

VALUTAZIONE NUMERICA DEL CAMPO MAGNETICO GENERATO DA ELETTRODOTTI: APPROCCI POSSIBILI E SOLUZIONI CONCRETE ALLA LUCE DELLA NORMATIVA VIGENTE

N.Zoppetti, D.Andreuccetti

1 Introduzione

Negli ultimi quattro anni l'insieme delle norme legislative che disciplinano l'esposizione dell'uomo al campo elettrico e al campo magnetico a frequenza estremamente bassa (ELF – Extremely Low Frequency) generati da elettrodotti è stato totalmente rivoluzionato fino a giungere alla situazione attuale in cui ad una legge quadro di riferimento (legge n. 36 del 22 febbraio 2001) si affianca una serie di decreti attuativi e norme tecniche. Il principale decreto attuativo della legge 36 è il DPCM 8/07/2003 nel quale vengono fissati i limiti di campo definiti nella legge quadro. Se da un lato questa situazione introduce un sensibile miglioramento rispetto alle precedenti, entrando nel merito vedremo come vi sono alcuni punti controversi ed apparenti contraddizioni.

Relativamente alle norme tecniche invece ci si riferisce alla CEI 211-6 (gennaio 2001) per le misure ed alla CEI 211-4 (luglio 1996) per quanto riguarda i calcoli. Quest'ultima descrive gli algoritmi di calcolo dei campi generati da elettrodotti modellati come fasci di conduttori rettilinei indefiniti, paralleli tra loro ed al suolo. È poi opportuno citare la CEI 11-60 a cui ci si riferisce nel DPCM 8/07/2003 e che definisce il limite superiore della intensità di corrente che può scorrere continuamente sui conduttori di un elettrodotto ad alta tensione.

In questo articolo ci si propone di:

- fornire un quadro sintetico delle prescrizioni imposte dalle normative vigenti soffermandosi in particolare sui punti controversi emersi durante numerose occasioni di applicazione;
- descrivere un possibile approccio alla modellazione tridimensionale degli elettrodotti che tenga conto dell'andamento curvilineo dei conduttori superando i limiti derivanti dall'utilizzo di conduttori rettilinei ed indefiniti;
- confrontare con delle misure i risultati dei calcoli ottenuti utilizzando modelli diversi di elettrodotto in modo da evidenziare quale algoritmo dia i migliori risultati.
- verificare e commentare le prescrizioni imposte dalla normativa nel caso degli esempi considerati.

2 Sintesi delle prescrizioni imposte dalla normativa vigente

La legge 36 ed il DPCM 8/07/2003 introducono un duplice criterio di protezione dell'uomo dalle esposizioni ai campi elettrici e magnetici generati da elettrodotti. Il primo criterio si riferisce al valore "di immissione" dei campi, misurabile in un punto in un determinato ambiente e si concretizza nella definizione dei cosiddetti *limiti di esposizione, valori di attenzione ed obiettivi di qualità*. Il secondo criterio si riferisce invece al valore "di emissione" inteso come valore di campo generato da un determinato insieme di sorgenti e calcolato secondo un algoritmo noto, supponendo che sulle linee scorrano determinate correnti di riferimento. Esso si concretizza nella definizione delle cosiddette *fasce di rispetto*.

2.1 Limiti di esposizione, valori di attenzione ed obiettivo di qualità

La definizione di limite di esposizione, valore di attenzione e di obiettivo di qualità viene data nell'articolo 3 della legge 36, mentre i relativi valori numerici sono stati specificati negli articoli 3 e 4 del DPCM 8/07/2003. In particolare per quanto riguarda il campo magnetico, sono fissati rispettivamente a 100, 10 e 3 μT da intendersi come mediana sulle 24 ore in normali condizioni di esercizio degli elettrodotti considerati. Il riferimento alla mediana fa sì che al valore di immissione misurato non contribuiscano sorgenti di tipo occasionale, quali dispositivi di uso domestico a cui non si applicano le disposizioni della legge 36. Il riferimento alle normali condizioni di esercizio permette di escludere condizioni eccezionali come guasti o sovraccarichi sugli elettrodotti. Un primo elemento di confusione è proprio la definizione di "*normali condizioni di esercizio*"; la

norma CEI 11-60 definisce la portata in corrente al variare della tipologia di conduttore, ma non è di alcun aiuto nel caso si voglia valutare se un certo numero di elettrodotti che contribuiscono a generare il campo magnetico in una determinata porzione di territorio stia o meno operando in normali condizioni di esercizio.

Il limite di esposizione (100 μT) non deve essere superato in alcuna condizione ed è inteso come limite di protezione da effetti acuti. Il valore di attenzione (10 μT) invece non deve essere superato negli ambienti adibiti a permanenza prolungata (oltre le quattro ore al giorno) e costituisce "misura di cautela ai fini della protezione da possibili effetti a lungo termine".

L'obiettivo di qualità infine viene introdotto ai fini "della progressiva minimizzazione delle esposizioni..." e si riferisce (art 4 del DPCM 8/07/2003) alla progettazione di nuovi elettrodotti (a) o alla progettazione di nuovi insediamenti in prossimità di elettrodotti esistenti (b). Appare di difficile applicazione il riferimento all'obiettivo di qualità inteso come mediana sulle 24 ore dei valori di campo nel caso della progettazione di nuovi elettrodotti, in cui di regola le mediane delle correnti non sono stimabili se non grossolanamente.

In generale il fatto che il limite di esposizione, il valore di attenzione e l'obiettivo di qualità siano definiti come mediana dei valori di campo ne rende difficile la verifica attraverso calcoli, anche nel caso si sia in grado di stimare con sufficiente accuratezza l'intensità delle correnti che scorrono sugli elettrodotti considerati.

Nel caso si consideri un solo elettrodotto, essendo garantita la proporzionalità tra campo magnetico ed intensità di corrente, il valore di corrente da utilizzare per i calcoli è la mediana sulle 24 ore nelle normali condizioni di esercizio, per cui manca tuttavia una definizione chiara. Si potrebbe per esempio utilizzare il più alto valore registrato nell'arco di un anno della mediana calcolata in ciascun giorno, scartando i valori considerati "eccezionali", oppure un valore convenzionale stabilito in base alle caratteristiche dell'elettrodotto.

Nel caso in cui siano significativi i contributi al campo generati da più di una linea, questi si compongono con modalità che dipendono dalle intensità delle correnti sulle linee, dalle relative fasi e dalla direzione assunta per i flussi di potenza. In altre parole, utilizzando su ciascuna linea la mediana della corrente non è detto che il valore di campo calcolato rappresenti una stima credibile della mediana del campo totale se non si considerano degli scenari completi che tengano conto di tutti i fattori citati. Se poi si vuole utilizzare il criterio della massima cautela considerando lo scenario che dà luogo al valore di campo maggiore, occorre tener presente che in generale le modalità con cui si sommano i contributi dovuti a linee diverse dipendono anche dal punto di calcolo considerato, per cui si potrebbero dover considerare configurazioni diverse per punti di calcolo diversi.

2.2 Fasce di rispetto

La legge n. 36, all'articolo 4 (comma 1 lettera h) definisce la fascia di rispetto per gli elettrodotti come la fascia all'interno della quale *"non è consentita alcuna destinazione di edifici ad uso residenziale, scolastico, sanitario ovvero ad uso che comporti una permanenza non inferiore a quattro ore"*.

Il DPCM 8/07/2003 specifica che per il calcolo di tali fasce ci si debba riferire al valore di campo fissato dall'obiettivo di qualità (3 μT) ed "alla portata in corrente in servizio normale dell'elettrodotto, come definita dalla norma CEI 11-60". La norma citata definisce la portata in corrente in servizio normale come "la corrente che può essere sopportata da un conduttore per il 100% del tempo con limiti accettabili del rischio di scarica ... e dell'invecchiamento". La norma inoltre fornisce il valore di tale portata per una tipologia di conduttore di riferimento e spiega come ricavarla nel caso di tipologie diverse.

La definizione della metodologia di calcolo per la determinazione delle fasce di rispetto viene affidata (Art. 6 comma 2 del DPCM) al sistema APAT-ARPA che non ha ancora specificato una procedura definitiva.

Il fatto che ci si riferisca all'obiettivo di qualità ed il vuoto normativo conseguente alla mancata pubblicazione delle procedure di calcolo delle fasce contribuiscono ad alimentare l'interpretazione

secondo cui queste siano uno strumento di pianificazione urbanistica e quindi da applicarsi solo in caso di nuovo edificato o di nuovi elettrodotti.

3 Algoritmi di calcolo del campo magnetico

Si presentano di seguito due possibili approcci per il calcolo del campo magnetico; il primo utilizza un modello semplificato dell'elettrodotto, il secondo un modello più complesso. Non si fornisce qui una descrizione dettagliata degli algoritmi considerati (per la quale si rimanda alle citazioni in bibliografia [1], [2]) ma se ne illustrano le caratteristiche generali in modo da poter confrontare e commentare i risultati dei calcoli.

In generale il vettore induzione magnetica \vec{B} generato da un conduttore C percorso da corrente I in un generico punto Q può essere calcolato secondo la seguente espressione:

$$\vec{B}(Q) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_C \frac{d\vec{C} \times \vec{r}}{r^3} \quad (1)$$

dove \vec{r} è il vettore che inizia in un generico punto P appartenente al conduttore e termina nel punto di calcolo Q mentre $d\vec{C}$ è l'elemento infinitesimo di conduttore. In genere l'integrale di linea della (1) deve essere risolto per via numerica; solo in un numero limitato di casi dalla geometria particolarmente semplice è possibile risolverlo analiticamente.

3.1 Algoritmi bidimensionali

Le norme tecniche ed in particolare la CEI 211-4 definiscono e si riferiscono ad algoritmi di calcolo secondo i quali gli elettrodotti sono rappresentati da fasci di conduttori rettilinei e paralleli tra loro ed al terreno, considerato in genere piano e trasparente per quanto riguarda il campo magnetico. Ciò permette di calcolare analiticamente il contributo al campo totale dovuto a ciascun conduttore utilizzando la nota espressione di Biot-Savart per cui, posto \hat{i}_c il versore del conduttore orientato come il flusso della corrente, la (1) diventa:

$$\vec{B}(Q) = \frac{\mu_0 I}{2\pi \cdot |\hat{i}_c \times \vec{r}|^2} \cdot \hat{i}_c \times \vec{r} \quad (2)$$

ed è possibile quindi ottenere il campo totale sommando i contributi di tutti i conduttori considerati secondo il principio di sovrapposizione degli effetti.

3.2 Algoritmi tridimensionali

È possibile tenere conto del reale andamento dei conduttori nello spazio modellando ciascuno di essi con una curva detta catenaria la cui espressione analitica può essere ricavata in funzione delle coordinate dei punti di sospensione dei conduttori e di un parametro che dipende sia dalla tensione meccanica a cui il conduttore è soggetto sia dalle sue caratteristiche costruttive [3]. In questo caso l'integrale della (1) deve essere svolto per via numerica. Disponendo della espressione analitica della curva è possibile utilizzare due differenti strategie di integrazione numerica.

La prima consiste nel rappresentare il conduttore con un sottoinsieme delle sue corde e di applicare la (1) a ciascun segmento considerato; il campo generato dal conduttore sarà dato in questo caso dalla somma dei contributi generati dai segmenti conduttori che lo rappresentano.

La seconda strategia consiste nel ricavare analiticamente l'espressione della funzione integranda della (1) e di lasciare alle procedure di integrazione numerica l'onere di gestire l'accuratezza della rappresentazione del conduttore in funzione dell'accuratezza desiderata per i risultati del calcolo.

La seconda strategia è sicuramente più flessibile in quanto adatta la rappresentazione del conduttore alla distanza dal punto di calcolo cosicché un conduttore molto lontano viene modellato meno accuratamente di uno vicino, che contribuisce in modo più significativo al campo totale e per il quale è quindi auspicabile una modellazione più accurata.

Gli algoritmi descritti considerano il terreno del tutto trasparente dal punto di vista del campo magnetico. In linea di principio nel terreno vengono indotte delle correnti che, in caso di terreni

particolarmente conduttivi, possono contribuire in misura apprezzabile al campo totale. Si tratta comunque di fenomeni che possono essere trascurati, almeno in prima approssimazione, specialmente se si è interessati al rispetto delle normative, cioè nel caso in cui si considerano valori di campo relativamente elevati [4].

4 La validazione dell' algoritmo tridimensionale

Il modello di calcolo tridimensionale è stato sviluppato nell'ambito di una tesi di laurea in Ingegneria Elettronica svolta presso l'Istituto di Fisica Applicata "Nello Carrara" IFAC-CNR ([2]) ed è stato ulteriormente perfezionato nell'ambito di una convenzione stipulata tra IFAC-CNR ed ARPA Toscana. Uno degli obiettivi della convenzione è lo sviluppo di applicazioni che, attingendo ad un archivio delle sorgenti di campo a frequenza industriale, consentano il calcolo del campo magnetico secondo l'algoritmo tridimensionale descritto.

In questo contesto, ed in stretta collaborazione con i tecnici ARPAT, le procedure di calcolo sono state sottoposte ad un processo di validazione che ha avuto lo scopo di verificare la capacità del modello di calcolo tridimensionale di fornire valutazioni sufficientemente accurate dell'intensità del campo magnetico generato da un insieme di elettrodotti oggetto di modellazione. Si è potuto constatare come esistano alcune limitazioni alla possibilità di utilizzare misure in ambiente urbano per validare un modello di calcolo dei campi.

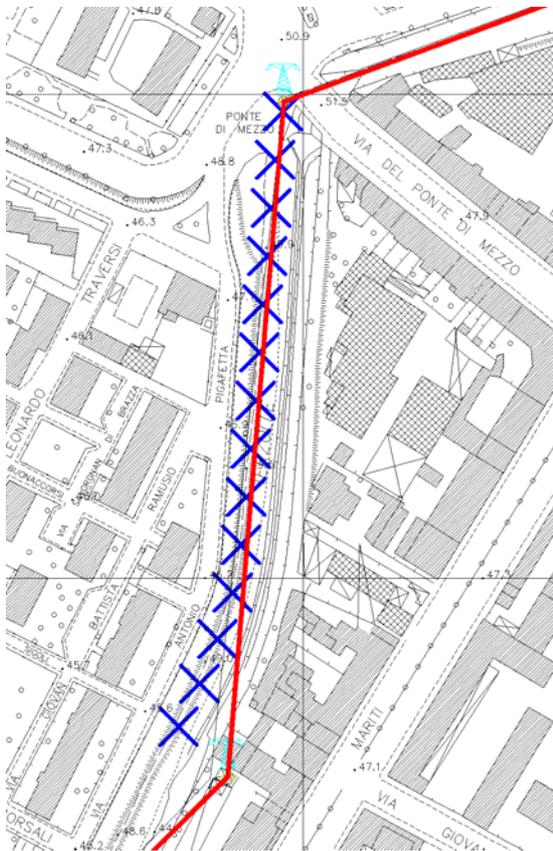


Figura 1: Mappa del sito di validazione

Infatti, il campo magnetico (spesso relativamente debole) generato dagli elettrodotti presi in considerazione viene perturbato e mascherato da numerosi fattori confondenti (linee elettriche interrato, impianti di illuminazione e segnalazione pubblica etc.) per cui diviene impossibile correlare ciò che si misura con i risultati del modello. Non si può pensare di risolvere il problema includendo nel modello anche le sorgenti confondenti perché, pur supponendo di riuscire a reperire le informazioni topografiche e strutturali necessarie e prescindendo dalle risorse che occorrerebbe mettere in campo per farlo, sarebbe comunque pressoché impossibile disporre, relativamente a tali sorgenti, dei dati sulle intensità di corrente e sulle relazioni di fase necessari ad elaborare una valutazione accurata.

Questo significa che il modello di calcolo su cui stiamo lavorando, come qualunque altro modello previsionale sui campi elettromagnetici di tipo deterministico, è adatto alla caratterizzazione dell'emissione di un insieme predefinito di sorgenti, piuttosto che alla previsione del valore "di immissione", riscontrabile in un punto scelto casualmente in un determinato ambiente.

Ci si è pertanto orientati verso un approccio alla validazione in grado di verificare la corretta funzionalità del nucleo del motore di calcolo in un ristretto numero di situazioni semplici, accuratamente modellabili e scelte in modo da mettere alla prova una o più caratteristiche innovative degli algoritmi implementati.

Le campagne di misure eseguite appositamente per la validazione si sono svolte secondo un protocollo che prevede l'impiego di due sonde Emdex II della Enertech Consultants, di cui una lasciata ferma in un punto prefissato e l'altra utilizzata per i rilevamenti nei punti prescelti. La necessità di disporre di uno strumento fisso è legata alle caratteristiche dei dati che il gestore è in grado di fornire relativamente alle correnti che scorrono sulle linee. In particolare, il gestore registra

per ciascuna linea quattro valori di corrente per ogni ora, ad intervalli regolari di 15 minuti. Lo strumento fisso è stato posizionato in un punto che si è verificato o si supponeva essere ragionevolmente lontano da sorgenti di campo che non fossero gli elettrodotti di interesse. Dove era presente una sola linea elettrica significativa, l'indicazione di questo strumento ha permesso di depurare i dati misurati dalle fluttuazioni della corrente di linea. Dove invece erano presenti due linee (come nel caso riportato di seguito), lo strumento fisso ha permesso quanto meno di avere indicazioni sulla stabilità delle correnti.

In Figura 1 è riportata la planimetria di uno dei siti di validazione; le croci indicano i punti dove sono state effettuate le misure. Essi sono allineati lungo l'argine del torrente Terzolle nella periferia nord di Firenze. L'argine costituisce un passaggio pedonale e ciclabile privo di illuminazione e sufficientemente lontano da altre possibili sorgenti di campo confondenti. Inoltre come si può notare esso corre per un lungo tratto proprio sotto i conduttori delle linee considerate (si tratta di due linee che condividono gli stessi sostegni a doppia terna), per cui risultano evidenti gli effetti della curvatura dei conduttori in termini di campo, calcolato e misurato.

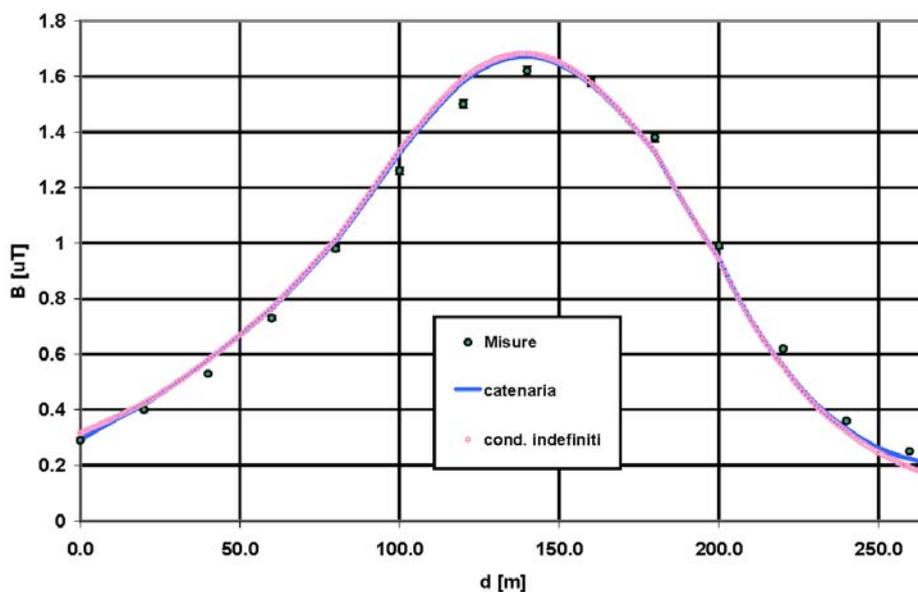


Figura 2: Risultati del calcolo

conduttore rettilineo indefinito parallelo al suolo passante per il punto della catenaria più vicino al punto di calcolo considerato (curva rosa). Come si può osservare le due curve sono quasi sempre sovrapposte tranne che al centro ed agli estremi della campata considerata. Al centro della campata il conduttore indefinito è posizionato alla minima distanza da terra e si discosta dalla catenaria che tende a risalire verso i punti di sospensione.

Agli estremi della campata avvengono contemporaneamente due fenomeni. Il primo è duale al precedente, infatti agli estremi della campata il conduttore rettilineo viene posizionato alla massima altezza possibile cioè all'altezza dei punti di sospensione mentre le catenarie si abbassano rapidamente fino a raggiungere la quota minima circa al centro della campata. Il secondo fenomeno, che in questo caso è dominante rispetto al primo, si manifesta nel caso in cui le campate attigue a quella considerata non siano con questa allineate. In particolare utilizzando i conduttori rettilinei viene sempre considerata solo una campata (quella più vicina al punto di calcolo) e quindi la distribuzione di campo conserva localmente la simmetria rispetto all'asse della campata. Utilizzando il modello tridimensionale invece, quando si calcola l'induzione presso un sostegno della linea, si risente del contributo delle campate sia a monte che a valle del sostegno e la natura vettoriale dei campi fa sì che, in caso di cambi di direzione pronunciati della linea, si determinino dissimmetrie della distribuzione di campo rispetto all'asse.

I calcoli rappresentati in Figura 2 sono stati eseguiti procedendo lungo la linea spezzata che unisce i punti di misura, partendo dal punto di misura più in alto nella planimetria (d=0 m) fino a quello più in basso (d=260 m circa). In particolare oltre al modello tridimensionale (curva blu a tratto continuo) si è sostituito a ciascuna catenaria il

Gli scostamenti osservabili in Figura 2 sono comunque relativamente piccoli (massimo 10%) e da soli non basterebbero a motivare gli sforzi fatti sia per studiare il nuovo algoritmo sia per reperire i dati necessari a modellare gli elettrodotti. Occorre però ricordare che i conduttori rettilinei ed indefiniti utilizzati passano per il punto della catenaria più vicino al punto di calcolo e che quindi anche in questo caso si presuppone di disporre del modello tridimensionale dell'elettrodotto. In mancanza di tale modello i conduttori rettilinei possono essere posizionati in base a rilievi dell'altezza da terra dei conduttori reali, che devono essere ripetuti per ogni sezione trasversale di campata considerata.

5 Determinazione della fascia di rispetto

In Figura 3 sono riportati i risultati dei calcoli atti a determinare la fascia di rispetto relativa alle linee dell'esempio precedente. La norma CEI 11-60 specifica per il conduttore di riferimento e la

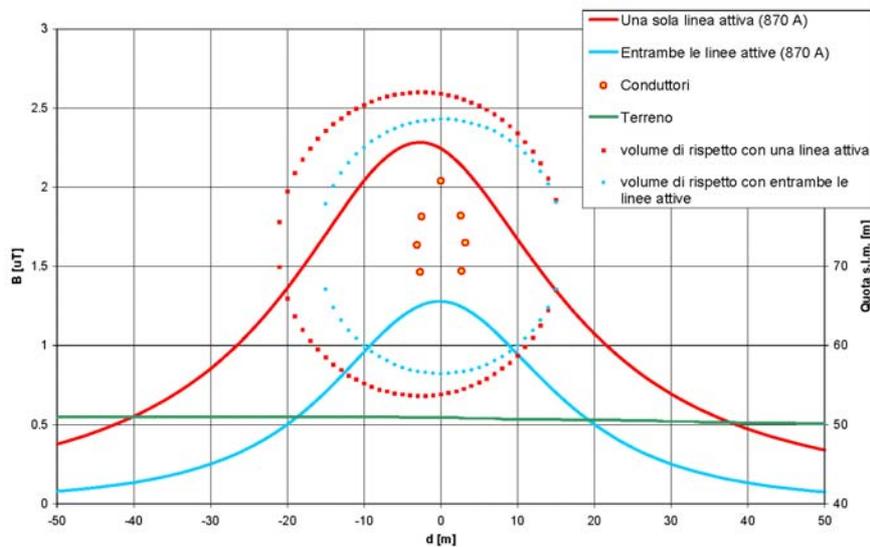


Figura 3: Calcolo della fascia di rispetto

tensione di linea di 132 kV una intensità di corrente pari a 870 A. Si è considerato un piano verticale trasversale alla linea e si sono calcolati i campi considerando in un caso entrambe le linee percorse dalla corrente di 870 A (curva azzurra) in un secondo caso solo una di esse è percorsa dalla corrente specificata mentre l'altra è supposta "aperta" (curva rossa). Oltre alle curve a tratto continuo, che rappresentano l'andamento

dell'induzione magnetica ad un metro da terra calcolato modellando ciascun conduttore con la relativa catenaria (asse delle ordinate a sinistra), in figura sono riportate a tratteggio anche le curve di livello a 3 microtesla sul piano verticale (asse delle ordinate a destra). Una recente circolare del ministero dell'ambiente infatti indica che l'ampiezza della fascia di rispetto deve essere determinata proiettando a terra il volume di rispetto a 3 microtesla calcolato utilizzando le correnti descritte nella norma CEI 11-60. Questo implica che in un caso come questo anche se al suolo i 3 microtesla non vengono mai raggiunti, utilizzando la procedura specificata si ottiene una fascia di rispetto ampia oltre 30 metri. Occorre tuttavia osservare che sotto ai conduttori i 3 microtesla vengono raggiunti a meno di 4 o 6 metri di altezza sul terreno (considerando rispettivamente una o entrambe le linee "attive") corrispondenti circa ad un primo ed un secondo piano di un ipotetico edificio. La procedura indicata ha dunque il pregio di svincolarsi dall'altezza di eventuali edifici presenti in prossimità degli elettrodotti considerati, ma può portare ad imporre dei vincoli esageratamente restrittivi nel caso di conduttori molto alti sul terreno.

Un secondo aspetto da sottolineare è legato al fatto che in questo caso considerando una sola linea percorsa da corrente si ottengono valori di campo più alti e quindi fasce di rispetto più ampie che con correnti di uguale ampiezza su entrambe le linee. Questo fenomeno, noto e prevedibile, è dovuto alla particolare disposizione dei conduttori per cui i contributi al campo generati dalle due linee si elidono piuttosto che sommarsi; tuttavia la normativa non specifica come comportarsi in questo genere di casi, tutt'altro che rari, e viene lasciato agli enti adibiti al controllo o al tecnico che esegue le valutazioni l'onere e la responsabilità di scegliere la configurazione da utilizzare.

6 Commenti e conclusioni

Si è presentato un possibile approccio alla modellazione tridimensionale di elettrodotti finalizzata al calcolo dell'induzione magnetica, confrontando i risultati dei calcoli con misure e con risultati ottenuti utilizzando modelli semplificati. La modellazione tridimensionale richiede maggiori sforzi soprattutto in fase di reperimento dei dati tecnici necessari, quali le caratteristiche dei sostegni utilizzati, la loro posizione ed i dati relativi al cablaggio delle campate. D'altra parte la fase di modellazione avviene una volta per tutte ed una volta conclusa permette di disporre di uno strumento molto potente per la valutazione del campo magnetico in prossimità del tratto di elettrodotto modellato prescindendo da sopralluoghi e rilievi che si rendono spesso necessari qualora si utilizzi un approccio al problema di tipo "locale" per cui si modella di volta in volta il tratto di elettrodotto di interesse con il "migliore" fascio di conduttori rettilinei ed indefiniti. L'analisi della normativa vigente ha però evidenziato come pur disponendo di uno strumento potente ed affidabile per il calcolo sia spesso difficile stabilire le condizioni di riferimento per cui eseguire i calcoli di verifica dei limiti di legge.

7 Bibliografia

- [1] Comitato Elettrotecnico Italiano, "Guida ai metodi di calcolo dei campi elettrici e magnetici generati da linee elettriche", Norma CEI 211-4, ottobre 1996.
- [2] Nicola Zoppetti: "*Impatto ambientale dei campi generati dagli elettrodotti: sviluppo ed applicazione di un metodo innovativo per la valutazione*", Tesi di laurea in Ingegneria Elettronica (Università degli Studi di Firenze), discussa il 13 marzo 2002.
- [3] N.Zoppetti, D.Andreuccetti, *Modellazione dei conduttori di un elettrodotto aereo: la catenaria* Report Tecnico IFAC N. TR/AEL/08.03 ISSN 1120-2823, Settembre 2003
- [4] M.Bini, D.Andreuccetti, R.Olmi, N.Zoppetti, *Effetti del terreno nel calcolo dei campi elettrico e magnetico prodotti da linee elettriche* Atti del XIV RiNEm (Riunione Nazionale di Elettromagnetismo) pagg 105-108, Settembre 2002, Ancona.