



Luca Brusaporci

		<i>Luca Brusaporci</i>	<i>Luca Brusaporci</i>	<i>Luca Brusaporci</i>	
A	3.11.2023	103	013	093	Emissione per autorizzazione
REVISIONE	DATA	ELABORATO	VERIFICATO	APPROVATO	DESCRIZIONE
COMMITTENTE BGC CONSULTING S.R.L. Via Enrico Cosenz, 22 20158 - Milano (MI) P.I. 03052120643					IMPIANTO SE 380/150/36 kV TROIA 2
INGEGNERIA & COSTRUZIONI BRULLI trasmissione					TITOLO RACCORDI 380kV RELAZIONE CAMPI ELETTRICI E MAGNETICI
SCALA	FORMATO	FOGLIO / DI		N. DOCUMENTO	
-	A4	1 / 28		6 1 6 0 4 A	

SOMMARIO

1. PREMESSA.....	3
2. QUADRO NORMATIVO.....	3
3. DESCRIZIONE DEL PROGETTO.....	4
3.1 Raccordi aerei 380 kV alla linea Troia-Foggia.....	4
3.2 Descrizione dei raccordi in progetto	4
4. METODOLOGIA DI CALCOLO.....	5
4.1 Calcolo dei campi elettrici	5
4.2 Calcolo dei campi magnetici.....	7
4.2.1 Correnti di calcolo	7
4.3 Risultati	7
4.4 Verifica dei valori limite e DPA.....	13
5. ANALISI DEI RICETTORI	13
6. CONCLUSIONI.....	13

1. PREMESSA

Oggetto della presente relazione è il calcolo dei campi elettrici e magnetici generati dai raccordi alla nuova SE 380/150/36 kV denominata Troia 2 dall'esistente linea RTN 380 kV "Troia - Foggia". L'opera in oggetto verrà realizzata, assieme alle altre menzionate nel seguito e descritte nel dettaglio nella documentazione di progetto, per connettere alla rete elettrica nazionale diversi produttori di energia da fonte rinnovabile.

L'attuale elettrodotto Troia - Foggia verrà deviato all'interno della futura SE Troia 2 grazie alla realizzazione di due raccordi di linea a semplice terna 380 kV.

Il tracciato dei nuovi raccordi è stato elaborato su un percorso che, come evincibile dagli elaborati allegati, si sviluppa nel Comune di Troia (Provincia di Foggia), ad una quota altimetrica compresa fra 332 e 392 mslm, interessando terreni ad uso agricolo.

La lunghezza planimetrica dei due nuovi raccordi è pari a:

- 1.019 m per il raccordo Nord, che va a creare la nuova linea Troia 2 - Foggia;
- 1.233 m per il raccordo Sud, che va a creare la nuova linea Troia 2 - Troia.

La presente relazione tratta dei soli raccordi a 380 kV alla linea esistente. Il calcolo dei campi elettrici e magnetici generati dalla SE 380/150/36 kV Troia 2, sono riportati nel documento 61404 - Relazione campi elettrici e magnetici.

2. QUADRO NORMATIVO

La normativa che regola l'esposizione della popolazione a campi elettromagnetici risale ai primi anni '90. La prima legge emanata, ora abrogata, è il DPCM 23 Aprile 1992 "Limiti massimi di esposizione ai campi elettrico e magnetico generati alla frequenza industriale nominale (50 Hz) negli ambienti abitativi e nell'ambiente esterno": tale normativa fissava la distanza da mantenersi dagli elettrodotti aerei e i valori massimi di esposizione per la popolazione. Con il crescente interesse da parte della popolazione per la tematica in oggetto, è stata avvertita la necessità di una regolamentazione più dettagliata dell'esposizione ai campi elettrici e magnetici, cui ha fatto seguito l'emanazione di numerose leggi regionali e della legge quadro nazionale.

In particolare, la Legge Quadro No. 36 del 22 Febbraio 2001 "Legge quadro sulla protezione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici" ha lo scopo di assicurare la tutela della salute dei lavoratori, delle lavoratrici e della popolazione dagli effetti dell'esposizione a determinati livelli di campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici e di assicurare la tutela dell'ambiente e del paesaggio promuovendo l'innovazione tecnologica.

Con i successivi decreti attuativi, DPCM 8 Luglio 2003, sono stati fissati i livelli di esposizione, di attenzione e l'obiettivo di qualità da rispettarsi al fine della tutela della salute della popolazione.

Nella tabella 1 seguente riportiamo i valori fissati come limite di esposizione, valore di attenzione e obiettivo di qualità per campi elettrici e magnetici prodotti alla frequenza di rete (50 Hz) connessi al funzionamento e all'esercizio degli elettrodotti.

	Campo magnetico (μT)	Campo elettrico (V/m)	NOTE
Limite di esposizione	100	5.000	-
Valore di attenzione	10	-	Da verificarsi in luoghi adibiti a permanenza non inferiore alle 4 ore
Obiettivo di qualità	3	-	

Tabella 1 - valori come da normativa in vigore

Con il DM del 29 Maggio 2008 "Approvazione della metodologia di calcolo per la determinazione delle fasce di rispetto per gli elettrodotti" viene approvata la metodologia di calcolo per la determinazione delle fasce di rispetto degli elettrodotti, in relazione a quanto previsto dal DPCM 8 Luglio 2003: uno degli scopi è la regolamentazione delle nuove installazioni e/o nuovi insediamenti presso elettrodotti o edifici esistenti.

A tal fine occorre approntare i corretti strumenti di pianificazione territoriale come la previsione di fasce di rispetto, calcolate sulla base di parametri certi e stabili nel lungo periodo. Le fasce di rispetto sono infatti definite come "lo spazio circostante un elettrodotto, che comprende tutti i punti, al di sopra e al di sotto del livello del suolo, caratterizzati da un'induzione magnetica di intensità maggiore o uguale all'obiettivo di qualità: all'interno delle fasce di rispetto non è consentita alcuna destinazione di edifici ad uso residenziale scolastico sanitario ovvero ad uso che comporti una permanenza non inferiore a quattro ore giorno".

Tali fasce di rispetto sono variabili in funzione ai dati caratteristici di ogni tratta o campata considerata in relazione ai dati caratteristici della stessa. Al fine di facilitare la gestione territoriale è stato introdotto il concetto di **Distanza di Prima Approssimazione (DPA)** quale: *“la distanza, in pianta sul livello del suolo, dalla proiezione del centro linea, che garantisce che ogni punto la cui proiezione al suolo disti dalla proiezione del centro linea più di DPA si trovi all'esterno delle fasce di rispetto”*.

La metodologia definita si applica alle linee elettriche aeree e interrate, esistenti o in progetto, con esclusione delle linee a media tensione in cavo cordato ad elica, siano esse interrate o aeree, in quanto in questi casi le fasce associabili hanno ampiezza ridotta, inferiore alle distanze previste dal Decreto Interministeriale 21 Marzo 1988, No. 449 e del DMILLPP del 16 Gennaio 1991. Nella normativa viene specificato inoltre che, per le stazioni e cabine primarie, la DPA - e quindi la fascia di rispetto - solitamente rientrano nei confini dell'area di pertinenza dell'impianto stesso. Comunque, nel caso l'autorità competente lo ritenga necessario, dovranno essere calcolate le fasce di rispetto relativamente agli elementi perimetrali (es. portali, sbarre, ecc.).

3. DESCRIZIONE DEL PROGETTO

La nuova SE 380/150/36 kV Troia 2 sarà connessa in entra esci alla linea Troia - Foggia mediante raccordi in singola terna a 380 kV.

3.1 Raccordi aerei 380 kV alla linea Troia-Foggia

L'intervento consiste nella progettazione e realizzazione di due raccordi 380 kV in semplice terna tra la nuova stazione e l'esistente elettrodotto. Essi avranno una lunghezza complessiva di circa 2.252 m. La linea 380 kV esistente "Troia - Foggia" è realizzata in palificata a semplice terna ed è armata con conduttore trinato in ACSR $\varnothing 31,5$ mm, pertanto i raccordi a tale elettrodotto sono progettati impiegando il medesimo conduttore a corda trinata ACSR $\varnothing 31,5$ mm. Si sottolinea che le ultime campate dai pali capolinea ai portali di stazione Troia 2, saranno realizzate con collegamento binato composto da due conduttori del tipo AAC 41,1.

Detti raccordi sono descritti nell'apposita relazione, documento No. 69601 - Relazione tecnico illustrativa.

3.2 Descrizione dei raccordi in progetto

Come precedentemente descritto e riportato nel documento No. 61432 – Inquadramento CTR, di cui si riporta nel seguito uno stralcio, la connessione degli impianti alimentati da fonte rinnovabile richiede la realizzazione di una nuova stazione 380/150/36 kV denominata Troia 2. Tale stazione sarà realizzata a circa 961 metri dalla esistente linea Troia-Foggia, a cui andrà a connettersi.

I campi elettrici e magnetici generati dalla stazione elettrica Troia non sono oggetto della presente relazione; sono calcolati e valutati nel documento No. 61404 – Relazione campi elettrici e magnetici.

Il progetto prevede la demolizione di 671,5 m di linea esistente tra i tralicci 161 e 159 e la realizzazione dei due raccordi: dal palo 162/1 al Portale A di stazione, e dal sostegno 158/1 al portale B di stazione. I nuovi raccordi, prevedono l'installazione di un totale di 8 nuovi pali oltre ai portali di stazione.

Le altezze dei portali e dei tralicci previsti per il progetto, così come le quote dei conduttori, sono mostrate nei documenti inerenti i profili degli elettrodotti: No. 61672 e 61673.

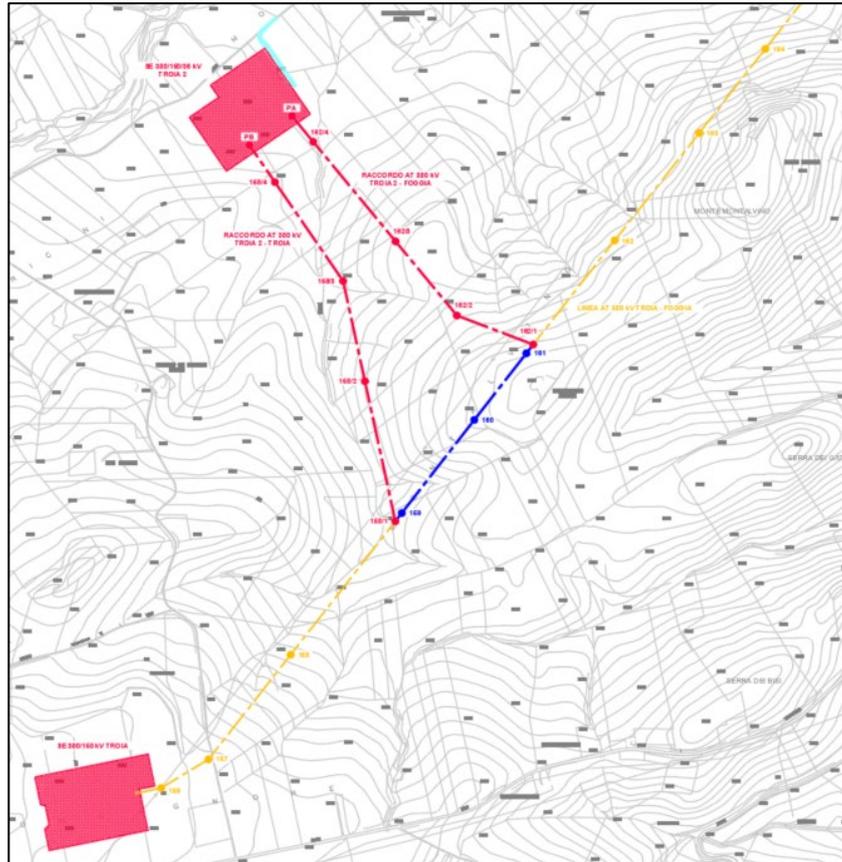


Figura 1: Estratto dall' Inquadramento CTR con planimetria dei raccordi in progetto in rosso, in giallo la linea esistente ed in blu la tratta esistente da demolire

4. METODOLOGIA DI CALCOLO

La rete elettrica nazionale, di cui i nuovi raccordi 380 kV tra la SE Troia 2 e l'esistente elettrodotto 380 kV "Troia - Foggia" fanno parte, è esercita alla frequenza di 50 Hz. A questa frequenza i campi elettrici e magnetici generati dagli elementi attivi sono due fenomeni distinti, il primo proporzionale alla tensione degli stessi, mentre il secondo proporzionale alla corrente che vi circola.

Anche i limiti applicabili per la tutela della salute della popolazione per questi due fenomeni sono molto differenti: per il campo elettrico è previsto il solo rispetto del limite di esposizione, mentre per il campo magnetico è previsto anche il rispetto di un valore di qualità, per luoghi in cui è prevista la permanenza per un tempo superiore alle 4 ore/giorno.

4.1 Calcolo dei campi elettrici

La valutazione del campo elettrico al suolo è avvenuta mediante l'impiego di un foglio di calcolo creato sul sito web "WebNIR" sviluppato nell'ambito dei progetti INAIL al fine di determinare i livelli di campo elettrico dispersi da uno o più fasci di conduttori rettilinei indefiniti. Un modello di questo tipo viene comunemente utilizzato per rappresentare gli elettrodotti, come previsto dalla guida CEI 211-4 "Guida ai metodi di calcolo dei campi elettrici e magnetici generati da linee e stazioni elettriche".

La configurazione della geometria dei sostegni e i valori delle grandezze elettriche sono quelli riportati nei documenti 61671 – Elementi tecnici delle opere e No. 61601 – Raccordi 380kV Relazione tecnico illustrativa. Per la progettazione degli elettrodotti oggetto di intervento è stato utilizzato un franco minimo da terra di 14 m, per come richiesto da Terna per elettrodotti a 380kV.

La valutazione del campo elettrico è avvenuta nelle condizioni maggiormente conservative, effettuando la simulazione in corrispondenza di un sostegno la cui altezza utile sia inferiore a quella minima dei sostegni previsti nel tracciato in oggetto.

Nel grafico sottostante riportiamo i risultati della simulazione.

Andamento del campo elettrico

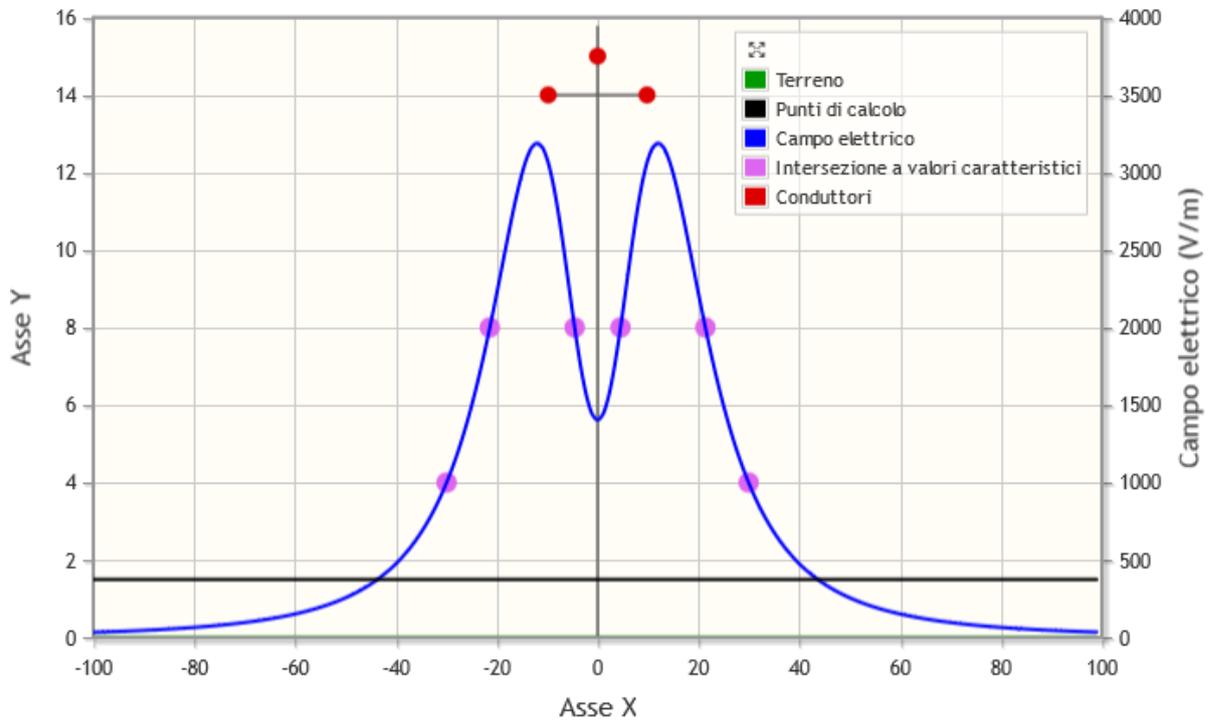


Figura 2: Andamento del campo elettrico a 1,5 m dal suolo – Sostegno EA del raccordo AT 380 kV Troia 2 – Foggia

Andamento del campo elettrico

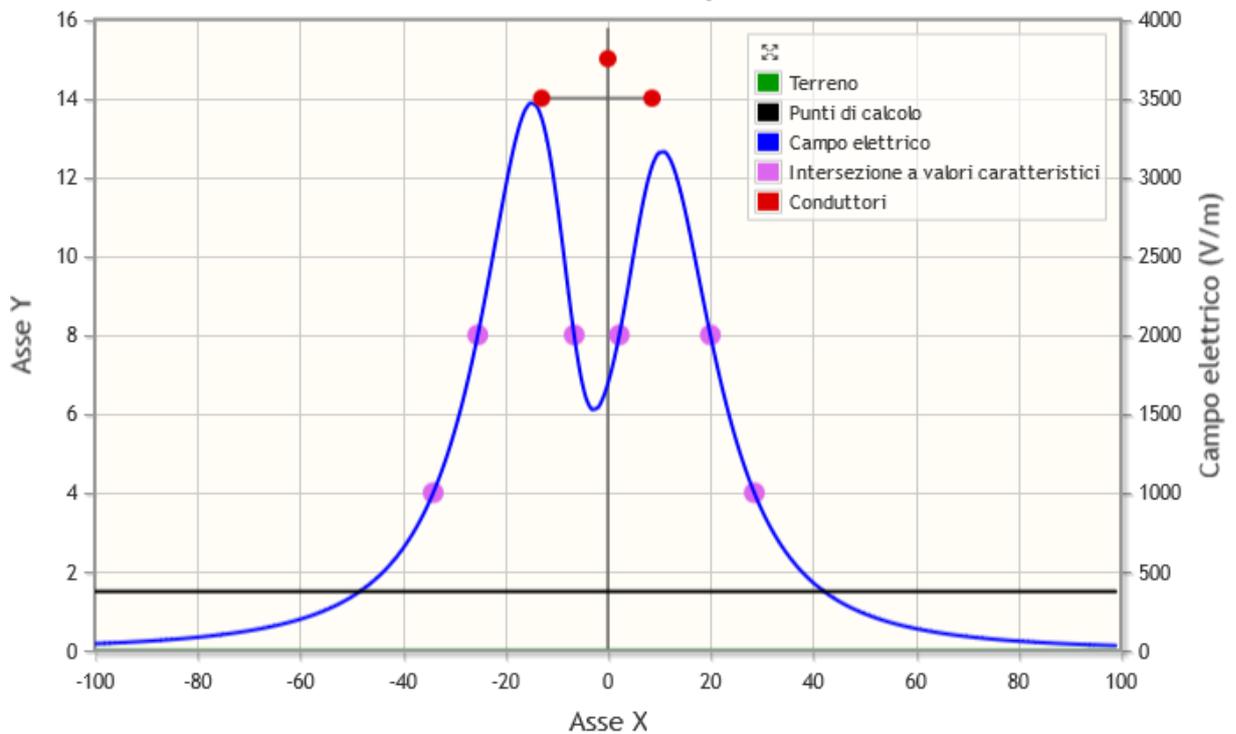


Figura 3: Andamento del campo elettrico a 1,5 m dal suolo – Sostegno VL del raccordo AT 380 kV Troia 2 - Troia

Come si evince dai risultati dai grafici sopra riportati, risultanti dalle simulazioni effettuate con il foglio di calcolo "WebNIR" a 1,5 m di altezza sul livello del suolo, il valore del campo elettrico è sempre inferiore al limite previsto dal DPCM 08/07/03 fissato in 5 kV/m.

4.2 Calcolo dei campi magnetici

Al fine di stimare il campo magnetico prodotto dagli elettrodotti in oggetto e determinare le DPA da applicarle, si è proceduto effettuando il calcolo teorico in considerazione di quanto previsto dal Decreto Ministeriale 29/05/2008, utilizzando la portata in corrente in servizio normale come definita dalla norma CEI 11-60 come descritto nel capitolo seguente.

Il calcolo del campo magnetico è stato effettuato utilizzando il software "Magic" di BEShielding di cui riportiamo in allegato il documento di validazione. Il software permette di calcolare i campi magnetici generati da sorgenti di tipo elettrico, quali trasformatori, sistemi di linee elettriche, cabine MT/BT, buche giunti, blindosbarre e impianti elettrici. Il software permette la determinazione delle fasce di rispetto per linee elettriche e cabine MT/BT, secondo quanto previsto dalla Legge Quadro n. 36/2001 (esposizione ai campi magnetici della popolazione) e dal D.Lgs. n. 81/08 (valutazione dei rischi in ambiente lavorativo). Permette inoltre di studiare le singole sorgenti (linee elettriche, cavi, sistemi multiconduttori, trasformatori) configurazioni bidimensionali e tridimensionali attraverso l'integrazione della legge di Biot-Savart o lo studio di sistemi complessi, come le cabine elettriche MT/BT, tenendo conto della tridimensionalità delle sorgenti, della loro reale posizione e della sovrapposizione degli effetti delle diverse componenti.

4.2.1 Correnti di calcolo

Nel calcolo si è considerata la corrente corrispondente alla portata in servizio normale della linea definita dalla norma CEI 11-60 per conduttori con diametro 31,5 mm, conformemente al disposto del D.P.C.M. 08/07/2003, come indicato nella seguente tabella:

Tensione nominale della linea kV	Zona A		Zona B	
	Periodo C	Periodo F	Periodo C	Periodo F
380	740	985	680	770

Tabella 2 – Valori di portata in corrente del conduttore di riferimento in zona A - B e periodo Caldo – Freddo come da CEI 11-60

Gli elettrodotti in oggetto sono localizzati in provincia di Foggia, a circa 388 m sul livello del mare, rientrano pertanto in zona A: la portata in corrente in servizio normale, di ciascun conduttore risulta pari a 985 A. I raccordi saranno armati con un fascio di conduttori trinato da 31,5 mm ciascuno; pertanto la corrente per il calcolo delle Distanze di Prima Approssimazione utilizzata sarà pari a $3 \times 985 = 2.955 \text{ A}$.

Per la tratta terminale di ciascun raccordo, alla SE Troia 2, compresa fra i pali capolinea e i portali di stazione, si è utilizzato lo stesso valore di corrente, pur in presenza di un collegamento binato composto da due conduttori del tipo AAC 41,1, dal momento che la corrente in transito sarà la medesima delle tratte di raccordo restanti.

4.3 Risultati

I valori di campo magnetico generati dall'elettrodotto sono calcolati al fine di definire le ampiezze delle Distanze di Prima Approssimazione da applicarsi dall'asse dei raccordi aerei. Tali valori sono desunti utilizzando le correnti come descritto nel capitolo precedente.

Riportiamo nel seguito i risultati delle simulazioni effettuate per la configurazione dei conduttori come disposti sui sostegni a Y di rettilineo.

Nella fase progettuale in essere è prevista la realizzazione di tutti i pali a Y. Cautelativamente viene considerato il palo a Y con sbracci maggiori tra quelli adottati e descritti nei profili, in particolare sono state effettuate simulazioni considerando i sostegni di tipo EA e VL.

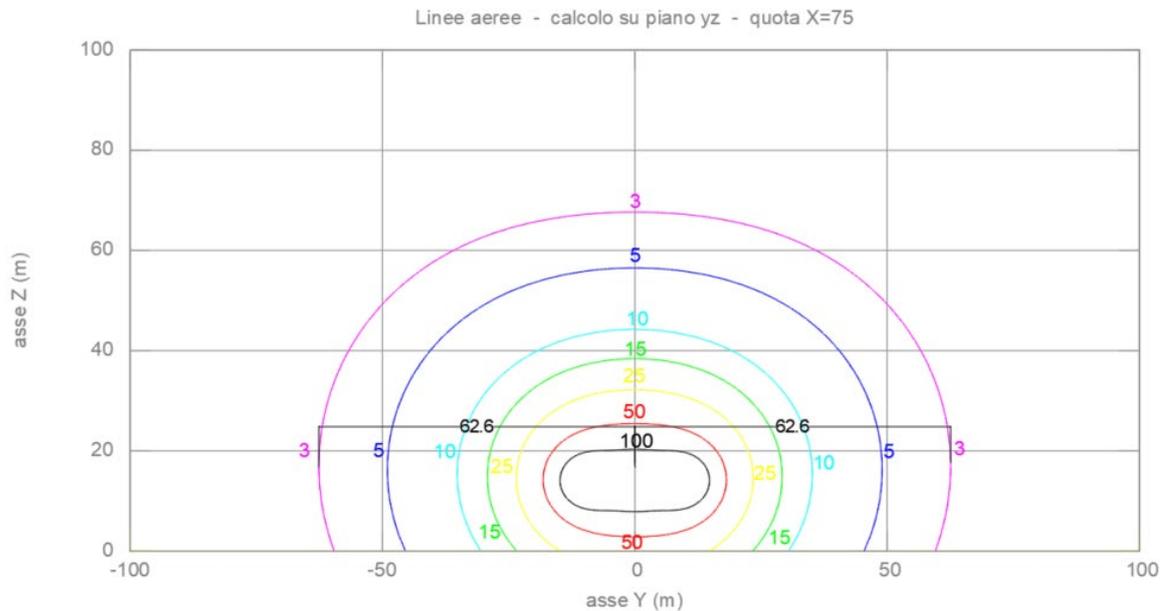


Figura 4 – Livelli di campo magnetico generato in corrispondenza dei sostegni EA

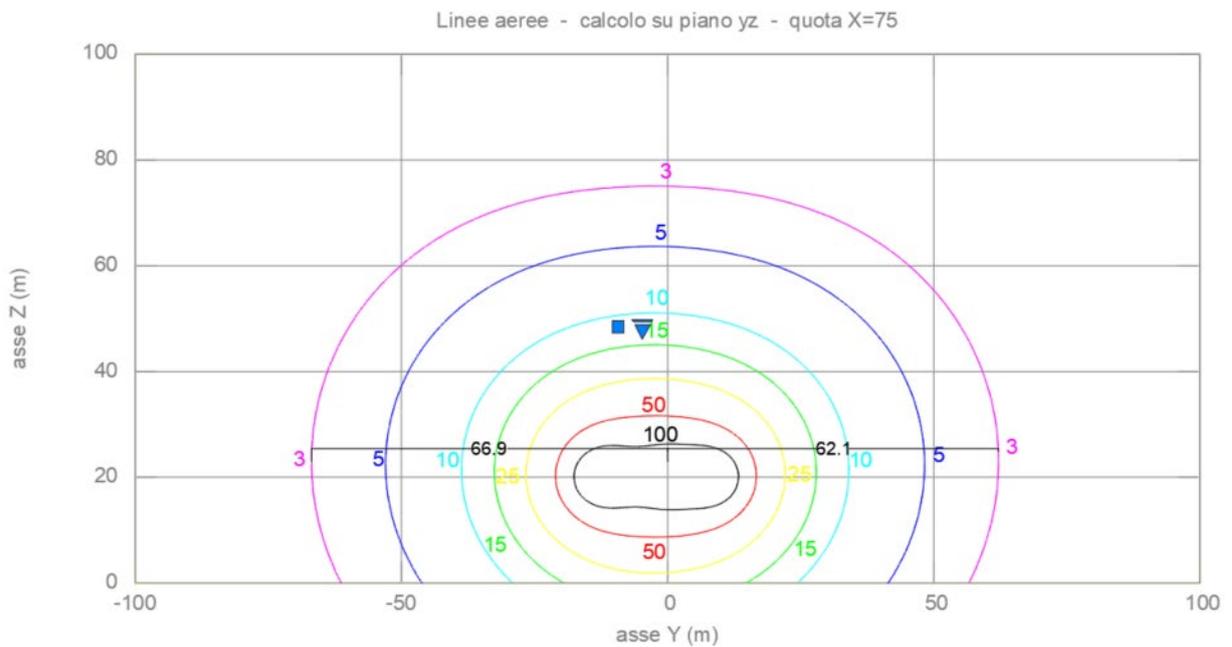


Figura 5 – Livelli di campo magnetico generato in corrispondenza dei sostegni VL

Come si osserva dai grafici dei livelli di campo magnetico generati in corrispondenza dei sostegni EA e VL, il valore di qualità di $3 \mu\text{T}$ viene rispettato, ad una distanza in pianta pari rispettivamente a 62,6 m e 66,9 m dall'asse palo. Cautelativamente si adotta come DPA la distanza maggiore, arrotondata al metro, quindi pari a 67 m.

Nelle figure seguenti riportiamo le curve di isolivello del campo magnetico generate sul piano XY per l'intera tratta dei raccordi ad una altezza di 10, 15, 20 e 30 metri dal suolo.

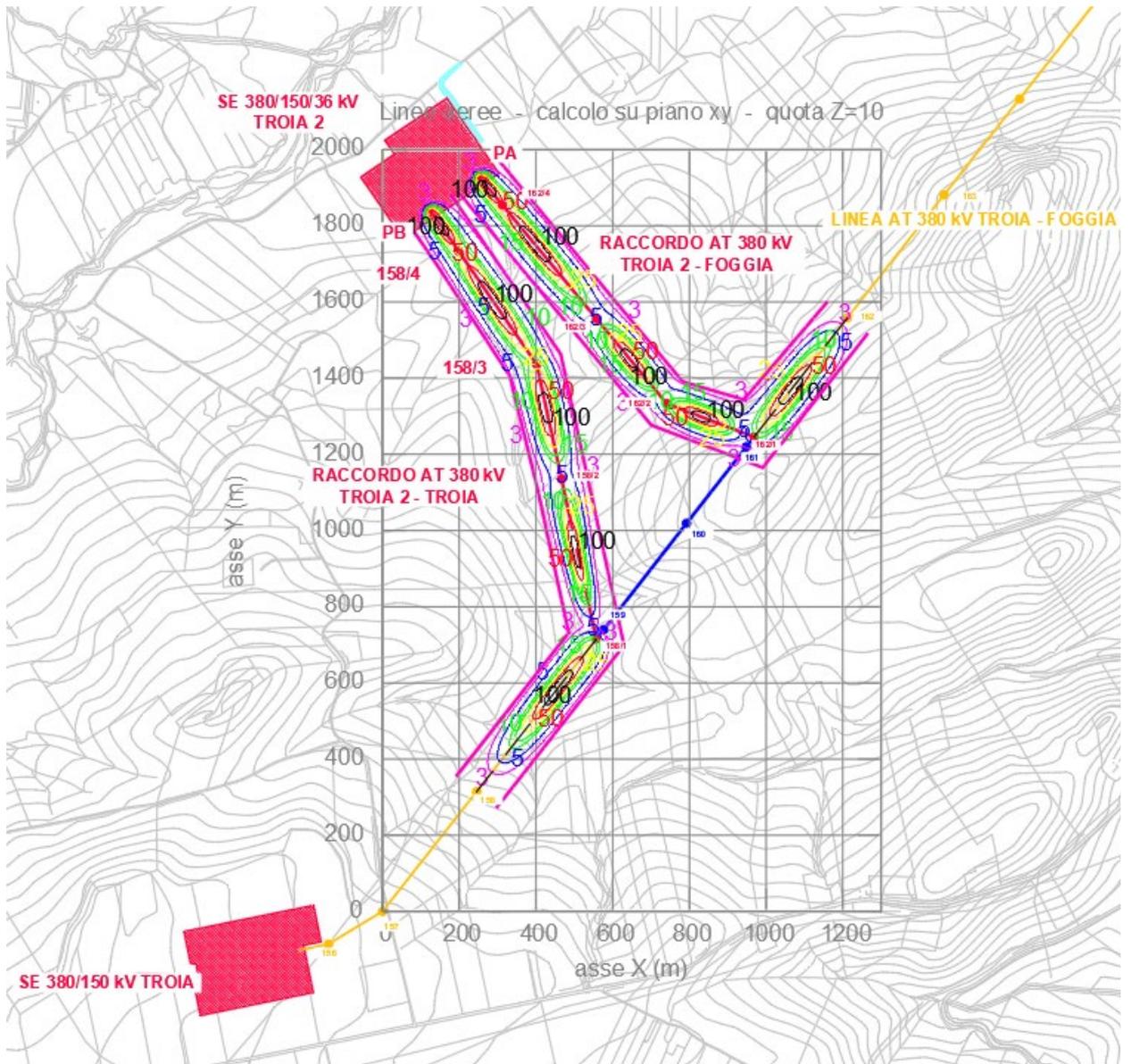


Figura 6 – Livello di campo magnetico generato dai raccordi ad un'altezza di 10 m dal suolo

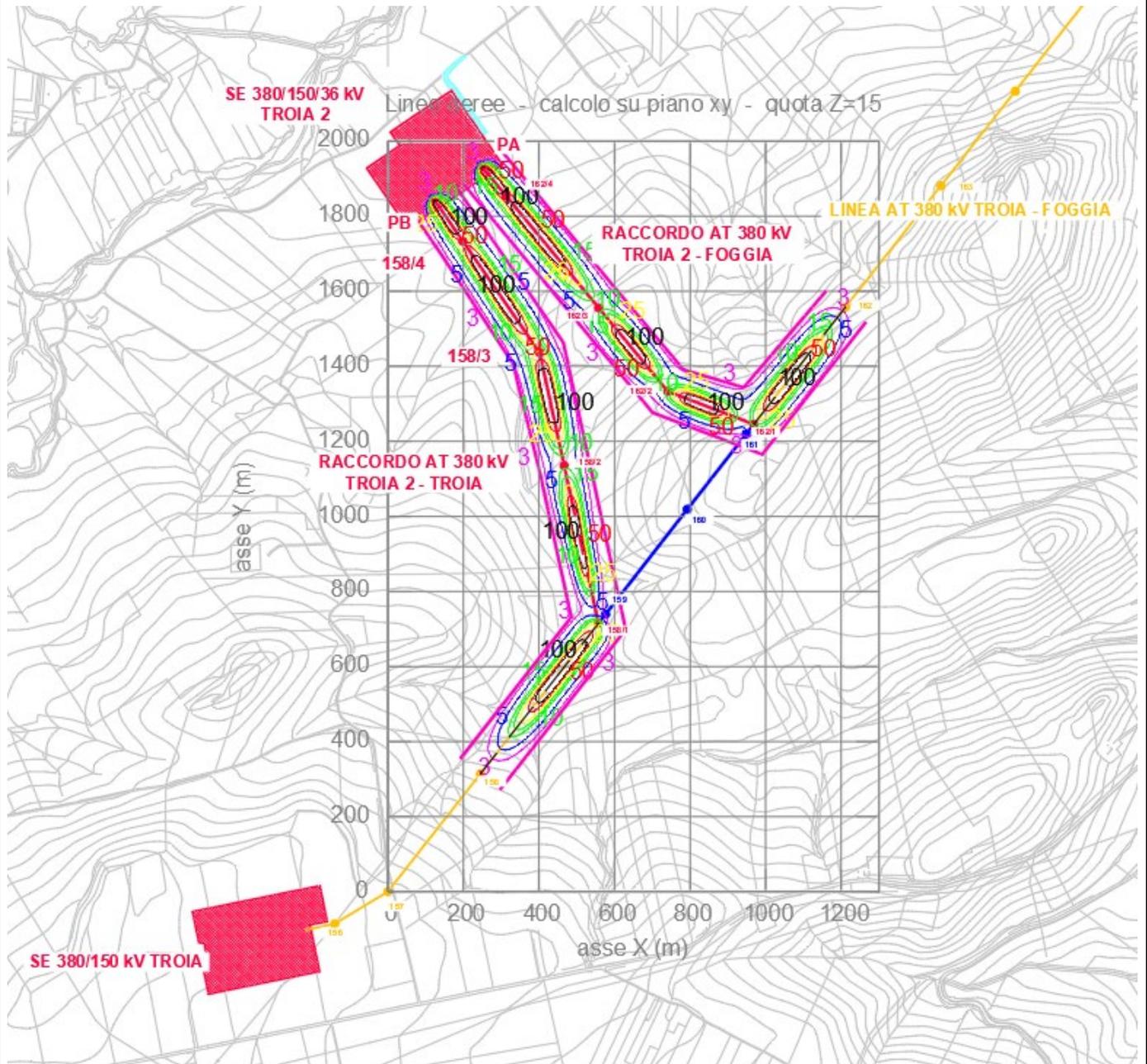


Figura 7 - Livello di campo magnetico generato dai raccordi ad un'altezza di 15 m dal suolo

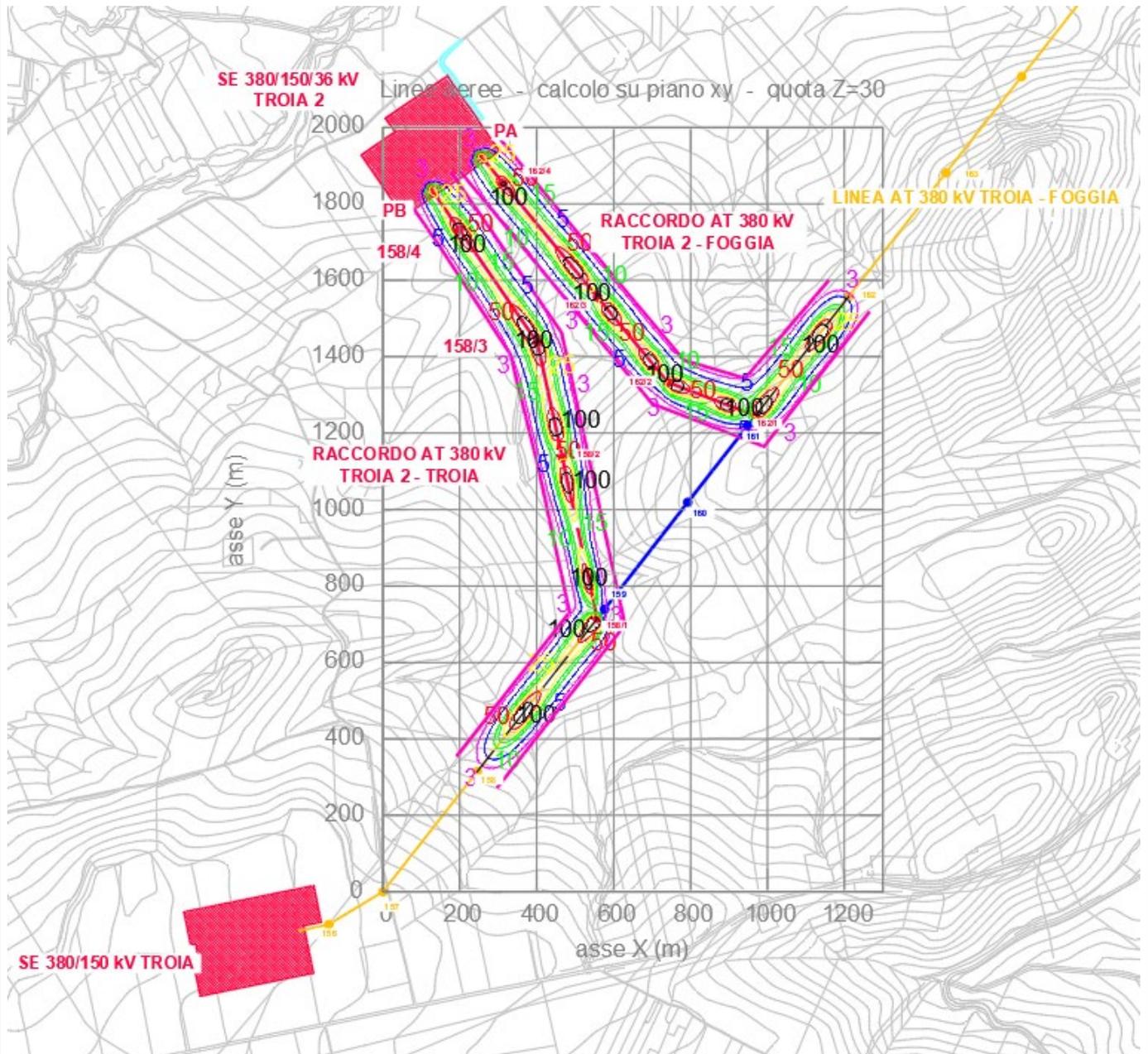


Figura 9 - Livello di campo magnetico generato dai raccordi ad un'altezza di 30 m dal suolo

4.4 Verifica dei valori limite e DPA

In Figura 4 e Figura 5 sono riportati gli andamenti delle intensità del campo magnetico, generati dalle configurazioni di sostegni principali, costituenti i raccordi in progetto. Dai grafici si evince che in nessun caso il campo magnetico generato dai conduttori raggiunge, al suolo, valori superiori al limite di esposizione per la popolazione di $100 \mu\text{T}$: tale valore viene raggiunto solo in vicinanza dei conduttori stessi dove è ben più grave il rischio di elettrocuzione.

Dai medesimi grafici si possono ricavare le ampiezze delle fasce di rispetto del valore di qualità di $3 \mu\text{T}$, che riportiamo nella tabella sottostante, arrotondate per eccesso al metro successivo, come previsto dalla norma.

DPA dall'asse della linea		
configurazione	lato sx ¹ (m)	lato dx (m)
EA	62,6	62,6
VL	66,9	62,1

Dall'analisi delle planimetrie sopra riportate in cui è indicata la fascia di rispetto, si evince che applicando una DPA di 67 metri (fascia magenta di Figura 6, 7, 8, e 9) viene rispettato il valore di qualità di $3 \mu\text{T}$, fatta eccezione per l'angolo interno in corrispondenza del P162/1 del raccordo AT 380 kV Troia 2-Foggia dove la fascia deve essere aumentata a 102 metri e in corrispondenza del P158/3 sul raccordo AT 380 kV Troia 2-Troia dove la fascia deve essere aumentata a 77 metri. Per maggiori dettagli si rimanda al documento No. 61424 – planimetria catastale con DPA.

5. ANALISI DEI RICETTORI

Nell'area compresa tra l'elettrodotto Troia – Foggia esistente e la SE Troia 2 in progetto e lungo il tracciato dei due raccordi in progetto, non sono presenti ricettori sensibili. Gli unici edifici presenti nelle vicinanze degli stessi sono collocati ad almeno 900 m dal tracciato linea, comunque esterni alle DPA, per come precedentemente definite.

6. CONCLUSIONI

Il DPCM 8 Luglio 2003 fissa i limiti di esposizione per la popolazione ai campi elettrici e magnetici generati da elettrodotti alla frequenza di rete (50Hz). Tali limiti sono pari a 5.000 V/m per il campo elettrico e $100 \mu\text{T}$, $10 \mu\text{T}$ e $3 \mu\text{T}$ per il campo magnetico rispettivamente come limite di esposizione, valore di attenzione e obiettivo di qualità: gli ultimi due sono validi per esposizioni superiori alle 4 ore / giorno. In base alla definizione del DM del 29 Maggio 2008, occorre applicare le DPA che garantiscano a chiunque rimanga all'esterno il rispetto del valore di qualità, alle stazioni elettriche, alle cabine primarie e secondarie e agli elettrodotti ad esse collegati.

I calcoli effettuati in base a quanto stabilito dal DM 29 Maggio 2008, e dalle "Linee Guida per l'applicazione del punto 5.1.3 dell'allegato al DM 29 Maggio 2008", hanno permesso di determinare la ampiezza della Distanza di Prima approssimazione pari a **67 metri** da applicare all'intera tratta aerea dei nuovi raccordi Troia 2 – Foggia e Troia 2 - Troia.

Per il raccordo AT 380 kV Troia 2 – Foggia, in corrispondenza della bisettrice dell'angolo interno, del sostegno P162/1 tale distanza deve essere portata a **102 metri**.

Per il raccordo AT 380 kV Troia 2 – Troia in corrispondenza della bisettrice dell'angolo interno, del sostegno P158/1 tale distanza deve essere portata a **77 metri**

Si osserva che il tracciato dell'elettrodotto è posto ad almeno 900 metri dal primo ricettore sensibile, considerando, tra i ricettori più prossimi, le abitazioni, ma non i ricoveri per gli attrezzi. Nell'ortofoto sottostante sono visibili i ricettori sensibili più prossimi ai raccordi.

¹ Per il sostegno VL si intende il lato con mensola maggiorata

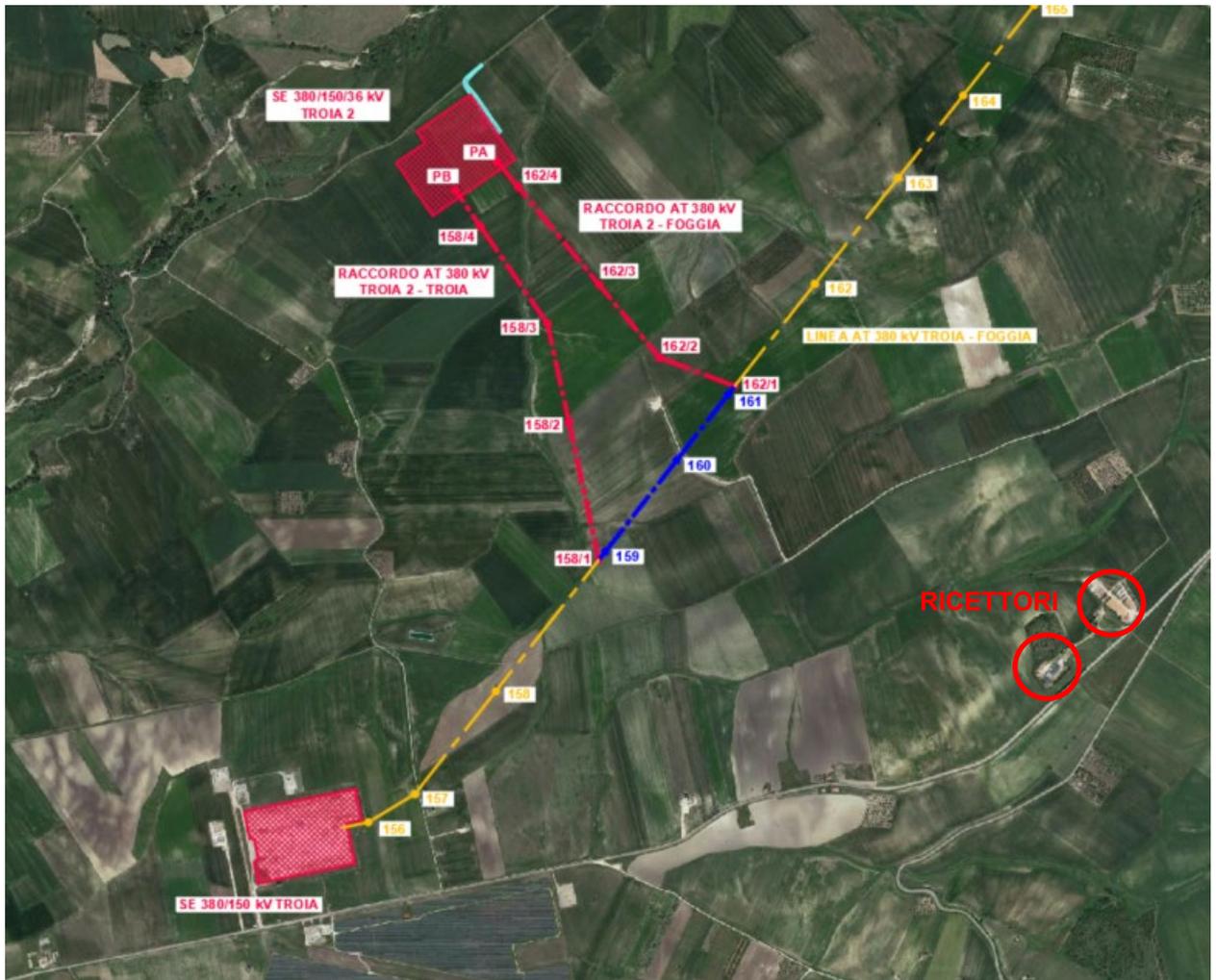


Figura 10 – Inquadramento su ortofoto

Come si evince dall'analisi dei ricettori precedentemente riportata e dal documento 61424 - Planimetria catastale con DPA, non sono presenti ricettori sensibili all'interno delle DPA.

Allegato 1: Documento di Validazione



Documento di Validazione

Algoritmi di calcolo del software MAGIC[®] (MAGnetic Induction Calculation)

Revisione	Data	Elaborato	Approvato
05	11/01/2021	M.F.	S.G.
00 Emissione	07/01/2014	D.B.	M.M.

Sommario

Premessa.....	3
1 Verifica del modulo bidimensionale.....	3
1.1 Confronto con CEI 211-04.....	3
1.2 Confronto con codice CESI.....	4
2 Verifica del modulo tridimensionale.....	7
2.1 Campo prodotto da un segmento finito arbitrariamente orientato.....	7
2.2 Validazione sperimentale del modulo tridimensionale.....	8
3 Verifica del modulo tridimensionale:trasformatore di potenza.....	9
3.1 Verifica del modello MAGIC della singola colonna del trasformatore con modello FEM (Finite Element Method).....	9
3.2 Verifica del modello MAGIC del trasformatore completo con misure sperimentali	12
Conclusioni.....	13

Premessa

Il presente documento riporta le verifiche funzionali del software MAGIC[®] attraverso il confronto con software già esistenti e di comprovata validità e con rilievi sperimentali.

Il confronto si sviluppa in tre parti:

- 1) verifica del modulo bidimensionale
- 2) verifica del modulo tridimensionale
- 3) verifica del modulo tridimensionale di configurazioni impiantistiche con particolare riferimento al trasformatore di potenza

Le principali caratteristiche del software MAGIC[®] sono:

- a) software bi-tridimensionale
- b) integrazione della formula di Biot-Savart
- c) dominio infinito (nessuna condizione al contorno necessaria)
- d) trascurati effetti di mitigazione del campo dovuto a schermatura di fatto (analisi conservativa)
- e) sovrapposizione degli effetti
- f) analisi in regime simbolico (calcolo dei moduli e delle fasi)

Il software è stato sviluppato da tecnici specializzati con la collaborazione e la supervisione di docenti e ricercatori del Politecnico di Torino – Dipartimento Energia (prof. Aldo Canova e Ing. Luca Giaccone).

1 Verifica del modulo bidimensionale

La verifica del modulo bidimensionale è stata condotta mediante confronto con la formulazione analitica, come indicato dalla CEI 211-04, e mediante confronto con un codice di calcolo sviluppato dal CESI.

1.1 Confronto con CEI 211-04

Una possibile validazione del programma utilizzato può essere effettuata confrontando il campo calcolato con il programma stesso e quello calcolato per via analitica, secondo la norma CEI 211-4 paragrafo 4.3, su di un caso in cui questa seconda procedura è applicabile in modo esatto. Tale caso si riferisce ad un sistema di conduttori rettilinei, paralleli e indefiniti.

Sotto queste ipotesi l'induzione magnetica \mathbf{B} è data dall'espressione:

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_{k=1}^N \frac{\bar{I}_k}{d_k} \bar{u}_l \times \bar{u}_r \quad (1)$$

in cui N è il numero dei conduttori, d è la distanza tra il conduttore k -esimo e il punto di calcolo; i vettori \bar{u}_l e \bar{u}_r indicano, rispettivamente, il verso della corrente e della relativa normale; \times indica il prodotto vettoriale.

In particolare è stato analizzato il caso, che verrà riportato successivamente, relativo ad una linea a doppia terna su semplice palificazione con corrente di 310 A. Come si può osservare dalla figura 1, le due curve sono praticamente coincidenti.

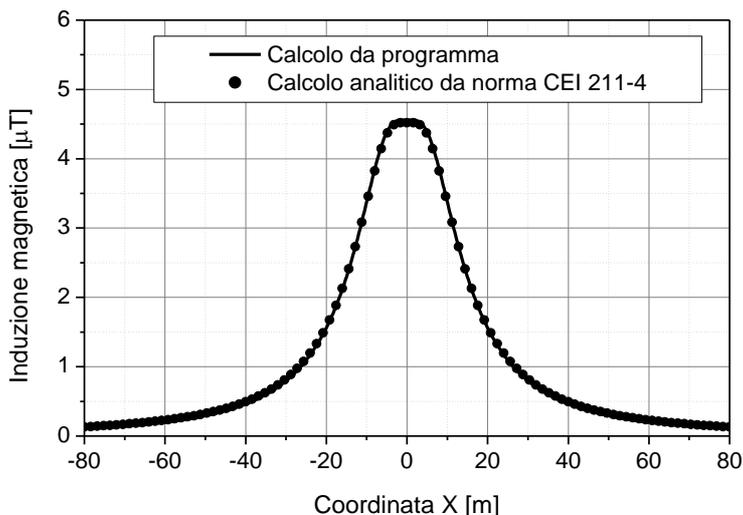


Figura 1: Induzione magnetica al suolo in prossimità di una linea aerea a doppia terna su semplice palificazione con corrente di 310: confronto tra MAGIC® e formula analitica CEI 211-4

Come si può osservare il profilo di induzione magnetica ottenuto dal software MAGIC® coincide esattamente con i punti calcolati mediante la formula analitica CEI 211-4.

1.2 Confronto con codice CESI

L'analisi del campo magnetico prodotto è stata condotta su due terne trifase di cavi affiancate. Le sezioni di affiancamento riguardano (Fig. 2):

- Buca giunti (interasse 70 cm e livello di interramento pari a 1.25 m)
- Formazione piana (interasse 35 cm e livello di interramento pari a 1.25 m)
- Distanza tra le due terne: 4m

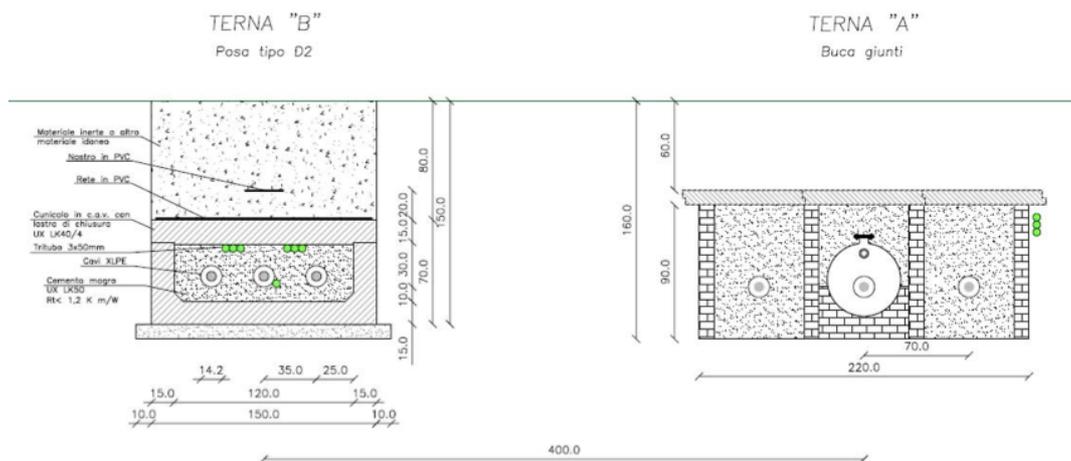


Figura 2: Affiancamento tra due linee interrate AT

Condizioni di carico e relazioni di fase:

- Terna B: $I_{eff} = 1500$ A (RST)
- Terna A: $I_{eff} = 1500$ A (TSR)

La configurazione analizzata mediante il codice sviluppato dal CESI porta alla distribuzione di campo riportata in Figura 3.

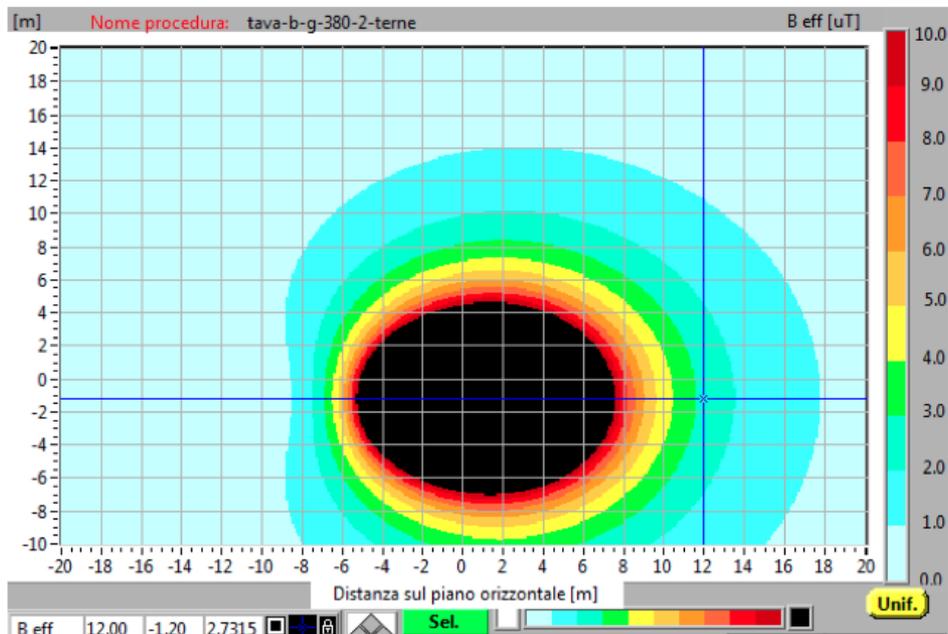


Figura 3: Mappa cromatica delle induzioni magnetiche calcolata mediante software CESI

La stessa configurazione è stata analizzata mediante il codice MAGIC[®] e può essere studiata attraverso due possibili funzioni messe a disposizione dal software:

- Terne parallele
- Multiconduttori 2D

In questo documento verrà utilizzato il Multiconduttore 2D (Fig. 4) che permette di definire un sistema di N conduttori posizionati arbitrariamente in cui viene applicata una corrente arbitraria.

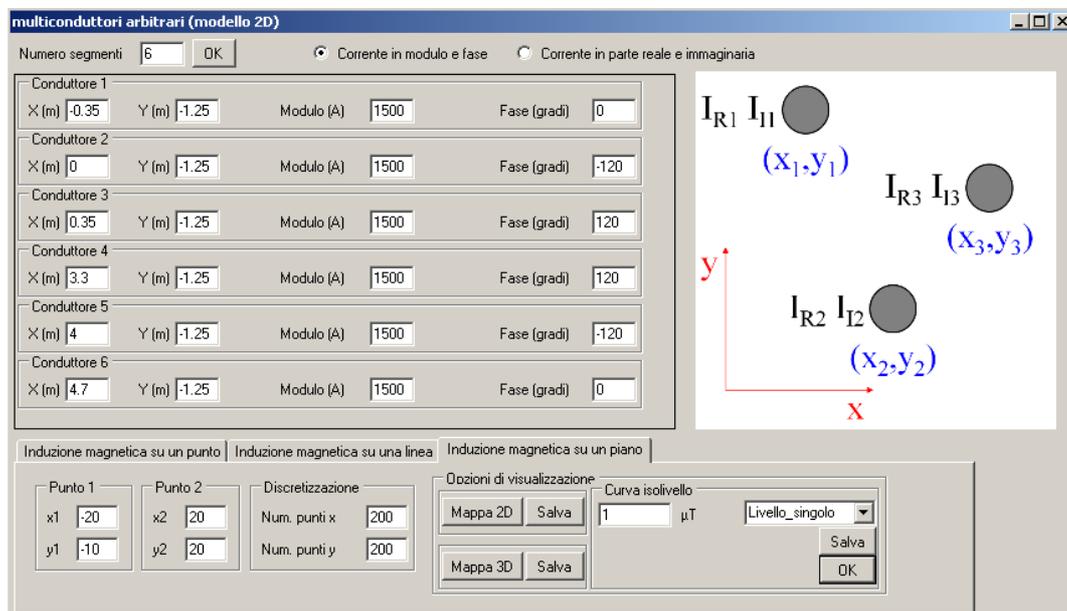


Figura 4:Schermata di ingresso modulo “multiconduttori arbitrari (modello 2D)””: dati definizione geometria e sorgenti

Nella seguente Fig. 5 è riportata la “geometria” del sistema che può essere visualizzata al termine dell’inserimento dati.

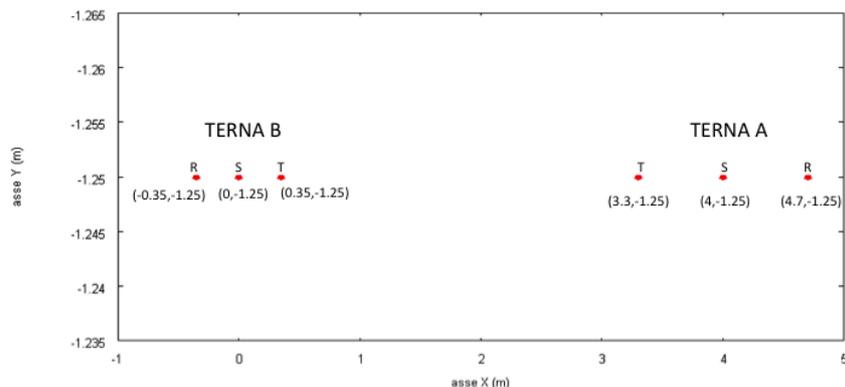


Figura 5: Geometria sorgenti

In Fig. 6 è riportata la mappa cromatica dell’induzione magnetica ottenuta dal software MAGIC® (valori in microT):

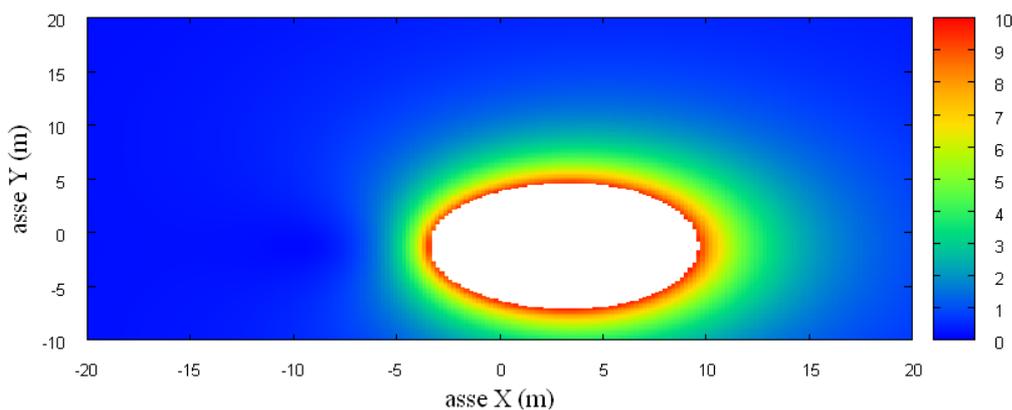


Fig. 6: Mappa cromatica dell’induzione magnetica ottenuta dal software MAGIC® (valori in microT):

In Fig. 7 sono riportate le linee isolivello dell’induzione magnetica (1, 3, 10, 100 microT) visualizzabili dal software MAGIC®.

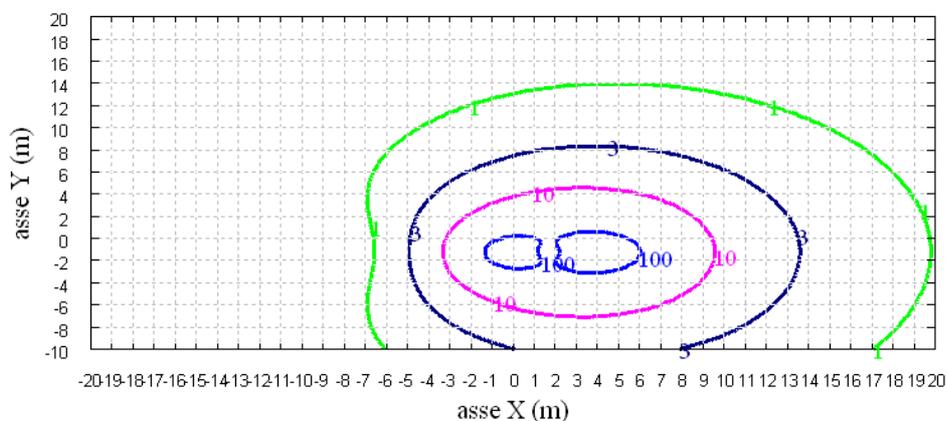
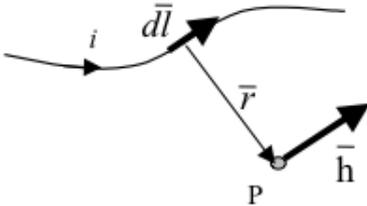


Fig. 7 Linee isolivello dell’induzione magnetica (1, 3, 10, 100 microT) da software MAGIC®.

Come si può osservare le mappe cromatiche dei due modelli risultano essere in perfetto accordo.

2 Verifica del modulo tridimensionale

Il modulo tridimensionale del MAGIC® si basa principalmente sull'integrazione della formula di Biot-Savart:

$\vec{h} = \int \frac{i d\vec{l} \times \vec{r}}{4\pi r^3}$	
---	--

Nelle configurazioni impiantistiche si ha spesso a che fare con fasci di cavi che il cui profilo copre percorsi approssimabili con buona precisione a delle spezzate tridimensionali. Ogni spezzata è quindi modellabile mediante una successione di segmenti opportunamente orientati nello spazio. Ne consegue che, sapendo valutare il campo di un segmento arbitrariamente orientato nello spazio, è possibile calcolare il campo prodotto da un fascio di cavi mediante la sovrapposizione degli effetti di tutti i segmenti costituenti il fascio.

2.1 Campo prodotto da un segmento finito arbitrariamente orientato

Si consideri il segmento rappresentato nella Fig. 8.

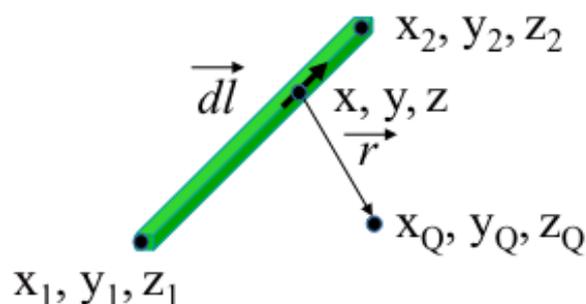


Fig. 8: Modello del segmento.

L'equazione del segmento in forma parametrica diventa la seguente:

$$\hat{x} = x_1 + (x_2 - x_1)t$$

$$\hat{y} = y_1 + (y_2 - y_1)t$$

$$\hat{z} = z_1 + (z_2 - z_1)t$$

Si consideri inoltre che:

$$\vec{r} = (x_Q - x)\vec{a}_x + (y_Q - y)\vec{a}_y + (z_Q - z)\vec{a}_z$$

$$d\vec{l} = dx\vec{a}_x + dy\vec{a}_y + dz\vec{a}_z$$

Facendo le opportune sostituzioni, la formula di Biot-Savart può essere risolta conducendo ad una formula chiusa per il calcolo delle tre componenti di campo H_x , H_y e H_z (ovvero B_x , B_y e B_z). L'integrazione, sebbene sia macchinosa e porti ad espressioni analitiche poco compatte, può essere semplicemente risolta mediante l'utilizzo di un processore simbolico. Per tutti i dettagli circa l'integrazione si consideri la seguente referenza:

Canova A.; F. Freschi; M. Repetto; M. Tartaglia, (2005), *Description of Power Lines by Equivalent Source System*. In: COMPEL, vol. 24, pp. 893-905. - ISSN 0332-1649

2.2 Validazione sperimentale del modulo tridimensionale

In Fig. 9 viene rappresentata una spira costituita da 4 conduttori rettilinei che ben rappresenta una sorgente di tipo tridimensionale.

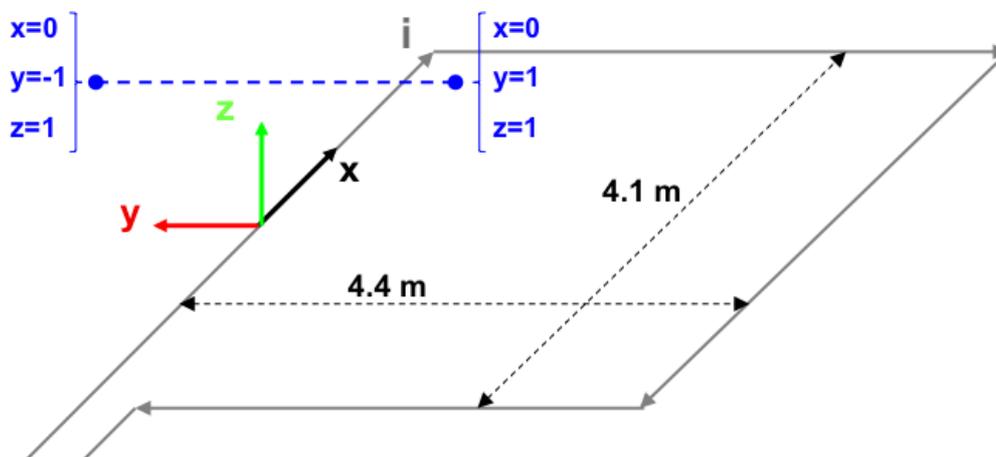


Fig. 9: Schema di spira quadrata.

Nella stessa immagine viene rappresentata una linea di confronto con le seguenti caratteristiche:

- È posta a 1 m da terra → $z = \text{costante} = 1 \text{ m}$
- Si estenda lungo l'asse y → $x = \text{costante} = 0 \text{ m}$
- È lunga due metri: → $y \text{ minimo} = -1 \text{ m}$, $y \text{ massimo} = 1 \text{ m}$

Su tale linea di confronto sono state eseguite delle misure sperimentali mediante sistema composto da sonda PMM-EHP50 C le cui caratteristiche sono riportate nel seguente elenco:

- Range di frequenze 5Hz – 100 kHz
- Range di campo elettrico 0.01 V/m – 100 kV/m
- Range di campo magnetico 1 nT – 10 mT
- Risoluzione 0.01 V/m - 1 nT
- Tempo di campionamento 30, 60 sec
- Massima acquisizione 1600 ore con acquisizione ogni 60 sec.
- SPAN 100, 200,500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 10 kHz, 100 kHz

Viene infine eseguito il confronto tra misure sperimentali e calcolo eseguito mediante software MAGIC[®]. I risultati di confronto sono riassunti nella seguente figura.

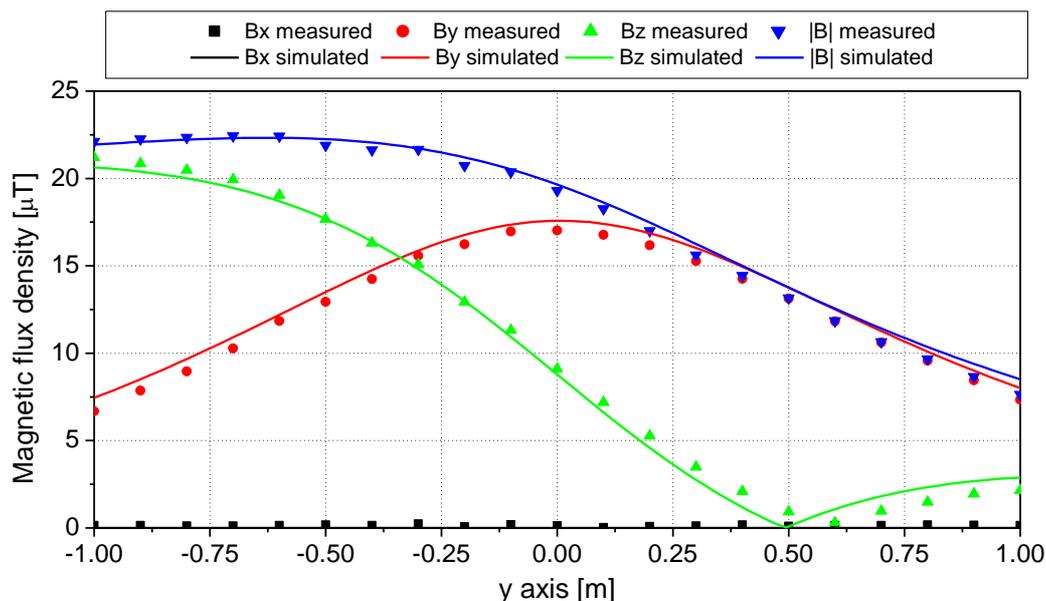


Fig. 10: Induzione magnetica misurata e calcolata mediante software MAGIC®.

Si dimostra quindi che le misure sperimentali sono in perfetto accordo con il modello implementato nel software MAGIC®.

3 Verifica del modulo tridimensionale:trasformatore di potenza

In questa sezione vengono riportati i principali risultati ottenuti utilizzando il software MAGIC® nella simulazione dei campi generati da un trasformatore in resina (il trasformatore in olio rappresenta una situazione semplificata rispetto a quello in resina).

La validazione è condotta in due step:

- Verifica del modello MAGIC della singola colonna del trasformatore con modello FEM (Finite Element Method)
- Verifica del modello MAGIC del trasformatore completo con misure sperimentali

Maggiore dettaglio sui confronti sono riportati nella seguente referenza:

A. Canova, L. Giaccone, M. Manca, R. Turri, P. Casagrande, "Simplified power transformer models for environmental magnetic impact analysis", 2° Int. Conf. on EMF-ELF, Paris, 24-25 Marzo 2011.

3.1 Verifica del modello MAGIC della singola colonna del trasformatore con modello FEM (Finite Element Method)

MAGIC® propone due diversi modelli per il trasformatore: il primo di tipo semplificato e valido a partire da circa 0.5-1m dal trasformatore, il secondo più rigoroso valido anche a piccole distanze dal trasformatore. Nel seguito i due modelli verranno indicati come Modello 1 e Modello 2.

Un primo confronto tra i due modelli è stato effettuato con un codice agli elementi finiti (FEMM) di tipo assialsimmetrico. In Figura 11 sono riportate le principali dimensioni del caso analizzato: avvolgimento primario e secondario di un trasformatore di 630 kVA in resina e l'indicazione delle linee di calcolo.

Nei calcoli che seguono i due avvolgimenti sono caratterizzati dalle stesse amperspire in opposizione ($N1 \cdot I1 = N2 \cdot I2$) e verranno considerate, come sorgenti, le correnti nominali.

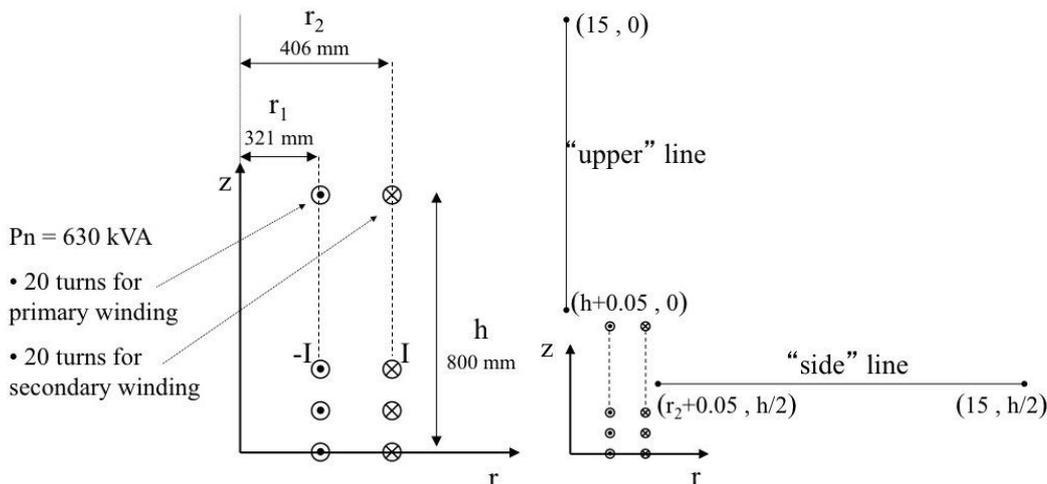


Fig. 11. Geometria del sistema (1) e linee di calcolo (2)

Le Fig. 12 e 13 mostrano, rispettivamente, i valori di induzione magnetica lungo la linea ad 1m dal lato degli avvolgimenti e lungo la linea ad 1.5 m sopra gli avvolgimenti. Le figure mettono a confronto il “modello 1 e 2” ed il calcolo, assunto come riferimento, effettuato mediante codice FEM.

Si può osservare un ottimo accordo tra i “modelli 1 e 2” adottati nel MAGIC® lungo entrambe le linee mentre per distanze inferiori al metro il modello semplificato, con particolare riferimento al campo lungo la linea verticale, risulta portare a delle discrepanze significative. Per tali distanze è pertanto conveniente utilizzare il “modello 2” che risulta più accurato a spese di un maggiore peso computazionale (nell’ordine comunque delle decine di secondi).

I modelli inseriti nel MAGIC® sono inoltre confrontati con il modello proposto da un altro software commerciale (EFC-400) che verrà denominato “Modello 3”. Tale modello è basato sull’ipotesi che il campo magnetico disperso, essendo correlato con la reattanza di dispersione del trasformatore, risulta quantitativamente correlato alla tensione di corto circuito. Il modello proposto da EFC-400 è quindi costituito da un unico avvolgimento (che sintetizza il primario ed il secondario) percorso da una corrente ridotta, rispetto alla corrente nominale, secondo la seguente formula:

$$I = I_R \cdot \frac{V_{SC} \%}{100} \quad (14)$$

in cui I_R è la corrente nominale (di primario o secondario) e V_{SC} è la tensione di cortocircuito percentuale. Può essere utilizzata la corrente di primario o di secondario (I_{R1} o I_{R2}) e corrispondentemente occorre considerare le spire di primario o secondario (N_1 e N_2).

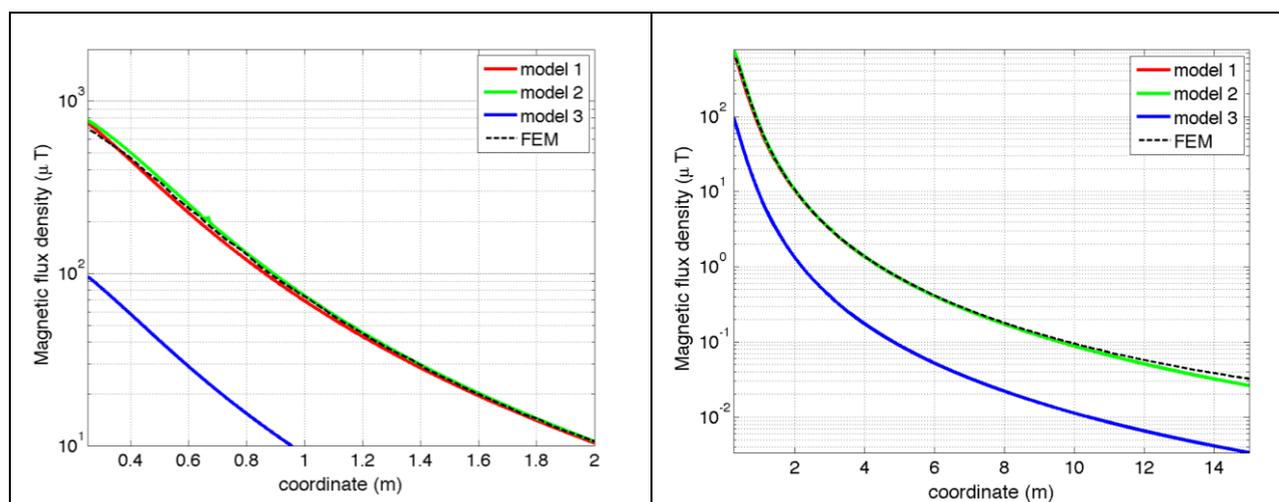


Fig. 12. Induzione magnetica lungo la linea laterale

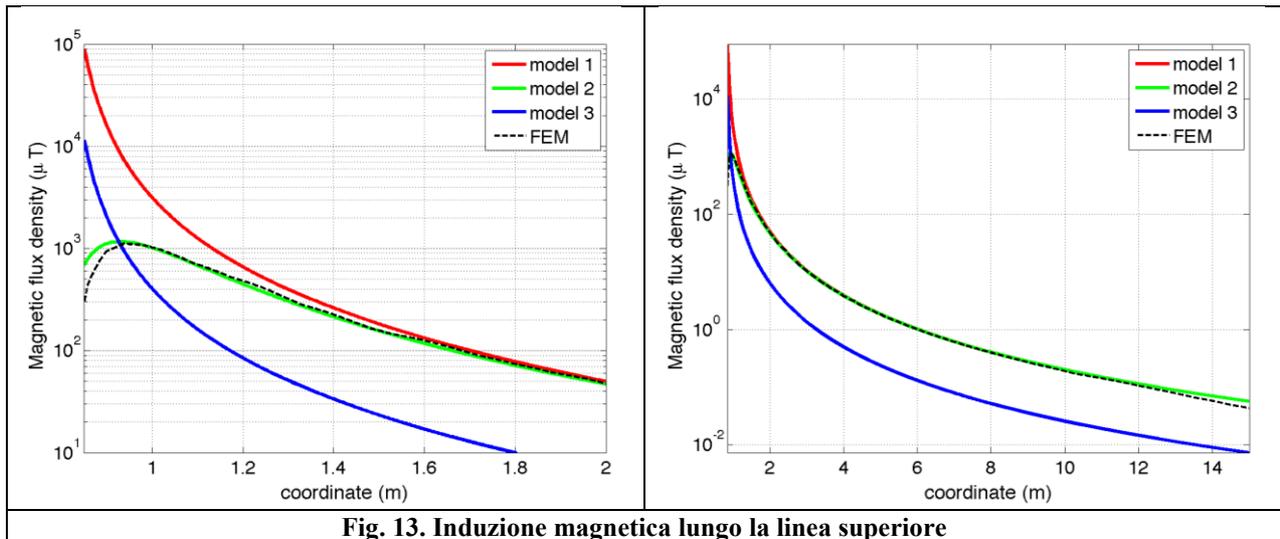


Fig. 13. Induzione magnetica lungo la linea superiore

Come si può osservare dai profili di induzione magnetica il modello 3 risulta scarsamente idoneo a modellare i due avvolgimenti concentrici di primario e secondario.

3.2 Verifica del modello MAGIC del trasformatore completo con misure sperimentali

In questo paragrafo il modelli vengono confrontati con dati sperimentali. Il caso analizzato si riferisce ad un trasformatore in resina da 630 kVA, 15kV/400V, funzionante in condizioni di corto circuito (Fig. 14). Il trasformatore viene alimentato con una tensione che fa circolare negli avvolgimenti una corrente pari al 42% della corrente nominale, si ha quindi 10.4 A di primario (lato MT) e 390 A di secondario (lato BT). Il modello del trasformatore risulta quindi completo e costituito da tutti gli avvolgimenti delle tre fasi.

Le linee di calcolo S1 ed S2 (Fig. 15) sono poste ad 1.5m dal piano di appoggio del trasformatore. E' importante sottolineare che il contributo dei terminali di BT influisce significativamente il campo magnetico ambientale, specialmente nella direzione S1. Pertanto, l'introduzione di tali sorgenti aggiuntive agli avvolgimenti porta ad una riduzione degli scostamenti tra i vari modelli.

In Fig. 16 e 17 sono riportati i confronti tra le induzioni magnetiche, lungo le linee S1 ed S2, misurate e calcolate con i diversi modelli.

Come si può osservare, in particolare per la linea S2 (dove il contributo delle connessioni è trascurabile) il modello 1 ed il modello 2 approssimano in modo soddisfacente i dati sperimentali.

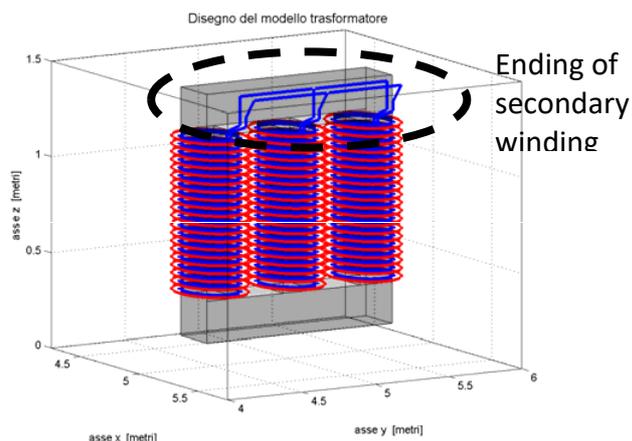


Fig. 14: Connessioni elettriche considerate al lati BT.

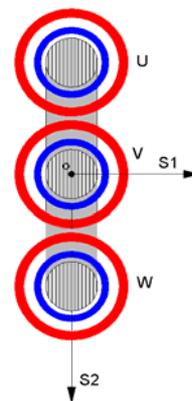


Fig. 15: Linee di calcolo S1 ed S2

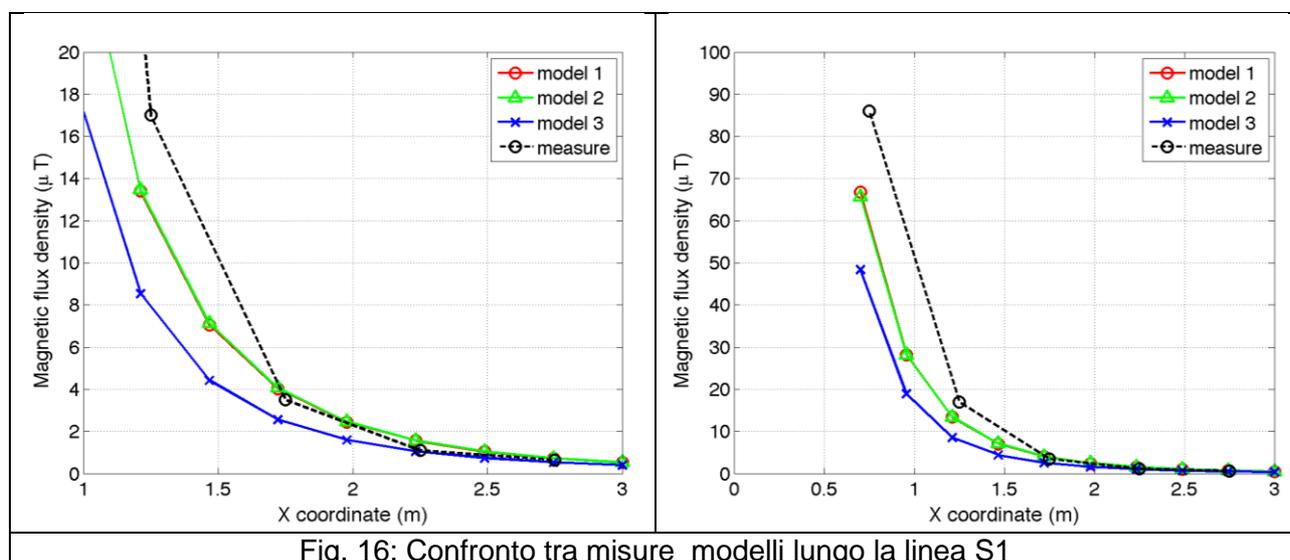


Fig. 16: Confronto tra misure modelli lungo la linea S1

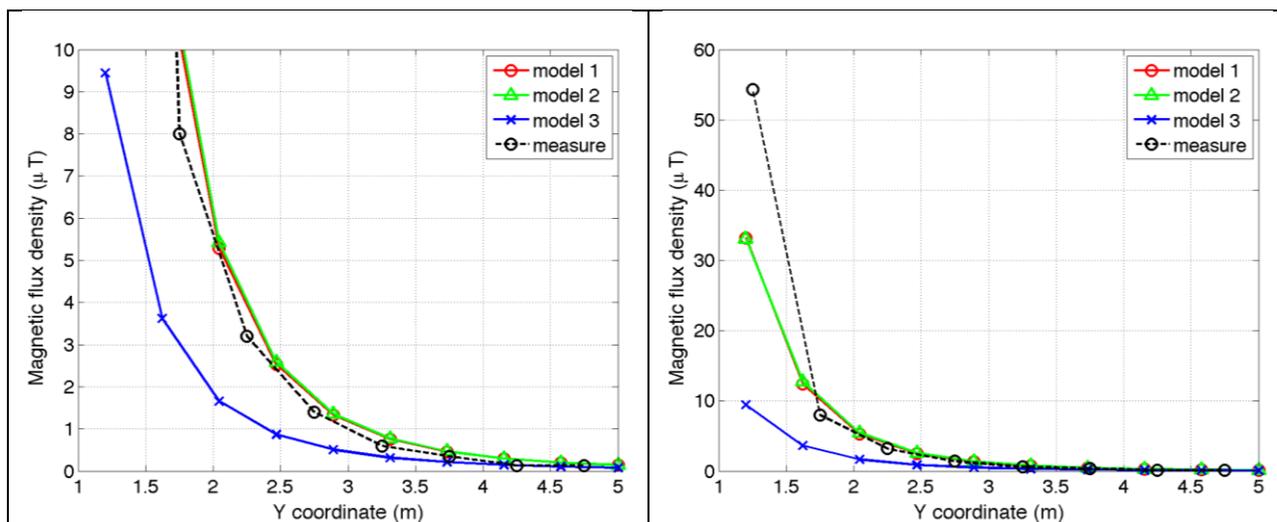


Fig. 17. Confronto tra misure modelli lungo la linea S2

Conclusioni

Il presente documento si propone di fornire alle autorità competenti tutti gli elementi necessari affinché il software MAGIC® possa essere validato secondo quanto richiesto dal Decreto Ministeriale (160) del 29/05/2008 “Approvazione della metodologia di calcolo per la determinazione delle fasce di rispetto per gli elettrodotti”.

Come indicato nell’art. 5.1.2 (Calcolo delle fasce di rispetto per linee elettriche) del decreto del 29/05/2008, i modelli tridimensionali non sono ancora standardizzati, tuttavia un software in cui i modelli soddisfino ai seguenti requisiti indicati nel decreto:

“...i modelli utilizzati devono essere descritti in termini di algoritmi implementati, condizioni al contorno e approssimazioni attuate. Essi devono essere validati attraverso misure o per confronto con modelli che abbiano subito analogo processo di verifica. La documentazione esplicativa e comprovante i criteri di cui sopra deve essere resa disponibile alle autorità competenti ai fini dei controlli”, può essere ritenuto idoneo allo scopo e, a tal fine, è stato redatto il presente documento.

Per quanto concerne in particolare le cabine elettriche, la complessità delle sorgenti in esame richiede una valutazione accurata che tenga conto principalmente della tridimensionalità delle singole sorgenti e l’effetto prodotto dalla combinazione delle stesse (sovrapposizione degli effetti). Nelle analisi precedentemente svolte sono stati analizzati e validati i principali componenti costituenti le cabine quali linee elettriche di connessione (tratti di conduttori di lunghezza finita), quadri elettrici (tratti conduttori di lunghezza finita) e trasformatori (elementi toroidali e tratti di conduttore di lunghezza finita).

Dai risultati ottenuti e presentati è quindi possibile concludere che il Software MAGIC® ha le caratteristiche per essere rispondente alle indicazioni richieste dal Decreto Ministeriale (160) del 29/05/2008, lasciando ovviamente alle autorità competenti la verifica ed il giudizio finale.