



Luca Brignoni


IMPIANTO DI RETE PER L'AMPLIAMENTO 132 kV
DELLA CABINA PRIMARIA TRESIGALLO

COSTRUZIONE 3° STALLO LINEA IN CAVO
UBICATO NEL COMUNE DI TRESIGNANA(FE)

PROCEDURA AUTORIZZATIVA (Atto e/o Decreto Regionale o Provinciale) N° - DEL -

PROGETTO DEFINITIVO

		<i>Luca Brignoni</i>	<i>Luca Brignoni</i>	<i>Luca Brignoni</i>	
B	27.8.2025	111	013	093	Revisione come da richieste Enel del 1.8.2025
A	30.4.2025	101	013	093	Emissione per autorizzazioni
REVISIONE	DATA	ELABORATO	VERIFICATO	APPROVATO	DESCRIZIONE
RICHIEDENTE SOLAR PV 18 s.r.l. Piazza Castello, 19 20121 - Milano (MI) FIRMA PER BENESTARE					TIPOLOGIA IMPIANTO CAPOFILA / POTENZA IN IMMISSIONE IMPIANTO FOTOVOLTAICO POTENZA IN IMMISSIONE 21,00 MW
					IMPIANTO CP 132/15 kV TRESIGALLO
INGEGNERIA & COSTRUZIONI BRULLI IL DIRETTORE E RESPONSABILE TECNICO trasmissione FIRMA PER BENESTARE					TITOLO FASCICOLO INFORMAZIONI PER INDUZIONE ELETTRO-MAGENTICA
GESTORE RETE ELETTRICA FIRMA PER BENESTARE					LIVELLO PROG. P D
					CODICE RINTRACCIABILITA' 392211454
					TIPO DOCUMENTO D 7
					N° ELABORATO 478404B
					FOGLIO / DI 1 / 24
NOME FILE T R S - 0 1 5 - B					
SCALA -					
FORMATO A4					

 Reggio nell'Emilia - ITALIA	Progetto CP 132/15 kV TRESIGALLO Fascicolo informazioni per induzione elettro-magnetica	Documento e revisione TRS-015BB 2
<div>SOMMARIO</div> <div><div>1</div><div>PREMESSA.....</div><div>3</div></div> <div><div>2</div><div>QUADRO NORMATIVO</div><div>4</div></div> <div><div>3</div><div>METODOLOGIA DI CALCOLO</div><div>5</div></div> <div><div>3.1</div><div>Calcolo del Campo Magnetico.....</div><div>5</div></div> <div><div>3.1.1</div><div>Correnti di calcolo</div><div>7</div></div> <div><div>3.2</div><div>Risultati</div><div>7</div></div> <div><div>4</div><div>CONCLUSIONI.....</div><div>10</div></div>		

1 PREMESSA

L'oggetto della presente relazione è il calcolo dei campi elettrici e magnetici generati dall'ampliamento di una Cabina Primaria (CP) 132/15 kV esistente denominata "CP Tresigallo" di proprietà di e-distribuzione, situata nel comune di Tresigallo (FE), connessa alla rete di trasmissione nazionale, attraverso le linee a 132 kV n° 140 "CP Tresigallo – CP Copparo, con derivazione Portomaggiore CP" e n° 123 "CP Tresigallo – CP Codigoro".

Le opere di ampliamento si rendono necessarie a seguito della richiesta di connessione in alta tensione di impianti "FER" che insistono sul territorio, nello specifico, del collegamento in cavo AT a 132 kV tra una stazione elettrica denominata Cabina Utente denominata "Jolanda Zardi" e l'ampliamento della Cabina Primaria Tresigallo di cui tratta la presente relazione.

La richiesta di realizzazione delle opere sopracitate è oggetto di STMG della società "Solar PV18 S.r.l. (CR 392211454).

Per una maggiore delucidazione dell'opera, si riporta uno stralcio del documento TRS-050 Inquadramento su Ortofoto, nel quale si evince la collocazione delle opere proposte.



Figura 1 – Stralcio inquadramento su Ortofoto

La presente relazione tratta del solo ampliamento della CP Tresigallo, in quanto la parte di CP esistente non verrà modificata dalle opere in progetto.

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

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


Tabella 1 – Valori come da normativa in vigore

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

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

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

La metodologia definita si applica alle linee elettriche aeree e interrate, esistenti o in progetto, con esclusione delle linee a media tensione in cavo cordato ad elica, siano esse interrate o aeree, in quanto in questi casi le fasce associabili hanno ampiezza ridotta, inferiore alle distanze previste dal Decreto Interministeriale 21 Marzo 1988, No. 449 e del 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.).

 <p>Reggio nell'Emilia - ITALIA</p>	<p>Progetto</p> <p>CP 132/15 kV TRESIGALLO</p> <p>Fascicolo informazioni per induzione elettro-magnetica</p>	<p>Documento e revisione</p> <p>TRS-015BB</p> <p>5</p>
<p>3 METODOLOGIA DI CALCOLO</p> <p>La rete elettrica nazionale, di cui la CP 132/15 kV Tresigallo 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.</p> <p>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 (5 kV), 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.</p> <p>Non si procede con il calcolo dei livelli di campo elettrico dato che, per le tensioni in gioco, le “Linee Guida per l’applicazione del punto 5.1.3 dell’allegato al DM 29/05/2008” elaborate da Enel specificano, a valle di misure e valutazioni effettuate sulle proprie linee elettriche, 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”.</p> <p>3.1 Calcolo del Campo Magnetico</p> <p>Al fine di stimare il campo magnetico prodotto al di fuori della “CP Tresigallo” dall’ampliamento in progetto per determinare le Dpa da applicare, si è effettuato il calcolo teorico dei livelli di campo magnetico utilizzando le indicazioni fornite dal DM 29 maggio 2008.</p> <p>La Cabina Primaria, si presenta con schema Standard, configurazione ad “H”, isolato in aria e misura nelle sue dimensioni maggiori, 114 m di lunghezza e 89 m di larghezza circa. L’area di intervento per le attività di ampliamento della cabina primaria 132/15 kV di Tresigallo prevede la realizzazione del terzo stallo linea AT con arrivo in cavo 132 kV e relative opere civili ed elettromeccaniche, la realizzazione del sezionamento della sbarra AT esistente e la realizzazione delle polifore di collegamento delle apparecchiature installate nel nuovo stallo AT.</p> <p>Si è quindi proceduto effettuando il calcolo teorico dei livelli di campo magnetico generati dal nuovo stallo e dalla sbarra esistente.</p> <p>Per il calcolo sono stati considerati solo gli elementi principali in alta tensione in aria. In base ai risultati delle simulazioni sono state determinate le DPA da applicare alla recinzione della stazione.</p> <p>Il calcolo del campo magnetico è stato effettuato utilizzando il software Magic di BESHielding. Il software permette di calcolare i campi magnetici generati da sorgenti di tipo elettrico, quali trasformatori, sistemi di linee elettriche, stazioni, cabine elettriche, buche giunti, blindosbarre e impianti elettrici. Il software permette la determinazione delle fasce di rispetto per linee elettriche e cabine elettriche, secondo quanto previsto dalla Legge Quadro No. 36/2001 (esposizione ai campi magnetici della popolazione) e dal D.Lgs. No. 81/08 (valutazione dei rischi in ambiente lavorativo). Il software permette inoltre di studiare le singole sorgenti (linee elettriche, cavi, sistemi multiconduttori, trasformatori) mediante configurazioni bidimensionali e tridimensionali attraverso l’integrazione della legge di Biot-Savart o lo studio di sistemi complessi, tenendo conto della tridimensionalità delle sorgenti, della loro reale posizione e della sovrapposizione degli effetti delle diverse componenti della stazione e cabina.</p> <p>Riportiamo nel seguito la geometria della cabina utente come schematizzata per il calcolo. Il punto di origine (0;0) del sistema è definito in Figura 2. In Figura 3 riportiamo le sezioni dell’impianto estratte dal documento TRS-105.</p>		

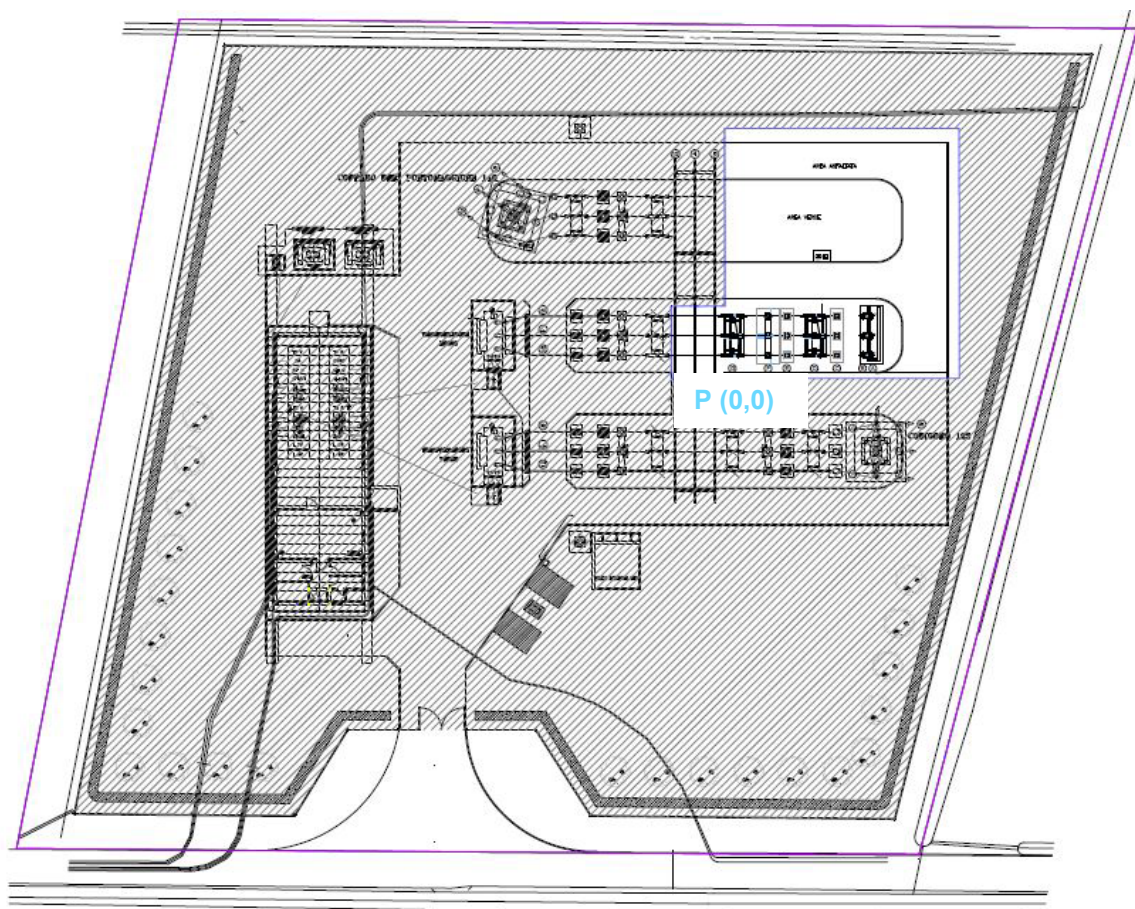


Figura 2 – Planimetria con individuazione degli elementi attivi

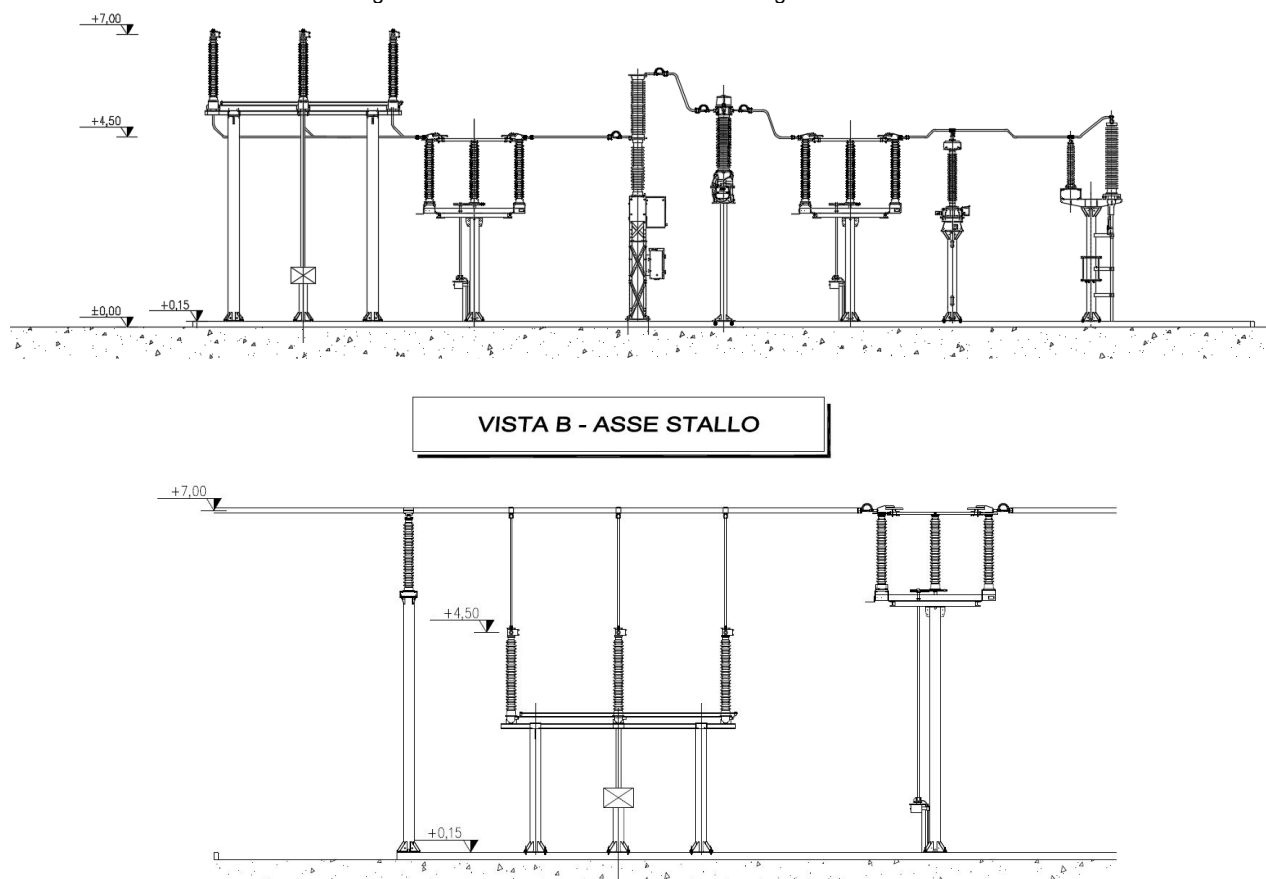


Figura 3 – Sezioni

Si è riportata in Figura 4 la schematizzazione della geometria della stazione all'interno del programma di calcolo.

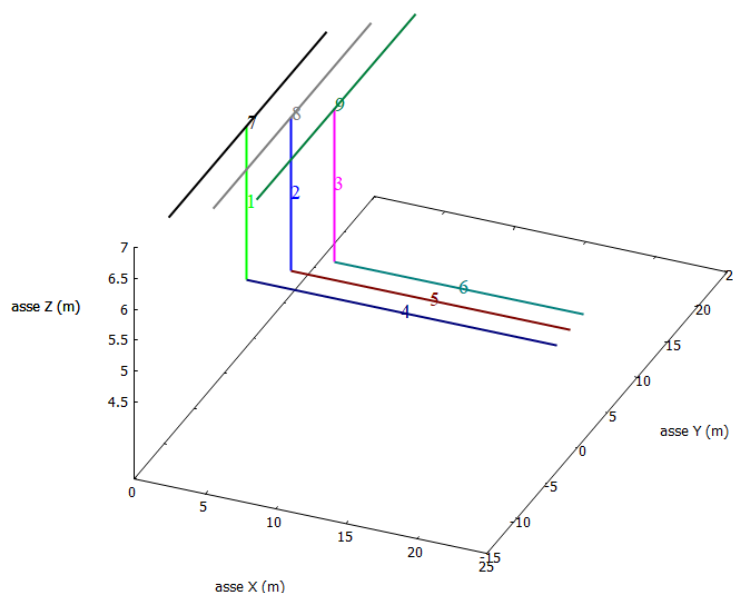


Figura 4 – Schematizzazione degli elementi attivi della stazione all'interno del programma di calcolo

3.1.1 Correnti di calcolo

L'ampliamento della CP Tresigallo sarà realizzato per permettere la connessione del cavidotto in alta tensione di collegamento tra la CU Jolanda Zardi e la CP "Tresigallo" e quindi l'immissione in rete della corrente che può essere prodotta dai produttori di energia rinnovabile connessi alla CU.

L'ampliamento della CP Tresigallo sarà costruito secondo gli standard e-distribuzione. Le sbarre della sezione 132 kV sono dimensionate per una corrente nominale pari a 2.000 A, come da All.3 del CdR. In base al medesimo allegato del Codice di Rete, gli stalli a 132 kV sono dimensionati per una corrente di 1.250 A.

Nello schema seguente riportiamo le correnti di calcolo:

	Elemento linea	Corrente di calcolo
Correnti da Allegato 3 CdR	Stallo	1250 A
	Sbarre	2000 A

Tabella 2 – Elementi attivi e relative correnti utilizzate per l'analisi del campo magnetico

3.2 Risultati

Nelle Figura 5, Figura 6, Figura 7 e Figura 8 si riportano le curve di isolivello del campo magnetico generate sul piano XY in riferimento al solo ampliamento della CP Tresigallo, ad una altezza dal suolo di 1, 5, 7 e 10 metri, nell'ipotesi che le correnti fluiscano come descritto nel capitolo precedente (corrente massima che può circolare).

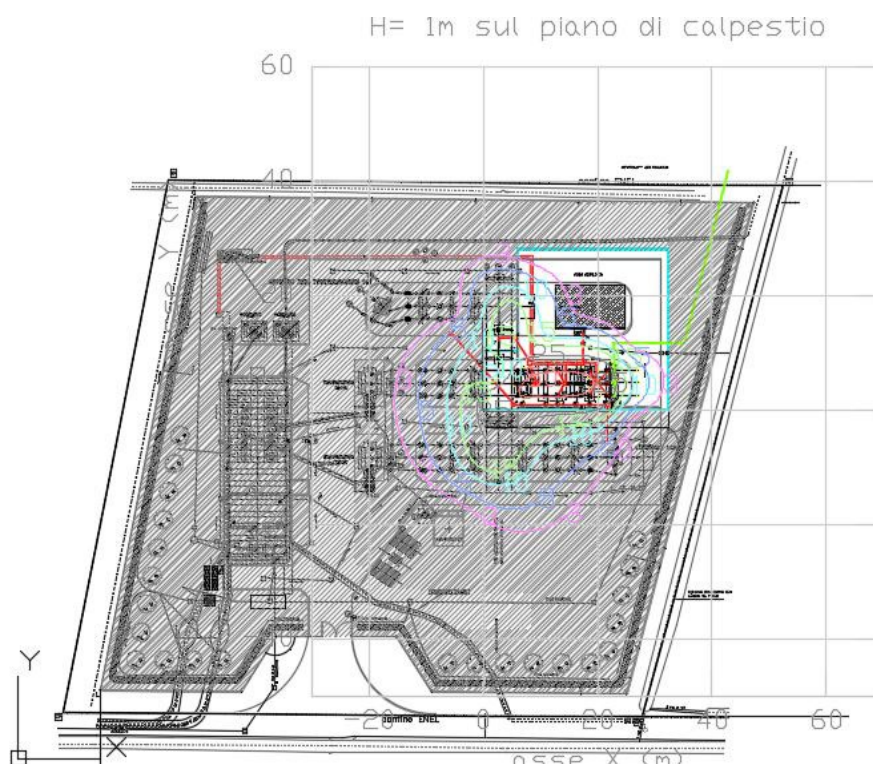


Figura 5 –Curve di isolivello del campo magnetico a 1 m dal piano di calpestio

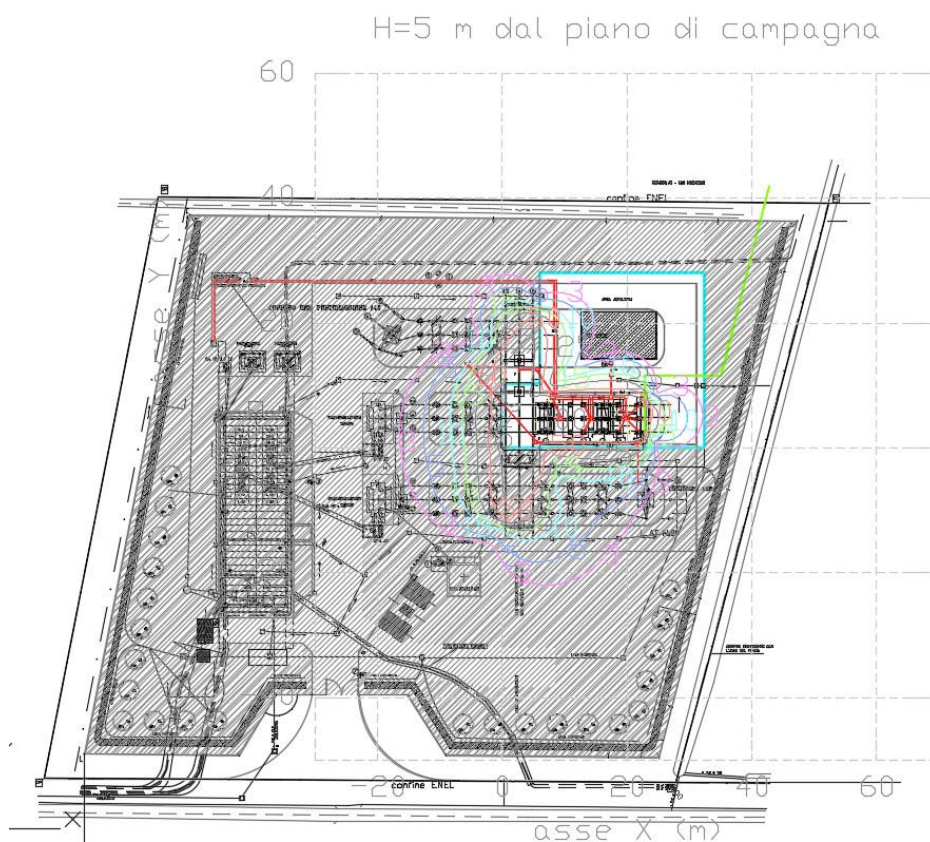


Figura 6 –Curve di isolivello del campo magnetico a 5 m dal piano di calpestio

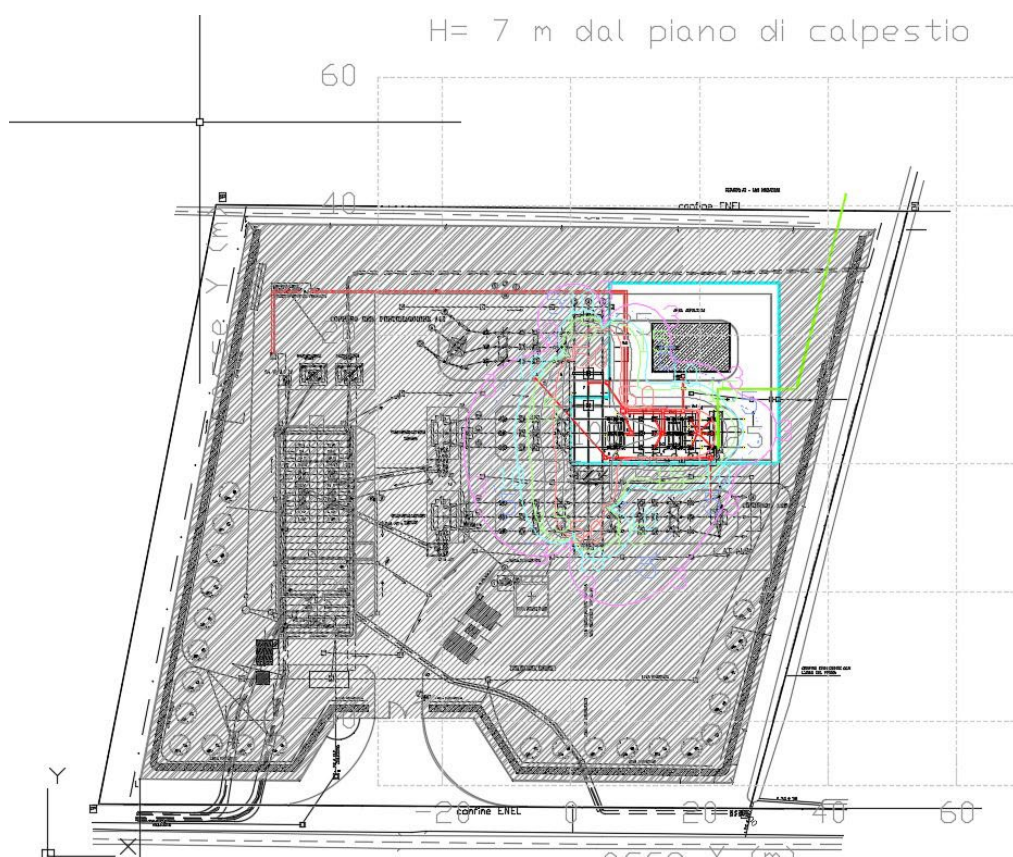


Figura 7 – Curve di isolivello del campo magnetico a 7 m dal piano di calpestio

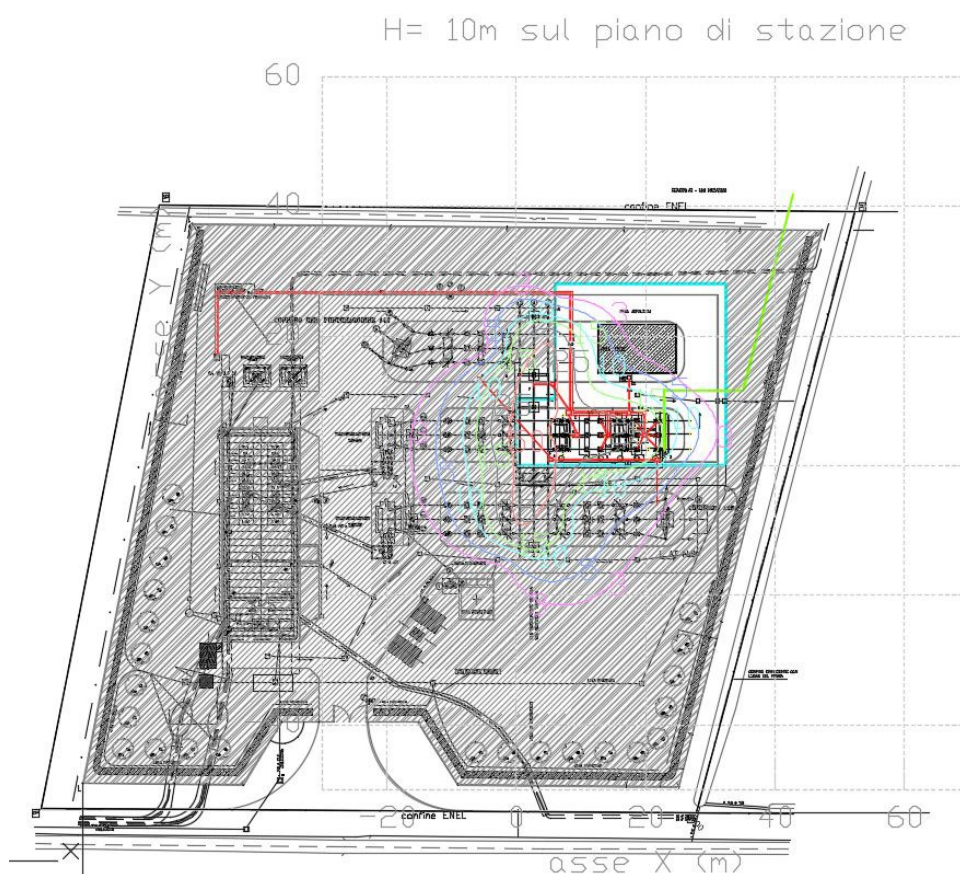


Figura 8 – Curve di isolivello del campo magnetico a 10 m dal piano di calpestio

Dai risultati delle simulazioni sopra riportate, si evince che esternamente alla recinzione esterna della Cabina primaria il campo magnetico è sempre inferiore al valore di qualità di $3 \mu\text{T}$, anche nella situazione più cautelativa in cui lo stallo funziona alla massima corrente ammissibile. Non occorre, pertanto, applicare alcuna Dpa al perimetro della CP.

4 CONCLUSIONI

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

Dalle simulazioni sopra riportate risulta che esternamente alla recinzione di confine della Cabina Primaria 132/15 kV "Tresigallo" il campo magnetico non supera mai il valore di qualità di $3 \mu\text{T}$, nemmeno utilizzando una corrente di calcolo estremamente cautelativa, pari alla massima che può transitare sugli elementi della cabina stessa. Non occorre pertanto applicare alcuna Dpa.

Allegato 1: Documento di Validazione



Documento di Validazione

Algoritmi di calcolo del software **MAGIC[®]** (**MAG**netic **I**nduction **C**alculation)

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.

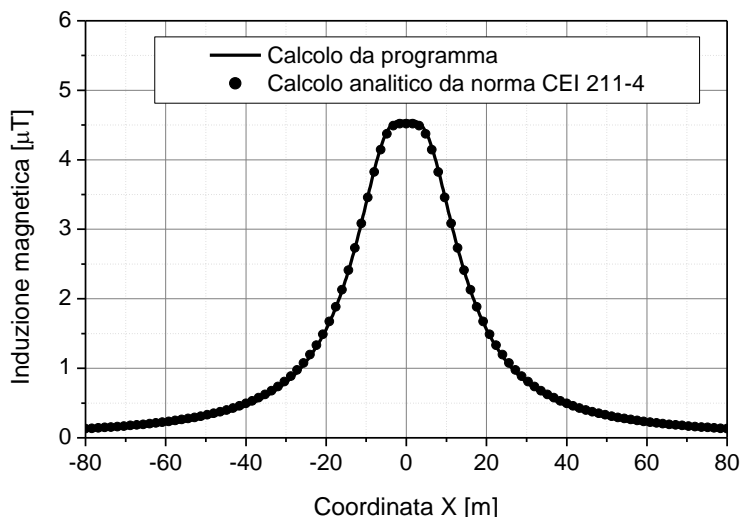


Figura 1: Induzione magnetica al suolo in prossimità di una linea aerea a doppia terna su semplice palificazione con corrente di 310: confronto tra MAGIC® e formula analitica CEI 211-4

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

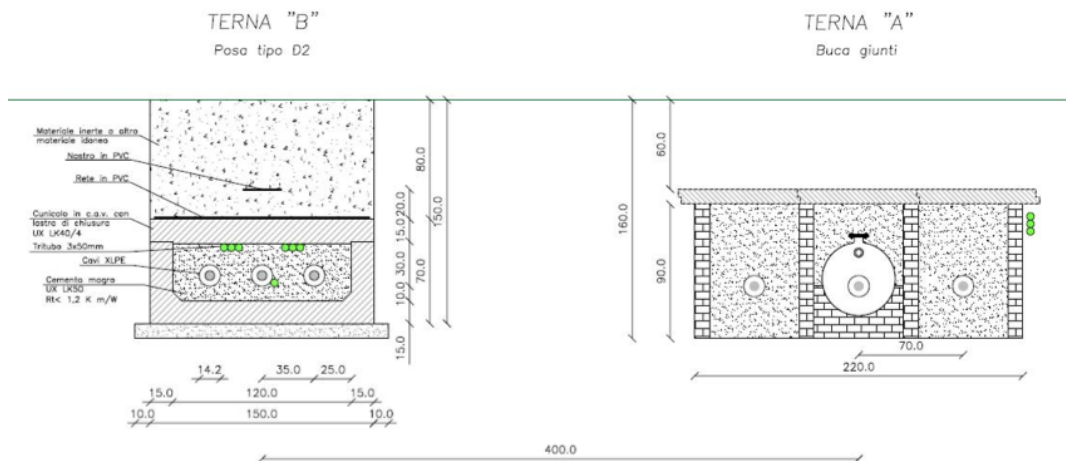


Figura 2: Affiancamento tra due linee interrate AT

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.

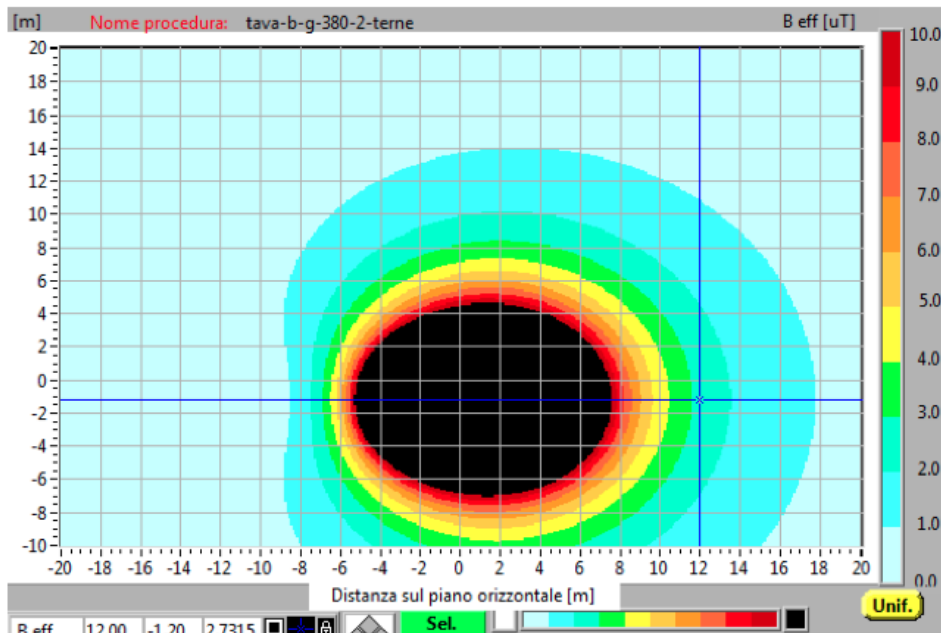


Figura 3: Mappa cromatica delle induzioni magnetiche calcolata mediante software CESI

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.

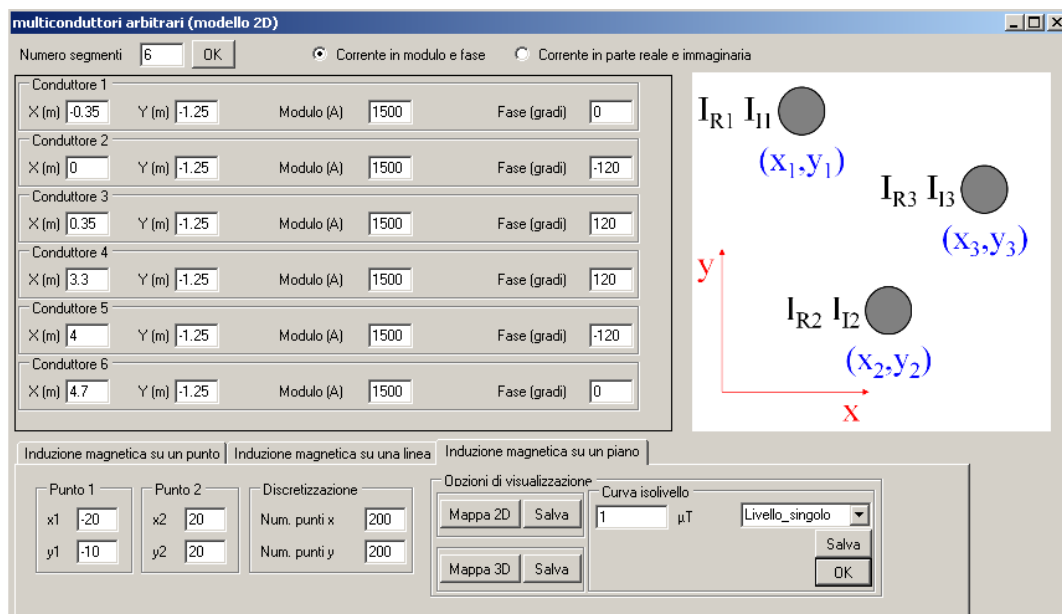


Figura 4:Schermata di ingresso modulo “multiconduttori arbitrari (modello 2D)””: dati definizione geometria e sorgenti

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

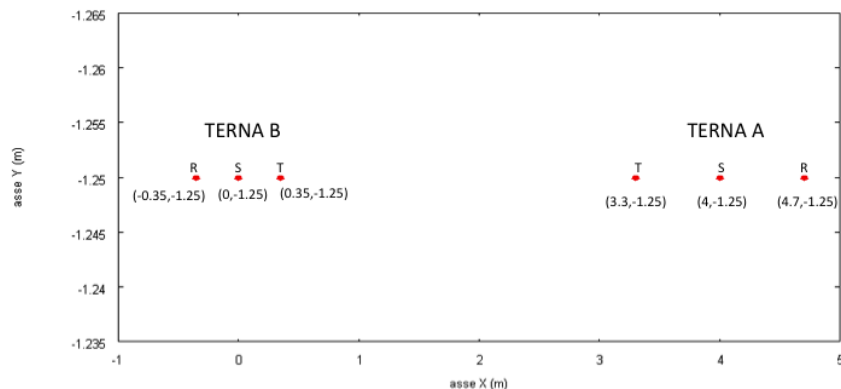


Figura 5: Geometria sorgenti

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

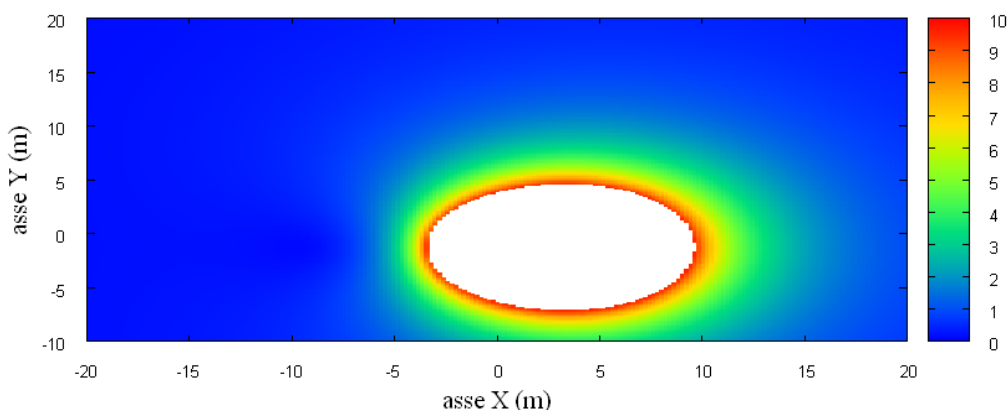


Fig. 6: Mappa cromatica dell’induzione magnetica ottenuta dal software MAGIC® (valori in microT):

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

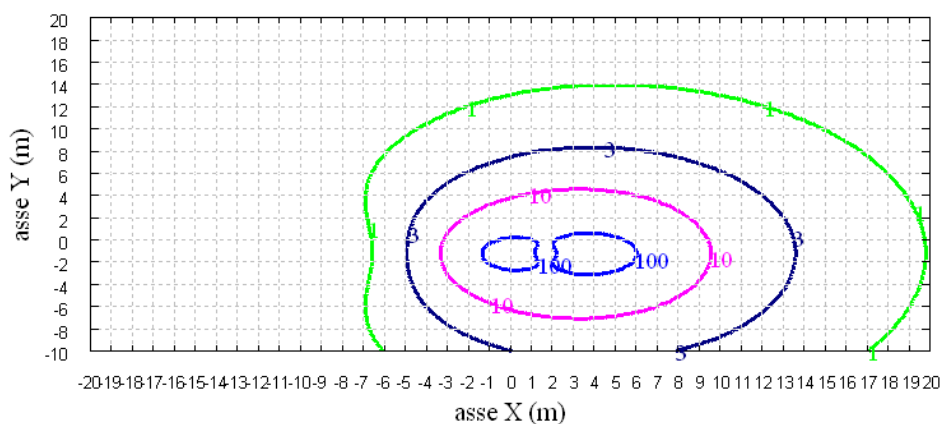


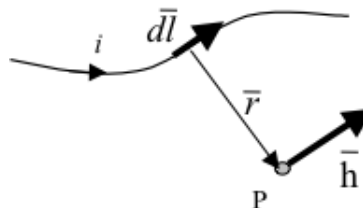
Fig. 7 Linee isolivello dell’induzione magnetica (1, 3, 10, 100 microT) da software MAGIC®.

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.

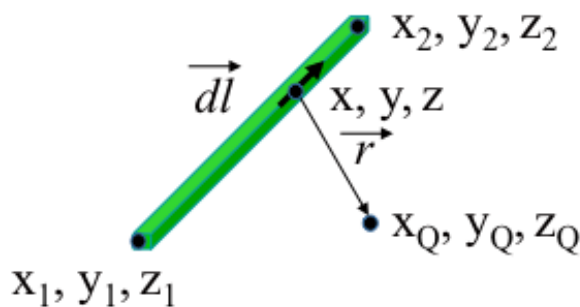


Fig. 8: Modello del segmento.

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.

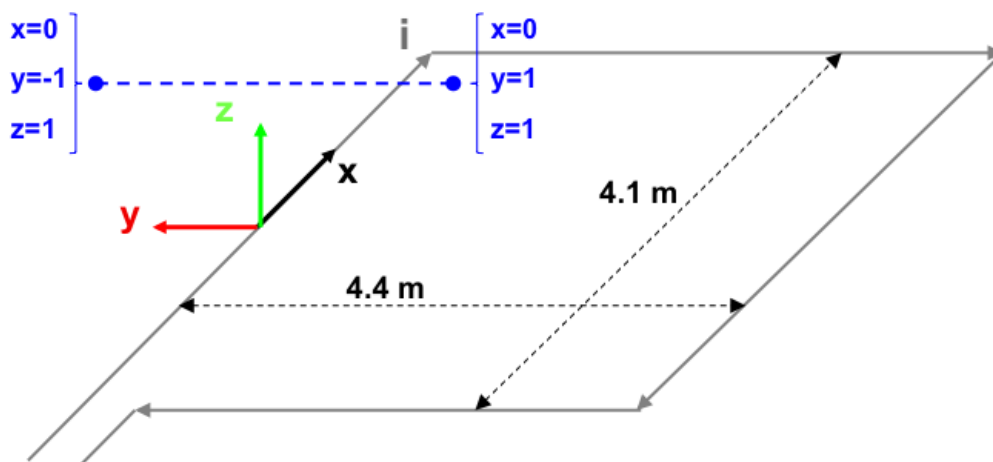


Fig. 9: Schema di spira quadrata.

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

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

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

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

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

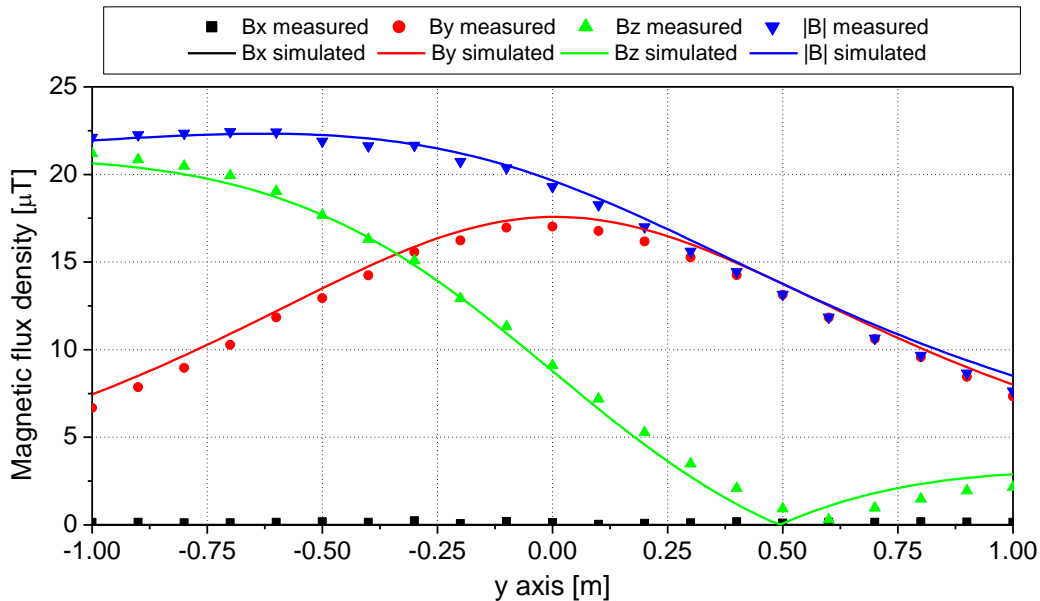


Fig. 10: Induzione magnetica misurata e calcolata mediante software MAGIC®.

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

3 Verifica del modulo tridimensionale:trasformatore di potenza

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

La validazione è condotta in due step:

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

Maggiore dettaglio sui confronti sono riportati nella seguente referenza:

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

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

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

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

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

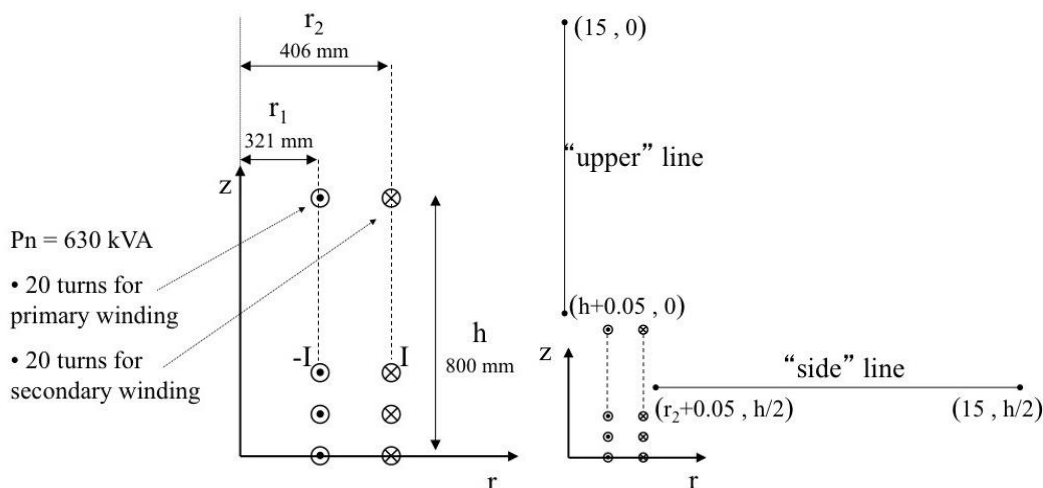


Fig. 11. Geometria del sistema (1) e linee di calcolo (2)

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

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

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

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

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

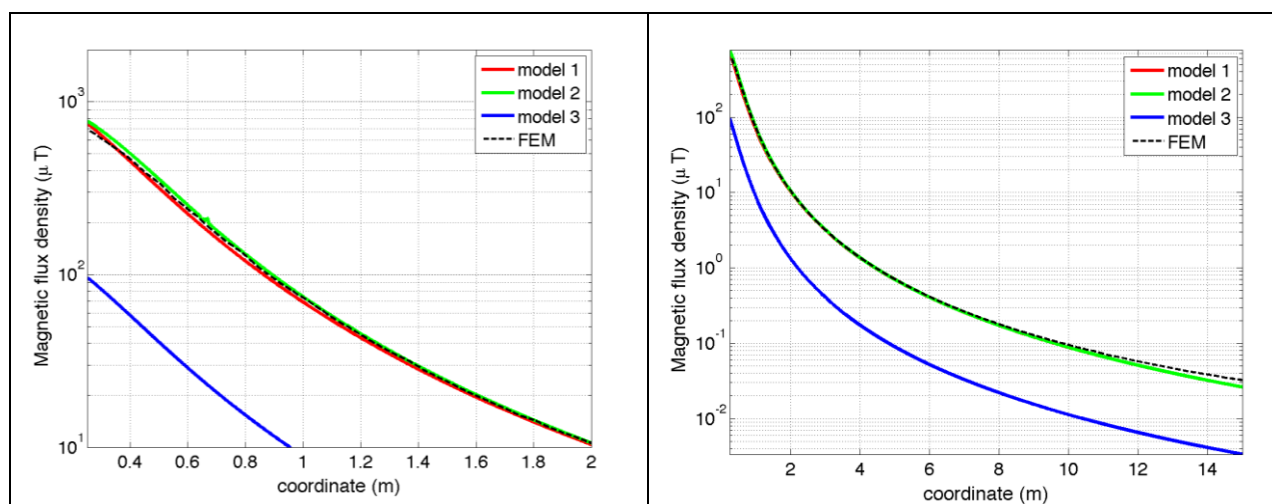


Fig. 12. Induzione magnetica lungo la linea laterale

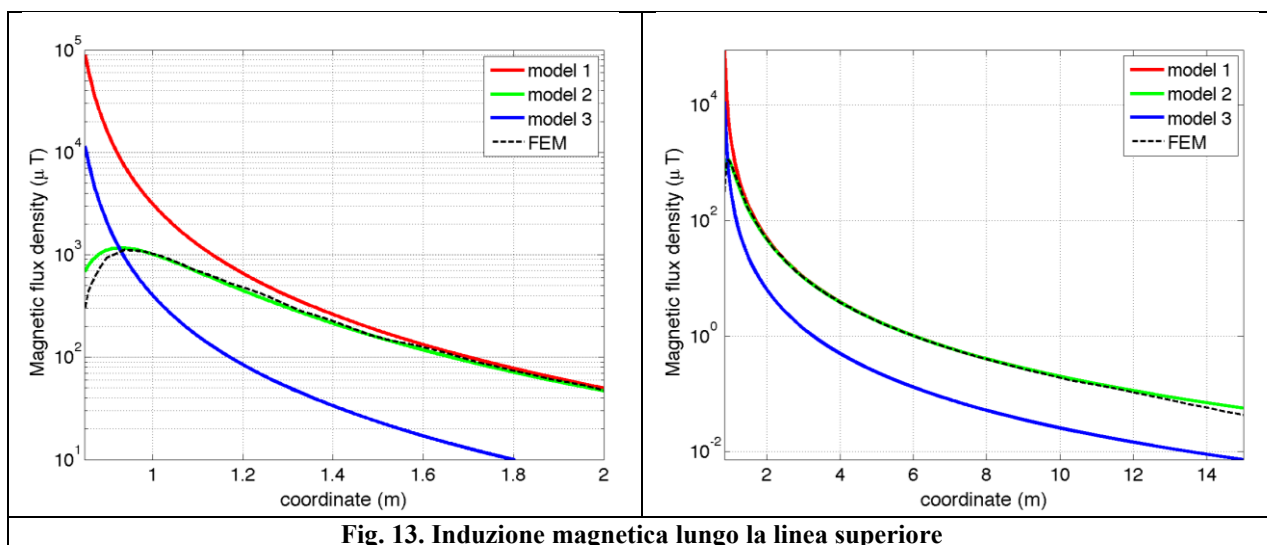


Fig. 13. Induzione magnetica lungo la linea superiore

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

3.2 Verifica del modello MAGIC del trasformatore completo con misure sperimentali

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

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

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

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

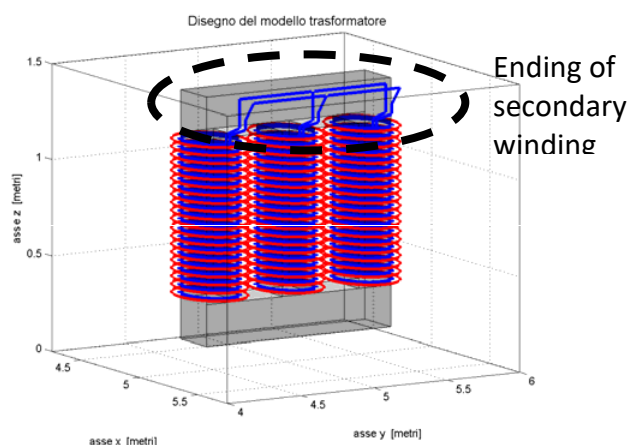


Fig. 14: Connessioni elettriche considerate al lati BT.

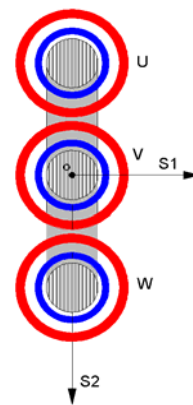


Fig. 15: Linee di calcolo S1 ed S2

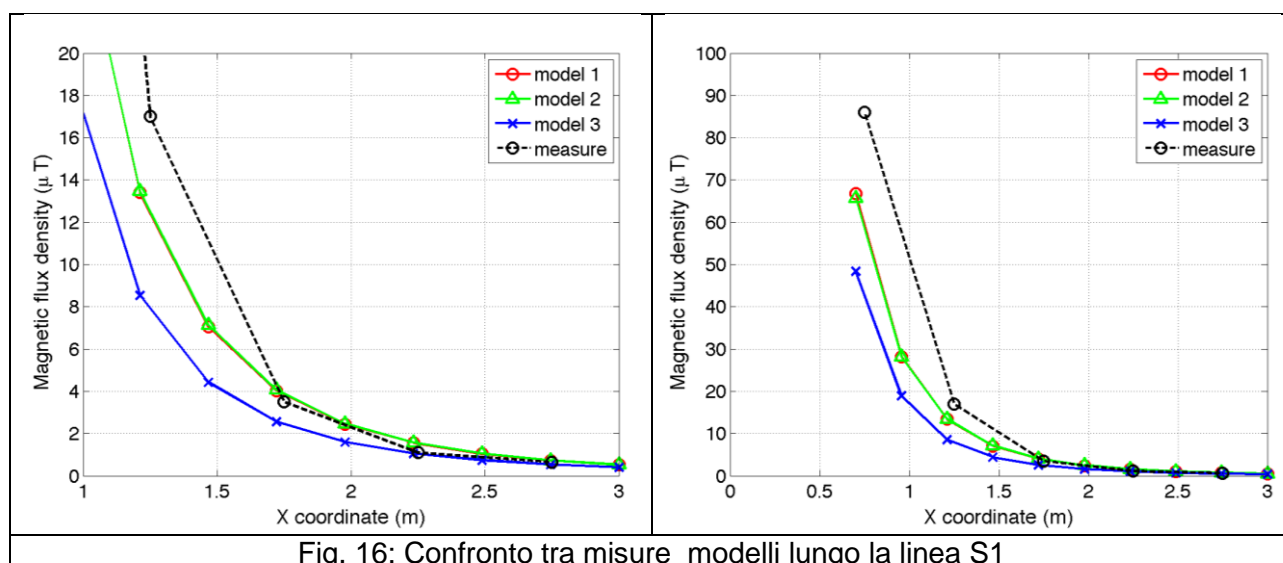


Fig. 16: Confronto tra misure modelli lungo la linea S1

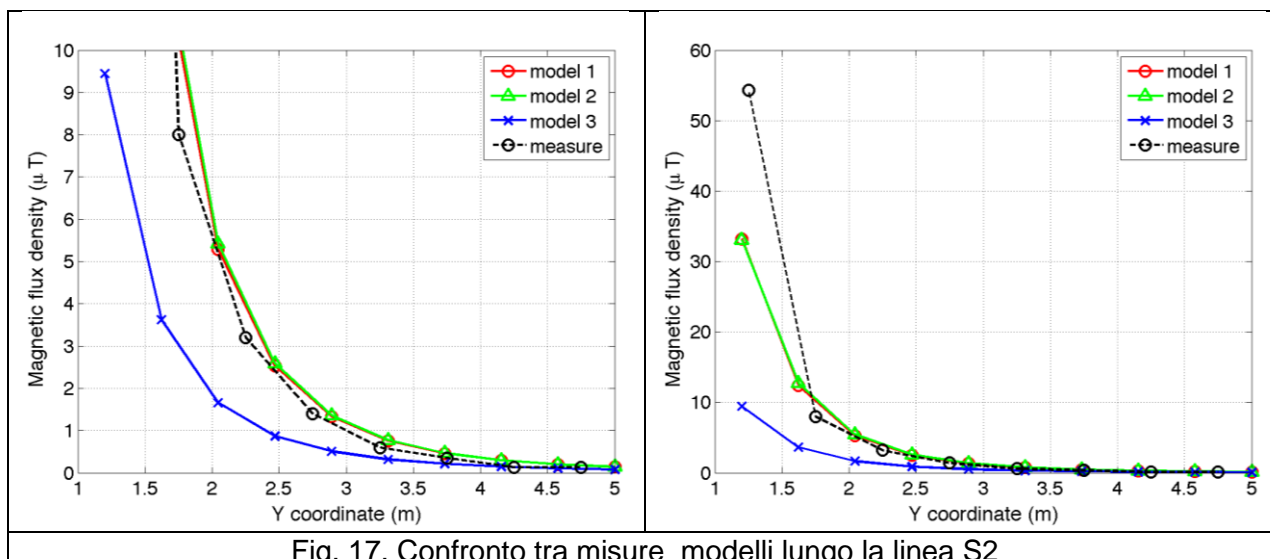


Fig. 17. Confronto tra misure e modelli lungo la linea S2

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.