



Gianluca Bongiorno

		<i>G. Bongiorno</i>	<i>Bongiorno</i>	<i>Bongiorno</i>	
A	20.6.2025	117	013	093	Emissione per autorizzazione
REVISIONE	DATA	ELABORATO	VERIFICATO	APPROVATO	DESCRIZIONE
CODICE PRATICA CAPOFILA C.P. 202201461					TIPOLOGIA IMPIANTO CAPOFILA / POTENZA IN IMMISSIONE IMPIANTO FOTOVOLTAICO 56 MW
CAPOFILA Bondeno Srl Via Mike Bongiorno, 13 20124 - Milano Partita IVA 05496160283					SE 132/36 kV BONDENO
INGEGNERIA & COSTRUZIONI BRULLI trasmissione					TITOLO RELAZIONE CAMPI ELETTRICI E MAGNETICI
SCALA -	FORMATO A4	FOGLIO / DI 1 / 24		N. DOCUMENTO 5 1 6 7 0 4 A	

Sommario

1	PREMESSA.....	3
2	QUADRO NORMATIVO.....	3
3	DESCRIZIONE DEL PROGETTO.....	4
3.1	SE Bondeno – CP Bondeno.....	4
3.2	Finale Emilia – SE Bondeno.....	5
3.3	SE Bondeno – Ferrara Cassana	5
3.4	SE Bondeno - Palantone con deriv. Pilastresi All.....	5
4	METODOLOGIA DI CALCOLO.....	6
4.1	Calcolo dei campi magnetici.....	6
4.2	Correnti di calcolo.....	6
4.3	Risultati	6
5	ANALISI DEI RICETTORI	7
6	CONCLUSIONI.....	10

1 PREMESSA

Oggetto della presente relazione è il calcolo dei campi elettrici e magnetici del progetto per la realizzazione dei raccordi di linea a semplice terna 132 kV da interconnettere nella futura Stazione di trasformazione (SE) 132/36 kV denominata "Bondeno".

L'opera in oggetto verrà realizzata nell'ambito del progetto di connessione a 36 kV dell'impianto fotovoltaico della società Bondeno Srl alla futura Stazione Elettrica RTN 132/36 kV Bondeno (CP 202201461). In particolare, alla futura SE 132/36 kV Bondeno verranno ricollegate le linee RTN a 132 kV "Finale Emilia – Bondeno", "Bondeno – Ferrara Cassana" e "Bondeno – Palantone con deriv. Pilastresi All.", oggi afferenti alla Cabina Primaria di Bondeno, previo:

- potenziamento/rifacimento della linea RTN a 132 kV "Bondeno – Finale Emilia";
- realizzazione di un nuovo elettrodotto RTN a 132 kV tra la nuova SE 132/36 kV Bondeno e la futura sezione di 132 kV dell'esistente SE RTN a 380 kV denominata "Ferrara Nord";
- realizzazione dei nuovi elettrodotti a 132 kV "Ferrara Cassana – Ferrara Nord" e "Ferrara Nord – Ferrara ZI" (opera oggetto di altro proponente).

I raccordi in progetto a 132 kV saranno realizzati in palificate a semplice terna ed armati con conduttore del tipo ACSR $\phi 31,5$ mm.

Come da unificazione Terna il franco minimo sarà non inferiore ai 10 metri, comunque superiore a quello previsto della normativa vigente.

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 (μ T)	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 DM LLP 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

Il perimetro dell'intervento include tutte le attività finalizzate a realizzare i raccordi in linea aerea 132 kV secondo lo standard della RTN.

La presente relazione tratta, pertanto, della realizzazione degli elettrodotto per permettere il collegamento della nuova SE 132/36 kV Bondeno con CP Bondeno del collegamento in doppia antenna, mediante due elettrodotto a 132 kV tra la futura SE 132/36 kV Bondeno e CP Bondeno. I limiti di batteria, per il primo raccordo, sono, pertanto, compresi entro i seguenti punti fisici:

- Palo gatto denominato PGA in SE Bondeno;
- Palo gatto denominato P80 in CP Bondeno.

I limiti di batteria, per il secondo raccordo, sono, pertanto, compresi entro i seguenti punti fisici:

- Palo gatto denominato PGB in SE Bondeno;
- Palo gatto denominato P95 in CP Bondeno.

Nella presente relazione viene, inoltre, trattata la realizzazione degli elettrodotto per permettere il collegamento della nuova SE 132/36 kV Bondeno con le linee RTN a 132 kV “Finale Emilia – Bondeno”, “Bondeno – Ferrara Cassana” e “Bondeno – Palantone con deriv. Pilastresi All.”, oggi afferenti alla Cabina Primaria di Bondeno.

Per il collegamento tra la nuova SE 132/36 kV Bondeno e la linea RTN a 132 kV “Finale Emilia – Bondeno”, i limiti di batteria sono, pertanto, compresi entro i seguenti punti fisici:

- Sostegno numero P77 linea 132 kV RTN Finale Emilia – Bondeno;
- Palo gatto denominato PGFIN in SE Bondeno.

Per il collegamento tra la nuova SE 132/36 kV Bondeno e la linea RTN a 132 kV “Bondeno – Ferrara Cassana”, i limiti di batteria sono, pertanto, compresi entro i seguenti punti fisici:

- Sostegno numero P92 linea 132 kV RTN Bondeno – Ferrara Cassana;
- Palo gatto denominato PGFC in SE Bondeno.


Per il collegamento tra la nuova SE 132/36 kV Bondeno e la linea RTN a 132 kV “Bondeno – Palantone con deriv. Pilastresi All.”, i limiti di batteria sono, pertanto, compresi entro i seguenti punti fisici:

- Sostegno numero P3 linea 132 kV RTN Bondeno – Palantone con deriv. Pilastresi All;
- Palo gatto denominato PGPAL in SE Bondeno.

3.1 SE Bondeno – CP Bondeno

L'elettrodotto, come evincibile dagli elaborati, si sviluppa dalla nuova SE 132/36 kV Bondeno alla CP Bondeno esistente, ubicate nel Comune di Bondeno.

I due elettrodotto percorrono il loro rispettivo tracciato per lo più in posizione parallela l'uno con l'altro, essi verranno denominati, rispettivamente, Raccordo 1 e Raccordo 2.

 Reggio nell'Emilia - ITALIA	Progetto SE 132/36 kV BONDENO Raccordi AT 132 kV Relazione campi elettrici e magnetici	Documento e revisione 516704A 5
	<p>I due elettrodotti si sviluppano ad una quota altimetrica compresa tra 9 e 10 m.s.l.m., interessando terreni le cui titolarità sono indicate negli elaborati No. 516441 - Elenco beni soggetti all'apposizione del vincolo preordinato all'esproprio e all'asservimento, e 517445 - Elenco beni soggetti ad occupazione temporanea.</p> <p>La lunghezza planimetrica del Raccordo 1 è pari a 356,8 m e comporta la realizzazione di 2 nuovi sostegni, escluso i pali gatti, previsti in SE Bondeno e CP Bondeno. L' elettrodotto si svilupperà a partire dal palo gatto nella SE Bondeno PGA, sino al palo gatto P80 in CP Bondeno.</p> <p>La lunghezza planimetrica del Raccordo 2 è pari a 390,8 m e comporta la realizzazione di due nuovi sostegni, escluso i pali gatti, previsti in SE Bondeno e CP Bondeno. L' elettrodotto si svilupperà a partire dal palo gatto nella SE Bondeno PGB, sino al palo gatto P95 in CP Bondeno.</p> <p>3.2 Finale Emilia – SE Bondeno</p> <p>L'elettrodotto, come evincibile dagli elaborati, si sviluppa dalla nuova SE 132/36 kV Bondeno alla linea a 132 kV "Finale Emilia – Bondeno". Il comune interessato è il comune di Bondeno, provincia di Ferrara.</p> <p>I due elettrodotti si sviluppano ad una quota altimetrica compresa tra 9 e 10 m.s.l.m., interessando terreni le cui titolarità sono indicate negli elaborati No. 516441 - Elenco beni soggetti all'apposizione del vincolo preordinato all'esproprio e all'asservimento, e 517445 - Elenco beni soggetti ad occupazione temporanea.</p> <p>La lunghezza planimetrica del raccordo è pari a 140,4 m e comporta la realizzazione di un nuovo sostegno, escluso il palo gatto, previsto in SE Bondeno. Il raccordo si svilupperà a partire dal palo gatto nella SE Bondeno PGFIN, sino al nuovo sostegno P78N.</p>	
	<p>Un tratto dell'esistente elettrodotto 132 kV Finale Emilia – CP Bondeno, della lunghezza planimetrica di circa 612,8 m, verrà dismesso, inclusi due sostegni della linea esistente (P78 e P79). I conduttori tra la CP Bondeno e l'esistente sostegno P79 e i conduttori tra il sostegno P79 e il sostegno P78 verranno dunque rimossi.</p> <p>3.3 SE Bondeno – Ferrara Cassana</p> <p>L'elettrodotto, come evincibile dagli elaborati, si sviluppa dalla nuova SE 132/36 kV Bondeno alla linea a 132 kV "Bondeno – Ferrara Cassana". Il comune interessato è il comune di Bondeno, provincia di Ferrara.</p> <p>I due elettrodotti si sviluppano ad una quota altimetrica compresa tra 9 e 10 m.s.l.m., interessando terreni le cui titolarità sono indicate negli elaborati No. 516441 - Elenco beni soggetti all'apposizione del vincolo preordinato all'esproprio e all'asservimento, e 517445 - Elenco beni soggetti ad occupazione temporanea.</p> <p>La lunghezza planimetrica del raccordo è pari a 589,8 m e comporta la realizzazione di due nuovi sostegni, escluso il palo gatto, previsto in SE Bondeno. Il raccordo si svilupperà a partire dal palo gatto nella SE Bondeno PGFC, sino al sostegno esistente P92.</p> <p>Un tratto dell'esistente elettrodotto 132 kV CP Bondeno – Ferrara Cassana, della lunghezza planimetrica di circa 346,1 m, verrà dismesso, inclusi due sostegni della linea esistente (P93 e P94). I conduttori tra la CP Bondeno e l'esistente sostegno P94 e i conduttori tra il sostegno P94 e il sostegno P93 verranno dunque rimossi.</p>	
	<p>3.4 SE Bondeno - Palantone con deriv. Pilastresi All.</p> <p>L'elettrodotto, come evincibile dagli elaborati, si sviluppa dalla nuova SE 132/36 kV Bondeno alla linea a 132 kV "Finale Emilia – Bondeno". Il comune interessato è il comune di Bondeno, provincia di Ferrara.</p> <p>I due elettrodotti si sviluppano ad una quota altimetrica compresa tra 9 e 10 m.s.l.m., interessando terreni le cui titolarità sono indicate negli elaborati No. 516441 - Elenco beni soggetti all'apposizione del vincolo preordinato all'esproprio e all'asservimento, e 517445 - Elenco beni soggetti ad occupazione temporanea.</p> <p>La lunghezza planimetrica del raccordo è pari a 586,3 m e comporta la realizzazione di due nuovi sostegni, escluso il palo gatto, previsto in SE Bondeno. Il raccordo si svilupperà a partire dal palo gatto nella SE Bondeno PGFC, sino al nuovo sostegno P2N.</p> <p>Un tratto dell'esistente elettrodotto 132 kV CP Bondeno – Palantone con deriv. Pilastresi All., della lunghezza planimetrica di circa 406,6 m, verrà dismesso, inclusi il sostegno della linea esistente P2 e il palo gatto presente nella CP Bondeno P1. I conduttori tra il palo gatto P1 nella CP Bondeno e l'esistente sostegno P2 e i conduttori tra il sostegno P94 e il sostegno P93 verranno dunque rimossi.</p>	

4 METODOLOGIA DI CALCOLO

La rete elettrica nazionale, di cui la stazione elettrica SE 132/36 kV "Bondeno" con i relativi raccordi aerei 132 kV farà 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. È possibile, pertanto, analizzare distintamente i due aspetti.

In base alle "Linee Guida per l'applicazione del punto 5.1.3 dell'allegato al DM 29/05/2008" elaborate da Enel, non è necessario effettuare il calcolo dei livelli di campo elettrico per tensioni inferiori o uguali a 150 kV in quanto dette linee guida specificano che "a valle di misure e valutazioni effettuate sulle proprie linee elettriche 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".

4.1 Calcolo dei campi magnetici

Al fine di stimare il campo magnetico prodotto dai cavidotti 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.

Al fine di calcolare le DPA da applicarsi alla linea in progetto è stato individuato un sostegno tipo tra quelli che si prevede di installare, in particolare è stato considerato il sostegno che presenta la disposizione delle fasi con conduttori più distanti, il quale comporta un valore maggiore del campo magnetico prodotto.

Sovrapponendo le DPA così calcolate con ortofoto e catasto è stata valutata l'eventuale presenza di ricettori sensibili in prossimità dei raccordi.

4.2 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

Gli elettrodotti in oggetto, essendo localizzati in provincia di Ferrara, ad una quota compresa tra 9 e 10 m sul livello del mare, rientra in zona B; pertanto, la portata in corrente in servizio normale risulta pari a 675 A.

Pertanto, la corrente per il calcolo delle Distanze di Prima Approssimazione utilizzata sarà pari a **675 A**.

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 singola terna.

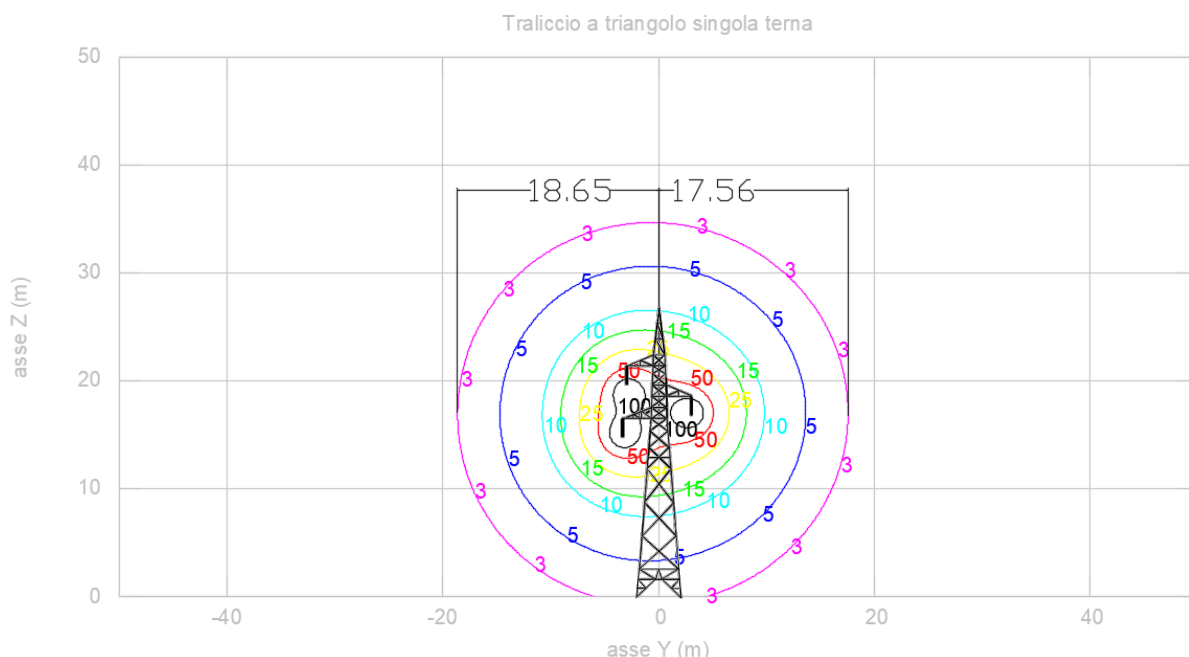


Figura 1 - Livelli di campo magnetico prodotti dal traliccio a singola terna

Dal grafico in Figura 1 si evince che dal lato della doppia mensola il valore di $3 \mu\text{T}$ si raggiunge ad una distanza di 18,56 m dall'asse del traliccio e 17,56 m dal lato della mensola singola. Arrotondando al primo intero la DPA da applicarsi risulta pertanto pari a **19 metri**.

5 ANALISI DEI RICETTORI

Le DPA calcolate precedentemente sono evincibili, con retino grigio contornato da linea tratto-punto grigia, dalla seguente Figura 2 estratta dal documento 516424 - Planimetria catastale con DPA. Come si evince da Figura 2, Figura 3 e Figura 4, all'interno di tali fasce non sono presenti ricettori sensibili.

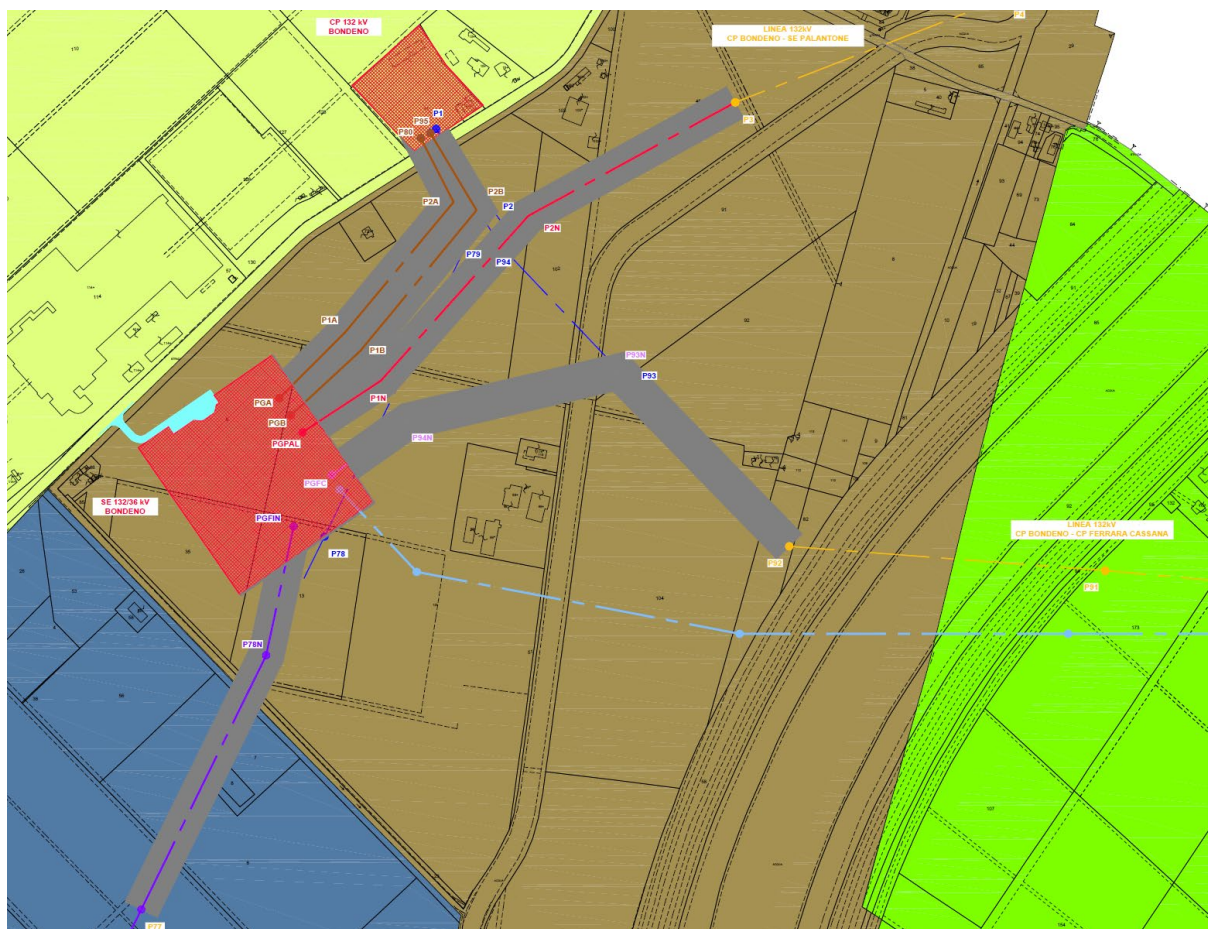


Figura 2 – Planimetria catastale con DPA

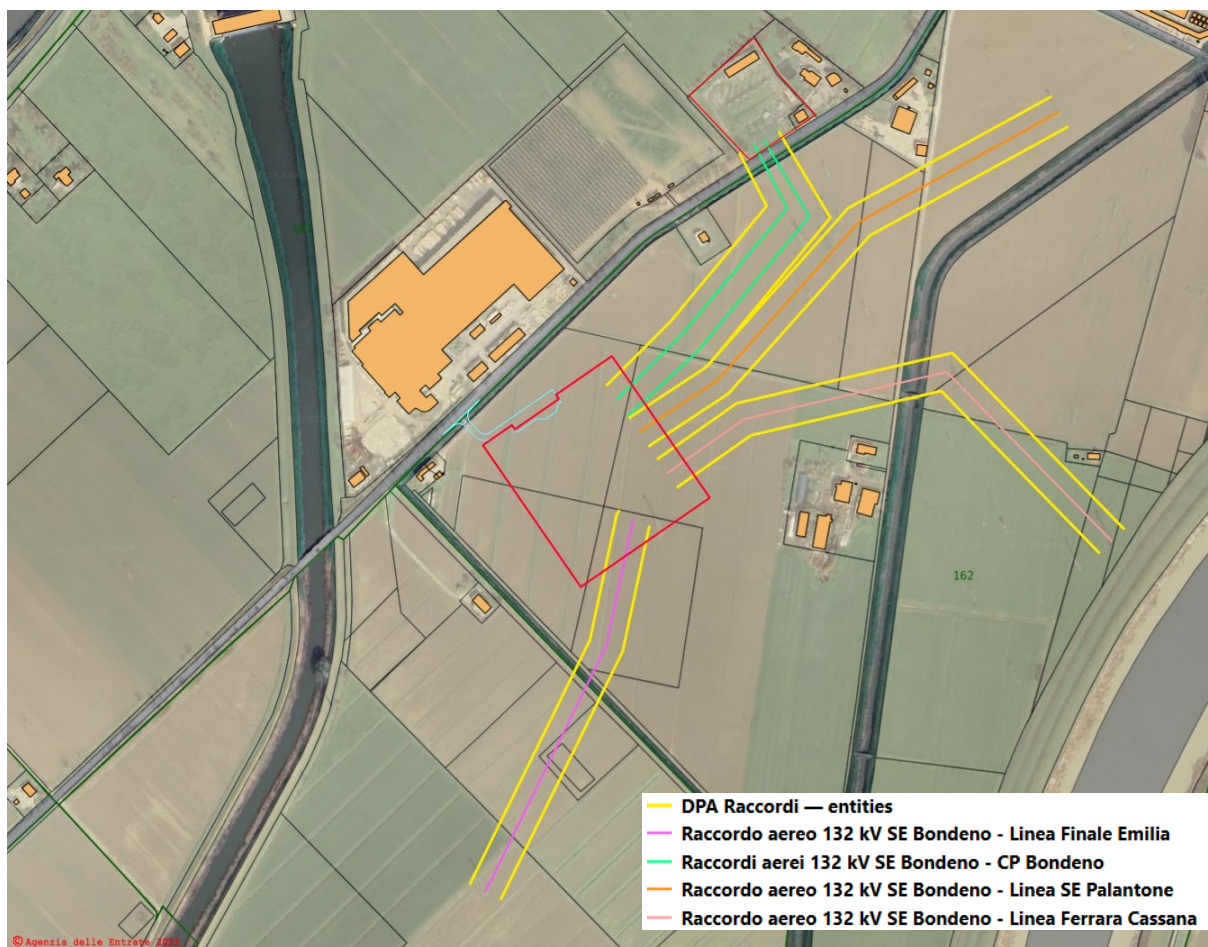


Figura 3 Raccordi e DPA su base catastale

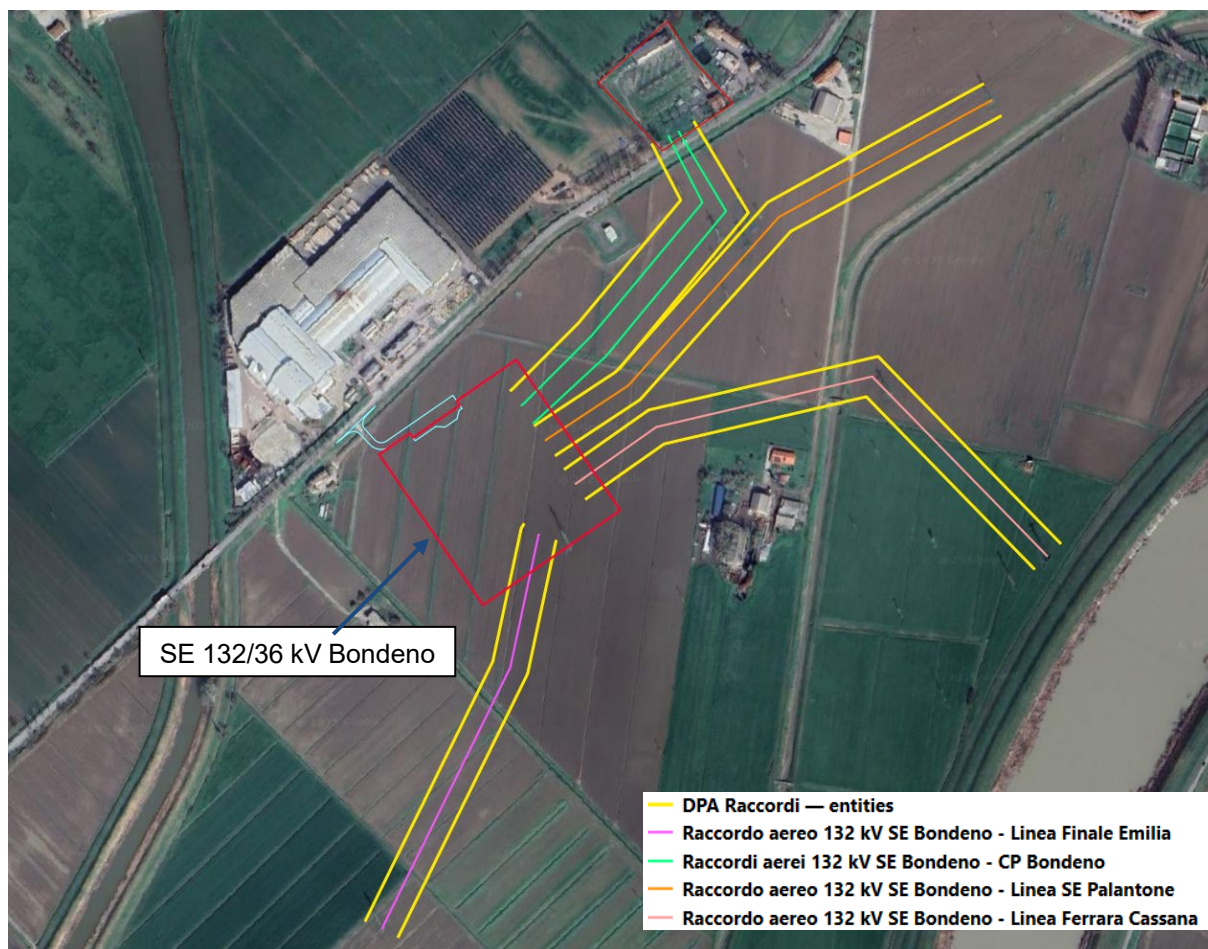


Figura 4 Raccordi e DPA su ortofoto

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 μ T, 10 μ T e 3 μ 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 **19 metri** da applicare alla tratta aerea dei nuovi raccordi dell'elettrodotto.

Si osserva che i raccordi in progetto sono lontani da ricettori sensibili.

Le DPA sono rappresentate nel documento 516424.

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.

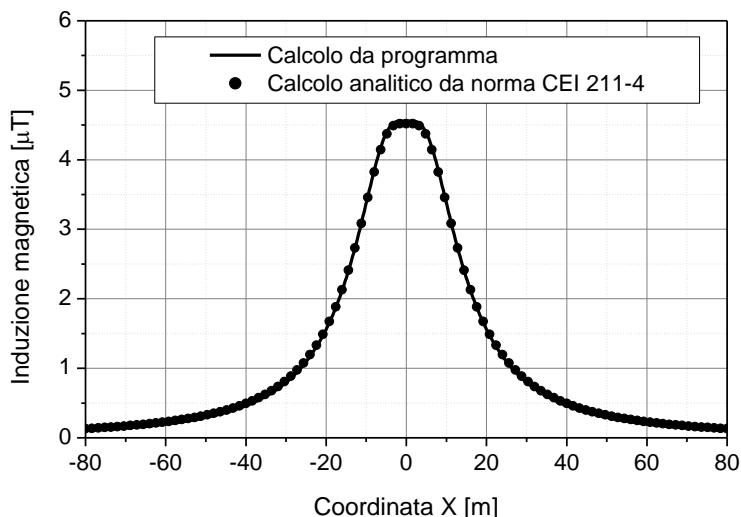


Figura 1: Induzione magnetica al suolo in prossimità di una linea aerea a doppia terna su semplice palificazione con corrente di 310: confronto tra MAGIC® e formula analitica CEI 211-4

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

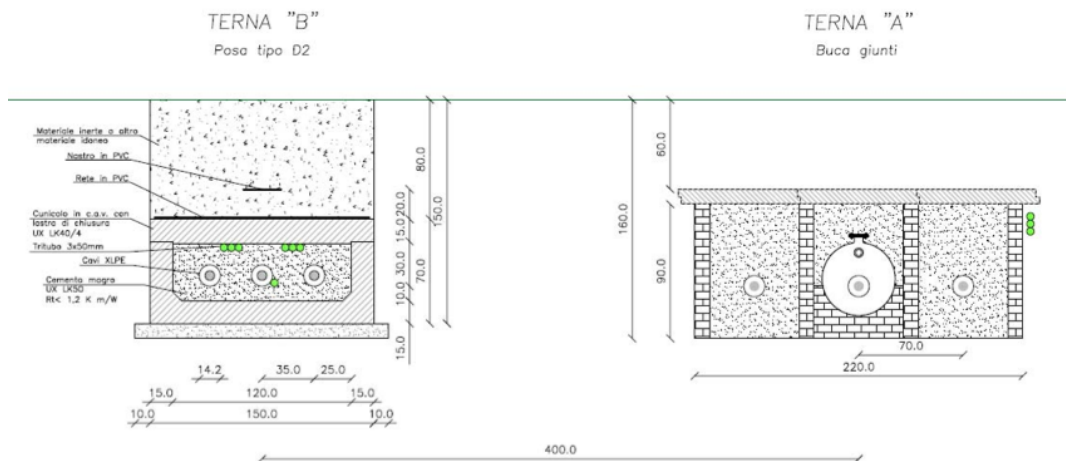


Figura 2: Affiancamento tra due linee interrate AT

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.

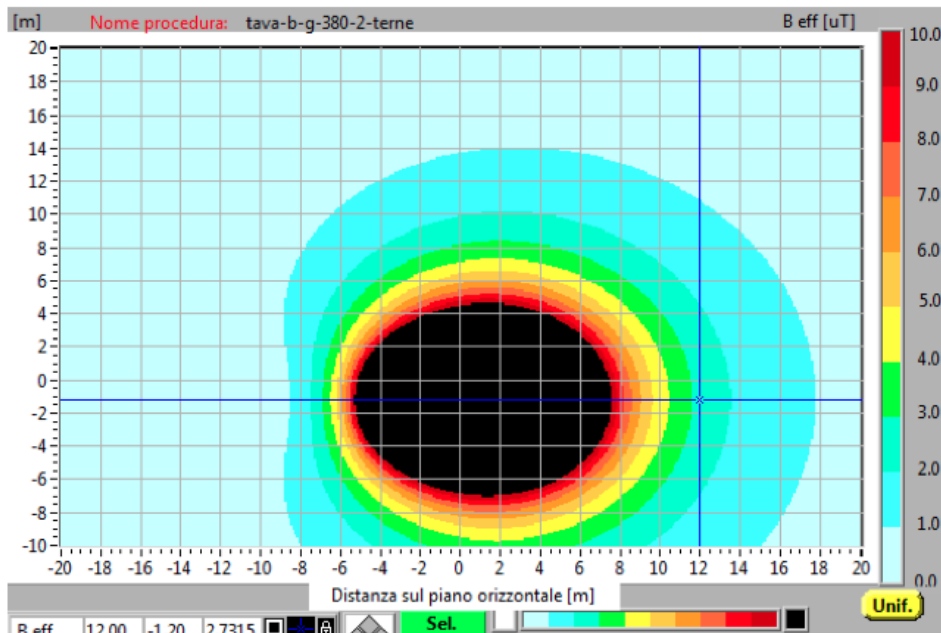


Figura 3: Mappa cromatica delle induzioni magnetiche calcolata mediante software CESI

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.

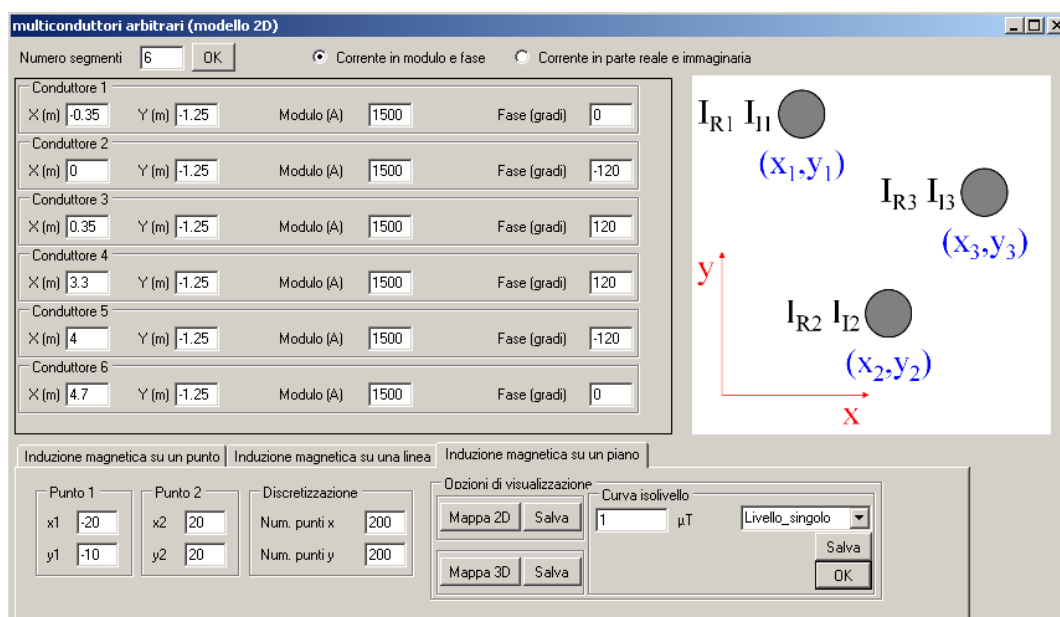


Figura 4:Schermata di ingresso modulo “multiconduttori arbitrari (modello 2D)””: dati definizione geometria e sorgenti

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

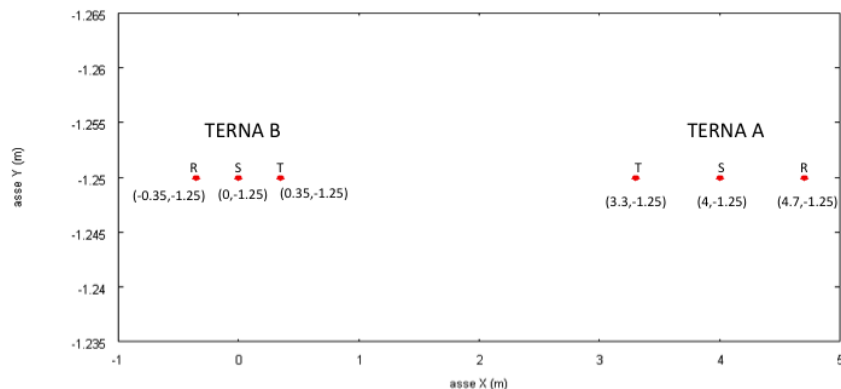


Figura 5: Geometria sorgenti

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

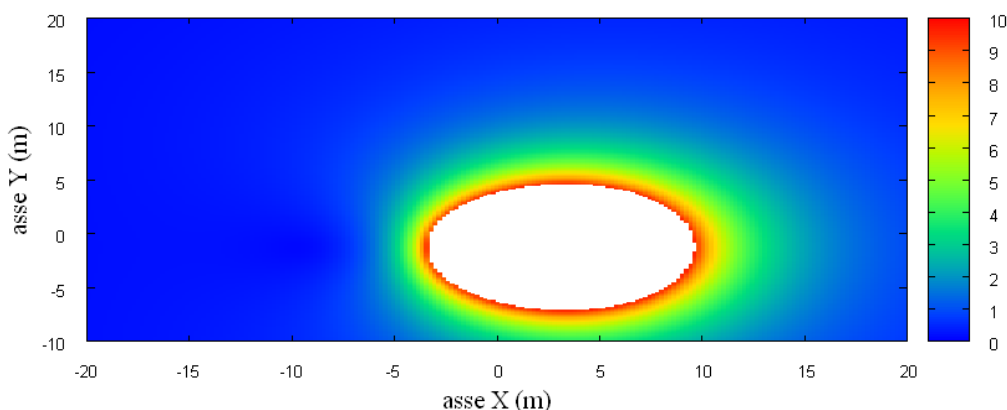


Fig. 6: Mappa cromatica dell’induzione magnetica ottenuta dal software MAGIC® (valori in microT):

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

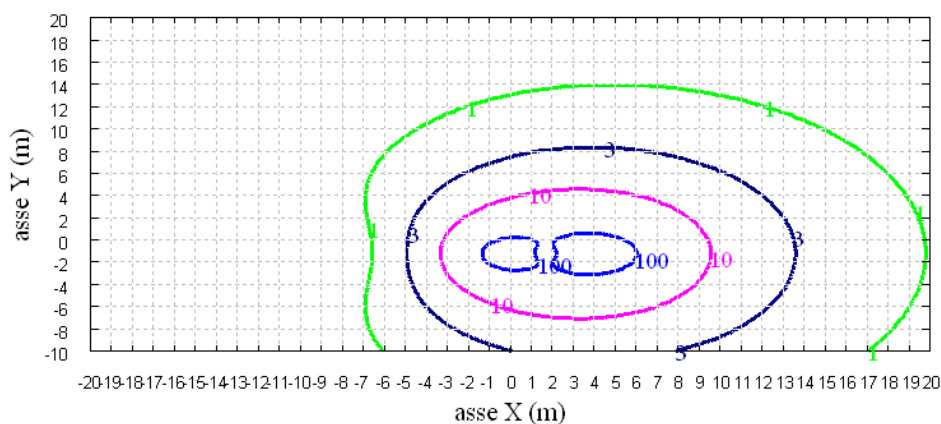


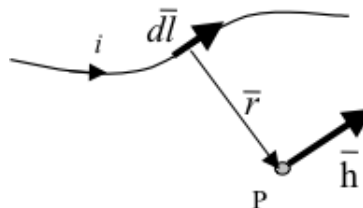
Fig. 7 Linee isolivello dell’induzione magnetica (1, 3, 10, 100 microT) da software MAGIC®.

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:

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



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.

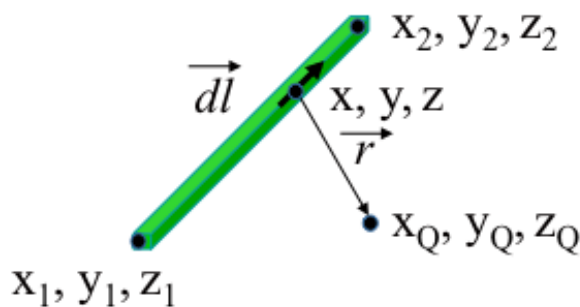


Fig. 8: Modello del segmento.

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

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

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

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

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.

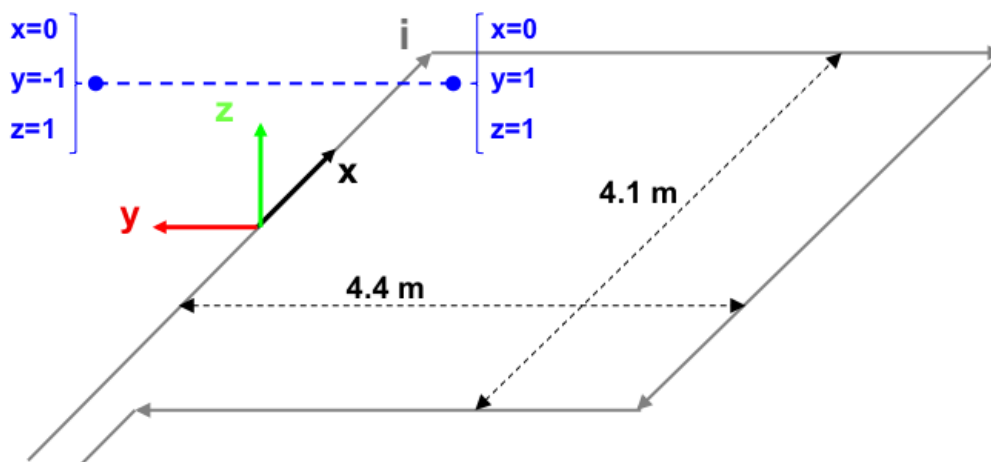


Fig. 9: Schema di spira quadrata.

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

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

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.

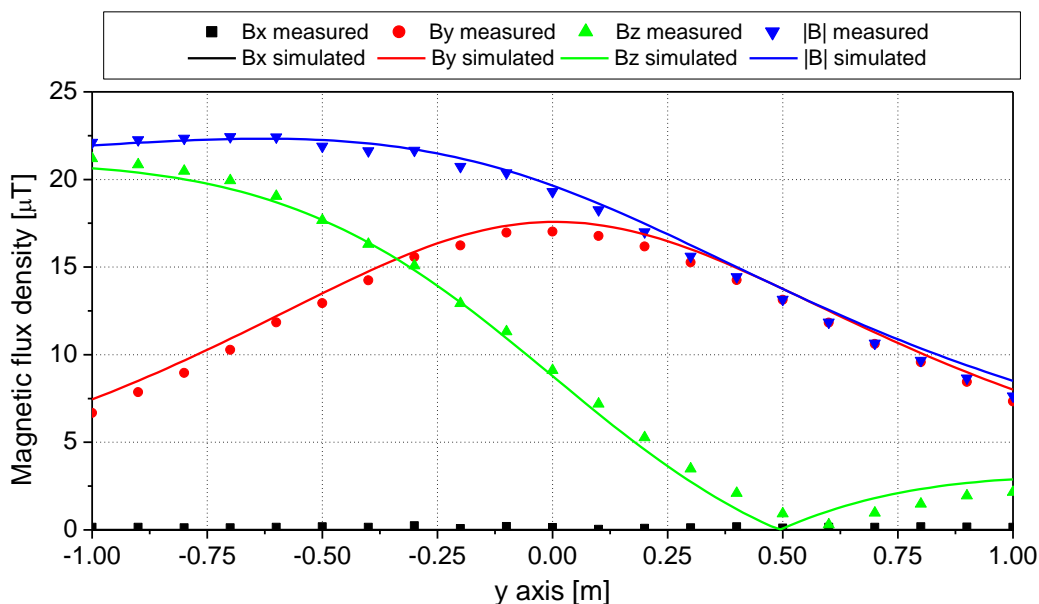


Fig. 10: Induzione magnetica misurata e calcolata mediante software MAGIC®.

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.

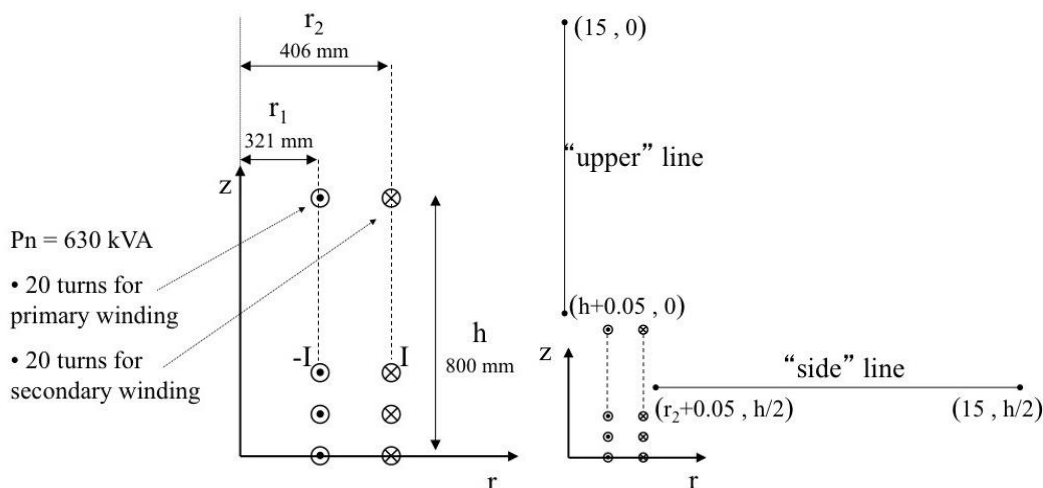


Fig. 11. Geometria del sistema (1) e linee di calcolo (2)

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).

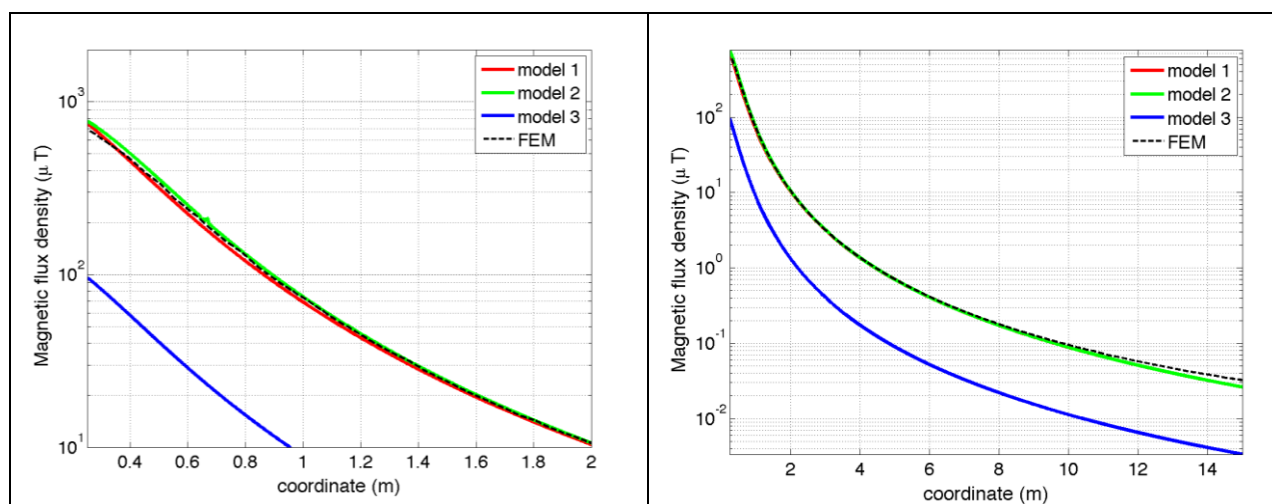


Fig. 12. Induzione magnetica lungo la linea laterale

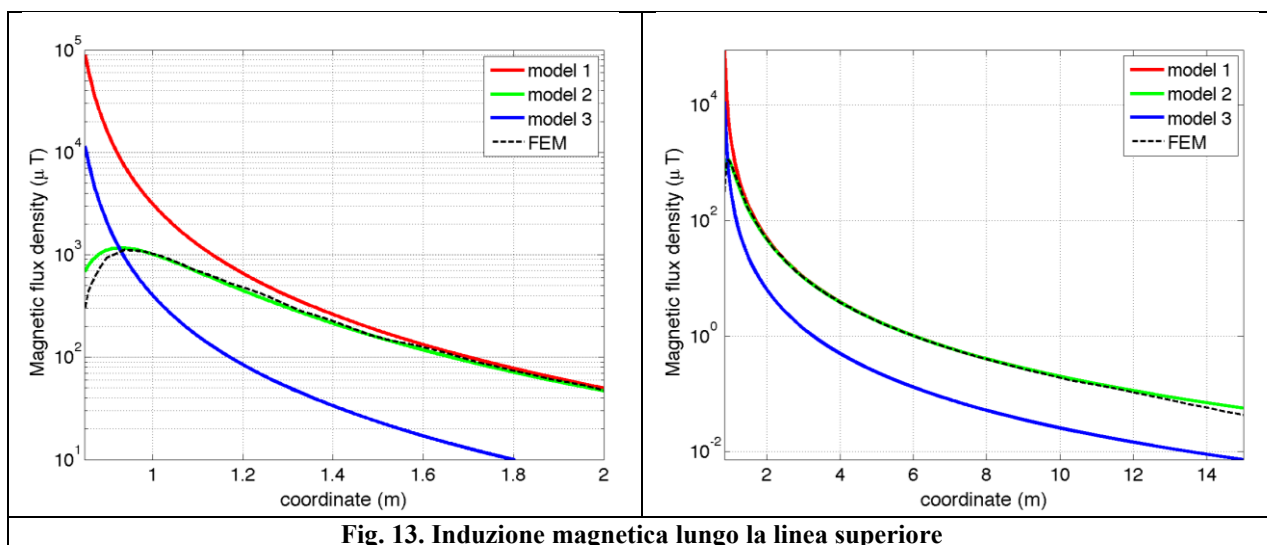


Fig. 13. Induzione magnetica lungo la linea superiore

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 i 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.

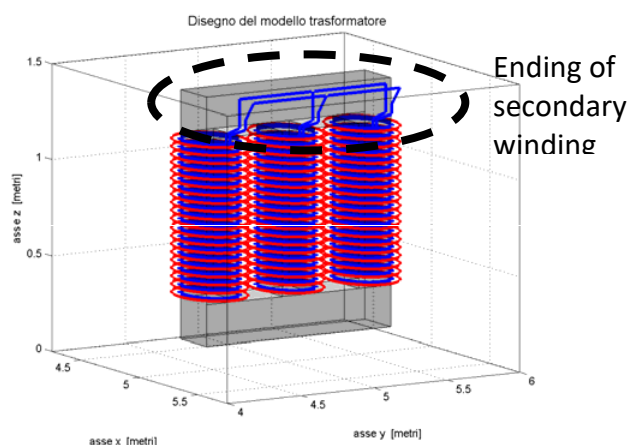


Fig. 14: Connessioni elettriche considerate al lati BT.

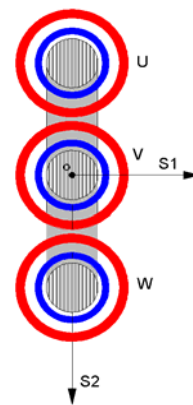


Fig. 15: Linee di calcolo S1 ed S2

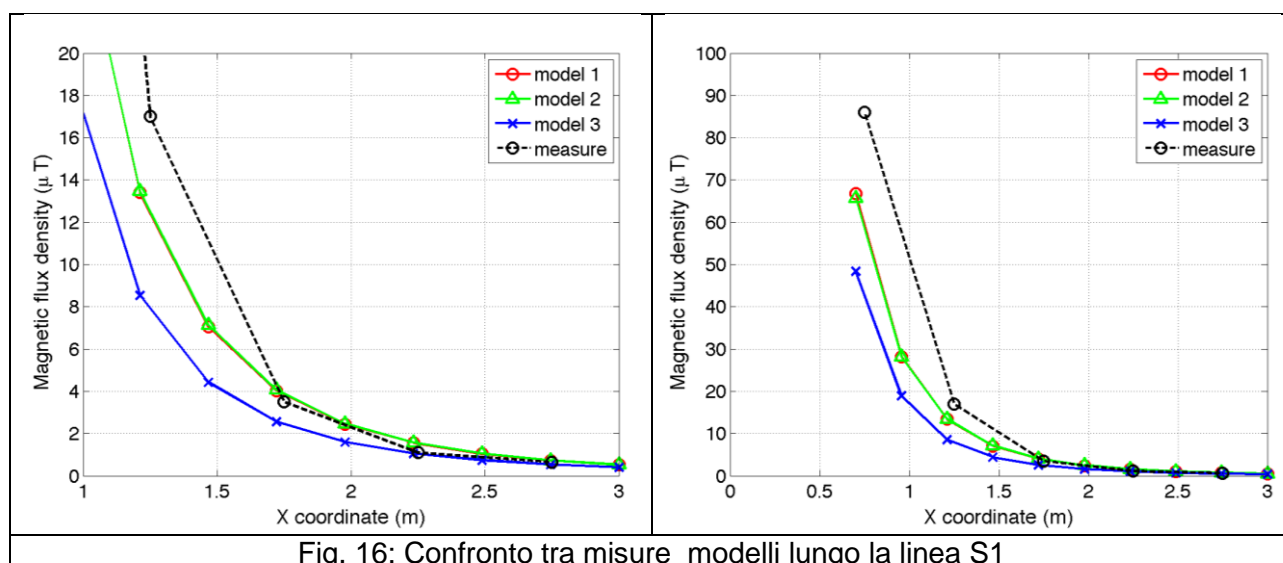


Fig. 16: Confronto tra misure modelli lungo la linea S1

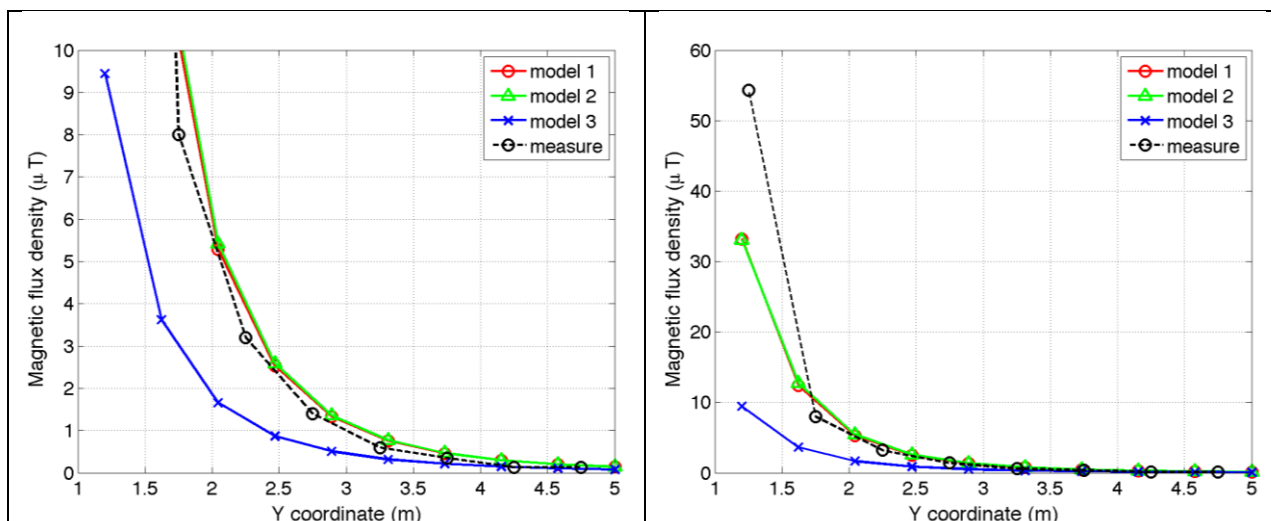


Fig. 17. Confronto tra misure modelli lungo la linea S2

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.