

		<i>Bertani</i>	<i>Bolognesi</i>	<i>Brugnoni</i>	
B	01/02/22	Bertani	Bolognesi	Brugnoni	Aggiornamento utenti
A	09/07/21	Bertani	Bolognesi	Brugnoni	Emissione per autorizzazione
REVISIONE	DATA	ELABORATO	VERIFICATO	APPROVATO	DESCRIZIONE
INGEGNERIA & COSTRUZIONI 					IMPIANTO PUNTO DI RACCOLTA PIANA DELLA FONTANA TITOLO RELAZIONE CAMPI ELETTRICI E MAGNETICI
SCALA	FORMATO	FOGLIO / DI		N. DOCUMENTO	
-	A4	1 / 24		0 4 2 0 4 B	

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	10

1 PREMESSA

Oggetto della presente relazione è il calcolo dei campi elettrici e magnetici generati dalla nuova Stazione Elettrica 150/30 kV denominata Piana della Fontana, sita in comune di Rotello, provincia di Campobasso (Molise) e del cavo di connessione di questa alla RTN.

La stazione sarà realizzata al fine di permettere il collegamento alla rete di trasmissione nazionale, tramite la Stazione Elettrica RTN 380/150 kV di Rotello, di 5 diversi impianti FER. Quattro di questi impianti saranno connessi in media tensione ed uno in alta tensione con la stazione elettrica di Piana della Fontana che funge da punto di raccolta: qui avverranno le rispettive trasformazioni MT/AT ovvero connessione diretta in sbarra. Un cavo AT interrato della sezione di 1.600 mm² conterà poi il punto di raccolta con la Stazione Elettrica RTN 380/150 kV di Rotello. In questo modo, cinque diversi impianti occuperanno un solo stallo sulla stazione RTN, in grado di connettere potenze per 250 MVA.

L'intervento complessivo comporterà, oltre alla realizzazione del punto di raccolta (stazione elettrica 150/30 kV) e dell'elettrodotto interrato ad alta tensione, anche la realizzazione dei cavidotti in media tensione interrati di collegamento tra gli impianti di produzione e la Stazione Elettrica.

La presente relazione tratta della sola Stazione Elettrica "Piana della Fontana" e del collegamento in cavo AT alla Stazione Elettrica 380/150 kV di Rotello. Per l'analisi dei campi elettrici e magnetici prodotti dalle linee in media tensione interne agli impianti di produzione di ciascuno dei 5 utenti, si faccia riferimento alla documentazione relativa a ciascun procedimento.

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 DM LPP 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 Stazioni Primarie, la Dpa rientra 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 la DPA è sicuramente interna 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 della corrente prodotta in media tensione da 5 impianti di produzione FER ad essa connessi e alla sua immissione nella rete elettrica di trasmissione nazionale attraverso il collegamento alla Stazione Elettrica 380/150 kV di Rotello. La stazione ha uno schema standard composto da un sistema di sbarre AT in aria, cui saranno connessi 5 stalli utente, 4 dei quali dotati di quadro MT su cui si attestano le linee MT in cavo interrato provenienti dall'impianto di produzione ed un trasformatore AT/MT per la successiva trasformazione in alta tensione, un utente connesso in cavo AT ed uno stallo linea per la connessione in alta tensione alla SE 380/150 kV Rotello. Lo stallo più vicino alla recinzione (figura 1: n. 16) e ad essa parallelo, è posto ad una distanza minima di 8,9 metri da essa, mentre la sbarra (figura 1: nn. 3-6-9-12-15) è posta a 4,5 m dalla recinzione sud-ovest.

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". Inoltre il limite di esposizione del campo elettrico risulta sempre rispettato esternamente alla recinzione della stazione.

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.

Per il calcolo teorico sono state utilizzate le indicazioni fornite dal DM 29/05/2008: all'interno della cabina primaria sono state considerate solo gli elementi principali quali stalli e sbarre, come già specificato le Distanze di Prima approssimazione relative ai raccordi in alta tensione vengono calcolate separatamente e successivamente.

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) mediante configurazioni bidimensionali e tridimensionali attraverso l'integrazione della legge di Biot-Savart o lo studio di sistemi complessi, come le cabine elettriche MT/BT, tenendo conto della tridimensionalità delle sorgenti, della loro reale posizione e della sovrapposizione degli effetti delle diverse componenti la cabina.

In generale, per poter meglio valutare a priori il valore dell'induzione magnetica nel punto di raccolta, abbiamo schematizzato la stazione con una griglia di conduttori rettilinei ortogonali fra loro, percorsi da correnti differenti a seconda della sorgente collegata a ogni tratto di linea.

Dalla planimetria riportata in figura 1 e dalle sezioni riportate in figura 2, possiamo osservare che gli elementi in tensione sono costituiti dagli stalli trasformatori (stalli utente), dallo stallo linea e dalla sbarra. Nel calcolo delle distanze di prima approssimazione si trascurerà il campo magnetico prodotto dalle linee a media tensione interrate di collegamento tra il quadro MT e i trasformatori e le linee a media tensione interrate in ingresso alla stazione, la cui fascia di rispetto è trascurabile come previsto dalla normativa.

Primo passo per realizzare il calcolo dei livelli di campo magnetico è individuare la geometria della stazione, schematizzandola come nella figura 1. In verde sono riportati gli stalli linea, in arancione 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.

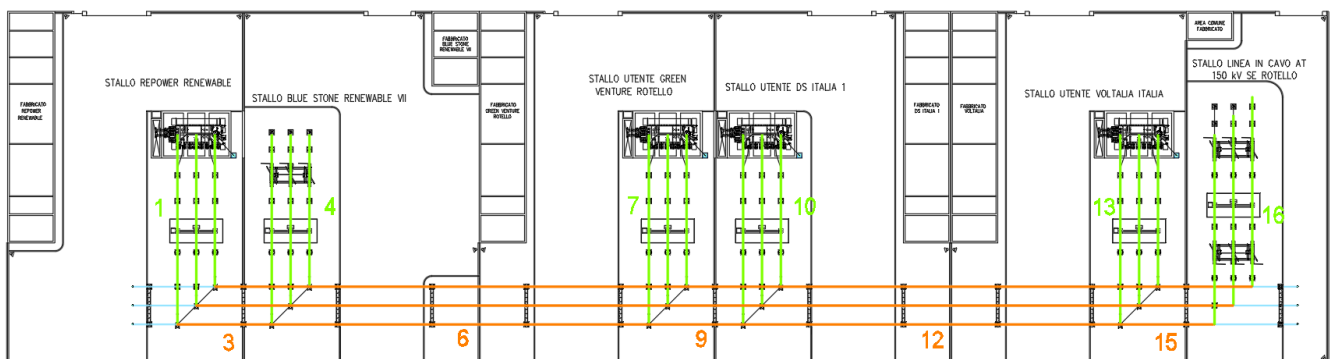


Figura 1 – Planimetria della cabina primaria con individuazione degli elementi attivi

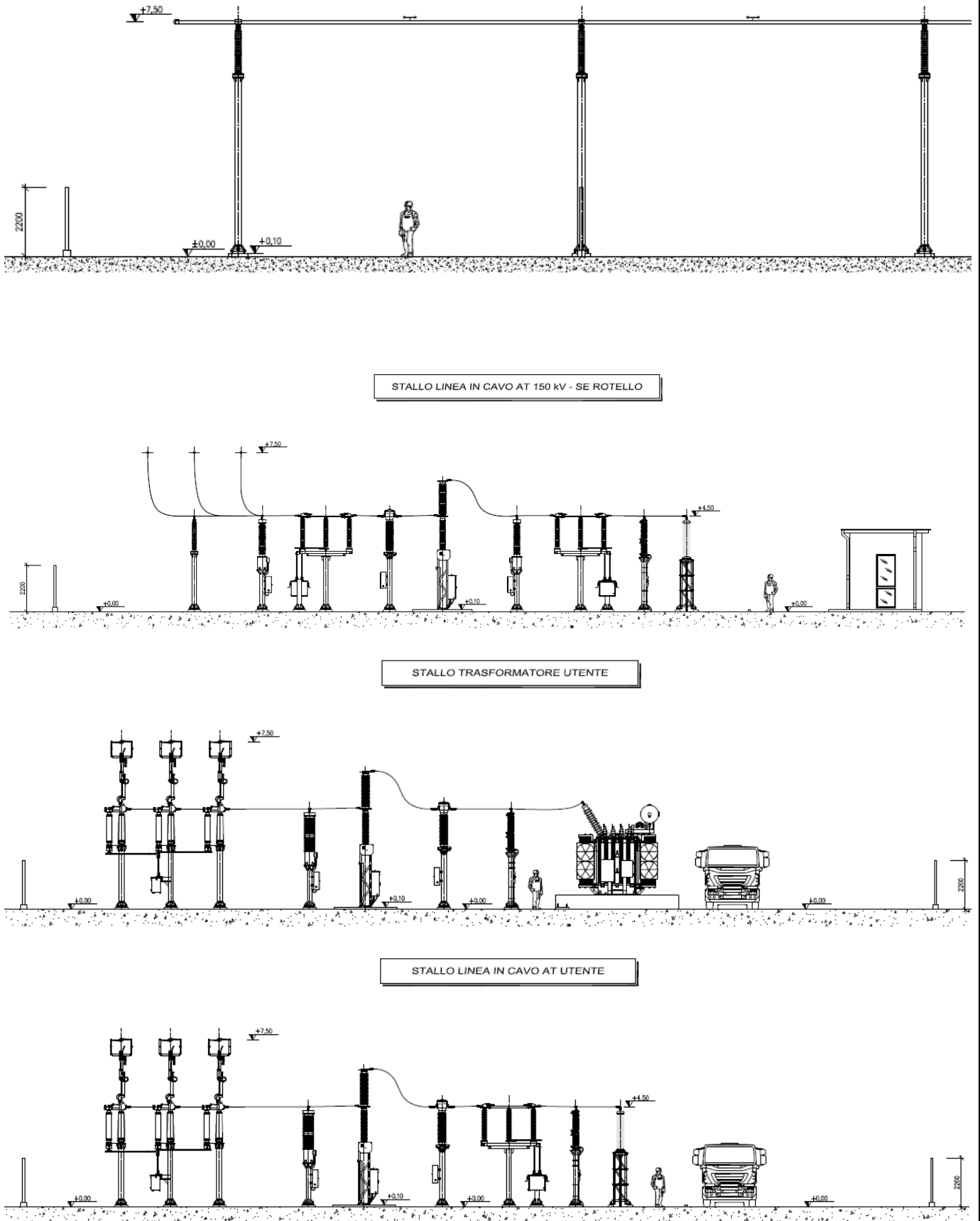


Figura 2 – Sezioni del Punto di Raccolta con individuazione delle altezze

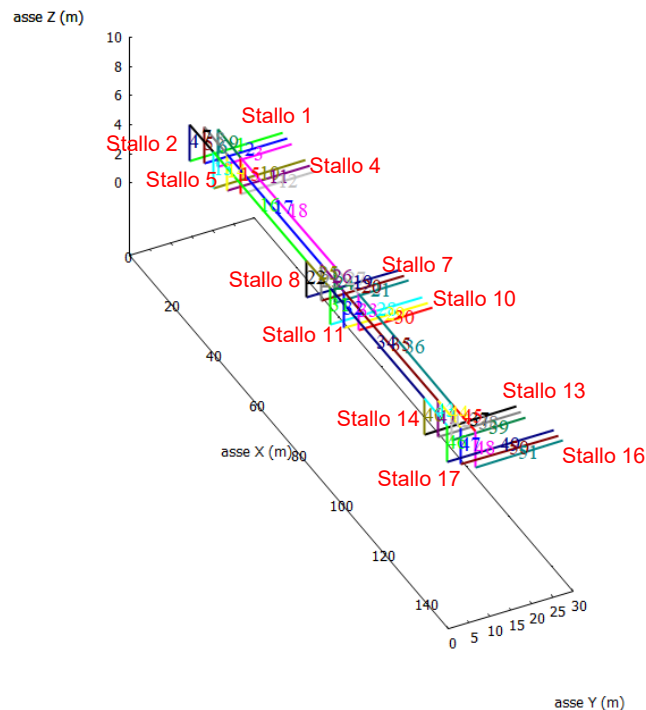


Figura 3 – Schematizzazione degli elementi attivi all'interno del programma di calcolo

3.1 Correnti di calcolo

Il cavidotto in alta tensione 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 sono presenti 5 stalli. In base alle potenze nominali degli impianti connessi è stata calcolata la corrente massima che può circolare sui vari stalli del punto di raccolta.

Nonostante la corrente prodotta dai diversi impianti di produzione di energia da fonti rinnovabili sia inferiore alla corrente che può circolare sui singoli elementi del punto di raccolta, si è deciso di utilizzare questa per il calcolo dei campi magnetici in base alle seguenti considerazioni:

1. la massima potenza degli impianti è raggiunta per poche ore all'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 calcolate:

Elemento linea	Utente	Potenza	Corrente di calcolo
Stallo utente 1	Voltalia Italia	38,93 MVA	150 A
Stallo utente 2	DS Italia 1	55,48 MVA	214 A
Stallo utente 3	Green Venture Rotello	52,43 MVA	202 A
Stallo utente 4	Blue Stone Renewable VII	50,8 MVA	196 A
Stallo utente 5	Repower Renewable	57,45 MVA*	221 A
Sbarra AT e Stallo linea in cavo AT	Comune agli utenti	--	1100 A

* Potenza apparente ricavata dalla potenza di connessione in MW a $\cos\phi$ 0,94

3.2 Risultati

I valori di campo magnetico della Stazione Piana della Fontana sono calcolati al fine di definire le ampiezze delle fasce di prima approssimazione da applicarsi al perimetro. Tali valori sono desunti nell'ipotesi cautelativa che gli impianti afferenti alla stazione funzionino alla massima potenza.

Riportiamo nel seguito le mappe dei campi magnetici prodotti sul piano x-z con $y = a$ 5 metri e 25 metri dalla recinzione al fine di individuare l'andamento dei campi magnetici.

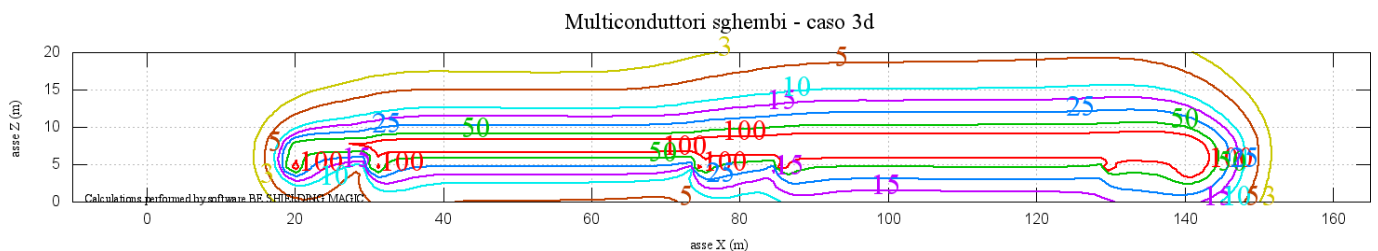


Figura 4 – Calcolo dei livelli di campo magnetico a 5 metri dalla recinzione

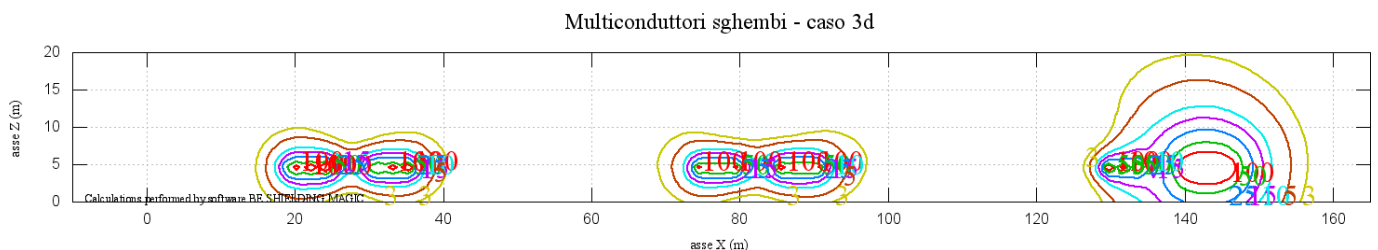
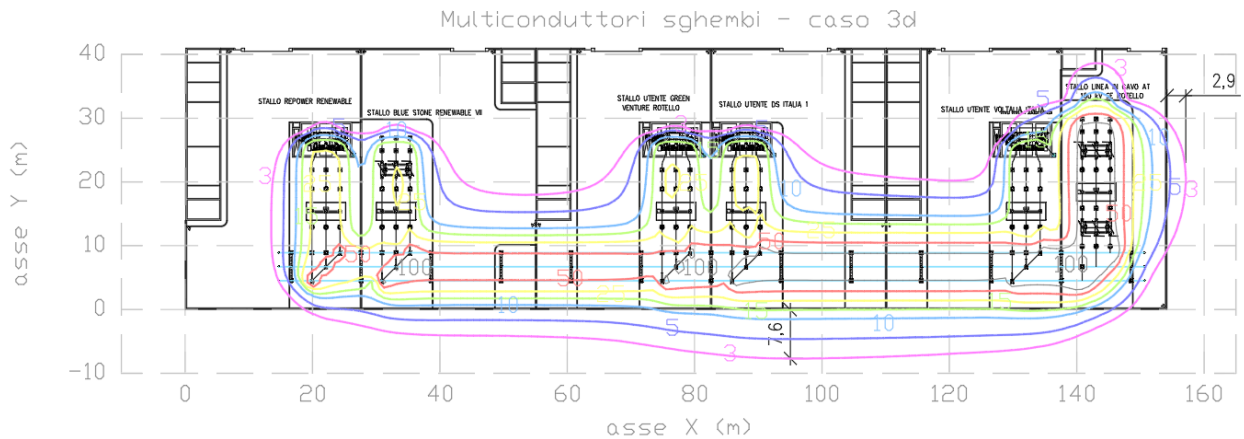


Figura 5 – Calcolo dei livelli di campo magnetico a 25 metri dalla recinzione

Nella immagine seguente riportiamo le curve di isolivello del campo magnetico generate sul piano xy ad una altezza dal suolo di 6 metri cioè in prossimità del punto di massima ampiezza del campo magnetico rilevato nelle sezioni.



Calculations performed by software BE SHIELDING MAGIC

Figura 6 – Calcolo dei livelli di campo magnetico a 6 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 sud ovest e lungo una piccola parte del lato sud est. Tale valore è rispettato ad una distanza di 7,6 metri dalla recinzione lungo il lato sud ovest e 2,9 metri lungo il lato sud est. La Dpa da applicare risulta pertanto pari rispettivamente a 8 metri per il lato sud ovest e 3 metri dal lato sud est.

Ricordiamo che le Dpa degli elettrodotti a media tensione collegati alla cabina primaria vengono calcolati come previsto dal DM 29/05/2008 e i risultati sono riportati in apposito documento separato.

Nel grafico sottostante riportiamo l'andamento del campo magnetico in prossimità della linea ad alta tensione di raccordo tra la stazione elettrica e la stazione di Rotello. Il cavo della lunghezza di circa 500 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 $3 \mu\text{T}$ a 3,05 metri dall'asse della linea: si applica pertanto una Dpa di 4 metri.

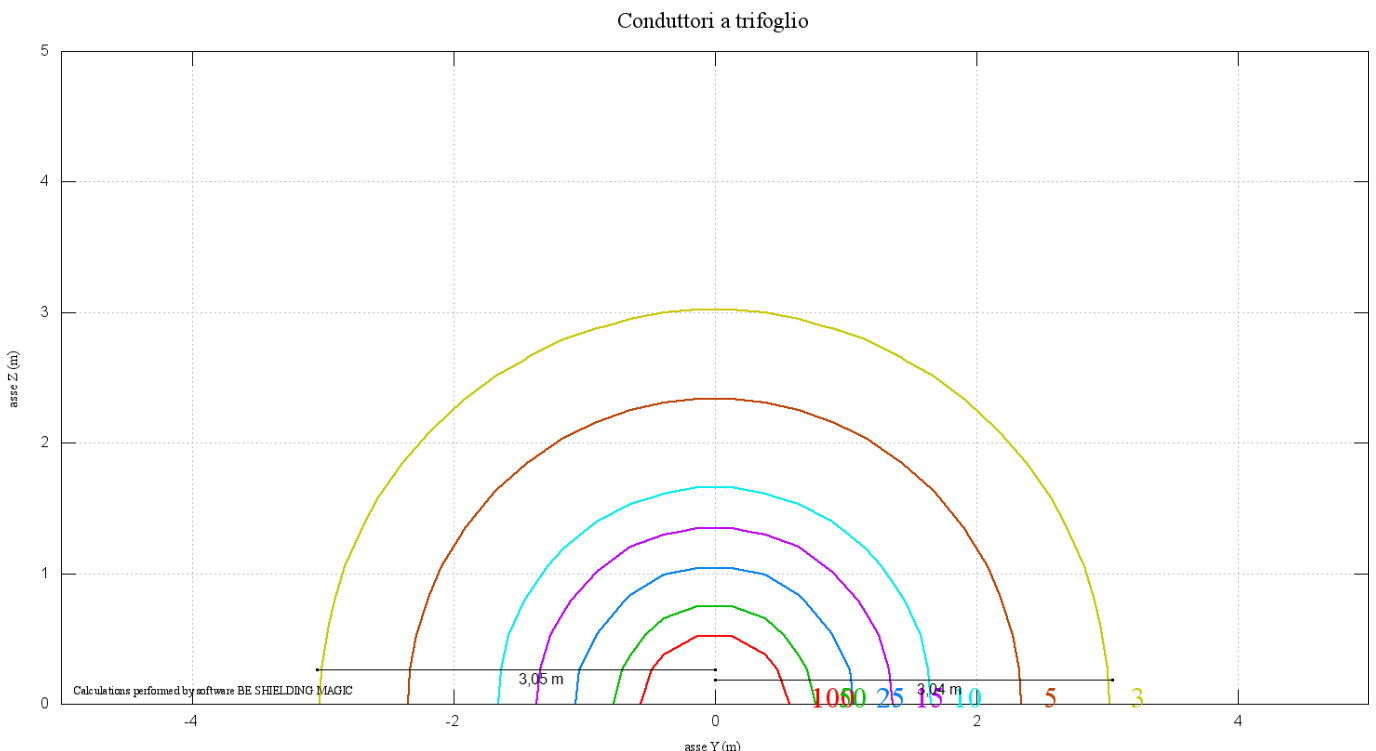


Figura 7 – Calcolo dei livelli di campo prodotto dal cavo AT comune

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 in oggetto ha la funzione di trasformazione e punto di raccolta per la potenza prodotta da 5 impianti FER e connessione su un unico stallo alla rete elettrica nazionale tramite la Stazione Elettrica 380/150 kV di Rotello. Il collegamento sarà effettuato tramite un cavo AT interrato della lunghezza di circa 500 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 della stessa per i lati nord-est e nord -ovest. Occorre invece applicare una distanza di prima approssimazione di 8 metri sul perimetro sud ovest e di 3 metri sul lato sud-est. Occorre inoltre applicare una Dpa di 4 metri dall'asse del cavidotto interrato. Nella figura sottostante sono riportate in rosso le Dpa, le stesse sono riportate nel documento 04021 - Piano particellare.

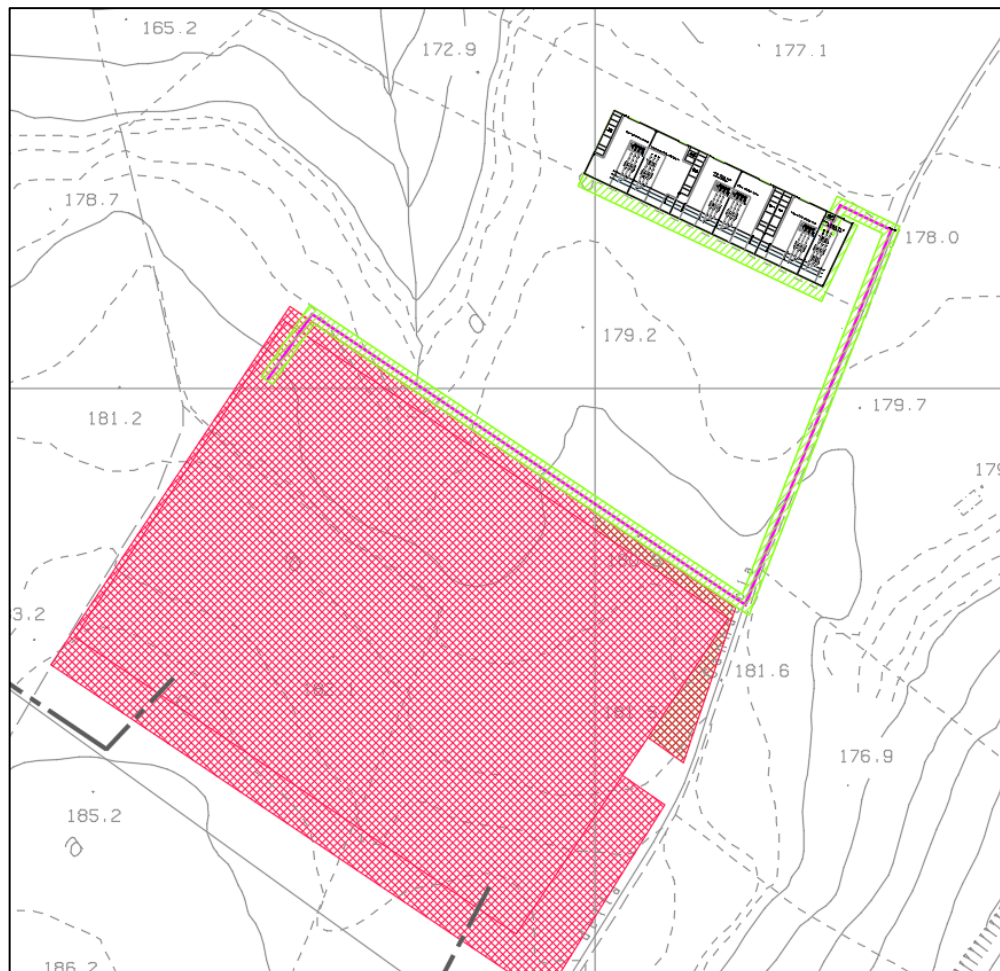


Figura 8 – Punto di raccolta Piana della Fontana e raccordo ad alta tensione con Dpa

Allegato 1: Documento di Validazione



Documento di Validazione

Algoritmi di calcolo del software MAGIC[®] (MAGnetic Induction Calculation)

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

Sommario

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

Premessa

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

Il confronto si sviluppa in tre parti:

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

Le principali caratteristiche del software MAGIC[®] sono:

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

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

1 Verifica del modulo bidimensionale

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

1.1 Confronto con CEI 211-04

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

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

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

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

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

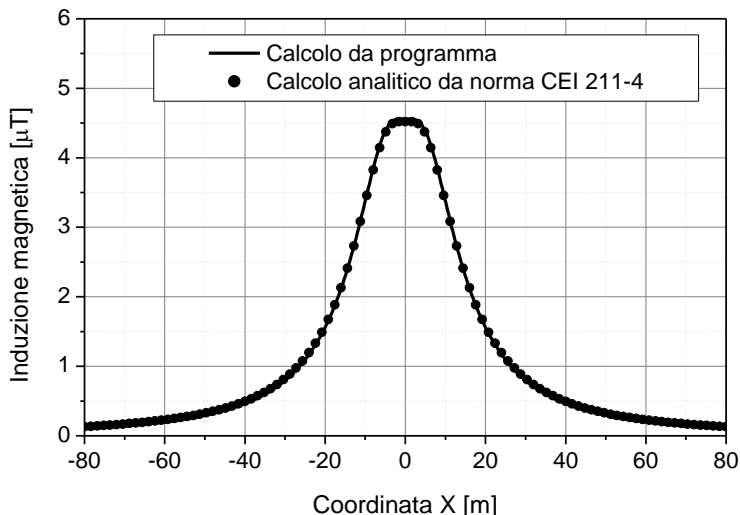


Figura 1: Induzione magnetica al suolo in prossimità di una linea aerea a doppia terna su semplice palificazione con corrente di 310: confronto tra MAGIC® e formula analitica CEI 211-4

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

1.2 Confronto con codice CESI

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

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

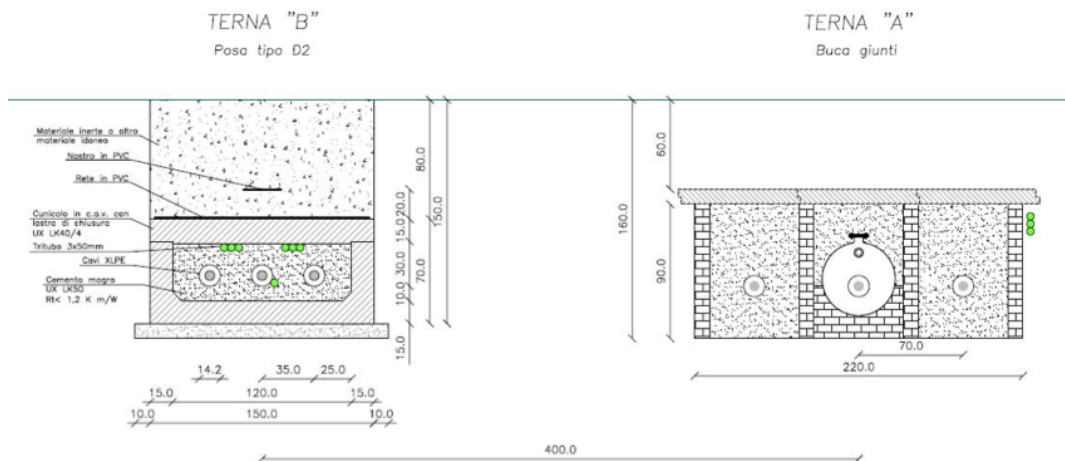


Figura 2: Affiancamento tra due linee interrate AT

Condizioni di carico e relazioni di fase:

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

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

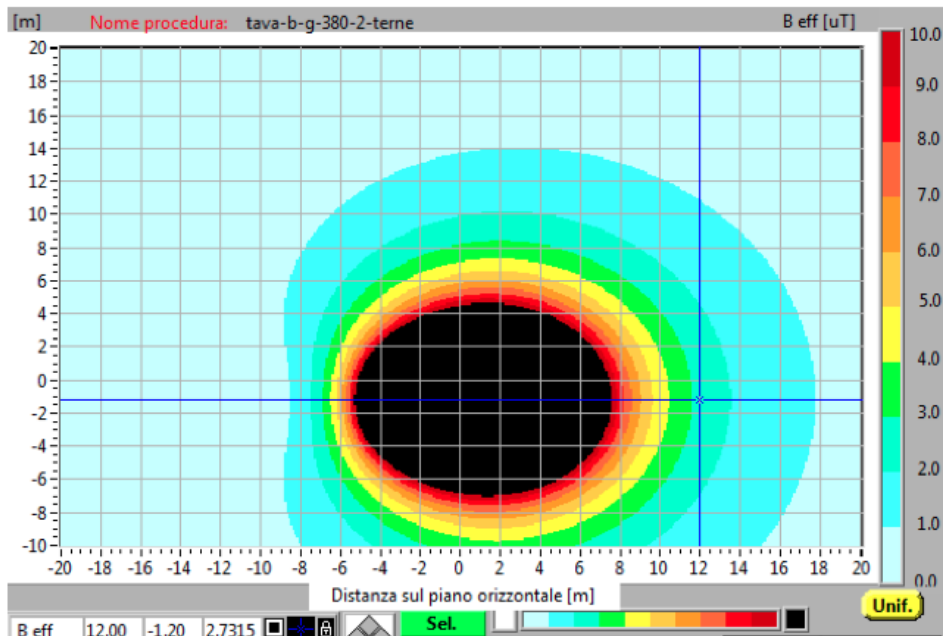


Figura 3: Mappa cromatica delle induzioni magnetiche calcolata mediante software CESI

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

- Terne parallele
- Multiconduttori 2D

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

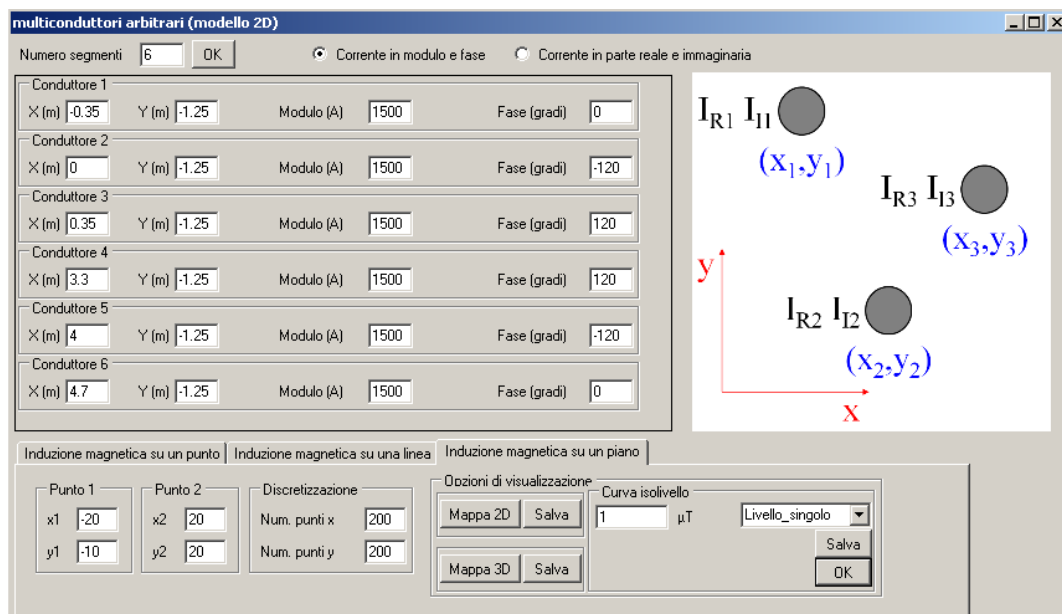


Figura 4: Schermata di ingresso modulo “multiconduttori arbitrari (modello 2D)”: dati definizione geometria e sorgenti

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

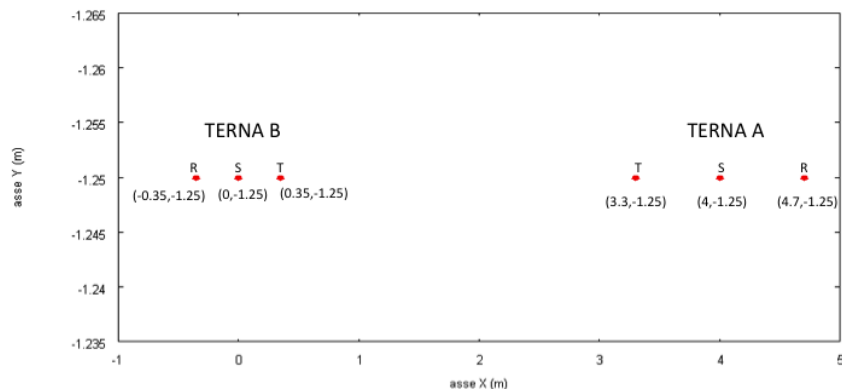


Figura 5: Geometria sorgenti

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

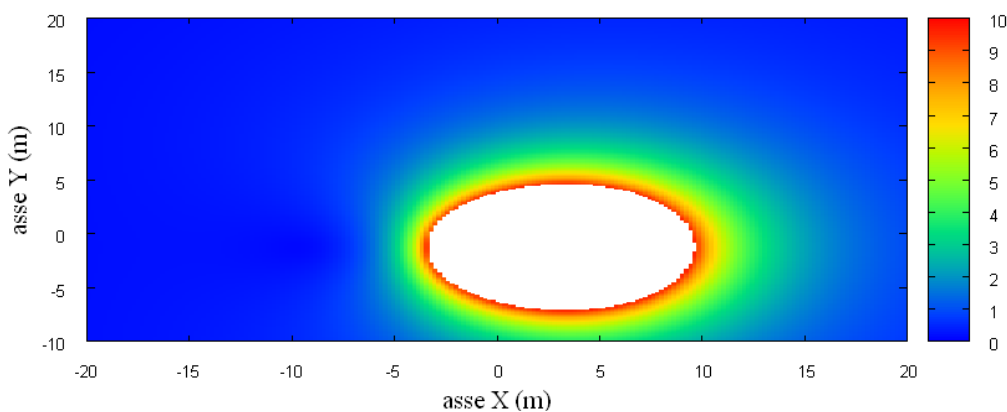


Fig. 6: Mappa cromatica dell’induzione magnetica ottenuta dal software MAGIC® (valori in microT):

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

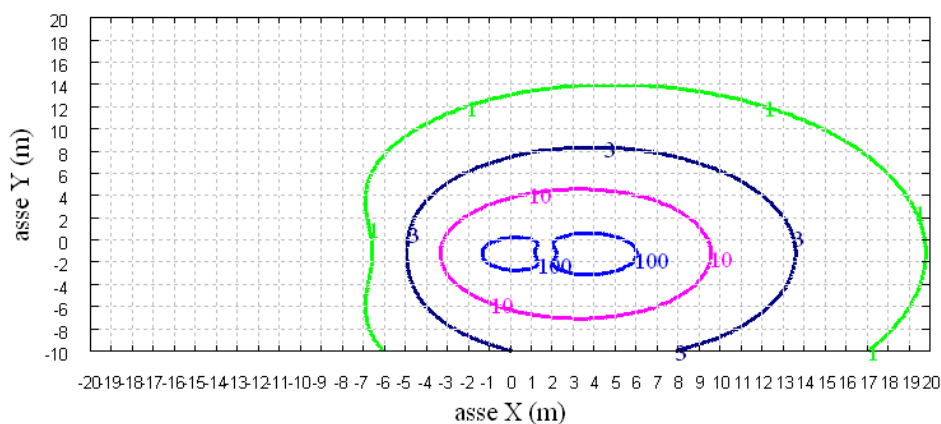
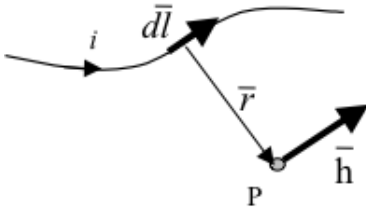


Fig. 7 Linee isolivello dell’induzione magnetica (1, 3, 10, 100 microT) da software MAGIC®.

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

2 Verifica del modulo tridimensionale

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

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

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.

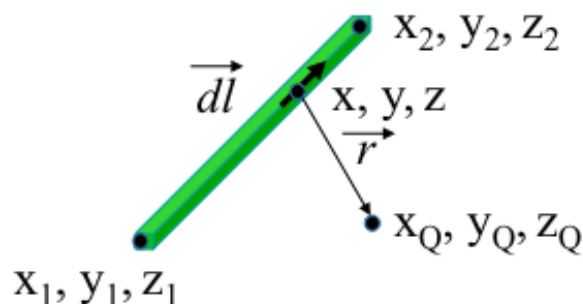


Fig. 8: Modello del segmento.

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.

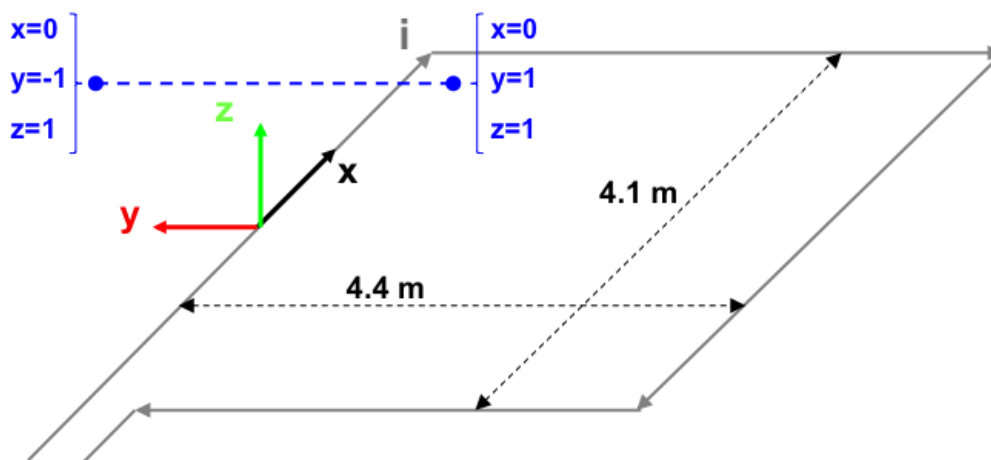


Fig. 9: Schema di spira quadrata.

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.

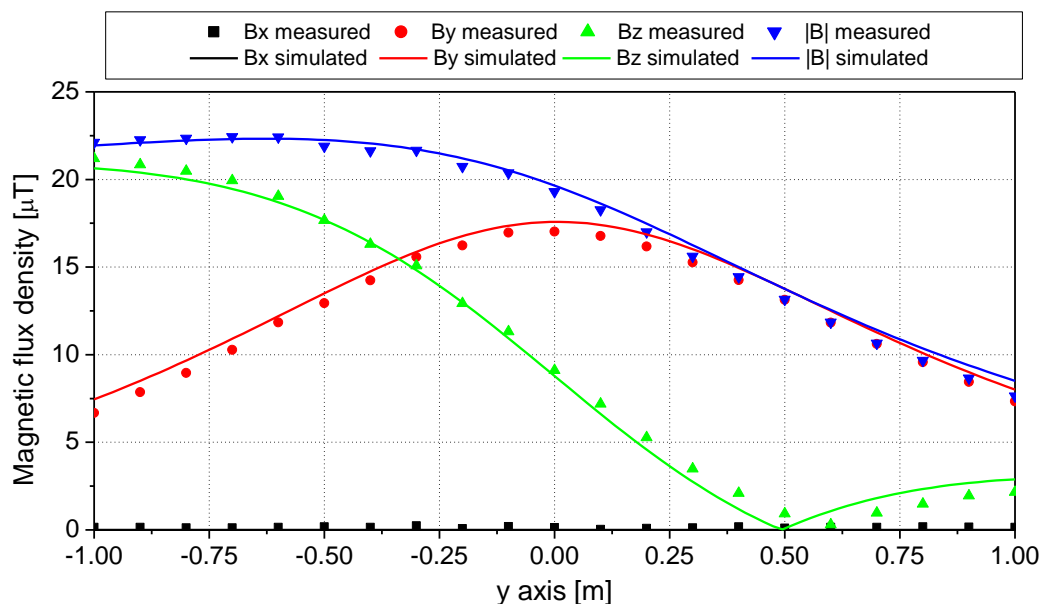


Fig. 10: Induzione magnetica misurata e calcolata mediante software MAGIC®.

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.

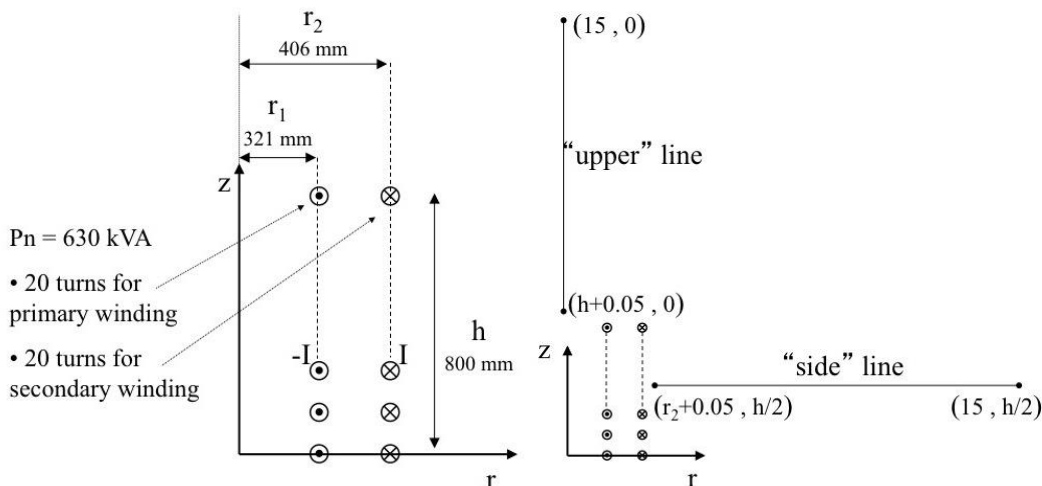


Fig. 11. Geometria del sistema (1) e linee di calcolo (2)

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).

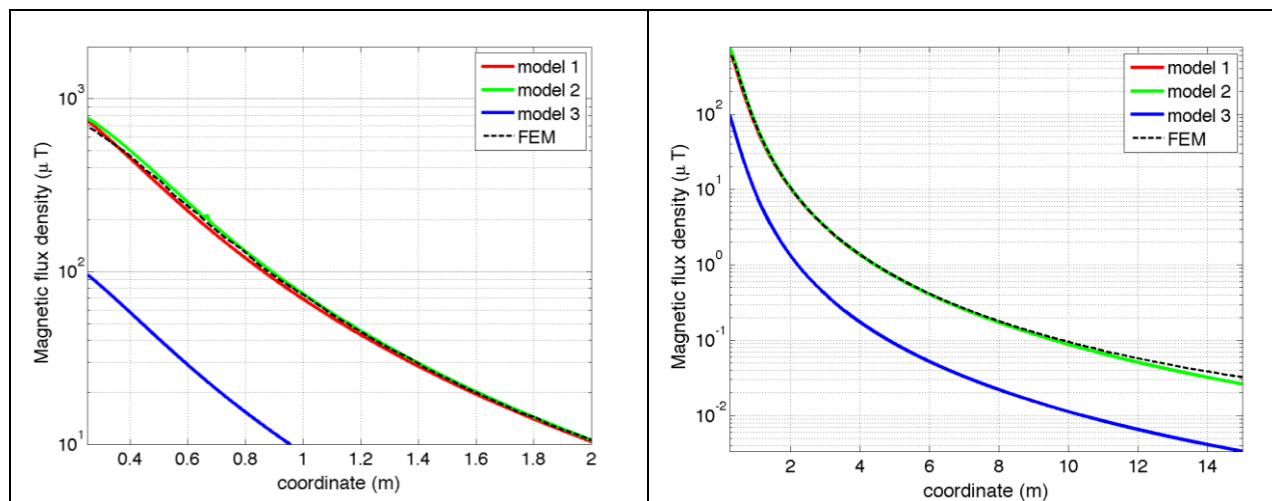


Fig. 12. Induzione magnetica lungo la linea laterale

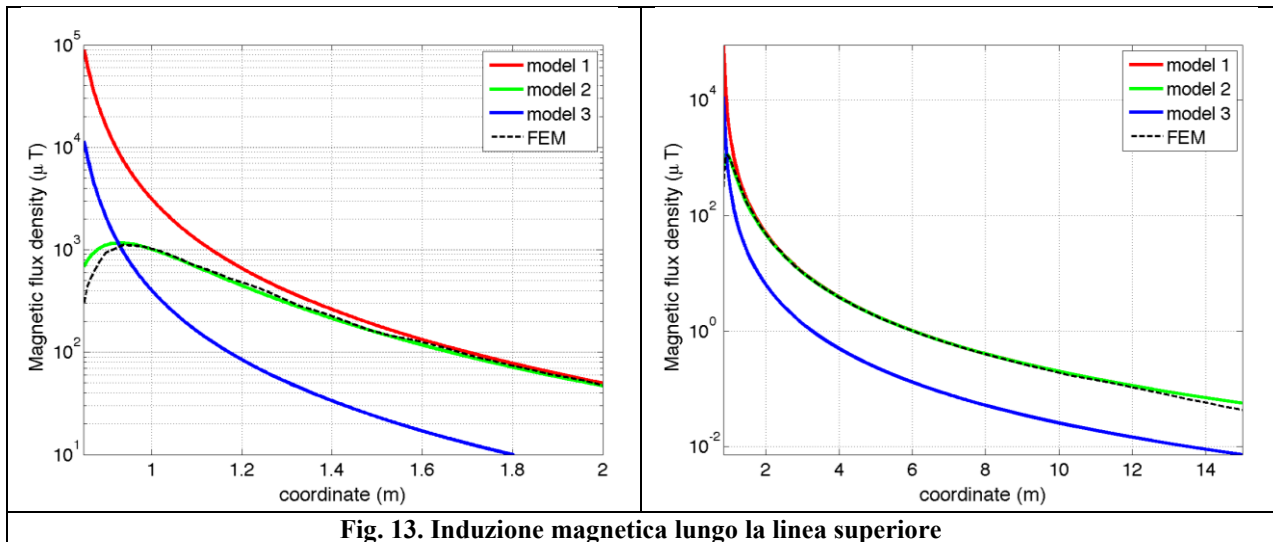


Fig. 13. Induzione magnetica lungo la linea superiore

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.

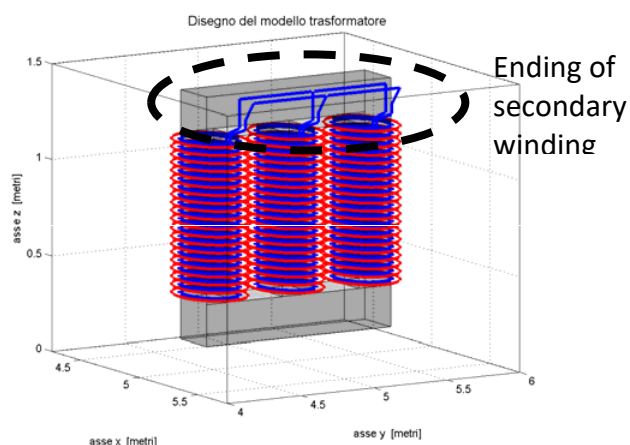


Fig. 14: Connessioni elettriche considerate ai lati BT.

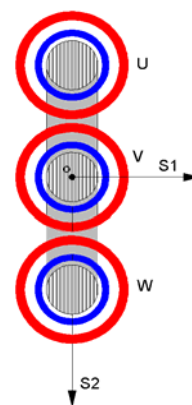


Fig. 15: Linee di calcolo S1 ed S2

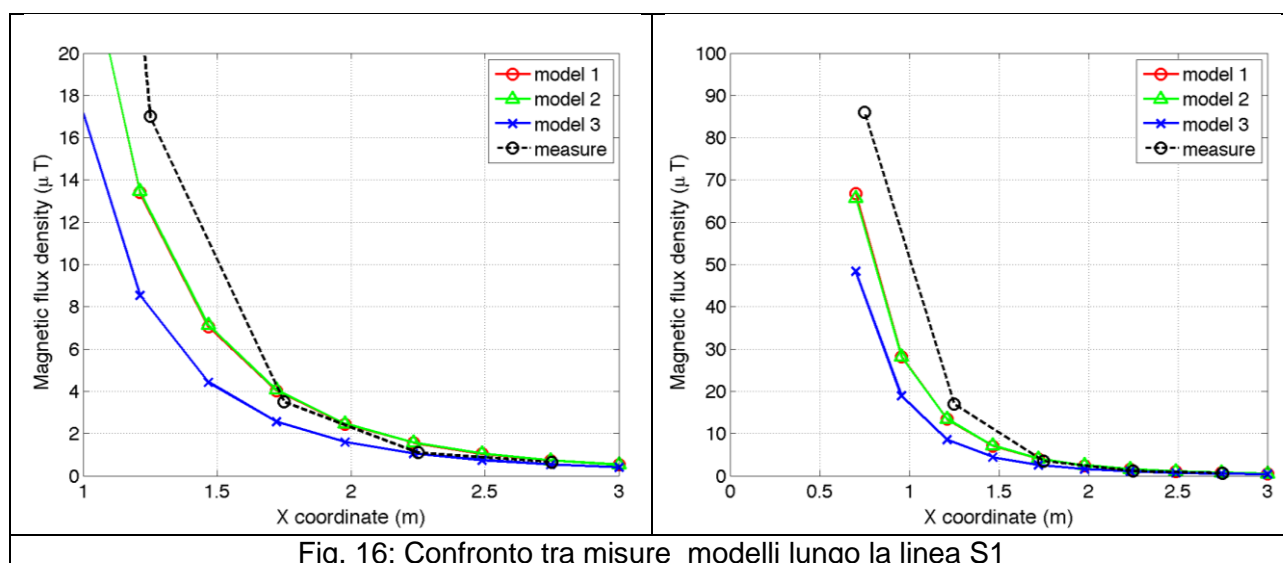


Fig. 16: Confronto tra misure modelli lungo la linea S1

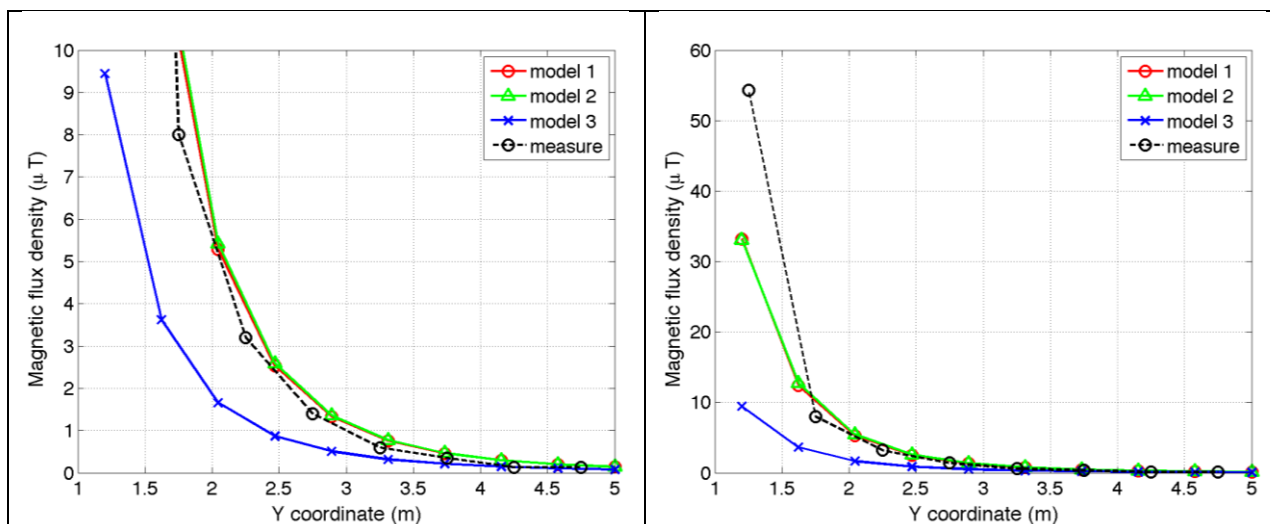


Fig. 17. Confronto tra misure modelli lungo la linea S2

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.