

## **SOFTWARE DI CALCOLO PER IL CAMPO DI INDUZIONE MAGNETICA GENERATO DA ELETTRODOTTI: IMPLEMENTAZIONE DI UN NUOVO ALGORITMO**

Comelli M., Benes M., Bampo A., Villalta R.

*ARPA Friuli Venezia Giulia, piazza Grande 1 – 33057 Palmanova (UD)*  
*comelli@arpa.fvg.it*

### **ABSTRACT**

Presso l'ARPA FVG, nell'ambito degli studi relativi alle radiazioni ELF, è stata condotta un'analisi sui software esistenti per il calcolo del campo di induzione magnetica generato da elettrodotti. Per quanto riguarda le esigenze dell'Agenzia, questi comportano alcune difficoltà inerenti l'immediato utilizzo dei dati elettrici e geometrici forniti dai gestori, ed in taluni casi si sono rivelati inadeguati a rappresentare configurazioni complesse di linee. Inoltre, nessuno di questi è predisposto per calcoli di tipo ciclico per la determinazione dell'evoluzione temporale dell'induzione in una porzione di territorio. Infine, i dati forniti in output non sono immediatamente visualizzabili in ArcView, il software GIS utilizzato dall'Agenzia.

L'innovativo strumento informatico chiamato Phidel permette di affrontare e risolvere tutte le problematiche sopra esposte. Nella sua implementazione i tratti di linea di interesse sono rappresentati da spezzate, ed il campo generato da queste è calcolato analiticamente, senza ricorrere ad ulteriori approssimazioni, neppure in compresenza di più linee: di conseguenza i risultati ricavati, se confrontati con quelli degli altri software, si sono rivelati i più prossimi a quelli ottenuti dalle misure effettuate sul territorio. I dati in output sono fruibili sia in ambiente GIS che da foglio elettronico, permettendo l'immediata sovrapposizione alla cartografia e la determinazione dell'estensione delle fasce di rispetto, di cui al DPCM 8 luglio 2003.

### **1. INTRODUZIONE**

L'entrata in vigore del DPCM 8 luglio 2003 [1] (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.

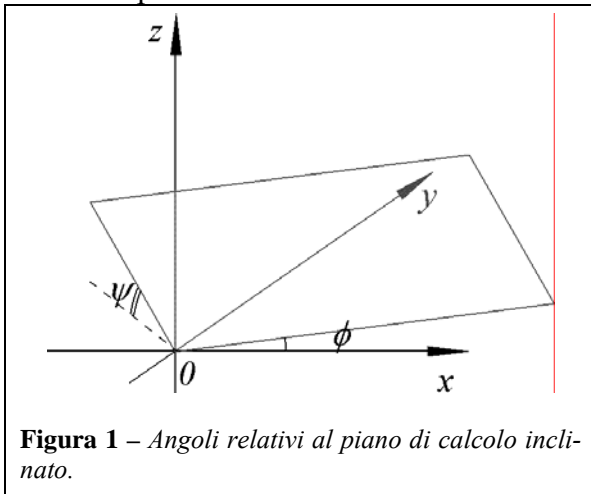
Sono stati quindi analizzati alcuni dei più diffusi applicativi per il calcolo del campo di induzione magnetica adoperati o sviluppati dai vari Enti ed Agenzie per la Protezione dell'Ambiente: per ciascuno di essi sono stati analizzati il metodo di calcolo, il sistema di riferimento adottato, la regione 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 previsioni 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 [2] 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 [3]) 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 [4];
- 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 solo alcuni dei 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);



**Figura 1** – Angoli relativi al piano di calcolo inclinato.

- 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 [5];
- 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.

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 [4, 6].

## 3. L'ALGORITMO DI CALCOLO

Nel seguito viene 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 attraverso 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:

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

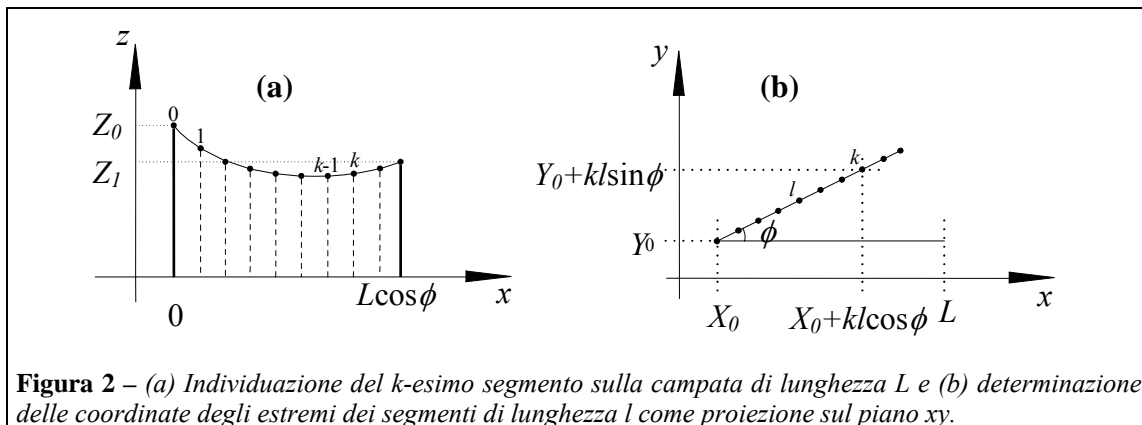
e si ricava  $b$  sostituendo le coordinate di uno degli estremi nell'equazione 1.

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  $x_k$ .



### 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 [7]:

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

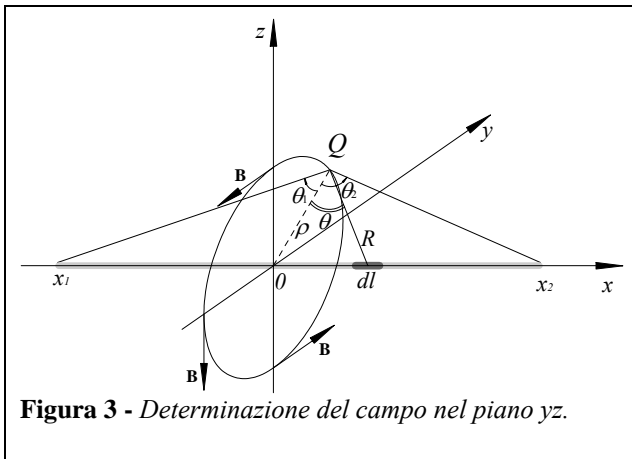
ove  $\mathbf{i}$ ,  $\mathbf{j}$  e  $\mathbf{k}$  sono i versori relativi agli assi cartesiani. Il raggio vettore, che va dall'origine delle coordinate al punto  $Q$  in cui si calcola il campo, è dato da  $\vec{\rho} = y\mathbf{j} + z\mathbf{k}$ , e quindi  $\vec{\rho} \cdot \vec{B} = 0$ : ne consegue 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:

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

del quale è noto il punto di applicazione (quello in cui si calcola il campo), e  $\rho$  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  $\theta$ ,  $\theta_1$  e  $\theta_2$  definiti in Figura 3 si ricavano le relazioni:

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

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

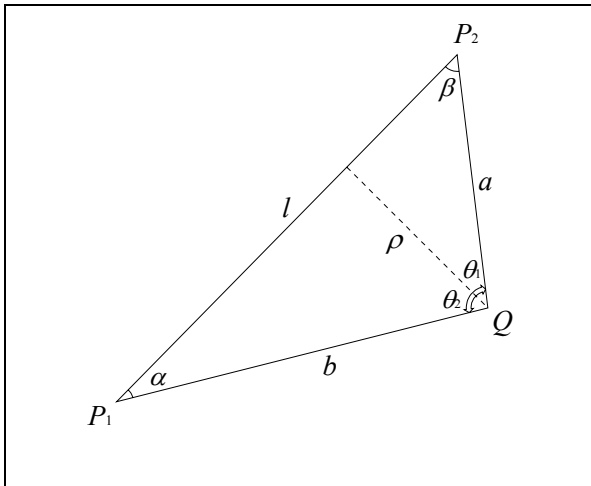
da cui:

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

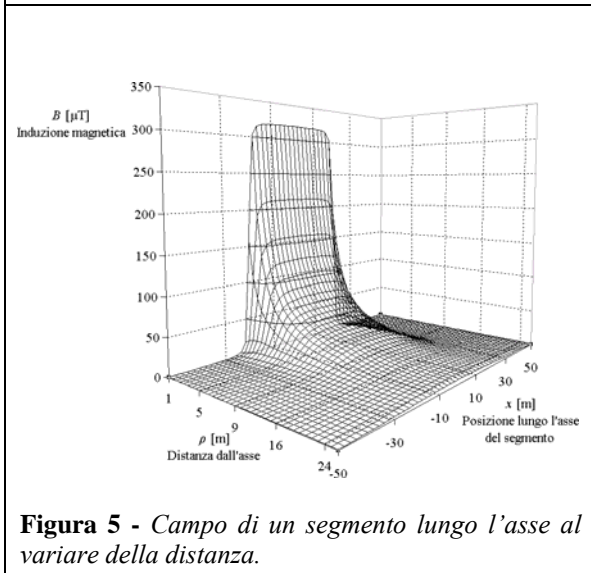
Sostituendo nella 6 e integrando lungo il tratto di filo si ricava:

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

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.



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

In Figura 4 è mostrato un particolare della Figura 3, e vengono introdotti gli angoli  $\alpha$  e  $\beta$  in modo da non dover tener conto dell'orientamento di  $\theta_1$  e  $\theta_2$ . 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  $\alpha$  e  $\beta$ :

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

Poiché per  $\rho$  vale:

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

e definendo la quantità  $\eta$  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.

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  $t$ :

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

### 3.3 – Determinazione di $\hat{e}$

Per la caratterizzazione del versore  $\hat{e}$  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  $\hat{e}$  coincide (eventualmente a meno di un segno, che tuttavia risulta inessenziale ai fini del calcolo) con  $\mathbf{j}$ , 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  $\hat{e}$  al punto di partenza.

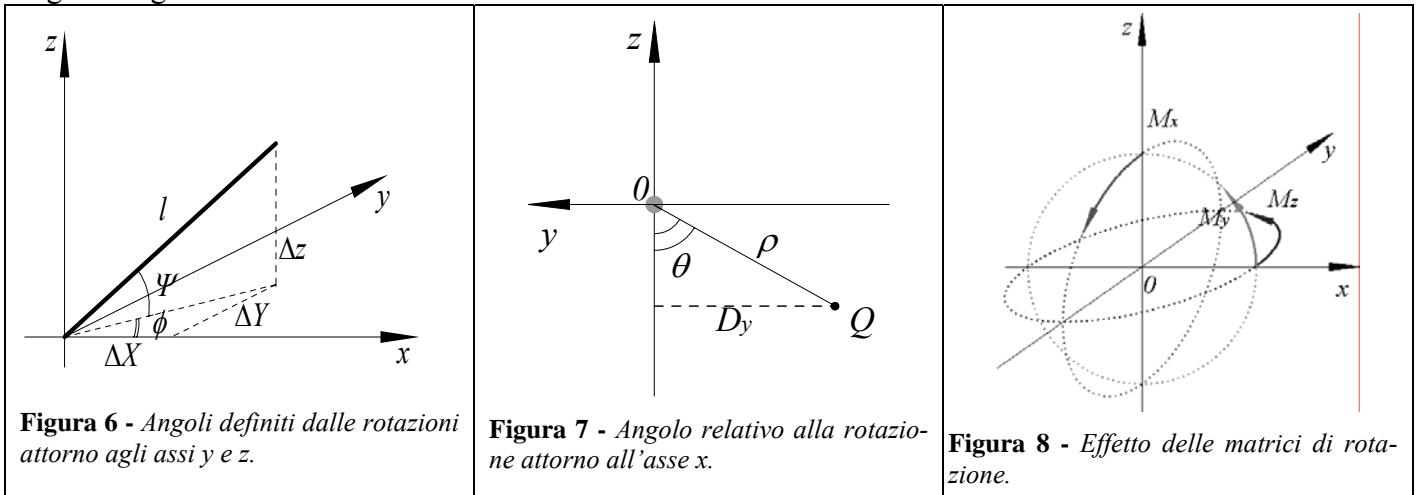
Dalla Figura 6 si ricavano due angoli di Eulero; quello relativo alla prima rotazione, attorno all'asse  $y$ , è dato da:

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

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

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

Dalla Figura 7 si ricava il terzo angolo di Eulero,  $\theta$ , che 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  $y$  e  $z$ .

**Figura 7** - Angolo relativo alla rotazione attorno all'asse  $x$ .

**Figura 8** - Effetto delle matrici di rotazione.

Con riferimento a  $D_y$ , definita in Figura 7, 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 8.

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:

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

### 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 [1, 4], 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:

$$\begin{aligned} B^{eff} &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (B_x^2 + B_y^2 + B_z^2) dt} = \\ &= I_0 \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left[ \left( \sum_i B_{x,i} \right)^2 + \left( \sum_i B_{y,i} \right)^2 + \left( \sum_i B_{z,i} \right)^2 \right] dt} = \\ &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \sum_{i,j} (B_{x,i} B_{x,j} + B_{y,i} B_{y,j} + B_{z,i} B_{z,j}) dt} = \\ &= \frac{\mu_0}{4\pi} \sqrt{\frac{2}{T} \sum_{i,j} I_i^{eff} I_j^{eff} \eta_i \eta_j \hat{\epsilon}_i \cdot \hat{\epsilon}_j \int_0^T \sin(\omega t + \varphi_i) \sin(\omega t + \varphi_j) dt} \quad 27 \end{aligned}$$

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 produttoria:

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

e risolvendo l'integrale sotto radice si ricava infine [8]:

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

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 [9], 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 lin-

guaggio 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 elettrodotti 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 la memoria richiesta variano quadraticamente rispetto al numero di segmenti: diminuendo la lunghezza del singolo segmento (e quindi aumentandone il numero) di un fattore 10, in prima approssimazione il tempo di calcolo e la quantità di memoria occupata crescono di 100 volte. 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

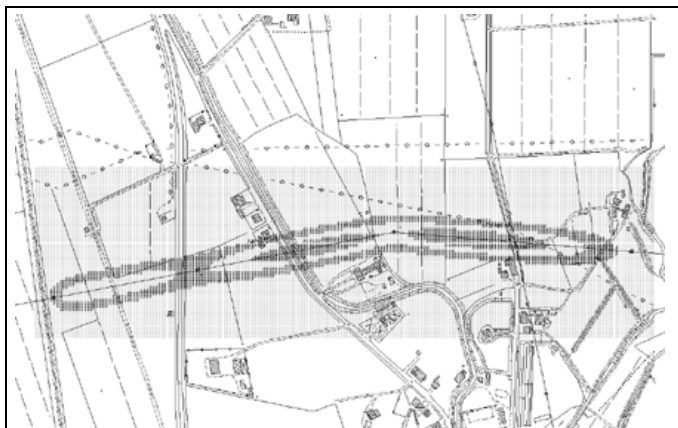


Figura 9 - Visualizzazione in ambiente GIS dei dati in output.

Specificatamente, il file in output è una matrice di dati compatibile con il programma GIS ArcView, che visualizza a monitor quanto richiesto (Figura 9, 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 tale modo, impostando opportunamente i valori di campo nella maschera di visualizzazione, è possibile determinare immediatamente l'estensione delle fasce di rispetto.

Per poter utilizzare il risultato in un programma di foglio di calcolo ed ottenerne una visualizzazione tridimensionale, 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.

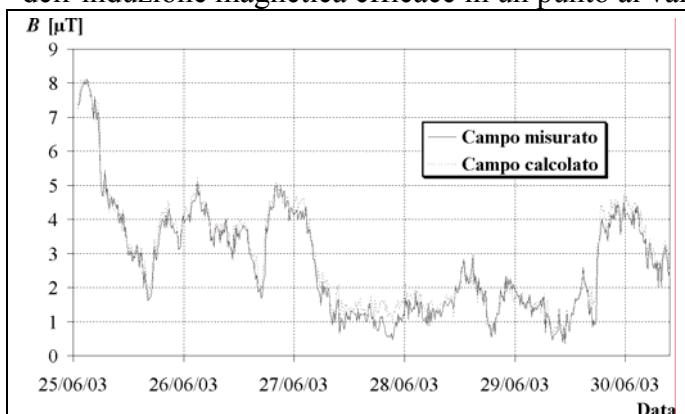


Figura 10 – Variazione nel tempo del campo misurato (in azzurro) e previsione teorica di Phidel (in arancio).

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.

La Figura 10 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  $\chi^2$ , 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 la centralina per le misure 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 [10] (Figura 11) 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.

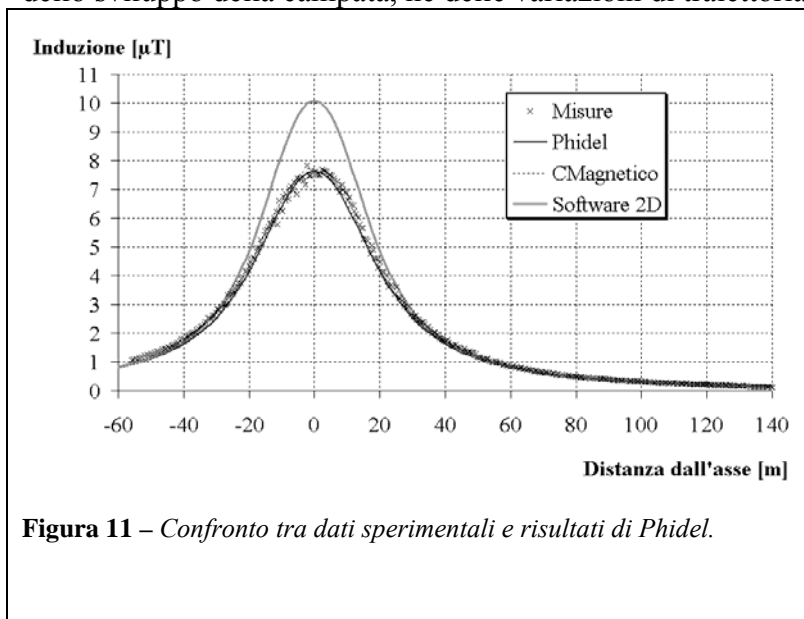


Figura 11 – Confronto tra dati sperimentali e risultati di Phidel.

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.

Tabella 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. 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.

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.

## 7. BIBLIOGRAFIA

- [1]. DPCM 8 luglio 2003, Gazzetta Ufficiale Italiana n. 200 del 29 agosto 2003.
- [2]. Daniele Andreuccetti, "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, maggio 2002
- [3]. Paolo Bevitori, Stefano R. de Donato, “La valutazione dell’inquinamento elettromagnetico”, Maggioli Editore, 2003
  - [4]. Norma Italiana CEI 211-4, luglio 1996, Prima Edizione, Fascicolo 2840, “Guida ai metodi di calcolo dei campi elettrici e magnetici generati da linee elettriche”
  - [5]. D. Andreuccetti, N. Zoppetti, “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, pp. 343-347.
  - [6]. M. Bini, D. Andreuccetti, R. Olmi, N. Zoppetti, “Influenza del terreno nel calcolo del campo elettrico e magnetico prodotto da linee elettriche”, dagli atti della XIV RiNEM, Quattordicesima Riunione Nazionale di Elettromagnetismo, Ancona, 16-19 settembre 2002
  - [7]. Duane E. Roller, Ronald Blum, “Fisica – Volume secondo: Elettricità, magnetismo, ottica”, Zanichelli, Bologna 1985.
  - [8]. Moreno Comelli, Luciano Bertocchi, Renato Villalta, Massimiliano Benes, “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, 2004
  - [9]. Moreno Comelli, “Phidel 2.2 – Manuale di riferimento”, <http://www.phidel.it>
  - [10]. Benes M., Comelli M., Drigo A., Giovani C., Montanari F., Villalta R., “Strumenti per una mappatura degli elettrodotti: database, software di simulazione e monitoraggio”, Comunicazione orale, pag. 21, Atti del Convegno Nazionale – Dal monitoraggio degli agenti fisici sul territorio alla valutazione dell’esposizione ambientale, 29-31 ottobre 2003, Villa Gualino, Torino.