

Un approccio modulare alla determinazione delle fasce di rispetto: dall'interconfronto di software di calcolo all'integrazione con l'applicativo GIS

Comelli M.⁽¹⁾, Zoppetti N.⁽¹⁾

(1) IFAC-CNR, Via Madonna del Piano, 10 - 50019 Sesto Fiorentino (FI), m.comelli@ifac.cnr.it

La normativa italiana vigente prevede l'utilizzo di procedure semplificate per il calcolo delle fasce, che oltre a risultare potenzialmente più onerose in termini di tempi di calcolo rispetto all'utilizzo di un algoritmo basato sull'implementazione esatta dell'equazione di Biot-Savart e che tenga conto della corretta configurazione geometrica dei conduttori, sono applicabili solo in casi semplici, presentano alcune incongruenze interne e possono dare luogo di conseguenza ad errori e casi di non applicabilità.

Si definisce una procedura, sufficientemente flessibile per essere applicata mediante diversi strumenti software, mirata alla generazione di mappe territoriali che rappresentano i livelli di campo magnetico e le fasce di rispetto di primo e secondo livello relative ad elettrodotti.

La determinazione dell'induzione magnetica viene affidata a due specifici software di calcolo che permettono di determinare il valore del campo sui punti (georiferiti) di un grigliato (bidimensionale o tridimensionale), una volta noti i parametri geometrici ed elettrici delle linee considerate.

Una volta ottenuto il valore dell'induzione magnetica calcolata su ciascun punto del grigliato, questo viene passato al GIS desktop GRASS per una sequenza di operazioni in cascata: dapprima un'interpolazione dei dati per ottenere un raster, quindi una successiva elaborazione per ricavare le isolinee in formato vettoriale.

È stato effettuato il calcolo in 2 casi studio esemplificativi, uno semplice in prossimità di una linea a singola terna in un tratto rettilineo, ed un in prossimità di diversi elettrodotti con configurazioni geometriche complesse.

L'utilizzo di strumenti dedicati ad uno specifico obiettivo (nel caso considerato il calcolo del campo e l'output grafico dei risultati) comporta un duplice vantaggio: da un lato permette di ottenere una valutazione esatta dei livelli di induzione magnetica non ricorrendo ad approssimazioni e non limitandosi ai soli casi semplici (per quanto coprono la maggioranza della casistica), dall'altro consente di avere a disposizione la generazione delle fasce di rispetto a tutte le quote e con l'approssimazione desiderata avvalendosi di uno strumento mirato alla generazione di mappe territoriali.

DISTANZE ED AREE DI PRIMA APPROSSIMAZIONE: GLI ASPETTI NORMATIVI

La Distanza di Prima Approssimazione (DPA) e l'Area di Prima Approssimazione (APA) di una linea elettrica costituiscono, nel loro insieme, una modalità di espressione approssimata della fascia di rispetto prevista dalle normative nazionali (legge 36/2001 e DPCM 8 luglio 2003). Il calcolo della DPA (che si riferisce ad un tratto di elettrodotto rettilineo) è l'unico caso in cui la larghezza della fascia viene determinata a partire dalla distribuzione di induzione magnetica attesa intorno all'elettrodotto in condizioni prefissate. Negli altri casi (cambi di direzione, affiancamento e incrocio di linee) il calcolo dell'APA, secondo la metodologia indicata dal DM del 29 maggio 2008, si basa direttamente su parametri legati alla struttura ed alle caratteristiche della linea.

LA DETERMINAZIONE DI DPA E APA SUL TERRITORIO REGIONALE

Presso IFAC-CNR, nell'ambito di una collaborazione con ARPA Toscana, sono state realizzati due applicativi per il calcolo di DPA ed APA sull'intero territorio regionale:

- **apa_angoli** calcola la DPA per un tratto rettilineo di linea facente parte di un elettrodotto a semplice o a doppia terna e le APA relative ai suoi cambi di direzione, senza considerare interazioni con altre linee salvo, nel caso di doppia terna, quelle che eventualmente condividono i sostegni con la linea in esame;
- **apa_incroci** determina l'APA tenendo conto di intersezioni tra campate di linee diverse.

L'APA complessiva in una certa porzione di territorio è data dalla sovrapposizione di APA diverse: quelle relative alle linee che insistono nella zona di interesse che a loro volta sono composte dalla sovrapposizione delle diverse tipologie di APA che, allo stato attuale, tengono conto di cambi di direzione ed incroci.

I due programmi costituiscono un modulo autonomo all'interno del pacchetto PLEIA, ed operano attingendo dall'archivio CeRT (il Catasto degli elettrodotti della Regione Toscana) i dati necessari alle elaborazioni da svolgere. A tal fine i programmi – esattamente come molti altri applicativi del pacchetto – devono potersi collegare all'*application server* di cui è dotato l'archivio e pertanto necessitano di un collegamento di rete con l'archivio stesso.

I LIMITI DELL'APPLICAZIONE DELLA NORMATIVA

RACCORDI DI TRATTI RETTILINEI E TRATTI CON ANGOLI

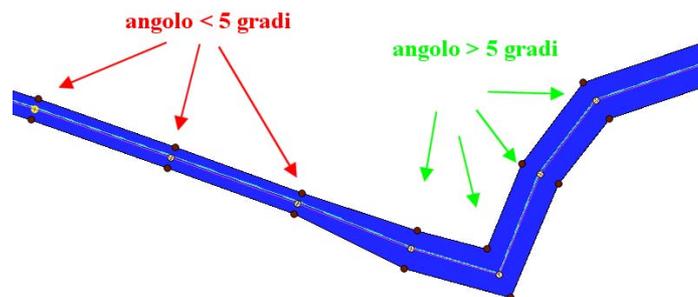
In alcuni casi l'applicazione del decreto comporta discontinuità nella generazione delle DPA/APA, in particolare per quanto riguarda linee che presentano tratti rettilinei e tratti con angoli superiori a 5°. Nel primo caso si determina la DPA tenendo conto delle effettive caratteristiche della linea e del sostegno di interesse, nel secondo si applicano le correzioni proposte dal Decreto e riportate in Tabella 1:

Tabella 1 - Estensione della fascia (APA) in funzione dell'ampiezza dell'angolo, della tensione nominale della linea e del numero di sub-conduttori del fascio che costituiscono ciascuna fase.

Per linee a <u>terna singola e a doppia terna ottimizzata</u>			Per linee in <u>doppia terna</u>		
Tensione	Estensione della fascia lungo la bisettrice θ angolo di deviazione tra 5° e 90°		Tensione	Estensione della fascia lungo la bisettrice θ angolo di deviazione tra 5° e 90°	
	P _{INT bis}	P _{EXT bis}		P _{INT bis}	P _{EXT bis}
380 kV tre conduttori per fase	$54 + 0.43 \cdot \theta$	$61 + 0.24 \cdot \theta$	DT a 380 kV tre conduttori per fase	$81 + 0.65 \cdot \theta$	$91 + 0.36 \cdot \theta$
380 kV due conduttori per fase	$44 + 0.35 \cdot \theta$	$49 + 0.19 \cdot \theta$	DT 380 kV due conduttori per fase	$66 + 0.52 \cdot \theta$	$73 + 0.28 \cdot \theta$
380 kV un conduttore per fase	$32 + 0.25 \cdot \theta$	$35 + 0.14 \cdot \theta$	DT 380 kV un conduttore per fase	$48 + 0.37 \cdot \theta$	$52 + 0.21 \cdot \theta$
220 kV due conduttori per fase	$42 + 0.29 \cdot \theta$	$47 + 0.16 \cdot \theta$	DT 220 kV due conduttori per fase	$44 + 0.30 \cdot \theta$	$49 + 0.17 \cdot \theta$
220 kV un conduttore per fase	$28 + 0.20 \cdot \theta$	$32 + 0.11 \cdot \theta$	DT 220 kV un conduttore per fase	$31 + 0.22 \cdot \theta$	$36 + 0.12 \cdot \theta$
132/150 kV	$22 + 0.14 \cdot \theta$	$24 + 0.07 \cdot \theta$	DT 132/150 kV un conduttore per fase	$31 + 0.204 \cdot \theta$	$34 + 0.10 \cdot \theta$

Come si può notare, l'estensione della fascia nel caso di angoli con ampiezza superiore a 5° non dipende né dalla tipologia del sostegno né dalla corrente che caratterizza la particolare tipologia di conduttore impiegata, come invece accade lungo tratti rettilinei. Ciò può dare origine a notevoli discontinuità nell'ampiezza della fascia. Un esempio di ciò è riportato nella Figura 1, in cui, in un tratto costituito da sostegni con tipologia omogenea, si verifica una apprezzabile discontinuità nella larghezza della fascia, risolta in sede operativa raccordando i punti ottenuti dal calcolo di DPA ed APA, rispettivamente.

Figura 1 - Discontinuità della fascia nel caso di tratti di linea rettilinei e con angoli.



LINEE CON SOSTEGNI A DOPPIA TERNA

Vi sono limitazioni alla determinazione della DPA di una linea con sostegni a doppia terna, anche quando siano noti tutti i dati di base (corrente a norma CEI 11-60 di entrambe le linee e tipologia del sostegno). In particolare:

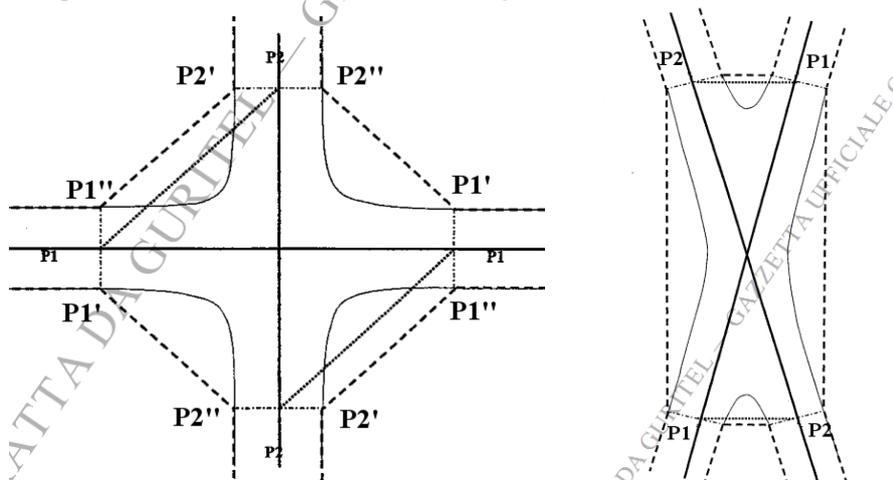
- la DPA non può essere calcolata per i sostegni che possono ospitare più di due terne trifase;
- la DPA non può essere calcolata se il sostegno, pur essendo a doppia terna, è utilizzato da tre o più linee;

- infine, la DPA non può essere calcolata se le due linee che utilizzano il sostegno non sono cablate in modo standard (nel quale una linea utilizza i tre punti di sospensione posti da un lato del sostegno e l'altra linea i punti posti dall'altro lato).

INCROCI

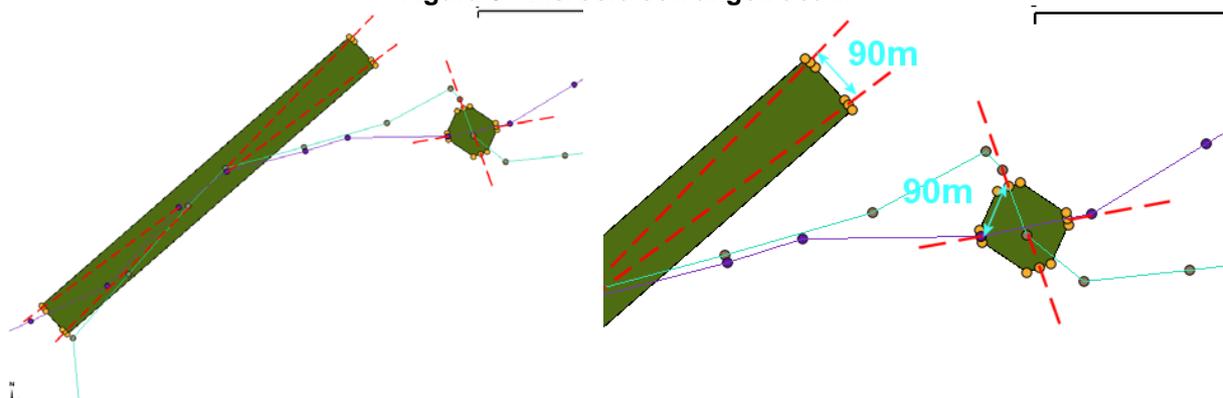
Nel caso di incroci tra linee, la procedura descritta nel Decreto fa riferimento a punti presso i quali la distanza interasse (misurata lungo la normale alla bisettrice dell'angolo acuto tra le campate che si incrociano) assume valori tabulati. Quando l'incrocio avviene con angoli molto acuti (linee quasi parallele), le coppie di tali punti cadono molto distanti dall'incrocio e le APA "si allungano" e possono discostarsi molto dai tracciati delle linee.

Figura 2 - Determinazione della APA per incroci secondo il Decreto.



In Figura 3 si illustra esempi di incrocio tra linee a 132 kV per le quali la distanza tabulata nel decreto è pari a 90 m.

Figura 3 - Incrocio con angoli acuti.



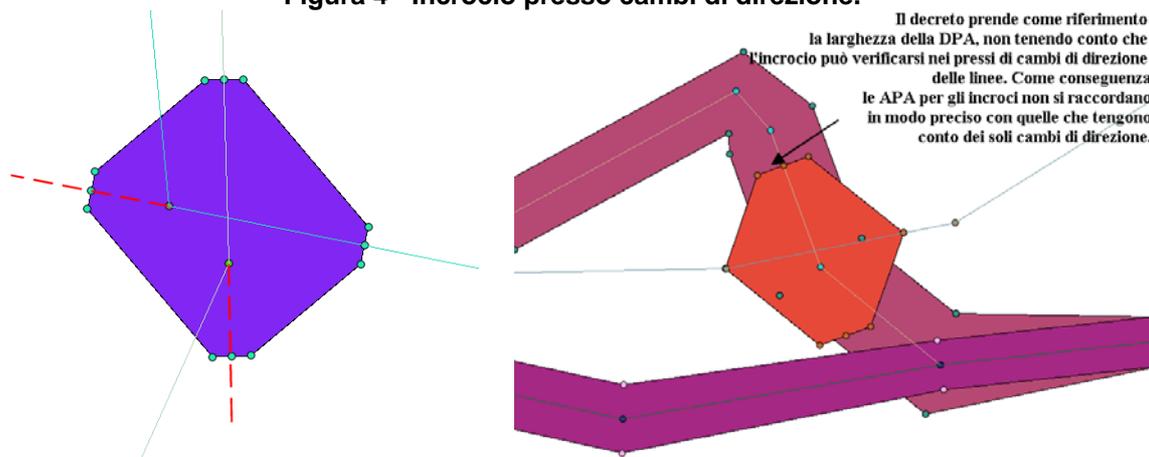
L'applicazione della procedura descritta nel decreto si riferisce ad una APA applicata ad incroci che avvengono lungo tratti rettilinei di entrambe le linee. Sorgono dunque problemi quando l'incrocio avviene vicino a sostegni presso i quali si verifica un cambio di direzione, nel qual caso la APA per gli incroci tiene conto della direzione delle rette sulle quali giacciono le campate che si incrociano e non del reale tracciato delle linee (

Figura 4, a sinistra).

Le APA presso i cambi di direzione delle linee sono in genere più ampie delle DPA e quindi non è raro che si verifichi quanto evidenziato in

Figura 4 (a destra) e cioè che il "troncamento" della APA relativa all'incrocio non si raccorda alla APA che tiene conto degli angoli, che risulta in genere più ampia.

Figura 4 - Incrocio presso cambi di direzione.



Nella Figura 4, a destra, si nota inoltre un altro caso particolare non previsto dal decreto: quello della biforcazione di due linee in doppia terna che passano in configurazione di terna singola.

I SOFTWARE DI CALCOLO: TIPOLOGIE ED INTERCONFRONTO

Per determinare in maniera corretta l'estensione delle fasce, senza ricorrere ad approssimazioni ed evitando i problemi derivanti dall'applicazione delle procedure descritte nel decreto, è stata sviluppata una procedura che prevede l'utilizzo integrato di appositi programmi per il calcolo dell'induzione magnetica e quindi il passaggio dell'output ad un software GIS che genera, in maniera automatizzata ed efficiente, le geometrie relative alle fasce.

Sono stati innanzitutto considerati due software, PLEIA-EMF (Andreuccetti, 2004), sviluppato nell'ambito della collaborazione tra IFAC-CNR ed ARPA Toscana, e Phidel (Comelli, 2007), un software commerciale nato nel corso di una collaborazione con ARPA Friuli Venezia Giulia e già utilizzato per il calcolo delle fasce fornite dai gestori.

Sebbene i due applicativi siano nati in contesti diversi, alcuni test di interconfronto hanno permesso di verificarne l'identità dei risultati. Infatti, per quanto riguarda l'algoritmo di calcolo, entrambi i software implementano le equazioni di Maxwell e consentono di parametrizzare correttamente la catenaria nella costruzione delle campate delle linee in esame.

Fanno inoltre della modularità uno dei loro punti di forza: invece di consistere di un ambiente chiuso (che racchiuda in sé i dati delle linee, il programma di calcolo e l'ambiente di visualizzazione), permettono di attingere dati da fonti diverse, purché siano ricondotte ad un opportuno formato, e risultano versatili in quanto basati su standard di input ed output aperti (file di testo).

Questo rende l'output dei software analizzati particolarmente adatto ad essere elaborato e quindi fornito a GRASS per le elaborazioni tipiche di un GIS.

Infine, entrambi i programmi possono effettuare il calcolo del campo secondo modalità di interesse per questo lavoro, in particolare:

- su piani orizzontali o verticali, date le coordinate del punto di origine, l'inclinazione nello spazio e il passo della griglia di punti lungo X e Y;
- su grigliato, ad opportune quote, a partire da un set di punti georiferiti e quotati. In particolare, per quotare i punti PLEIA attinge i dati dal DTM regionale, mentre in Phidel è implementato un algoritmo di interpolazione basato su dati estratti dalla cartografia numerica.

L'ACCOPIAMENTO CON GRASS

La determinazione di isolinee a partire da un insieme di punti è una procedura comunemente implementata nei software GIS, e risulta pertanto naturale pensare di utilizzare GRASS (*Geographic Resources Analysis Support System*), un software per l'analisi ed elaborazione di dati

geospaziali open source ed estremamente adatto per l'implementazione di routine automatizzate lato server, per ricavare le geometrie delle fasce a partire dall'output del software di calcolo.

Questa procedura mira alla determinazione delle fasce di rispetto propriamente dette, e si svincola dalla determinazione di APA e DPA, che, come si è visto nella prima parte dell'articolo, può essere problematica.

IMPLEMENTAZIONE DI UNA PROCEDURA LATO SERVER

Si è allora creata una procedura che, a partire dall'output del software su un piano orizzontale, a quota determinata o ad una certa altezza dal suolo (seguendo quindi il profilo del DTM), permettesse di determinare correttamente l'andamento delle isolinee come interpolazione del risultato di calcolo.

Per la determinazione della distanza di prima approssimazione, intesa come proiezione al suolo del volume di campo superiore al limite di legge, il calcolo va eseguito su più piani (ossia in un grigliato tridimensionale di un volume contenente i conduttori di interesse); ad ogni coppia di coordinate (X, Y) risultano così associato un elenco di coppie di valori di quota ed induzione calcolata (Z_i , B_i). L'interpolazione effettuata sui $\max(B_i)$ restituisce la distanza di prima approssimazione, mentre l'interpolazione sui valori di campo per un certo Z_i fornisce l'estensione della fascia alla quella quota (assoluta o riferita al DTM).

Per sgravare i tecnici dall'utilizzo di GRASS, un software sicuramente potente ma dall'interfaccia poco intuitiva, è stata implementata una procedura lato server accoppiata ad un'interfaccia web che consente di eseguire l'upload dell'output del software (che per l'occasione è stato ottimizzato in modo da minimizzare il traffico di rete ed il successivo processamento lato server).

Figura 5 - Upload dei dati e definizione dei parametri per la generazione delle isolinee.

The screenshot shows a web form titled "UPLOAD ISOLINEE ELF DA FILE PL5". At the top left is the ARPAT logo (Agenzia regionale per la protezione ambientale della Toscana) and at the top right is the IFAC logo. The form contains the following fields and controls:

- File .pl5: A text input field followed by a "Sfoglia..." button.
- Denominazione: A text input field.
- Altezza dal suolo [m]: A text input field with the value "0".
- B_{min} [μT]: A text input field with the value "1".
- B_{max} [μT]: A text input field with the value "100".
- ΔB [μT]: A dropdown menu with the value "1".
- Classification options: Two radio buttons. The first is "Classificazione esistente" with a dropdown menu set to "Niente". The second is "Nuova classificazione" with an empty text input field.
- At the bottom center is an "Invia" button.

Una volta caricato sul server, il file con i risultati di calcolo viene analizzato per verificarne la consistenza con il formato previsto dal sistema, e viene inoltre eseguito un controllo sulle coordinate. A questo punto, sul server si crea un file di testo con 3 colonne, in cui vengono riportati:

- X, Y e B se il grigliato è orizzontale e disposto secondo gli assi di riferimento;
- X', Y' e B se il grigliato è orizzontale ma ruotato, in modo da eseguire il calcolo su di un grigliato regolare (riconducendosi al caso precedente);
- X', Z' e B se il grigliato è verticale e ruotato, in modo da eseguire i passaggi successivi su di un unico tipo di file.

Viene quindi creato un database GRASS temporaneo, assegnato all'utente in base alle credenziali di accesso. Viene utilizzato il mapset PERMANENT, mentre la location viene ridefinita in base alle coordinate ed al numero di righe e colonne dei dati in input.

Vengono eseguiti i seguenti comandi di Grass in sequenza:

- r.in.xyz: il file di testo precedentemente creato viene letto e quindi convertito in un raster, in cui il valore di ogni cella corrisponde al valore di induzione calcolata;
- r.contour: dal raster vengono ricavate le curve di livello di induzione magnetica comprese tra i valori minimo e massimo e con il passo specificati dall'utente, e salvate in un vettore di Grass;
- v.out.ogr: le curve di livello vengono convertite in uno shape file.

A questo punto, lo shape file viene convertito in una tabella nel database PostgreSQL con colonna geometrica PostGIS (in due passi: prima viene creato un file di testo che rappresenta una query per il popolamento del database, quindi eseguita con un motore SQL integrato sul server).

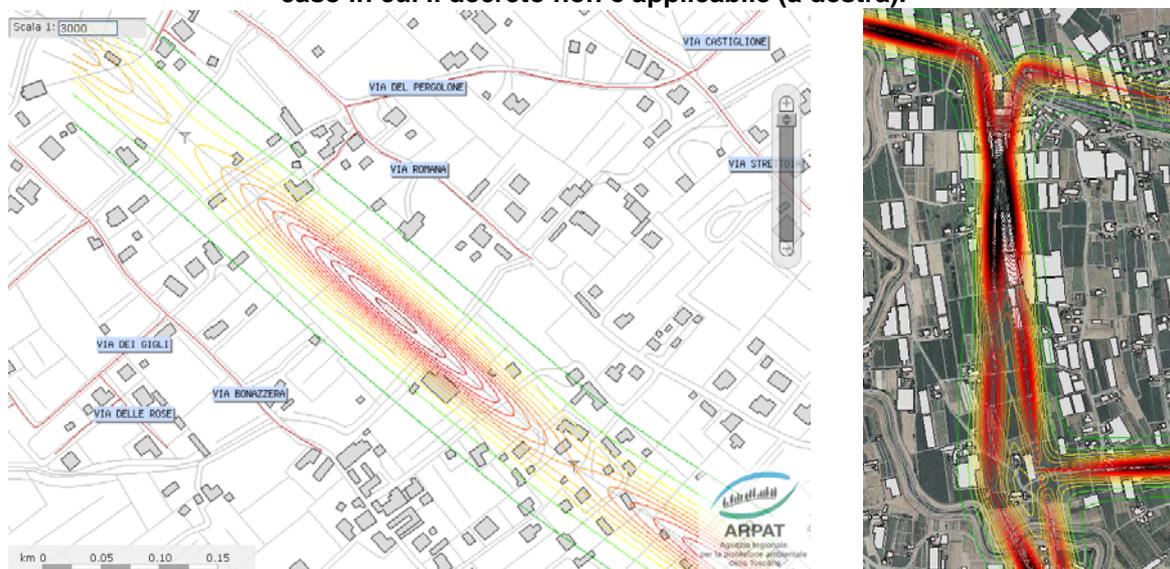
In caso di piano verticale, alla geometria così ottenuta viene dapprima applicata una rotazione attorno all'asse X, in modo da riportarla all'orientamento originario. In caso di calcolo su piano obliquo, questa viene quindi riportata alla posizione ed inclinazione di partenza tramite una seconda trasformazione affine, utilizzando un'apposita funzione PostGIS.

Le geometrie di questa tabella vengono quindi unite a seconda del valore di campo, ed inserite in un'apposita tabella del database.

LA VISUALIZZAZIONE DEI RISULTATI

Se il calcolo avviene su di un piano orizzontale, viene creato un apposito layer che aggiorna l'interfaccia del sistema webGIS in uso presso ARPA Toscana; questo consente ai tecnici di poter sovrapporre i risultati del calcolo alla cartografia regionale e verificare le possibili intersezioni delle isolinee di campo con l'edificato, alla quota di interesse.

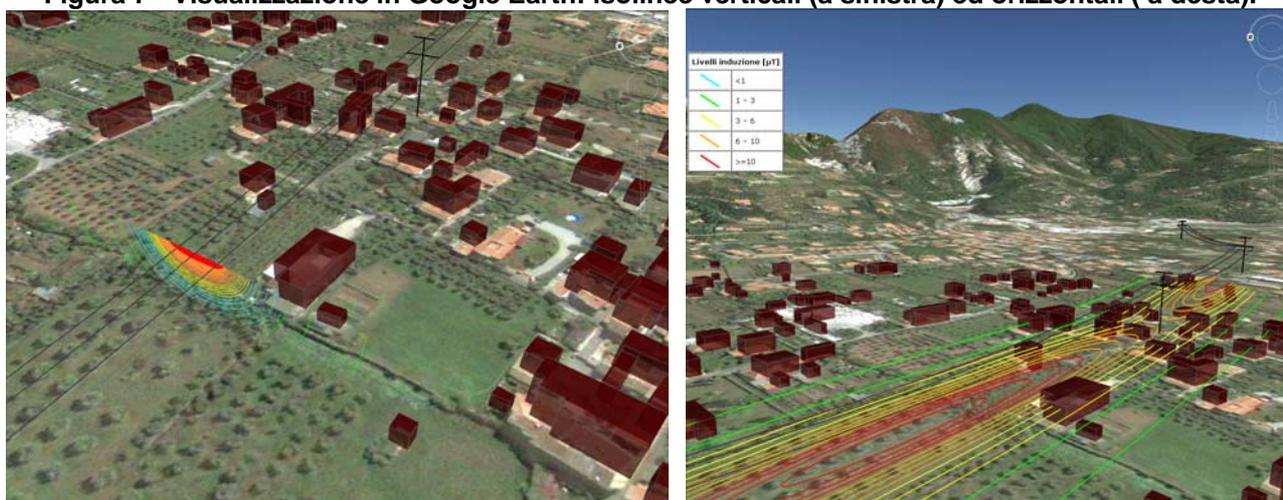
Figura 6 - Risultato della simulazione su webGIS degli Agenti Fisici per una linea in un tratto rettilineo (a sinistra) e con 3 linee, con angoli, incroci e biforcazione, caso in cui il decreto non è applicabile (a destra).



Per mostrare i risultati, a titolo di esempio sono stati scelti due casi particolari, visualizzati in Figura 6: a sinistra una linea a singola terna, in tratto rettilineo e pianeggiante, a destra una situazione con tre linee, in cui oltre a vari cambi di direzione si ha un incrocio ed una derivazione, situazione difficilmente risolvibile in termini di DPA ed APA seguendo le istruzioni del DM.

Altra opzione interessante è la possibilità di esportare i risultati delle interpolazioni in formato KMZ, in modo da caricarle in Google Earth e sovrapporle, oltre alle ortofoto di Google, al modello tridimensionale dell'edificato e delle linee elettriche contenute in archivio. In questo modo, poiché è possibile rappresentare i risultati ad un'altezza dal suolo corrispondente a quella di calcolo, si può evidenziare immediatamente l'intersezione o meno di un'isolinea di interesse con l'edificato, opportunamente estruso secondo il valore relativo all'altezza (v. Figura 7, a destra).

Figura 7 - Visualizzazione in Google Earth: isolinee verticali (a sinistra) ed orizzontali (a destra).



CONCLUSIONI

Il Decreto del 2008 prevede una metodologia semplificata di calcolo delle fasce di rispetto per gli elettrodotti, compendiando in alcune tabelle le modalità di determinazione di Distanze ed Aree di Prima Approssimazione. Presso IFAC-CNR sono stati sviluppati due programmi di calcolo che hanno permesso di determinare in maniera automatizzata, attingendo dall'archivio CeRT presente presso ARPA Toscana, tali entità geometriche su tutto il territorio regionale.

Sono emerse, nell'implementazione del lavoro, alcune criticità rilevanti che hanno condotto ad un'interpretazione del decreto per quanto riguarda il raccordo di DPA ed APA lungo alcuni punti dei tracciati, ed hanno evidenziato l'impossibilità a procedere secondo quanto suggerito dalla normativa nei casi in cui la stessa non risulta applicabile, in quanto si riconduce ad una casistica particolare e priva di elementi di genericità.

È allora stato condotto un lavoro che ha visto il confronto di diversi software di calcolo, PLEIA-EMF e Phidel, ne ha estratto le peculiarità più vantaggiose e quindi accoppiato i risultati con una procedura implementata lato server e basata sul GIS GRASS per l'interpolazione del calcolo al fine di ottenere curve di livello rappresentanti esattamente l'estensione delle fasce.

La memorizzazione dei dati forniti da GRASS nel data base georiferito presente in ARPAT ha inoltre permesso l'immediata integrazione del lavoro con l'ambiente webGIS, nonché offerto ai tecnici dell'Agenzia la possibilità di esportare nell'ambiente 3D di Google Earth i risultati delle simulazioni, per sovrapporli con la cartografia di interesse.

Bibliografia

1. Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio, *Approvazione della metodologia di calcolo per la determinazione delle fasce di rispetto per gli elettrodotti*, Decreto 29 maggio 2008, Supplemento ordinario n. 160 alla Gu 5 luglio 2008 n. 156
2. Andreuccetti D. and Zoppetti N., *Magnetic fields dispersed by high-voltage power lines: an advanced evaluation method based on 3-D models of electrical lines and the territory*, 2004 Radiation Protection Dosimetry, 111(4), 343–347.
3. Comelli M., Benes M., Bampo A. and Villalta R., *A technical note about Phidel: a new software for evaluating magnetic induction field generated by power lines*, 2007, Radiation Protection Dosimetry, Vol. 123, No. 2, pp. 182–189
4. Sito internet di GRASS: <http://grass.fbk.eu/>