



Università degli Studi dell'Aquila  
Dipartimento di Ingegneria Elettrica e dell'Informazione  
67100 Poggio Roio AQ

**Relazione tecnica: validazione software WinELF (ver. 7.0)**

**Responsabile Scientifico: *Prof. Mauro Feliziani***

**L'Aquila, novembre 2007**

## 1. INTRODUZIONE

Oggetto di questo studio è la validazione del software WinELF (versione 2006) della VECTOR s.r.l. mediante confronto con altri risultati provenienti da misure sperimentali e da calcoli utilizzando un altro programma di calcolo.

### 1.1 Descrizione Software WinELF

WinELF è un modulo software finalizzato al calcolo del campo induzione magnetica generato da una o più linee ad alta tensione a frequenza industriale. Supporta il calcolo delle fasce di rispetto. Per la memorizzazione delle informazioni relative alla linea (sostegni, conduttori, campate, gestori) il modulo si appoggia ad un Data Base Oracle (o MS Access) gestibile direttamente dall'applicativo. La sequenza delle campate di interesse per il calcolo in una zona è rappresentata sul territorio tramite simboli e colori selezionati dall'operatore che permettono di distinguere linee con tensione diversa. Il calcolo del campo magnetico viene effettuato secondo il metodo indicato dalla Norma CEI 211-4 o con un'integrazione lungo la catenaria. L'operatore è in grado di definire alcuni parametri inerenti l'elaborazione e la sua rappresentazione grafica. Il campo magnetico può essere valutato direttamente sopra il modello orografico corrente oppure lungo piani orizzontali o verticali; la quota alla quale viene posizionato il piano orizzontale e la direzione e dimensione della zona piana verticale sono definite volta per volta dall'operatore.

Le caratteristiche principali di WinELF sono riportate nel seguito:

**Campo calcolato:** Campo induzione magnetica

**Modelli di calcolo:** Secondo Norma CEI 211-4; integrazione lungo la catenaria

**Unità di misura:**  $\mu\text{T}$  (microTesla)

**Scala cromatica di rappresentazione:** definibile dall'operatore

**Soglia:** definibile dall'operatore

**Passo di calcolo:** definibile dall'operatore

**Data base:** MS Access, Oracle

**Zona di influenza:** Rettangolare

**Criteri di selezione campate:** Area geografica, Tensione

**Criteri di calcolo:** Per punto – Per area (sul modello orografico, su piani verticali e orizzontali).

**Output:** Grafico (2D-3D), collegamento DDE ad oggetti Windows

La simulazione numerica è uno strumento essenziale per una rapida e affidabile valutazione dei livelli di campo in una qualsiasi area interessata da elettrodotti, allo scopo di poterne agevolmente valutare la compatibilità con le prescrizioni legali vigenti. A tal fine è stato sviluppato un software in grado di calcolare l'induzione magnetica prodotta da strutture filari percorse da corrente in regime quasi-statico, in cui campo elettrico e magnetico possono essere considerati indipendenti. Tale ipotesi è largamente verificata per la frequenza industriale di 50 Hz utilizzata in Europa per la trasmissione e distribuzione dell'energia elettrica in corrente alternata.

## 2. VALIDAZIONE NUMERICA DEL SOFTWARE WINELF

### 2.1 Confronto con altro codice numerico

Per validare il software WinELF, è stato operato un confronto con il programma di calcolo **MAGWIRE3D** sviluppato all'Università de L'Aquila per l'analisi dei campi magnetici a bassa frequenza generati dalle linee di distribuzione elettrica. La descrizione del software e' riportata nel seguito

### 2.2 Descrizione Software MAGWIRE3D utilizzato per validazione

Il software MAGWIRE3D sviluppato in *Matlab* da L'Università de L'Aquila si basa sulla soluzione della legge di *Biot-Savart* per il calcolo dell'induzione magnetica. La legge di *Biot-Savart* afferma che (vedi Fig.1) l'induzione magnetica  $\vec{B}$  prodotta in un punto nello spazio da un segmento infinitesimo di filo ( $d\vec{l}$ ) percorso da una corrente  $i(t)$  è data da:

$$d\vec{B}(\vec{r}, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{i(t)d\vec{l} \times \vec{r}'}{|\vec{r}'|^3}$$

dove  $\mu_0$  è la permeabilità magnetica del vuoto ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m),  $\vec{r}$  è il vettore posizione,  $r'$  la distanza tra il segmento infinitesimo ed il punto di calcolo  $P(\vec{r}) = P(x,y,z)$ .

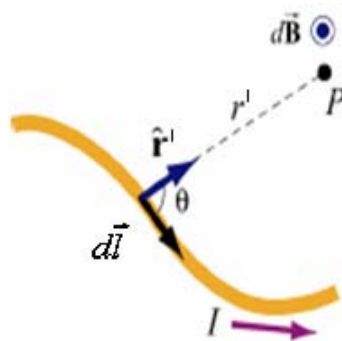


Figura 1– Illustrazione delle grandezze della legge di Biot-Savart

L'induzione magnetica totale  $\vec{B}$  si trova sommando i singoli contributi infinitesimi, il che equivale ad un'integrazione lungo il tratto di conduttore considerato, di geometria e lunghezza note:

$$\vec{B}(\vec{r}, t) = \int_{wire} d\vec{B}(\vec{r}, t) = \int_{wire} \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{i(t)d\vec{l} \times \vec{r}'}{|\vec{r}'|^3}$$

L'integrazione non è di facile risoluzione se la geometria del conduttore è complessa, per cui si fa un'approssimazione sostituendo l'integrale con una sommatoria. Ogni conduttore percorso da corrente viene discretizzato in segmenti rettilinei di lunghezza finita e l'induzione magnetica totale è calcolata applicando il principio di sovrapposizione degli effetti per grandezze vettoriali.

Fissato un sistema di riferimento globale nelle coordinate cartesiane ( $X_g, Y_g, Z_g$ ), discretizzato il conduttore ed individuato un segmento, per il calcolo dell'intensità dell'induzione magnetica prodotta dallo stesso in un certo punto si passa in un sistema di coordinate locali, avente origine ( $X_a, Y_a, Z_a$ ) in un estremo del segmento (vedi Figura 2), tramite una rototraslazione. Con ciò si ottiene il contributo del segmento all'induzione magnetica complessiva, che alla fine deve essere riportato nel sistema di coordinate globali mediante una rototraslazione inversa.

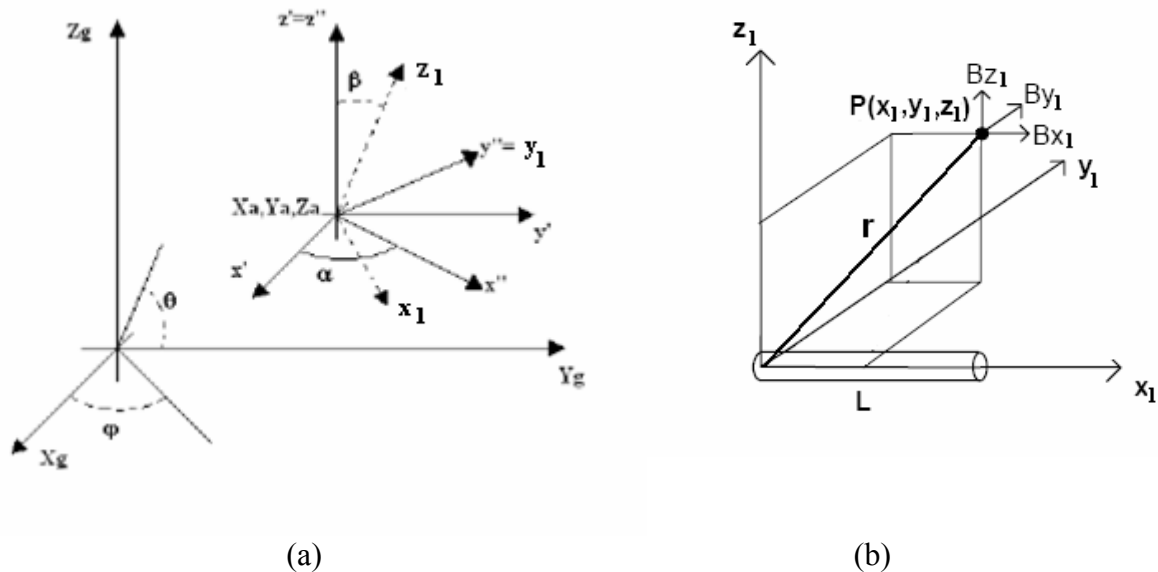


Figura 1 - Sistema di riferimento globale ( $X_g, Y_g, Z_g$ ) e sistema di riferimento locale ( $X_1, Y_1, Z_1$ ) (a); Conduttore di lunghezza finita (b).

### 2.3 Confronto tra i risultati ottenuti da WinELF e da MAGWIRE3D

E' importante notare che il software **MAGWIRE3D** non utilizza dati cartografici ma solo dati geometrici. Pertanto la validazione può essere fatta solo sul motore elettromagnetico, cioè sulla correttezza della soluzione dell'equazione di *Biot-Savart* mediante integrazione.

E' stata eseguita la valutazione del livello di intensità di induzione magnetica prodotta da differenti configurazioni di linee aeree, effettuando un calcolo per punti, mediante la sezione "*Elf Analisi*" di WinELF. Questo comando gestisce tutte le operazioni di analisi e valutazione dei campi magnetici a bassa frequenza. WinELF memorizza informazioni relative a: gestori, linee elettriche, tronchi, tratti, campate e sostegni secondo il prototipo del catasto delle sorgenti di inquinamento elettromagnetico (in base al rapporto RTI CTN-AGF 4/2001).

E' possibile effettuare diversi tipi di calcolo con WinELF:

- **Calcolo in un punto:** gestisce la valutazione del campo in punti specifici.
- **Calcolo per Area:** gestisce la valutazione del campo in aree di estensione definibile (sezione orizzontale assoluta, sezione orizzontale al suolo, sezione verticale assoluta, volume prismatico).

- **Calcolo per Punti:** gestisce la valutazione del campo in un insieme di punti.

Per poter effettuare il confronto è stata utilizzata questa ultima tipologia di calcolo, elaborando i dati con Excel.

Poiché WinELF utilizza un modello territoriale solido, il sistema di riferimento deve essere di tipo geografico, cioè non proiettato. Tuttavia è possibile specificare anche un sistema di riferimento di tipo terrestre (cioè in coordinate piane), tenendo conto che il programma provvederà ad eseguire automaticamente la de-proiezione dei dati. Il software MAGWIRE3D si basa su un riferimento cartesiano per cui è stata necessaria la conversione tra riferimento geografico e proiettato; il riferimento proiettato utilizzato è il **Gauss-Boaga**.

Sono stati esaminati vari casi:

- 1) due campate di una linea trifase rettilinee sopra un terreno piano
- 2) due campate di una linea trifase sopra un terreno piano le quali formano tra di loro un angolo di 135°.
- 3) due campate di una linea trifase sopra un terreno non piano con dislivello (caso reale – “Lido Vecchio Casal Palocco”)
- 4) due campate di due linee trifasi sopra un terreno piano che si incrociano formando tra di loro un angolo di 90°.

Per quanto riguarda i primi tre casi, l’analisi è stata effettuata considerando alcuni punti di riferimento: quello relativo al sostegno centrale ed i due a metà campata, a destra ed a sinistra rispetto a questo ultimo. Nel quarto caso è stato analizzato il punto d’incrocio considerando la variazione dell’induzione magnetica prima lungo una linea e successivamente lungo quella ortogonale alla prima.

E’ stata valutata l’induzione magnetica lungo la retta ortogonale alla linea passante per ciascun punto in esame, in un range – 100 m + 100 m, con passo di 10 m utilizzando l’algoritmo di integrazione sulla catenaria. Infine si è eseguito il confronto con il software MAGWIRE3D. L’induzione magnetica è stata valutata ad una quota di un metro sul livello del mare. Soltanto nel caso “Lido Vecchio Casal Palocco” si sono utilizzate le informazioni elettro-geometriche presenti nell’archivio di WinEDT, in tutti gli altri casi è stato necessario inserire le relative informazioni elettrico-geometriche.

Tutte le operazioni metriche (calcolo di distanze, di angoli, etc.) sono state effettuate mediante strumenti intrinseci di WinELF.

Si analizzano di seguito i vari casi studiati, accompagnati dai relativi parametri di analisi:

- Archivio sostegni:

*Quota slm* : indica la quota a cui è posizionato il sostegno, rispetto al livello del mare;

*Geometria* : indica la geometria del sostegno;

*D* : misurata in metri, indica la distanza laterale dei conduttori;

$H$  : misurata in metri, indica l'altezza a cui è posizionato ciascun conduttore rispetto alla base del sostegno.

- Archivio campate:

*Lunghezza (L)*: riporta la lunghezza in metri calcolata a partire dalla posizione dei due sostegni di estremità;

*Parametro di tesatura (k)*: è il rapporto tra la sollecitazione orizzontale cui è sottoposto il conduttore e il peso per metri lineari del conduttore stesso.

- Archivio tratte:

*Corrente massima* : è la corrente massima che fluisce in ogni conduttore;

*Configurazione terna*: caratterizza la configurazione della terna (ossia se singola, doppia, sfasamento tra fasi, etc.);

## Caso 1 - Due campate di una linea trifase rettilinea sopra un terreno piano



Figura 3 – Configurazione di una tratta con due campate rettilinee.

### Parametri di analisi:

Sostegni:

- *Quota slm* = 0.00 m
- *Geometria* : Pino destro
- $D_1 = 2.2$  m       $D_2 = -2.4$  m       $D_3 = 2.6$  m
- $H_1 = 16.420$  m       $H_2 = 14.920$  m       $H_3 = 13.920$  m
- $L_1 = 223$  m
- $L_2 = 198$  m
- *Corrente massima* = 450 A
- *Configurazione terna* :

fase A =  $0^\circ$       fase B =  $120^\circ$       fase C =  $240^\circ$

- $k = 1000$  m

Si riportano di seguito i confronti.

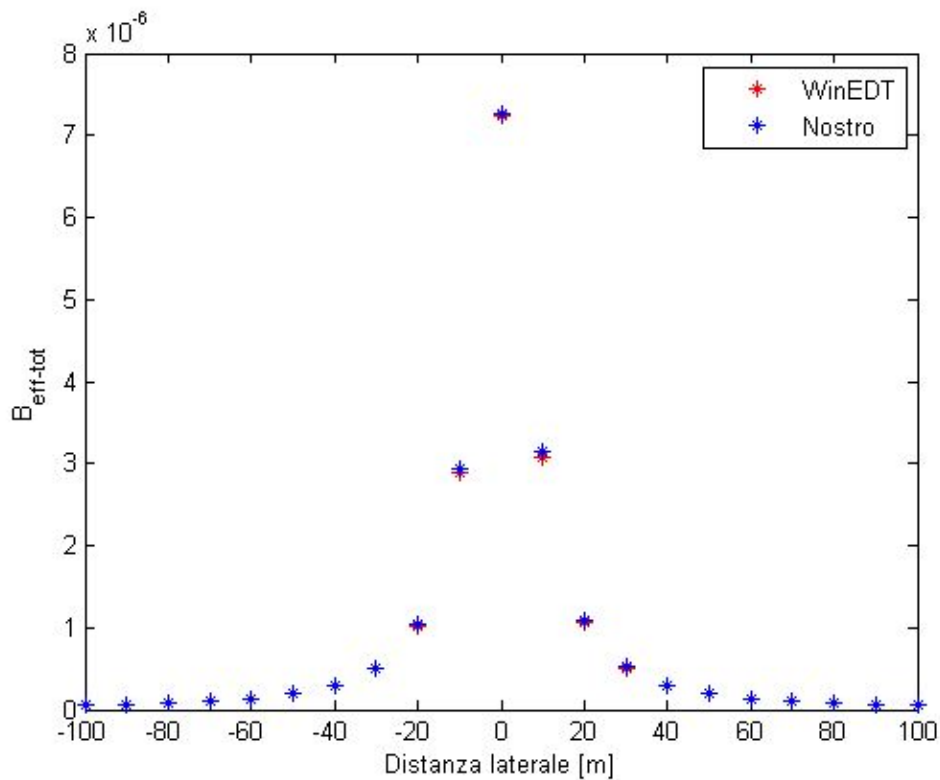


Figura 4. Confronto tra l'induzione magnetica calcolata da WinELF e MAGWIRE3D a metà campata tra sostegno 1 e sostegno 2.

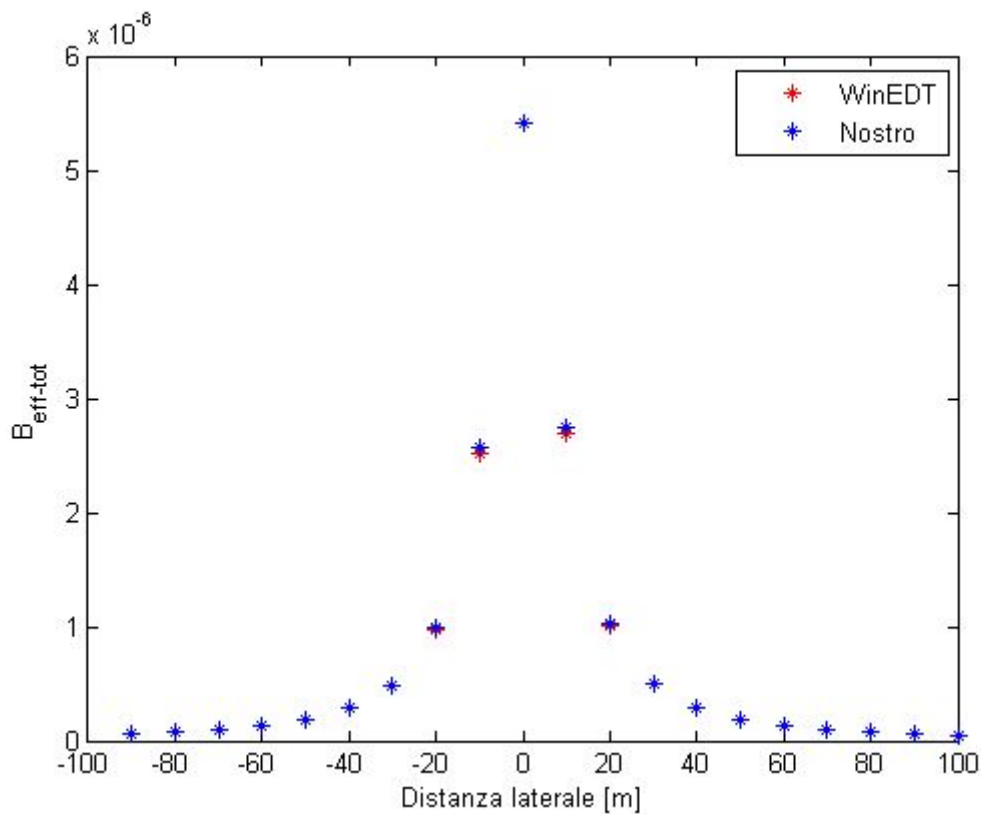


Figura 5. Confronto tra l'induzione magnetica calcolata da WinELF e MAGWIRE3D a metà campata tra sostegno 2 e sostegno 3.

**Caso 2 - Due campate di una linea trifase sopra un terreno piano le quali formano tra di loro un angolo di 135°.**



Figura 6 – Configurazione di una tratta con due campate non rettilinee tra loro (angolo di 135°).

Parametri di analisi:

Per i tre sostegni:

- *Quota slm* = 0.00 m
- *Geometria* : Pino destro
- $D_1 = 2.2$  m       $D_2 = -2.4$  m       $D_3 = 2.6$  m
- $H_1 = 16.420$  m       $H_2 = 14.920$  m       $H_3 = 13.920$  m

- $L_1 = 223$  m
- $L_2 = 100$  m
- *Corrente massima* = 450 A
- *Configurazione terna* :

fase A = 0°    fase B = 120°    fase C = 240°

- $k = 1000$  m

Rispetto al caso precedente è presente un'unica variazione: il terzo sostegno forma con il secondo un angolo di 135°.

Si riportano di seguito i confronti.

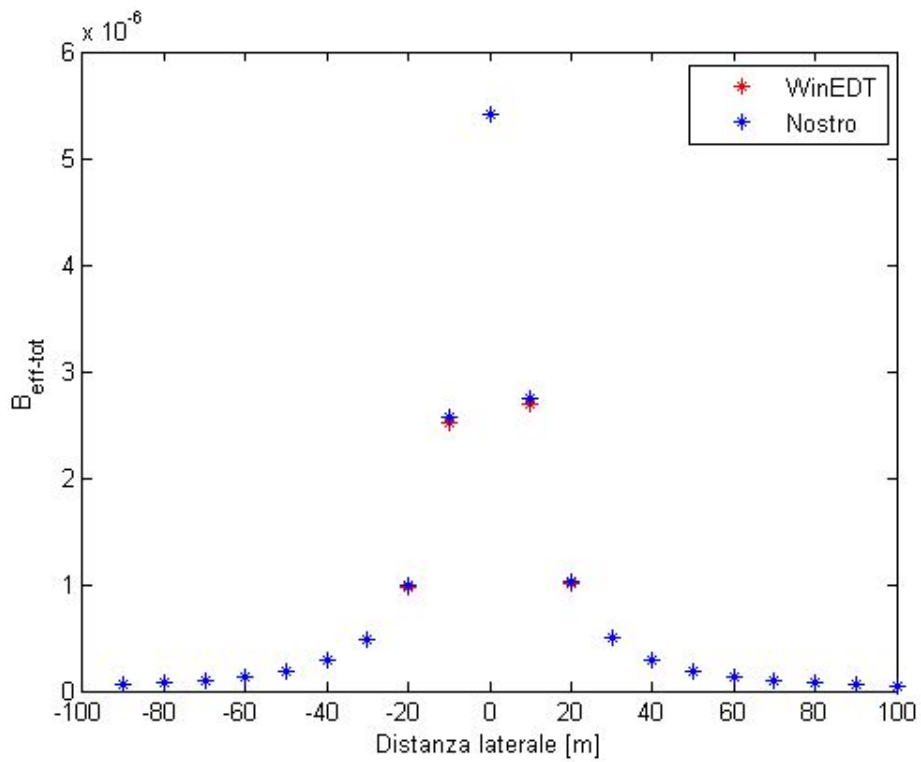


Figura 7. Confronto tra l'induzione magnetica calcolata da WinELF e MAGWIRE3D a metà campata tra sostegno 1 e sostegno 2.

**Caso 3 - Due campate di una linea trifase sopra un terreno non piano con dislivello (caso reale  
– “Lido Vecchio Casal Palocco”)**

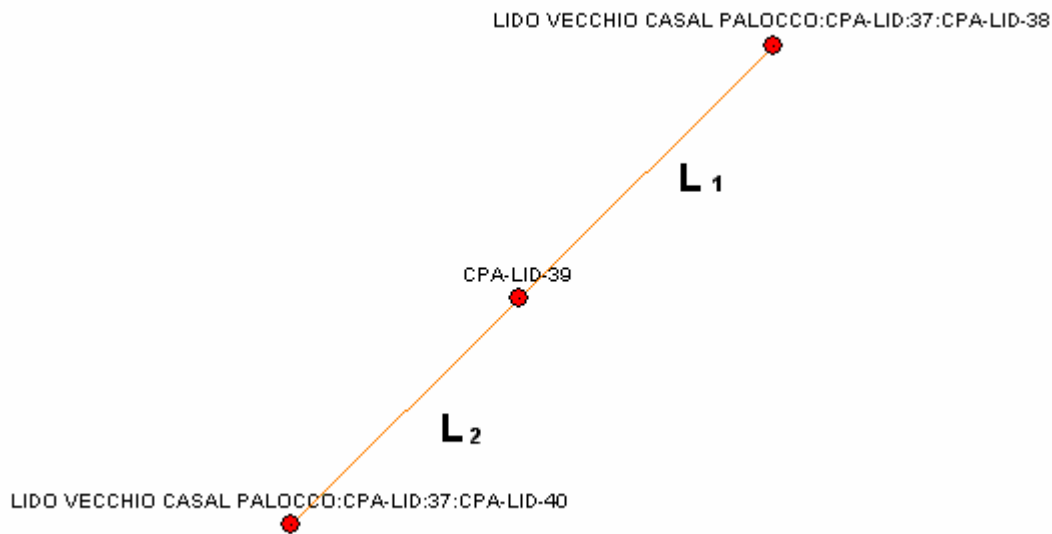


Figura 8 – Configurazione di una tratta reale con due campate rettilinee.

Parametri di analisi:

*Sostegno CPA\_LID\_38:*

- *Quota slm* = -2.07 m
- *Geometria* : Pino destro
- $D_1 = 2.2$  m      $D_2 = -2.4$  m      $D_3 = 2.6$  m
- $H_1 = 16.420$  m    $H_2 = 14.920$  m    $H_3 = 13.920$  m

*Sostegno CPA\_LID\_39:*

- *Quota slm* = 1.30 m
- *Geometria* : Pino destro
- $D_1 = 2.2$  m      $D_2 = -2.4$  m      $D_3 = 2.6$  m
- $H_1 = 18.050$  m    $H_2 = 16.550$  m    $H_3 = 15.550$  m

*Sostegno CPA\_LID\_40:*

- *Quota slm* = 1.66 m
- *Geometria* : Pino destro
- $D_1 = 2.2$  m       $D_2 = -2.4$  m       $D_3 = 2.6$  m
- $H_1 = 19.390$  m     $H_2 = 17.890$  m     $H_3 = 16.890$  m
- $L1 = 184$  m
- $L2 = 165$  m
- *Corrente massima* = 450 A
- *Configurazione terna* :

fase A = 0°    fase B = 120°    fase C = 240°

- $k = 1000$  m

Il caso reale “Lido Vecchio Casal Palocco” rientra nel caso più generale di sostegni ad altezze differenti rispetto al livello del mare e con diverse geometrie.

Si riportano di seguito i confronti.

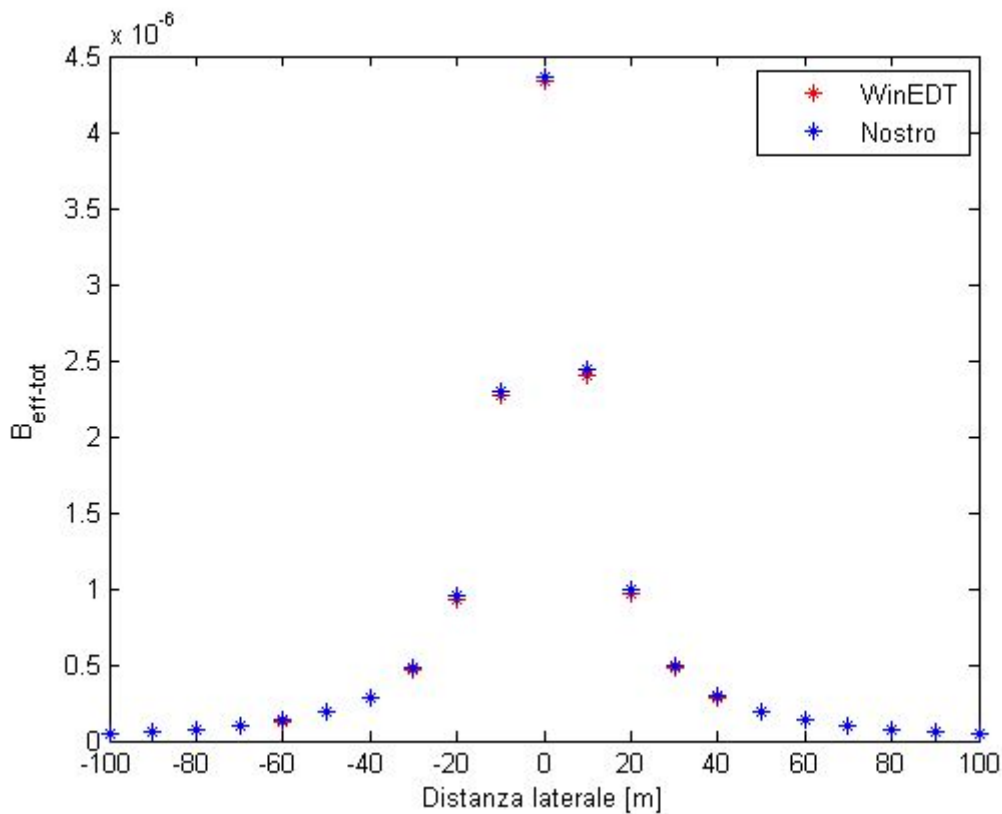


Figura 9. Confronto tra l'induzione magnetica calcolata da WinELF e MAGWIRE3D a metà campata tra sostegno CPA\_LID\_38 e sostegno CPA\_LID\_39.

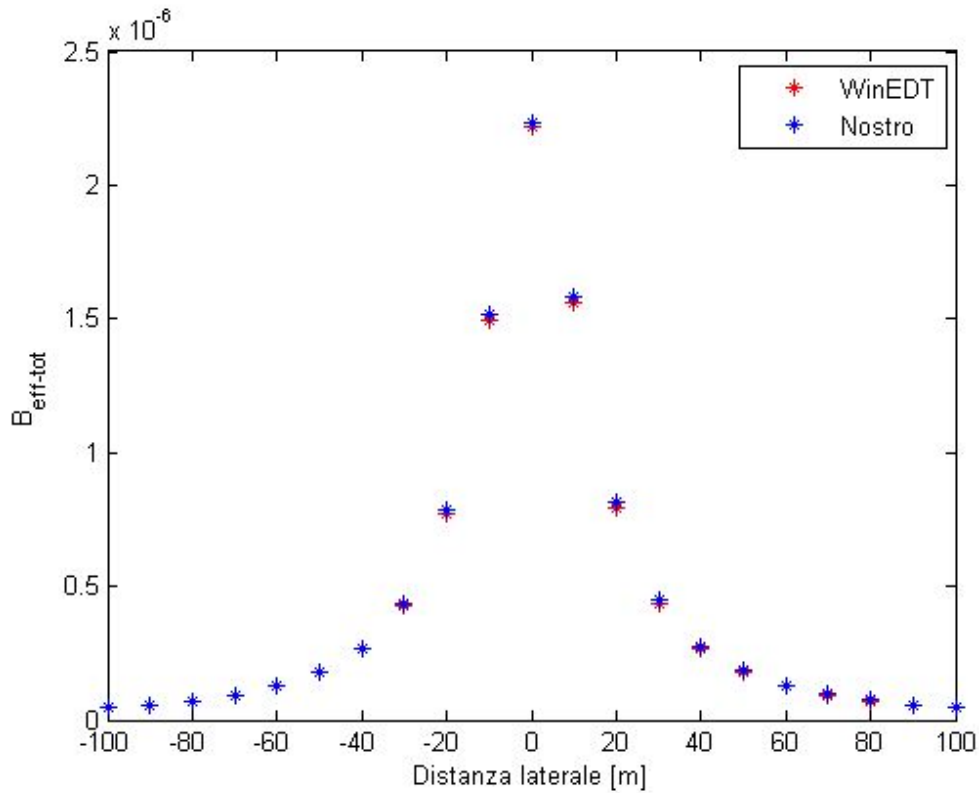


Figura 10. Confronto tra l'induzione magnetica calcolata da WinELF e MAGWIRE3D a metà campata tra sostegno CPA\_LID\_39 e sostegno CPA\_LID\_40.

**Caso 4 - Due campate di due linee trifasi sopra un terreno piano che si incrociano formando tra di loro un angolo di 90°.**

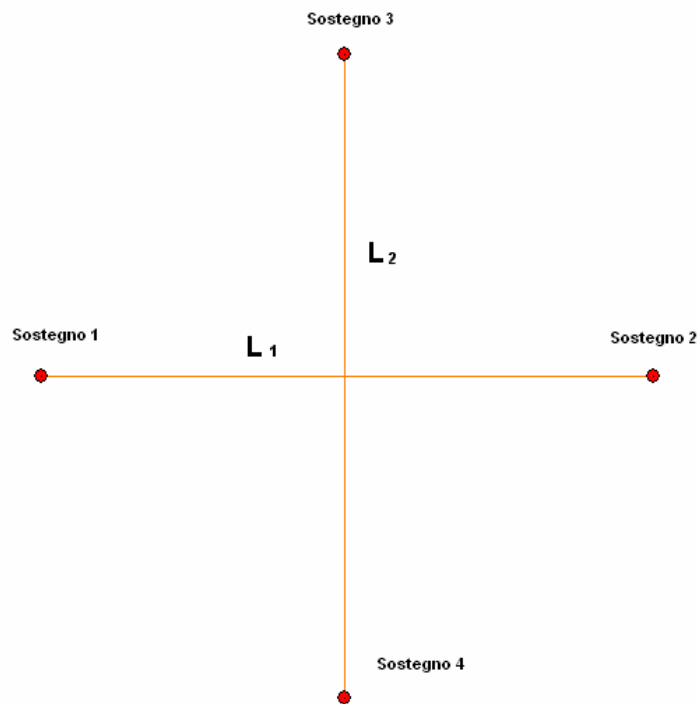


Figura 11 – Configurazione di un incrocio di due campate con angolo di 90°.

Parametri di analisi:

Per i sostegni 1 e 2 si è assunto:

- $Quota\ slm = 0.00\ m$
- *Geometria* : Pino destro
- $D_1 = 2.2\ m$        $D_2 = -2.4\ m$        $D_3 = 2.6\ m$
- $H_1 = 16.420\ m$      $H_2 = 14.920\ m$      $H_3 = 13.920\ m$

Per i rimanenti due invece:

- $Quota\ slm = 0.00\ m$
- *Geometria* : Pino destro
- $D_1 = 2.2\ m$        $D_2 = -2.4\ m$        $D_3 = 2.6\ m$
- $H_1 = 18.050\ m$      $H_2 = 16.550\ m$      $H_3 = 15.550\ m$

- $L1 = 100$  m
- $L2 = 100$  m
- *Corrente massima* = 450 A
- *Configurazione terna* :  
 fase A =  $0^\circ$  fase B =  $120^\circ$  fase C =  $240^\circ$

Si riportano di seguito i confronti:

- calcolo lungo il primo tratto (*incrocio 1 – incrocio 2*)

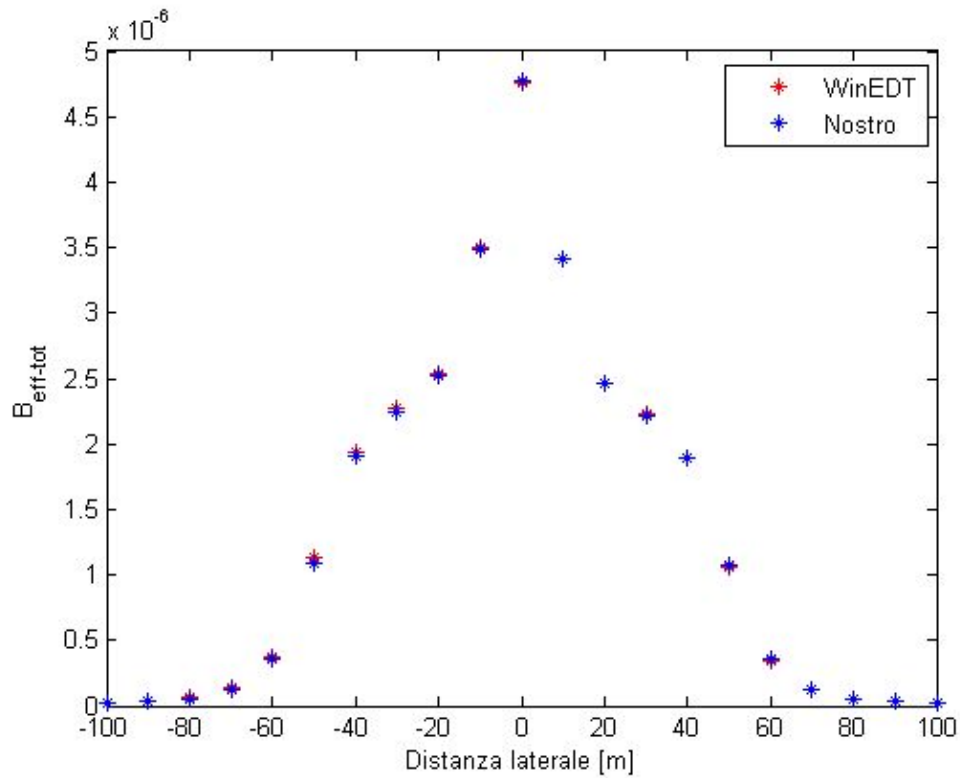


Figura 12. Confronto tra l'induzione magnetica calcolata da WinELF e MAGWIRE3D a metà campata della linea L1.

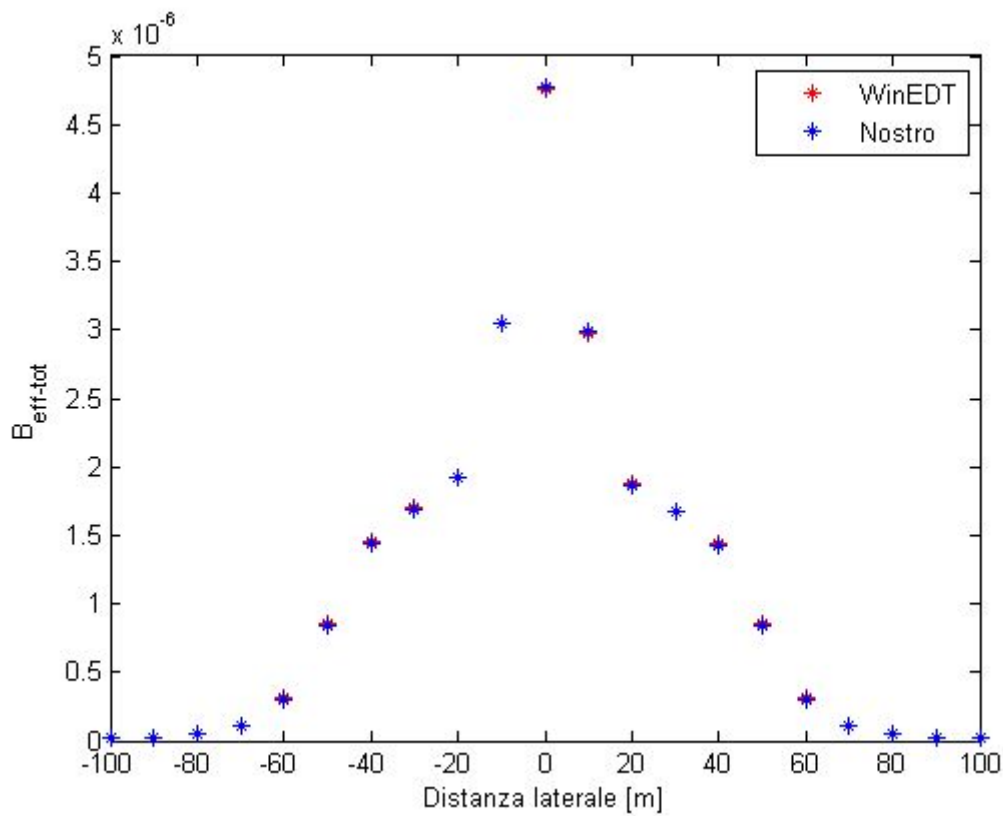


Figura 13. Confronto tra l'induzione magnetica calcolata da WinELF e MAGWIRE3D a metà campata della linea L2.

### 3. VALIDAZIONE SPERIMENTALE DEL SOFTWARE WINELF

Per la validazione sperimentale del software WinELF si è presa in considerazione una configurazione reale composta dall'incrocio di due linee elettriche esercite dall'ACEA di Roma di cui erano noti le configurazioni elettrogeometriche:

- 1) Collatina - Smistamento Est (la cui traccia e' indicata con linea gialla in Figura 12).
- 2) Cinecitta' – Tor Cervara (la cui traccia e' indicata con linea rossa in Figura 12).

Le misure sono state effettuate in alcuni giorni feriali invernali in alcuni punti.

I punti sono stati individuati mediante ausilio di Google Earth, mappe GIS con definizione di 1 m, rilevamenti GPS e misure metriche effettuate in loco a partire dai tralicci.

Le misure nei punti suddetti sono state effettuate mediante lo strumento EFA3 della Wandel & Goltermann situato a varie altezze dal suolo.

I calcoli sono stati effettuati con WinELF analizzando la seguente configurazione derivata dai noti dati reali di configurazione elettrogeometrica.

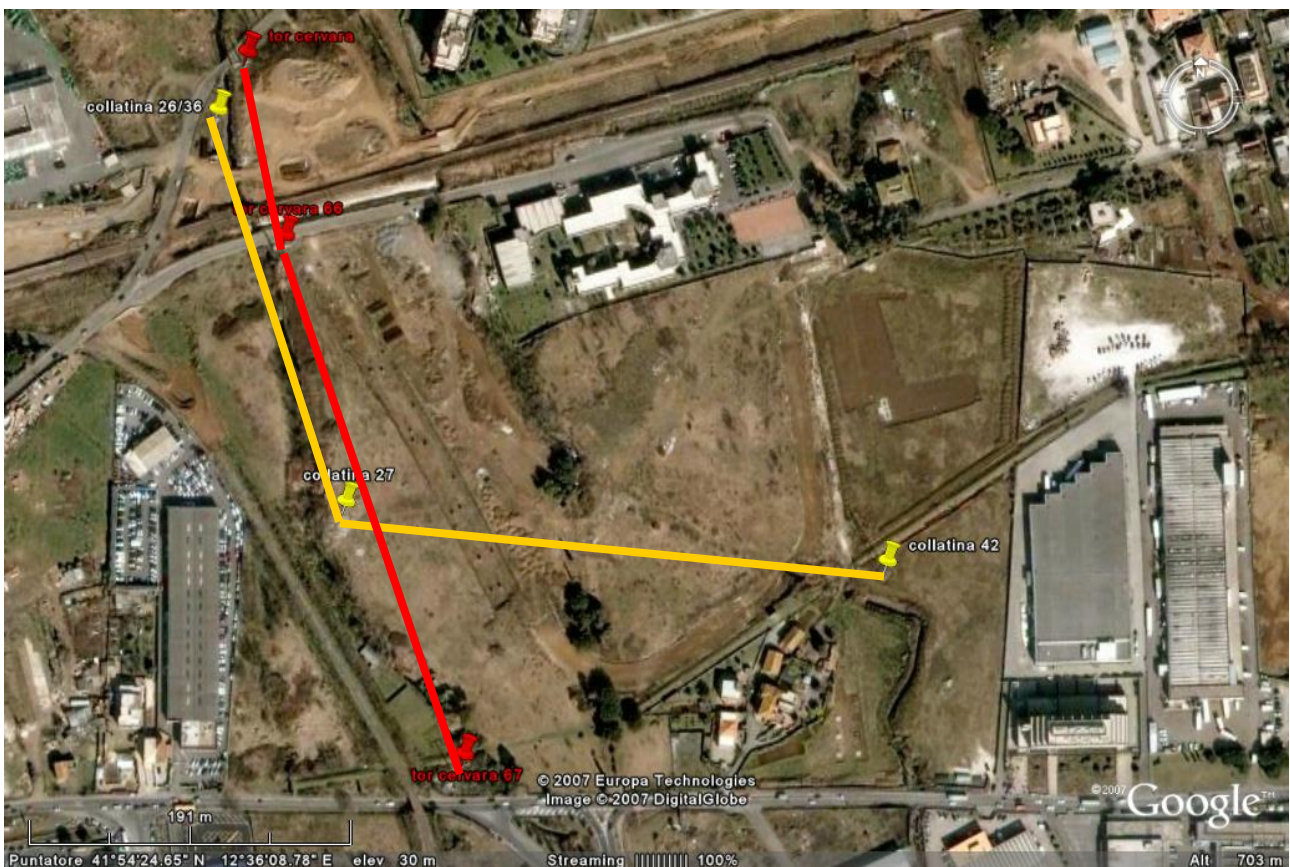


Figura 14. Traccia delle linee elettriche Collatina - Smistamento Est (linea gialla) e Cinecitta' – Tor Cervara (linea rossa) riportate nel sito di misura (immagine da Google Earth).

I punti di calcolo sono riportati nella mappa GIS con definizione di 1 m come riportato in Figura 15.

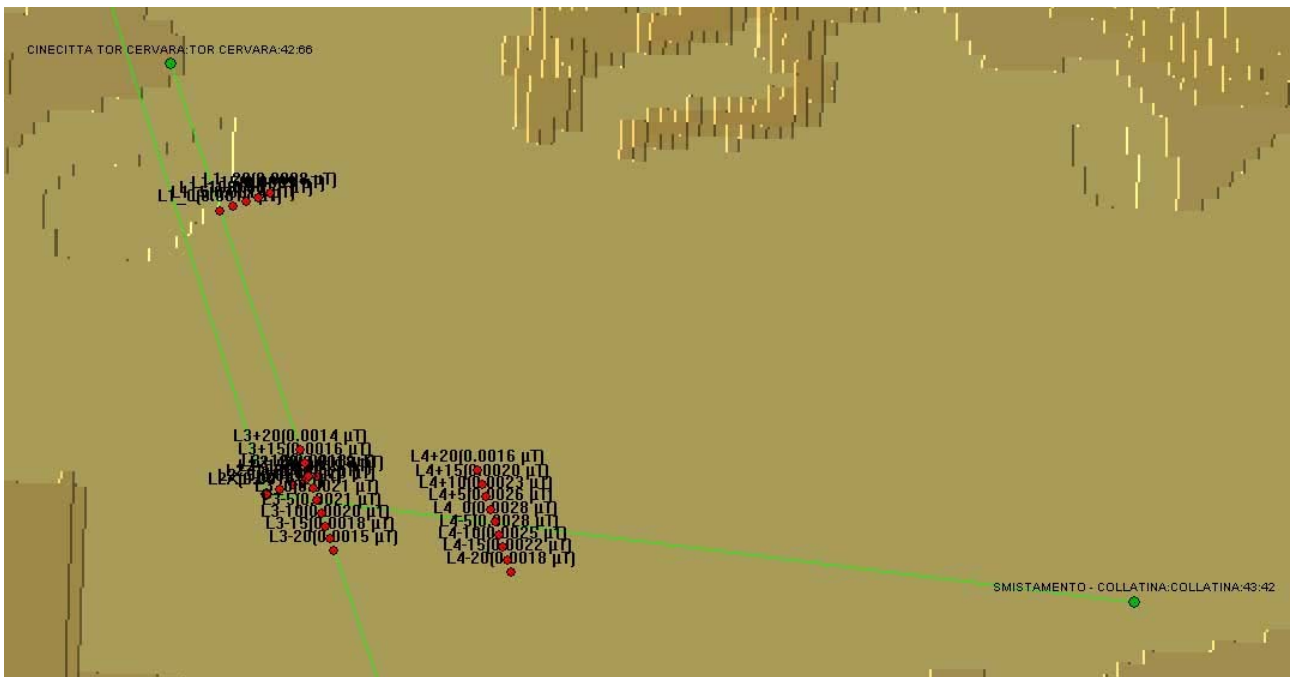


Figura 15. Punti di calcolo riportati sulla mappa GIS con definizione di 1 m.

Il confronto tra i valori misurati e quelli calcolati e' riportato nella Tabella I.

Nome punto	Longitudine	Latitudine	Quota (m)	B Calcolato da WinELF (µT)	B misurato (µT)
L1_0	012e36'00"05	41n54'26"69	28	0,21	0,14
L1_5	012e36'00"26	41n54'26"74	28	0,14	0,10
L1_10	012e36'00"47	41n54'26"80	28	0,12	0,09
L1_15	012e36'00"68	41n54'26"85	28	0,07	0,07
L1_20	012e36'00"87	41n54'26"90	28	0,07	0,06
L2X	012e36'00"81	41n54'23"26	26	0,17	0,17
L2_5	012e36'01"02	41n54'23"31	28	0,21	0,16
L2_10	012e36'01"23	41n54'23"37	28	0,21	0,15
L2_15	012e36'01"43	41n54'23"42	28	0,21	0,14
L2_20	012e36'01"63	41n54'23"47	28	0,21	0,14
L3-20	012e36'01"91	41n54'22"57	28	0,14	0,14
L3-15	012e36'01"84	41n54'22"72	28	0,19	0,18
L3-10	012e36'01"77	41n54'22"87	28	0,21	0,19
L3-5	012e36'01"70	41n54'23"02	28	0,24	0,20
L3_0	012e36'01"63	41n54'23"18	28	0,24	0,22
L3+5	012e36'01"56	41n54'23"33	28	0,24	0,21
L3+10	012e36'01"50	41n54'23"48	28	0,21	0,20

L3+15	012e36'01"43	41n54'23"63	28	0,17	0,18
L3+20	012e36'01"36	41n54'23"79	28	0,14	0,14
L4-20	012e36'04"80	41n54'22"31	28	0,19	0,20
L4-15	012e36'04"73	41n54'22"46	28	0,24	0,25
L4-10	012e36'04"66	41n54'22"61	28	0,31	0,28
L4-5	012e36'04"60	41n54'22"76	28	0,36	0,29
L4_0	012e36'04"53	41n54'22"92	28	0,38	0,30
L4+5	012e36'04"46	41n54'23"07	28	0,36	0,27
L4+10	012e36'04"39	41n54'23"22	28	0,31	0,25
L4+15	012e36'04"32	41n54'23"37	28	0,24	0,23
L4+20	012e36'04"25	41n54'23"54	28	0,17	0,19

Tabella I – Punti considerati e confronto tra i valori calcolati e misurati.

Dal confronto riportato in Tabella I si vede che i valori misurati differiscono di poco da quelli misurati. La discrepanza è sicuramente dovuta alla difficoltà di individuare con assoluta precisione le distanze tra i conduttori delle linee e i punti di misura. Si pensi che errori di qualche decina di centimetri comportano variazioni sensibili di induzione magnetica che varia secondo la legge di *Biot Savart*. Le discrepanze dipendono essenzialmente da due fattori:

- 1) imprecisione nei dati GIS soprattutto per quanto riguarda la quota sul livello del mare, attribuibili nel caso specifico a movimenti terra effettuati nell'area urbanizzata della periferia di Roma;
- 2) imprecisione nei dati costruttivi della linea elettrica.

#### 4. CONCLUSIONI

Il software WinELF per il calcolo del campo magnetico prodotto da linee elettriche trifasi e' stato esaminato con l'intento di validarne i risultati. La validazione e' stata condotta mediante due distinti approcci:

- 1) confronto dei risultati ottenuti da WinELF con altri risultati numerici ottenuti dal software MGWIRE3D sviluppato dall'Università de L'Aquila;
- 2) confronto dei risultati ottenuti da WinELF con misure sperimentali effettuate presso un elettrodotto in esercizio di cui erano noti i dati di carico elettrico.

Per quanto riguarda il primo punto, sono state scelte configurazioni di elettrodotti tipiche e sufficientemente critiche per l'analisi di campo magnetico. Il confronto tra i risultati dei programmi WinELF e MGWIRE3D, entrambi basati sulla soluzione vettoriale tridimensionale dell'equazione di Biot Savart, ha dato esito del tutto positivo, in quanto non si sono riscontrate discrepanze significative nei risultati ottenuti tramite i due software. Si noti che la validazione è stata eseguita sulla corretta applicazione della legge di Biot Savart per conduttori filiformi con geometria tridimensionale percorsi da corrente.

Per il secondo punto, si è esaminata una configurazione reale piuttosto critica composta da due linee trifase con un incrocio. Il confronto tra i risultati sperimentali e quelli ottenuti da WinELF e' da ritenersi positivo.

In conclusione dai calcoli e dalle misure effettuate in diverse configurazioni di linee elettriche trifasi il software WinELF ha dato risultati validi per quanto riguarda il calcolo del campo di induzione magnetica.