

UN NUOVO SOFTWARE DI CALCOLO PER IL CAMPO DI INDUZIONE MAGNETICA GENERATO DA ELETTRODOTTI: PHIDEL

Moreno Comelli

Sez. Fisica Ambientale ARPA Friuli Venezia Giulia, via Tavagnacco 91 – 33100 Udine
comelli@arpa.fvg.it

Riassunto

Presso l'ARPA FVG, nell'ambito degli studi sulle radiazioni ELF, è stata condotta un'analisi sui software per il calcolo del campo generato da elettrodotti. Questi comportano alcune difficoltà nell'utilizzo dei dati elettrici e geometrici forniti dai gestori, e si sono rivelati inadeguati a rappresentare configurazioni complesse di linee.

L'innovativo programma chiamato Phidel affronta e risolve tutte le problematiche incontrate, ed i risultati si sono rivelati i più prossimi a quelli ottenuti dalle misure effettuate sul territorio. I dati in output permettono l'immediata sovrapposizione alla cartografia e la determinazione dell'estensione delle fasce di rispetto, di cui al DPCM 8 luglio 2003.

Parole chiave: ELF, software, Phidel, elettrodotti

1. INTRODUZIONE

L'entrata in vigore del DPCM 8 luglio 2003 [9] (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), ha reso necessario approfondire le problematiche inerenti il calcolo di tali campi, al fine di valutare sia l'entità dell'esposizione della popolazione che l'ampiezza delle fasce di rispetto. Queste ora devono essere calcolate in base alle estensioni dei volumi di campo efficace superiori ai limiti previsti dalla normativa, e non più come prestabilita distanza dalle linee.

Sono stati quindi analizzati alcuni dei più diffusi applicativi per il calcolo del campo di induzione magnetica adoperati o sviluppati dai vari Enti ed Agenzie per la Protezione dell'Ambiente: per ciascuno di essi sono stati analizzati il metodo di calcolo, il sistema di riferimento adottato, la regione di campionamento, i dati elettrici e geometrici in ingresso, il tipo di presentazione dei dati in output, il linguaggio di programmazione, i requisiti richiesti e le ulteriori opzioni disponibili.

I prodotti analizzati forniscono predizioni in sostanziale accordo con le misure, ma quasi tutti presentano dei limiti non superabili: non consentono di valutare campi prodotti in configurazioni complesse (tipicamente con linee intersecantisi), talvolta non è possibile tener conto degli sfasamenti tra correnti di linee distinte, oppure effettuare ciclicamente il calcolo su set di dati riguardanti la storia della linea. Per questi motivi è stato sviluppato un software, chiamato Phidel, che rispetto a quelli studiati migliora l'algoritmo di calcolo ed organizza i dati in un output opportunamente formattato. Per quanto concerne l'inserimento dei dati elettrici e geometrici, il programma è stato modellato in riferimento al database degli elettrodotti

sviluppato dall’Agenzia, nonché alla tipologia di dati forniti dai gestori delle linee.

2. I REQUISITI DEL NUOVO SOFTWARE

L’analisi di diversi software di calcolo (*CMagnetico* dell’Istituto Trentino di Cultura – Istituto di Ricerca Scientifica del Trentino, *CAMPI* [1] del prof. Daniele Andreuccetti dell’Istituto di Fisica Applicata “Nello Carrara” del Consiglio Nazionale delle Ricerche di Firenze, *LINATCTN* della sezione di Ivrea dell’ARPA Piemonte, *NIR – Calcolo ELF* di Stefano De Donato [4]) e la struttura dei dati a disposizione hanno portato ad implementare in Phidel le caratteristiche riassumibili nei seguenti punti:

- rispetto dei requisiti specificati nella norma CEI 211-4 [8];
- modularità, ossia possibilità di operare a passi intermedi per intervenire sui dati senza dover iniziare da capo l’intero procedimento in caso di modifica di alcuni parametri;
- salvataggio dei dati su file di testo ad ogni passaggio, in modo da poterli facilmente modificare e visualizzare;
- compatibilità con i dati geometrici ed elettrici a disposizione;
- rapidità di esecuzione, a scapito di opzioni inessenziali come visualizzazione tridimensionali delle campate o salvataggio in formati proprietari;
- minore dipendenza possibile da specifici requisiti di sistema;
- minimizzazione delle approssimazioni geometriche nella caratterizzazione della catenaria;
- interfaccia grafica per facilitare l’inserimento dei dati;
- possibilità di elaborare vettori di dati esterni relativi a fasi e correnti (o, in maniera del tutto equivalente, tensioni e potenze) per determinare l’evoluzione storica del campo anche in presenza di più linee senza ricorrere ad esecuzioni ripetute (modalità batch);
- calcolo del campo in punti, su percorsi rettilinei o su piani, con origine, dimensioni e passo di campionamento specificabili (e conseguente confronto immediato con misure sperimentali) senza ricorrere a sezionamenti bidimensionali [2];
- possibilità di specificare due angoli (come in Figura 1) per calcolare il campo su piani inclinati rispetto al sistema di riferimento originario. Tramite questa opzione è possibile ottenere i valori di induzione magnetica relativamente a piani verticali ortogonali alla direzione della campata, in modo di ricavare le fasce di rispetto per i valori limite previsti dalla normativa.

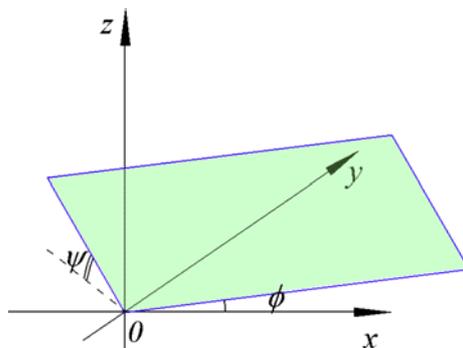


Figura 1 – Angoli relativi al piano di calcolo inclinato.

Sulla base delle caratteristiche appena esposte è stato elaborato il progetto descritto nel capitolo successivo. Le uniche approssimazioni introdotte riguardano la discretizzazione della campata e l'ipotesi di terreno trasparente al campo di induzione magnetica [5, 8].

3. L'ALGORITMO DI CALCOLO

Nel seguito è descritta la procedura che conduce alla formula risolutiva del problema, che è stata implementata nel codice di Phidel. I passaggi sono schematizzabili come segue:

- discretizzazione della campata, approssimata da una spezzata costituita da un numero finito di segmenti di lunghezza determinata;
- calcolo del campo prodotto da ciascun segmento;
- somma di tutti i contributi e calcolo del campo totale;
- determinazione del versore del campo con l'implementazione degli angoli di Eulero;
- calcolo del valore efficace.

3.1. La caratterizzazione della catenaria

La curva che descrive una fune sospesa a due estremi, detta catenaria, è rappresentata analiticamente dalla funzione coseno iperbolico. La sua forma dipende da un parametro (di seguito indicato con a) detto costante di tesatura e definito come rapporto tra tensione e peso del cavo per unità di lunghezza (solitamente alla temperatura di 40°C):

$$z(x) = b + a \cosh\left(\frac{x - x_0}{a}\right) \quad (1)$$

x_0 indica il punto di minimo della curva e il parametro b ne determina il posizionamento in quota.

Nel caso in cui le coordinate dei punti di sospensione, $(0, z_1)$ e (L, z_2) (vedi Figura 2(a)), e la costante di tesatura a siano note, il punto di minimo x_0 viene determinato analiticamente parametrizzando la catenaria in una parabola; si ottiene quindi:

$$x_0 = -a \ln \frac{\frac{z_2 - z_1}{a} + \sqrt{\left(\frac{z_2 - z_1}{a}\right)^2 + e^{-\frac{L}{a}} \left(e^{\frac{L}{a}} - 1\right)^2}}{e^{\frac{L}{a}} - 1} \quad (2)$$

e si ricava b sostituendo le coordinate di uno degli estremi nell'equazione (1).

Una volta caratterizzata la curva, vengono determinate le coordinate degli estremi di ogni segmento che ne approssima l'andamento, come visualizzato in Figura 2(b). La campata di lunghezza L è suddivisa in segmenti la cui proiezione al suolo abbia lunghezza l . Se si indicano con X_0, Y_0 e Z_0 le coordinate del punto di sospensione al traliccio precedente, gli estremi di sospensione del k -esimo segmento sono dati da:

$$x_k = X_0 + kl \cos \phi \quad (3)$$

$$y_k = Y_0 + kl \sin \phi \quad (4)$$

mentre z_k si ricava dalla (1), una volta noto x_k .

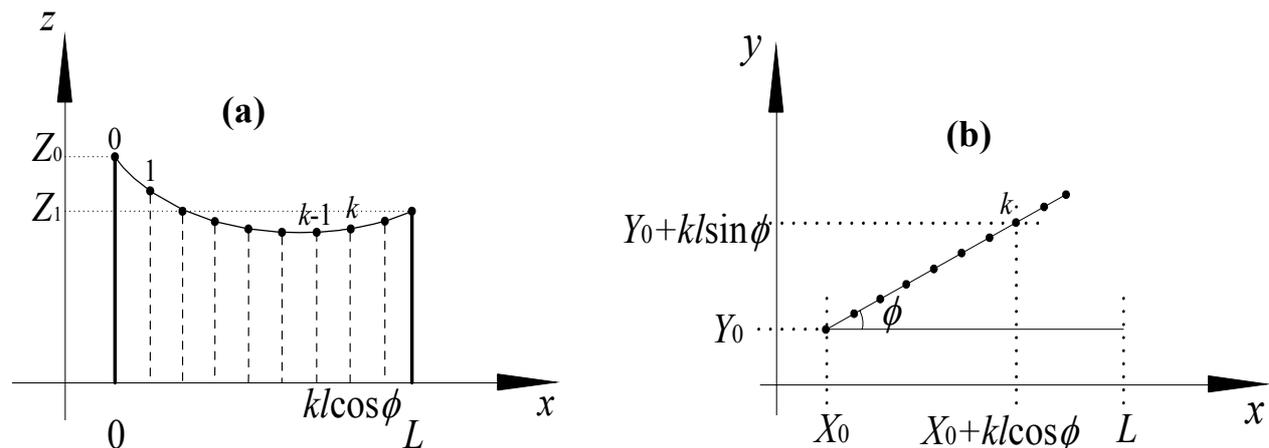


Figura 2 – (a) Individuazione del k -esimo segmento sulla campata di lunghezza L e (b) determinazione delle coordinate degli estremi dei segmenti di lunghezza l come proiezione sul piano xy .

3.2. Campo generato da un segmento percorso da corrente

Per calcolare il campo di induzione magnetica generato dalla corrente che passa in un conduttore rettilineo si applica la legge di Biot-Savart:

$$\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_C \frac{I(\vec{r}') d\vec{l} \times \vec{R}}{R^3} \quad (5)$$

ove $\vec{R} = \vec{r} - \vec{r}'$ è il vettore spostamento che va dal punto \vec{r}' in cui si trova l'elemento di cavo $d\vec{l}$ percorso dalla corrente $I(\vec{r}')$ al punto \vec{r} in cui si calcola il campo. Considerando il caso di un filo rettilineo di lunghezza finita orientato lungo l'asse x , il campo prodotto dall'elemento di corrente $I d\vec{l} = I dx' \vec{i}$ nel piano yz (v. Figura 3) è dato da [13]:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I dx'}{4\pi R^3} \vec{i} \times (-x' \vec{i} + y \vec{j} + z \vec{k}) = \frac{\mu_0 I dx'}{4\pi R^3} (y \vec{k} - z \vec{j}) \quad (6)$$

ove \vec{i} , \vec{j} e \vec{k} sono i versori relativi agli assi cartesiani. Il raggio vettore, che va dall'origine delle coordinate al punto Q in cui si calcola il campo, è dato da $\vec{\rho} = y \vec{j} + z \vec{k}$, e quindi $\vec{\rho} \cdot \vec{B} = 0$: ne consegue che le linee di campo sono perpendicolari al raggio vettore e descrivono delle circonferenze attorno all'asse che contiene il tratto di filo (v. Figura 3), a conferma del fatto che si tratta di un problema a simmetria cilindrica.

Per comodità di esposizione si definisce il versore:

$$\hat{\varepsilon} = \frac{(y \vec{k} - z \vec{j})}{\rho} \quad (7)$$

del quale è noto il punto di applicazione (quello in cui si calcola il campo), e ρ è la distanza

dal punto in cui si calcola il campo dall'asse del filo. La (6) allora diventa:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I \rho dx'}{4\pi R^3} \hat{\varepsilon} \quad (8)$$

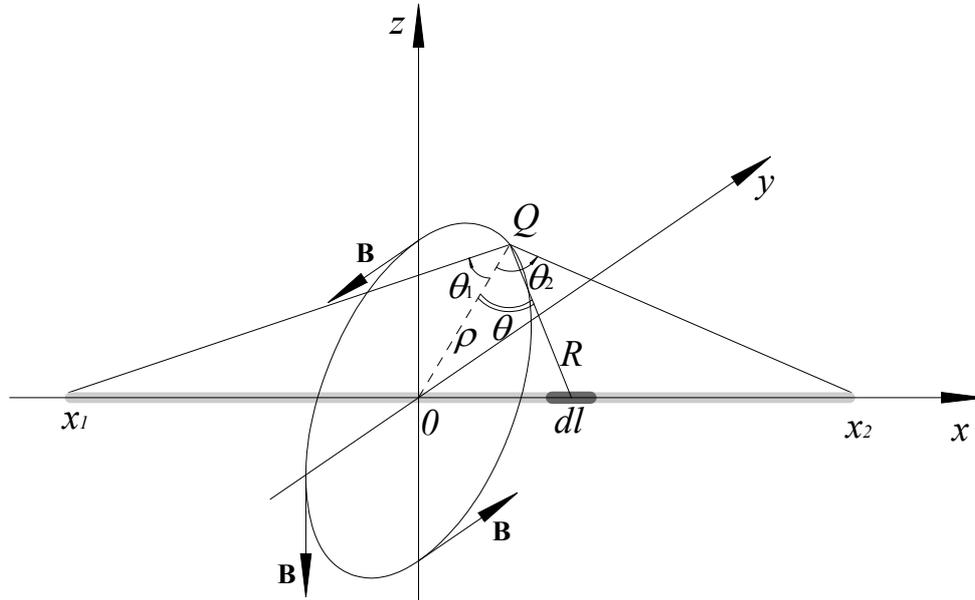


Figura 3 - Determinazione del campo nel piano yz.

In base agli angoli θ , θ_1 e θ_2 definiti in Figura 3 si ricavano le relazioni:

$$\cos \theta = \frac{\rho}{R} \Rightarrow R = \frac{\rho}{\cos \theta} \quad (9)$$

$$\tan \theta = \frac{x'}{\rho} \Rightarrow x' = \rho \tan \theta \quad (10)$$

da cui:

$$dx' = \rho d \tan \theta = \frac{\rho}{\cos^2 \theta} d\theta \quad (11)$$

Sostituendo nella (6) e integrando lungo il tratto di filo si ricava:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi \rho} (\sin \theta_2 - \sin \theta_1) \hat{\varepsilon} \quad (12)$$

Tale relazione non dipende dal sistema di coordinate e vale anche fuori dal piano yz.

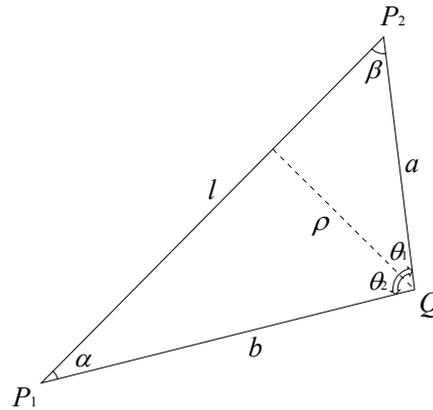


Figura 4 - Definizione delle quantità relative al tratto di filo P_1P_2 in funzione della lunghezza e della distanza degli estremi dal punto di misura Q .

In Figura 4 è mostrato un particolare della Figura 3, e vengono introdotti gli angoli α e β in modo da non dover tener conto dell'orientamento di θ_1 e θ_2 . Dato che:

$$\cos \beta = -\frac{b^2 - a^2 - l^2}{2al} \quad (13)$$

$$\cos \alpha = -\frac{a^2 - b^2 - l^2}{2bl} \quad (14)$$

È possibile riscrivere la (12) in funzione di α e β :

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi\rho} (\cos \alpha + \cos \beta) \hat{e} \quad (15)$$

Poiché per ρ vale:

$$\rho = a \sin \beta \quad (16)$$

e definendo la quantità η come:

$$\eta = \frac{\cos \alpha + \cos \beta}{\rho} \quad (17)$$

la (15) assume la seguente forma semplificata:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \eta \hat{e} \quad (18)$$

L'andamento di tale quantità, nel caso di un segmento lungo 40 m percorso da una corrente di 1600 A, è visualizzato in Figura 5.

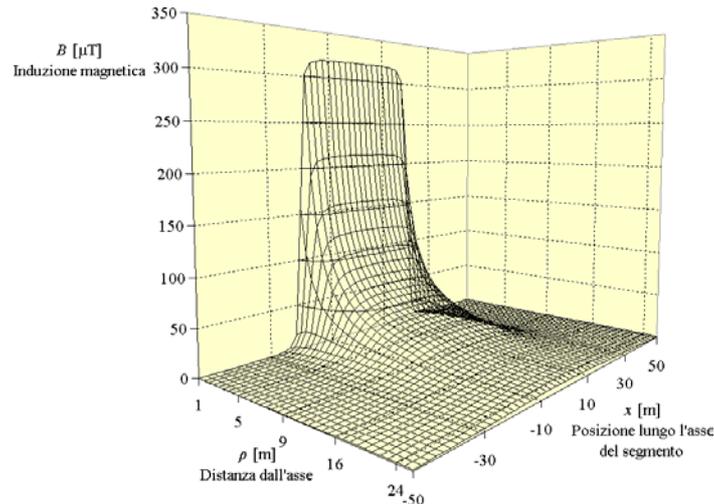


Figura 5 - Campo di un segmento lungo l'asse al variare della distanza.

Dalla (18), nel caso di corrente alternata in regime sinusoidale $I_i \sin(\omega t + \varphi_i)$, ove I_i è la corrente di picco, si ricava il campo generato dall' i -esimo segmento al tempo t :

$$\vec{B}_i(t) = \frac{\mu_0}{4\pi} I_i \sin(\omega t + \varphi_i) \eta_i \hat{\varepsilon}_i \quad (19)$$

3.3. Determinazione di $\hat{\varepsilon}$

Per la caratterizzazione del versore $\hat{\varepsilon}$ si rende necessaria, nel seguito, una breve digressione sulle matrici di rotazione che impiegano gli angoli di Eulero. Questo viene fatto per tener conto dell'orientamento del segmento percorso da corrente, e quindi della direzione di \vec{B} , nella fase successiva di costruzione dell'algoritmo di calcolo.

Poiché si conosce esattamente l'orientamento del versore di \vec{B} relativo ad un cavo percorso da corrente orientato parallelamente all'asse delle ascisse, si opera dapprima una traslazione del segmento considerato in modo che un suo estremo vada a coincidere con l'origine degli assi. Quindi si applicano due rotazioni attorno agli assi (prima z , quindi y) affinché cada sul semiasse positivo delle x . A questo punto una terza rotazione, attorno all'asse x , porta il punto in cui si effettua il calcolo sul piano xz . In questa configurazione si sa che $\hat{\varepsilon}$ coincide (eventualmente a meno di un segno, che tuttavia risulta inessenziale ai fini del calcolo) con \hat{j} , e per determinarne il secondo estremo è sufficiente sommarvi tale versore. Si eseguono infine le stesse operazioni in ordine inverso: dapprima le tre rotazioni e quindi la traslazione spaziale, in modo da riportare il punto di applicazione di $\hat{\varepsilon}$ al punto di partenza.

Dalla Figura 6 si ricavano gli angoli di Eulero; quello relativo alla prima rotazione, attorno all'asse y , è dato da:

$$\sin \psi = \frac{\Delta z}{l} \Rightarrow \psi = \arcsin\left(\frac{\Delta z}{l}\right) \quad (20)$$

mentre quello relativo alla seconda rotazione, attorno all'asse z , da:

$$\tan \phi = \frac{\Delta Y}{\Delta X} \Rightarrow \phi = \arctan\left(\frac{\Delta Y}{\Delta X}\right) \quad (21)$$

Il terzo angolo di Eulero, θ , definisce la rotazione attorno all'asse x . Questa avviene dopo le precedenti trasformazioni (traslazione e rotazioni attorno a z e y), per cui il segmento giace sull'asse x .

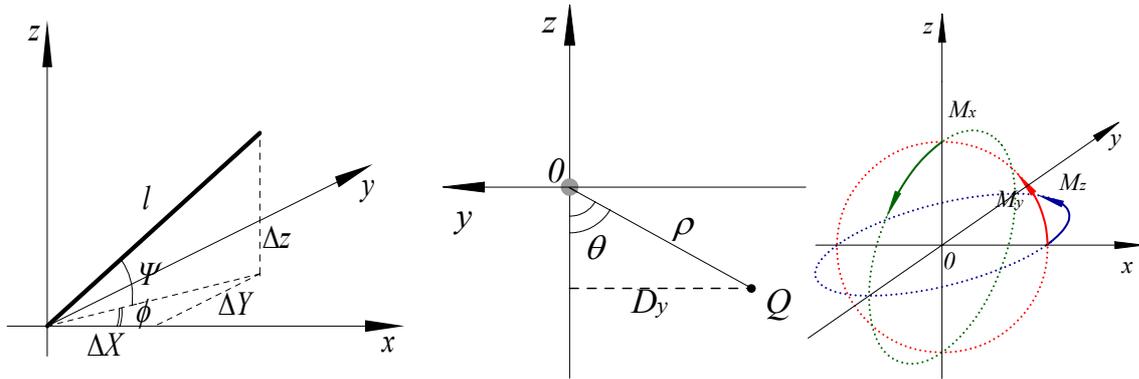


Figura 6 - Angoli definiti dalle rotazioni attorno agli assi e visualizzazione dell'effetto delle matrici di rotazione.

Con riferimento a D_y , definita in Figura 6, si trova:

$$\sin \theta = \frac{D_y}{\rho} \Rightarrow \theta = \arcsin\left(\frac{D_y}{\rho}\right) \quad (22)$$

Le rotazioni appena trattate possono essere espresse in forma matriciale, e vengono di seguito indicate con \hat{M}_x , \hat{M}_y , ed \hat{M}_z . La matrice che descrive la rotazione combinata è data da $\hat{\Omega} = \hat{M}_z \hat{M}_y \hat{M}_x$, mentre la rotazione inversa è definita da $\hat{\Omega}^{-1} = \hat{M}_x^{-1} \hat{M}_y^{-1} \hat{M}_z^{-1}$. L'effetto dell'applicazione di ciascuna matrice è visualizzato in Figura 6.

Indicando con indice s le coordinate relative all'estremo del segmento, con Q quelle relative al punto di misura e con A quelle relative al vertice di $\hat{\varepsilon}$, si ha:

$$\hat{\varepsilon} \equiv \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_A - x_Q \\ y_A - y_Q \\ z_A - z_Q \end{pmatrix} \quad (23)$$

per definizione e, per il ragionamento precedente:

$$\begin{pmatrix} x_A \\ y_A \\ z_A \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{pmatrix} + \hat{\Omega} \left[\hat{\Omega}^{-1} \begin{pmatrix} x_Q - x_s \\ y_Q - y_s \\ z_Q - z_s \end{pmatrix} - \mathbf{j} \right] = \begin{pmatrix} x_Q \\ y_Q \\ z_Q \end{pmatrix} - \hat{\Omega} \mathbf{j} \quad (24)$$

Si ottiene quindi, sostituendo la (24) nella (23):

$$\hat{\varepsilon} = -\hat{\Omega}\mathbf{j} \quad (25)$$

che costituisce la rappresentazione del vettore $\hat{\varepsilon}$ tramite gli angoli di Eulero.

3.4. Calcolo del campo efficace

In regime alternato sinusoidale l'ampiezza del campo magnetico varia ciclicamente alla stessa frequenza della corrente che lo genera. Nel caso di un insieme di linee elettriche trifase, data la presenza di più sorgenti, le tre componenti spaziali del campo non sono generalmente in fase tra loro, e di conseguenza il vettore risultante ha intensità e direzione variabili nel tempo.

La quantità a cui si fa riferimento nella normativa [8, 9], e che viene fornita dagli strumenti di misura, è il valore efficace del campo di induzione magnetica, definito da:

$$B^{eff} \equiv \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T B^2(t) dt} \quad (26)$$

essendo T il periodo associato alla frequenza di rete di 50 Hz. Tale valore viene ora ricavato a partire dalla relazione (19).

Nella formula dovrà essere utilizzato il valore efficace della corrente, fornita gestore della linea, legato al valore di picco dal coefficiente $\sqrt{2}$. Si ricava allora il campo di induzione magnetica efficace:

$$\begin{aligned} B^{eff} &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (B_x^2 + B_y^2 + B_z^2) dt} = \\ &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left[\left(\sum_i B_{x,i} \right)^2 + \left(\sum_i B_{y,i} \right)^2 + \left(\sum_i B_{z,i} \right)^2 \right] dt} = \\ &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \sum_{i,j} (B_{x,i} B_{x,j} + B_{y,i} B_{y,j} + B_{z,i} B_{z,j}) dt} = \\ &= \frac{\mu_0}{4\pi} \sqrt{\frac{2}{T} \sum_{i,j} I_i^{eff} I_j^{eff} \eta_i \eta_j \hat{\varepsilon}_i \cdot \hat{\varepsilon}_j \int_0^T \sin(\omega t + \varphi_i) \sin(\omega t + \varphi_j) dt} \quad (27) \end{aligned}$$

Gli indici i, j nella sommatoria sono indici di segmento. La discretizzazione comporta nel calcolo la mancanza di riferimenti al singolo conduttore, tenendo presente che tutti i segmenti riferiti ad esso sono percorsi dalla stessa corrente $\sqrt{2} I_i^{eff} \sin(\omega t + \varphi_i)$.

Si definisce per semplicità l'elemento tensoriale A_{ij} come produttrice:

$$A_{ij} = \prod_{k=i,j} I_k^{eff} \eta_k \hat{\varepsilon}_k \quad (28)$$

e risolvendo l'integrale sotto radice si ricava infine [6]:

$$B^{eff} = \frac{\mu_0}{4\pi} \sqrt{\sum_{i,j} A_{ij} \cos(\varphi_j - \varphi_i)} \quad (29)$$

che rappresenta l'equazione finale per il calcolo del campo efficace e che è stata implementata in Phidel.

Si noti la dipendenza del valore efficace dell'induzione magnetica da un termine dipendente dalla fase relativa tra i conduttori – $\cos(\varphi_j - \varphi_i)$ – e da un termine – A_{ij} – dipendente dalle correnti e dalla geometria del sistema.

4. LA STRUTTURA DEL SOFTWARE

Il software realizzato è diviso in due parti distinte [7], inerenti l'immissione dei dati e la loro elaborazione, che preludono alla successiva visualizzazione in ambiente GIS (Sistema Informativo Geografico) o all'elaborazione su foglio di calcolo. Le due sezioni, dovendo assolvere compiti peculiari, sono state sviluppate in diversi linguaggi di programmazione, per motivi di praticità e di velocità di esecuzione.

Un'opzione avanzata permette di effettuare il calcolo nella cosiddetta modalità batch, ossia automatizzando il processo di elaborazione di grosse quantità di dati relative all'andamento nel tempo delle grandezze elettriche delle linee considerate, per ricavare l'evoluzione temporale dell'induzione in un punto.

4.1. L'immissione dati

La parte preposta all'inserimento dei dati elettrici e geometrici è stata sviluppata in PHP, un linguaggio di scripting open source mirato alla programmazione web; è server-side, cioè gli script vengono eseguiti su lato server, da dove l'output viene inviato al browser del client in forma di file HTML. L'unico requisito software consiste (per l'utilizzo di PHP come scripting server-side) nell'installazione di un server web, del modulo PHP e, ovviamente, di un browser.

Grazie alle potenzialità offerte dal linguaggio PHP, le pagine relative all'inserimento dei dati con i relativi campi vengono create dinamicamente di volta in volta, a seconda di quanto richiesto dall'utente. La convenzione utilizzata per i dati da inserire prende spunto dallo studio effettuato sui vari software, ma tiene conto soprattutto dello schema del catasto degli elettrodotto realizzato presso l'ARPA Friuli Venezia Giulia, e quindi dei dati direttamente a disposizione dell'Ente.

L'inserimento avviene secondo il seguente schema, che descrive i dati richiesti da ciascuna delle tre schermate:

- inserimento del numero di linee del caso in esame;
- per ogni linea va specificato il nome, il numero di cavi e di tralicci, la corrente e la lunghezza del segmento approssimante la campata;
- per ogni traliccio sono richieste quota e coordinate, oltre alle coordinate dei tralicci precedente e successivo a quelli presi in considerazione per il calcolo. Questi ultimi servono a definire univocamente l'orientamento degli sbracci, supposti diretti secondo la bisettrice dell'angolo formato dai tratti di linea di interesse. Per ogni cavo è necessario specificare la fase (R, S o T), l'altezza del punto di sospensione, lo sbraccio (la distanza dall'asse del traliccio del punto di sospensione), il parametro di tesatura e la lunghezza della catena di isolatori.

Infine, vanno immessi il nome del progetto (utilizzato, assieme a data e ora di creazione, per generare un file di back-up), la quota e le coordinate relative al punto di origine del calcolo, il numero di passi lungo le direzioni x e y , l'angolo relativo all'asse delle ascisse, l'angolo della pendenza del piano di calcolo rispetto al piano orizzontale xy (come evidenziati in Figura 1) e la lunghezza del passo lungo ciascuna delle direzioni x e y .

Al momento della conferma dei valori inseriti, per ogni campo viene effettuato un controllo che segnala l'eventuale presenza di valori mancanti o inconsistenti, per permettere all'utente di completare l'inserimento o correggere l'errore.

Il PHP è un linguaggio interpretato, quindi poco adatto ad eseguire grosse quantità di calcoli. Di conseguenza è stato utilizzato esclusivamente per inserire i dati e salvarli su un file di testo: questo può essere eventualmente modificato solo in alcuni parametri, per effettuare il calcolo per una configurazione simile (ad esempio con altri valori di corrente o ad una quota diversa) senza dover ripetere l'intera procedura di inserimento.

4.2. L'elaborazione dati

L'elaborazione dei dati per calcolare il campo efficace di induzione magnetica (secondo la (29)) richiede maggiori risorse: è stata pertanto sviluppata in Visual C++, un linguaggio compilato che permette di operare in ambiente visuale per la progettazione dell'interfaccia utente. L'utilizzo dei puntatori consente inoltre di allocare dinamicamente la memoria richiesta dal programma, che può così operare anche in presenza di limitate risorse di sistema.

La complessità del codice, e di conseguenza la memoria richiesta e i tempi di elaborazione, dipendono fortemente dal numero di segmenti. Di conseguenza, la scelta della lunghezza dei segmenti può essere rilevante nel caso di calcoli di configurazioni particolarmente complesse, ma va verificato che tale perdita di precisione non influisca eccessivamente sul risultato finale. Si deve quindi trovare un compromesso tra precisione di calcolo e risorse (tempo e memoria) impiegate.

Il programma legge il file contenente i dati, lo elabora e crea in output un altro file di testo, costituito da una matrice di quattro colonne: due per le coordinate, la terza per la quota e la quarta per l'intensità efficace di induzione magnetica.

4.3. La visualizzazione

Specificatamente, il file in output è una matrice di dati compatibile con il programma GIS ArcView, che visualizza a monitor quanto richiesto (Figura 7, a sinistra, riferita alla linea 21356 a 380 kV Planais-Redipuglia), sovrapponendo graficamente i valori di campo alla Carta Tecnica. Tale rappresentazione rende evidente l'intensità di campo su una superficie alla quota definita.

In tal modo, impostando opportunamente i valori di campo nella maschera di visualizzazione, è possibile determinare immediatamente l'estensione delle fasce di rispetto.

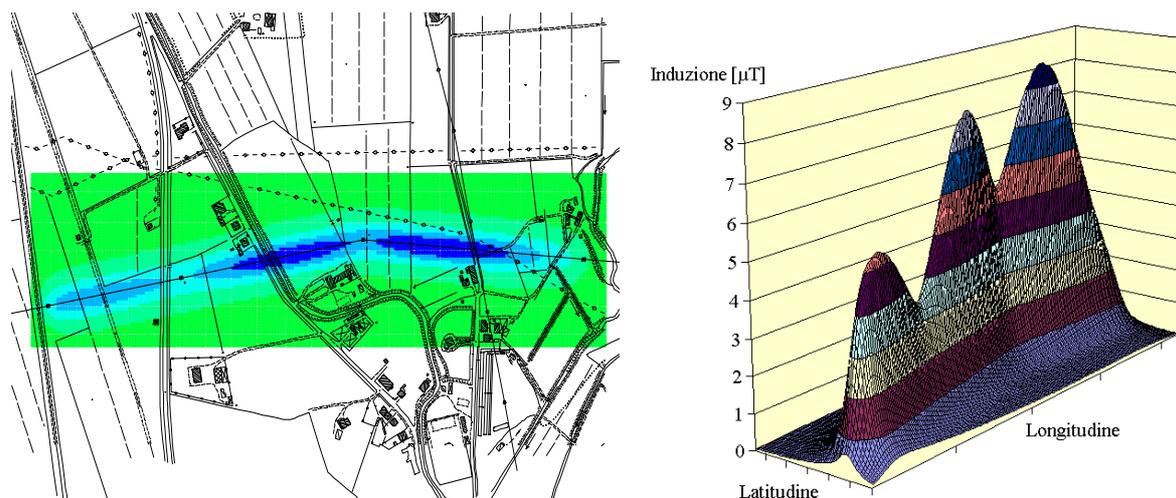


Figura 7 - Visualizzazione dei dati in output in ambiente GIS (a sinistra) e in foglio di calcolo (a destra).

Per poter utilizzare il risultato in un programma di foglio di calcolo ed ottenerne una visualizzazione tridimensionale (Figura 7, a destra), è possibile trasformare l'output del programma attraverso un'utility appositamente creata, facente parte del software.

4.4. Il calcolo dell'evoluzione temporale

A partire dai valori storici delle grandezze elettriche delle linee ad altissima tensione (220 e 380 kV), ossia tensione, potenza attiva e reattiva, registrati ogni quarto d'ora, è possibile utilizzare un'opzione avanzata di Phidel (la cosiddetta modalità batch) per calcolare l'andamento dell'induzione magnetica efficace in un punto al variare del tempo.

Il software elabora, assieme al file di dati elettrici e geometrici caratterizzanti il sistema, un file di testo contenente i valori ottenuti dalle registrazioni del gestore.

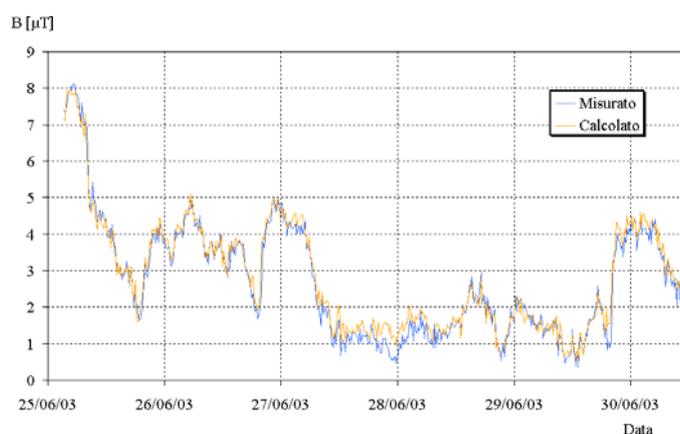


Figura 8 – Variazione nel tempo del campo misurato (in azzurro) e previsione teorica di Phidel (in arancio).

La Figura 8 mostra l'andamento nel tempo dei valori calcolati dal software e di quelli rilevati da una centralina di tipo PMM 8055S in prossimità di una doppia linea (configurazione costituita da due linee sostenute dagli stessi tralicci ed aventi sfasamento tra le tensioni note). I dati, sottoposti ad un test del $\tilde{\chi}^2$, confermano la validità dell'algoritmo, fornendo il risultato $\tilde{\chi}_{5182}^2 = 0.6$.

Questa caratteristica del software permette di calcolare il valore mediano (secondo quanto richiesto dagli Artt. 3 e 4 del DPCM 8 luglio 2003) dell'induzione a partire dalle grandezze elettriche, qualora non sia possibile utilizzare un sistema di misura in continuo. È infatti necessario considerare gli sfasamenti relativi tra le correnti, in quanto in presenza di più linee non è possibile risalire alla mediana del campo né a partire dai soli valori medi delle correnti, senza considerare anche gli sfasamenti relativi tra di esse, né utilizzando una misura a breve termine.

5. L'INTERCONFRONTO TRA I SOFTWARE

I risultati ottenuti dai software analizzati sono stati confrontati con le misure effettuate in prossimità di linee a 380 kV [3] (Figura 9) acquisite con il sistema LINDA, costituito da un rivelatore EMDEX II fissato su un supporto mobile munito di odometro: questo registra simultaneamente i valori di campo, il tempo e le informazioni relative al percorso.

Tre dei programmi considerati (CAMPI, LINATCTN e NIR) lavorano in 2 dimensioni: quindi permettono il calcolo solo lungo percorsi ortogonali all'asse della linea, e non è possibile l'immediato confronto con i dati sperimentali nel caso di traiettorie inclinate. Tali software inoltre approssimano i conduttori come rettilinei e di lunghezza infinita, non consentendo di tener conto né dello sviluppo della campata, né delle variazioni di traiettoria della linea.

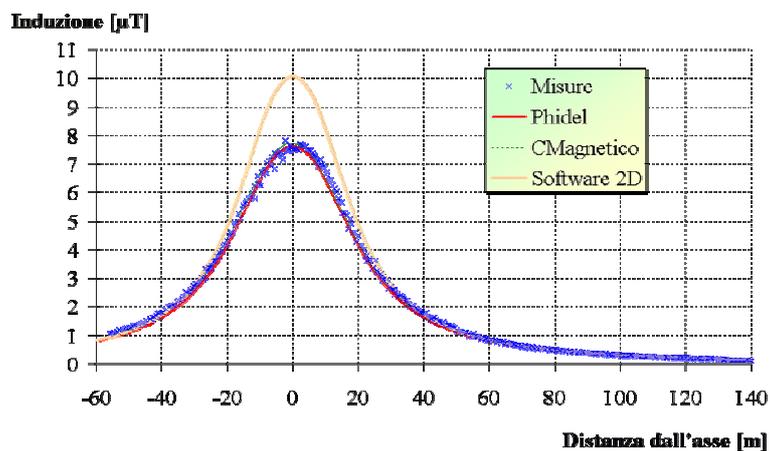


Figura 9 – Confronto tra dati sperimentali e risultati di Phidel e altri software.

L'utilizzo di Phidel consente un risparmio di tempo, poiché fornisce i dati richiesti senza ulteriori elaborazioni che tengano conto dell'angolo formato dalla traiettoria del percorso con la normale all'asse della linea: in tale maniera il confronto con i dati sperimentali è immediato.

Il calcolo del $\tilde{\chi}^2$, riportato nella tabella sottostante per ciascuno dei software considerati, evidenzia il grado di accordo tra le misure sperimentali e i dati ottenuti dai vari programmi, dimostrando che i risultati forniti da Phidel presentano una maggiore affidabilità.

Tab. 1 – Valutazione dell'affidabilità dei vari software.

Nome linea	Phidel	CMagnetico	Software 2D
21356 (380 kV)	$\tilde{\chi}_{260}^2=0.6$	$\tilde{\chi}_{260}^2=0.6$	$\tilde{\chi}_{260}^2=2.7$
21347 (380 kV)	$\tilde{\chi}_{75}^2=0.7$	$\tilde{\chi}_{75}^2=1.0$	$\tilde{\chi}_{75}^2=2.3$

6. DEFINIZIONE DI UNA PROCEDURA DI VALIDAZIONE

Diversi lavori in Letteratura [10, 11, 12, 14, 15] analizzano vari software per il calcolo del campo magnetico efficace generato da elettrodoti, soffermandosi o su alcune caratteristiche del programma o sul confronto con i dati sperimentali di situazioni specifiche, senza però definire un protocollo di verifica generale.

La procedura di validazione sviluppata presso ARPA FVG si articola in due fasi successive. Nella prima si considera l'algoritmo che porta alla realizzazione del programma, e lo si usa per calcolare il campo generato da alcune configurazioni caratteristiche che siano calcolabili esattamente (campo di un segmento, di una spira) o di cui sia predicibile l'andamento (variazione del campo con la distanza dal cavo o con lo sfasamento relativo tra le correnti di due linee): il software analizzato deve riprodurre esattamente quanto previsto dalla teoria. La seconda parte consiste nel confronto dei dati forniti dal software con i risultati di misure eseguite presso varie configurazioni di elettrodoti, in modo da testare l'affidabilità del programma tramite un test del chi quadro ridotto nelle varie situazioni in cui se ne prevede l'utilizzo.

Nel presente lavoro la procedura appena descritta è applicata a Phidel.

7. VALIDAZIONE TEORICA

Al fine di eseguire i test atti a fornire la validazione teorica di un software, è necessario conoscerne le condizioni di funzionamento e le approssimazioni utilizzate dall'algoritmo implementato. L'unica approssimazione presente in Phidel consiste nella discretizzazione della campata che descrive il conduttore in una spezzata costituita da segmenti di lunghezza definita dall'utente. Di conseguenza, la prima verifica è data dalla riproduzione del campo generato da un conduttore rettilineo di lunghezza finita, e dal confronto con quanto previsto dalla teoria.

7.1. Campo di un segmento

Il campo generato da un segmento è descritto dalla formula (18):

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \eta \hat{\epsilon}$$

in cui I è la corrente circolante, $\hat{\varepsilon}$ è il versore che identifica l'orientamento del campo e la quantità η dipende dalla geometria del sistema (lunghezza del segmento e posizione ad esso relativa del punto di calcolo).

A partire da questa relazione si calcola lo scarto relativo dalla previsione teorica in funzione della posizione del punto di calcolo rispetto al segmento considerato, come riportato in Figura 10. Tale valore è sempre inferiore allo 0.03%, e la differenza percentuale maggiore si ha per i valori di campo più bassi, quando diventano più importanti le approssimazioni dovute alle perdite di cifre significative.

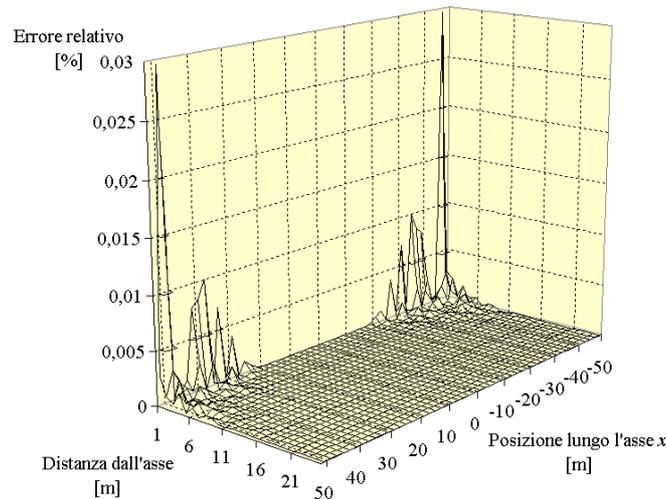


Figura 10 – Scarto percentuale dalla previsione teorica del campo generato da un segmento.

A partire da questa relazione si calcola lo scarto relativo dalla previsione teorica in funzione della posizione del punto di calcolo rispetto al segmento considerato, come riportato in Figura 10. Tale valore è sempre inferiore allo 0.03%, e la differenza percentuale maggiore si ha per i valori di campo più bassi, quando diventano più importanti le approssimazioni dovute alle perdite di cifre significative.

Ad ogni modo, si tratta di differenze non rilevabili dagli strumenti di misura utilizzati da ARPA FVG, in quanto la sensibilità è tipicamente inferiore di almeno tre ordini di grandezza ai valori calcolati in tali punti (per i rivelatori PMM 8053 ed EMDEX II, ad esempio, vale 10 nT).

7.2 - Comportamento a piccole distanze dal cavo

Disponendo del codice sorgente del software da analizzare, è possibile effettuare un'analisi sulle variabili utilizzate, e confrontarne l'andamento con quello atteso dalla teoria.

Al diminuire della distanza, nel seguito indicata con ρ , del punto in cui si calcola il campo dal segmento considerato, si può dimostrare che la quantità η definita nella (17) si comporta in maniera diversa a seconda che ci si avvicini al segmento ($\lim_{\rho \rightarrow 0} \eta = \infty$), o ad un suo prolungamento esterno ($\lim_{\rho \rightarrow 0} \eta = 0$). I risultati ottenuti dal software sono concordi con quanto previsto dalla teoria, come visualizzato nelle figure seguenti, che si riferiscono ai due casi.

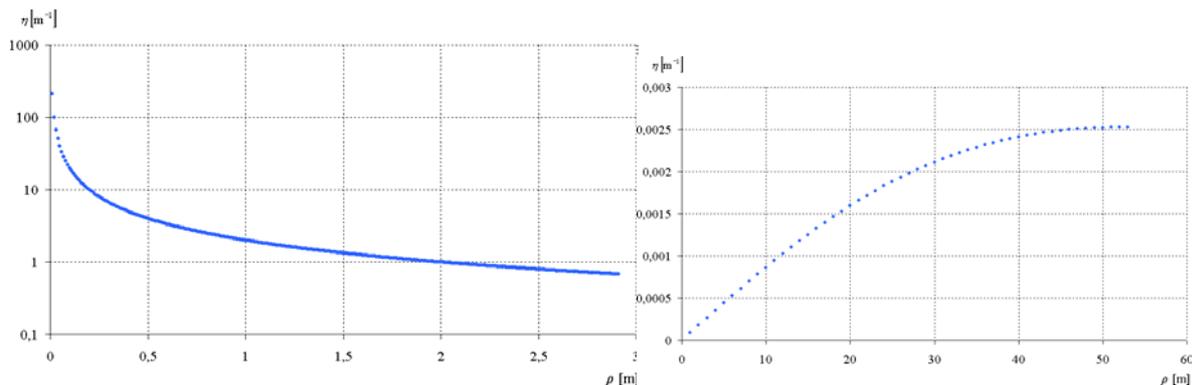


Figura 11 - Andamento di η per piccoli valori di ρ avvicinandosi al segmento e ad un suo prolungamento esterno.

7.3 - Risultato al variare della lunghezza del segmento

Quando la lunghezza dei segmenti costituenti la spezzata che approssima la catenaria si avvicina allo zero, il calcolo tende al caso non approssimato. Ci si aspetta quindi un andamento asintotico, come quello effettivamente ottenuto e visualizzato in scala semilogaritmica nei due esempi riportati nella Figura 12.

Tali grafici sono riferiti a due punti, uno posto in prossimità della base di un traliccio di una linea aerea (linea continua nera), l'altro più distante dalla stessa linea (linea tratteggiata grigia). In entrambi i casi la lunghezza del segmento costituente la spezzata è stata fatta variare da 0.1 a 300 m.

È ottimale scegliere, in entrambe le condizioni, una lunghezza di 10 m, poiché il valore di campo rimane costante per lunghezze inferiori, che comportano tuttavia un incremento dei tempi di calcolo.

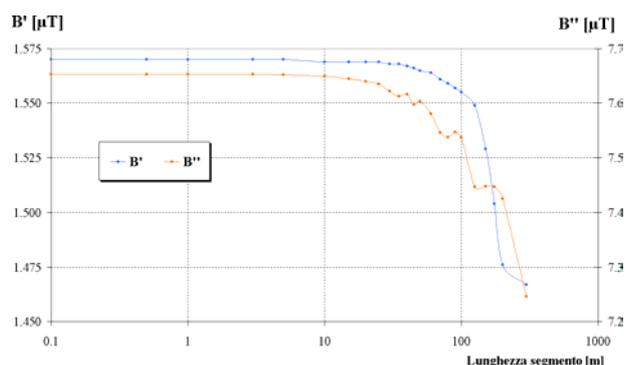


Figura 12 - Verifica dell'andamento asintotico del campo al diminuire della lunghezza del segmento.

Lunghezze superiori sono preferibili nel caso di configurazioni con numerosi conduttori o punti di calcolo, per una valutazione preliminare in tempi brevi.

L'andamento irregolare nel grafico tratteggiato, che presenta una successione di minimi e massimi relativi, è dovuto alla particolare configurazione scelta, in cui il punto di mi-

sura può trovarsi più o meno vicino ai segmenti che approssimano la campata a seconda della lunghezza definita per questi dall'utente. Anche questo problema viene tuttavia risolto utilizzando il valore consigliato di 10 m.

7.4 - Campo di una spira

Nel centro di una spira a forma di poligono regolare avente lato di lunghezza l , il valore del campo è dato da [13]:

$$B = \frac{n\mu_0 I}{\pi l} \sin \frac{\pi}{n} \tan \frac{\pi}{n} \quad (30)$$

ove n è il numero di lati della spira. L'esatto accordo di tale formula con i risultati forniti dal software è stato provato sino alla quarta cifra significativa per $n=3, 4, 5, 6, 8$ lati.

Nell'esempio visualizzato nelle figure seguenti in ambiente GIS è considerata una spira quadrata, di lato $d=100$ m e percorsa da una corrente $I=1000$ A.

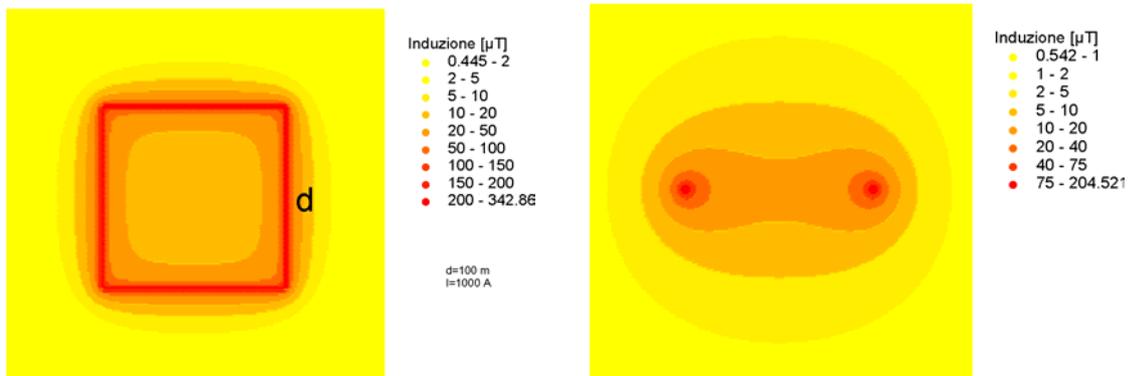


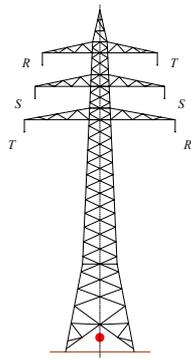
Figura 13 – Campo di una spira quadrata, calcolato in un piano parallelo ai conduttori e in uno ad essi ortogonale.

7.5 - Variazione dello sfasamento relativo

Considerando il caso di una configurazione costituita da due linee distinte, il campo efficace in un punto deve essere una funzione periodica dello sfasamento relativo tra le correnti delle due linee.

Si consideri a tal proposito la campata, lunga 300 m, tra due da tralicci il cui schema è riportato in Figura 14; sono indicate le fasi dei conduttori e i due punti in cui è effettuato il calcolo. Nell'esempio le costanti di tesatura dei cavi riferiti alle due linee valgono 1600 m e 1700 m, e le correnti 960 A e 1300 A, rispettivamente.

Il risultato atteso è un campo variante periodicamente in funzione dello sfasamento, ed avente un minimo a 360° a distanza infinita: infatti a piccole distanze il punto di misura risente della geometria del sistema (ossia della distanza da ciascun conduttore), mentre allontanandosi dalla sorgente la distanza relativa tra i cavi diventa trascurabile rispetto alle dimensioni del problema. Conforme alle aspettative, tale andamento è riportato in Figura 15.



Altezza sbracci: 35 m, 33 m, 31 m
 Lunghezza sbracci: 5 m, 8 m, 5 m
 Quota calcolo: 2 m
 Distanza dall'asse della linea dei
 punti di calcolo: 0 m e 50 m
 ● punti di calcolo

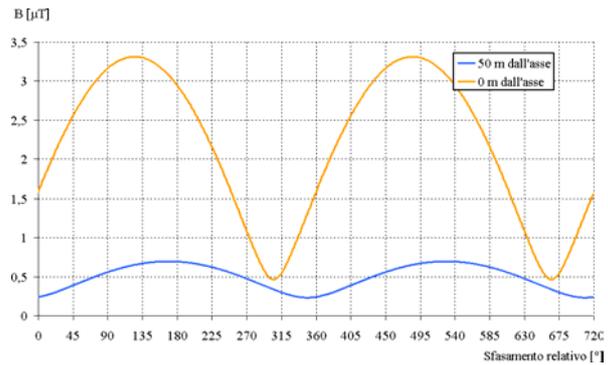


Figura 14 –Punti di calcolo.

Figura 15 – Campo in funzione dello sfasamento relativo.

8. VALIDAZIONE SPERIMENTALE

8.1 - Misura effettuata presso terna singola

In presenza di una linea costituita da una terna singola, l'induzione magnetica in un punto è proporzionale alla corrente circolante, per la legge di Biot-Savart.

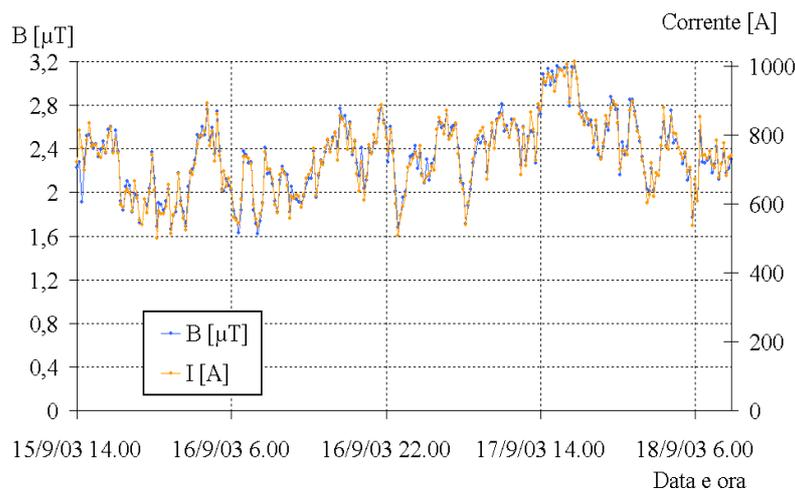


Figura 16 - Andamento temporale di corrente di linea e di induzione magnetica nei pressi di una linea a 380 kV.

Per verificare sperimentalmente l'accordo in tale caso dei risultati del software con quelli sperimentali, è stata effettuata una misura avvalendosi di una centralina di tipo PMM 8055S, adatta per le misure in continuo, e i dati raccolti nell'arco di quattro giornate sono stati rapportati ai valori di corrente forniti dall'ente gestore.

Supposta una relazione del tipo $B=mI$ tra campo e corrente, il valore ricavato sperimentalmente per il coefficiente di proporzionalità, $m=(3.2\pm 0.1)\text{nT/A}$, deve essere confrontato con quello ottenuto dal calcolo effettuato tramite Phidel, $m_c=(3.2\pm 0.3)\text{nT/A}$.

I due valori sono consistenti, essendo lo scarto inferiore all'incertezza relativa ad entrambi.

8.2 - Misura lungo un percorso

Sono state eseguite due misure di profilo dell'induzione magnetica trasversalmente a due linee singole campione a 380 kV (la 21347 Planais-Salgareda e la 21356 Planais-Redipuglia) utilizzando il sistema di misura EMDEX II nella versione LINDA, in cui lo strumento palmare viene fissato su di un supporto mobile munito di odometro [3]. Nella Figura 17 viene mostrato il confronto tra le misure ed il calcolo eseguito con Phidel.

Sui dati è stato fatto uno studio del chi quadrato ridotto. È stato assunto un errore sperimentale del 3%, come riportato nel manuale d'uso dello strumento, al quale viene sommata in quadratura la fluttuazione percentuale di corrente, ricavabile dai dati forniti dall'ente gestore. Nel caso della linea 21347, per un valore della corrente di 130 ± 50 A, si è ottenuto il valore $\tilde{\chi}_{75}^2 = 0.7$; nel caso della linea 21356, per un valore della corrente di 1110 ± 90 A, è stato ottenuto $\tilde{\chi}_{260}^2 = 0.6$. In nessun caso il valore del $\tilde{\chi}^2$ ottenuto comporta il rigetto dell'ipotesi di consistenza fra misure e calcolo, fissata al 5% la soglia di rigetto.

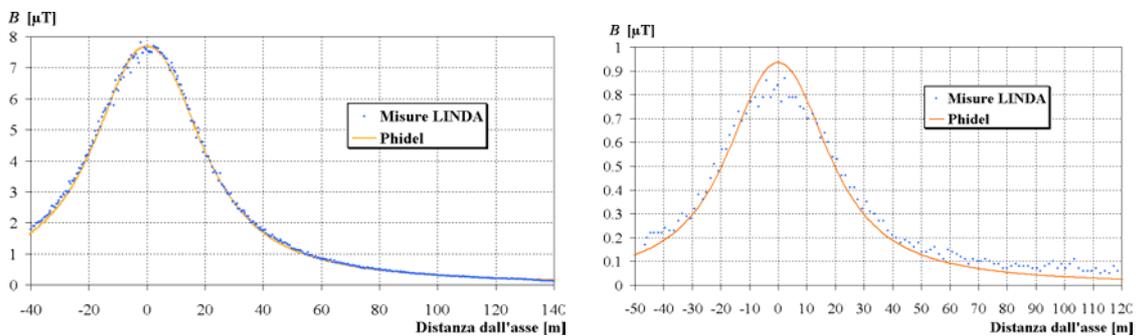


Figura 17 – Confronto tra dati sperimentali e risultati del software (linee 21356 e 21357).

8.3 - Misura presso una doppia linea

Utilizzando Phidel è possibile riprodurre la storia di una doppia linea utilizzando un file di testo contenente i valori di tensione, potenza attiva e reattiva al variare del tempo.

La configurazione costituita da due linee distinte, sostenute dagli stessi tralicci ed aventi sfasamento tra le tensioni noto, è stata definita “doppia linea” [6]. La determinazione del valore di induzione magnetica in un punto non dipende dai soli valori delle correnti di linea, ma anche dallo sfasamento tra di esse.

Un calcolo del campo è pertanto possibile solo nel caso in cui sia possibile determinare tale sfasamento φ , dai valori di potenza attiva P e reattiva Q :

$$\varphi = \arctan \frac{Q}{P} \quad 4$$

Dai dati relativi alle linee si può ricavare, utilizzando la nuova versione del software, l'evoluzione nel tempo del campo di induzione magnetica nel punto in cui è stata posta una centralina di tipo PMM 8055S per le misure in continuo.

In Figura 18 sono confrontati i valori misurati (B_m) e quelli calcolati (B_c) [3]. I dati, linearmente correlati con una regressione pari a 0.95, vengono sottoposti ad un test del $\tilde{\chi}^2$, che

non rigetta l'ipotesi di validità del software ($\tilde{\chi}_{5182}^2 = 0.6$), posta al 5% la soglia di rigetto.

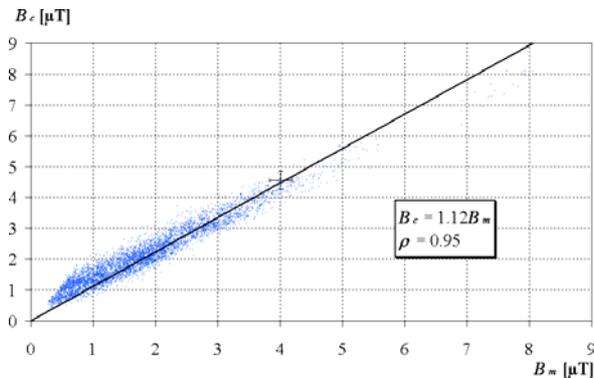


Figura 18 – Confronto tra dati sperimentali e risultato di Phidel.

9. CONCLUSIONI

La necessità di effettuare il calcolo dell'induzione magnetica in situazioni complesse ha portato allo sviluppo di uno strumento nuovo, chiamato Phidel, che oltre ad ottimizzare le procedure di inserimento dati, elaborazione e visualizzazione, permette di considerare configurazioni con più linee, sia aeree che interrate, e di ricavare l'estensione dei volumi di campo ai valori specificati dalla normativa ricorrendo alla sola approssimazione della discretizzazione della campata.

L'algoritmo implementa la legge di Biot-Savart, ed è quindi conforme a quanto indicato dalla norma CEI 211-4. Il programma fornisce dati in output in un formato compatibile con i software di cui è già in possesso l'Agenzia, mentre la modalità di funzionamento batch permette di elaborare grossi quantitativi di dati in configurazioni complesse.

L'implementazione in PHP e tramite il linguaggio Visual C++ ha infine permesso di guadagnare in versatilità, portabilità e prestazioni, fornendo allo stesso tempo all'utente un'intuitiva interfaccia grafica.

È stato inoltre sviluppato un protocollo destinato alla verifica della validità dei software destinati al calcolo di campi emessi da sorgenti ELF, ma per la sua generalità (validazione teorica prima e sperimentale in seguito) può essere applicato a qualunque tipo di programma di calcolo, qualora siano soddisfatti alcuni requisiti essenziali: possibilità di effettuare calcoli in situazioni esattamente conoscibili e quindi immediatamente testabili, disponibilità (eventuale) del codice sorgente per verificare l'andamento delle variabili in funzione di opportuni parametri, possibilità infine di eseguire un confronto tra output del programma e misure effettuate in situazioni in cui siano note le condizioni che portano al fenomeno fisico studiato.

La procedura così sviluppata è stata applicata con successo al programma Phidel, che ha riprodotto esattamente i risultati previsti dalla teoria nei casi esaminati, ed ha soddisfatto il confronto con i dati sperimentali fornendo nei test del chi quadro ridotto risultati che non hanno mai permesso il rigetto dell'ipotesi di validità.

Presso l'ARPA FVG si sta valutando l'eventualità di avvalersi di Phidel per il calcolo del campo efficace di induzione magnetica generato da più linee elettriche ad altissima tensione, poiché l'interconfronto con gli altri software più diffusi in possesso delle Agenzie per la Protezione dell'Ambiente ha mostrato un migliore accordo con i dati sperimentali.

Bibliografia

- [1]. Daniele Andreuccetti, maggio 2002. CAMPI – Un programma per il calcolo del campo elettrico e dell'induzione magnetica generati da linee elettriche – Manuale programma CAMPI versione 4.1. Istituto di Fisica Applicata "Nello Carrara", Consiglio Nazionale delle Ricerche, Firenze.
- [2]. D. Andreuccetti, N. Zoppietti, 2004. Magnetic Fields Dispersed by High-Voltage Power Lines: an Advanced Evaluation Method Based on 3-D Models of Electrical Lines and the Territory. *Radiation Protection Dosimetry* (2004), Vol. 111, No. 4, 343-347.
- [3]. Benes M., Comelli M., Drigo A., Giovani C., Montanari F., Villalta R., 2003. Strumenti per una mappatura degli elettrodotti: database, software di simulazione e monitoraggio. In: *Atti del Convegno Nazionale – Dal monitoraggio degli agenti fisici sul territorio alla valutazione dell'esposizione ambientale*. 29-1 ottobre 2003, Villa Gualino, Torino, 21-24.
- [4]. Paolo Bevitori, Stefano R. de Donato, 2003. *La valutazione dell'inquinamento elettromagnetico*. Maggioli Editore, 107 p.
- [5]. M. Bini, D. Andreuccetti, R. Olmi, N. Zoppietti, 2002. Influenza del terreno nel calcolo del campo elettrico e magnetico prodotto da linee elettriche. In: *Atti della XIV RiNEM, Quattordicesima Riunione Nazionale di Elettromagnetismo*, Ancona, 16-19 settembre 2002.
- [6]. Moreno Comelli, Luciano Bertocchi, Renato Villalta, Massimiliano Benes, 2004. *Analisi, modelli previsionali e Valutazione di Impatto Ambientale di campi di induzione magnetica generati da linee elettriche ad altissima tensione*. Università degli Studi di Trieste, 133 p.
- [7]. Moreno Comelli, 2005. Phidel 2.2 – Manuale di riferimento. <http://www.phidel.it>.
- [8]. Comitato Elettrotecnico Italiano, luglio 1996. *Guida ai metodi di calcolo dei campi elettrici e magnetici generati da linee elettriche*. Norma Italiana CEI 211-4, Prima Edizione, Fascicolo 2840.
- [9]. DPCM 8 luglio 2003. *Gazzetta Ufficiale Italiana* n. 200 del 29 agosto 2003, 11-13.
- [10]. Elena Gambato, Maria Rosa, 2000. *Studio dei modelli per il calcolo dei campi elettromagnetici generati da elettrodotti*. Direzione Tecnico Scientifica ARPAV, Venezia.
- [11]. G. Licitra, M. Magnoni, G. D'Amore, A. Poggi, S. Adda, M.C. Losana, A. Jacoponi, T. Gabrieli, 2001. *Rassegna dei modelli per il rumore, i campi elettromagnetici e la radioattività ambientale*. ANPA, RTI CTN_AGF 1/2001.
- [12]. D. Manco, L. Bruzzi, A. Soloni, D. Valbonetti, S. Fabbri, S. Violanti, 2001. Electric and magnetic fields generated by AC power lines: an application of advanced modelling tools in order to predict exposure levels. *Radiation Protection Dosimetry*, 97(4), 359-362.
- [13]. Duane E. Roller, Ronald Blum, 1985. *Fisica – Volume secondo: Eletticità, magnetismo, ottica*. Zanichelli, Bologna.
- [14]. Roberto Turri, Maurizio Albano, 2000. *Calcolo previsionale dei campi elettromagnetici generati da elettrodotti*, Associazione Elettrotecnica ed Elettronica Italiana, Padova.
- [15]. Silvia Violanti, Gennaio-Febbraio 2003. *Cem nelle aree urbane*, a Bologna uno studio per valutare i campi a basse frequenze, ARPA Rivista N. 1, ARPA Emilia-Romagna.