

		<i>Bertani</i>	<i>Bolognesi</i>	<i>Brugnoni</i>	
C	06/12/22	Bertani	Bolognesi	Brugnoni	Aggiornamento utenti
B	10/02/22	Bertani	Bolognesi	Brugnoni	Aggiornamento utenti
A	30/07/21	Bertani	Bolognesi	Brugnoni	Emissione per autorizzazione
REVISIONE	DATA	ELABORATO	VERIFICATO	APPROVATO	DESCRIZIONE
INGEGNERIA & COSTRUZIONI 					IMPIANTO PUNTO DI RACCOLTA MASSERIA MURAZZO TITOLO RELAZIONE CAMPI ELETTRICI E MAGNETICI
SCALA	FORMATO	FOGLIO / DI		N. DOCUMENTO	
-	A4	1 / 26		0 5 3 0 4 C	

SOMMARIO

1	PREMESSA	3
2	QUADRO NORMATIVO	3
3	CALCOLO DEL CAMPO MAGNETICO.....	4
3.1	Correnti di calcolo.....	7
3.2	Risultati.....	8
4	CONCLUSIONI	12

1 PREMESSA

Oggetto della presente relazione è il calcolo dei campi elettrici e magnetici generati dalla nuova Stazione Elettrica 150 kV denominata "Masseria Maruzzo" sita in comune di Montecilfone, provincia di Campobasso (Molise) e del cavo di connessione di questa alla futura Stazione Elettrica 380/150 kV di Terna posta nelle vicinanze.

La stazione sarà realizzata al fine di permettere il collegamento alla rete di trasmissione nazionale, tramite la futura Stazione Elettrica RTN 380/150 kV di Montecilfone, di 5 diversi impianti di produzione di energia da fonti rinnovabili in modo da garantire il limite massimo di potenza immessa nello stallo della stazione RTN SE 380/150 kV "Montecilfone". In prima fase la progettazione contemplava l'occupazione di due stalli dell'impianto ai seguenti produttori "Vitalia Italia" e "Green Venture Montenero", che condividevano lo stallo in SE RTN. Successivamente, a valle dell'ulteriore richiesta con modello 4a/bis, Terna comunica la condivisione con altri due produttori: "Fri EI" e "Tavenna Solar Park". Un'ulteriore richiesta di condivisione vede l'occupazione di uno stallo disponibile, nel punto di raccolta, da parte del produttore "ARNG Solar III" facente parte, come "Green Venture Montenero", del gruppo "V-Ridium".

I suddetti impianti saranno connessi sia in media che in alta tensione con il punto di raccolta di Masseria Murazzo: per gli impianti che saranno collegati in MT è prevista per ciascun produttore una cabina di trasformazione MT/AT nel punto di raccolta, mentre per l'impianto connesso in AT sarà previsto un arrivo in cavo. Un cavo AT interrato della sezione di 1.600 mm² conterà poi il punto di raccolta con la futura Stazione Elettrica RTN 380/150 kV di Montecilfone. In questo modo, cinque diversi impianti occuperanno un solo stallo sulla stazione RTN, in grado di connettere potenze per 250 MVA.

La presente relazione tratta della sola Stazione Elettrica "Masseria Murazzo" e del raccordo ad alta tensione in cavo AT alla Stazione Elettrica 380/150 kV di Montecilfone. I campi elettrici e magnetici prodotti dalle linee a media e alta tensione degli utenti che si collegano al punto di raccolta non sono parte della presente relazione. Inoltre nella prima fase in oggetto, l'impianto sarà progettato per accogliere 4 utenti, come comunicati da Terna a valle della richiesta con modello 4a/bis. L'impianto è predisposto per collegare un ulteriore utente, per raggiungere il valore di potenza di 250 MVA.

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 DMLLPP del 16 Gennaio 1991. Nella normativa viene specificato inoltre che, per le stazioni primarie, la Dpa - e quindi la fascia di rispetto - solitamente rientrano nei confini dell’area di pertinenza dell’impianto stesso. Comunque, nel caso l’autorità competente lo ritenga necessario, dovranno essere calcolate le fasce di rispetto relativamente agli elementi perimetrali (es. portali, sbarre, ecc.)

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

3 CALCOLO DEL CAMPO MAGNETICO

Al fine di stimare il campo magnetico prodotto al di fuori della cabina utente 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.

Le linee guida succitate ricordano che al punto 5.2 dell’allegato al Decreto 29 maggio 2008 (GU n. 156 del 5 luglio 2008) si stabilisce che generalmente per le Cabine Primarie e Stazioni Elettriche, le Dpa rientrano nel perimetro dell’impianto (§ 5.2.2) in quanto non vi sono livelli di emissione sensibili oltre detto perimetro. Sempre nelle stesse linee guida si specifica che per le Cabine Primarie le DPA sono sicuramente interne alla cabina se sono rispettate le seguenti distanze dal perimetro esterno, (escludendo le fasce di rispetto delle linee in ingresso/uscita):

- 14 m dall’asse delle sbarre di AT in aria;
- 7 m dall’asse delle sbarre di MT in aria.

Il punto di raccolta in oggetto è funzionale alla trasformazione e gestione dell’energia prodotta in media e alta tensione da fonti rinnovabili ad essa connessi e alla sua immissione nella rete elettrica di trasmissione nazionale attraverso il collegamento alla futura Stazione Elettrica 380/150 kV di Montecilfone. La stazione ha uno schema standard composto da un sistema di sbarre AT in aria, cui saranno connessi in questa prima fase 4 stalli utente. Due di questi, connessi in media tensione, saranno dotati ciascuno di un quadro MT su cui si attestano le linee in cavo interrato provenienti dall’impianto di produzione ed un trasformatore MT/AT per la successiva trasformazione in alta tensione. Il terzo e il quarto stallo utente e lo stallo linea per la connessione in alta tensione alla RTN non saranno dotati di trasformatore. Gli stalli più vicini alla recinzione (figura 1: n. 6 e 7) e ad essa paralleli, sono posti a una distanza minima di 8,9 metri da essa, mentre la sbarra (figura 1: n. 4) è posta a 34,5 m dalla recinzione ad essa parallela. La stazione ha una larghezza complessiva di 71,75 metri: questo per permettere l’ampliamento della sbarra e la realizzazione di un ulteriore stallo utente nell’area verde.

Si è quindi effettuato il calcolo teorico dei livelli di campo magnetico al fine di determinare le Dpa da applicare alla stazione elettrica. Successivamente e in maniera separata sono stati calcolati i livelli di campo magnetico al fine di determinare le Dpa del raccordo in alta tensione tra le due stazioni.

Primo passo per realizzare il calcolo dei livelli di campo magnetico è individuare la geometria della stazione, schematizzandola come nella figura 1. In blu sono riportati gli stalli linea, in giallo la sbarra di collegamento. I collegamenti dagli stalli alla sbarra sono considerati come conduttori verticali.

Il punto di origine (0;0) del sistema è stato definito all'estremità inferiore sinistra (Figura 1) della recinzione dell'impianto.

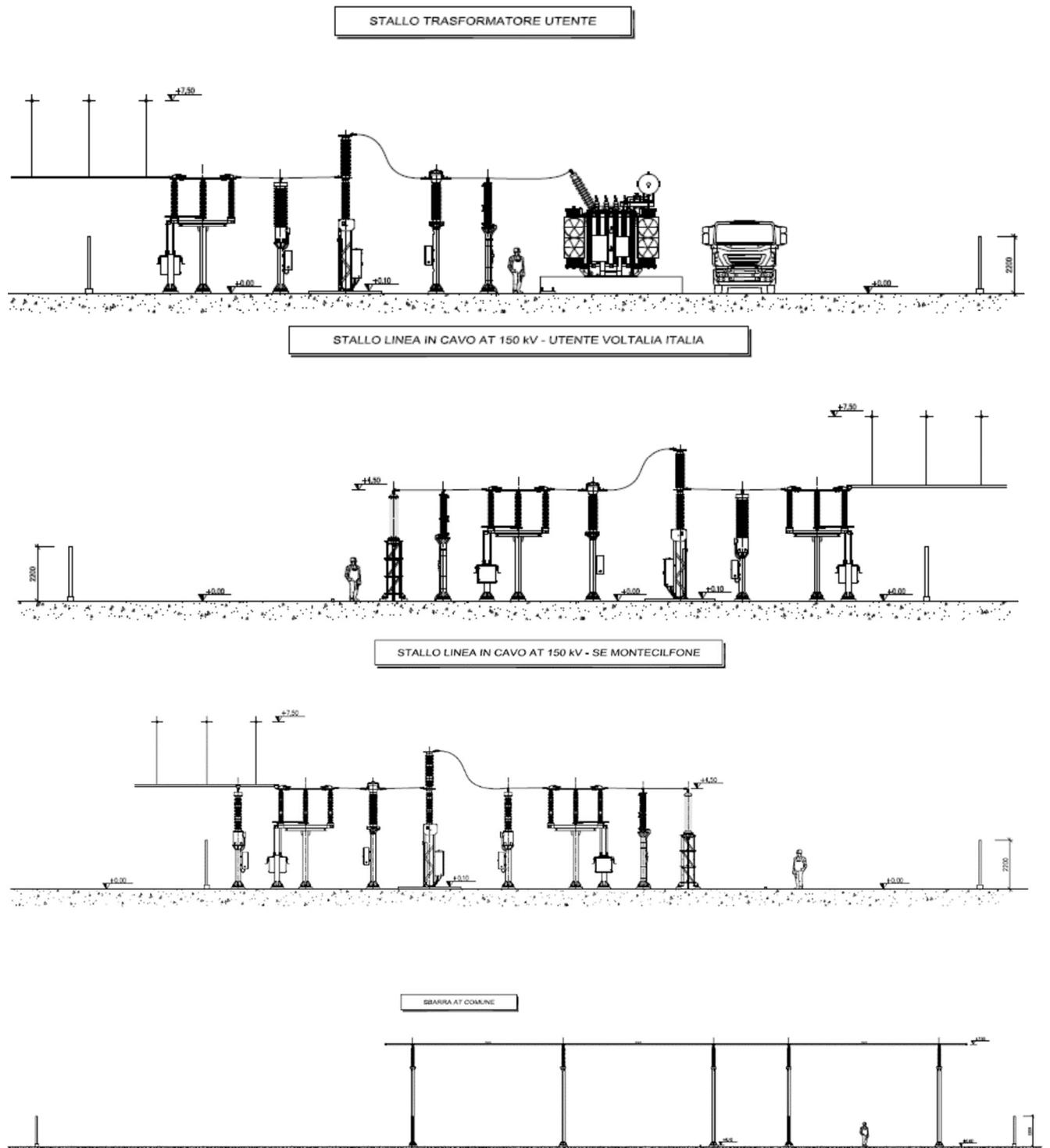


Figura 2 – Sezioni del punto di raccolta con individuazione delle altezze

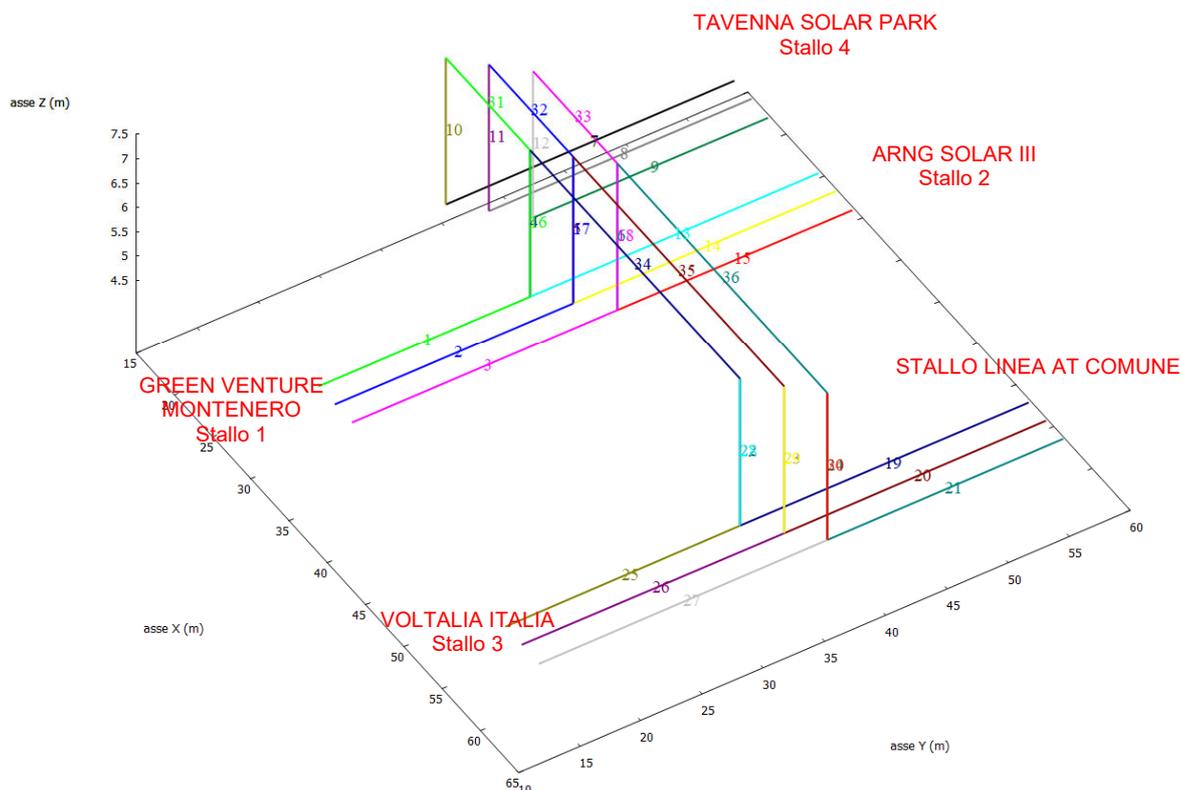


Figura 3 – Schematizzazione degli elementi attivi all'interno del programma di calcolo

3.1 Correnti di calcolo

Il cavidotto in alta tensione di collegamento alla futura SE RTN 150/380 kV di Montecilfone sarà realizzato con un conduttore di alluminio con sezione di 1600 mm². La norma CEI 11-60 prevede che tale conduttore possa portare una corrente massima in servizio normale di 1100 A.

All'interno della stazione, in questa prima fase, sono presenti 4 stalli utenti di cui 2 si connettono in media tensione e 2 direttamente in alta tensione.

In base alle potenze massime che possono essere prodotte dagli impianti connessi è stata calcolata per ciascuno la corrente che può essere immessa su ogni stallo utente del punto di raccolta, tenendo conto delle seguenti considerazioni:

1. la massima potenza degli impianti è raggiunta per poche ore l'anno, in condizioni di massimo irraggiamento per i parchi fotovoltaici e di vento costante e sostenuto per i parchi eolici, pertanto questa condizione è già ampiamente cautelativa;
2. nel caso di potenziamento degli impianti, questi saranno soggetti ad apposito procedimento di autorizzazione e in tale sede si verificheranno nuovamente le DpA associate alle nuove correnti in transito.

Per quanto riguarda lo stallo in cavo AT di collegamento al cavidotto in alta tensione si è utilizzato cautelativamente il valore di portata massima di quest'ultimo pari a 1100 A, anziché la somma delle correnti entranti nel punto di raccolta, per tenere in considerazione possibili ulteriori contributi di corrente che non richiedano una modifica delle autorizzazioni richieste.

Nella tabella seguente riportiamo le correnti di calcolo:

Elemento linea	Utente	Potenza	Corrente di calcolo
Stallo utente 1	ARNG Solar III	22,25 MVA	86 A
Stallo utente 2	Green Venture Montenero	19,38 MVA	75 A
Stallo utente 3	Volitalia Italia	65,48 MVA	252 A
Stallo utente 4	Tavenna solar Park	47,67 MVA	184 A
Stallo linea in cavo AT Comune	Comune agli utenti	--	1100 A

*Potenza apparente ricavata dalla potenza di connessione in MW a cosfi 0,944

3.2 Risultati

I valori di campo magnetico della Stazione Elettrica di Masseria Murazzo sono calcolati al fine di definire le ampiezze delle fasce di prima approssimazione da applicarsi al perimetro. Tali valori sono stati calcolati considerando che gli impianti di produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili degli utenti già assegnati al punto di raccolta, funzionino alla massima potenza. Allo stesso modo viene considerato che l'elettrodotto di raccordo trasporti la massima corrente che può essere evacuata dal cavo AT, questo per tenere in considerazione lo stato futuro, quando sarà realizzato anche lo stallo utente mancante.

Riportiamo nel seguito le mappe dei campi magnetici prodotti sul piano x-y ad una altezza dal suolo di 1 - 4,5 - 7 e 10 metri dal suolo, al fine di verificare il punto di massima ampiezza del campo magnetico.

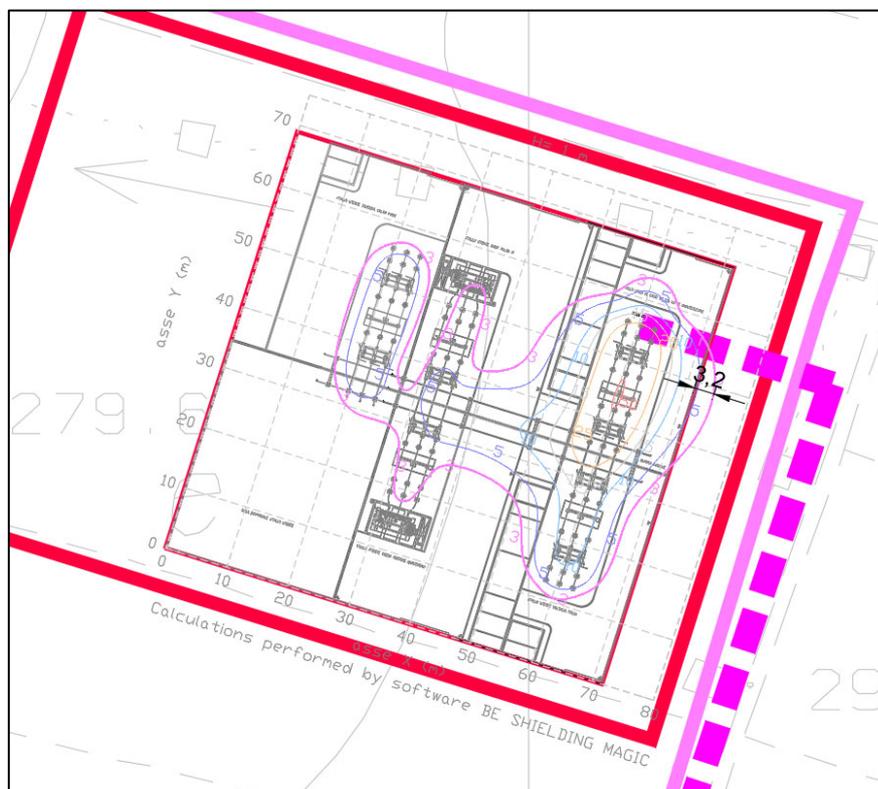


Figura 4 – Calcolo dei livelli di campo magnetico a 1 m da terra

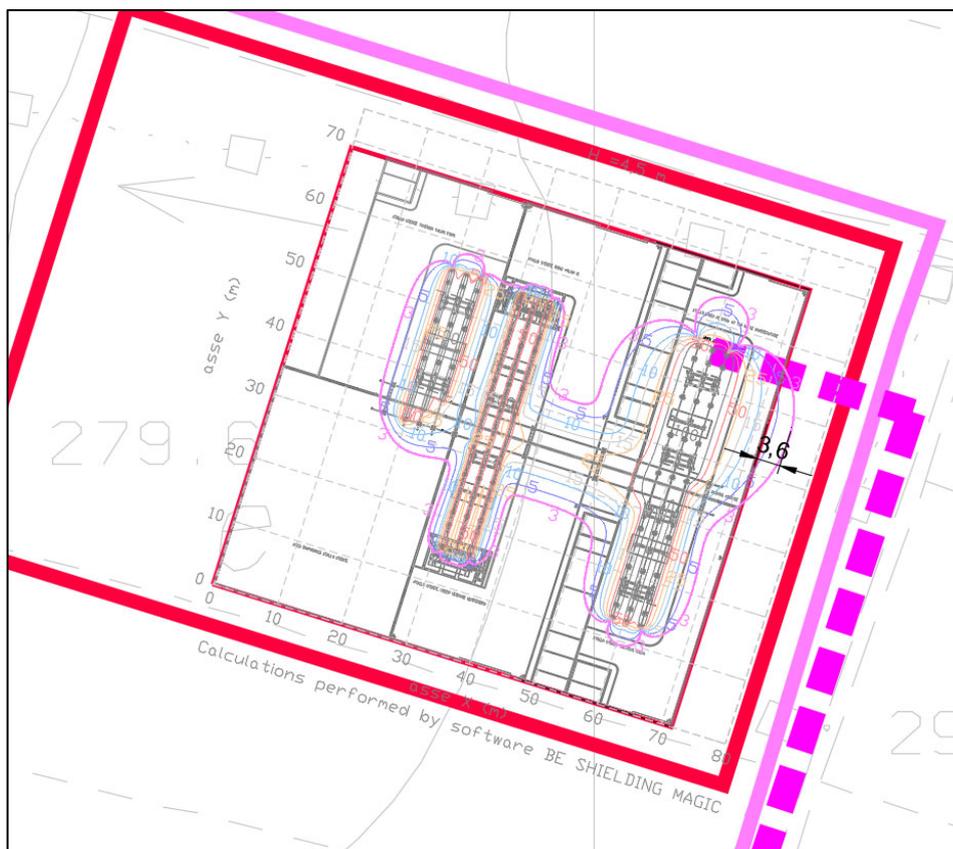


Figura 5 – Calcolo dei livelli di campo magnetico a 4.5 m da terra



Figura 6 – Calcolo dei livelli di campo magnetico a 7 m da terra

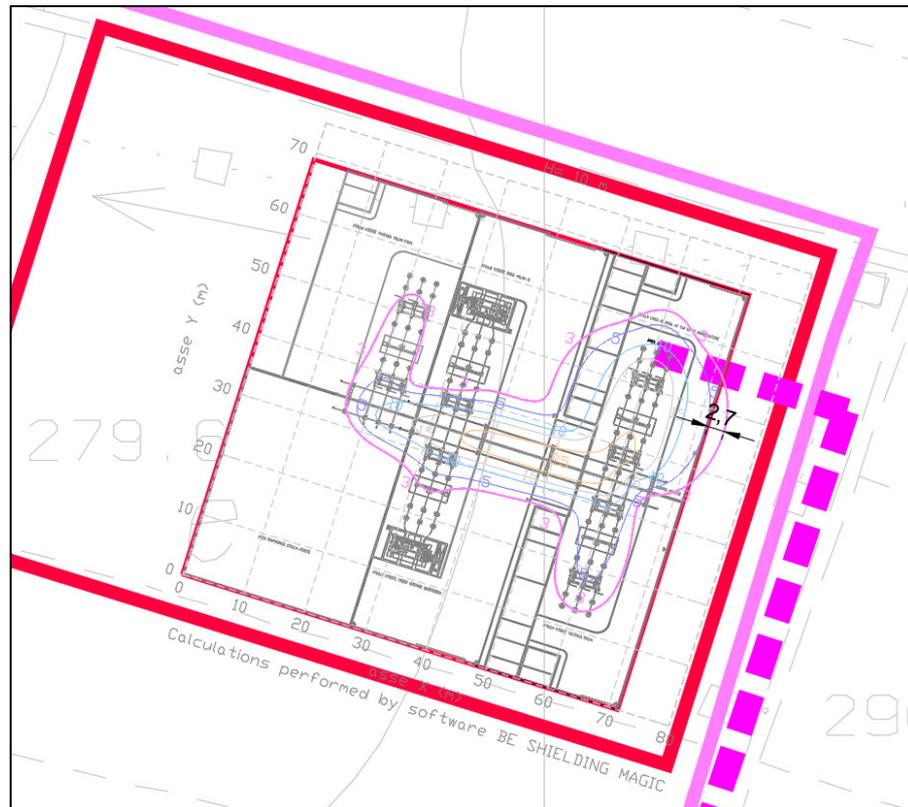


Figura 7 – Calcolo dei livelli di campo magnetico a 10 m da terra

Dai risultati delle simulazioni sopra riportate si evince che esternamente ai confini della stazione elettrica il campo magnetico è superiore al valore di qualità di $3 \mu\text{T}$ lungo il lato est in prossimità dell'uscita del cavo in alta tensione di connessione alla SE Montecilfone. Tale valore è rispettato ad una distanza di 3,6 metri dalla recinzione come visibile dalla figura. La Dpa da applicare sarebbe pertanto pari a 4 metri dalla recinzione est del punto di raccolta, si evidenzia però che tale area è occupata dalle pertinenze della stazione stessa, pertanto non si ritiene di dovere applicare tali distanze.

Ricordiamo che le Dpa degli elettrodotti a media e alta tensione collegati al punto di raccolta non sono oggetto della presente relazione.

Nel grafico sottostante riportiamo l'andamento del campo magnetico in prossimità della linea in cavo ad alta tensione di raccordo tra il punto di raccolta Masseria Murazzo e la SE Montecilfone. Il cavo della lunghezza di circa 190 metri risulta interrato a una profondità di 1,5 metri dal piano di campagna. Dal grafico si osserva il rispetto del valore di qualità di $3 \mu\text{T}$ sul piano di campagna a 2,7 metri dall'asse della linea: si applica pertanto una Dpa di 3 metri per lato dall'asse del cavo AT.

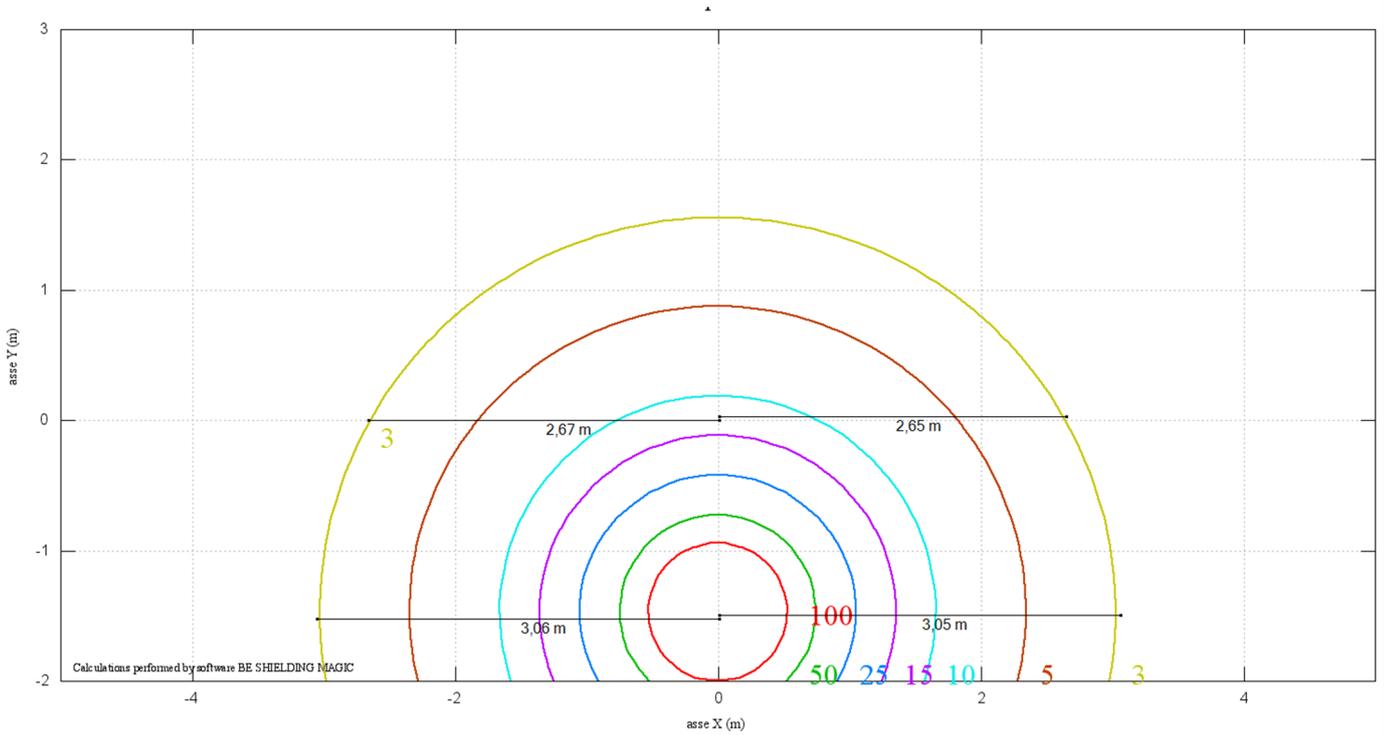


Figura 8 – Grafico dei livelli di campo magnetico prodotti dal cavidotto AT di connessione alla SE Montecilfone

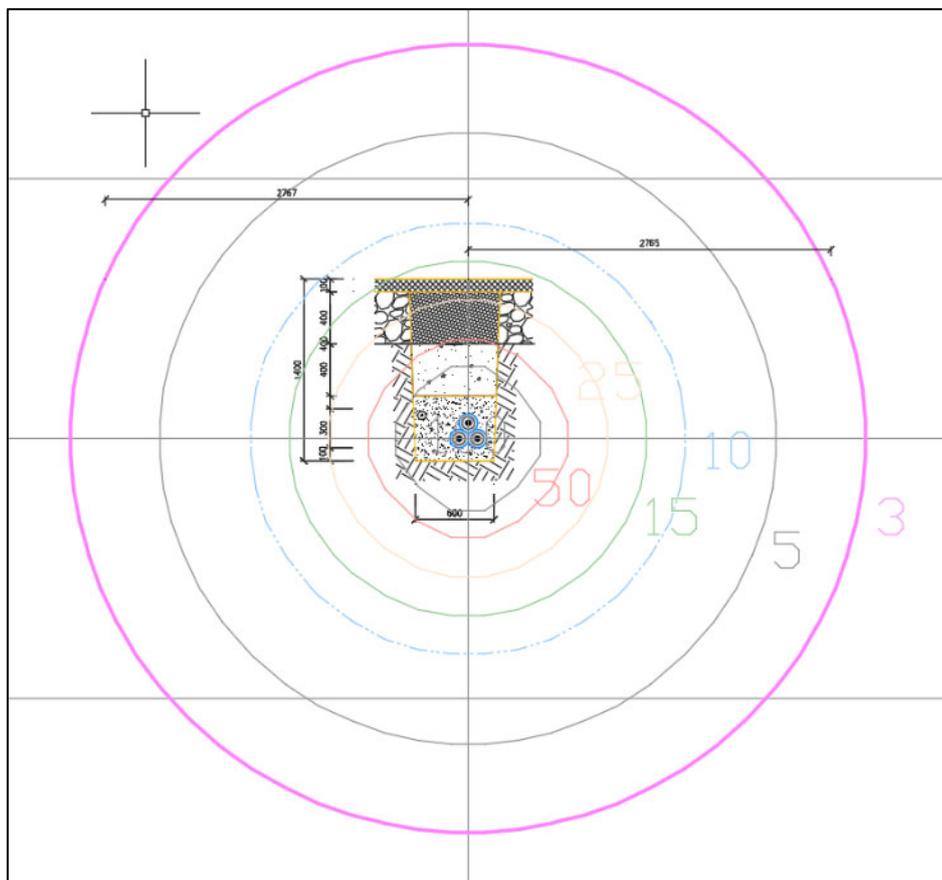


Figura 9 – Sovrapposizione tra il campo magnetico prodotto dal cavidotto AT e la sezione di posa

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 $100 \mu\text{T}$, $10 \mu\text{T}$ e $3 \mu\text{T}$ 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.

La stazione elettrica Masseria Murazzo in oggetto, ha la funzione di trasformazione e punto di raccolta per l'energia prodotta da un totale di 5 produttori da fonti rinnovabili, di cui ad oggi solo 4 assegnati su una connessione comune presso la futura Stazione Elettrica 380/150 kV di Montecilfone. Il collegamento comune sarà effettuato tramite un cavo interrato ad alta tensione della lunghezza di circa 190 metri.

Dalle simulazioni effettuate, nonché dalle linee guida sul calcolo delle fasce di prima approssimazione è stato rilevato il rispetto del valore di qualità di $3 \mu\text{T}$ già sul perimetro del punto di raccolta ad eccezione del lato est, in adiacenza allo stallo di collegamento con l'elettrodotto AT interrato, dove tale valore viene rispettato ad una distanza di 4 metri dalla stazione stessa. Si sottolinea che tale area sarà comunque occupata dalle pertinenze della stazione stessa pertanto non si sono applicate le DPA.

Occorre invece applicare una Dpa di 3 metri per parte dall'asse del cavo di elettrodotto AT interrato. Nella figura sottostante sono riportate in verde le Dpa, le stesse sono riportate nel documento 05321 Piano particellare.

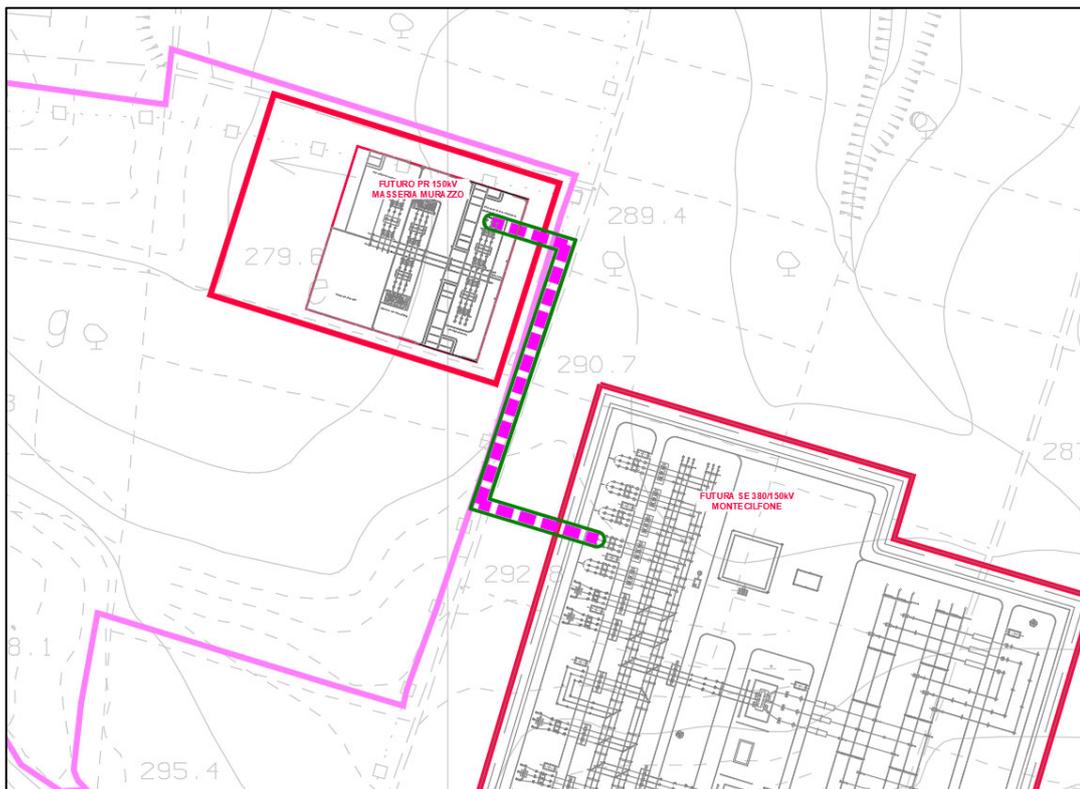


Figura 10 – Punto di raccolta Masseria Murazzo e cavo interrato ad alta tensione di collegamento alla SE Montecilfone con Dpa (in verde)

Allegato 1: Documento di Validazione



Documento di Validazione

Algoritmi di calcolo del software **MAGIC**[®] (**MAG**netic Induction Calculation)

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

Sommario

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

Premessa

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

Il confronto si sviluppa in tre parti:

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

Le principali caratteristiche del software MAGIC[®] sono:

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

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

1 Verifica del modulo bidimensionale

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

1.1 Confronto con CEI 211-04

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

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

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

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

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

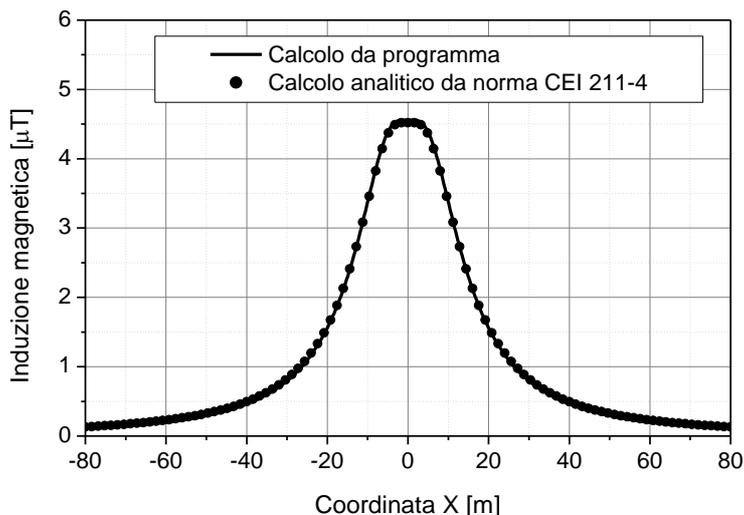


Figura 1: Induzione magnetica al suolo in prossimità di una linea aerea a doppia terna su semplice palificazione con corrente di 310: confronto tra MAGIC® e formula analitica CEI 211-4

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

1.2 Confronto con codice CESI

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

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

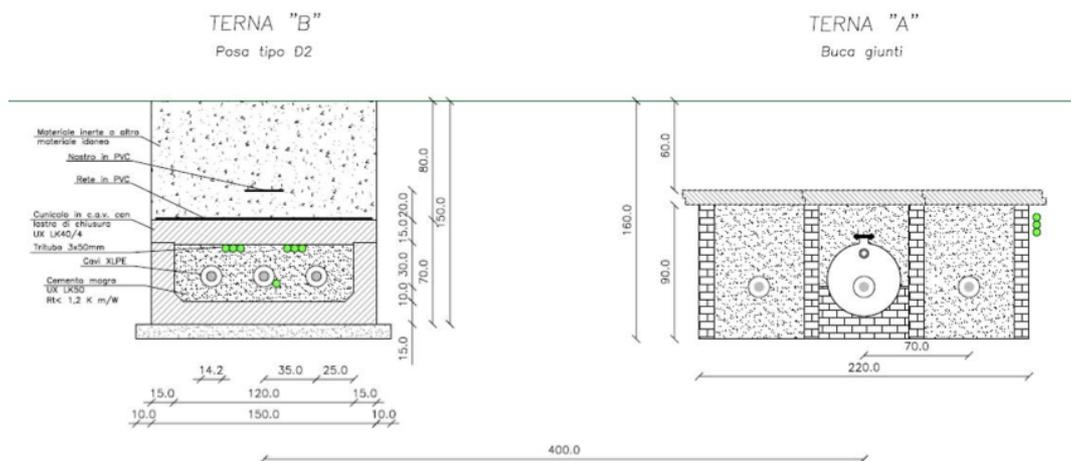


Figura 2: Affiancamento tra due linee interrate AT

Condizioni di carico e relazioni di fase:

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

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

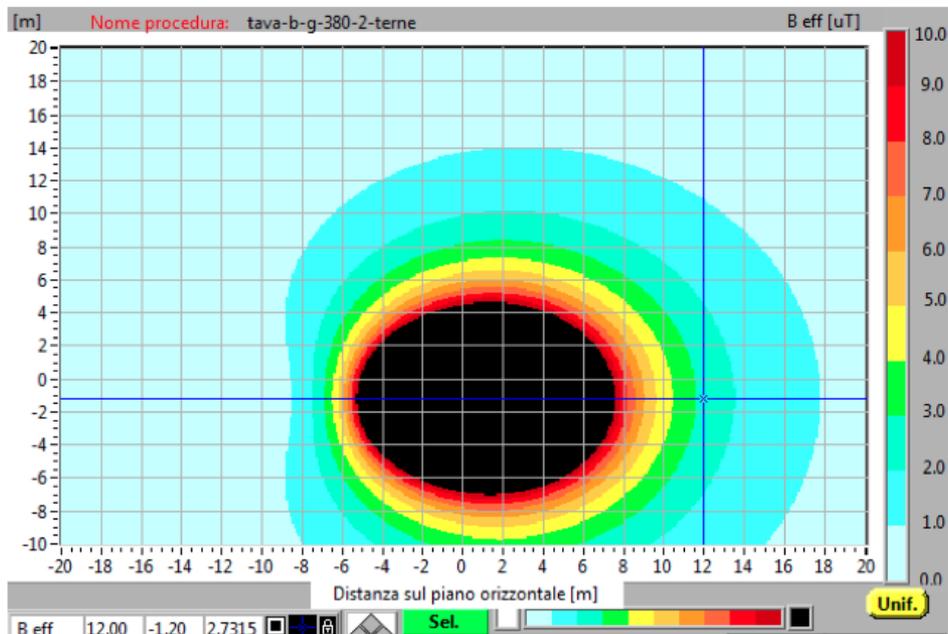


Figura 3: Mappa cromatica delle induzioni magnetiche calcolata mediante software CESI

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

- Terne parallele
- Multiconduttori 2D

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

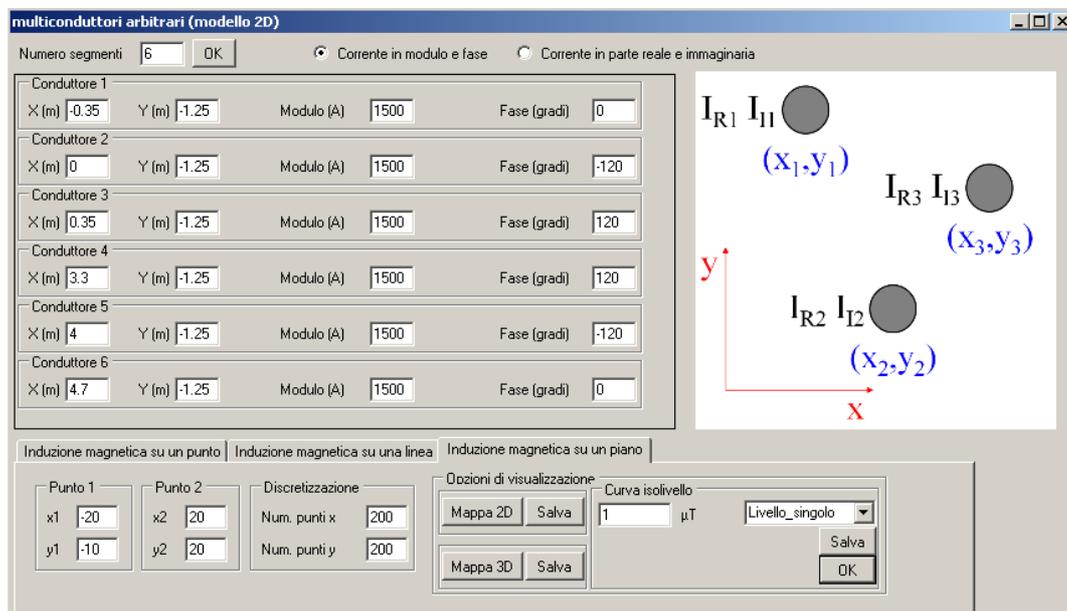


Figura 4:Schermata di ingresso modulo “multiconduttori arbitrari (modello 2D)””: dati definizione geometria e sorgenti

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

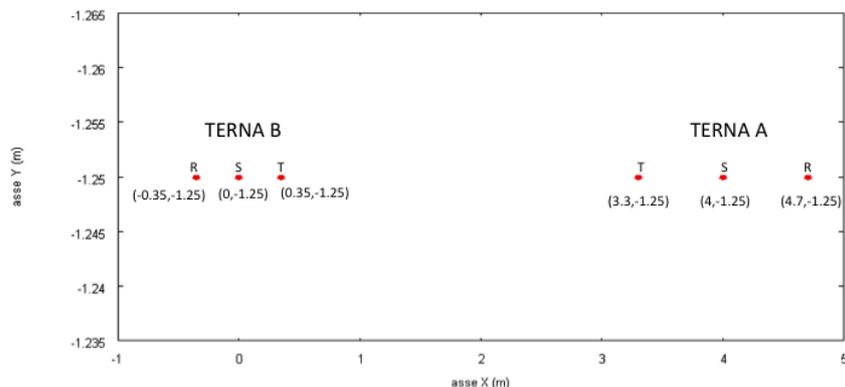


Figura 5: Geometria sorgenti

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

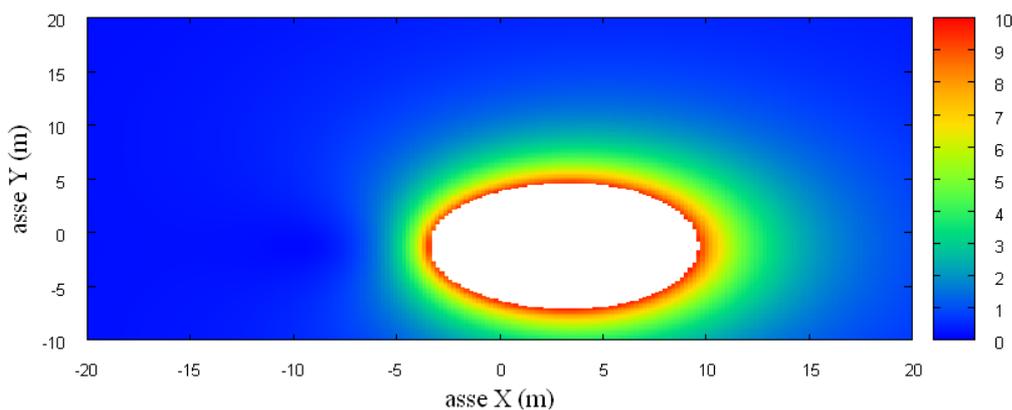


Fig. 6: Mappa cromatica dell’induzione magnetica ottenuta dal software MAGIC® (valori in microT):

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

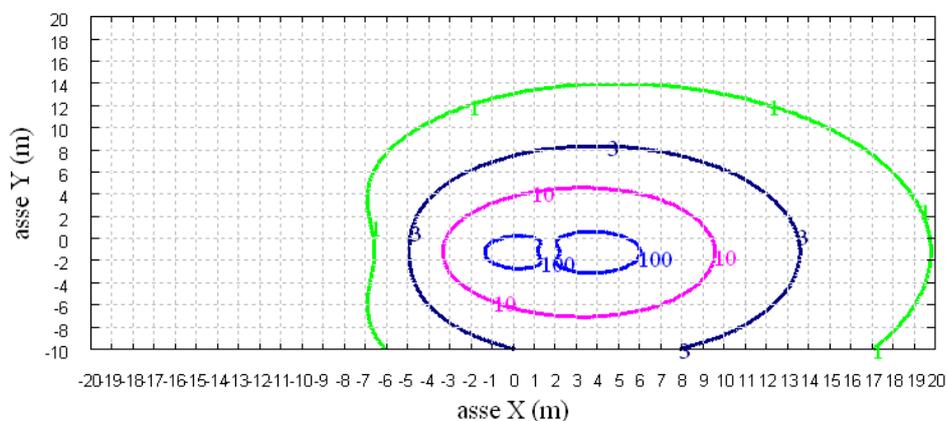
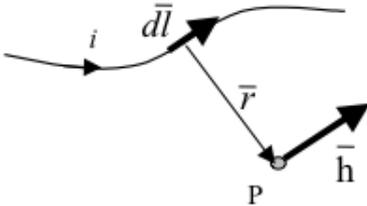


Fig. 7 Linee isolivello dell’induzione magnetica (1, 3, 10, 100 microT) da software MAGIC®.

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

2 Verifica del modulo tridimensionale

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

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

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

2.1 Campo prodotto da un segmento finito arbitrariamente orientato

Si consideri il segmento rappresentato nella Fig. 8.

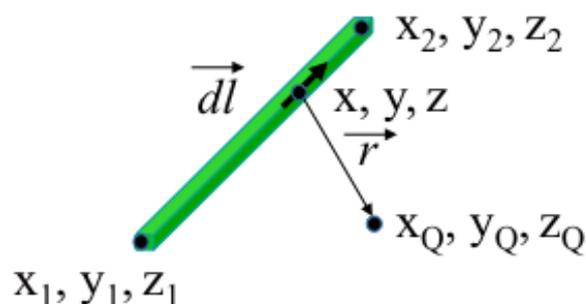


Fig. 8: Modello del segmento.

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

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

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

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

Si consideri inoltre che:

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

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

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

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

2.2 Validazione sperimentale del modulo tridimensionale

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

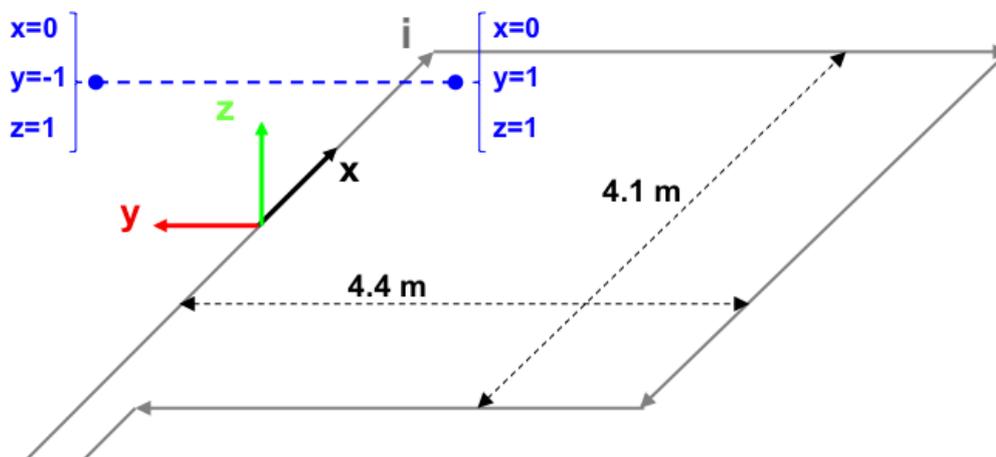


Fig. 9: Schema di spira quadrata.

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

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

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

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

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

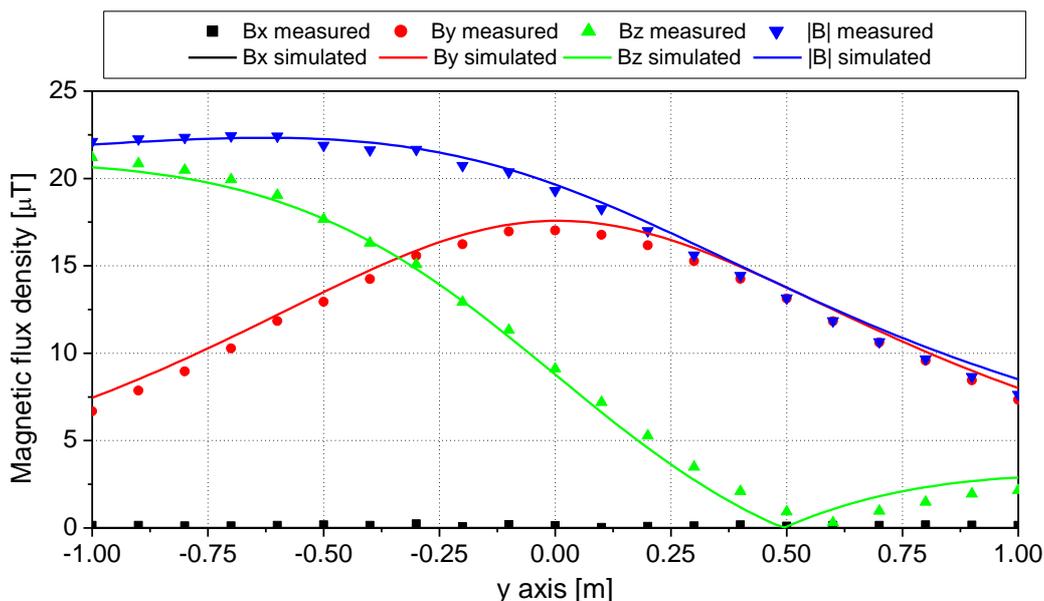


Fig. 10: Induzione magnetica misurata e calcolata mediante software MAGIC®.

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

3 Verifica del modulo tridimensionale:trasformatore di potenza

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

La validazione è condotta in due step:

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

Maggiore dettaglio sui confronti sono riportati nella seguente referenza:

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

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

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

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

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

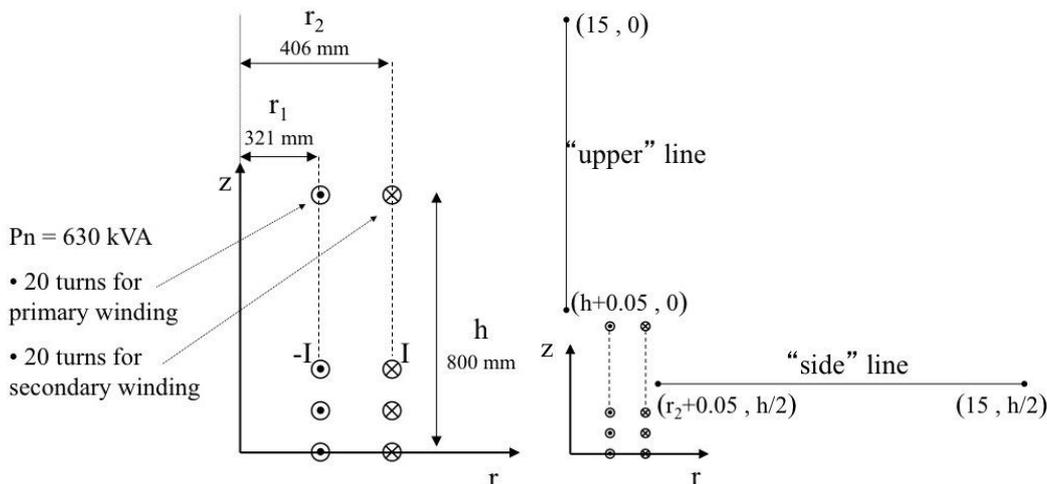


Fig. 11. Geometria del sistema (1) e linee di calcolo (2)

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

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

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

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

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

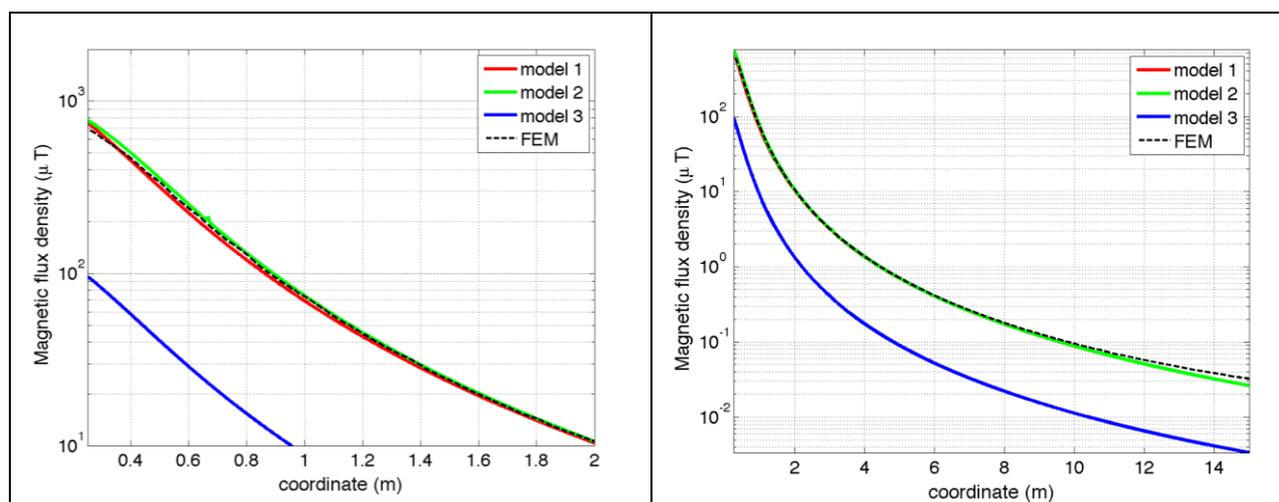
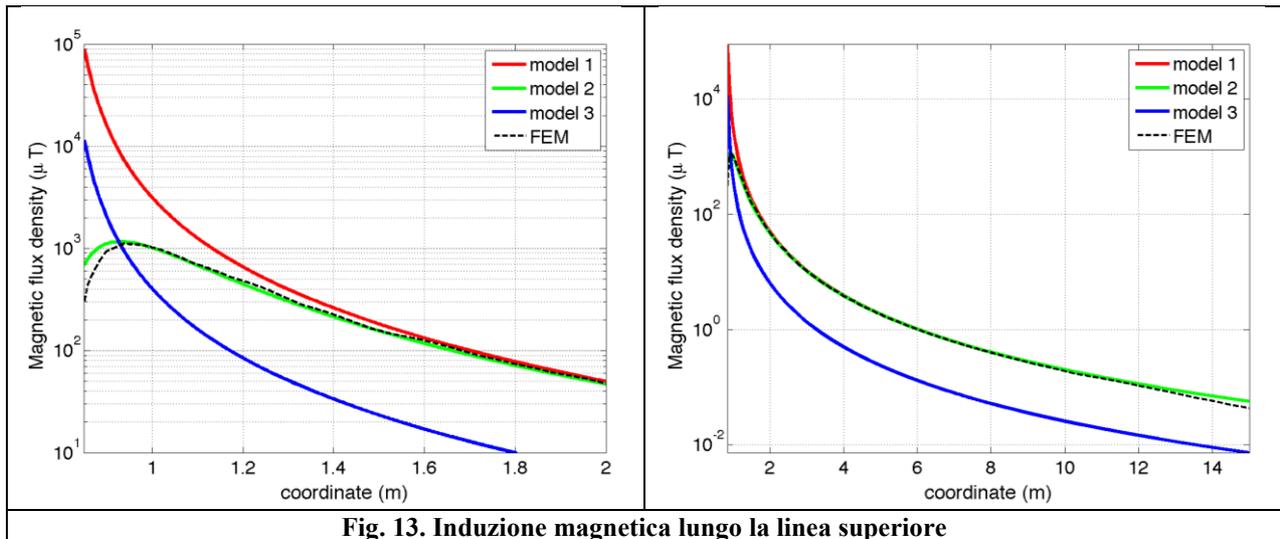


Fig. 12. Induzione magnetica lungo la linea laterale



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.

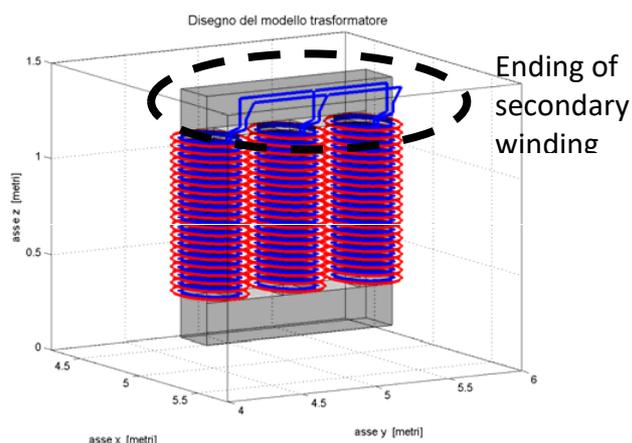


Fig. 14: Connessioni elettriche considerate ai lati BT.

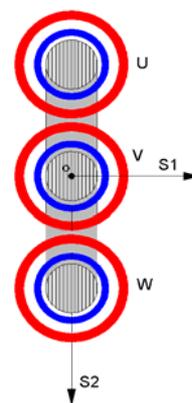


Fig. 15: Linee di calcolo S1 ed S2

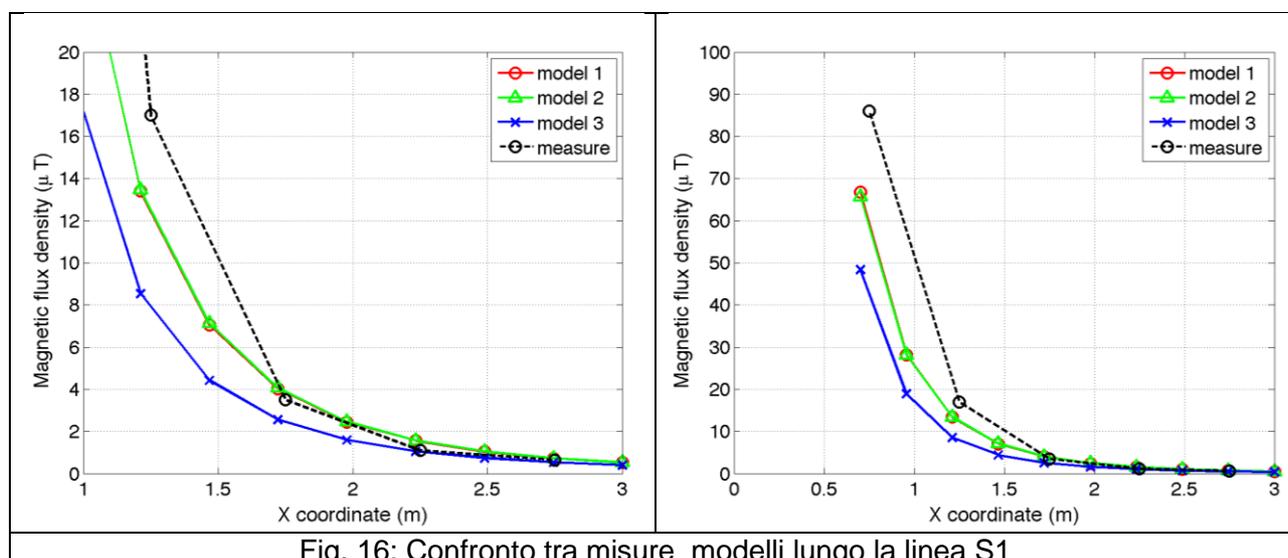


Fig. 16: Confronto tra misure modelli lungo la linea S1

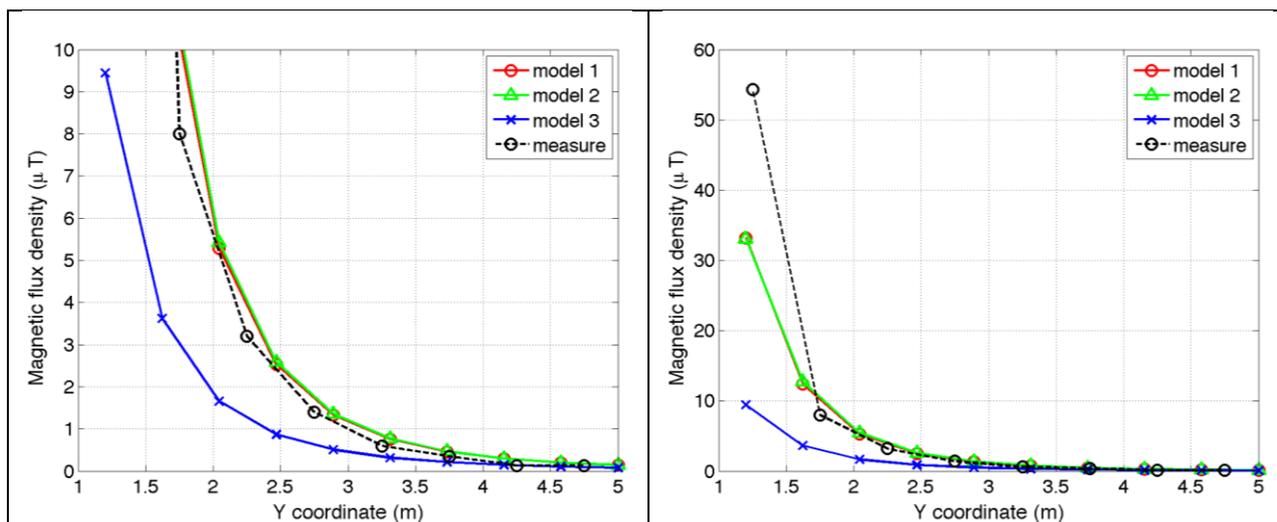


Fig. 17. Confronto tra misure modelli lungo la linea S2

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.