

Campo magnetico disperso da elettrodotti ad alta tensione:

una metodologia avanzata di valutazione

basata su modelli 3D di linee elettriche e territorio

Andreuccetti, D. e Zoppetti, N.

Istituto di Fisica Applicata Nello Carrara (IFAC) del CNR, Via Panciatichi 64, 50127 Firenze
D.Andreuccetti@ifac.cnr.it, N.Zoppetti@ifac.cnr.it

Abstract

Viene presentata una metodologia avanzata per la valutazione del campo magnetico disperso da elettrodotti ad alta tensione. Essa risulta particolarmente adatta a compiere valutazioni accurate su vaste porzioni di territorio, specie quando si debba tener conto del contributo di numerose linee aeree e/o interrate, come spesso avviene, per esempio, nelle Valutazioni di Impatto Ambientale (VIA) relative a nuovi elettrodotti. Gli aspetti di maggior interesse della metodologia presentata sono (1) l'interazione con un archivio elettronico delle sorgenti, da cui vengono attinte tutte le informazioni necessarie alla valutazione; (2) l'utilizzo di un modello tridimensionale sia degli elettrodotti sia del territorio da essi attraversato; (3) l'interfacciamento diretto con la cartografia elettronica ed infine (4) l'impiego di una modalità di rappresentazione dei risultati basata su *contour maps*, che risulta di facile leggibilità, ma anche accurata ed esaustiva. L'utilizzo di un modello dettagliato delle linee elettriche, che tiene conto delle caratteristiche individuali di ogni singolo sostegno e di ciascuna campata, permette di ottenere risultati accurati tanto in prossimità di una linea, dove si fanno maggiormente sentire gli effetti dell'andamento non rettilineo dei conduttori sul piano verticale, quanto a distanza maggiore, dove sono influenti i cambiamenti di direzione della linea stessa sul piano orizzontale.

I. INTRODUZIONE

Vi sono casi in cui vi è l'esigenza di disporre di una valutazione del campo magnetico disperso da uno o più elettrodotti in una assegnata porzione di territorio, che sia più accurata e dettagliata di quella ottenibile dall'applicazione dei tradizionali modelli di calcolo 2D codificati dalla normativa CEI [1]. Nelle Valutazioni di Impatto Ambientale, per esempio, ci si imbatte spesso in situazioni in cui, in porzioni di territorio relativamente limitate, coesistono numerose linee elettriche con tracciati non paralleli ed è tutt'altro che rara l'eventualità di incroci tra di esse. Inoltre, la ricerca di un obiettivo di qualità relativamente elevato, quale quello di $3 \mu\text{T}$ previsto da un decreto ministeriale di cui si dà per imminente la pubblicazione, richiede di spingersi abbastanza vicino alla linea, dove non è del tutto trascurabile l'andamento a catenaria dei conduttori sul piano verticale. D'altra parte, qualora si sia interessati a ricercare valori più bassi, dell'ordine dei decimi di microtesla, occorre spingersi a distanze notevoli dalla linea, dove divengono significativi gli effetti dovuti ai cambiamenti di direzione del tracciato in pianta. In tutti i casi, infine, una valutazione accurata che interessi ampie regioni richiede che si tenga conto sia delle variazioni delle caratteristiche strutturali delle linee coinvolte (dovute per esempio all'utilizzo di tipi di sostegni diversi) sia della morfologia del territorio.

Queste esigenze sono interamente soddisfatte dalla metodica di valutazione recentemente sviluppata presso il nostro Istituto (in buona parte nell'ambito di una specifica tesi di laurea [2]) basata sulla definizione di un **modello tridimensionale** (3D) sia per le **sorgenti di campo** sia per una **porzione del territorio** che le circonda.

Il *modello 3D degli elettrodotti* viene costruito a partire dai dati contenuti in un archivio elettronico, che implementa un prototipo di **catasto delle sorgenti di campo elettrico e magnetico a frequenza industriale** il quale, a sua volta, è il risultato dello sviluppo di una attività nata in seno ad un progetto nazionale [3] a cui si è recentemente preso parte.

Il *modello 3D del terreno* (DTM: Digital Terrain Model) viene ricavato dalla cartografia 2D di base e rappresenta la conformazione orografica di una fascia di territorio intorno a ciascun elettrodotto considerato. Esso consente di determinare automaticamente le quote dei punti in cui si vuole calcolare il campo.

Affinché i modelli delle sorgenti e del terreno si integrino correttamente, mantenendo le giuste relazioni spaziali, è necessario che sia la cartografia sia le informazioni contenute nell'archivio delle sorgenti siano **georeferenziate** nello stesso sistema di coordinate cartografiche. Ciò garantisce che anche i risultati del calcolo saranno georeferenziati e dunque facilmente integrabili nella stessa cartografia di base.

La gestione dei modelli delle sorgenti e del terreno integrata alla cartografia permette di rappresentare i risultati del calcolo attraverso le cosiddette **mappe di isocampo**, ovvero delle *contour maps* costituite da un insieme di curve "di livello" (*curve isocampo*) relative a valori di induzione magnetica e di altezza dal suolo specificati dall'utente. Questa

modalità di rappresentazione si è rivelata particolarmente versatile, in quanto sintetizza in forma grafica i risultati del calcolo, rendendoli comprensibili anche ad un pubblico non specializzato.

II. LA SESSIONE DI CALCOLO

Il calcolo dell'induzione magnetica ed il tracciamento delle curve isocampo costituiscono la cosiddetta **sessione di calcolo**. Ogni sessione di calcolo comprende tutte le operazioni necessarie al tracciamento di un insieme di curve isocampo lungo una prefissata linea elettrica (**linea principale della sessione**) tenendo conto di tutte le eventuali altre linee (dette **linee secondarie della sessione**) che contribuiscono significativamente al campo totale in prossimità della linea principale. Ciascuna curva isocampo è relativa ad un valore di induzione magnetica specificato dall'utente.

La generica sessione di calcolo è caratterizzata da tre fasi distinte e consecutive: una prima fase in cui si costruisce il modello della linea principale e delle eventuali linee secondarie attingendo ai dati dell'archivio delle linee; una seconda in cui si effettua il calcolo dell'induzione magnetica ed in particolare la ricerca delle coordinate dei punti, con altezza dal suolo specificata, in cui si raggiungono i valori cercati; infine una terza fase in cui ha luogo l'effettivo tracciamento delle curve isocampo.

A. Il modello delle sorgenti

Il modello numerico delle sorgenti di induzione magnetica viene costruito all'inizio della sessione di calcolo e permane nella memoria dell'elaboratore fino al momento in cui l'applicazione, terminando, libera tutte le risorse utilizzate. I dati necessari (posizione, conformazione, altezza ed orientamento di tutti i sostegni di ciascuna linea e caratteristiche elettriche e meccaniche del cablaggio delle relative campate) vengono acquisiti dall'**archivio delle linee**, collegandosi in modalità *client-server* (con protocollo TCP/IP) ad una apposita **applicazione di interfaccia**, realizzata in linguaggio C, che a sua volta si connette al vero e proprio **motore del database**. L'utilizzo, dal lato del database, di una tale applicazione consente, da una parte, di isolare dalla rete l'archivio vero e proprio, aumentandone il livello di protezione e di affidabilità, e dall'altra di offrire alle procedure di calcolo una interfaccia standardizzata, indipendente dalla specifica implementazione dell'archivio stesso. Inoltre, l'*applicazione di interfaccia* offre alcune funzionalità di preelaborazione dei dati, che aumentano l'efficienza complessiva del sistema.

Le procedure di calcolo sono state realizzate in linguaggio C++, adottando una tecnica di programmazione **orientata agli oggetti**. Questa impostazione ha permesso di definire il modello delle sorgenti secondo una ben precisa gerarchia, che permette la gestione integrata dei dati e delle funzioni che agiscono su di essi.

La rappresentazione di un **tratto di elettrodotto aereo** si basa sulla definizione di un modello geometrico individuale di ciascun conduttore di ciascuna delle campate della linea, a sua volta costituito in ultima analisi dall'espressione analitica della **curva catenaria**. Tale curva, come è noto, descrive una fune pesante, omogenea, inestensibile e perfettamente flessibile, sospesa per i suoi estremi e soggetta unicamente al proprio peso. I parametri caratteristici di ciascuna catenaria sono determinati in funzione dei dati ricavati dall'archivio, e cioè delle coordinate dei punti di sospensione di ciascun conduttore e del parametro che specifica la tensione meccanica a cui esso è soggetto. A partire dall'espressione analitica della catenaria, è possibile determinare un sottoinsieme delle sue corde che ne costituisca una rappresentazione semplificata, ma sufficientemente accurata ai fini del calcolo dell'induzione magnetica.

Per modellare i **tratti interrati** si ricorre invece ad una spezzata, determinata campionando la superficie del terreno lungo il tracciato della linea e sottraendo alle quote dei punti ricavati la profondità di interramento dei conduttori, nominalmente costante. La scelta dei vertici della spezzata è condotta in modo da tenere conto dei cambi di direzione della linea sia sul piano orizzontale (in base ai vincoli imposti dalla planimetria del tracciato) sia sul piano verticale (vincoli imposti dal profilo del terreno lungo il tracciato).

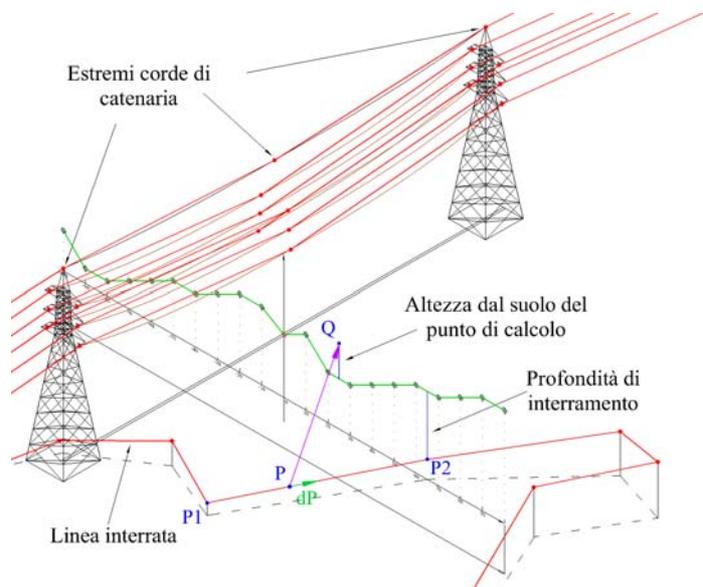


Figura 1: Definizioni relative al calcolo dell'induzione magnetica

B. Il calcolo dell'induzione magnetica

Il valore complessivo dell'induzione magnetica generata da ciascuna linea in un generico punto Q è calcolato componendo vettorialmente i contributi di tutti i segmenti che costituiscono i modelli dei conduttori della linea, dove per i tratti aerei tali segmenti sono corde di catenaria, mentre per i tratti interrati si tratta degli elementi costitutivi della spezzata che modella il conduttore. Il contributo di ciascun segmento è calcolato integrando numericamente lungo di esso la legge di Biot-Savart in forma differenziale:

$$\vec{B}_{segment} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{P1}^{P2} \frac{d\vec{P} \times (Q - P)}{|Q - P|^3}$$

dove I è la corrente che scorre sul segmento conduttore, $P1$ e $P2$ sono i suoi estremi, P il generico punto e $d\vec{P}$ l'elemento infinitesimo su di esso. Si veda anche la Figura 1, nella quale è rappresentata la situazione in cui si calcola il campo generato da una linea aerea (linea principale) tenendo conto di una linea interrata posta nelle immediate vicinanze (linea secondaria).

In presenza di più linee che contribuiscono significativamente al campo complessivo (come in Figura 1, dove se ne sono ipotizzate due), si pone il problema della combinazione dei relativi contributi. Si sono fino ad oggi considerate due differenti modalità, dette **modalità di combinazione coerente ed incoerente**, che corrispondono rispettivamente alla somma vettoriale dei vari contributi tenendo conto delle relative fasi ed alla semplice combinazione RMS dei rispettivi valori efficaci. Più in dettaglio, se si vogliono sommare i contributi \vec{B}_i di n linee in un dato punto Q , le due diverse modalità sono espresse dalle relazioni:

$$\text{Combinazione coerente: } B_{tot} = \left| \sum_{i=1}^n \vec{B}_i \right| \quad \text{Combinazione incoerente: } B_{tot} = \sqrt{\sum_{i=1}^n |\vec{B}_i|^2}$$

La possibilità di effettuare la combinazione incoerente è stata introdotta perché più adatta a trattare i casi, tutt'altro che rari, in cui o non è nota la relazione di fase tra le correnti che scorrono su elettrodotti distinti ed indipendenti, oppure le rispettive intensità risultano statisticamente scorrelate. Sebbene non costituisca necessariamente il caso peggiore, la somma incoerente fornisce in questi casi una stima ragionevolmente cautelativa.

C. I risultati del calcolo

Per determinare l'andamento delle curve isocampo, si procede lungo la linea principale e si ricercano su ogni *sezione* (definita nel paragrafo seguente) i punti in cui si raggiungono i valori di induzione magnetica ricercati. Si uniscono quindi i punti relativi allo stesso valore di campo, come mostrato in Figura 2, nella quale è riportata anche una rappresentazione delle *sezioni*, di cui si nota la particolare disposizione "a ventaglio" presso i cambi di direzione del tracciato della linea.

Infine, in Figura 3, si riporta un esempio in cui è rappresentata la distribuzione di induzione magnetica ad un metro dal suolo nei pressi di una cabina primaria, alla quale fanno capo più linee, sia aeree sia interrato. Tale rappresentazione è stata ottenuta componendo nella stessa mappa i risultati di sessioni di calcolo relative a linee principali diverse (utilizzando la combinazione coerente per i contributi dalle diverse linee).

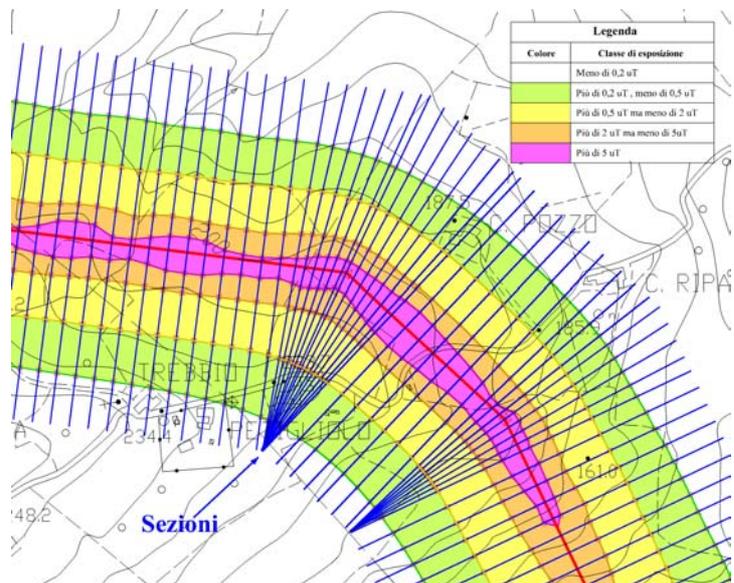


Figura 2: Mappa di isocampo con evidenziazione delle sezioni

III. IL SEZIONAMENTO DEL TERRENO

La creazione del **modello 3D del terreno** (DTM) e l'estrazione di dati da esso avvengono fuori linea, una volta per tutte, in modo che l'applicazione di calcolo attinga le informazioni riguardo l'orografia da un file di testo, di opportuno formato, indipendente dal particolare tipo di DTM di cui si dispone. Non vi è spazio in questa sede per approfondire l'aspetto della costruzione del DTM a partire dalla cartografia 2D; basti sapere che il modello stesso consiste in un file contenente elementi triangolari con vertici quotati e che è ottenuto a partire dai punti quotati e dalle linee isocline della cartografia 2D, utilizzando una applicazione che implementa la triangolazione conforme di Delaunay [4].

Uno degli aspetti cruciali per il funzionamento dell'applicazione di calcolo è il cosiddetto **sezionamento del terreno**: si definisce *sezione del terreno*, o più brevemente *sezione*, l'insieme di un numero finito di punti appartenenti alla superficie definita dal DTM, individuati allontanandosi a passi regolari dall'asse della linea, in direzione trasversale ad essa ed in entrambi i versi (Figura 4). Ciascuna sezione ricostruisce il profilo del terreno sul piano verticale a cui essa appartiene e viene memorizzata nel cosiddetto *file delle sezioni*, che contiene i dati di tutte le sezioni ricavate lungo le linee di interesse. Le sezioni vengono utilizzate per determinare la quota dei punti in cui calcolare il campo.

Con **sezionamento del terreno** si indica il processo di costruzione delle sezioni procedendo lungo l'asse di una linea elettrica. Durante il sezionamento vengono definite sia le caratteristiche delle singole sezioni, quali il passo trasversale ed il numero di punti appartenenti ad ognuno degli sbracci laterali (che insieme definiscono la larghezza della sezione), sia quelle che determinano come ciascuna sezione è disposta rispetto alle altre estratte lungo la stessa linea. Tali caratteristiche sono scelte in base sia al tipo di indagine che si vuole

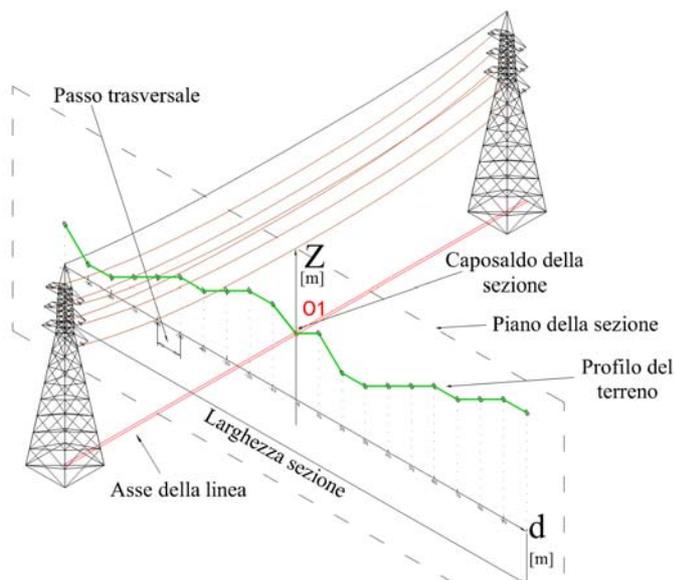


Figura 4 Sezionamento del terreno

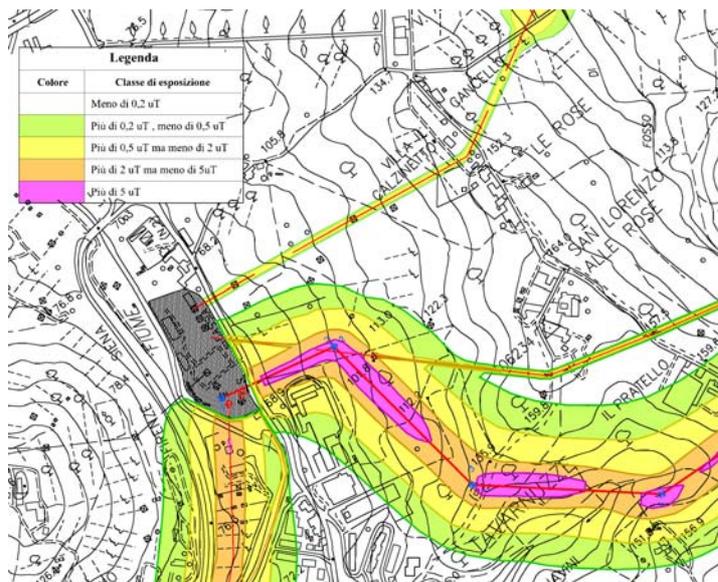


Figura 3: Mappa di isocampo nei pressi di una stazione elettrica

svolgere, sia alla scala della cartografia da cui si è ricavato il modello del terreno, sia alla precisione con cui le sorgenti sono localizzate attraverso i relativi dati di archivio. In particolare, la larghezza della sezione è legata al più piccolo valore di induzione magnetica per cui si è interessati a tracciare le curve isocampo, mentre il passo trasversale minimo è condizionato dalla risoluzione consentita dalla scala della cartografia di base utilizzata (tale risoluzione è, per esempio, dell'ordine di 2 metri per la cartografia in scala 1:10.000).

Particolare cura è stata posta nella progettazione di un algoritmo di sezionamento che gestisca i cambi di direzione della linea lungo cui si procede, in modo da evitare l'intersezione tra le porzioni di piano occupate da sezioni differenti (si veda la Figura 2). Tale evenienza è per quanto possibile da evitare, sia per non introdurre due rappresentazioni in disaccordo della stessa porzione di territorio e quindi risultati di calcolo potenzialmente non corretti ([1] cap. 3, pagg. 98-104), sia perché l'assenza di sovrapposizioni tra

sezioni facilita l'automatizzazione del processo di tracciamento delle curve isocampo.

IV. REFERENZE

- [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] Gruppo di Lavoro cEr/CeN: "Specifiche tecniche per la realizzazione del Catasto Elettromagnetico Nazionale e dei Catasti Elettromagnetici Regionali", Rev. 3.1/ENEA, 2 agosto 2001.
- [4] Jonathan Richard Shewchuk, "Triangle: Engineering a 2D Quality Mesh Generator and Delaunay Triangulator", First Workshop on Applied Computational Geometry (Philadelphia, Pennsylvania), pages 124-133, ACM, May 1996.