



Giacca Bertani

		<i>Bertani</i>	<i>Bolognesi</i>	<i>Brugnioni</i>	
B	07/04/22	Bertani	Bolognesi	Brugnioni	Modifica SPV
A	29/09/21	Bertani	Bolognesi	Brugnioni	Emissione per autorizzazione
REVISIONE	DATA	ELABORATO	VERIFICATO	APPROVATO	DESCRIZIONE
COMMITTENTE 					IMPIANTO FANO
INGEGNERIA & COSTRUZIONI 					TITOLO RACCORDI DI LINEA AT RELAZIONE CAMPI ELETTRICI E MAGNETICI
SCALA	FORMATO	FOGLIO / DI		N. DOCUMENTO	
-	A4	1 / 24		0 2 2 0 4 B	

SOMMARIO

1	PREMESSA	3
2	QUADRO NORMATIVO	3
3	CALCOLO DEL CAMPO MAGNETICO.....	4
3.1	Correnti di calcolo.....	5
3.2	Risultati.....	5
4	ANALISI DEI RICETTORI	9
5	CONCLUSIONI	10

1 PREMESSA

Oggetto della presente relazione è il calcolo dei campi elettrici e magnetici generati dai due raccordi a 132 kV sull'elettrodotto "Fano ET – CP Saltara" necessari per collegare la nuova Cabina Primaria (CP) 132/20 kV denominata Fano Sud, che dovrà essere realizzata in Comune di Fano, Provincia di Pesaro-Urbino.

La cabina sarà realizzata al fine di permettere il collegamento alla rete di trasmissione nazionale, di un lotto di impianti fotovoltaici denominato Fano, del produttore Juwi Development 07 Srl.

L'attuale elettrodotto SE Fano ET - CP Saltara è armato con conduttore ACSR $\varnothing 31,5$ mm, pertanto i raccordi a tale elettrodotto sono progettati con il medesimo conduttore e verificati con franco minimo dal suolo pari a 10 metri come da indicazioni Terna. Il progetto è realizzato tenendo conto, per la verifica del franco minimo dal suolo e delle distanze di rispetto, di una temperatura pari a quella prevista dalla norma CEI 11-60 e dal DM 21 Marzo 1988 e cioè di 55 °C previsti per la Zona A, che porta alla possibilità di far transitare sulla linea una corrente di 870 A nel periodo freddo e 620 A nel periodo caldo. Tuttavia la progettazione è redatta in modo che i franchi minimi di legge siano verificati anche a 75 °C.

L'intervento complessivo in progetto per il collegamento degli impianti fotovoltaici comporterà, oltre alla realizzazione della Cabina Primaria e dei raccordi alla linea esistente, anche il potenziamento della linea esistente 132 kV "CP Sassoferrato – CP Fabriano" per permettere di evacuare la potenza richiesta in immissione sulla RTN. La presente relazione tratta dei soli raccordi alla linea "Fano ET – CP Saltara". I campi elettrici e magnetici prodotti dalla Cabina Primaria "Fano Sud" e dal ripotenziamento della linea esistente 132 kV "CP Sassoferrato – CP Fabriano" sono analizzati in documenti specifici.

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

	Campo magnetico (μT)	Campo elettrico (V/m)	NOTE
Limite di esposizione	100	5000	-
Valore di attenzione	10	-	Da verificarsi in luoghi adibiti a permanenza non inferiore alle 4 ore
Obiettivo di qualità	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 DMLPP 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 i raccordi alla linea 132 kV "Fano ET – CP Saltara" faranno 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 del conduttore di riferimento con sezione di 31,5 mm, come definito dalla norma CEI 11-60, conformemente a quanto disposto dal 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

I raccordi all'elettrodotto esistente a 132 kV "Fano ET – CP Saltara" saranno realizzati con conduttore standard bimetallico in alluminio-acciaio del diametro di 31,5 mm. Gli elettrodotti in oggetto essendo localizzati in provincia di Pesaro-Urbino ad una quota di circa 50 m sul livello del mare rientrano in zona A: pertanto la portata in corrente in servizio normale che può circolare su di essi definita dalla norma CEI 11-60 nel periodo invernale è pari a 870 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 tre 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 applicando le condizioni standard, per la verifica dei franchi dal suolo e delle distanze di rispetto, ma cautelativamente le medesime sono state verificate anche con temperature maggiori 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 sui raccordi le seguenti correnti:

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

Pertanto, in base alle necessità della rete elettrica di trasmissione espresse da Terna per l'area in oggetto, il progetto dei raccordi tiene conto che questi possano essere eserciti in futuro con portata di 1115 A, anche se tale ipotesi al momento non è materialmente fattibile in quanto la linea "Fano ET – CP Saltara", non è progettata per tale corrente.

Per interpretare lo spirito cautelativo della norma e nell'ottica di uno sviluppo futuro della rete, per il calcolo delle Distanze di Prima Approssimazione si è scelto di utilizzare una corrente di verifica dei raccordi comunque pari a **1115 A**.

3.2 Risultati

I valori di campo magnetico generati dai raccordi sono calcolati al fine di definire le ampiezze delle fasce di prima approssimazione da applicarsi dall'asse degli stessi, considerando l'aumento dei livelli di campo magnetico dovuti al parallelismo tra le due linee.

Riportiamo nel seguito le mappe sul piano y-z dei campi magnetici prodotti dai raccordi, nel punto in cui questi sono paralleli e rettilinei: da questa sezione si evince la larghezza della Dpa da applicarsi all'asse degli elettrodotti al fine di verificare il rispetto del valore di qualità di 3 μ T è di 39 metri.

Linee aeree - calcolo su piano yz - quota X=150

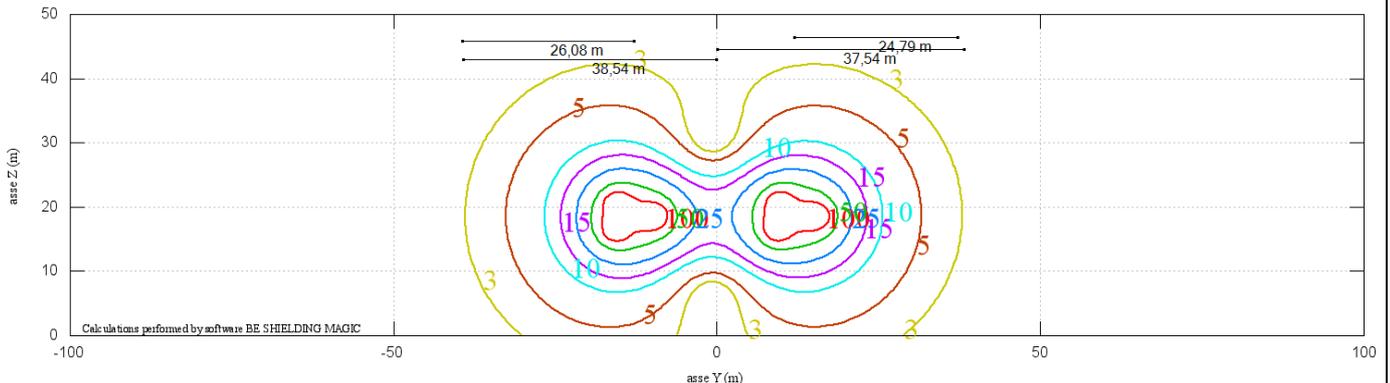


Figura 1 – Livelli di campo magnetico prodotto dai raccordi nei tratti rettilinei e paralleli

Dalla figura 1 si può osservare 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 può ricavare le ampiezze delle fasce di rispetto da applicarsi all'asse dei singoli elettrodotti del valore di qualità di $3 \mu\text{T}$, che riportiamo nella tabella sottostante, arrotondate per eccesso, come previsto dalla norma.

DPA			
configurazione	DPA dall'asse del singolo elettrodotto verso l'esterno (m)	DPA calcolate con singolo elettrodotto e corrente di calcolo pari a 1115 A	DPA riportate dalle Linee Guida con corrente di calcolo pari a 870 A
triangolo	26,5	25	22

L'ultima colonna a destra della tabella riporta la distanza di prima approssimazione 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 la corrente nominale del conduttore ACSR $\varnothing 31,5 \text{ mm}$ in zona A nel periodo freddo, la penultima riporta la DPA per un singolo elettrodotto con conduttori a triangolo e corrente di esercizio pari a 1115 A mentre le altre riportano la distanza nel caso in oggetto, risultante dal calcolo tridimensionale.

Il DM 29/05/2008 prevede che nel caso in cui il tracciato di un elettrodotto "ha un cambio di direzione del piano orizzontale, si verifica all'interno dell'angolo tra le due campate un incremento dell'estensione della fascia di rispetto che è massimo sul piano verticale passante per la bisettrice dell'angolo tra le due campate".

In corrispondenza dei sostegni 1A e 1B di raccordo con la linea esistente si osservano due angoli di 83° e 90° allo stesso modo in corrispondenza dei sostegni P5A e P5B i raccordi deviano di circa 50° verso sud-est per raggiungere la CP Fano Sud. Si è simulato il valore del campo magnetico a 5, 10 e 20 metri dal suolo, fissando lo 0 a 50 mslm coincidente con la quota di base del palo P1A.

I risultati dei calcoli e le Dpa sono state determinate in base agli studi tridimensionali elaborati con il software di calcolo "Magic" di BESHielding e sono riportati nelle figure seguenti.

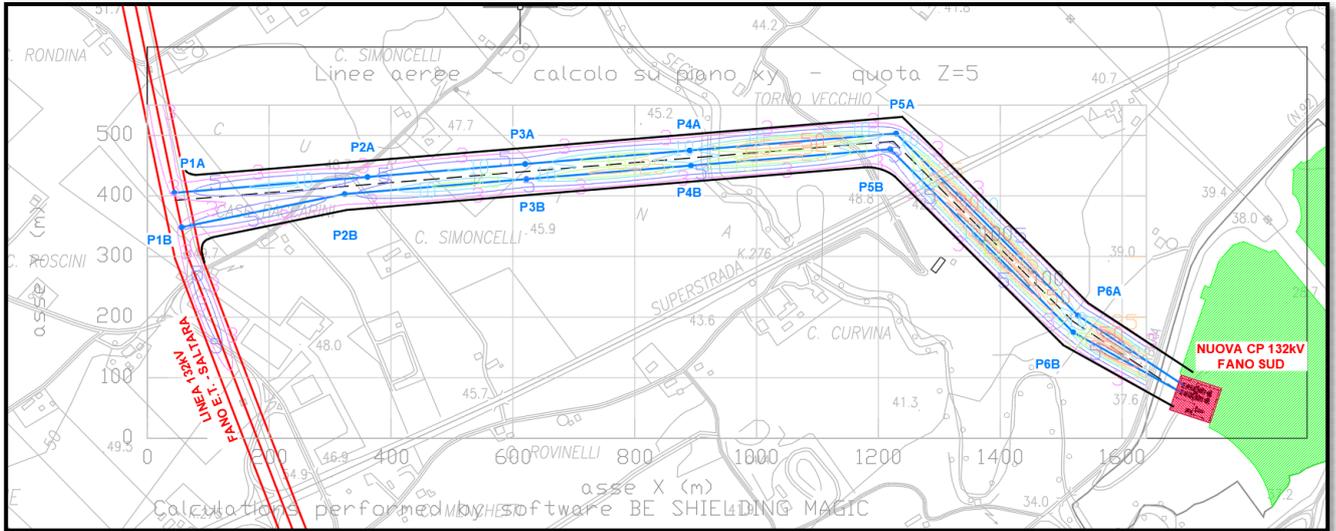


Figura 2 – Livelli di campo magnetico a 55 mslm

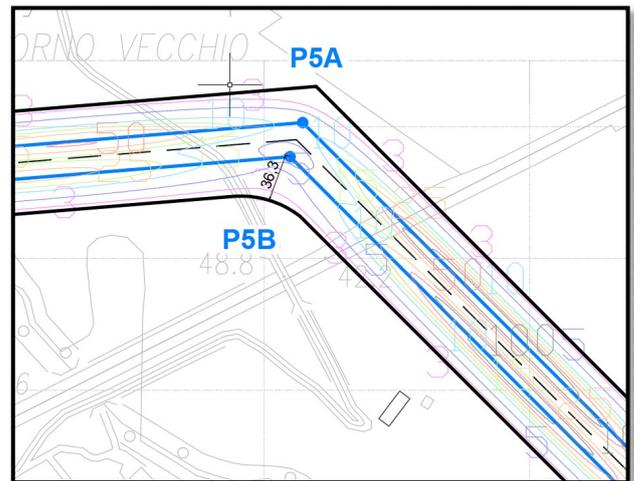
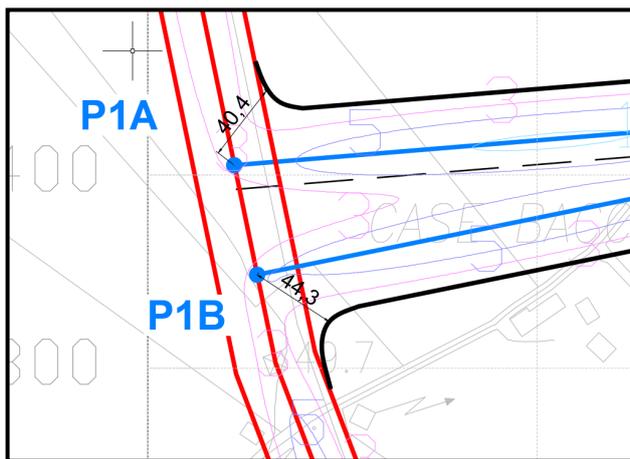


Figura 3 – Dettaglio dei livelli di campo magnetico in corrispondenza dei sostegni P1A, P1B, P5A e P5B a 55 mslm

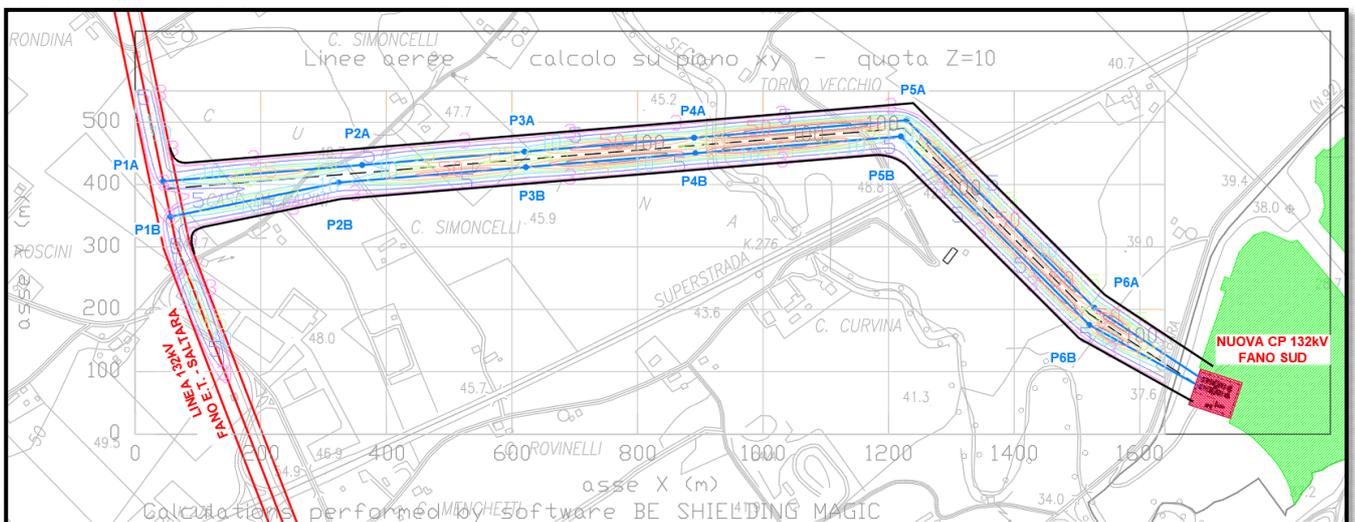


Figura 4 – Livelli di campo magnetico a 60 mslm

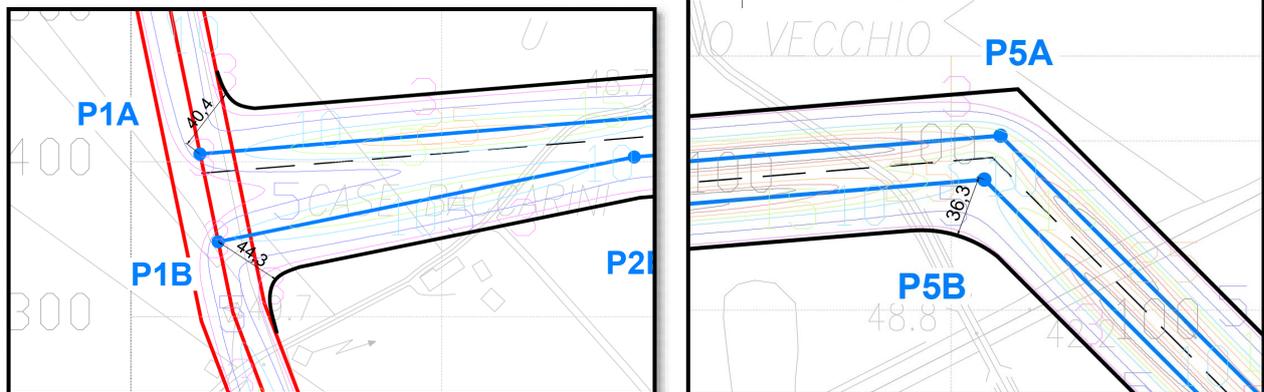


Figura 5 – Dettaglio dei livelli di campo magnetico in corrispondenza dei sostegni P1A, P1B, P5A e P5B a 60 mslm

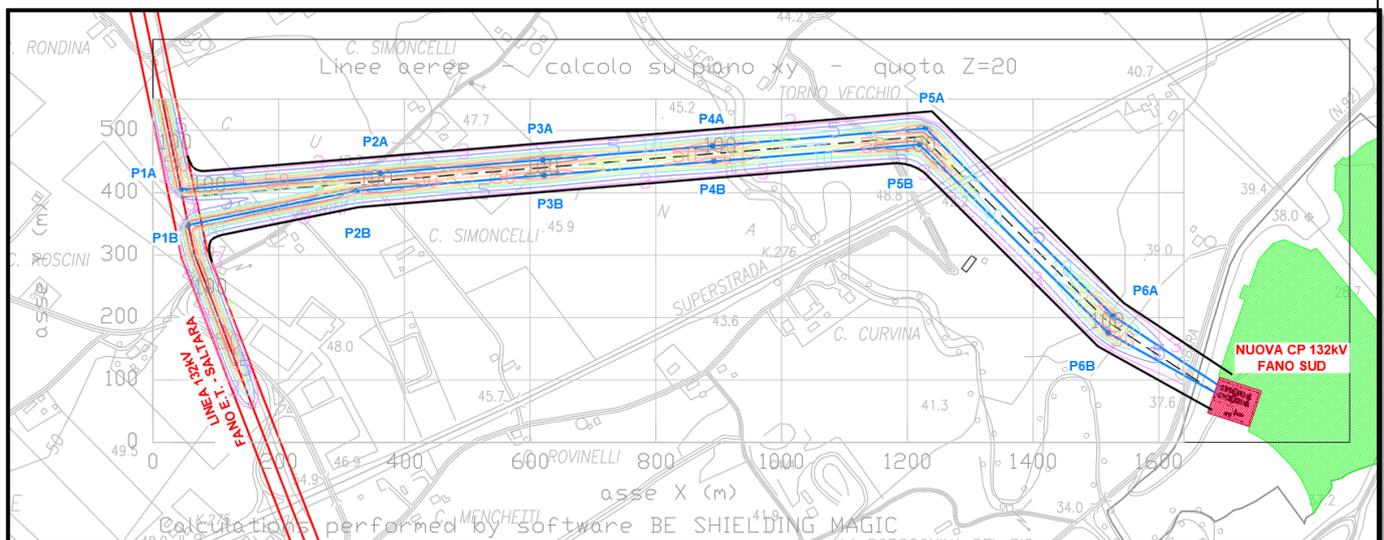


Figura 6 – Livelli di campo magnetico a 70 mslm

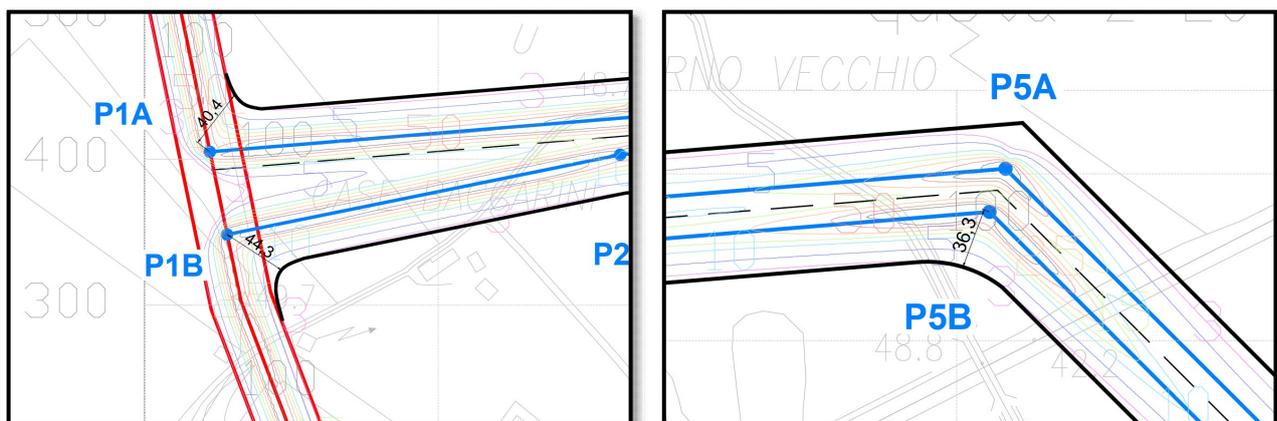


Figura 7 – Dettaglio dei livelli di campo magnetico in corrispondenza dei sostegni P1A, P1B, P5A e P5B a 70 mslm

Dalle figure precedenti si osserva che una DPA di 26,5 metri dall'asse di ciascun elettrodotto è sufficiente per garantire il valore di qualità di $3 \mu\text{T}$ in ogni punto della linea ad eccezione della parte interna ai cambi di direzione in prossimità dei sostegni P1A, P1B e P5B.

In questi punti occorre mantenere una DPA rispettivamente di 40,4 m da P1A, 44,3 m da P1B e 33,5 m da P5B, misurate sulla bisettrice dell'angolo.

4 ANALISI DEI RICETTORI

L'area dove si sviluppano i raccordi è un'area agricola ai margini di un'area industriale. In prossimità della linea è presente un deposito di mezzi a cielo aperto dove non sono visibili strutture che prevedono la permanenza continuativa di persone per un tempo superiore alle 4 ore giorno.

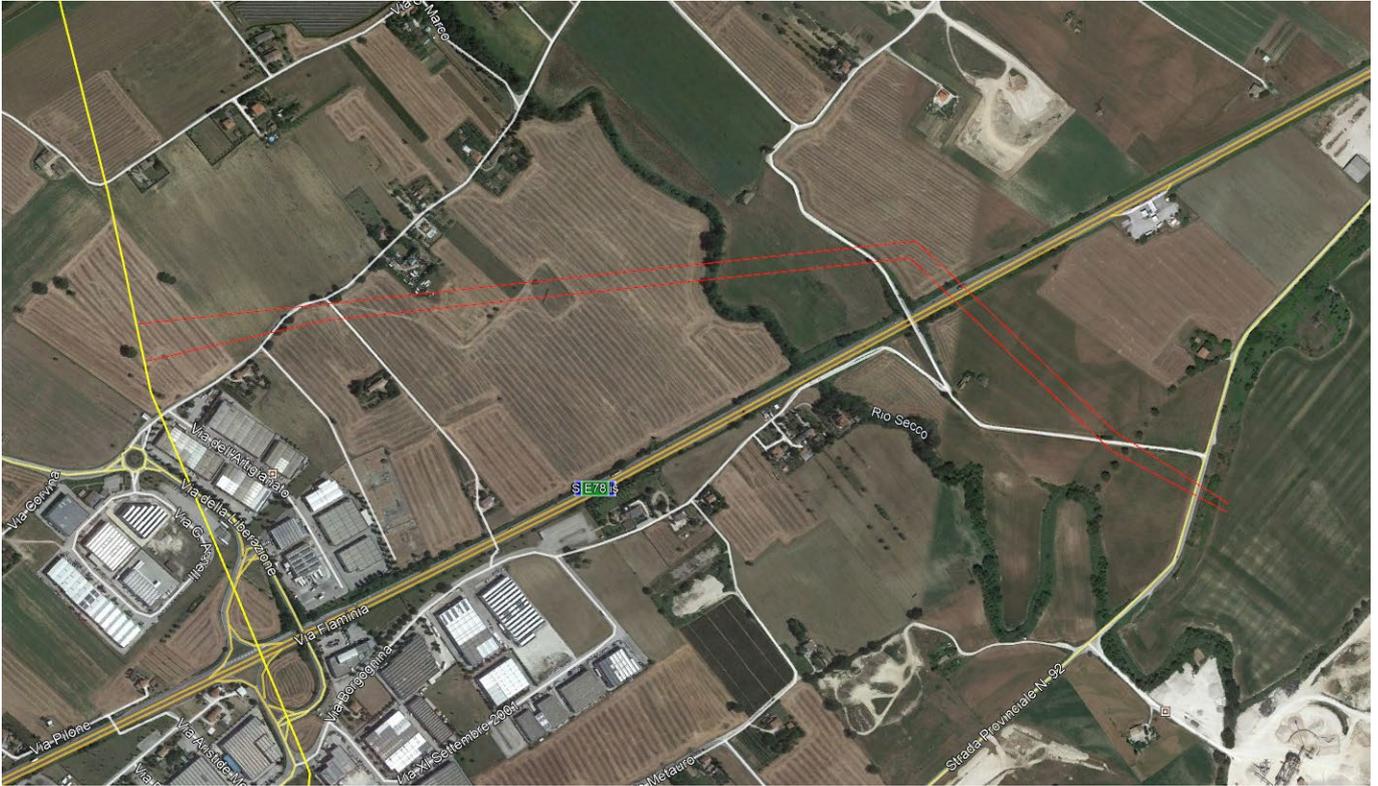


Figura 8 - Foto aerea con indicazione dell'elettrodotto esistente (in giallo) e dei raccordi in progetto (in rosso)

Durante il sopralluogo sono stati individuati i ricettori sensibili posti a meno di 60 metri dall'asse di ciascun 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.

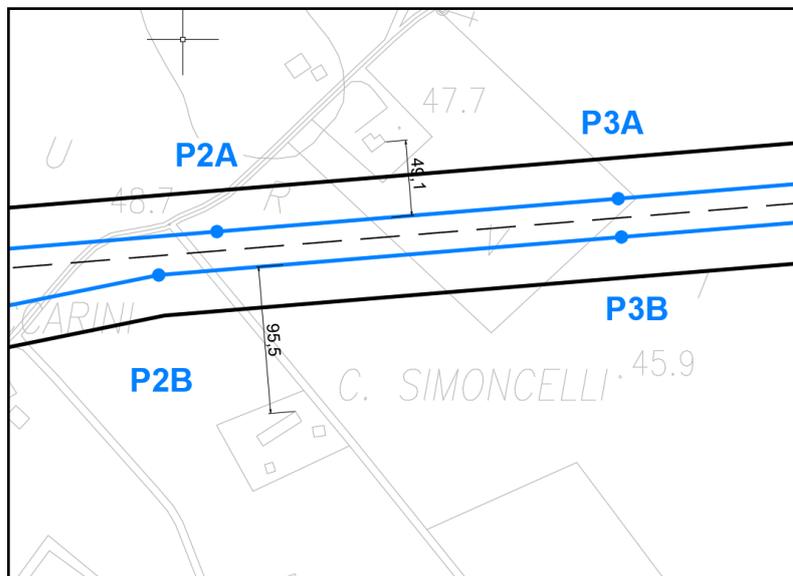


Figura 9- Distanza dei due ricettori posti in prossimità delle campate P2 - P3

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 μ T, 10 μ T e 3 μ 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.

I raccordi in oggetto hanno la funzione di connettere la cabina primaria CP Fano Sud, collegata a un lotto di tre parchi fotovoltaici, alla rete elettrica nazionale mediante un entra ed esci sull'esistente elettrodotto "Fano ET – CP Saltara". Le simulazioni sono state effettuate in via cautelativa considerando una corrente in transito di 1115 A sui raccordi e 870 A sull'elettrodotto esistente. È stato rilevato il rispetto del valore di qualità di 3 μ T a 26,5 metri dall'asse di ciascun raccordo: tale fascia necessita di essere ampliata, come precedentemente descritto, internamente ai cambi di direzione corrispondenti ai sostegni P1A, P1B e P5B.

Come evidenziato in tale fascia non ricadono edifici che prevedono la permanenza di persone per un tempo superiore alle 4 ore/giorno.

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.

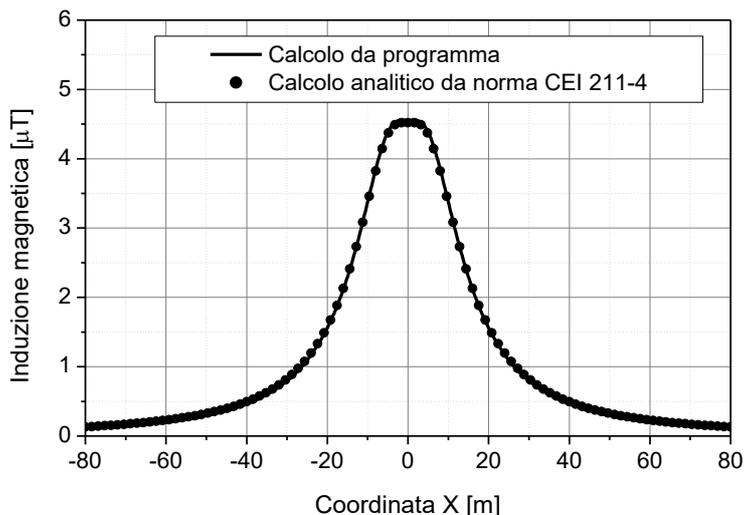


Figura 1: Induzione magnetica al suolo in prossimità di una linea aerea a doppia terna su semplice palificazione con corrente di 310: confronto tra MAGIC® e formula analitica CEI 211-4

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

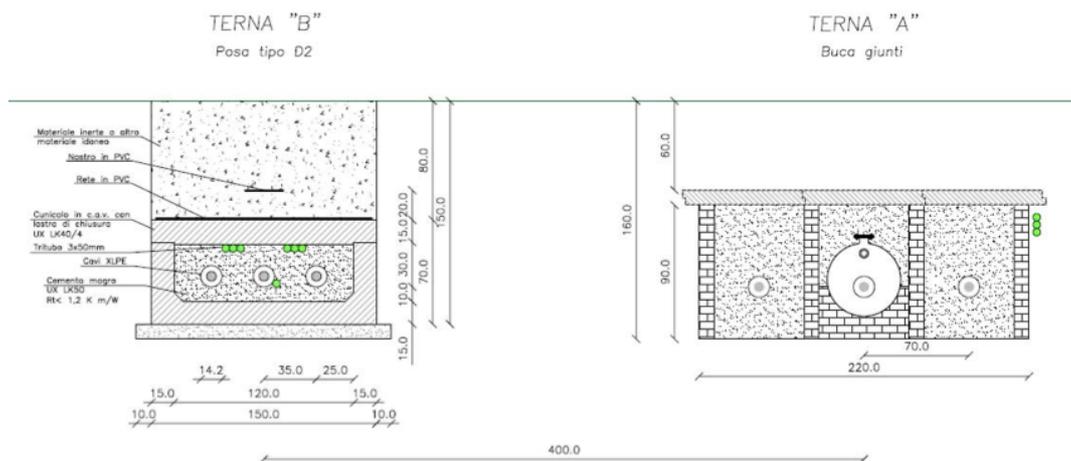


Figura 2: Affiancamento tra due linee interrate AT

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.

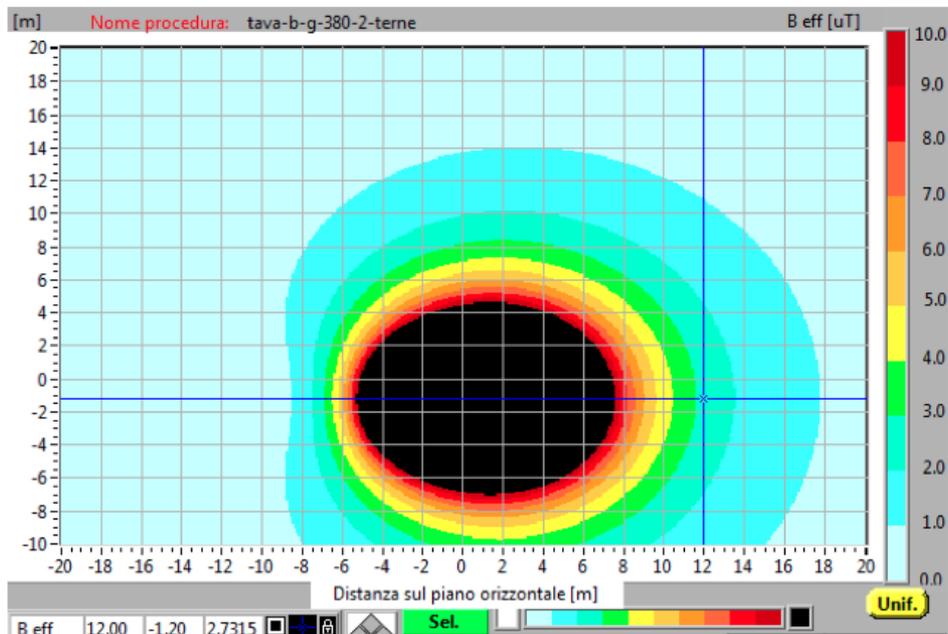


Figura 3: Mappa cromatica delle induzioni magnetiche calcolata mediante software CESI

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.

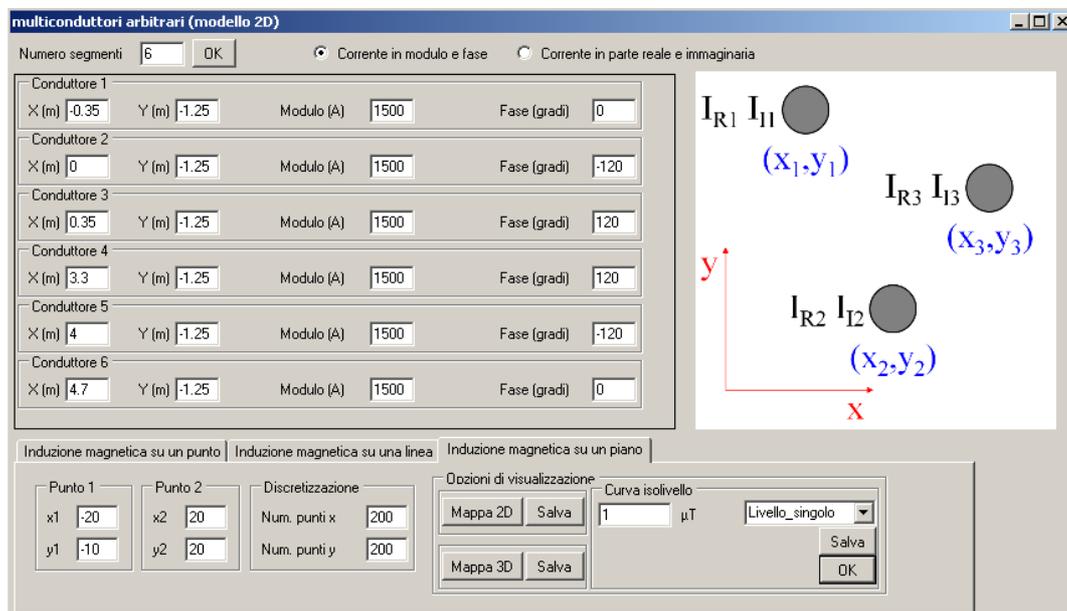


Figura 4: Schermata di ingresso modulo “multiconduttori arbitrari (modello 2D)”: dati definizione geometria e sorgenti

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

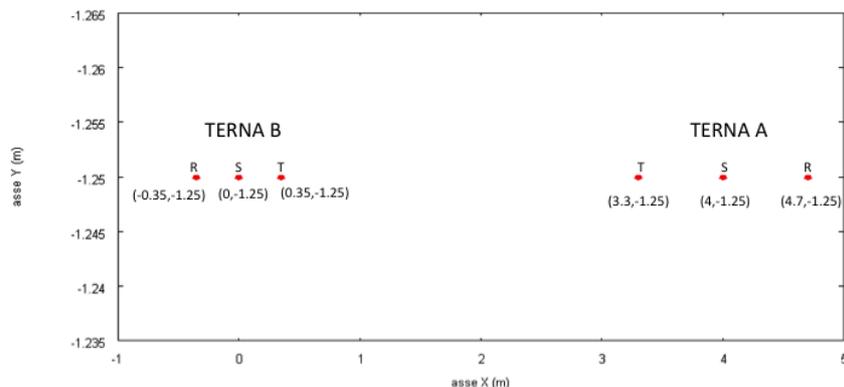


Figura 5: Geometria sorgenti

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

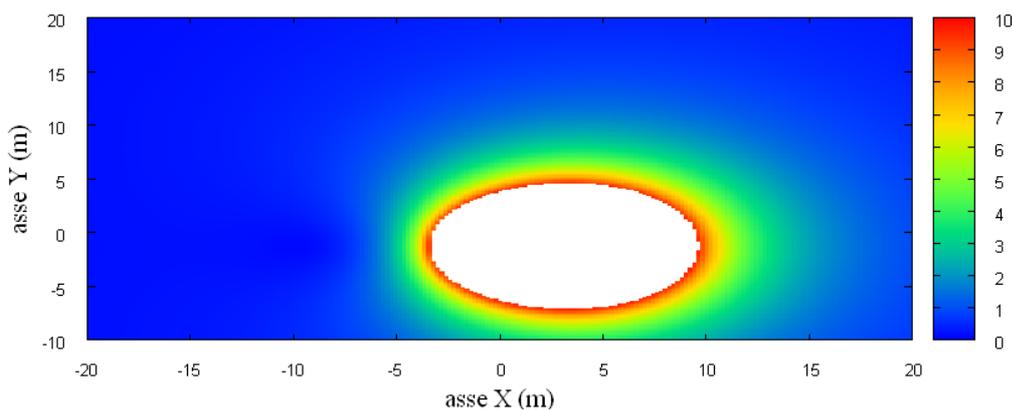


Fig. 6: Mappa cromatica dell’induzione magnetica ottenuta dal software MAGIC® (valori in microT):

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

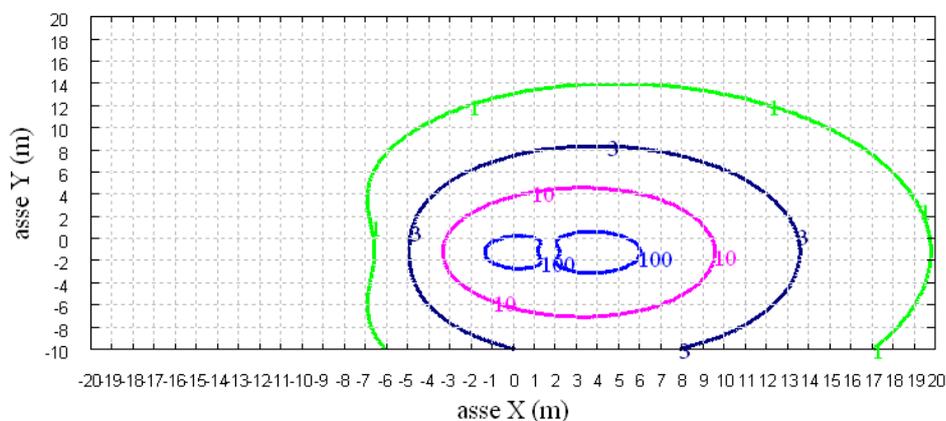
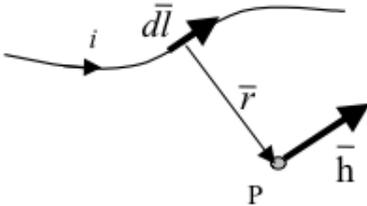


Fig. 7 Linee isolivello dell’induzione magnetica (1, 3, 10, 100 microT) da software MAGIC®.

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:

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

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.

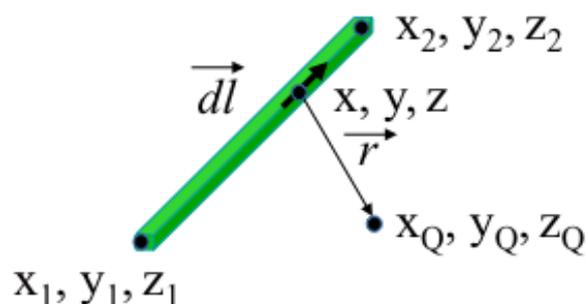


Fig. 8: Modello del segmento.

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.

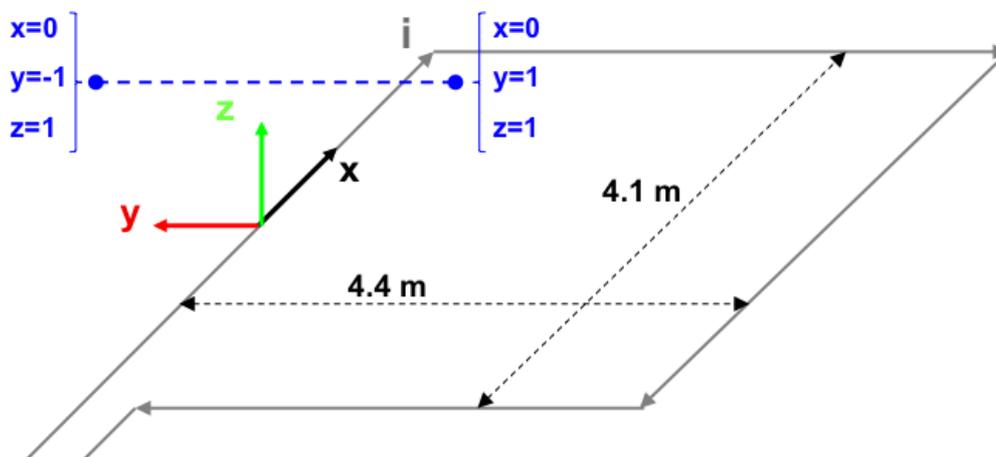


Fig. 9: Schema di spira quadrata.

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

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

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

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

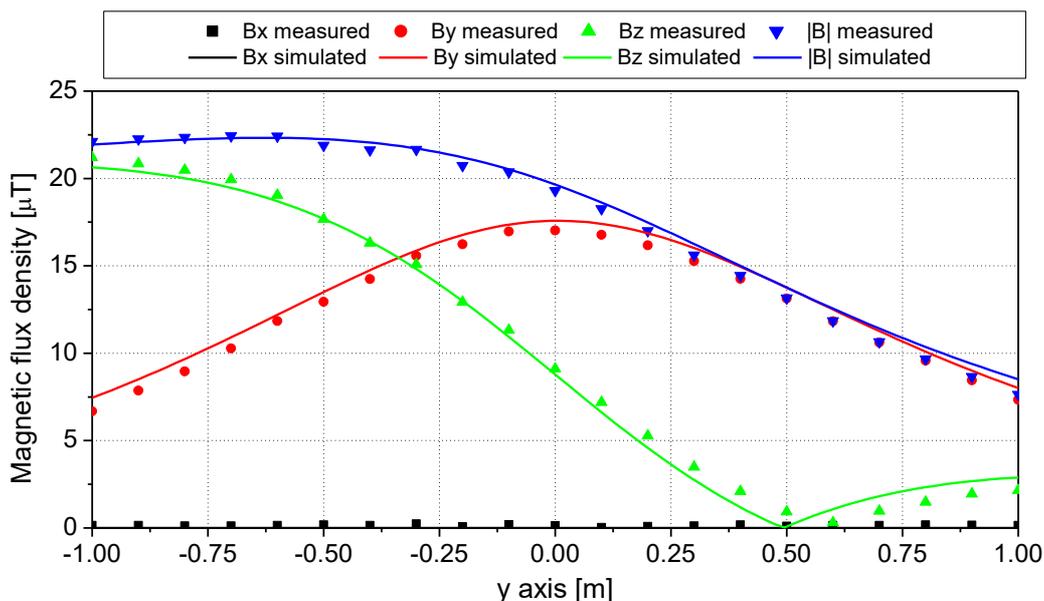


Fig. 10: Induzione magnetica misurata e calcolata mediante software MAGIC®.

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

3 Verifica del modulo tridimensionale:trasformatore di potenza

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

La validazione è condotta in due step:

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

Maggiore dettaglio sui confronti sono riportati nella seguente referenza:

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

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

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

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

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

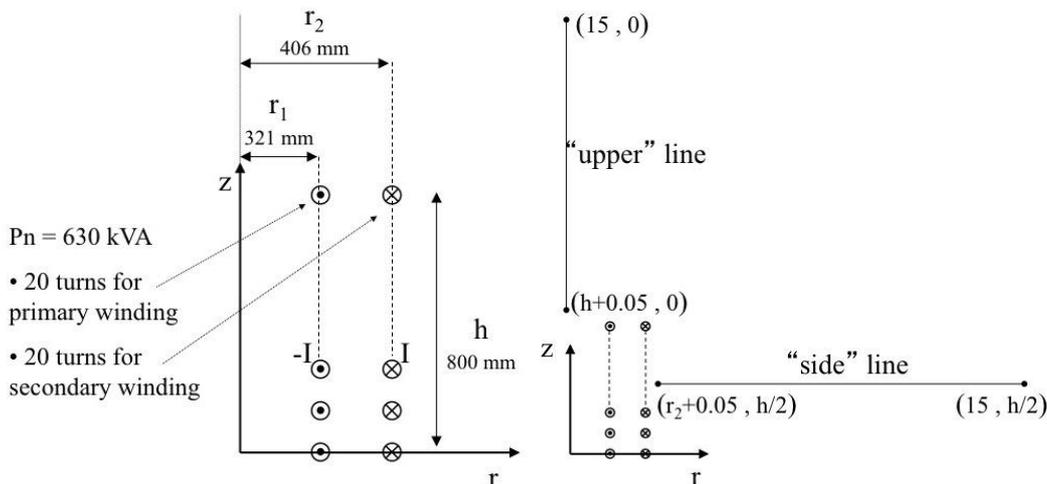


Fig. 11. Geometria del sistema (1) e linee di calcolo (2)

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

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

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

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

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

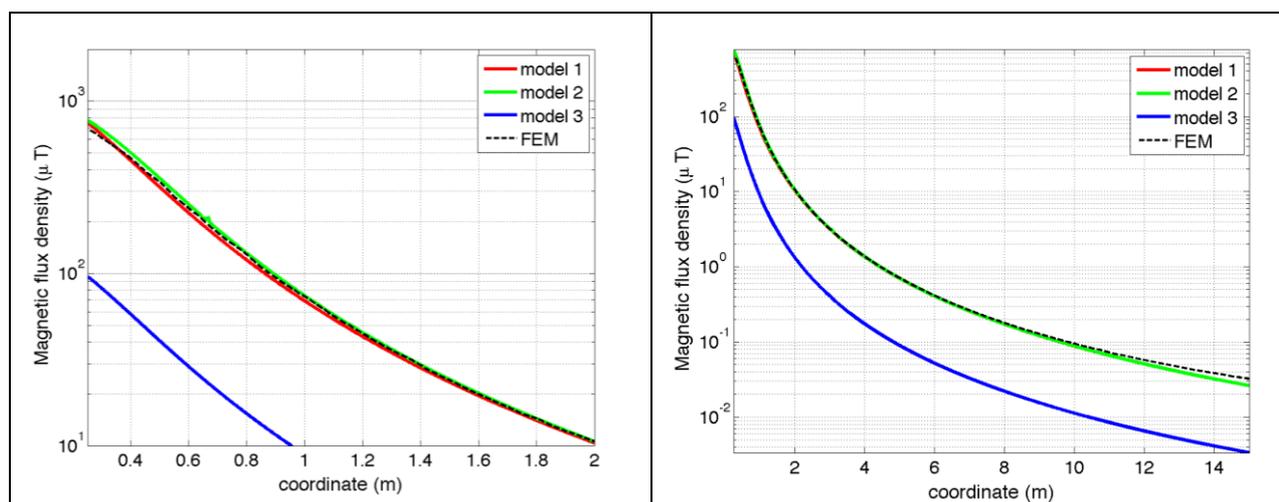


Fig. 12. Induzione magnetica lungo la linea laterale

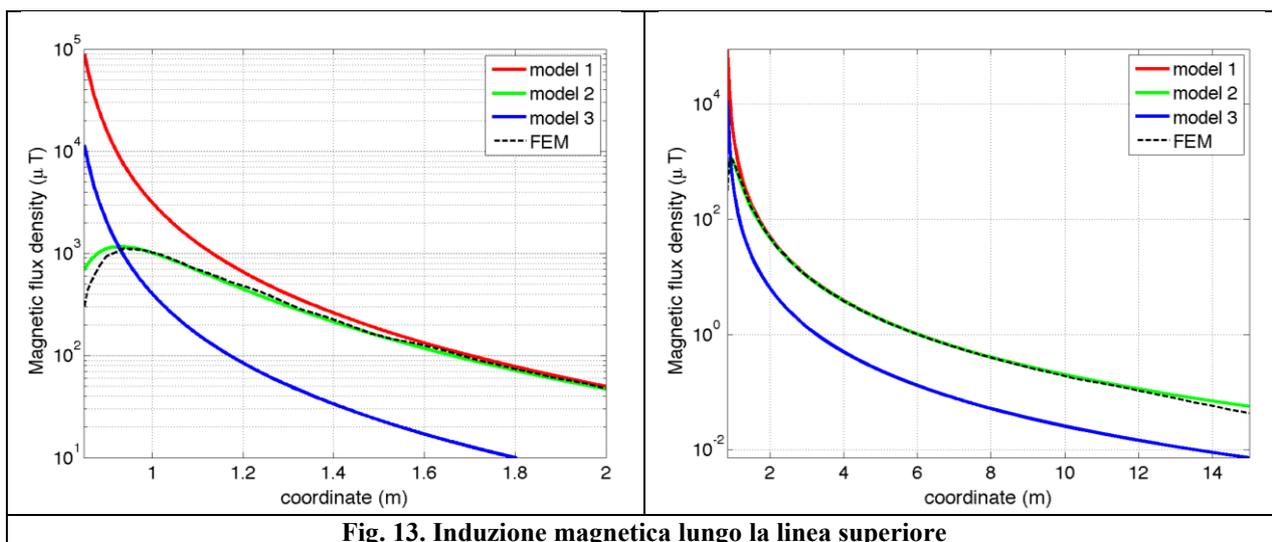


Fig. 13. Induzione magnetica lungo la linea superiore

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

3.2 Verifica del modello MAGIC del trasformatore completo con misure sperimentali

In questo paragrafo 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.

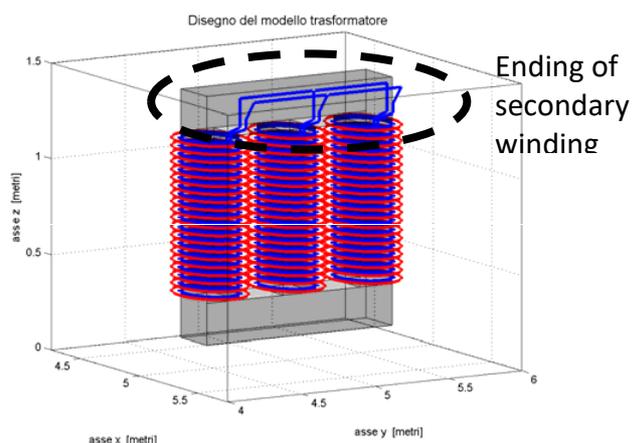


Fig. 14: Connessioni elettriche considerate ai lati BT.

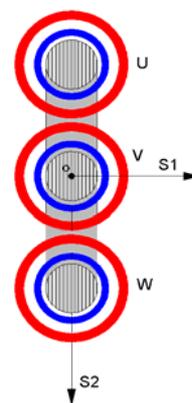


Fig. 15: Linee di calcolo S1 ed S2

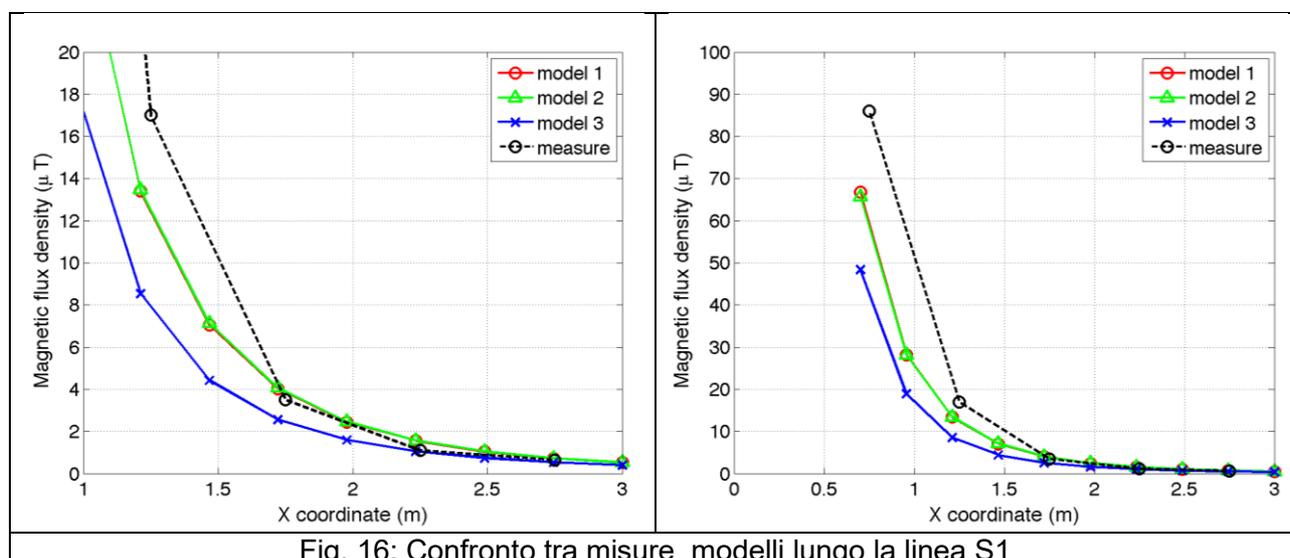


Fig. 16: Confronto tra misure modelli lungo la linea S1

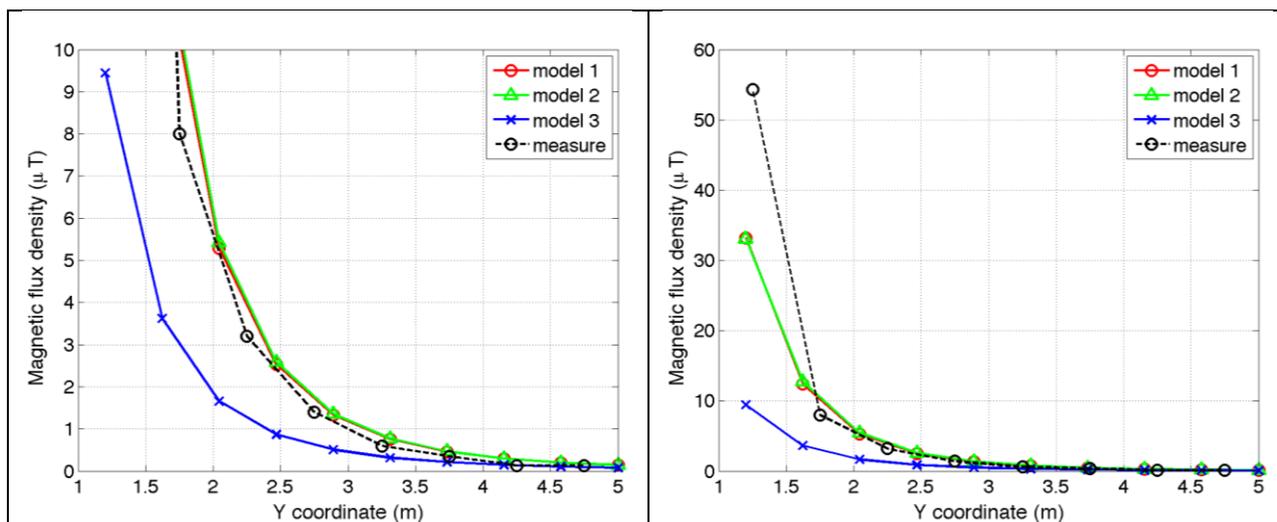


Fig. 17. Confronto tra misure modelli lungo la linea S2

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.