

		<i>Bertani</i>	<i>Bolognesi</i>	<i>Brugnoli</i>	
A	29/09/21	Bertani	Bolognesi	Brugnoli	Emissione per autorizzazione
REVISIONE	DATA	ELABORATO	VERIFICATO	APPROVATO	DESCRIZIONE
INGEGNERIA & COSTRUZIONI  					IMPIANTO  FANO  TITOLO  POTENZIAMENTO LINEA AT FABRIANO - SASSOFERRATO RELAZIONE CAMPI ELETTRICI E MAGNETICI
SCALA	FORMATO	FOGLIO / DI		N. DOCUMENTO	
-	A4	1 / 37		0 2 4 0 4 A	

**SOMMARIO**

<b>1</b>	<b>PREMESSA .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>QUADRO NORMATIVO .....</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>CALCOLO DEL CAMPO MAGNETICO.....</b>	<b>4</b>
3.1	Correnti di calcolo.....	5
3.2	Risultati.....	6
3.3	Verifica dei valori limite e DPA.....	8
<b>4</b>	<b>ANALISI DEI RICETTORI .....</b>	<b>17</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONI .....</b>	<b>23</b>

## 1 PREMESSA

Oggetto della presente relazione è il calcolo dei campi elettrici e magnetici generati dal progetto del potenziamento dell'elettrodotto **RTN 132 kV Fabriano - Sassoferrato**. L'opera in oggetto verrà realizzata per garantire una migliore magliatura e superare le criticità attuali della rete aumentando i margini di continuità del servizio di trasmissione nell'area dell'elettrodotto, anche a seguito della connessione di un impianto fotovoltaico ubicato nel comune di Fano (provincia di Pesaro e Urbino). L'attuale elettrodotto Fabriano - Sassoferrato, risalente agli anni '70, è armato con conduttore ACSR  $\varnothing 22,8$  mm, e il gestore della rete ha evidenziato la necessità di potenziare tale linea con un conduttore a corda ACSR  $\varnothing 31,5$  mm in extra franco, aumentando la capacità di trasmissione dell'elettrodotto. Il progetto è realizzato tenendo conto - per la verifica delle altezze sul suolo e delle distanze di rispetto - di una temperatura maggiore di quella prevista dalla norma CEI 11-60 e dal DM 21 Marzo 1988 (75 °C anziché 55 °C previsti per la Zona A), che porta alla possibilità di far transitare sulla linea una corrente di 1.115 A nel periodo freddo e 930 A nel periodo caldo.

Il potenziamento della linea comporta il contestuale rifacimento del percorso e dei sostegni della stessa. Infatti il tracciato del vecchio elettrodotto attraversa diverse aree edificate, tra cui 3 aree industriali e una residenziale, oltre a lambire diverse abitazioni sparse: il potenziamento della linea con il conseguente aumento di corrente non avrebbe consentito il rispetto del valore di qualità per i campi magnetici in molti edifici esistenti, pertanto tenuto conto dei vincoli urbanistici, archeologici e idrogeologici presenti, il tracciato del nuovo elettrodotto è stato elaborato su un percorso differente, misto aereo-cavo, come evincibile dall'elaborato 02432A. La soluzione considerata si sviluppa nei Comuni di Fabriano (tratta in cavo interrato e sostegni dal P1 al P16) e Sassoferrato (sostegni dal P17 al portale di ammarro presente in CP), provincia di Ancona, ad una quota altimetrica compresa fra 284 e 459 mslm.

La lunghezza dell'elettrodotto è pari a circa 15,1 km, di cui quasi 2 km in cavo interrato e 13,1 km in linea aerea. Il cavo AT uscirà dalla CP Fabriano dal medesimo stallo attualmente in uso per la connessione con CP Sassoferrato tramite modifica dello stesso. La parte interrata, composta da una terna di cavi in alluminio, isolati in XLPE (polietilene reticolato), della sezione di 1.600 mm<sup>2</sup>, o tipologia equivalente, sarà posata in un'unica trincea della profondità di circa 1,6 m (profondità di posa del cavo paria 1,5 m). I cavi verranno posati prima al di sotto della pista ciclabile in progetto nei pressi del Cimitero di S. Maria a Fabriano, e poi al di sotto della viabilità esistente nella zona industriale limitrofa, interessando le Vie Beniamino Gigli, Bruno Buozzi, Giuseppe di Vittorio e Achille Grandi. Il passaggio da cavo a linea aerea avverrà a Nord dell'abitato di Fabriano e comporta la realizzazione di 38 nuovi sostegni, escluso il portale di ammarro già presente per l'ingresso nella CP di Sassoferrato.

La presente relazione tratta del solo ripotenziamento dell'elettrodotto a 132 kV: i campi elettrici e magnetici prodotti dalle CP di Fabriano e Sassoferrato non sono oggetto della presente relazione.

## 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.

Tabella 1 - valori come da normativa in vigore

	<b>Campo magnetico (<math>\mu</math>T)</b>	<b>Campo elettrico (V/m)</b>	<b>NOTE</b>
<b>Limite di esposizione</b>	100	5000	-
<b>Valore di attenzione</b>	10	-	Da verificarsi in luoghi adibiti a permanenza non inferiore alle 4 ore
<b>Obiettivo di qualità</b>	3	-	

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 DMLLPP del 16 Gennaio 1991. Nella normativa viene specificato inoltre che, per le stazioni 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.)

Al fine di stimare il campo elettrico e magnetico prodotto dagli elementi di rete e determinare le Dpa da applicarle, sono state prese in considerazione le "Linee Guida per l'applicazione del punto 5.1.3 dell'allegato al DM 29/05/2008" elaborate da Enel ad uso pubblico, "al fine di semplificare ed uniformare l'approccio al calcolo della Distanza di Prima Approssimazione (procedimento semplificato per il calcolo della fascia di rispetto) dei propri impianti, fruibile sia da parte di privati in sede di realizzazione di nuovi insediamenti, che da parte degli organi di controllo in sede di verifica".

### **3 CALCOLO DEL CAMPO MAGNETICO**

La rete elettrica nazionale, di cui il ripotenziamento della linea a 132 kV "Fabriano - Sassoferrato" farà parte, è esercita alla frequenza di 50 Hz. A questa frequenza i campi elettrici e magnetici generati dall'elettrodotto stesso sono due fenomeni distinti, il primo proporzionale alla tensione della linea stessa, mentre il secondo proporzionale alla corrente che vi circola.

**Non si procede con il calcolo dei livelli di campo elettrico dato che, per le tensioni in gioco, le sopra citate linee guida specificano, a valle di misure e valutazioni effettuate sulle linee elettriche facenti parte della rete di Enel, che "il campo elettrico al suolo in prossimità di elettrodotti a tensione uguale o inferiore a 150 kV non supera mai il limite di esposizione per la popolazione pari a 5 kV/m".**

Al fine di stimare il campo magnetico prodotto dai cavidotti in oggetto e determinare le Dpa da applicarle, si è proceduto considerando prima le indicazioni fornite dalle "Linee Guida per l'applicazione del punto 5.1.3 dell'allegato al DM 29/05/2008" elaborate da Enel e poi effettuando il calcolo teorico sempre in considerazione di quanto previsto dal Decreto Ministeriale succitato.

È stato predisposto il calcolo teorico utilizzando la corrente massima che può transitare sull'elettrodotto 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-Savar 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.

### 3.1 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
132 ÷ 150	620	870	575	675

L'elettrodotto in oggetto, essendo localizzato in provincia di Ancona, ad una quota fra 284 e 459 sul livello del mare rientra in zona A: pertanto la portata in corrente in servizio normale risulta pari a **870 A**. Secondo la medesima normativa il cavo di alluminio con sezione di 1600 mm<sup>2</sup> può portare fino a **1110 A**.

La norma CEI 11-60 prevede che le portate di progetto "standard" definite al punto 3.1 e riportate nella tabella sopra, possano essere variate applicando dei fattori correttivi in base alle reali condizioni di progetto delle linee. In particolare, la norma prevede 3 condizioni in cui occorre applicare fattori correttivi al calcolo della corrente:

- Quando il parametro di posa è diverso da quello del conduttore di riferimento
- Quando esiste uno squilibrio effettivo tra le campate
- Quando il progetto dell'elettrodotto venga realizzato tenendo conto di franchi maggiorati.

Il progetto è realizzato tenendo conto - per la verifica delle altezze sul suolo e delle distanze di rispetto - di una temperatura maggiore di quella prevista dalla norma CEI 11-60 e dal DM 21 Marzo 1988 (75 °C anziché 55 °C previsti per la Zona A), che porta alla possibilità di far transitare sulla linea le seguenti correnti:

Tensione nominale della linea kV	Zona A	
	Periodo C	Periodo F
132 ÷ 150	930	1115

La necessità di realizzare il progetto in modo che sull'elettrodotto possa transitare una corrente maggiore e che quindi i franchi minimi siano verificati anche a 75 °C, è dovuta alla necessità di tenere in considerazione i continui sviluppi della RTN e del numero sempre crescente di impianti alimentati da FER da installarsi nella zona.

Per il calcolo delle Distanze di Prima Approssimazione si è utilizzata una corrente di **1110 A**. Questo in base al fatto che la portata in servizio normale del conduttore aereo è maggiore, seppur di poco, ma la corrente che può circolare sull'elettrodotto è limitata dalla portata del cavo interrato.

### 3.2 Risultati

I valori di campo magnetico generati dall'elettrodotto sono calcolati al fine di definire le ampiezze delle fasce di prima approssimazione da applicarsi dall'asse dell'elettrodotto interrato e aereo. Tali valori sono desunti utilizzando le correnti come descritto nel capitolo precedente.

Riportiamo nel seguito i risultati delle simulazioni effettuate rispettivamente considerando il cavo interrato posato a trifoglio a una profondità di 1,5 m, i cavi come disposti sul palo gatto, configurazione che corrisponde al palo P1 e con i conduttori a triangolo come nella restante parte di elettrodotto. L'asse dei grafici è posto nell'asse dei sostegni. Esiste una campata tra i sostegni 3 e 4, in cui è presente una differente tipologia di tralici che permette di effettuare l'incrocio con una linea esistente: le Dpa di questa campata verranno discusse nel dettaglio in seguito.

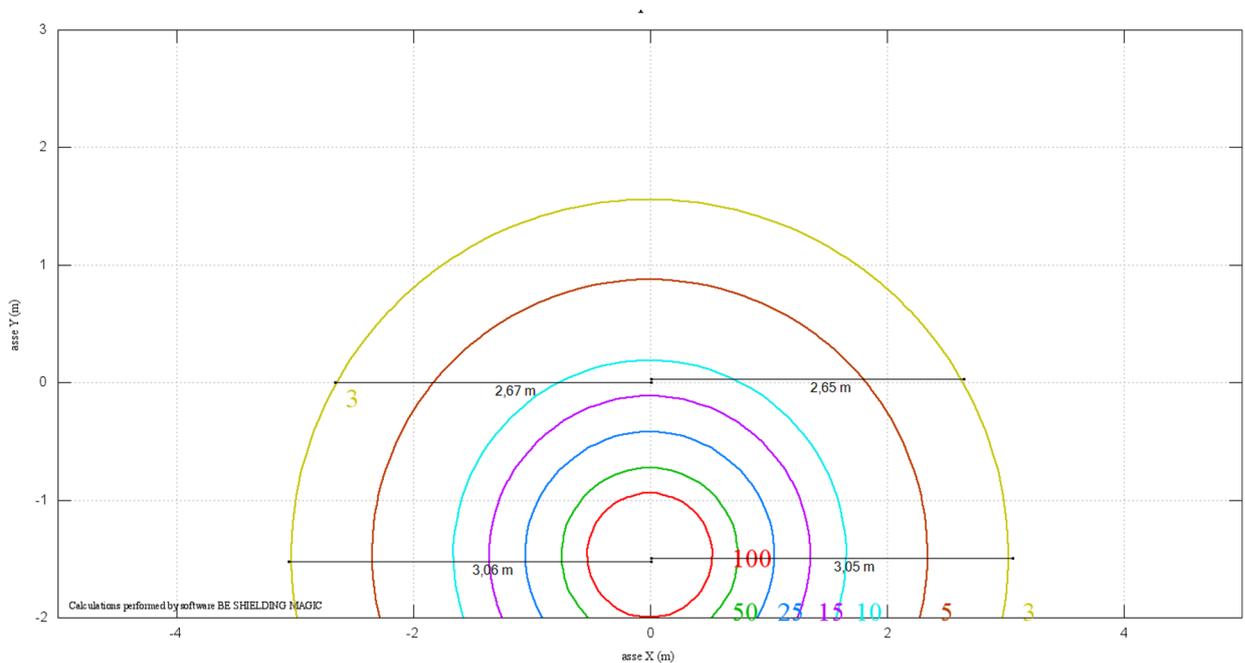


Figura 1 – Livelli di campo magnetico prodotti dal tratto in cavidotto dell'elettrodotto Fabriano -Sassoferrato

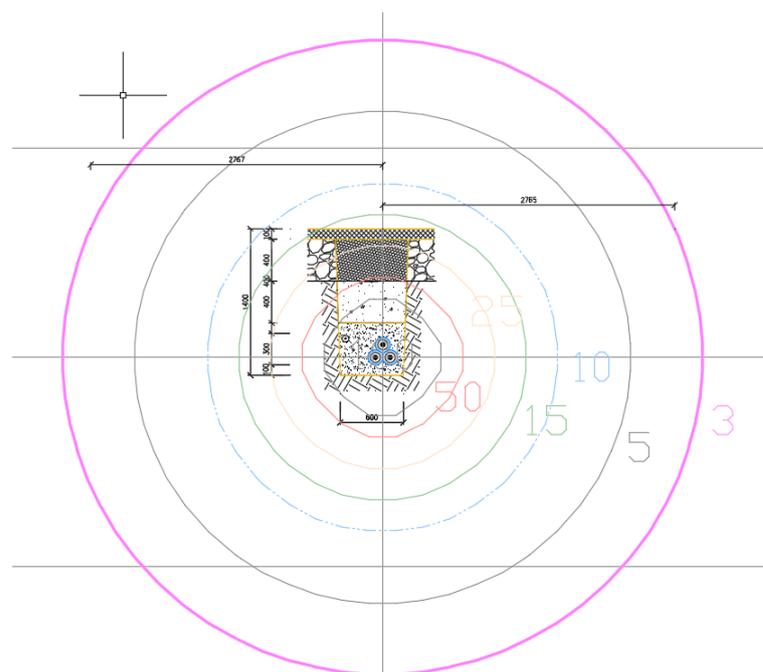


Figura 2 – Livelli di campo magnetico di cui in figura 1 applicati alla sezione dell'elettrodotto

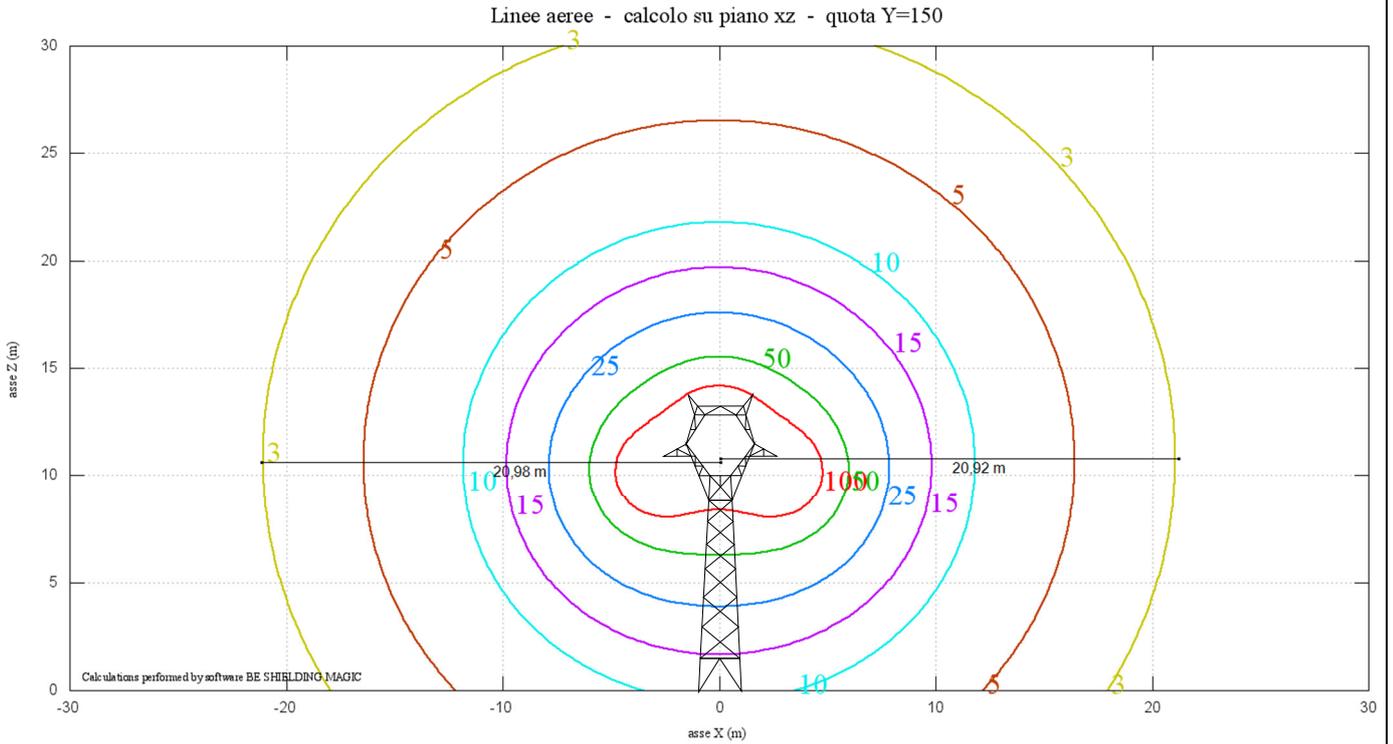


Figura 3 – Livelli di campo magnetico generato dai conduttori del tratto aereo come disposti sul palo gatto

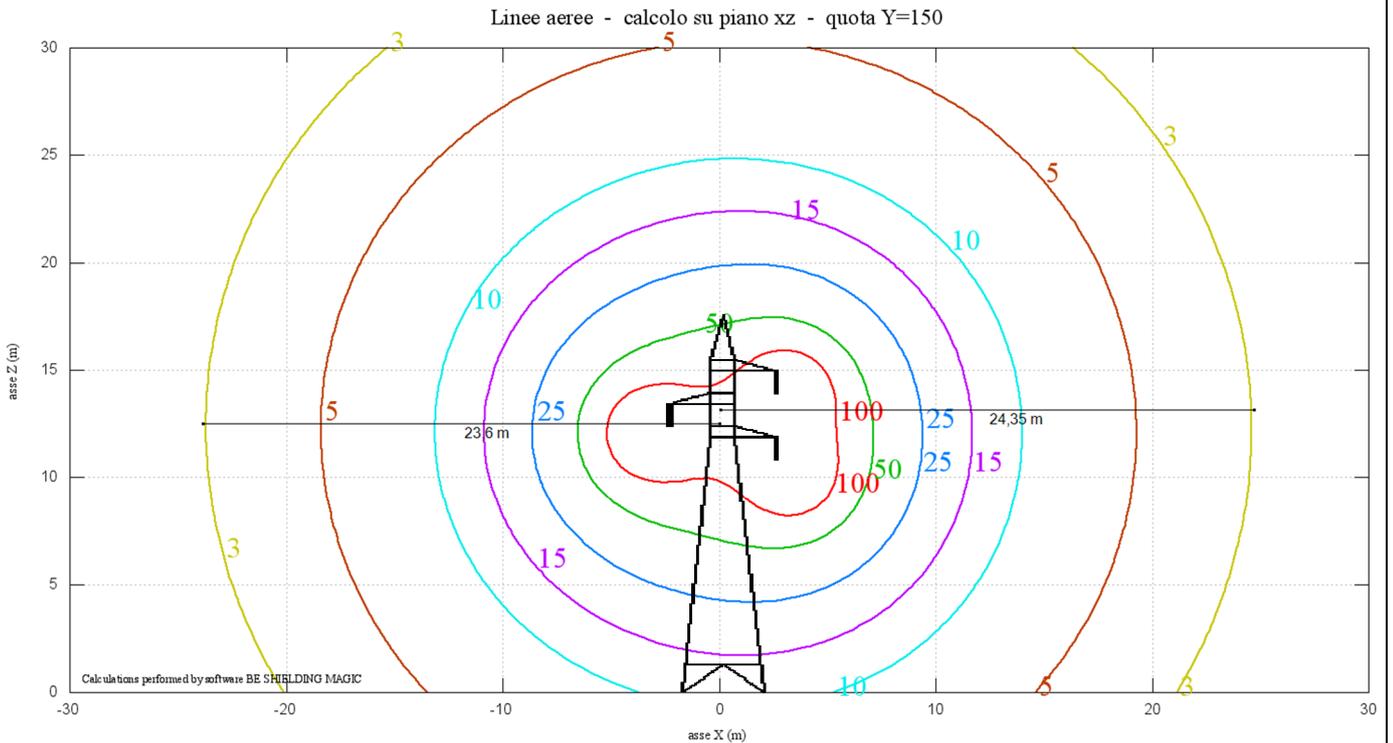


Figura 4 – Livelli di campo magnetico generato dai conduttori del tratto aereo, con disposizione delle fasi a triangolo

### 3.3 Verifica dei valori limite e DPA

Nelle figure 1 e 2 è riportato l'andamento dell'intensità del campo magnetico in prossimità del cavidotto interrato. Nelle figure 3 e 4 è riportato l'andamento delle intensità del campo magnetico considerando un franco minimo dal suolo di 10 metri. Dai grafici si può vedere 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, come previsto dalla norma.

DPA dall'asse della linea			DPA riportate dalle Linee Guida con corrente di calcolo pari a 870A	
Configurazione	lato sx (m)	lato dx (m)	lato sx (m)	lato dx (m)
cavo interrato	3	3	3,1	3,1
palo gatto	21	21	19	19
triangolo	24	25	22	22

Le ultime due colonne a destra della tabella riportano la fascia di rispetto del valore di qualità di 3  $\mu\text{T}$  prevista dalle "Linee Guida per l'applicazione del punto 5.1.3 dell'allegato al DM 29/05/2008" elaborate da Enel per correnti inferiori alla nostra, ad eccezione del cavo interrato dove la corrente è la medesima e le Dpa di Enel sono individuate senza considerare la profondità di interramento dell'elettrodotto.

Nello spirito cautelativo di definizione delle Dpa si ritiene di applicare la fascia di rispetto maggiore, pari a 25 m a tutti i tratti rettilinei di linea coinvolti, dal palo n. 1 al portale di ammarro presente all'interno della CP Sassoferrato ad eccezione delle due tratte dove si verifica un incrocio con altre linee ad alta tensione.

Il DM 29/05/2008 prevede che nel "Nei casi di incrocio tra due linee diventa importante la minima distanza tra le stesse, misurata sulla perpendicolare alla bisettrice dell'angolo di incrocio, in corrispondenza alla quale le singole fasce di ciascuna linea sono da considerarsi come imperturbate dalla presenza dell'altra. Questa distanza è assunta pari a quella di interasse che è suggerita nei casi di parallelismo di cui al paragrafo 5.1.4.1: le motivazioni di tale scelta sono indicate nello stesso paragrafo. Le distanze indicate nelle tabelle seguenti per ogni coppia di linee rappresentano la lunghezza del segmento (di cui alle figure successive) che serve per individuare e delimitare l'area di prima approssimazione per gli incroci tra due linee..."

L'elettrodotto aereo interseca 2 elettrodotti aerei ad alta tensione:

- in prossimità della campata tra i pali P3 e P4 l'elettrodotto in progetto passa al di sotto dell'elettrodotto 132 kV "Fabriano – Whirlpool UT"
- in prossimità della campata P7 e P8 la linea passa al di sopra dell'elettrodotto 132 kV "Fossato di Vico RT – Genga".

In prossimità di teli intersezioni è stato effettuato il calcolo tridimensionale dei campi magnetici, utilizzando per gli elettrodotti da intersecare le misure effettuate in sito e le sezioni dei conduttori ricavati dall'atlante di rete di Terna. In particolare l'elettrodotto "Fabriano – Whirlpool UT" risulta armato con conduttori di sezione pari a 308 mm<sup>2</sup>, mentre l'elettrodotto "Fossato di Vico RT – Genga" è armato con cavi di alluminio acciaio di sezione pari a 222 mm<sup>2</sup>.

Riportiamo nel seguito i risultati delle simulazioni per il primo attraversamento: la quota del terreno nell'area è molto variabile, lo zero è stato fissato a 300 mslm, pari alla quota del sostegno P3. Riportiamo prima le sezioni effettuate in prossimità dell'incrocio delle linee e poi la planimetria in pianta delle stesse a diverse altezze.

Linee aeree - calcolo su piano xz - quota Y=156

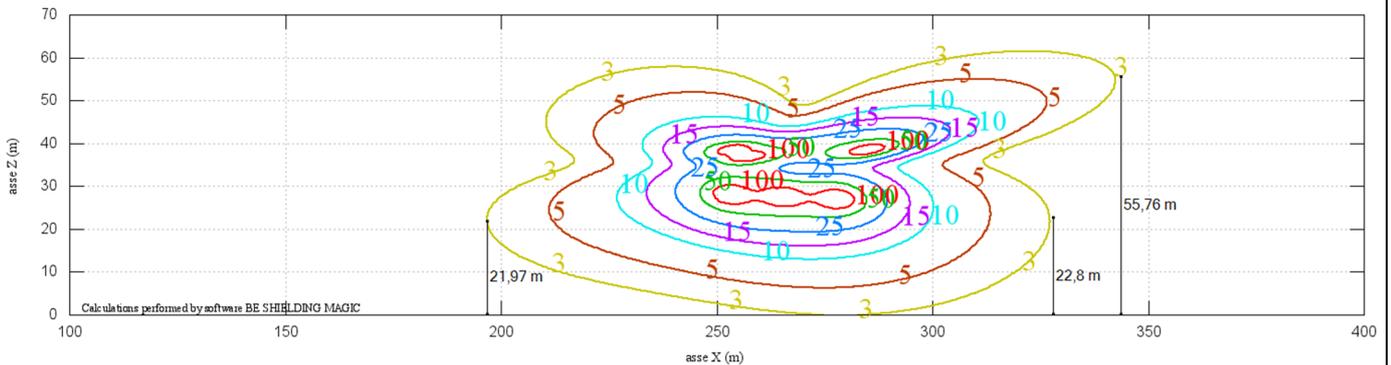


Figura 5 – Livelli di campo magnetico generato nel punto di intersezione dei due elettrodotti - piano XZ

Linee aeree - calcolo su piano yz - quota X=265,5

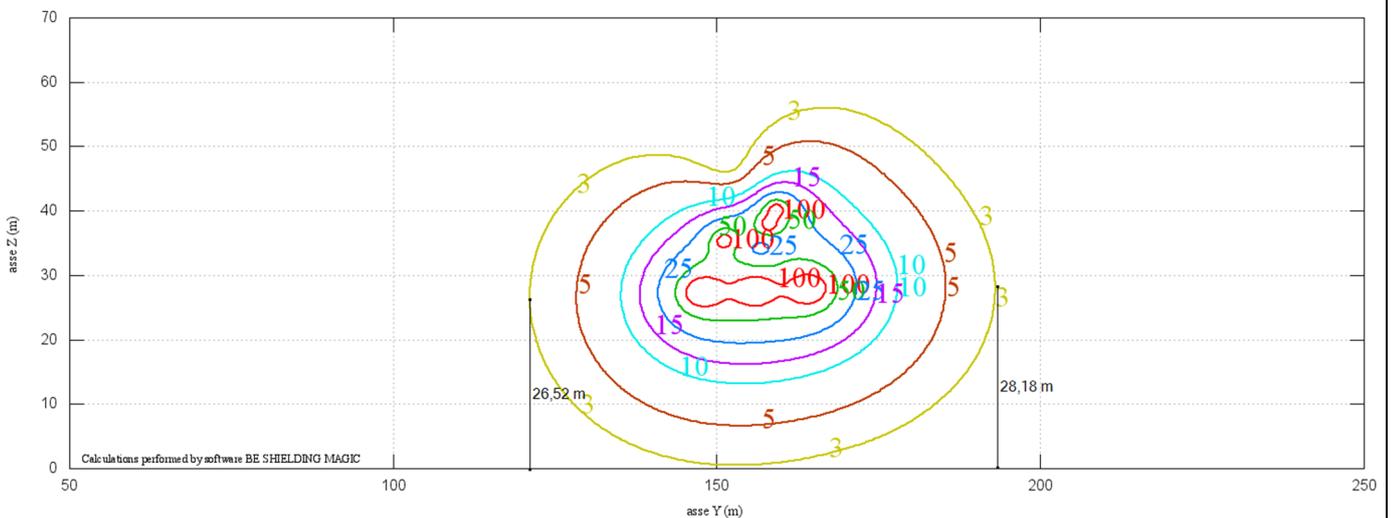


Figura 6 –Livelli di campo magnetico generato nel punto di intersezione dei due elettrodotti - piano YZ

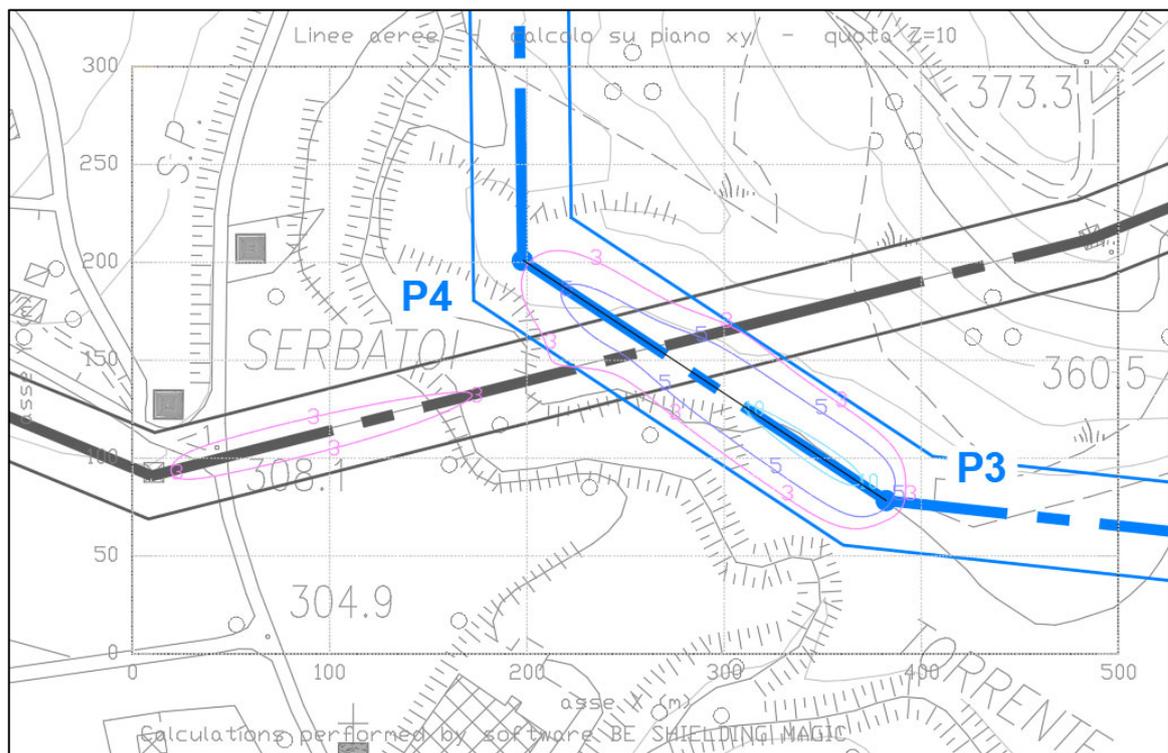


Figura 7 - Livello di campo magnetico generato nella tratta P3 – P4 a 310 mslm (+10)

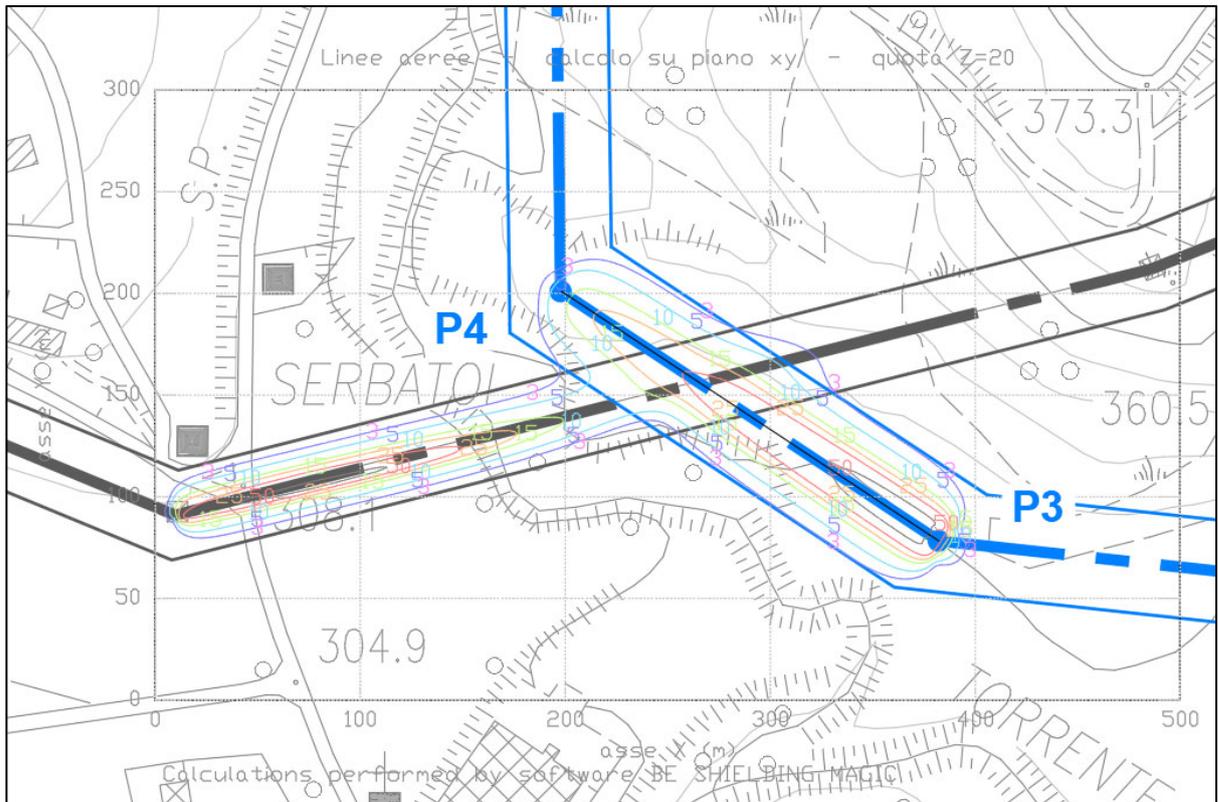


Figura 8 - Livello di campo magnetico generato nella tratta P3 – P4 a 320 mslm (+20)

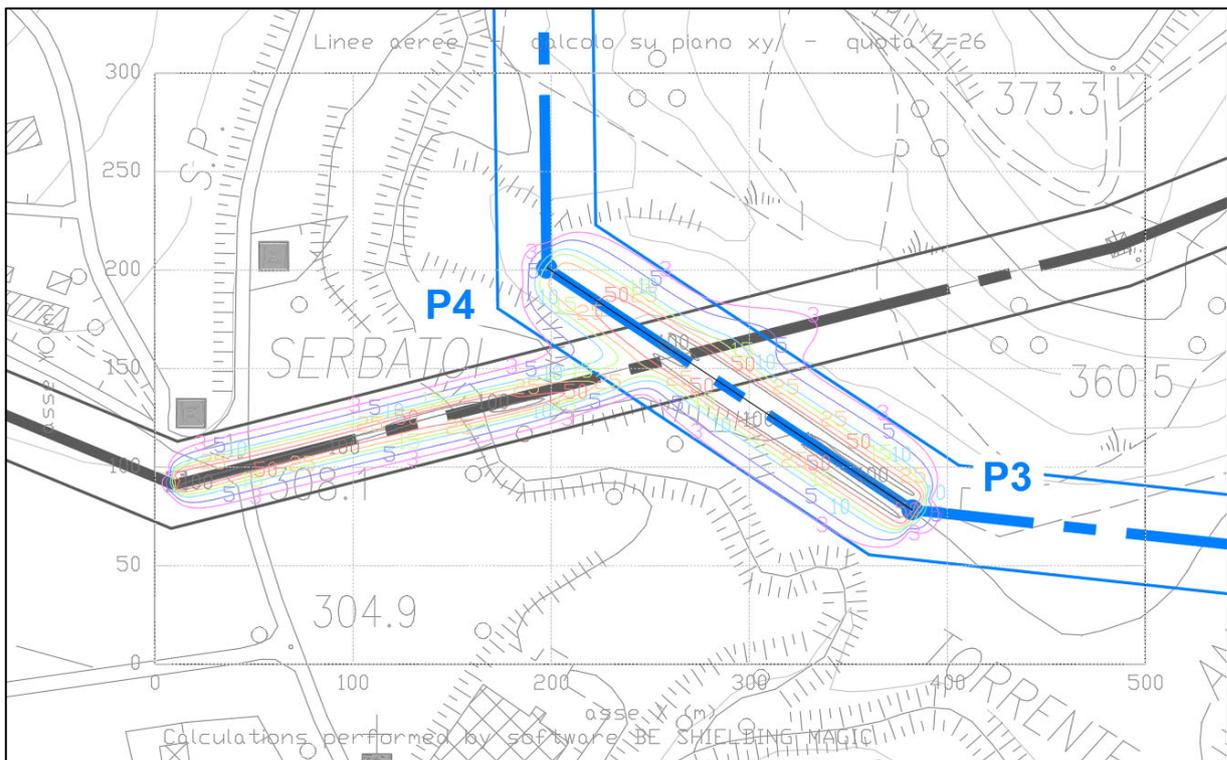


Figura 9 - Livello di campo magnetico generato nella tratta P3 – P4 a 326 mslm (+26)

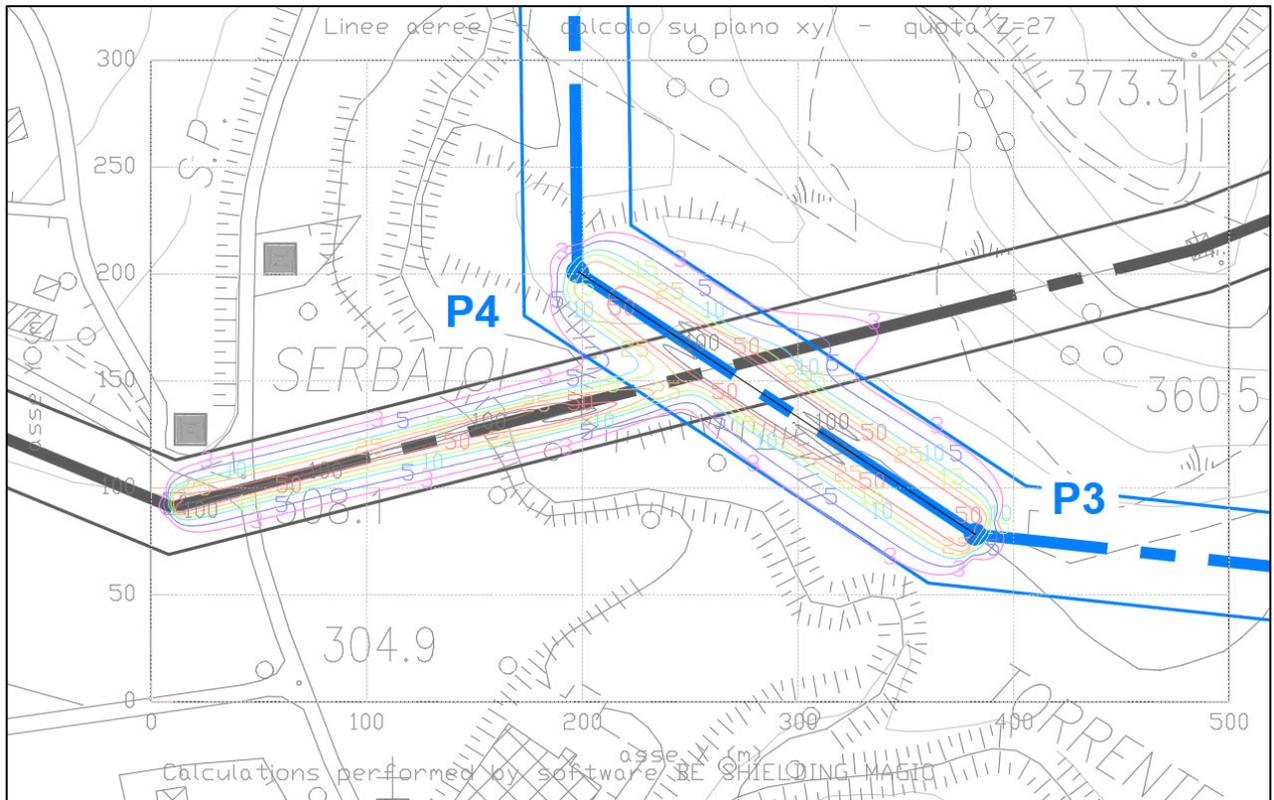


Figura 10 - Livello di campo magnetico generato nella tratta P3 - P4 a 327 mslm (+27)

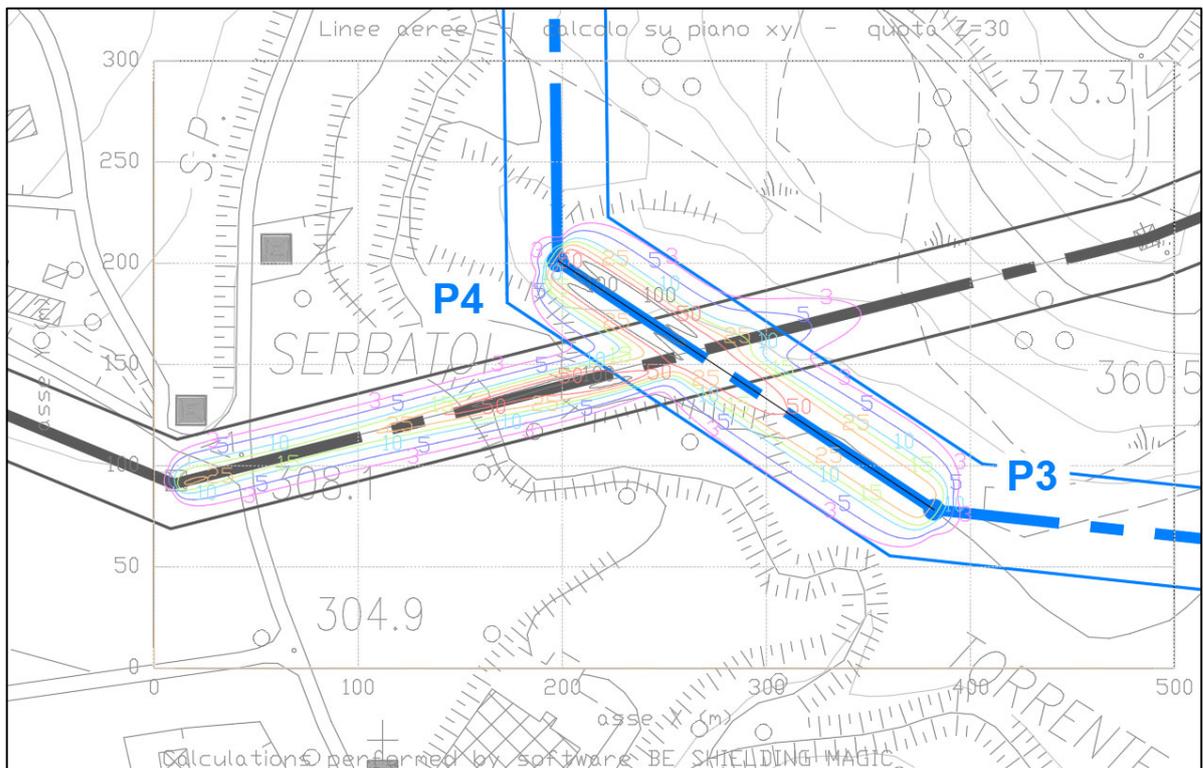


Figura 11 - Livello di campo magnetico generato nella tratta P3 - P4 a 330 mslm (+30)

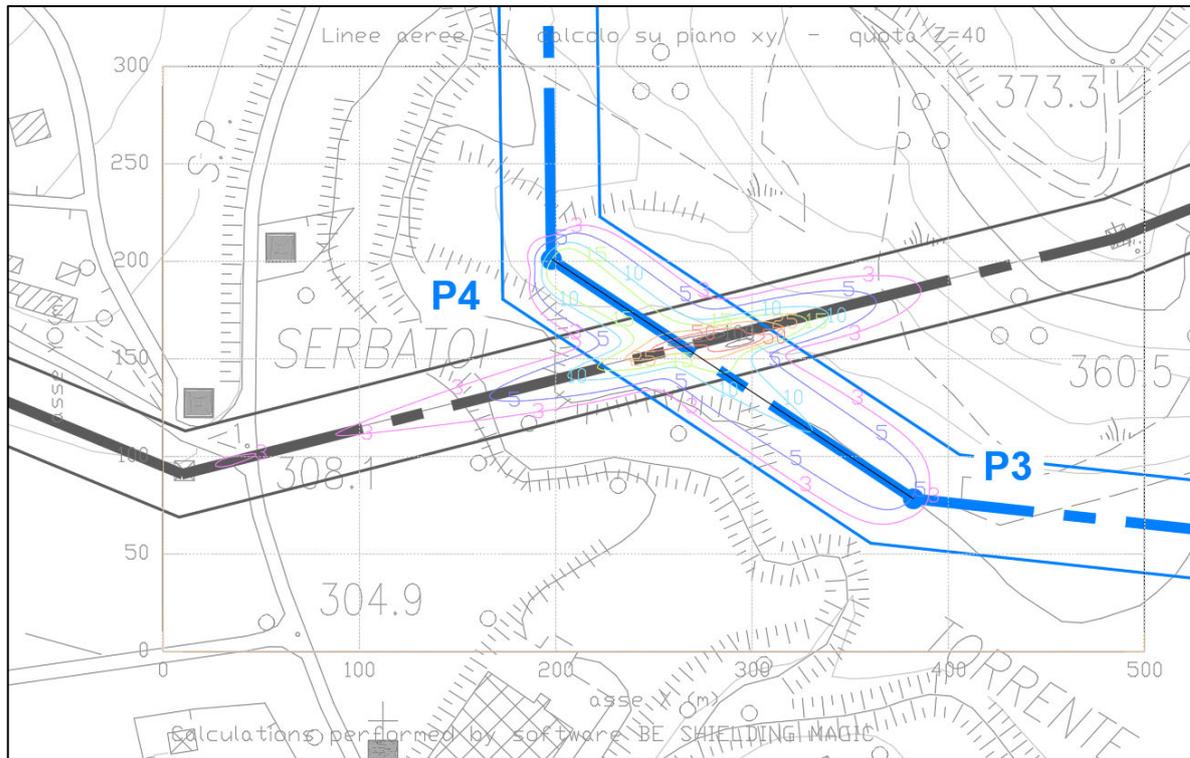


Figura 12 - Livello di campo magnetico generato nella tratta P3 – P4 a 340 mslm (+40)

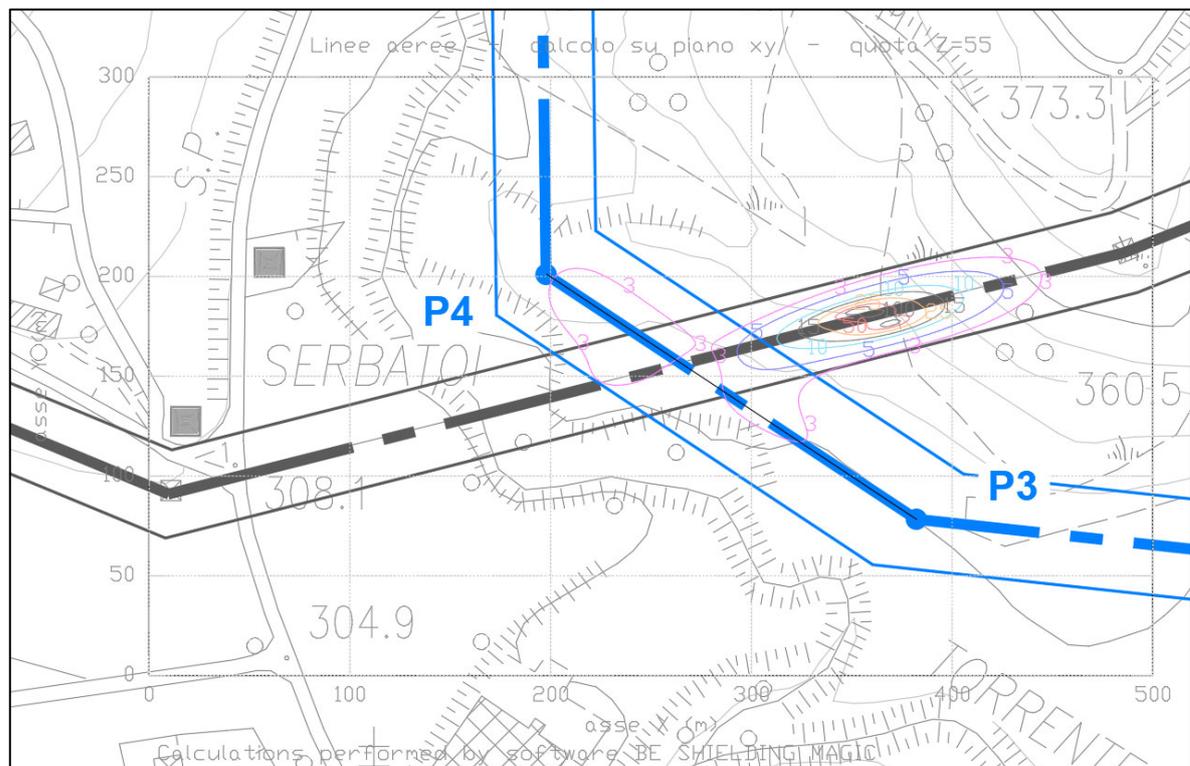


Figura 13 - Livello di campo magnetico generato nella tratta P3 – P4 a 355 mslm (+55)

Dalle figure precedenti si osserva che occorre ampliare la fascia di rispetto nel tratto interessato a 31 metri per garantire il rispetto del valore di qualità di  $3 \mu\text{T}$ .

Riportiamo nel seguito i risultati delle simulazioni per il secondo attraversamento: lo zero è stato fissato a 361 mslm, pari alla quota del sostegno P8. Riportiamo prima le sezioni effettuate in prossimità dell'intersezione delle linee e poi le planimetrie in pianta delle stesse.

Linee aeree - calcolo su piano xz - quota Y=124,5

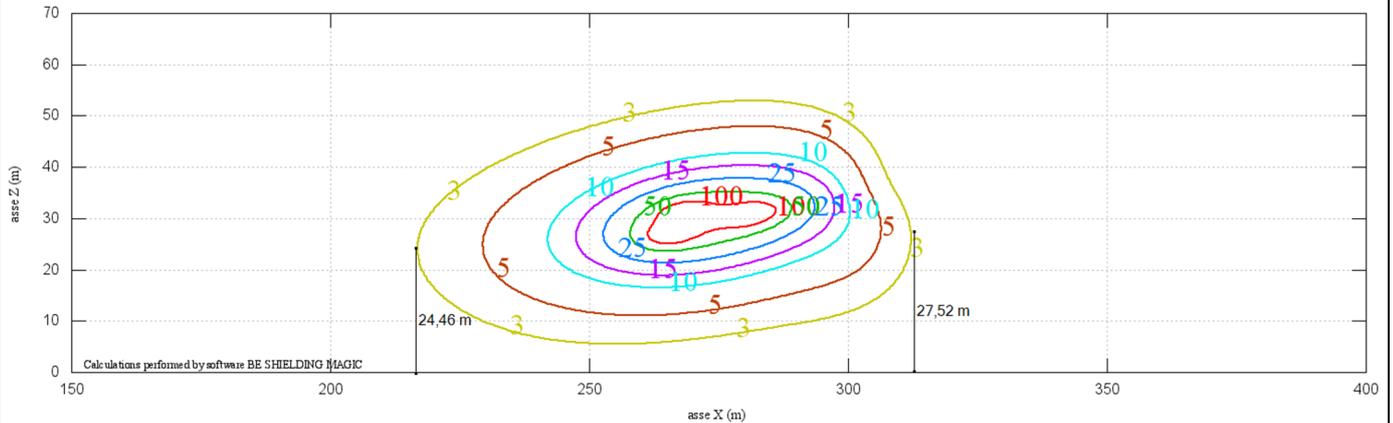


Figura 14 -Livelli di campo magnetico generato nel punto di intersezione dei due elettrodotti - piano XZ

Linee aeree - calcolo su piano yz - quota X=275

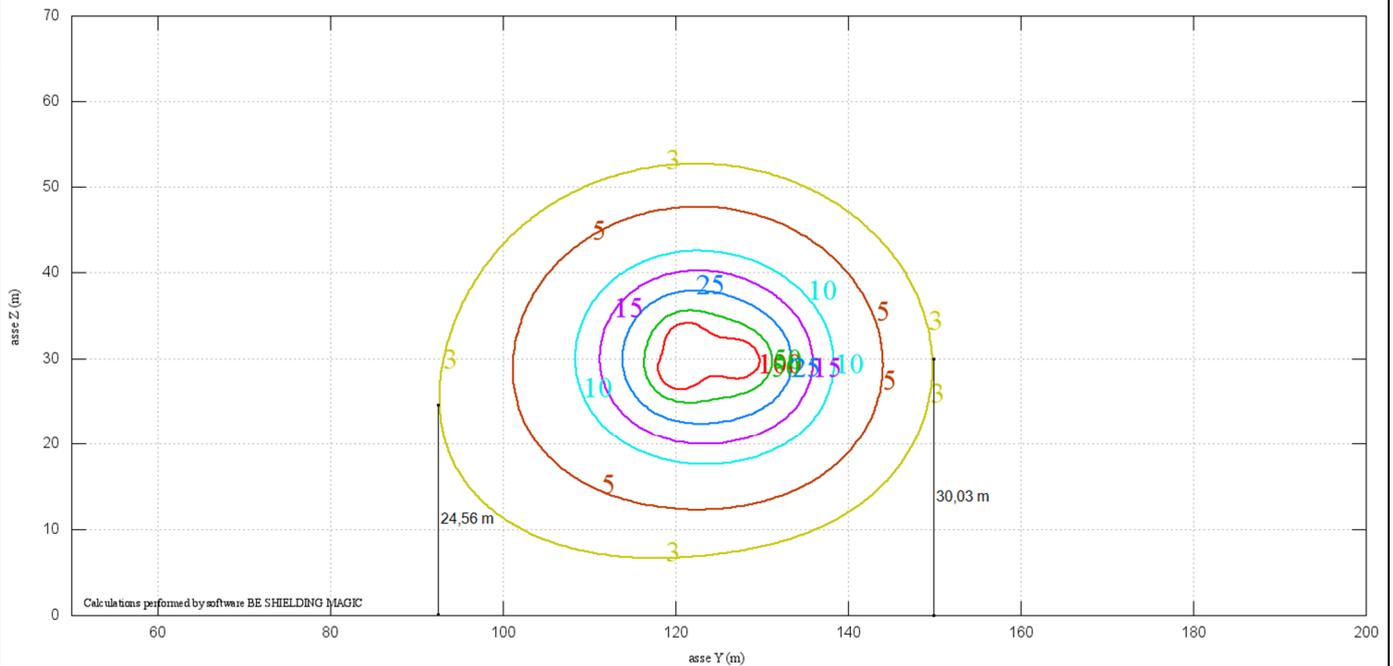


Figura 15 -Livelli di campo magnetico generato nel punto di intersezione dei due elettrodotti - piano YZ

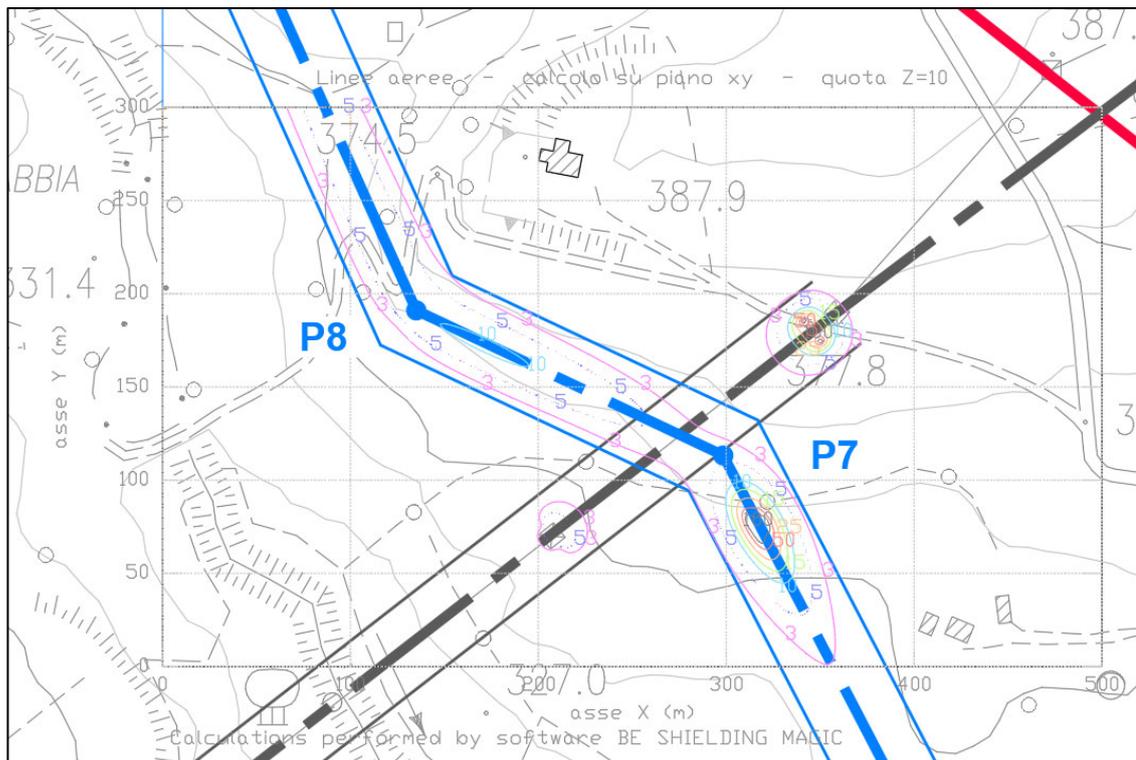


Figura 16 - Livello di campo magnetico generato nella tratta P7 - P8 a 371 slm (+10)

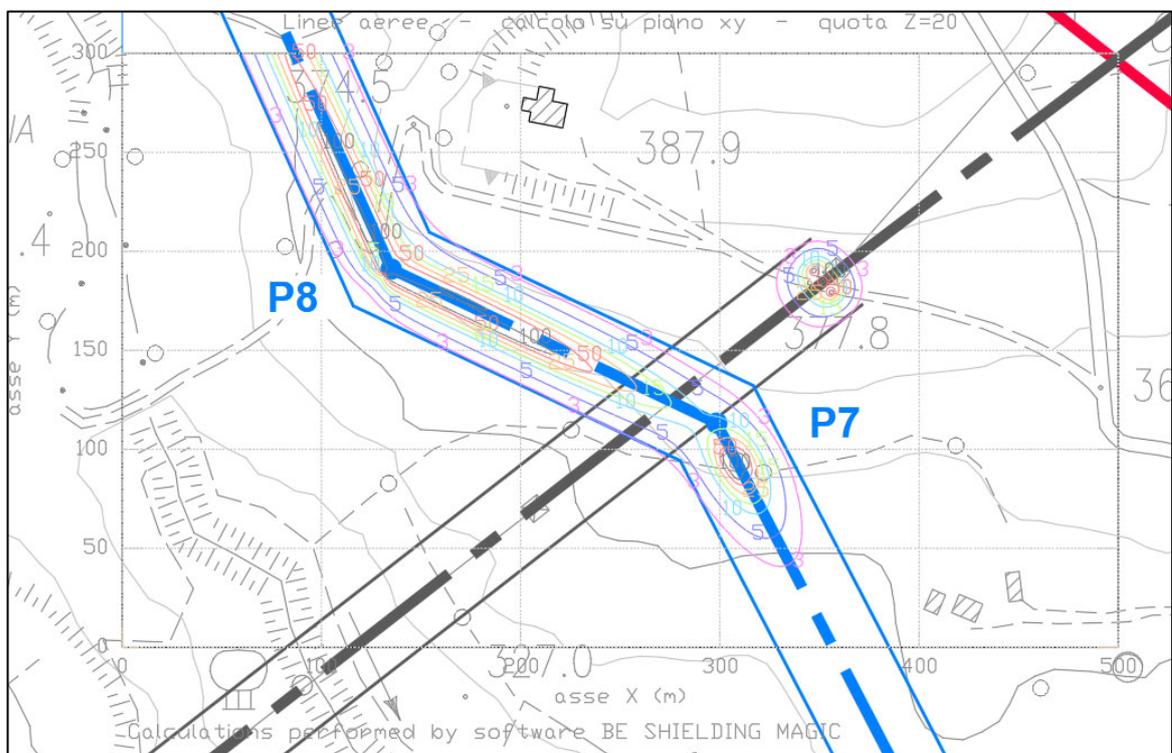


Figura 17 - Livello di campo magnetico generato nella tratta P7- P8 a 381 slm (+20)

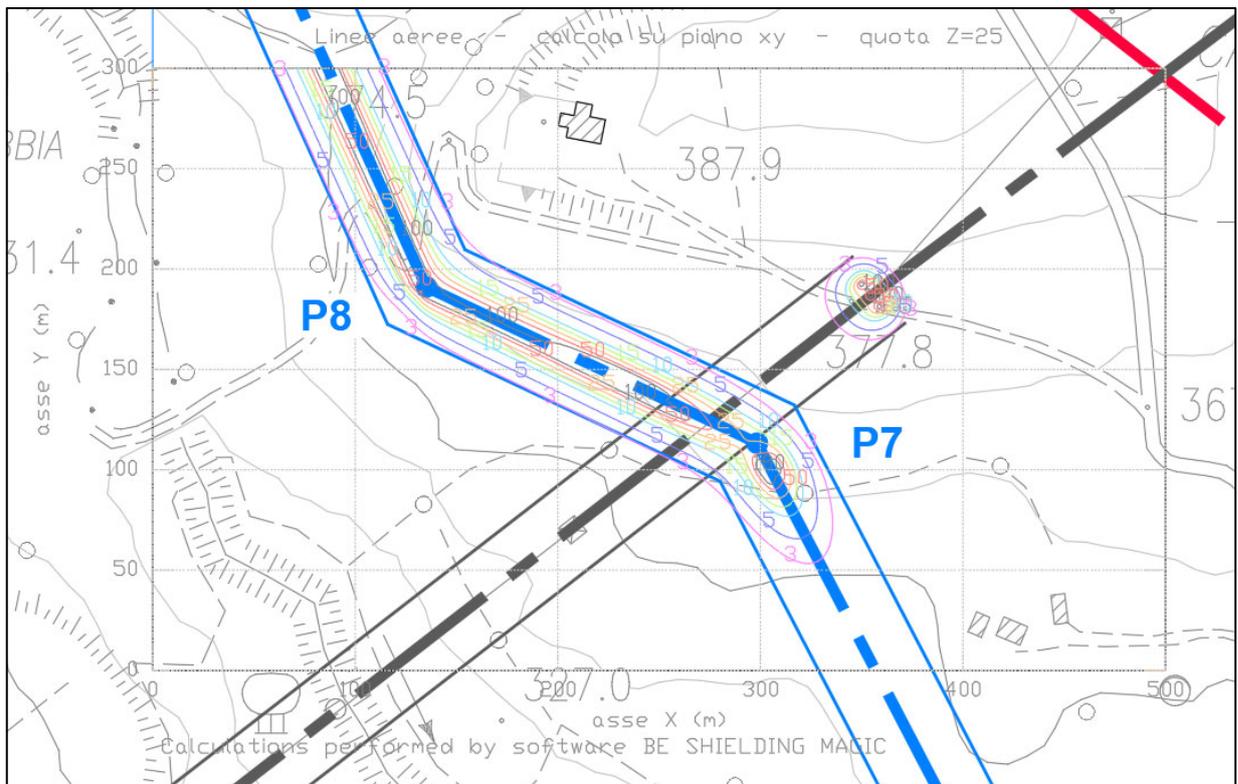


Figura 18 - Livello di campo magnetico generato nella tratta P7- P8 a 385 slm (+25)

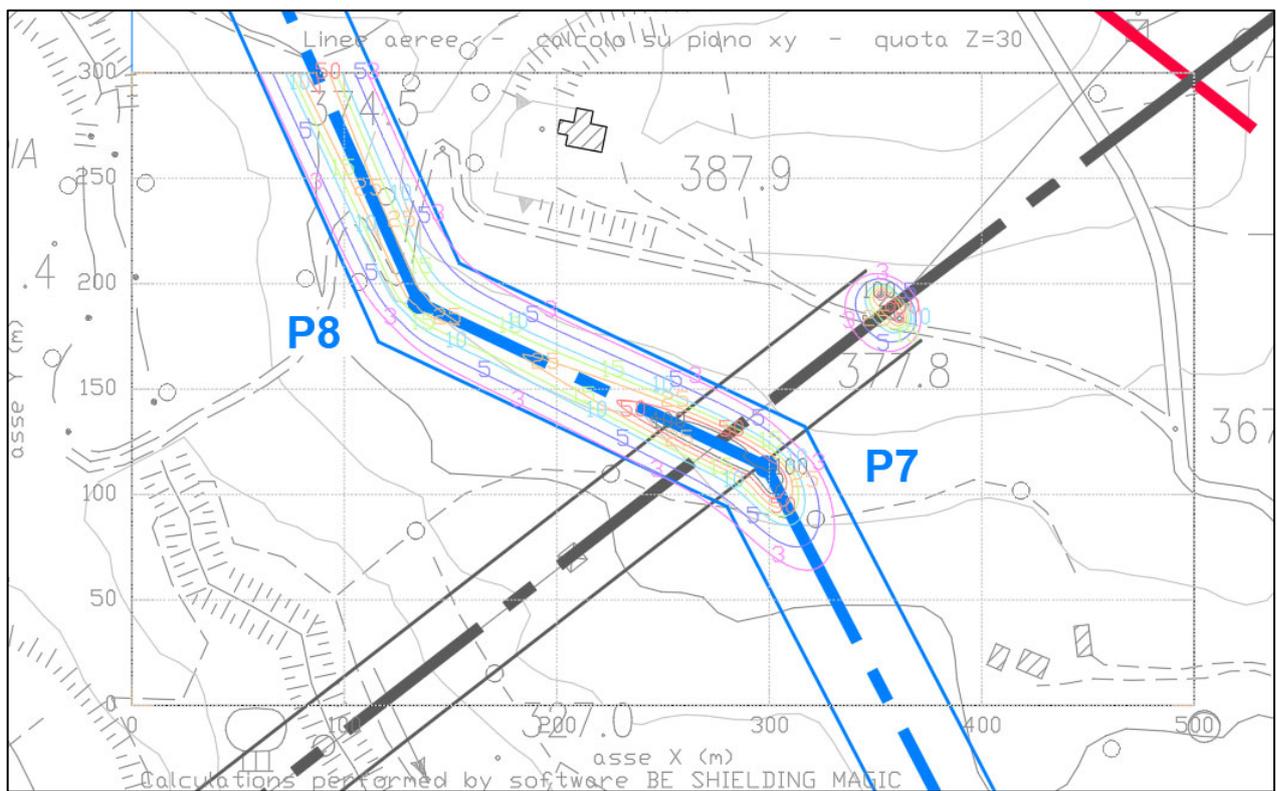


Figura 19 - Livello di campo magnetico generato nella tratta P7- P8 a 390 slm (+30)



#### 4 ANALISI DEI RICETTORI

L'area dove è insediato attualmente l'elettrodotto, come visibile dalla foto aerea sottostante (in giallo), è prevalentemente di campagna ma il tracciato attraversa 3 aree industriali la prima delle quali all'interno del centro abitato di Fabriano dove sono presenti anche abitazioni private.

Il tracciato del nuovo elettrodotto, per evitare queste aree densamente urbanizzate, prevede il primo tratto in cavo interrato e superato l'abitato di Fabriano si sviluppa su un percorso differente in aereo su terreni di campagna evitando le aree industriali. Nella progettazione del potenziamento dell'elettrodotto in oggetto sono stati presi in considerazione sin dall'inizio i ricettori sensibili esistenti.

Nelle immagini successive riportiamo una foto aerea dell'area interessata dal potenziamento dell'elettrodotto, dove si osserva la natura dell'uso del suolo della zona e il tracciato dell'elettrodotto esistente e del potenziamento in progetto.



Figura 21 - Foto aerea con indicazione dell'elettrodotto esistente ( in giallo ) e del ripotenziamento in progetto ( in rosso )

Durante il sopralluogo sono stati individuati diversi ricettori sensibili posti a meno di 60 metri dall'asse dell'elettrodotto in progetto riportati nelle immagini seguenti. Dall'indagine sono stati esclusi quei piccoli edifici utilizzati come riparo per gli attrezzi e gli edifici visibilmente diroccati.

Si sottolinea che tutti questi edifici ricadono ampiamente al di fuori delle Distanze di Prima Approssimazione come cautelativamente calcolate.



Figura 22 - Distanza dei 2 ricettori in prossimità del ponte su torrente Giano lungo il percorso del cavo interrato

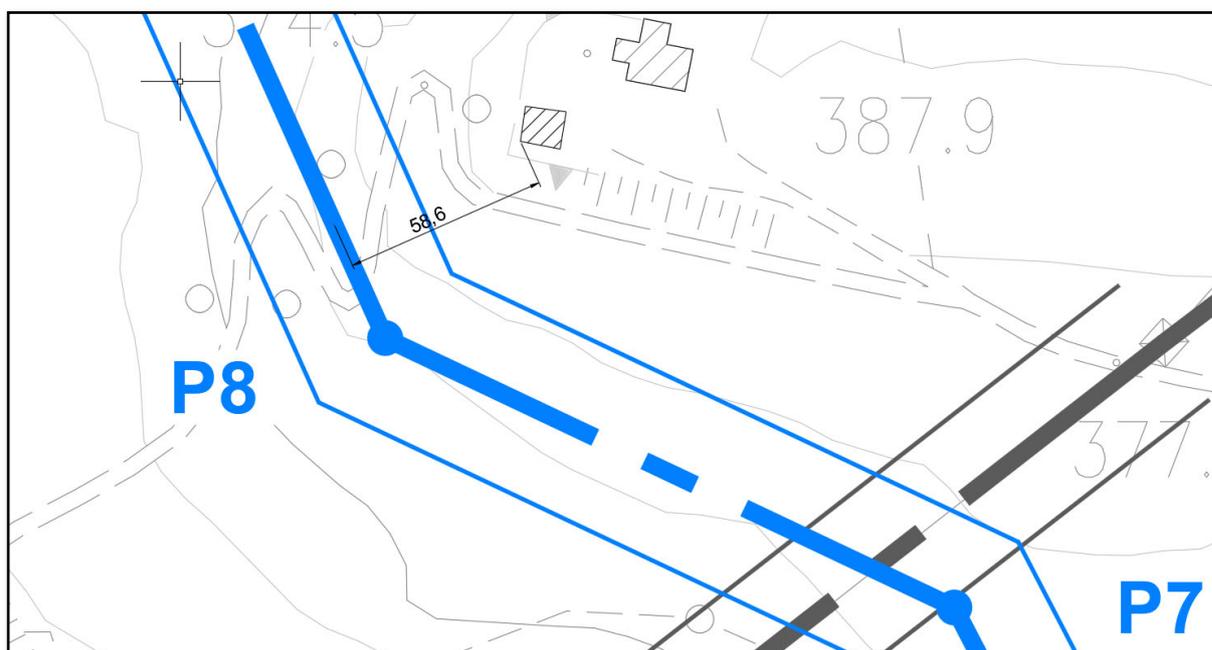


Figura 23 - Distanza del ricettore sensibili dalla tratta P8 - P9 in prossimità dell'incrocio analizzato P7 - P8

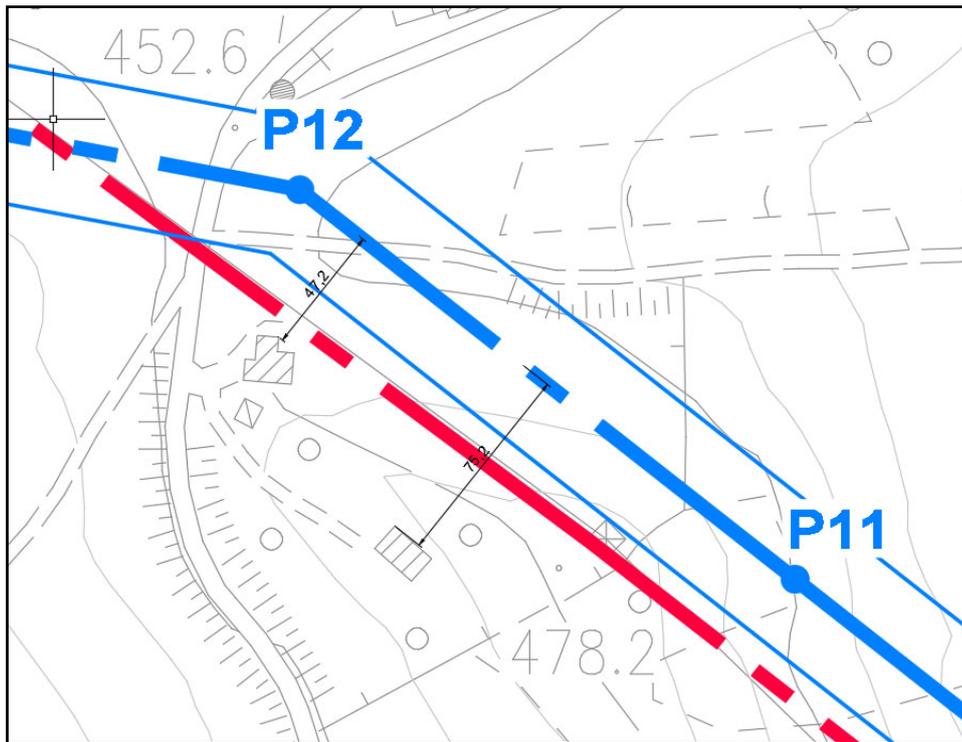


Figura 24 - Distanza dei ricettori sensibili dalla tratta P11 - P12

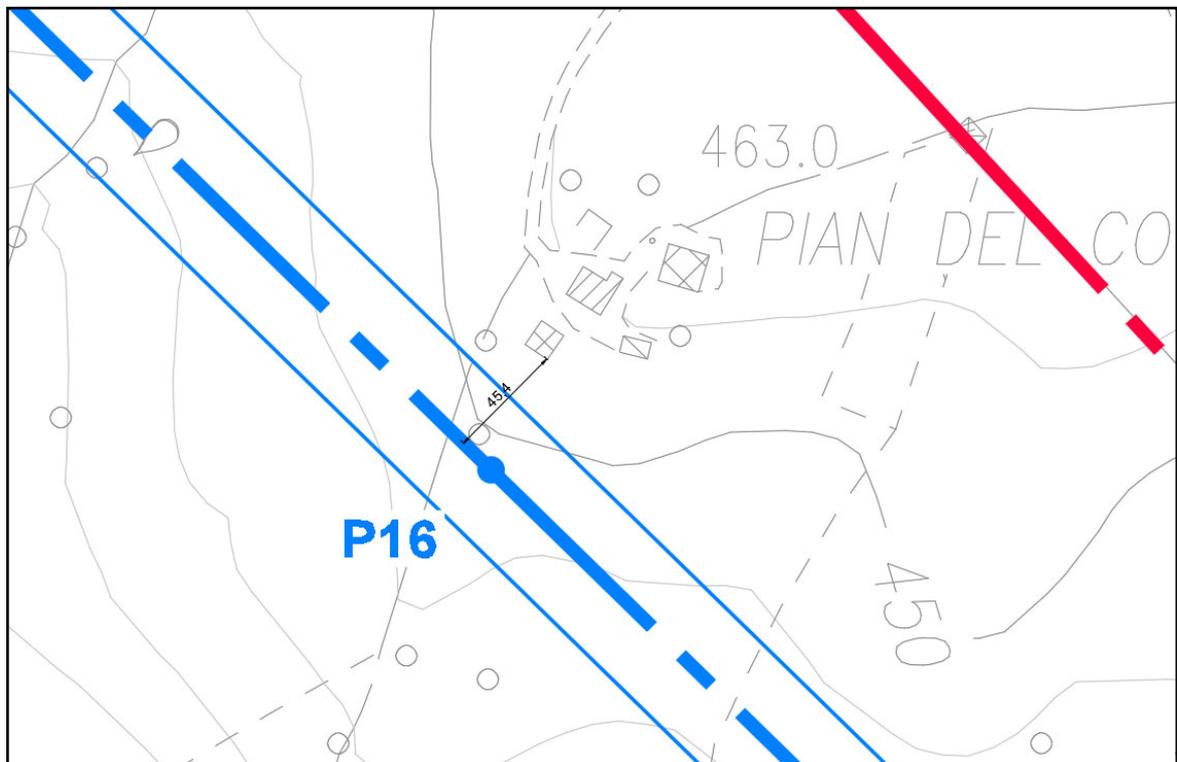


Figura 25 - Distanza dei ricettori sensibili dalla tratta P16 - P17

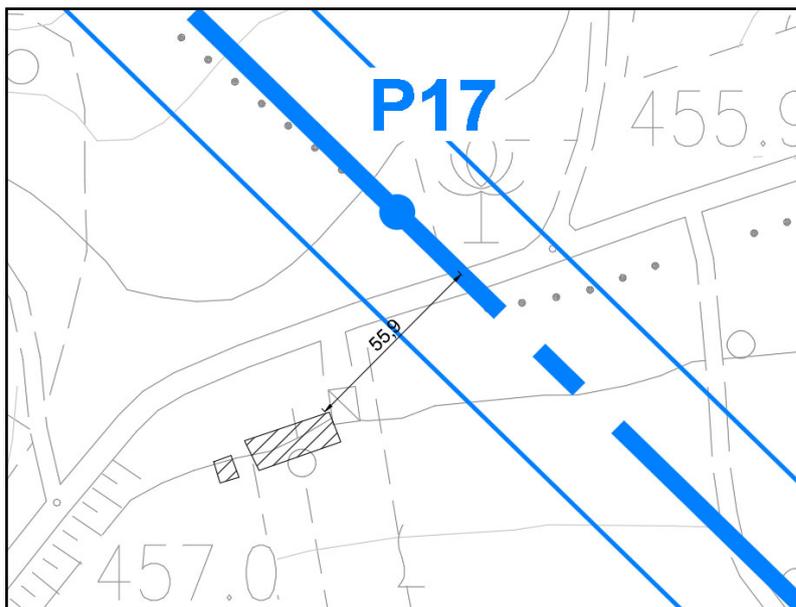


Figura 26 - Distanza dei ricettori sensibili dalla tratta P16 – P17

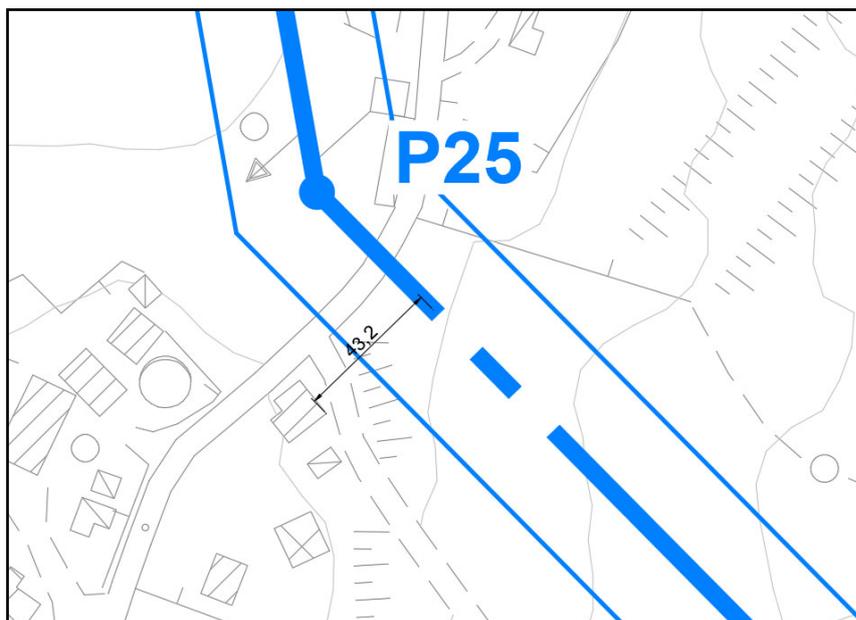


Figura 27 - Distanza dei ricettori sensibili dalla tratta P24 – P25

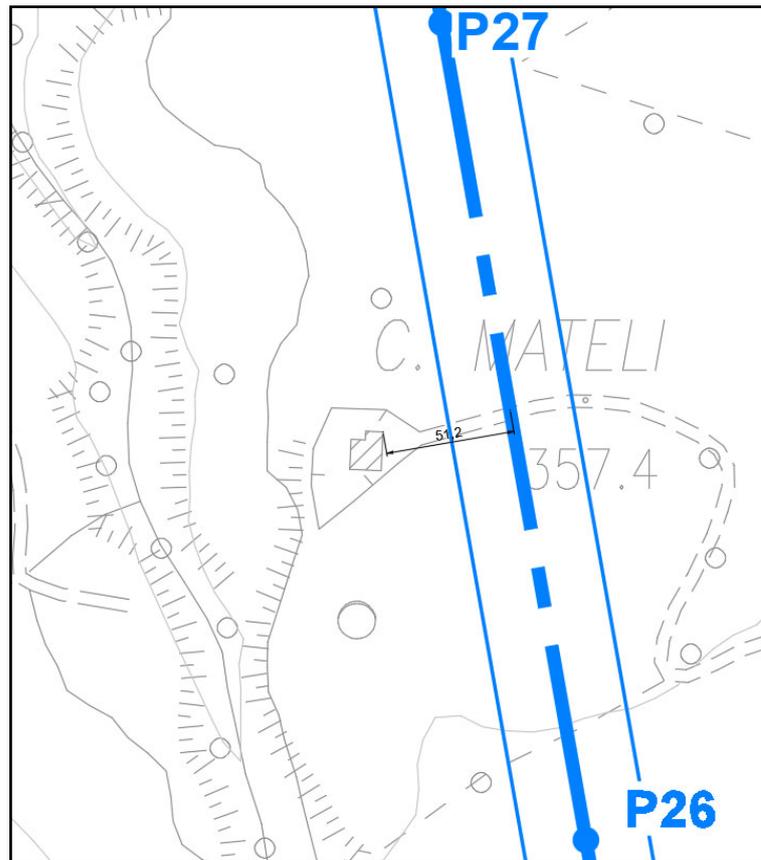


Figura 28 - Distanza dei ricettori sensibili dalla tratta P26 - P27

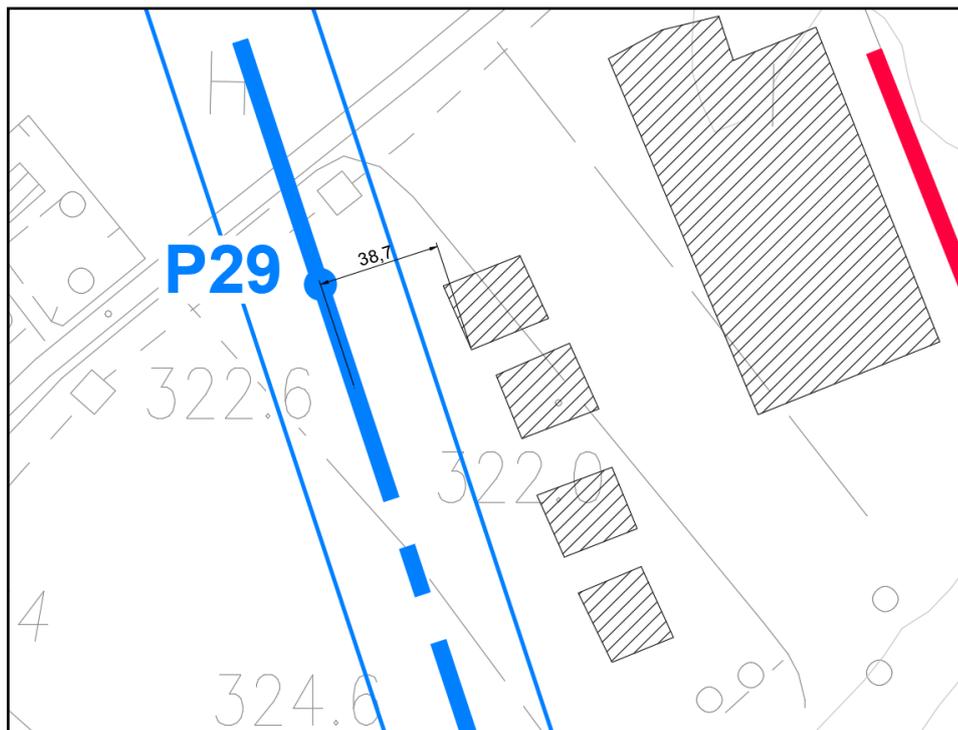


Figura 29 - Distanza dei ricettori sensibili dal sostegno P29

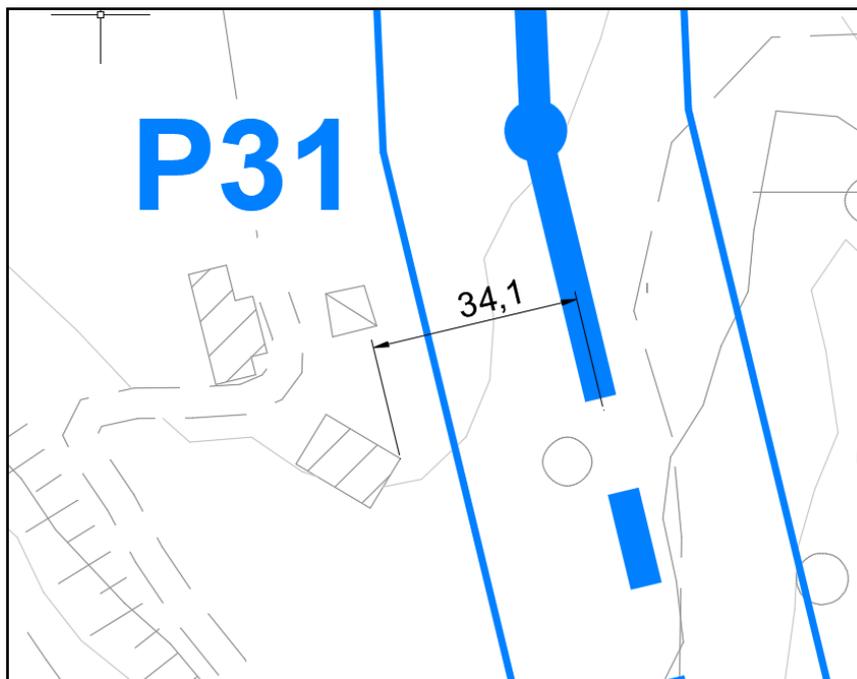


Figura 30 - Distanza dei ricettori sensibili dalla tratta P30 – P31

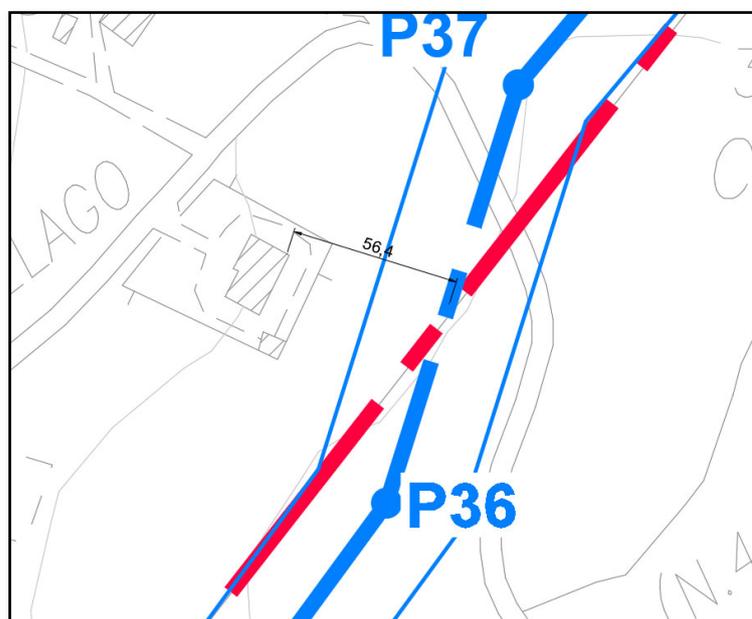


Figura 31 - Distanza dei ricettori sensibili dalla tratta P36 – P37

Come si osserva tutti i ricettori sensibili sono posta ad almeno 40 metri dall'asse dell'elettrodotto aereo e in molti casi il nuovo elettrodotto è progettato a una distanza maggiore dell'esistente.

L'unico punto di criticità in cui occorrerà fare particolare attenzione alla posa del cavo è il punto in prossimità della strettoia di Via di Vittorio in prossimità dell'incrocio con via Grandi, prima del ponte.

## 5 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 100  $\mu$ T, 10  $\mu$ T e 3  $\mu$ T 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 la Dpa alle stazioni elettriche, alle cabine primarie e secondarie e agli elettrodotti ad esse collegati.

Il potenziamento dell'elettrodotto 132 kV denominato "**Fabriano - Sassoferrato**" facente parte della rete di trasmissione nazionale (RTN), è richiesto al fine di aumentare la corrente che può transitare sull'elettrodotto stesso in modo da superare le criticità attuali, aumentando i margini di continuità del servizio di trasmissione nell'area dell'elettrodotto, anche a seguito della connessione di un impianto fotovoltaico ubicato nel comune di Fano (provincia di Pesaro e Urbino). Il potenziamento della linea comporta il contestuale rifacimento del percorso e dei sostegni della stessa. Infatti il tracciato dell'elettrodotto esistente attraversa diverse aree edificate: il potenziamento della linea con il conseguente aumento di corrente non avrebbe consentito il rispetto del valore di qualità per i campi magnetici in molti edifici esistenti, pertanto tenuto conto dei vincoli urbanistici, archeologici e idrogeologici presenti, il tracciato del nuovo elettrodotto è stato elaborato su un percorso differente, parallelo al precedente, misto aereo-cavo.

Il nuovo elettrodotto sarà realizzato con conduttori di sezione maggiore, tenendo conto di franchi maggiorati verificati ad una temperatura di 75 °C che permettono un aumento della portata in servizio normale, nel periodo invernale, dagli attuali 576 A a 1.110 A.

I calcoli effettuati in base a quanto stabilito dal DM 29/05/2008 hanno permesso di determinare le "Distanze di Prima approssimazione" pari a **3 metri** e a **25 metri** da applicarsi rispettivamente alla tratta interrata e aerea del nuovo tracciato dell'elettrodotto. Tali fasce risultano sufficienti anche per la campata tra il palo P7 e P8, in corrispondenza con l'attraversamento dell'elettrodotto 132 kV "Fossato di Vico RT – Genga".

Nella campata tra i pali P3 e P4, in cui l'elettrodotto incrocia la linea 132 kV "Fabriano – Whirlpool UT" le DPA devono essere aumentate a **31 metri** per lato dall'asse dello stesso.

Come si evince dall'analisi dei ricettori precedentemente riportata e dal documento 02421 - Piano particellare, in cui sono riportate le Dpa non sono presenti ricettori sensibili al loro interno. L'unico punto di criticità in cui occorrerà fare particolare attenzione alla posa del cavo è il punto in prossimità della strettoia di Via di Vittorio in prossimità dell'incrocio con via Grandi, prima del ponte su torrente Giano.

**Allegato 1: Documento di Validazione**



## Documento di Validazione

# Algoritmi di calcolo del software MAGIC<sup>®</sup> (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<sup>®</sup> 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<sup>®</sup> 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.

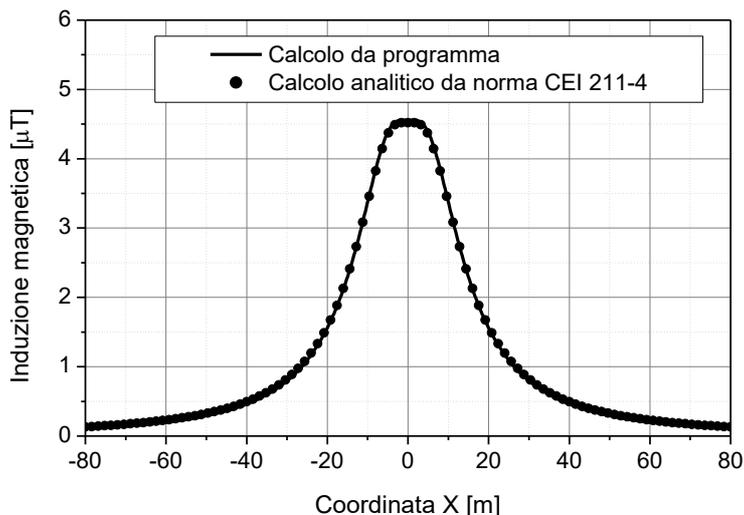


Figura 1: Induzione magnetica al suolo in prossimità di una linea aerea a doppia terna su semplice palificazione con corrente di 310: confronto tra MAGIC® e formula analitica CEI 211-4

**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

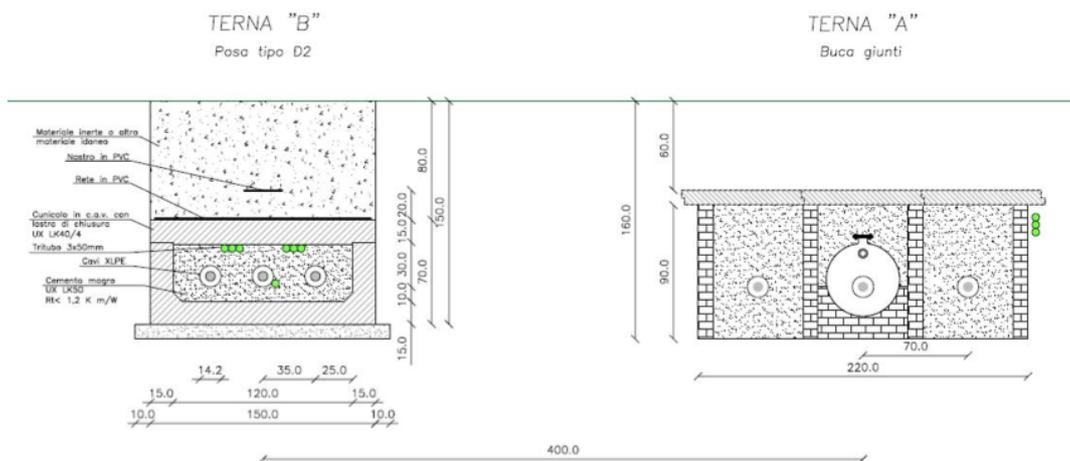


Figura 2: Affiancamento tra due linee interrate AT

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.

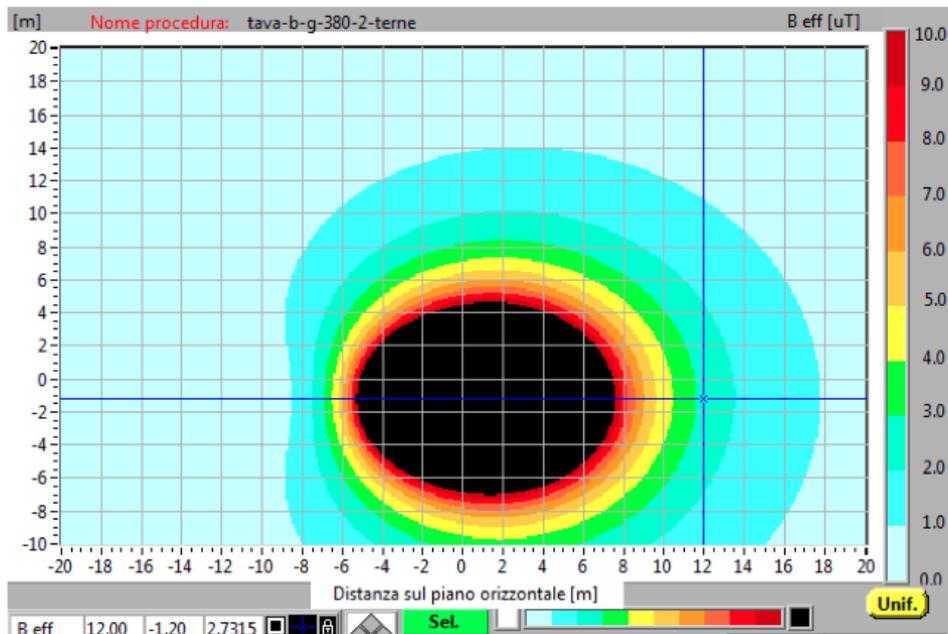
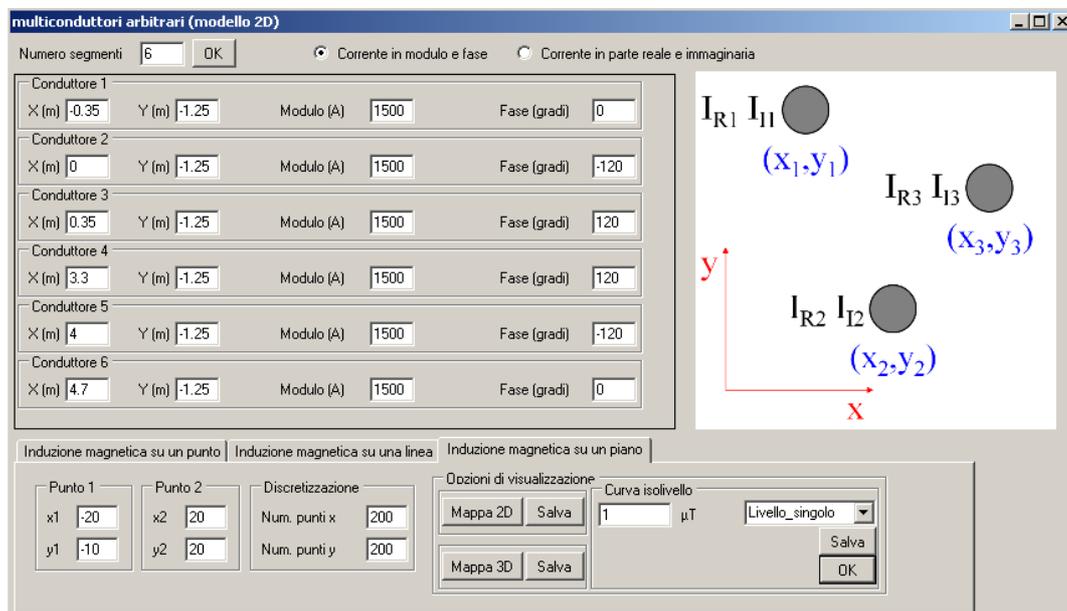


Figura 3: Mappa cromatica delle induzioni magnetiche calcolata mediante software CESI

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

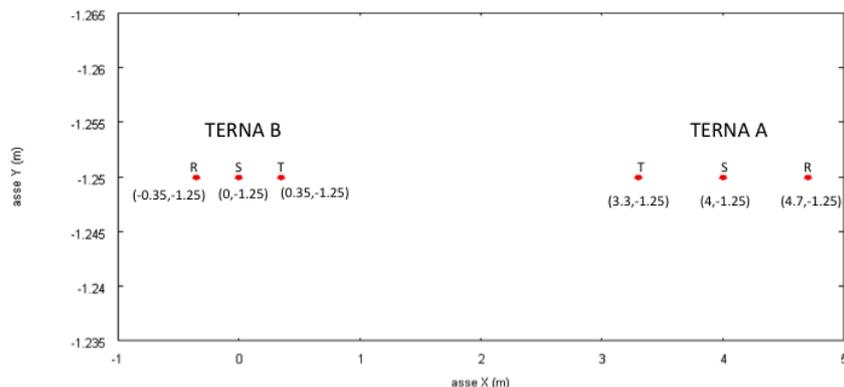
- Terne parallele
- Multiconduttori 2D

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.



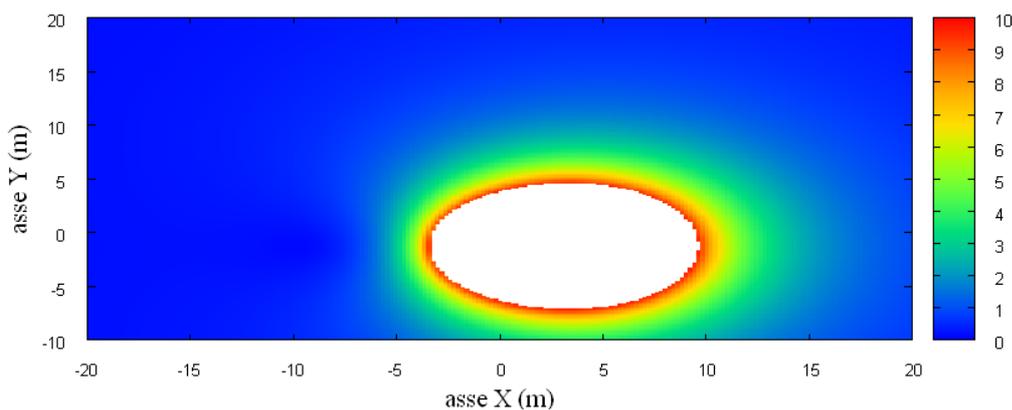
**Figura 4:**Schermata di ingresso modulo “multiconduttori arbitrari (modello 2D)””: dati definizione geometria e sorgenti

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



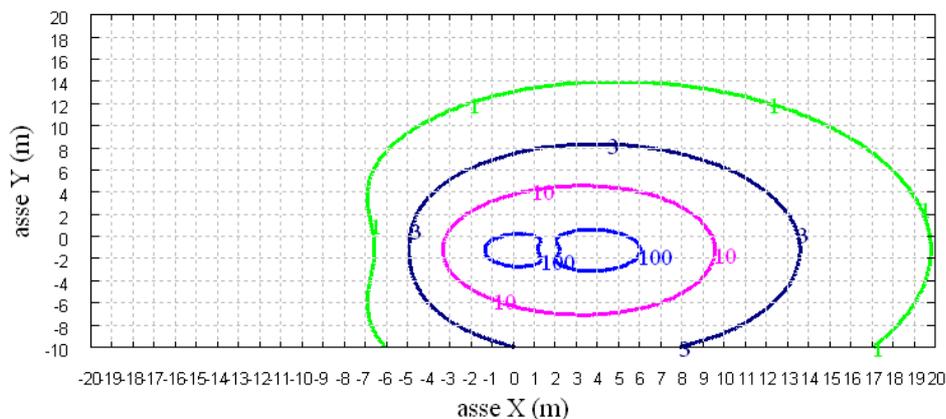
**Figura 5:** Geometria sorgenti

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®.

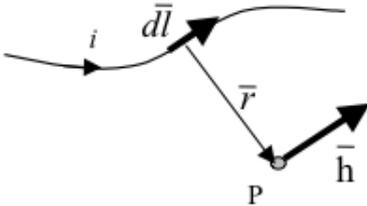


**Fig. 7** Linee isolivello dell’induzione magnetica (1, 3, 10, 100 microT) da software MAGIC®.

**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:

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

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.

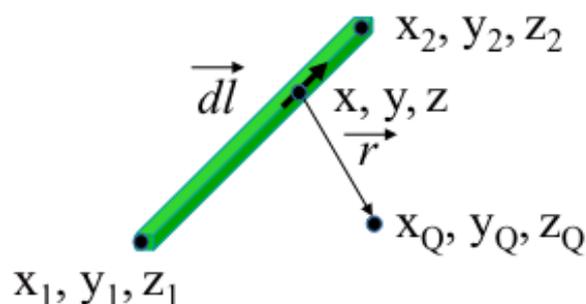


Fig. 8: Modello del segmento.

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

$$\begin{cases} x = x_1 + (x_2 - x_1)t \\ y = y_1 + (y_2 - y_1)t \\ z = z_1 + (z_2 - z_1)t \end{cases}$$

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.

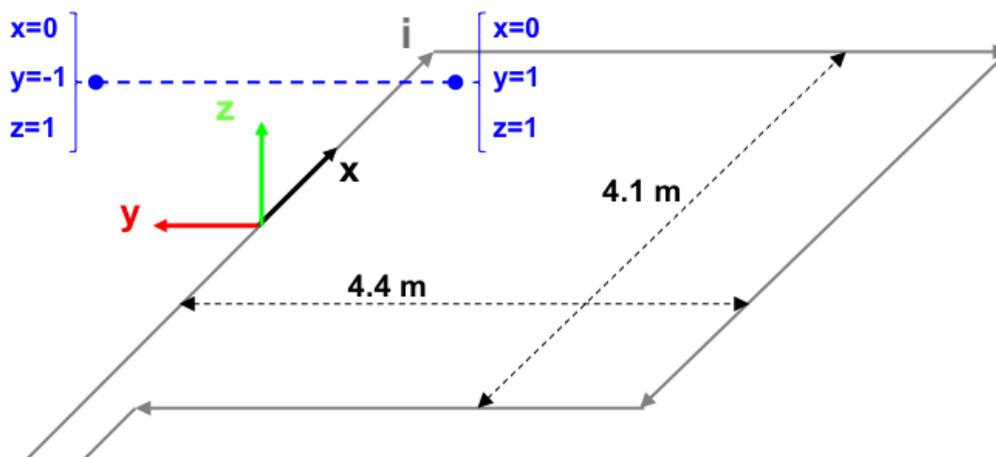


Fig. 9: Schema di spira quadrata.

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 estende 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<sup>®</sup>. I risultati di confronto sono riassunti nella seguente figura.

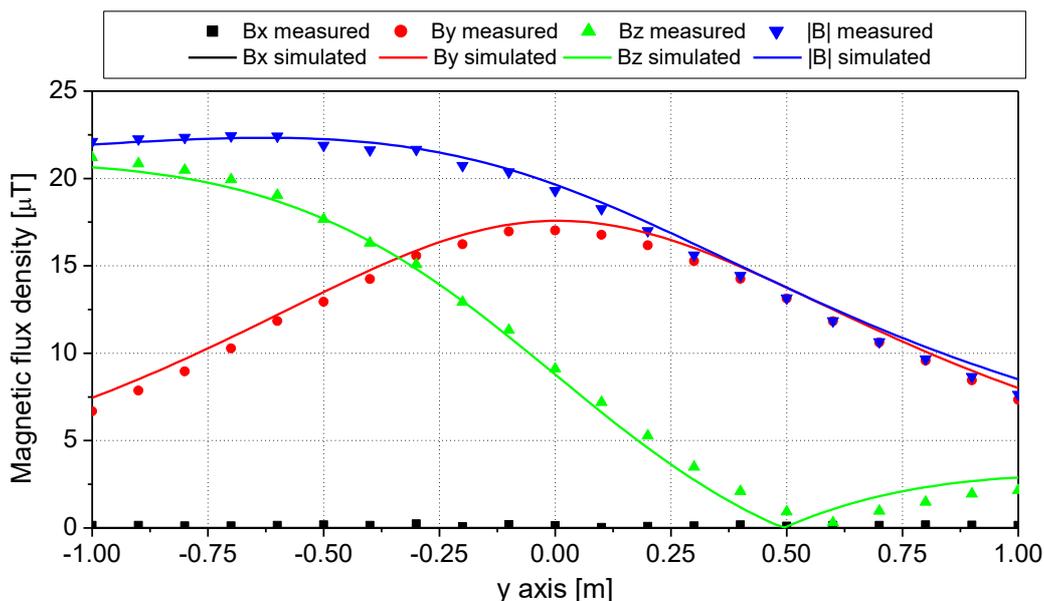


Fig. 10: Induzione magnetica misurata e calcolata mediante software MAGIC®.

**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.

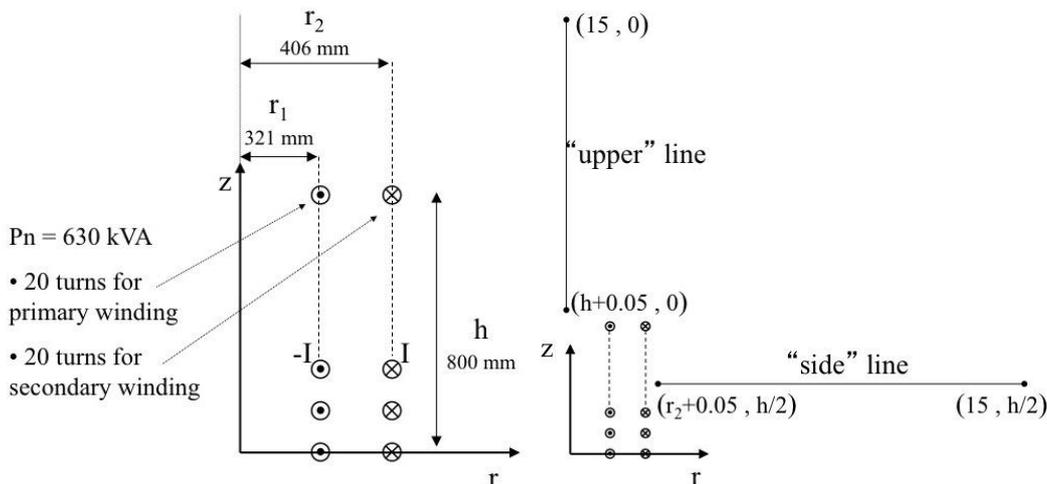


Fig. 11. Geometria del sistema (1) e linee di calcolo (2)

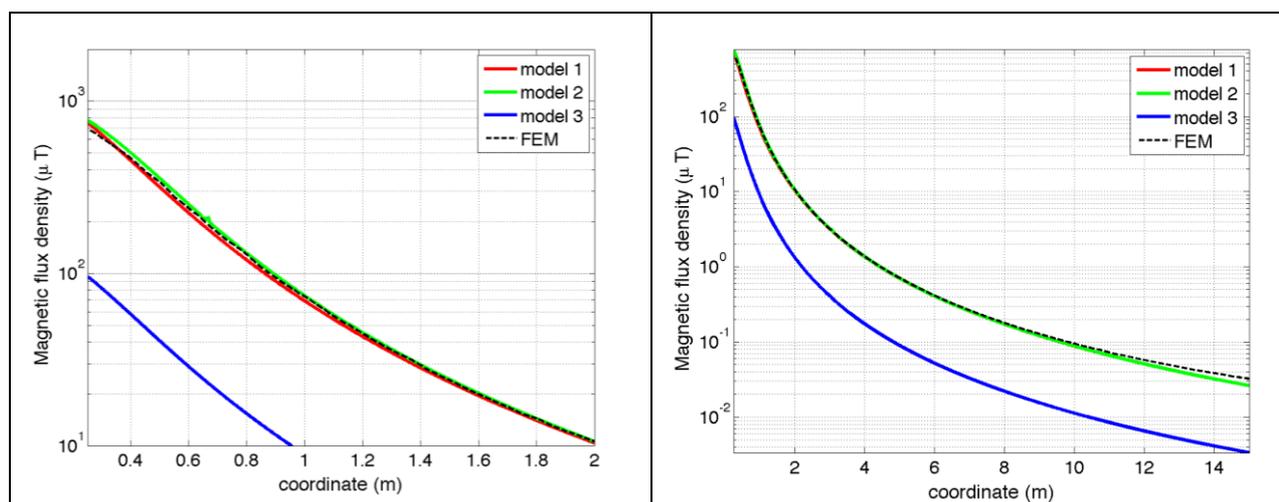
Le Fig. 12 e 13 mostrano, rispettivamente, i valori di induzione magnetica lungo la linea ad 1m dal lato degli avvolgimenti e lungo la linea ad 1.5 m sopra gli avvolgimenti. Le figure mettono a confronto il “modello 1 e 2” ed il calcolo, assunto come riferimento, effettuato mediante codice FEM.

**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).**

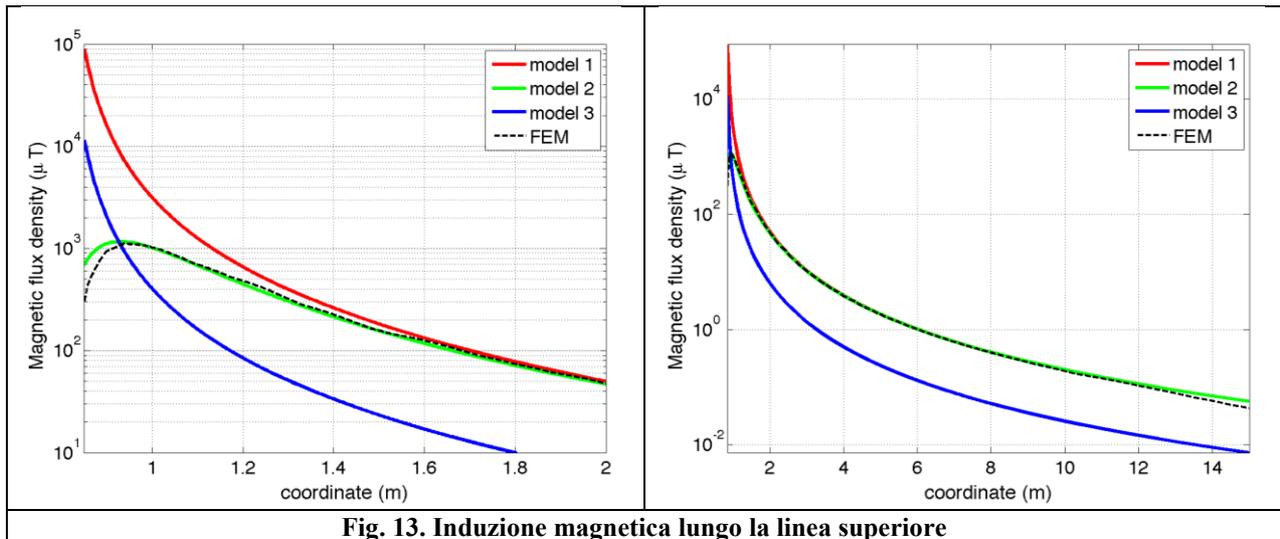
I modelli inseriti nel MAGIC® sono inoltre confrontati con il modello proposto da un altro software commerciale (EFC-400) che verrà denominato “Modello 3”. Tale modello è basato sull’ipotesi che il campo magnetico disperso, essendo correlato con la reattanza di dispersione del trasformatore, risulta 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.**

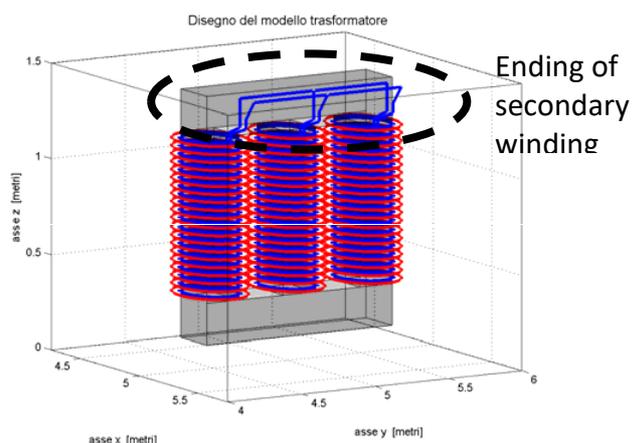


Fig. 14: Connessioni elettriche considerate al lati BT.

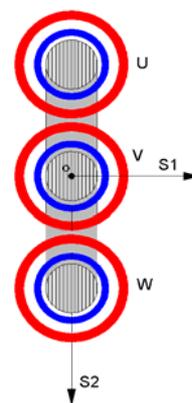


Fig. 15: Linee di calcolo S1 ed S2

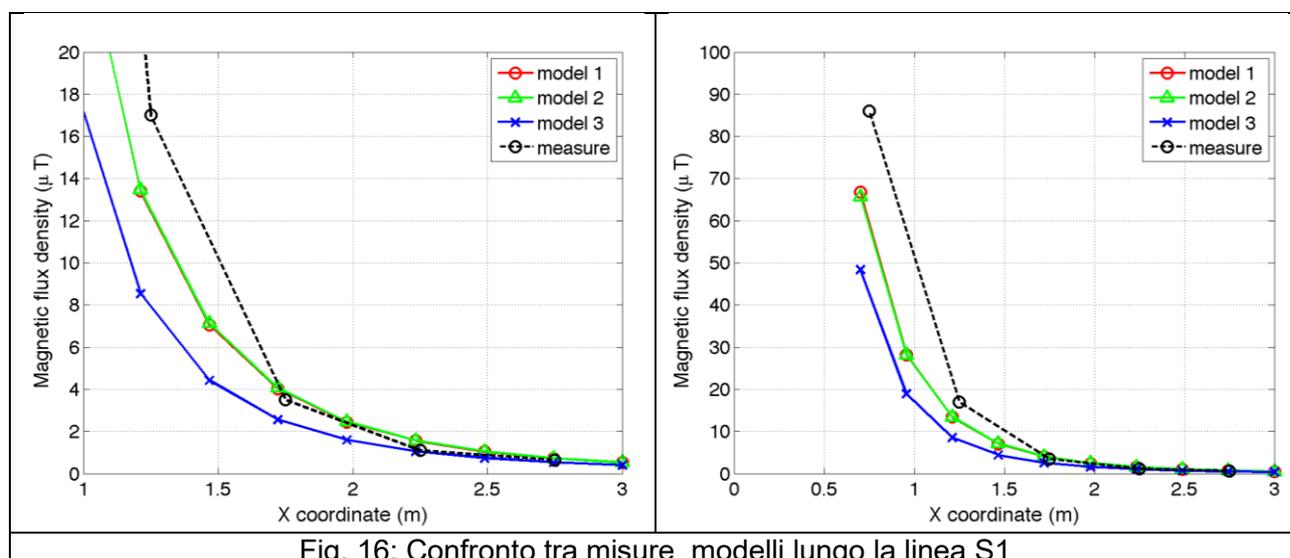


Fig. 16: Confronto tra misure modelli lungo la linea S1

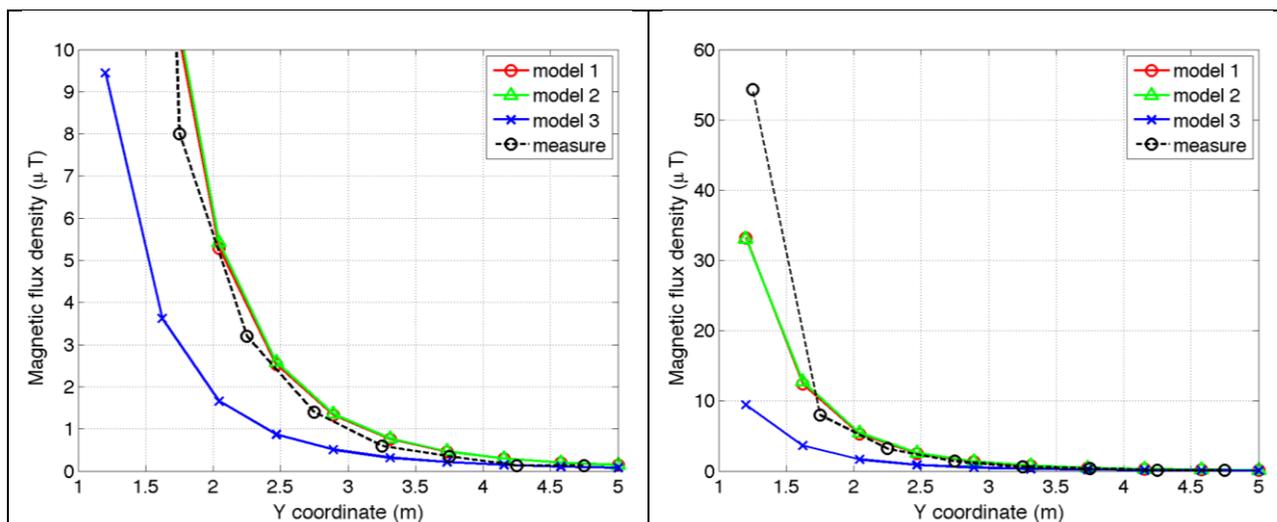


Fig. 17. Confronto tra misure modelli lungo la linea S2

## 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.***