



Gianluca Brulli

REVISIONE	DATA	ELABORATO	VERIFICATO	APPROVATO	DESCRIZIONE
B	24.6.2024	103	013	093	Revisione per variazione posizione SE
A	15.4.2024	103	013	093	Emissione per autorizzazione
CODICE PRATICA CAPOFILE C.P. 202102241					TIPOLOGIA IMPIANTO CAPOFILE / POTENZA IN IMMISSIONE IMPIANTO FOTOVOLTAICO 36,5 MW
CAPOFILE  ARNG SOLAR I S.R.L. P.IVA 02328180688 Viale Giorgio Ribotta, 21 00144 - Roma Italia arngsolar@pec.it					IMPIANTO SE 150/36 kV CASTELLUCCIO SATELLITE
INGEGNERIA & COSTRUZIONI 					TITOLO RACCORDI AT 150 kV RELAZIONE CAMPI ELETTRICI E MAGNETICI
SCALA	FORMATO	FOGLIO / DI		N. DOCUMENTO	
-	A4	1 / 26		6 7 7 0 4 B	

SOMMARIO

1	PREMESSA	3
2	QUADRO NORMATIVO	4
3	CALCOLO DEL CAMPO MAGNETICO.....	5
3.1	Correnti di calcolo.....	5
3.2	Risultati.....	6
3.3	Verifica dei valori limite e DPA	7
3.4	Analisi dei ricettori	10
4	CONCLUSIONI	12

 <p>Reggio nell'Emilia - ITALIA</p>	<p>Progetto</p> <p align="center">SE 150/36 kV CASTELLUCCIO SATELLITE</p> <p align="center">Raccordi AT 150 kV</p> <p align="center">Relazione campi elettrici e magnetici</p>	<p>Documento e revisione</p> <p align="center">67704B</p> <p align="center">3</p>
--	---	---

1 PREMESSA

Oggetto della presente relazione è il calcolo dei campi elettrici e magnetici generati dal progetto del collegamento in doppia antenna, alla rete di trasmissione nazionale, di una nuova Stazione di trasformazione (SE) 150/36 kV denominata “Satellite di Castelluccio dei Sauri” (in seguito nei vari documenti di progetto identificata come “Castelluccio Satellite”), tramite due raccordi di linea a semplice terna 150 kV, su di una nuova Stazione Elettrica (SE) 380/150/36 kV denominata “Castelluccio dei Sauri” che sarà collegata in entrata alla linea esistente 380 kV “Foggia – Deliceto”. L’opera in oggetto verrà realizzata per garantire una migliore magliatura di rete, superare le criticità attuali e aumentare i margini di continuità del servizio di trasmissione oltre che connettere alla rete elettrica nazionale diversi produttori di energia da fonte rinnovabile, fra i quali ARNG Solar I (CP 202102241) avente funzione di capofila, per la redazione del PTO riferito alle opere di RTN, relativamente alla SE 150/36 kV Castelluccio Satellite e raccordi aerei 150 kV. Per maggiori dettagli riferiti al progetto della SE 150/36 kV Castelluccio Satellite si rimanda alla Relazione tecnica illustrativa (Documento No. 67401).

I raccordi a 150 kV tra le Stazioni Elettriche sopra citate, denominati come Raccordo A a Nord e Raccordo B a Sud, saranno realizzati in palificata a semplice terna ed armate con conduttore ad alta temperatura ZTACIR (ZTAL) $\varnothing 22,75$ mm, come da indicazione Terna al fine di garantire una portata target, nello specifico 1.000 A, in periodo estivo.

I parametri limite di progettazione, oltre alla portata di corrente, sono il rispetto del franco minimo di legge e del valore di qualità per i campi magnetici di $3 \mu T$, così come previsto dal DM 8/07/2003. La scelta del conduttore sopra indicata è giustificata dalla portata target richiesta da Terna di 1.000 A nel periodo estivo; a differenza dei conduttori tradizionali, i conduttori ad alta temperatura sono stati sviluppati identificando formazioni con caratteristiche finalizzate a risolvere esigenze puntuali di incremento della portata o di riduzione della freccia. Il franco minimo sarà non inferiore ai 10 metri, superiore a quello strettamente previsto dalla normativa vigente.

Gli elettrodotti in questione si sviluppano all’interno della Provincia di Foggia, rispettivamente da Ovest, partendo dalla futura SE 380/150/36 kV Castelluccio dei Sauri posizionata nel Comune di Castelluccio dei Sauri, proseguendo in direzione Est attraversando il Comune di Ascoli Satriano, sino alla futura SE 150/36 kV Castelluccio Satellite ubicata nel Comune di Ortona.

I due elettrodotti percorrono il loro rispettivo tracciato per lo più in posizione parallela l’uno con l’altro di cui uno posizionato a Nord (Raccordo A) e il secondo a Sud (Raccordo B).

L’elettrodotto più a nord, anche denominato Raccordo A, prevede l’utilizzo del conduttore ZTAL $\varnothing 22,75$ mm di lunghezza pari a 8.640 m e necessita della realizzazione di venticinque nuovi sostegni, esclusi i portali pali gatto, previsti in SE 380/150/36 kV Castelluccio dei Sauri e in SE 150/36 kV Castelluccio Satellite. L’opera si sviluppa nei Comuni di Castelluccio dei Sauri (vi ricade il palo gatto PGA1 e il palo P1A), Ascoli Satriano (dal sostegno PA2 al sostegno PA20) e Ortona (dal sostegno P21A al palo gatto PGA2).

L’elettrodotto più a sud, anche denominato Raccordo B, prevede l’utilizzo del conduttore ZTAL $\varnothing 22,75$ mm di lunghezza pari a 8.613 m e necessita della realizzazione di venticinque nuovi sostegni, esclusi i pali gatto, previsti in SE 380/150/36 kV Castelluccio dei Sauri e in SE 150/36 kV Castelluccio Satellite. L’opera si sviluppa nei Comuni di Castelluccio dei Sauri (dal palo gatto PGB1 al sostegno PB1), Ascoli Satriano (dal sostegno PB2 al sostegno PB19) e Ortona (dal sostegno PB20 al palo gatto PGB2).

La presente relazione tratta solo gli elettrodotti a 150 kV: i campi elettrici e magnetici generati dalla SE 380/150/36 kV Castelluccio dei Sauri e dalla SE 150/36 kV Castelluccio Satellite non sono oggetto del presente elaborato.

2 QUADRO NORMATIVO

La normativa che regola l'esposizione della popolazione a campi elettromagnetici risale ai primi anni '90. La prima legge emanata, ora abrogata, è il DPCM 23 Aprile 1992 "Limiti massimi di esposizione ai campi elettrico e magnetico generati alla frequenza industriale nominale (50 Hz) negli ambienti abitativi e nell'ambiente esterno": tale normativa fissava la distanza da mantenersi dagli elettrodotti aerei e i valori massimi di esposizione per la popolazione. Con il crescente interesse da parte della popolazione per la tematica in oggetto, è stata avvertita la necessità di una regolamentazione più dettagliata dell'esposizione ai campi elettrici e magnetici, cui ha fatto seguito l'emanazione di numerose leggi regionali e della legge quadro nazionale.

In particolare, la Legge Quadro No. 36 del 22 Febbraio 2001 "Legge quadro sulla protezione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici" ha lo scopo di assicurare la tutela della salute dei lavoratori, delle lavoratrici e della popolazione dagli effetti dell'esposizione a determinati livelli di campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici e di assicurare la tutela dell'ambiente e del paesaggio promuovendo l'innovazione tecnologica.

Con i successivi decreti attuativi, DPCM 8 Luglio 2003, sono stati fissati i livelli di esposizione, di attenzione e l'obiettivo di qualità da rispettarsi al fine della tutela della salute della popolazione.

Nella tabella 1 seguente riportiamo i valori fissati come limite di esposizione, valore di attenzione e obiettivo di qualità per campi elettrici e magnetici prodotti alla frequenza di rete (50 Hz) connessi al funzionamento e all'esercizio degli elettrodotti.

	Campo magnetico (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	-	

Figura 1 - valori come da normativa in vigore

Con il DM del 29 Maggio 2008 "Approvazione della metodologia di calcolo per la determinazione delle fasce di rispetto per gli elettrodotti" viene approvata la metodologia di calcolo per la determinazione delle fasce di rispetto degli elettrodotti, in relazione a quanto previsto dal DPCM 8 Luglio 2003: uno degli scopi è la regolamentazione delle nuove installazioni e/o nuovi insediamenti presso elettrodotti o edifici esistenti. A tal fine occorre approntare i corretti strumenti di pianificazione territoriale come la previsione di fasce di rispetto, calcolate sulla base di parametri certi e stabili nel lungo periodo. Le fasce di rispetto sono infatti definite come "lo spazio circostante un elettrodotto, che comprende tutti i punti, al di sopra e al di sotto del livello del suolo, caratterizzati da un'induzione magnetica di intensità maggiore o uguale all'obiettivo di qualità: all'interno delle fasce di rispetto non è consentita alcuna destinazione di edifici ad uso residenziale scolastico sanitario ovvero ad uso che comporti una permanenza non inferiore a quattro ore giorno". Tali fasce di rispetto sono variabili in funzione ai dati caratteristici di ogni tratta o campata considerata in relazione ai dati caratteristici della stessa. Al fine di facilitare la gestione territoriale è stato introdotto il concetto di **Distanza di Prima Approssimazione (Dpa)** quale: "la distanza, in pianta sul livello del suolo, dalla proiezione del centro linea, che garantisce che ogni punto la cui proiezione al suolo disti dalla proiezione del centro linea più di Dpa si trovi all'esterno delle fasce di rispetto".

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

La rete elettrica nazionale, di cui le linee RTN 150 kV "SE 380/150/36 kV Castelluccio dei Sauri – SE 150/36 kV Castelluccio Satellite" 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". Inoltre, il limite di esposizione del campo elettrico risulta sempre rispettato esternamente alla recinzione della stazione.

Al fine di stimare il campo magnetico prodotto dai cavidotti in oggetto e determinare le Dpa da applicarle, si procede, 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 corrispondente alla portata in servizio normale 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). Esso permette inoltre di studiare le singole sorgenti (linee elettriche, cavi, sistemi multiconduttori, trasformatori) configurazioni bidimensionali e tridimensionali attraverso l'integrazione della legge di Biot-Savart o lo studio di sistemi complessi, come le cabine elettriche MT/BT, tenendo conto della tridimensionalità delle sorgenti, della loro reale posizione e della sovrapposizione degli effetti delle diverse componenti.

3.1 Correnti di calcolo

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

Il progetto è realizzato tenendo conto - per la verifica delle altezze sul suolo e delle distanze di rispetto - di una temperatura di 160 °C anziché di 55 °C (temperatura pari a quella prevista dalla norma CEI 11-60 e dal DM 21 Marzo 1988 previsti per la Zona A), tale temperatura consente al conduttore di far transitare una corrente continuativa di 1.007 A nel periodo caldo e **1.077 A** nel periodo freddo.

Ciascun conduttore di energia sarà costituito da una corda di alluminio-acciaio della sezione complessiva di 306,94 mm² composta da 7 fili in lega di Fe-Ni rivestiti di alluminio (ACI) del diametro 3,25 mm e da 30 fili in lega di alluminio (ZTAL) del diametro di 3,25 mm, con un diametro complessivo di 22,75 mm. Il carico di rottura teorico del conduttore sarà di 9.872 daN.

La scelta del conduttore sopra indicata è giustificata dalla portata target richiesta da Terna di 1.000 A nel periodo estivo; a differenza dei conduttori tradizionali, i conduttori ad alta temperatura sono stati sviluppati identificando formazioni con caratteristiche finalizzate a risolvere esigenze proprio di incremento della portata o di riduzione della freccia;

Conduttore ZTACIR (ZTAL) Ø22,75 mm (C17)

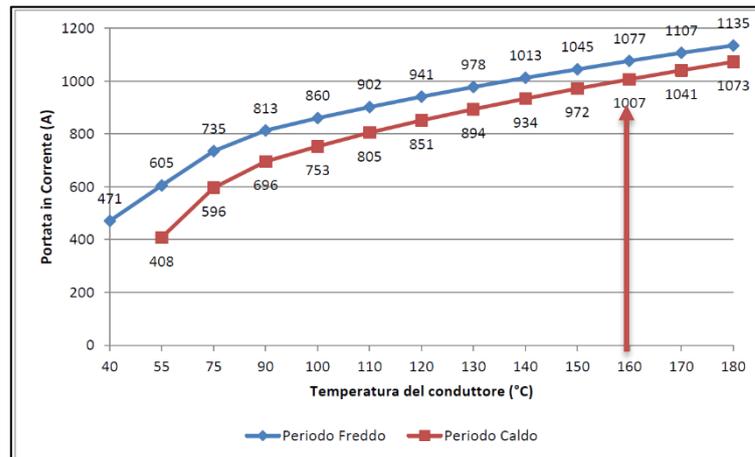


Figura 2

Nella tabella in figura 2 (estratto LIN_0000C107) sono indicate le curve dove è possibile, in alternativa:

- fissato un valore della portata in esercizio continuativo della linea, determinare la temperatura del conduttore da utilizzare per le verifiche dei franchi al suolo (condizione di massima freccia);
- calcolata la massima temperatura in grado di permettere il rispetto dei franchi al suolo, determinare la massima portata in esercizio continuativo transitabile sulla linea.

Tali verifiche vengono effettuate con la curva relativa al periodo caldo in quanto più cautelativa in termini di portata massima transitante a pari temperatura limite.

Per il conduttore ad alta temperatura ZTACIR $\varnothing 22,75$ mm, come evidenziato dal grafico precedente, non si considera una differenza tra zona A e zona B. Considerando la necessità di garantire una portata target richiesta da Terna di 1.000 A, il franco di legge è stato verificato ad una temperatura di 160° C e la portata in corrente nel periodo freddo risulta pari a **1.077 A**, dato preso in considerazione come corrente di calcolo per le Distanze di Prima Approssimazione (DPA).

3.2 Risultati

I valori di campo magnetico generati dall'elettrodotto sono calcolati al fine di definire le ampiezze delle fasce di prima approssimazione da applicarsi dall'asse dell'elettrodotto aereo. Tali valori sono desunti utilizzando le correnti come descritto nel capitolo precedente.

Riportiamo nel seguito i risultati delle simulazioni effettuate rispettivamente considerando i cavi come disposti sul palo gatto configurazione che corrisponde al Palo Gatto all'interno delle stazioni elettriche, e con i conduttori a triangolo come nella restante parte di elettrodotto. L'asse dei grafici è posto nell'asse dei tralicci.

Linee aeree - calcolo su piano yz - quota X=75

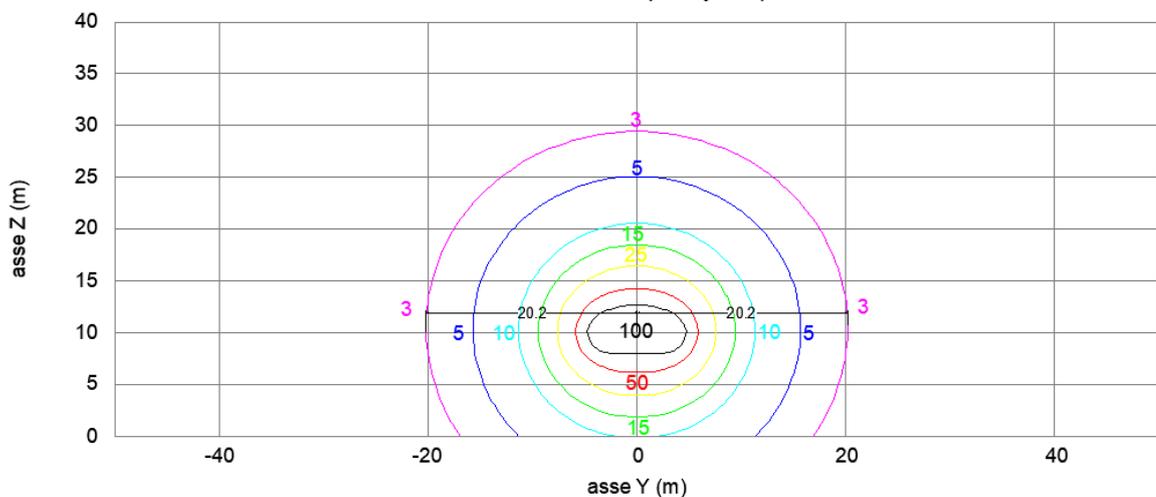


Figura 3 – Calcolo dei livelli di campo magnetico generato dai conduttori del tratto aereo come disposti sul palo gatto

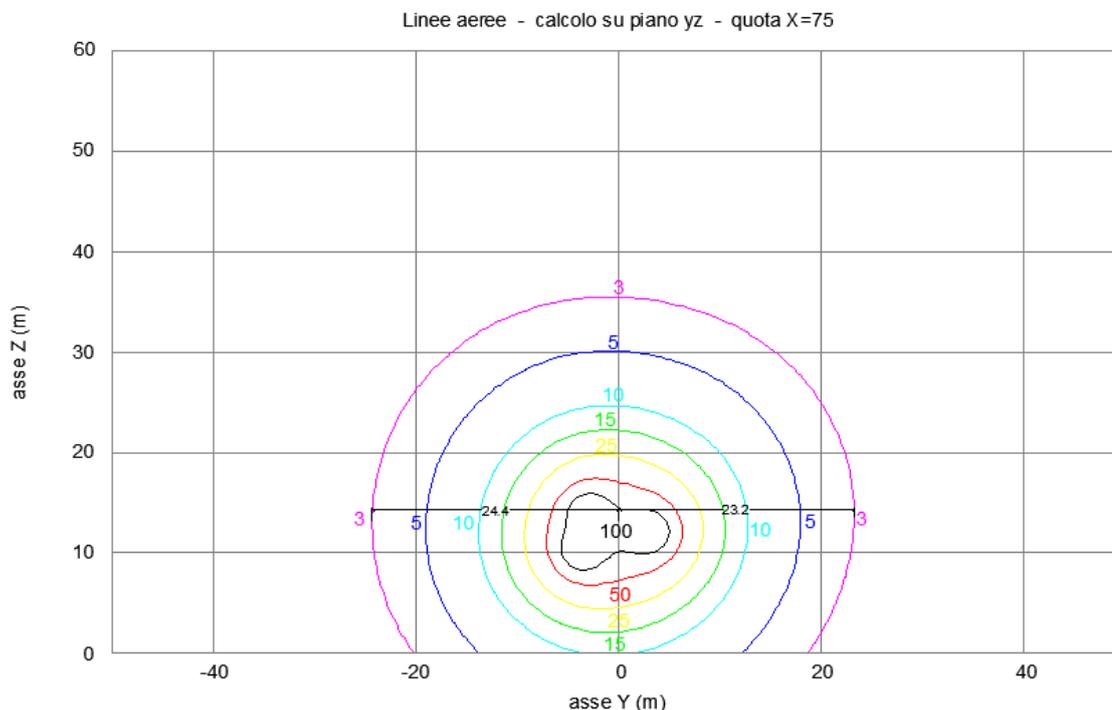


Figura 4 – Calcolo dei livelli di campo magnetico generato dai conduttori del tratto aereo, con disposizione delle fasi a triangolo

3.3 Verifica dei valori limite e DPA

Nelle Figura 3 e Figura 4 sono riportati gli andamenti delle intensità del campo magnetico. Dai grafici si può vedere 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 possono ricavare le ampiezze delle fasce di rispetto del valore di qualità di $3 \mu\text{T}$, che riportiamo nella tabella sottostante, arrotondate per eccesso al metro, come previsto dalla norma.

DPA dall'asse della linea			DPA riportate dalle Linee Guida con corrente di calcolo pari a 1.077 A	
configurazione	lato sx (m)	lato dx (m)	lato sx (m)	lato dx (m)
palo gatto	21	21	21	21
triangolo	25	24	25	24

Le ultime due colonne a destra della tabella riportano la fascia di rispetto 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 correnti inferiori alla nostra. Nello spirito cautelativo di definizione delle Dpa si ritiene di applicare la fascia di rispetto maggiore, pari a 25 m a tutti i tratti di linea coinvolti per entrambi gli elettrodotti.

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".

Le linee sono state progettate cercando di mantenere una traiettoria il più rettilinea possibile, si rende necessario effettuare alcuni cambiamenti di direzione significativi solo per evitare costruzioni, impianti esistenti e zone vincolate del territorio foggiano. Si analizza di seguito nel dettaglio il cambiamento di direzione in prossimità dei pali n. 15A (13°) e 17A (10°) in quanto, anche se non quelli di ampiezza maggiore, si trovano a distanza ravvicinata da ricettori sensibili presenti nell'area. Per semplicità, il calcolo dei campi elettrici e magnetici considera la tratta completa dal sostegno P14A al sostegno P18A.

Dal profilo della linea, riportato nel documento 67772 si osserva che il traliccio n. 14A ha una altezza al conduttore più basso di 24 m, il traliccio n. 15A ha un'altezza al conduttore più basso di 24 m, il traliccio n. 16A ha un'altezza al conduttore più basso di 15 m, il traliccio n.17A ha un'altezza al conduttore più basso di 27 m e infine il traliccio n. 18A ha un'altezza al conduttore più basso di 27 m.

Nelle immagini successive sono riportate le curve di isolivello del campo magnetico generata dalla configurazione dei tralicci in progetto.

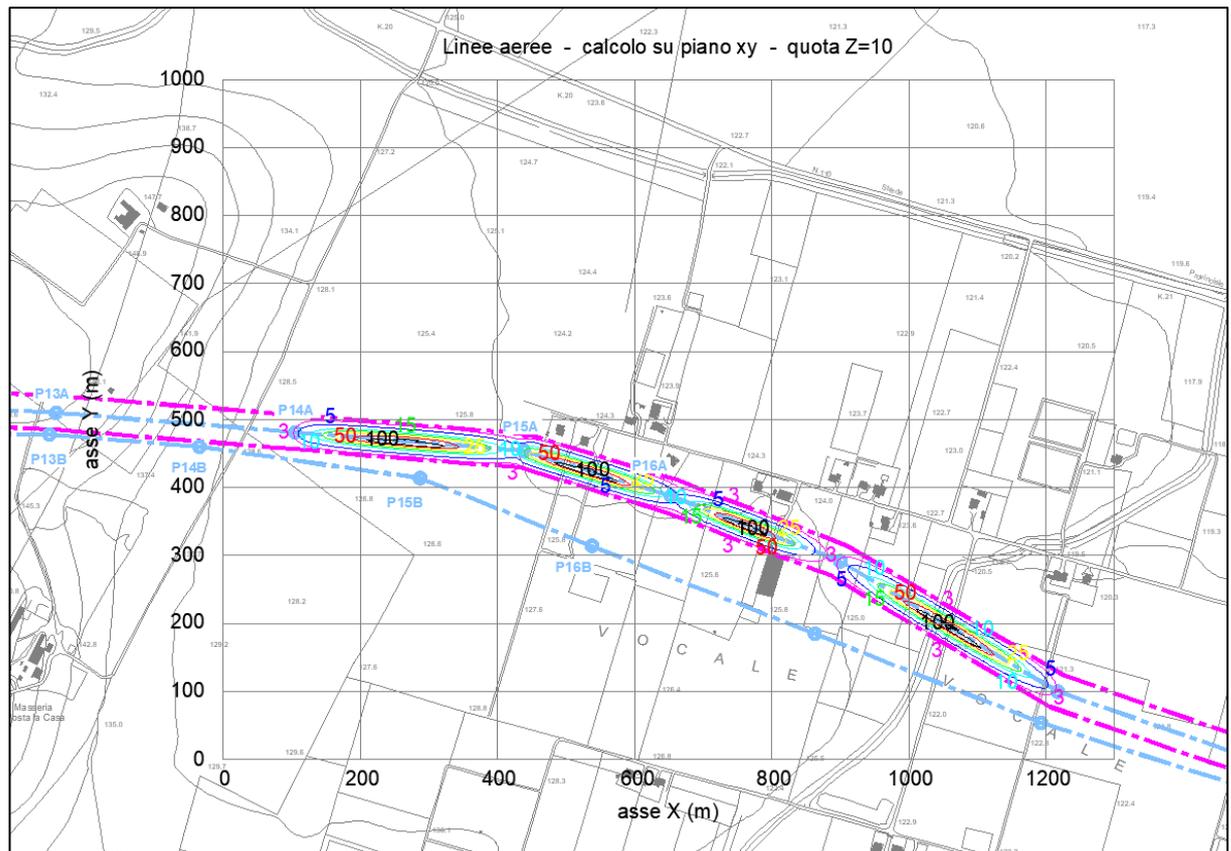


Figura 5 - calcolo dei campi magnetici generati nella tratta P14A – P18A a 10 metri dal suolo

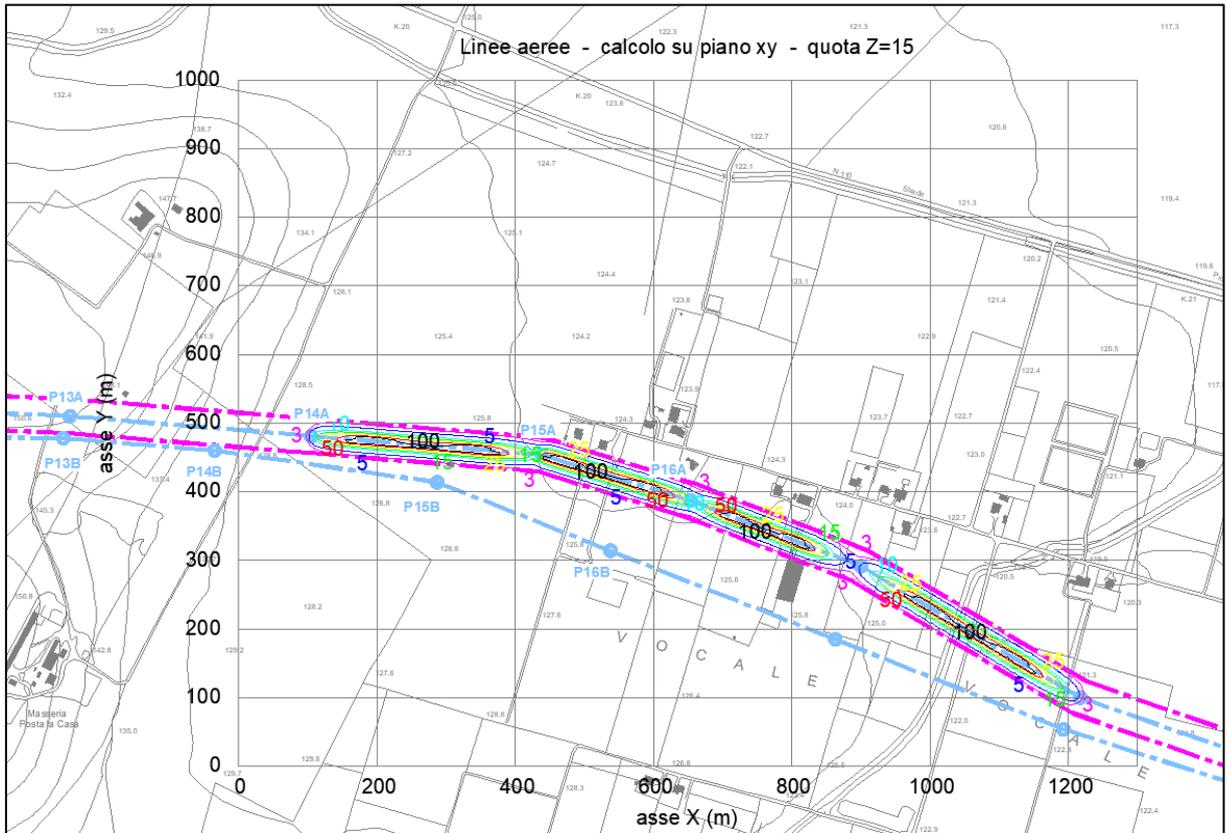


Figura 6 - calcolo dei campi magnetici generati nella tratta P14A – P18A a 15 metri dal suolo

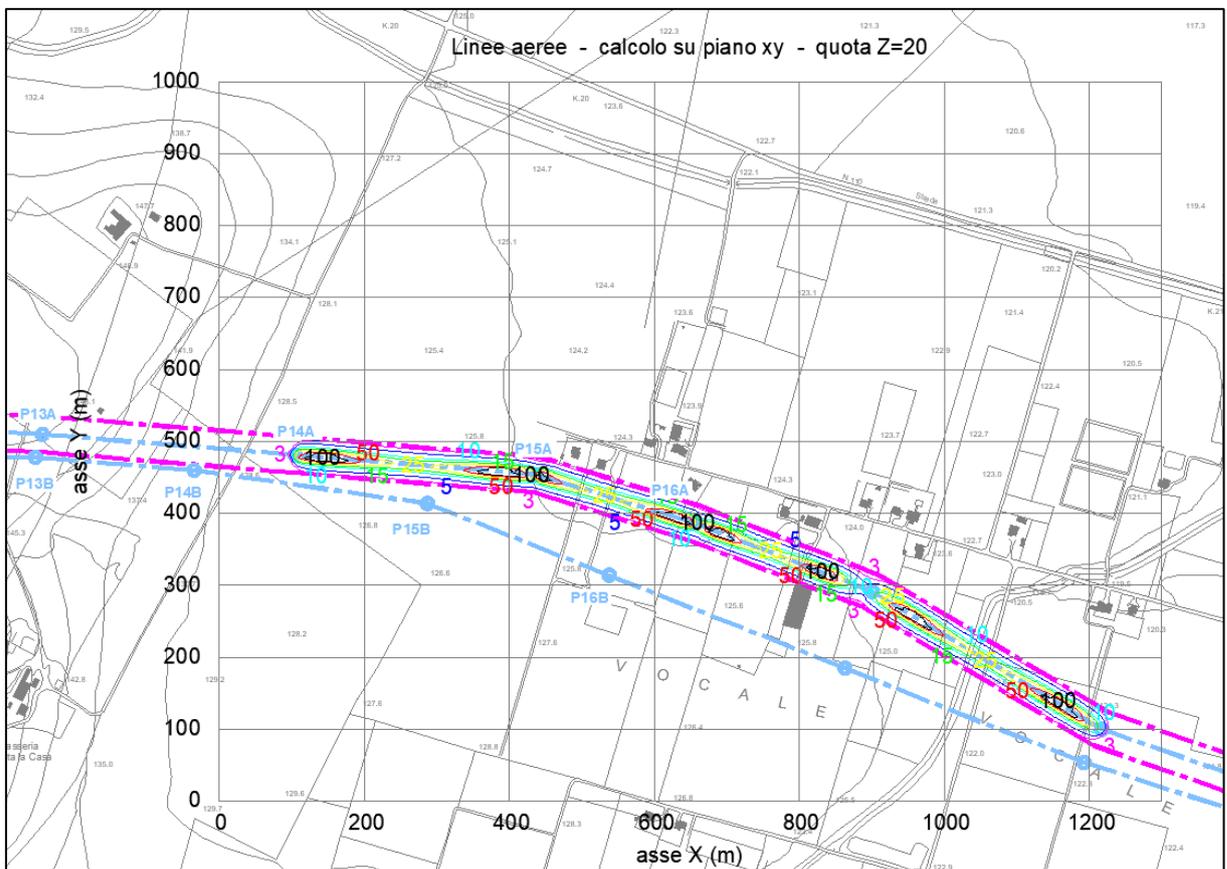


Figura 7 - calcolo dei campi magnetici generati nella tratta P14A – P18A a 20 metri dal suolo

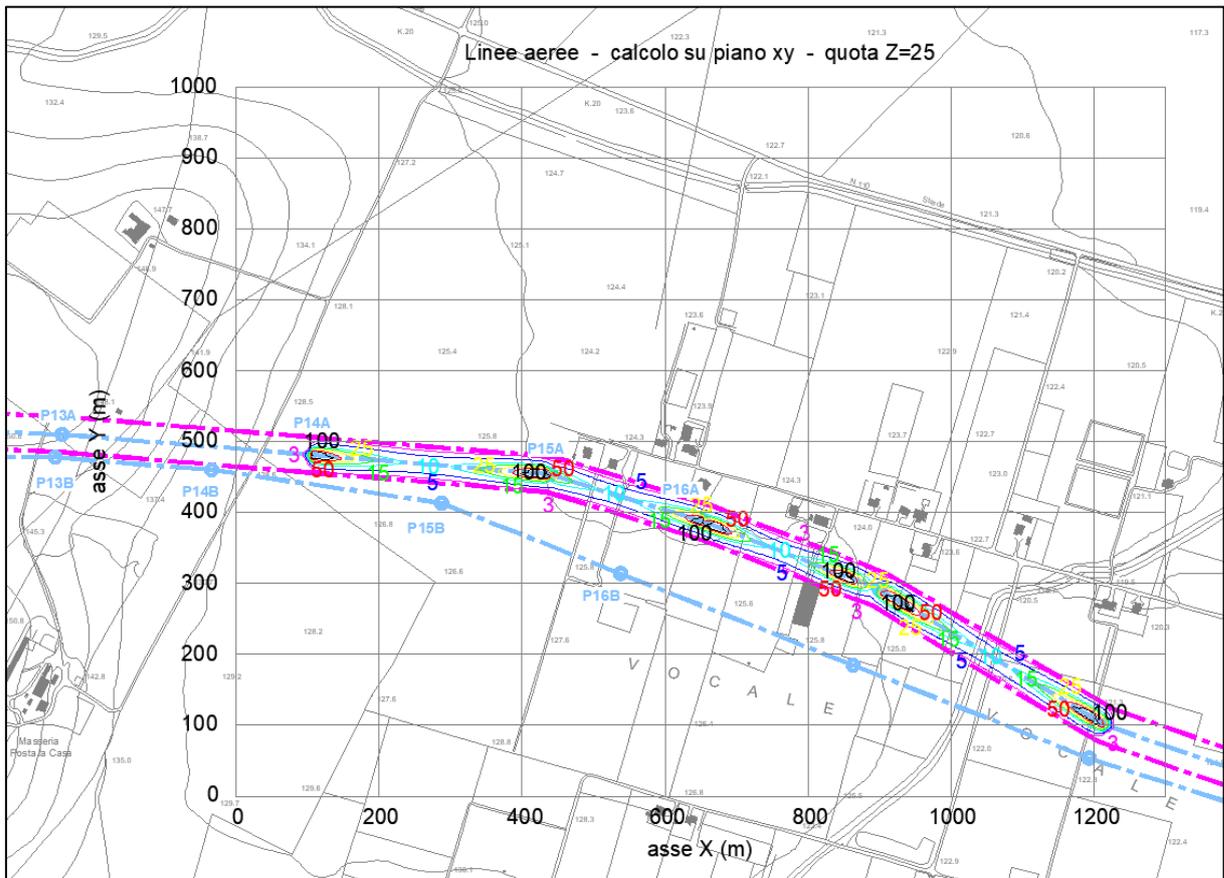


Figura 8 - calcolo dei campi magnetici generati nella tratta P14A – P18A a 25 metri dal suolo

Come si osserva dalle figure precedenti in corrispondenza degli angoli interni dei pali della tratta P14A – P18A la Dpa non subisce variazioni.

3.4 Analisi dei ricettori

L'area su cui insiste lo studio del tracciato degli elettrodotti è classificata come "area agricola". In tali aree sono presenti alcune abitazioni sparse e qualche impianto per la produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile. Nella progettazione del tracciato degli elettrodotti in oggetto sono stati presi in considerazione sin dall'inizio i pochi ricettori sensibili presenti. In particolare, durante il sopralluogo sono stati individuati vari punti in cui i ricettori sensibili sono posti a meno di 100 metri dall'asse dell'elettrodotto in progetto.

Nell'immagine successiva, riportiamo una foto aerea dell'area interessata dalla realizzazione degli elettrodotti, dove si osserva la natura agricola della zona.



Figura 9

Nell'immagini seguenti sono riportati gli edifici individuati quali ricettori sensibili e per ognuno riportiamo la distanza dall'asse del nuovo elettrodotto. Si sottolinea che tutti questi edifici ricadono al di fuori delle Distanze di Prima Approssimazione come cautelativamente calcolate.

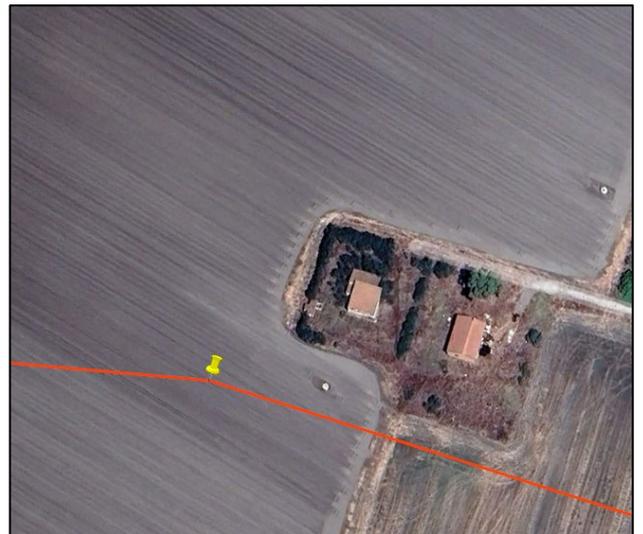
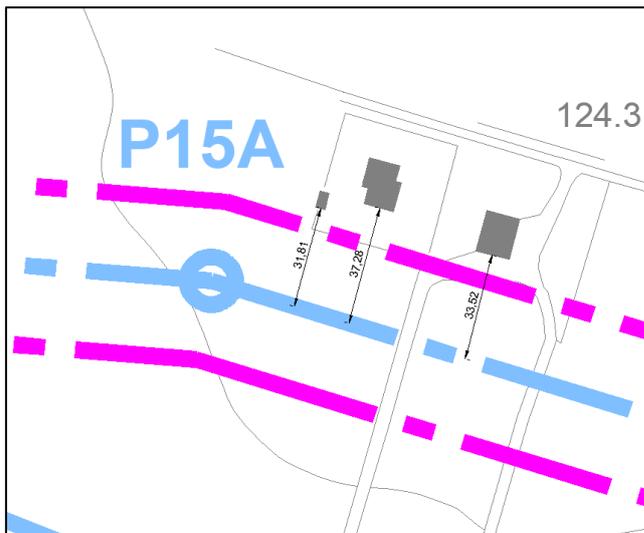


Figura 10 – Ricettori in prossimità del traliccio n.P15A

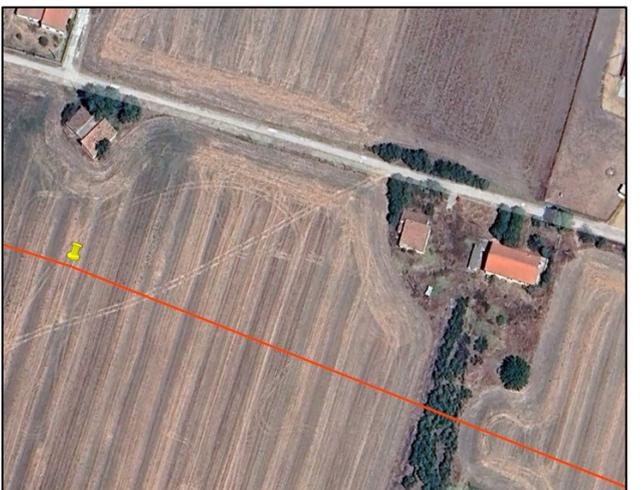
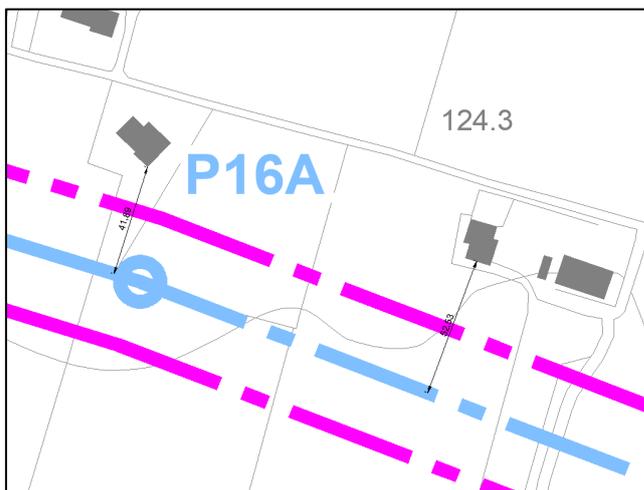


Figura 11 – Ricettori in prossimità del traliccio n.P16A

Come si osserva dalle immagini riportate tutti i ricettori sono posti al di fuori delle DPA di 25 metri idonee a garantire il rispetto del valore di qualità di $3 \mu\text{T}$, determinate in base ai valori massimi di campo magnetico corrispondenti alla disposizione a traliccio dei conduttori.

Come si osserva dalla Figura 12, il ricettore presente tra i due elettrodotti ricade in minima parte all'interno delle DPA di 25 metri. Dal sopralluogo effettuato è stato possibile accertarsi del fatto che il ricettore interessato è adibito a serra; per la sua natura questa non viene considerata come ricettore sensibile ai fini dei campi elettrici e magnetici.



Figura 12

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.

I calcoli effettuati in base a quanto stabilito dal DM 29/05/2008 e dalle Linee Guida per l'applicazione del punto 5.1.3 dell'allegato al DM 29/05/2008" hanno permesso di determinare la ampiezza della Distanza di Prima approssimazione pari rispettivamente a **25 metri** da applicare alla tratta aerea del nuovo tracciato dell'elettrodotto. Si osserva che il tracciato dell'elettrodotto è posto ad almeno 30 metri dal primo ricettore sensibile, considerando anche, tra i ricettori più prossimi abitazioni diroccate, ma non i ricoveri per gli attrezzi.

Le Dpa sono riportate nel documento 67724 Planimetria catastale – distanze di prima approssimazione.

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.

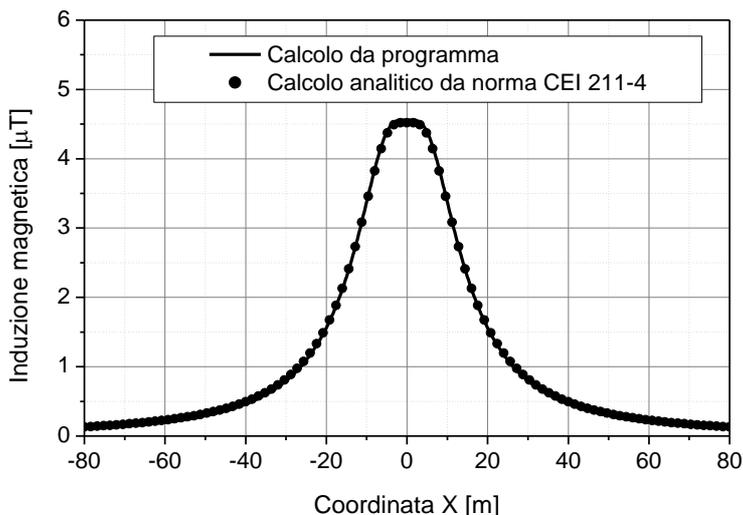


Figura 1: Induzione magnetica al suolo in prossimità di una linea aerea a doppia terna su semplice palificazione con corrente di 310: confronto tra MAGIC® e formula analitica CEI 211-4

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

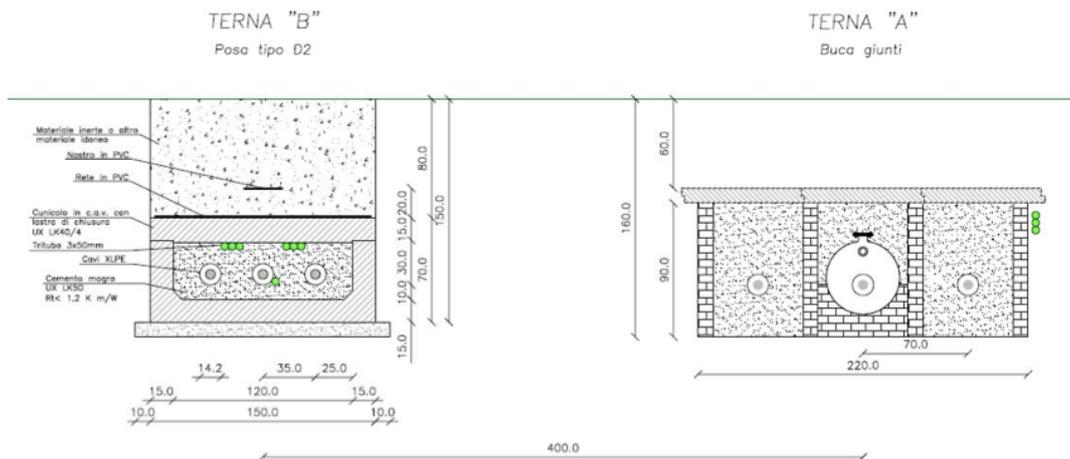


Figura 2: Affiancamento tra due linee interrate AT

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.

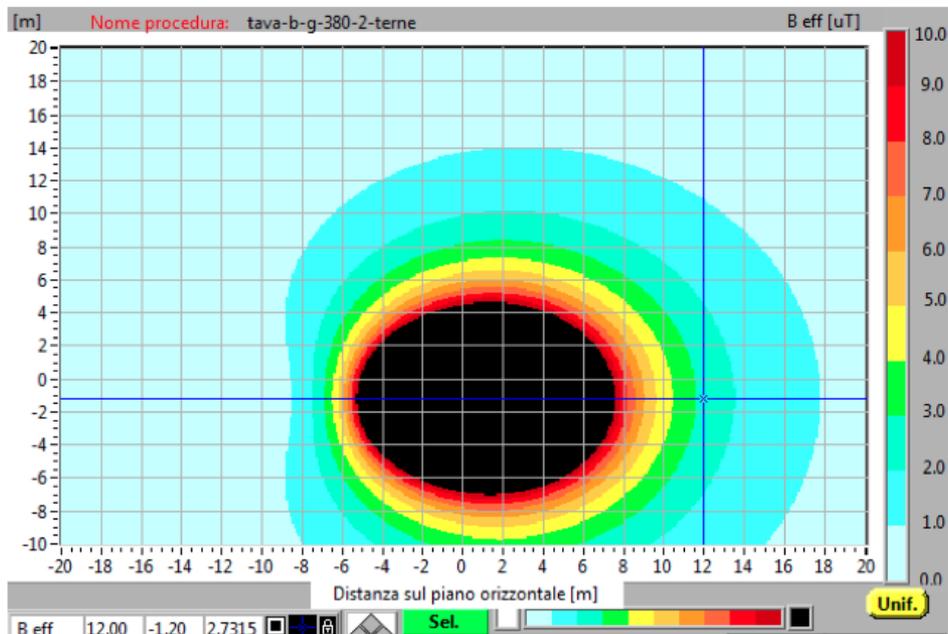


Figura 3: Mappa cromatica delle induzioni magnetiche calcolata mediante software CESI

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.

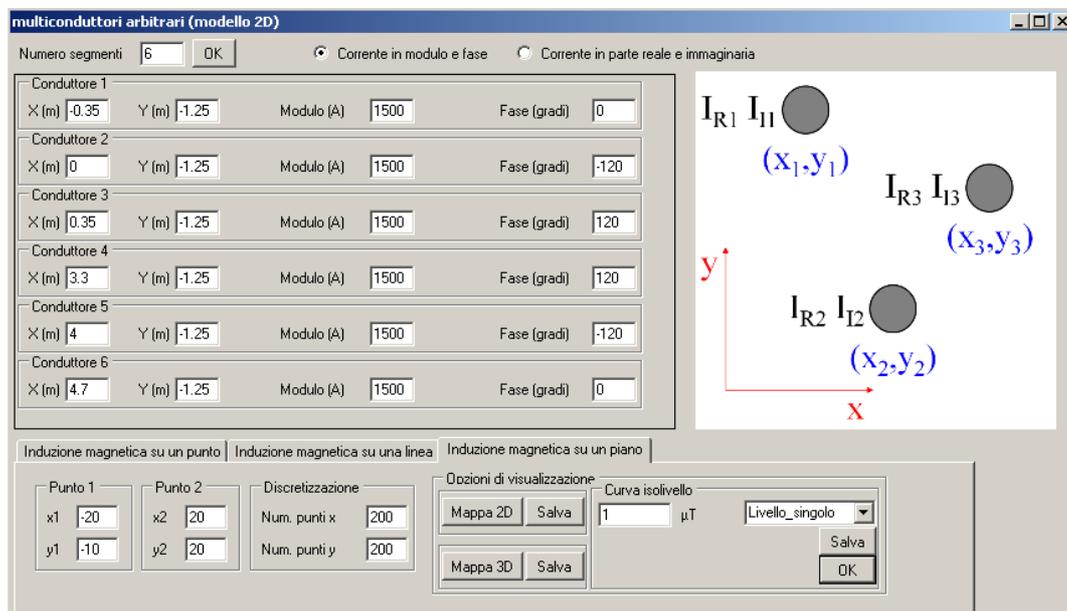


Figura 4: Schermata di ingresso modulo “multiconduttori arbitrari (modello 2D)”: dati definizione geometria e sorgenti

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

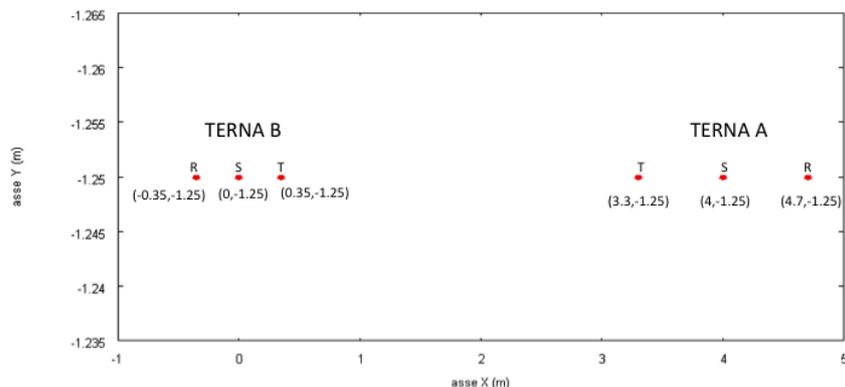


Figura 5: Geometria sorgenti

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

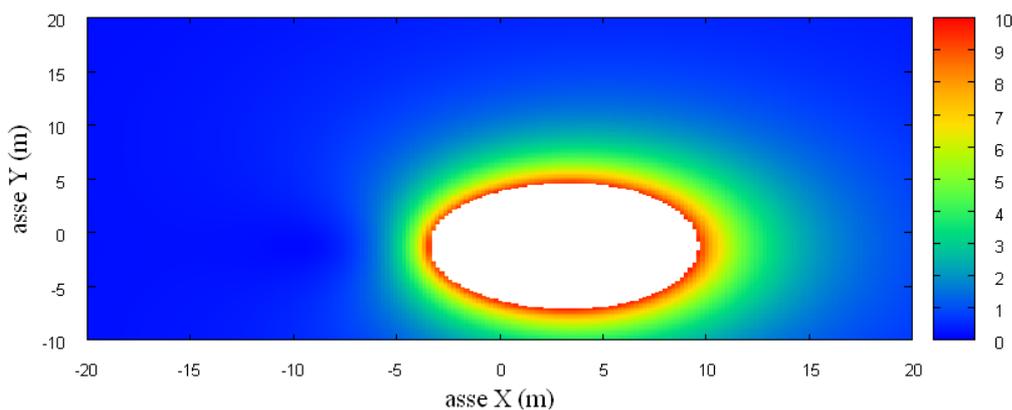


Fig. 6: Mappa cromatica dell’induzione magnetica ottenuta dal software MAGIC® (valori in microT):

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

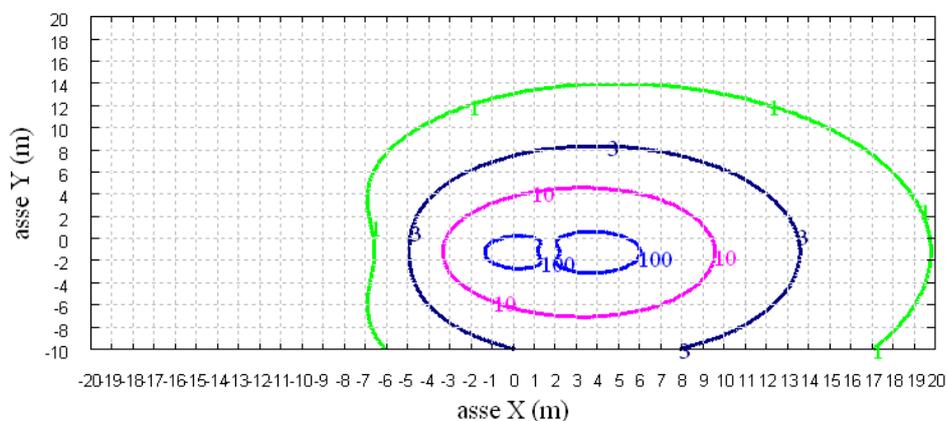
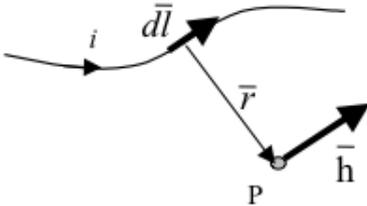


Fig. 7 Linee isolivello dell’induzione magnetica (1, 3, 10, 100 microT) da software MAGIC®.

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.

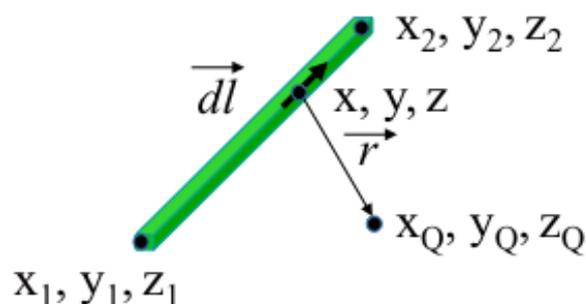


Fig. 8: Modello del segmento.

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.

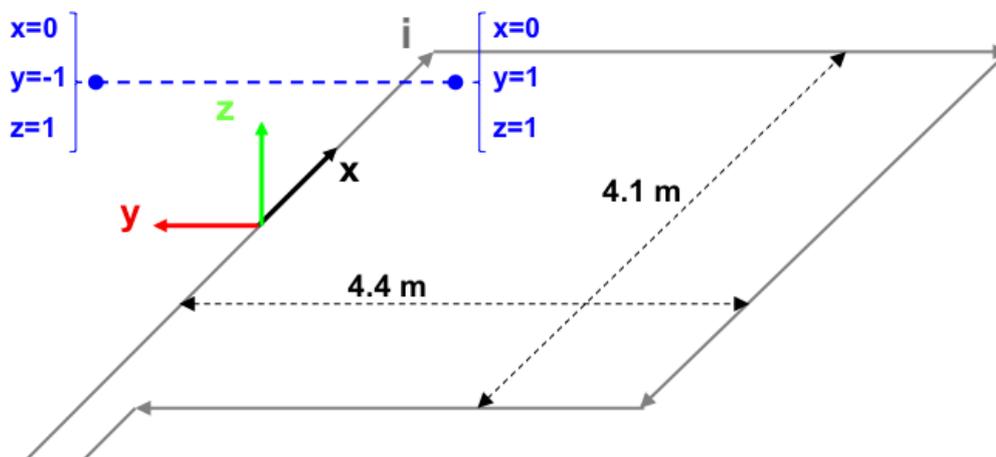


Fig. 9: Schema di spira quadrata.

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.

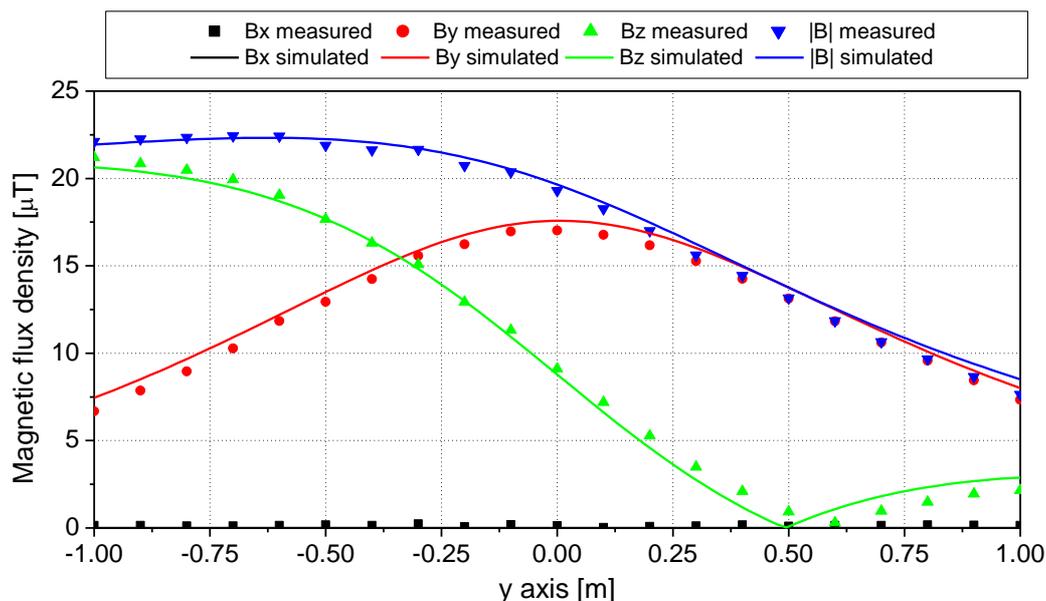


Fig. 10: Induzione magnetica misurata e calcolata mediante software MAGIC®.

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.

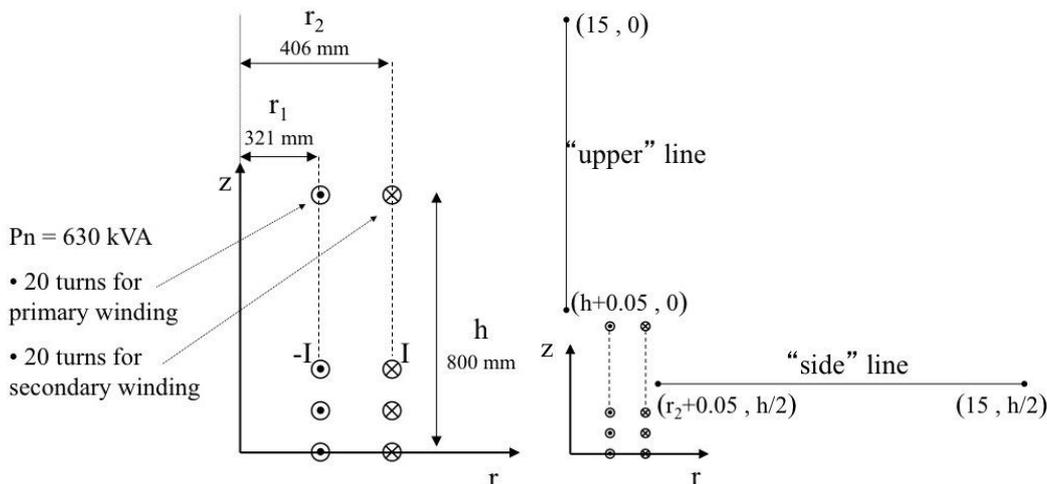


Fig. 11. Geometria del sistema (1) e linee di calcolo (2)

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).

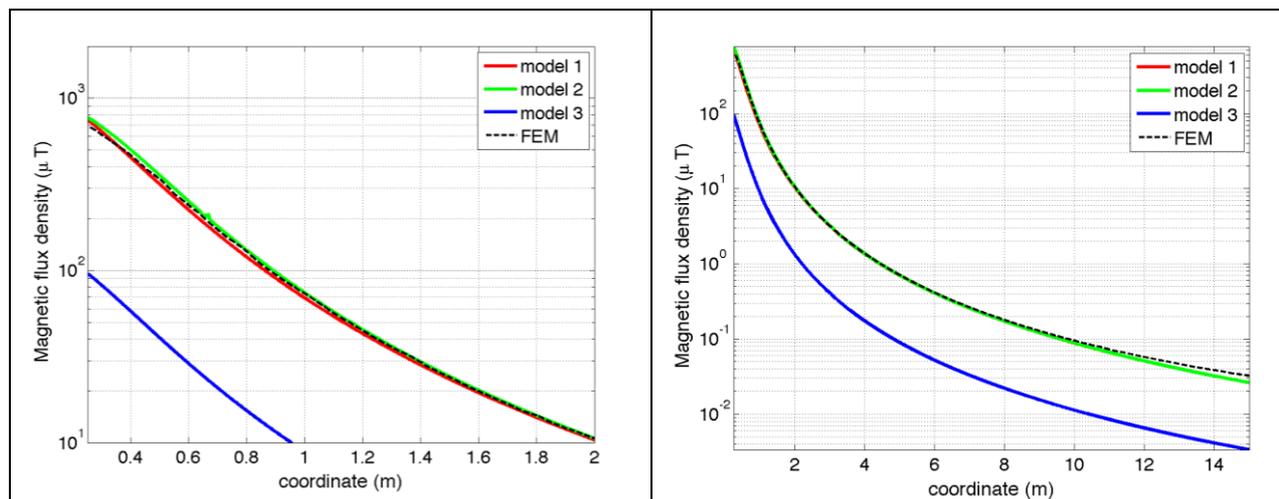
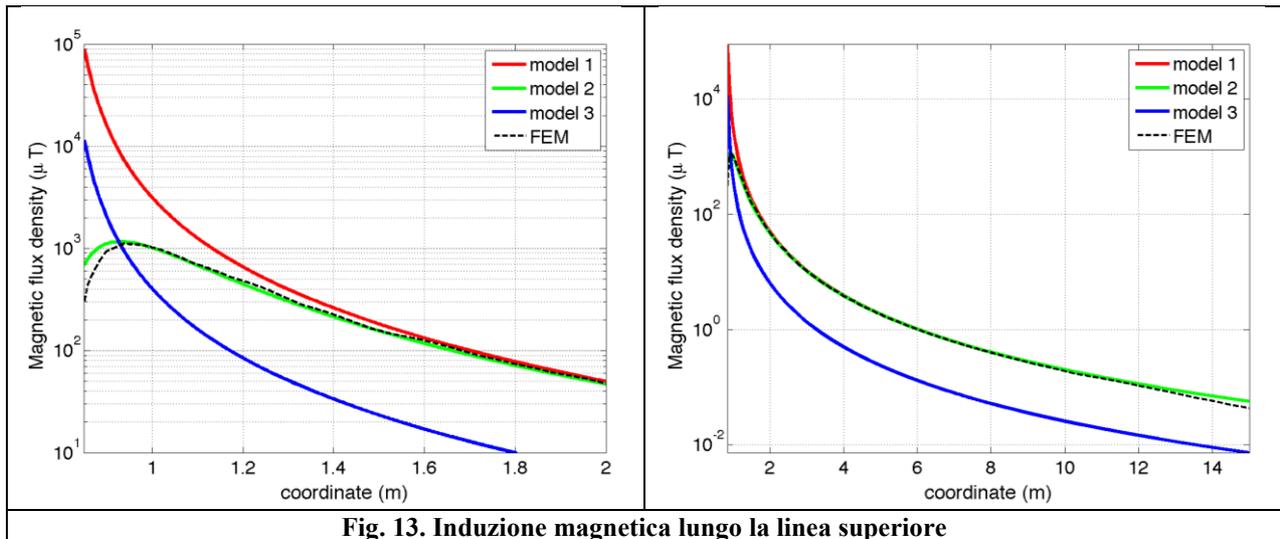


Fig. 12. Induzione magnetica lungo la linea laterale



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

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

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

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

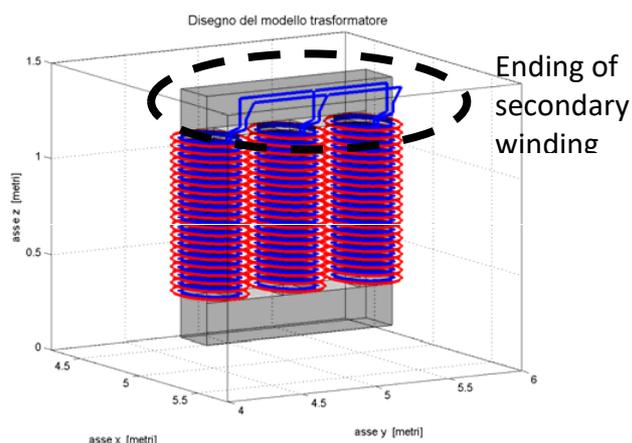


Fig. 14: Connessioni elettriche considerate al lati BT.

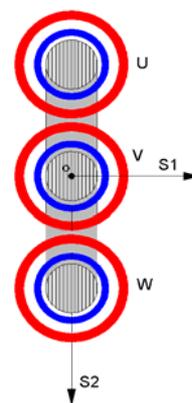


Fig. 15: Linee di calcolo S1 ed S2

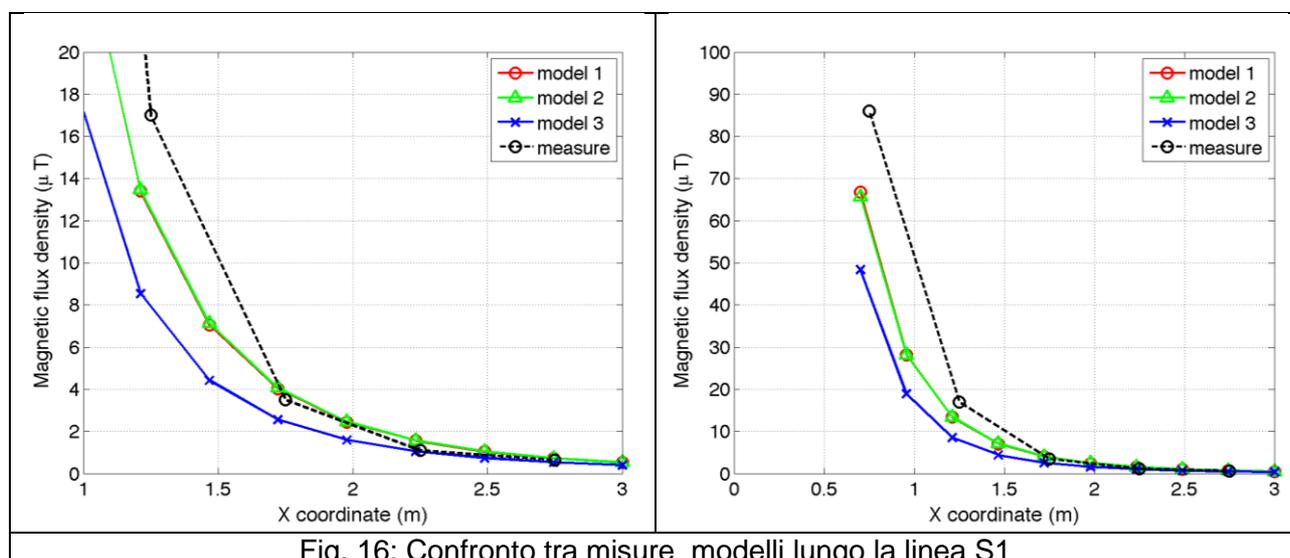


Fig. 16: Confronto tra misure modelli lungo la linea S1

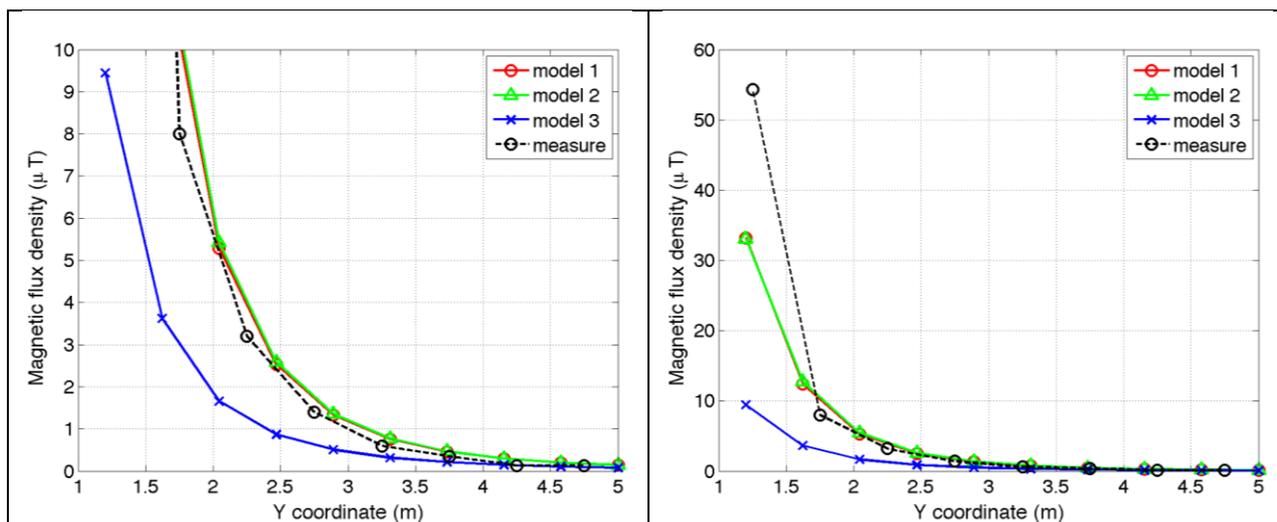


Fig. 17. Confronto tra misure modelli lungo la linea S2

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.