure che la coppia di valori K_{P_2A} , K_{P_2B} differisce pochissimo dalla coppia K_{P_1A} , K_{P_1B} confermando un risultato atteso, in quanto i punti P_1 e P_2 si trovano praticamente alla stessa distanza dall'elettrodotto.

I valori di induzione magnetica misurati non possono essere direttamente confrontati con il valore di attenzione indicato dalla legge. Per questo è necessario calcolare, attraverso il suaccennato procedimento di normalizzazione, un valore di campo di riferimento ottenuto dalla corrispondente corrente di riferimento. Per la corrente di riferimento I_r si è considerato in prima istanza il 50% della corrente massima di esercizio normale, in quanto tale valore è il più cautelativo secondo quanto prescritto in [11]. Pertanto, le correnti di riferimento per le due terne in esame sono le seguenti:

terna A, portata 285 A $\Rightarrow I_{rA} = 142,5$ A

terna B, portata 230 A $\Rightarrow I_{rB} = 115$ A

In tal caso, la normalizzazione relativa ai punti P_1 e P_2 fornisce i seguenti risultati:

$$B_{rP_1} = K_{P_1A}I_{rA} + K_{P_1B}I_{rB} = 0,006 \times 142,5 + 0,0093 \times 115 \cong \mathbf{1,92} \mu\text{T}$$

$$B_{rP_2} = K_{P_2A}I_{rA} + K_{P_2B}I_{rB} = 0,006 \times 142,5 + 0,0095 \times 115 \cong \mathbf{1,95} \mu\text{T}$$

e quindi il valore di attenzione di 10 μT prescritto in [1] viene rispettato. Si noti inoltre che anche l'obiettivo di qualità di 3 μT prescritto in [1] viene rispettato qualora si faccia riferimento al 50% della portata al limite termico; d'altra parte questo limite non risulta pertinente in questo caso, sia perché si tratta di edificio esistente in prossimità di costruzione già esistente, sia perché, anche qualora si trattasse di nuova realizzazione, si dovrebbe far riferimento al limite regionale di 0,2 μT di cui a [10,11] - ovvero di 0,5 μT per il particolare caso dell'area in cui ricade l'edificio considerato - come chiarito in precedenza in base alla sentenza di cui a [4]. In proposito si noti che i valori di 0,2-0,5 μT non sono rispettati, quindi l'edificio - se non fosse già esistente - non potrebbe essere costruito nella posizione ed alla distanza attuale dall'elettrodotto, e di converso l'elettrodotto - se non fosse già esistente - non potrebbe venire realizzato nella posizione ed alla distanza attuale dall'edificio. Quindi quello che - in termini di protezione della popolazione da possibili effetti a lungo termine derivanti dall'esposizione ai campi magnetici - appare uno "status quo" accettabile non sarebbe invece uno scenario futuro accettabile: è questa la conseguenza delle discordanze tra normativa nazionale e regionale.

Si noti anche che la mediana dei valori di induzione magnetica misurati nell'arco delle 24 ore nei due punti P_1 e P_2 è pari rispettivamente a 1,47 μT e 1,54 μT . Pertanto i valori di induzione

normalizzati al 50% della portata del conduttore sono superiori ai valori mediani ottenuti dalla campagna misure del 30% circa. Ciò dimostra che il procedimento di “normalizzazione” consente di pervenire a risultati cautelativi e non dipendenti dalla particolare condizione di carico durante la misura. La normalizzazione di B al 50% della portata conduttore può dunque ritenersi una ragionevole interpretazione in senso cautelativo del DPCM 8 luglio 2003 [1]. Considerare il 100% della portata è ovviamente ancor più cautelativo, ma in [1] il valore di attenzione di 10 μT è espressamente definito “come mediana dei valori nell'arco delle 24 ore nelle normali condizioni di esercizio” e come già detto il valore del campo normalizzato al 50% della portata approssima per eccesso il valore mediano misurato.

Se ora si considera il 100% della portata al limite termico delle terne A e B, indicativa della relativa corrente massima, $I_{max,A}$ e $I_{max,B}$ rispettivamente, allora si hanno i valori indicativi dell'esposizione massima nei punti P_1 e P_2 , B_{max,P_1} e B_{max,P_2} rispettivamente. In tal caso, la normalizzazione relativa a tali punti fornisce i seguenti risultati:

$$B_{max,P_1} = K_{P_1A}I_{max,A} + K_{P_1B}I_{max,B} = 0,006 \times 285 + 0,0093 \times 230 \cong \mathbf{3,85} \mu\text{T}$$

$$B_{max,P_2} = K_{P_2A}I_{max,A} + K_{P_2B}I_{max,B} = 0,006 \times 285 + 0,0095 \times 230 \cong \mathbf{3,90} \mu\text{T}$$

e quindi il valore di attenzione di 10 μT prescritto in [1] viene ancora rispettato, pur in presenza di questi valori estremi di corrente. Si noti inoltre che, pur con tutte le riserve espresse poc'anzi sulla sua pertinenza in questo caso, l'obiettivo di qualità di 3 μT prescritto in [1] non viene rispettato qualora si faccia riferimento al 100% della portata al limite termico, né a maggior ragione è rispettato il limite regionale di 0,2-0,5 μT di cui a [10,11]. D'altra parte, i valori di B_{max} , sia per P_1 , sia per P_2 , rappresentano i massimi valori del campo nella peggiore situazione dal punto di vista della emissione di campo, ovvero quando le correnti circolanti raggiungono il 100% della portata al limite termico del conduttore. Pare quindi più corretto raffrontarli al limite di esposizione di 100 μT (fissato concordemente sia in [1], sia in [10,11]), che non deve essere mai superato: i valori di B_{max} , sia per P_1 , sia per P_2 , sono largamente inferiori a tale limite.

Conclusioni

In questo lavoro si è descritta una metodologia, sviluppata specificamente per elettrodotti MT a doppia terna non ottimizzati, che si vale della tecnica della regressione multilineare per stimare i due coefficienti che descrivono il legame di proporzionalità fra induzione magnetica misurata e correnti di terna ed estrapolare così i valori di campo magnetico misurati ai valori di corrente di riferimento - secondo quanto prescritto dalla normativa vigente – pervenendo alla valutazione del livello di esposizione della popolazione ai campi magnetici generati da tali elettrodotti.

La metodologia, basata sulla misura in continuo nei punti di massima esposizione e sulla acquisizione dei diagrammi di carico delle linee, è stata applicata con successo ad una linea a doppia terna esistente. Infatti, nei due punti di massima esposizione il ruolo delle altre sorgenti a bassa frequenza è risultato trascurabile e le stime ottenute per i due coefficienti di proporzionalità hanno permesso di determinare il valore di induzione di riferimento corrispondente al 50% ed al 100% della corrente massima di esercizio normale.

I valori di induzione normalizzati al 50% della portata conduttore (normalizzazione significativa ai fini dell'esposizione continuativa secondo un'interpretazione cautelativa del DPCM 8 luglio 2003), pari a 1,92 μT e 1,95 μT , risultano inferiori al valore di attenzione di

10 μT (ed anche all'obiettivo di qualità di 3 μT , pur non pertinente) riportati nel DPCM 8 luglio 2003, ma superiori alla soglia di 0,2-0,5 μT cui fa riferimento la L.R. n. 30/2000. I valori massimi di induzione normalizzati al 100% della portata conduttore, pari a 3,85 μT e 3,90 μT , risultano inferiori al limite di esposizione (100 μT), come pure al valore di attenzione (10 μT), ma superiori all'obiettivo di qualità di 3 μT , come pure alla soglia di 0,2-0,5 μT cui fa riferimento la L.R. n. 30/2000. I valori mediani di induzione misurati nell'arco di due giorni nei due punti sono risultati pari a 1,47 μT e 1,54 μT .

La sentenza n. 307 del 7 Ottobre 2003 della Corte Costituzionale si è espressa - come precisato - attribuendo allo Stato la fissazione delle soglie di esposizione ed affidando alle Regioni la disciplina dell'uso del territorio in funzione della localizzazione degli impianti; poiché nel caso applicativo considerato occorre semplicemente effettuare una valutazione dell'esposizione nella situazione esistente, secondo tale sentenza la norma di legge a cui fare riferimento è il DPCM 8 luglio 2003, che identifica nel valore di attenzione di 10 μT il limite da non superare da parte della mediana dei valori di induzione nell'arco delle 24 ore nelle normali condizioni di esercizio. Poiché nel caso in esame tale limite è rispettato anche con la normalizzazione al 100% della portata conduttore, si può dunque affermare che il livello di esposizione dei residenti è entro i limiti normativi.

Figure

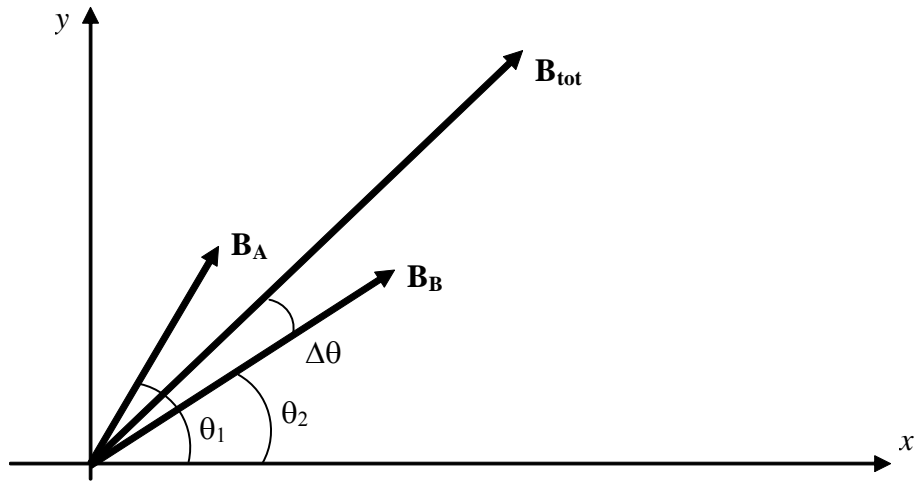


Fig. 1: rappresentazione vettoriale dei due vettori induzione B_A e B_B generati in un punto P dalle due terne simmetriche di corrente A e B, di valore efficace I_A e I_B , rispettivamente.

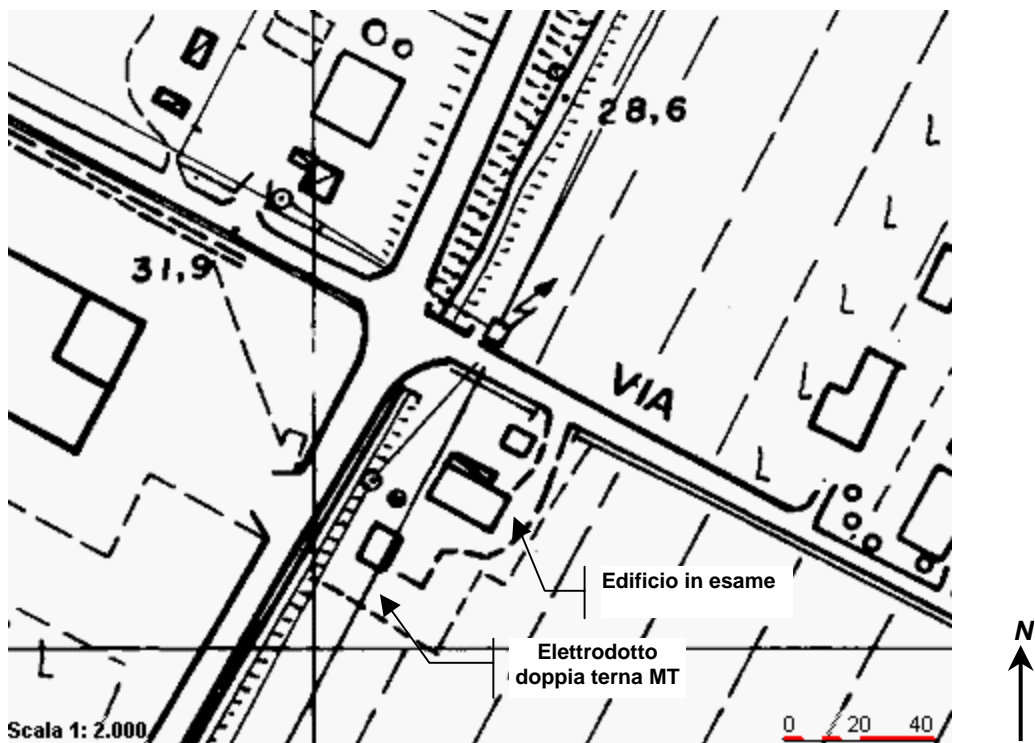


Fig. 2: pianta dell'area di interesse (si notino l'elettrodotto e l'edificio in esame).

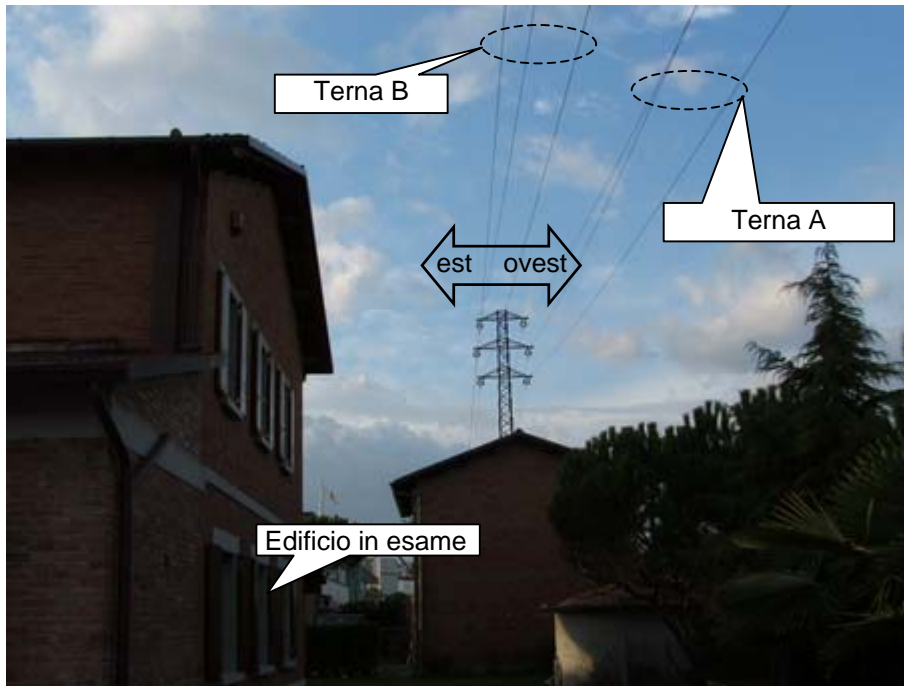


Fig. 3: vista dell'edificio in esame e dell'elettrodotto a doppia terna con i conduttori della Terna A sul lato ovest e quelli della Terna B sul lato est.

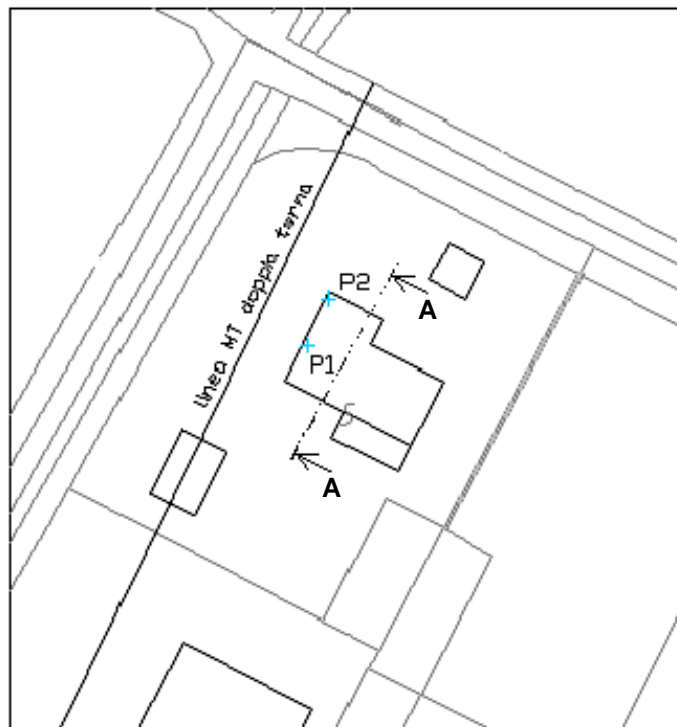


Fig. 4: pianta dell'edificio in esame e punti di misura P_1 e P_2

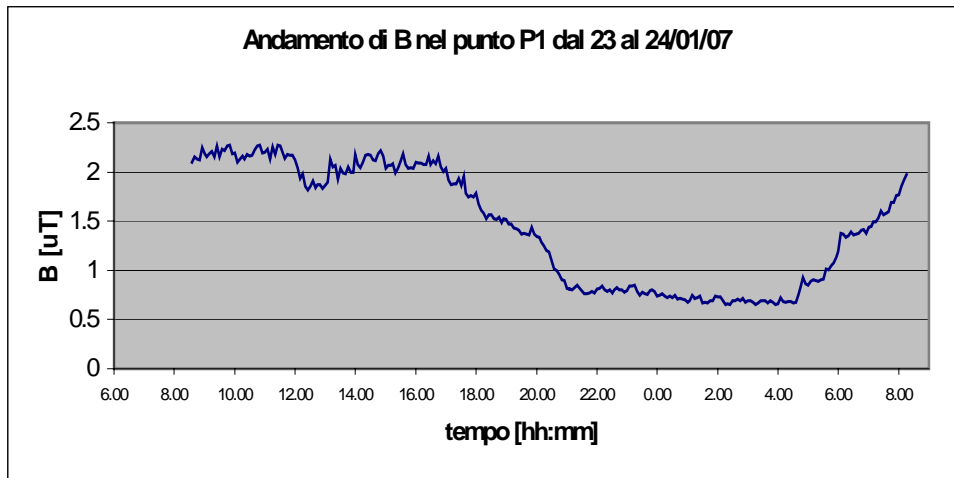


Fig. 5: valori istantanei di induzione magnetica misurati nell'arco delle 24 ore nel punto P₁

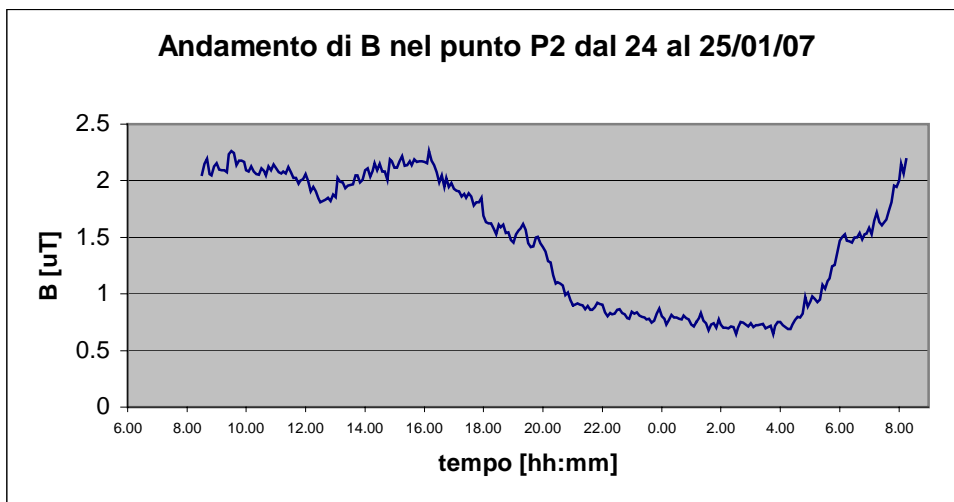


Fig. 6: valori istantanei di induzione magnetica misurati nell'arco delle 24 ore nel punto P₂

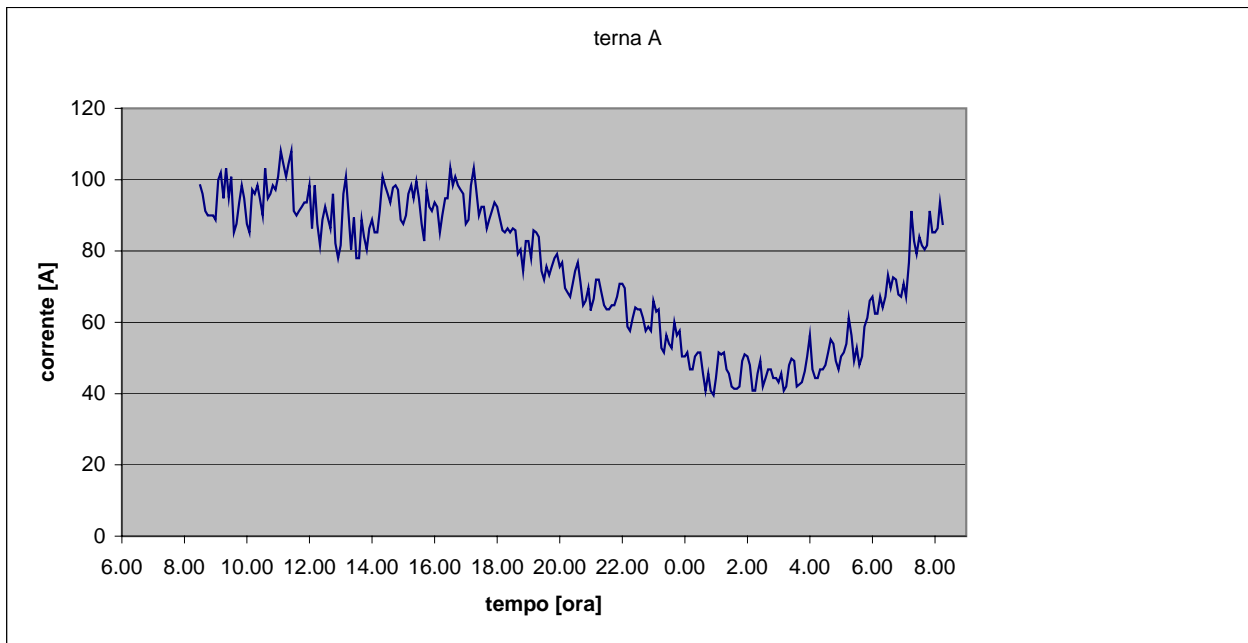


Fig. 7: andamento della corrente della terna A nell'intervallo dal 23 al 24/01/07

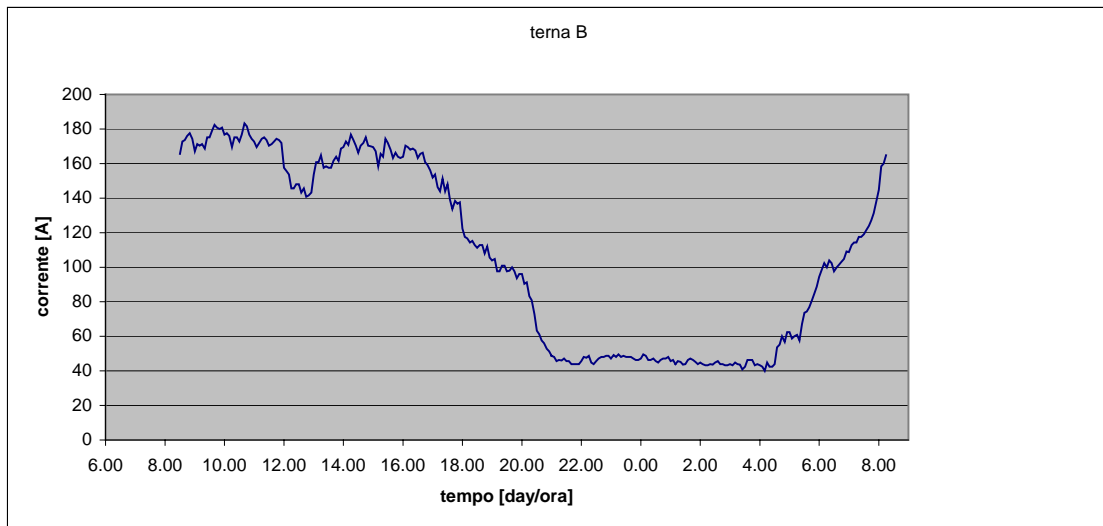


Fig. 8: andamento della corrente della terna B nell'intervallo dal 23 al 24/01/07

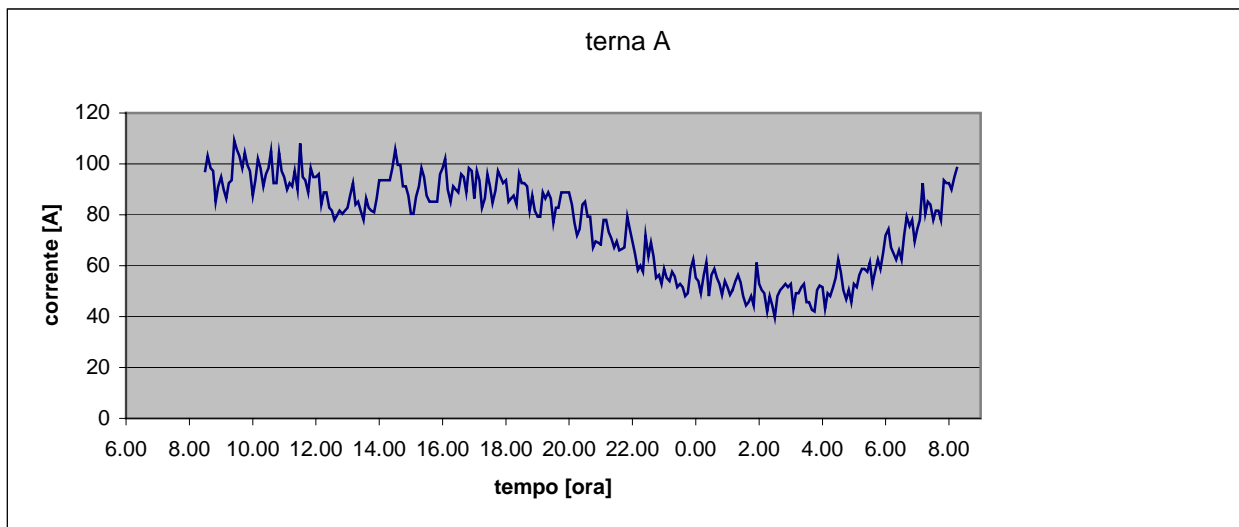


Fig. 9: andamento della corrente della terna A nell'intervallo dal 24 al 25/01/07

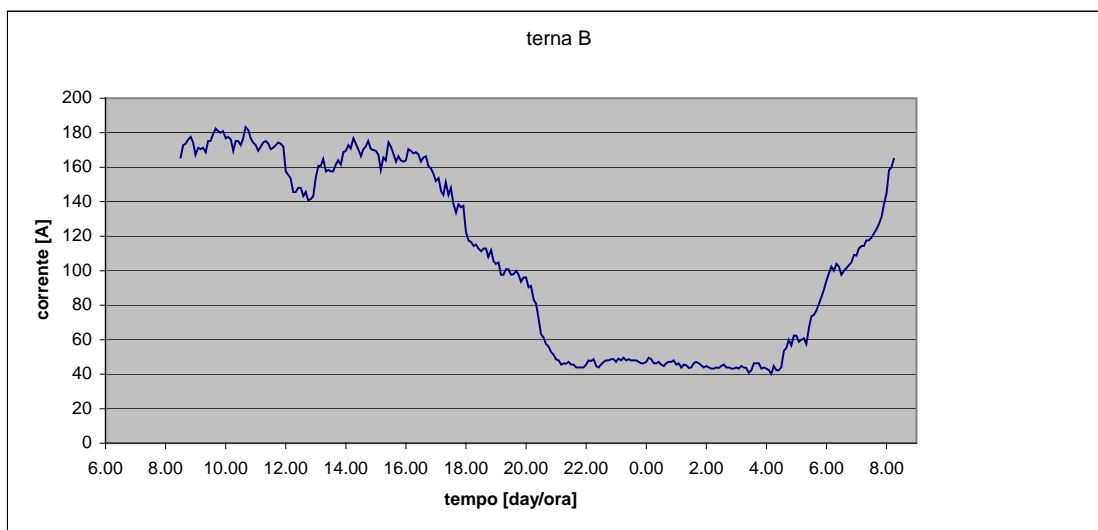


Fig. 10: andamento della corrente della terna B nell'intervallo dal 24 al 25/01/07

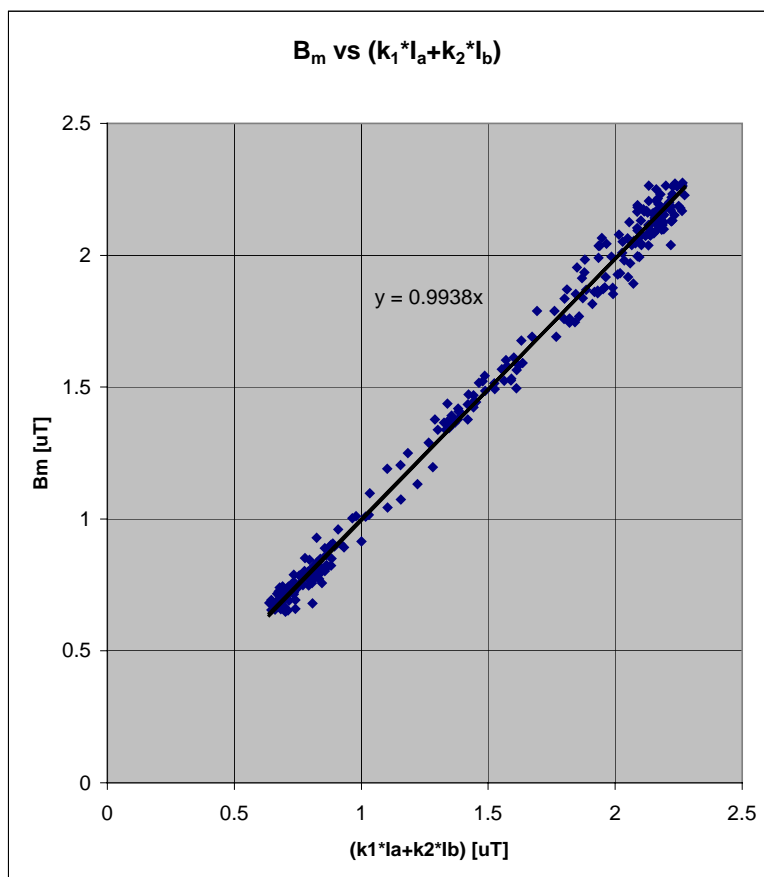


Fig. 11: analisi di correlazione tra B misurato e B calcolato secondo la (15) per il punto di misura P1

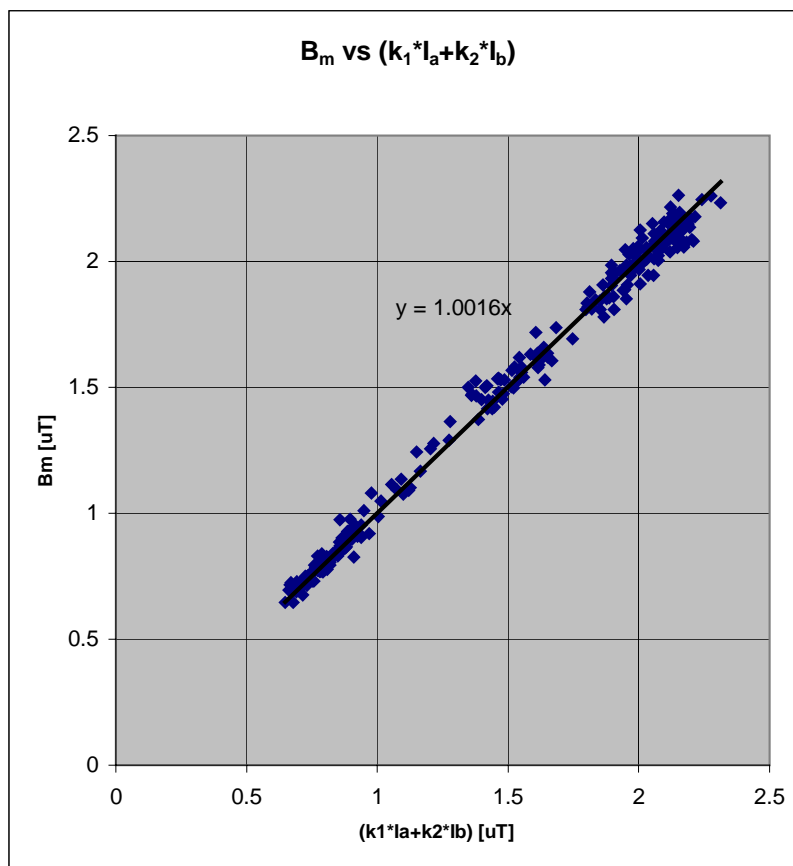


Fig. 12: analisi di correlazione tra B misurato e B calcolato secondo la (15) per il punto di misura P₂

Tabelle

Tabella 1: valori medio, minimo e massimo di B nei punti di misura P_1 e P_2

Punto	B50 [μ T]	Bmin [μ T]	Bmax [μ T]	data-ora di inizio misura	data-ora di fine misura
P1	1,47	0,65	2,27	23/01/07 - 8:30:00	24/01/07 - 08:25:00
P2	1,54	0,65	2,26	24/01/07 - 8:30:00	25/01/07 - 08:25:00

Tabella 2: Valori medio, minimo e massimo della corrente delle terne A e B nei giorni di misura

terna	I50 [A]	Imin [A]	Imax [A]	data-ora di inizio misura	data-ora di fine misura
A	78	39,6	108	23/01/07 - 8:30:00	24/01/07 - 08:25:00
B	106,8	40	183,2	23/01/07 - 8:30:00	24/01/07 - 08:25:00
A	81,6	39,6	109,2	24/01/07-08:30:00	25/01/07-08:25:00
B	108,8	40	176,8	24/01/07-08:30:00	25/01/07-08:25:00

Bibliografia

[1] DPCM 8 luglio 2003, "Fissazione dei limiti di esposizione, dei valori di attenzione e degli obiettivi di qualità per la protezione della popolazione dalle esposizioni ai campi elettrici e magnetici alla frequenza di rete (50 Hz) generati dagli elettrodotti", Pubblicato in G.U. n. 200 del 29 Agosto 2003.

[2] M. Benes, M. Comelli, A. Bampo, R. Villalta, "Procedure di misura di campi elf in prossimità di configurazioni complesse di linee elettriche", AIRP- Convegno Nazionale di Radioprotezione: Campi neutronici nella terapia medica Catania, 15-17 settembre 2005.

[3] Norma CEI 11-60, "Portata al limite termico delle linee aeree esterne con tensione maggiore di 100 kV", Giugno 2002, 2^a Edizione, F 6507.

[4] Sentenza n. 307 del 7 Ottobre 2003 della Corte Costituzionale.

[5] Norma CEI 211-4, "Guida ai metodi di calcolo dei campi elettrici e magnetici generati da linee elettriche", 1996, Fascicolo 2840.

[6] G. Mazzanti, "The role played by current phase-shift on magnetic field established by ac double-circuit overhead transmission lines. Part I: static analysis", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 21, n. 2, pp. 939-948, aprile 2006.

- [7] G. Mazzanti, "The role played by current phase-shift on magnetic field established by ac double-circuit overhead transmission lines. Part II: dynamic analysis", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 21, n. 2, pp. 949-958, aprile 2006.
- [8] G. Mazzanti, "Uncertainties in the calculation of continuous exposure of general public to magnetic field from ac overhead transmission lines", Atti del 2005 IEEE Power Engineering Society (PES) General Meeting, S. Francisco, California (U.S.A.), 12-16 giugno 2005, ISBN 0-7803-9156-X/05.
- [9] D. Andreuccetti, N. Zoppetti, R. Conti, N. Fanelli, A. Giorgi, R. Rendina, "Magnetic fields from overhead power lines: advanced prediction techniques for environmental impact assessment and support to design", Atti della 2003 IEEE Power Tech Conference, Bologna (Italia), giugno 2003.
- [10] Legge Regionale Emilia Romagna 31/10/2000, n. 30, "Norme per la tutela e la salvaguardia dell'ambiente dall'inquinamento elettromagnetico". Bollettino Ufficiale della Regione Emilia Romagna del 3 novembre 2000, n. 154.
- [11] Direttiva Applicativa del 20/02/01 n. 197 della L.R. 31/10/2000 n. 30, "Direttive per l'applicazione della L.R. 31/10/2000, n. 30 recante norme per la tutela e la salvaguardia dell'inquinamento elettromagnetico". Bollettino Ufficiale della Regione Emilia Romagna del 16 marzo 2001, n. 40 (vedi anche Delibera della giunta regionale Emilia Romagna n. 1449 del 17/7/2001: "Modifiche per l'inserimento di alcuni elementi di semplificazione alla Deliberazione 20 febbraio 2001 n. 197).
- [12] D. Di Cola, "Fasce di rispetto: un fattore regionale", *Il Giornale dell'installatore elettrico*, n. 13, pp. 78-80, ottobre 2004.
- [13] Norme CEI 211-6, "Guida per la misura e la valutazione dei campi elettrici e magnetici nell'intervallo di frequenza 0 Hz – 10 kHz, con riferimento all'esposizione umana", 1^a edizione, 2001.
- [14] G. Grandi, M. Landini, "Sul calcolo e la misura di campi magnetici a bassa frequenza" Memoria dei Ricercatori di Elettrotecnica, Messina, Giugno 2002
- [15] L. Alberti, "Incontro sui campi elettromagnetici – Comune di Anzola dell'Emilia (BO)" in data 2 Dicembre 2003
- [16] Norma CEI 106-11; Guida per la determinazione delle fasce di rispetto per gli elettrodotti secondo le disposizioni del DPCM 8 luglio 2003 (Art. 6) - Parte 1: Linee elettriche aeree e in cavo