



*Fluor Barfoni*


# IMPIANTO DI UTENZA PER LA CONNESSIONE 132KV ALLA CABINA PRIMARIA TRESIGALLO

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

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

## PROGETTO DEFINITIVO

		<i>Brulli</i>	<i>Barfoni</i>	<i>Barfoni</i>	
A	9.10.2025	101	013	093	Emissione per autorizzazione
REVISIONE	DATA	ELABORATO	VERIFICATO	APPROVATO	DESCRIZIONE
RICHIEDENTE <b>SOLAR PV 18 s.r.l.</b> Piazza Castello, 19 20121 - Milano (MI) FIRMA PER BENESTARE					TIPOLOGIA IMPIANTO CAPOFILA / POTENZA IN IMMISSIONE <b>IMPIANTO FOTOVOLTAICO</b> <b>POTENZA IN IMMISSIONE 21,00 MW</b>
					IMPIANTO <b>CU 132/30 kV JOLANDA ZARDI</b>
INGEGNERIA & COSTRUZIONI <b>BRULLI</b> IL DIRETTORE E RESPONSABILE TECNICO <b>trasmissione</b> <i>Barfoni</i>					TITOLO <b>RELAZIONE CAMPI ELETTRICI E MAGNETICI</b>
GESTORE RETE ELETTRICA FIRMA PER BENESTARE					LIVELLO PROG. <b>P D</b>
					CODICE RINTRACCIABILITA' <b>392211454</b>
					TIPO DOCUMENTO <b>- -</b>
					N° ELABORATO <b>-</b>
					FOGLIO / DI <b>1 / 24</b>
					NOME FILE <b>5 0 8 2 0 4 A</b>
					SCALA <b>-</b>
					FORMATO <b>A4</b>

 Reggio nell'Emilia - ITALIA	Progetto  <b>CU 132/30 kV JOLANDA ZARDI</b> <b>Relazione campi elettrici e magnetici</b>	Documento e revisione  <b>508204A</b> <b>2</b>
<div><b>SOMMARIO</b></div> <div><div>1</div><div>PREMESSA.....</div><div>3</div></div> <div><div>2</div><div>QUADRO NORMATIVO .....</div><div>4</div></div> <div><div>3</div><div>METODOLOGIA DI CALCOLO .....</div><div>4</div></div> <div><div>3.1</div><div>Calcolo del Campo Elettrico .....</div><div>5</div></div> <div><div>3.2</div><div>Calcolo del Campo Magnetico.....</div><div>5</div></div> <div><div>3.2.1</div><div>Correnti di calcolo .....</div><div>7</div></div> <div><div>3.3</div><div>Risultati .....</div><div>8</div></div> <div><div>4</div><div>CONCLUSIONI.....</div><div>10</div></div>		

**1 PREMESSA**

L'oggetto della presente relazione è il calcolo dei campi elettrici e magnetici generati dalla nuova stazione elettrica 132 kV denominata Cabina Utente "Jolanda Zardi" (nel seguito anche "CU") situata nei pressi della Cabina Primaria "Tresigallo" di proprietà di e-distribuzione e del cavidotto in AT che collega la Cabina Primaria alla Cabina Utente.

L'opera, nel suo complesso, è funzionale a consentire l'immissione nella RTN in alta tensione dell'energia prodotta dall'impianto fotovoltaico con potenza di 21,00 MW del produttore Solar PV 18 S.r.l.. L'energia sarà trasmessa, come sopra citato, tramite un cavo in Alta Tensione completamente interrato, verso la Cabina Primaria "Tresigallo" (nel seguito anche "CP").

La società Solar PV 18 S.r.l., nell'ambito del proprio piano di sviluppo degli impianti di produzione di energia elettrica da fonti energetiche rinnovabili, prevede di realizzare un impianto fotovoltaico per la produzione di energia elettrica nel Comune di Tresignana (FE), di potenza nominale dell'impianto pari 21.000 kW. Pertanto, attraverso la CU sopracitata, tale impianto sarà allacciato in antenna alla rete di e-distribuzione, tramite la realizzazione di un nuovo stallo nella Cabina Primaria Tresigallo come da STMG, avente come codice di rintracciabilità 392211454.

Per una maggiore delucidazione dell'opera, si riporta uno stralcio del documento No. 508233 – Inquadramento su Ortofoto, nel quale si evince la collocazione delle opere proposte.



Figura 1 – Inquadramento su Ortofoto

La presente relazione tratta della sola "CU 132/30 kV Jolanda Zardi" e del cavidotto AT di collegamento alla CP 132 kV "Tresigallo". Il calcolo dei campi elettrici e magnetici prodotti dall'ampliamento della CP non è oggetto di questa relazione.

## 2 QUADRO NORMATIVO

La normativa che regola l'esposizione della popolazione a campi elettromagnetici risale ai primi anni '90. La prima legge emanata, ora abrogata, è il DPCM 23 Aprile 1992 "Limiti massimi di esposizione ai campi elettrico e magnetico generati alla frequenza industriale nominale (50 Hz) negli ambienti abitativi e nell'ambiente esterno": tale normativa fissava la distanza da mantenersi dagli elettrodotti aerei e i valori massimi di esposizione per la popolazione. Con il crescente interesse da parte della popolazione per la tematica in oggetto, è stata avvertita la necessità di una regolamentazione più dettagliata dell'esposizione ai campi elettrici e magnetici, cui ha fatto seguito l'emanazione di numerose leggi regionali e della legge quadro nazionale. In particolare la Legge Quadro No. 36 del 22 Febbraio 2001 "Legge quadro sulla protezione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici" ha lo scopo di assicurare la tutela della salute dei lavoratori, delle lavoratrici e della popolazione dagli effetti dell'esposizione a determinati livelli di campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici e di assicurare la tutela dell'ambiente e del paesaggio promuovendo l'innovazione tecnologica. Con i successivi decreti attuativi, DPCM 8 Luglio 2003, sono stati fissati i livelli di esposizione, di attenzione e l'obiettivo di qualità da rispettarsi al fine della tutela della salute della popolazione.

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

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

Tabella 1 – Valori come da normativa in vigore

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

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


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

La metodologia definita si applica alle linee elettriche aeree e interrate, esistenti o in progetto, con esclusione delle linee a media tensione in cavo cordato ad elica, siano esse interrate o aeree, in quanto in questi casi le fasce associabili hanno ampiezza ridotta, inferiore alle distanze previste dal Decreto Interministeriale 21 Marzo 1988, No. 449 e del DMLLP del 16 Gennaio 1991. Nella normativa viene specificato inoltre che, per le stazioni e cabine primarie, la Dpa - e quindi la fascia di rispetto - solitamente rientrano nei confini dell'area di pertinenza dell'impianto stesso. Comunque, nel caso l'autorità competente lo ritenga necessario, dovranno essere calcolate le fasce di rispetto relativamente agli elementi perimetrali (es. portali, sbarre, ecc.).

## 3 METODOLOGIA DI CALCOLO

La rete elettrica nazionale, di cui la nuova "CU 132/30 kV Jolanda Zardi" farà parte, è esercita alla frequenza di 50 Hz. A questa frequenza i campi elettrici e magnetici generati dagli elementi attivi sono due fenomeni distinti, il primo proporzionale alla tensione degli stessi, mentre il secondo proporzionale alla corrente che vi circola.

Anche i limiti applicabili per la tutela della salute della popolazione per questi due fenomeni sono molto differenti: per il campo elettrico è previsto il solo rispetto del limite di esposizione (5 kV), mentre per il campo

 <p>Reggio nell'Emilia - ITALIA</p>	<p>Progetto</p> <p><b>CU 132/30 kV JOLANDA ZARDI</b></p> <p><b>Relazione campi elettrici e magnetici</b></p>	<p>Documento e revisione</p> <p><b>508204A</b></p> <p><b>5</b></p>
<p>magnetico è previsto anche il rispetto di un valore di qualità, per luoghi in cui è prevista la permanenza per un tempo superiore alle 4 ore/giorno. È possibile, pertanto, analizzare distintamente i due aspetti.</p> <p><b>3.1 Calcolo del Campo Elettrico</b></p> <p>In riferimento alla natura di cavidotti interrati dei due raccordi 150 kV in analisi, la valutazione del campo elettrico al suolo risulta in un valore trascurabile per come indicato dalla norma CEI 211-4 al §4.2.1:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• “Non viene qui riportata alcuna procedura per le linee in cavo interrato in quanto sia gli schermi dei cavi sia il terreno ed i materiali delle relative trincee e cunicoli riducono praticamente a valori trascurabili il campo elettrico esterno, analogamente, il campo elettrico prodotto da sistemi blindati isolati in gas risulta schermato dagli involucri dei conduttori di fase.”</li> </ul> <p><b>3.2 Calcolo del Campo Magnetico</b></p> <p>Al fine di stimare il campo magnetico prodotto al di fuori della “CU 132/30 kV Jolanda Zardi” per determinare le Dpa da applicare, si è effettuato il calcolo teorico dei livelli di campo magnetico utilizzando le indicazioni fornite dal DM 29 maggio 2008.</p> <p>La cabina utente ha uno schema standard composto da un trasformatore AT/MT 132/30 kV della potenza di 25 MVA e una sbarra AT in aria a cui è connesso il cavo AT di collegamento alla CP “Tresigallo”. La conformazione della CU è stata studiata per permettere la futura connessione di altri produttori: è stata predisposta una separazione tra la parte utente e lo stallo AT, che rappresenterà l'area comune del Punto di raccolta, e verrà recintata un'area verde adiacente disponibile per la realizzazione di ulteriori Cabine utente. In questo modo potrà essere realizzato un Punto di raccolta che permette di connettere a un unico stallo della CP più produttori, saturandone la disponibilità.</p> <p>Allo stato attuale sono da realizzare le sole opere relative alla cabina utente “CU 132/30 kV Jolanda Zardi”. La CU è dotata di un quadro MT su cui sono connesse le linee MT provenienti dal campo fotovoltaico e da cui parte le linee interrate di collegamento col trasformatore AT/MT; da questo, l'energia viene trasformata in alta tensione e transita sullo stallo AT fino al terminale cavo e successivamente sul cavidotto AT. E da qui sino alla CP Tresigallo.</p> <p>La cabina utente, come meglio individuabile nel documento 508252 - Planimetria reparto AT, sarà ad oggi costituita da:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• No. 1 stallo trasformatore AT/MT dotato di No. 1 trasformatore AT/MT 132/30 kV della potenza di 25 MVA</li> <li>• No. 1 sistema singola sbarra, comprendente No. 1 passo sbarra standard realizzati con tubo Ø100.</li> <li>• No. 1 montante linea AT caratterizzato da No. 1 arrivo linea in cavo tramite terminale cavo;</li> </ul> <p>Si è quindi proceduto effettuando il calcolo teorico dei livelli di campo magnetico generati separatamente da cabina utente e cavidotto ad alta tensione. All'interno della cabina utente sono stati considerati solo gli elementi principali in alta tensione in aria, il calcolo dei livelli di campo magnetico dei cavidotti MT è escluso dalla presente relazione. In base ai risultati delle simulazioni sono state determinate le DPA da applicare ai singoli elementi.</p> <p>Il calcolo del campo magnetico è stato effettuato utilizzando il software Magic di BESHielding. Il software permette di calcolare i campi magnetici generati da sorgenti di tipo elettrico, quali trasformatori, sistemi di linee elettriche, stazioni, cabine elettriche, buche giunti, blindosbarre e impianti elettrici. Il software permette la determinazione delle fasce di rispetto per linee elettriche e cabine elettriche, secondo quanto previsto dalla Legge Quadro No. 36/2001 (esposizione ai campi magnetici della popolazione) e dal D.Lgs. No. 81/08 (valutazione dei rischi in ambiente lavorativo). Il software permette inoltre di studiare le singole sorgenti (linee elettriche, cavi, sistemi multiconduttori, trasformatori) mediante configurazioni bidimensionali e tridimensionali attraverso l'integrazione della legge di Biot-Savart o lo studio di sistemi complessi, tenendo conto della tridimensionalità delle sorgenti, della loro reale posizione e della sovrapposizione degli effetti delle diverse componenti della stazione e cabina.</p> <p>Riportiamo nel seguito la geometria della cabina utente come schematizzata per il calcolo. Il punto di origine (0;0) del sistema è stato definito all'estremità inferiore sinistra (Figura 2) della recinzione della CU in progetto. In Figura 3 riportiamo le sezioni dell'impianto estratte dal documento 508253.</p>		



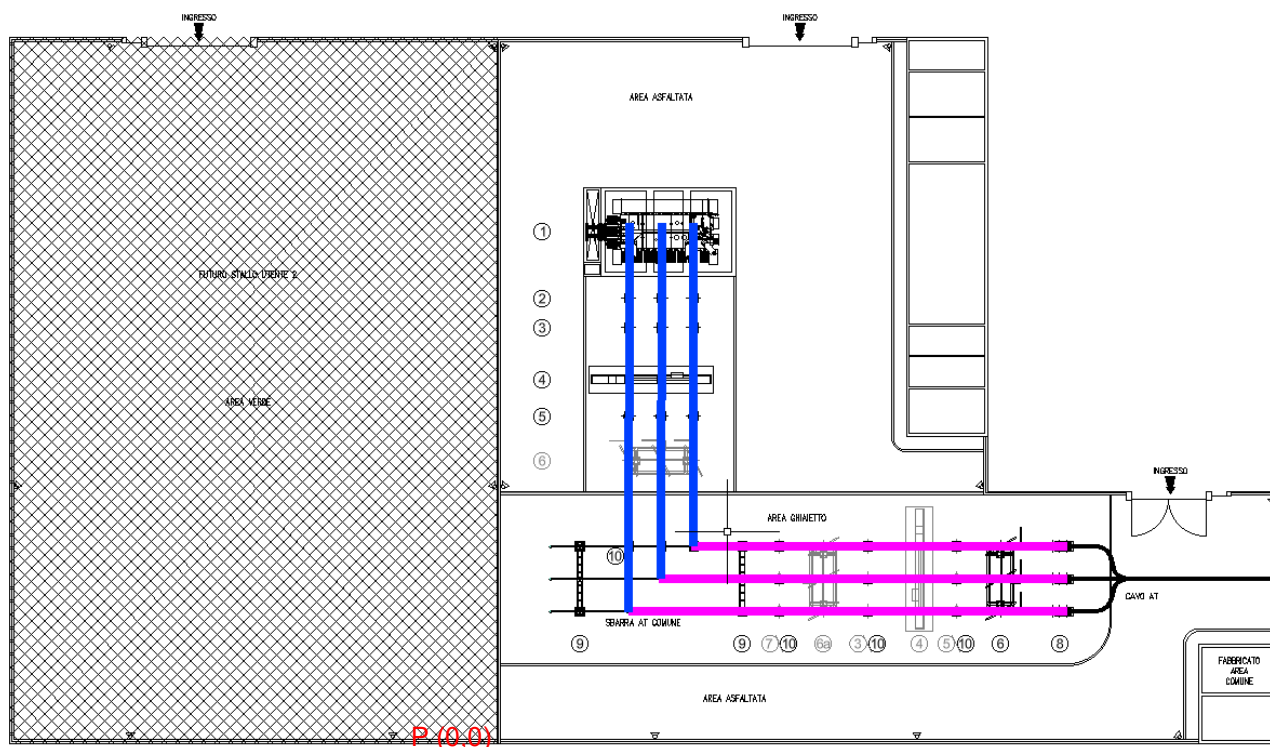


Figura 2 – Planimetria con individuazione degli elementi attivi

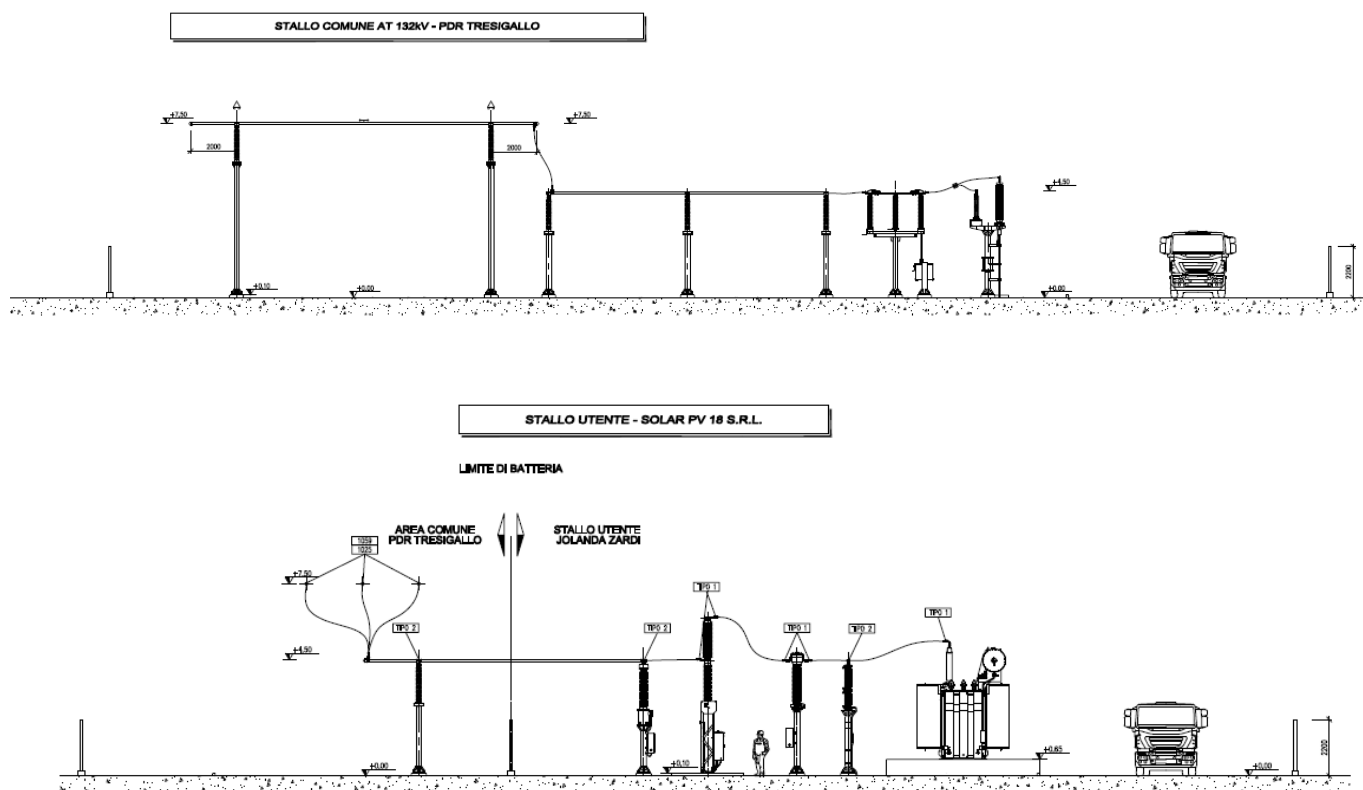


Figura 3 – Sezione

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

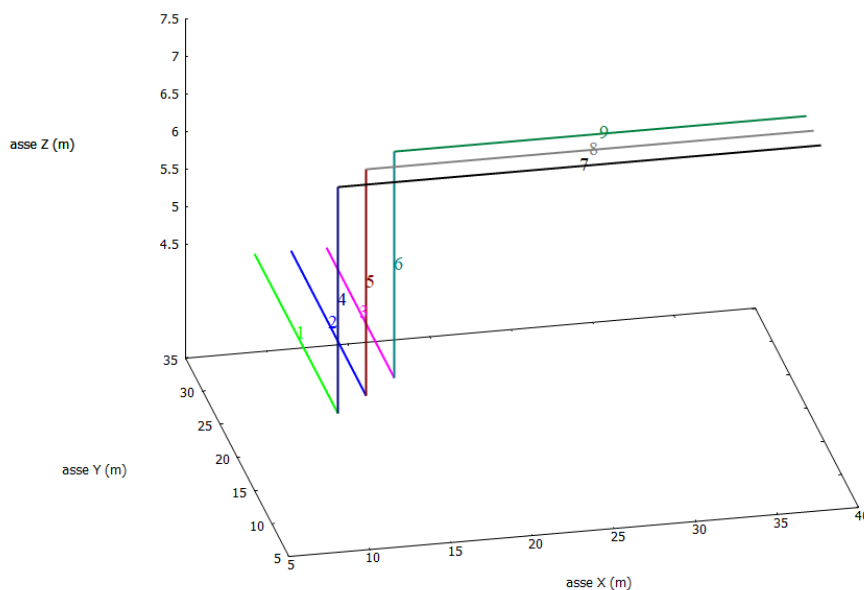


Figura 4 – Schematizzazione degli elementi attivi della stazione all'interno del programma di calcolo

### 3.2.1 Correnti di calcolo

Il cavidotto in alta tensione di collegamento tra la CU e la CP “Tresigallo” sarà realizzato con un conduttore di alluminio con sezione di 400 mm<sup>2</sup> con diametro esterno della singola corda pari a 79 mm. La portata massima di questo conduttore posato a trifoglio risulta pari a 520 A. Allo stesso modo la corrente che circola all'interno della cabina utente è limitata dalla capacità del trasformatore che, come detto, ha una potenza pari a 25 MVA.

Quindi, il conduttore scelto e la cabina utente potrebbero veder transitare una corrente maggiore rispetto a quella producibile dall'impianto fotovoltaico in oggetto ma, non essendovi altre connessioni sulla “CU 132/30 kV Jolanda Zardi” oltre a quella dell'impianto FV medesimo, la corrente che transita sul cavo è solamente quella prodotta dall'impianto fotovoltaico. Pertanto, sarà la potenza di quest'ultimo a determinare la corrente massima in transito sugli elementi attivi della CU. Si sottolinea di come la massima potenza dell'impianto fotovoltaico è raggiunta per poche ore all'anno, in condizioni di massimo irraggiamento, e pertanto questa condizione è ampiamente cautelativa; inoltre, nel caso di potenziamento dell'impianto, questo sarebbe soggetto ad apposito procedimento di autorizzazione e in tale sede si verificherebbero nuovamente le DpA associate all'aumento delle correnti in transito.

Per la parte di opere comuni, non essendo noto se e quali altri produttori arriveranno a far parte dello stallo viene utilizzata la portata massima del cavidotto AT pari a 520 A.

Nello schema seguente riportiamo le correnti di calcolo:

Elemento linea	Potenza massima fotovoltaico	Corrente di calcolo
Cabina utente	21 MW	103 A
Future parti comuni	-	520 A
Linea cavo AT		520 A

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

### 3.3 Risultati

Nelle Figura 5, Figura 6, Figura 7 e Figura 8, si riportano le curve di isolivello del campo magnetico generate sul piano XY in riferimento alla nuova CU “Jolanda Zardi”, ad una altezza dal suolo di 1, 5 e 7 metri, nell'ipotesi che le correnti fluiscano come descritto nel capitolo precedente. Si evidenzia inoltre che la DPA degli elettrodotti MT in ingresso alla stazione sarà valutato direttamente durante la fase autorizzativa delle singole linee.

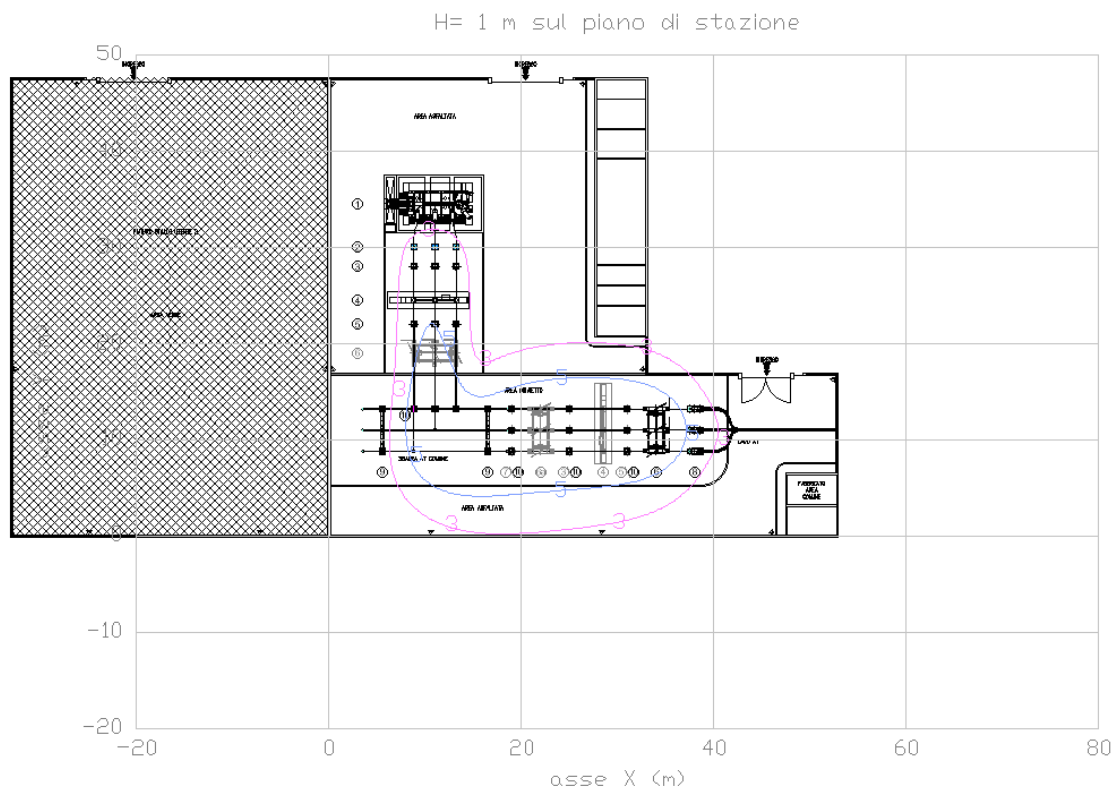


Figura 5 –Curve di isolivello del campo magnetico a 1 m dal piano di calpestio

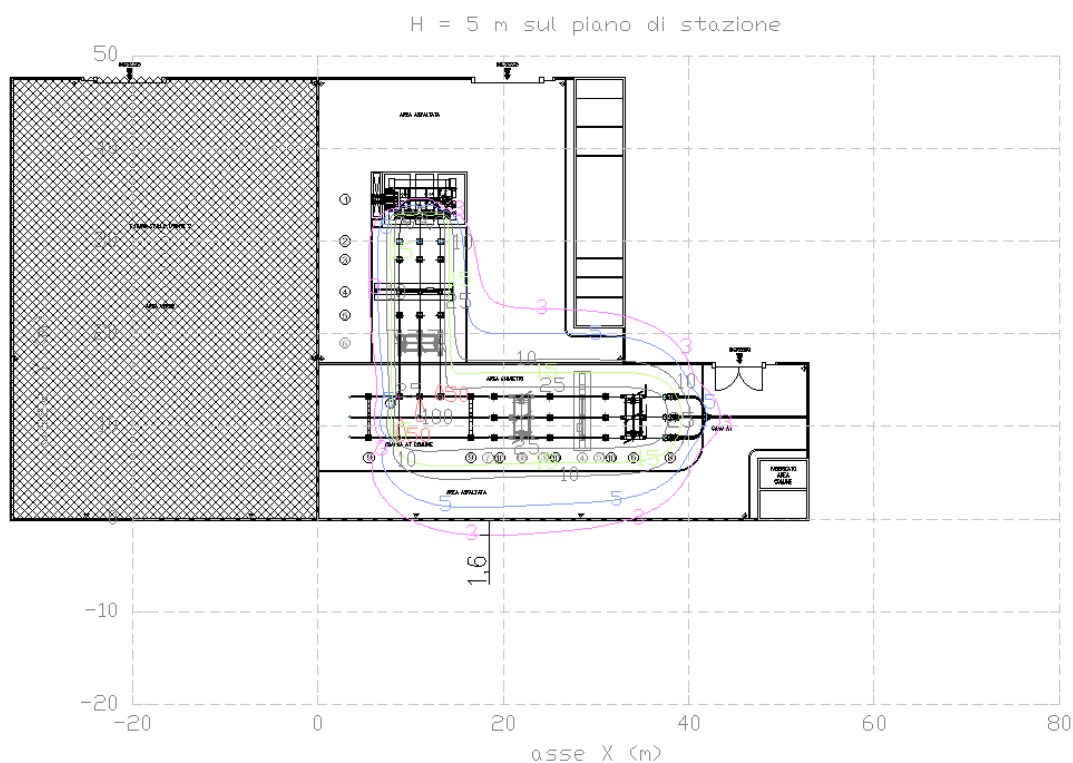


Figura 6 –Curve di isolivello del campo magnetico a 5 m dal piano di calpestio



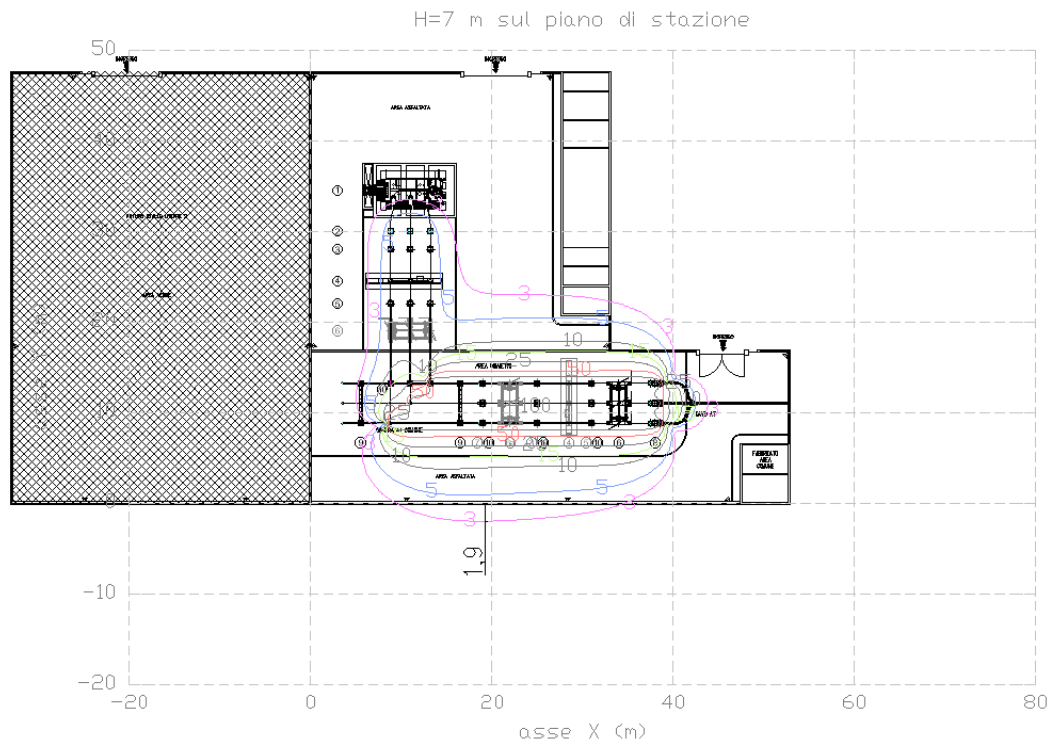


Figura 7 – Curve di isolivello del campo magnetico a 7 m dal piano di calpestio

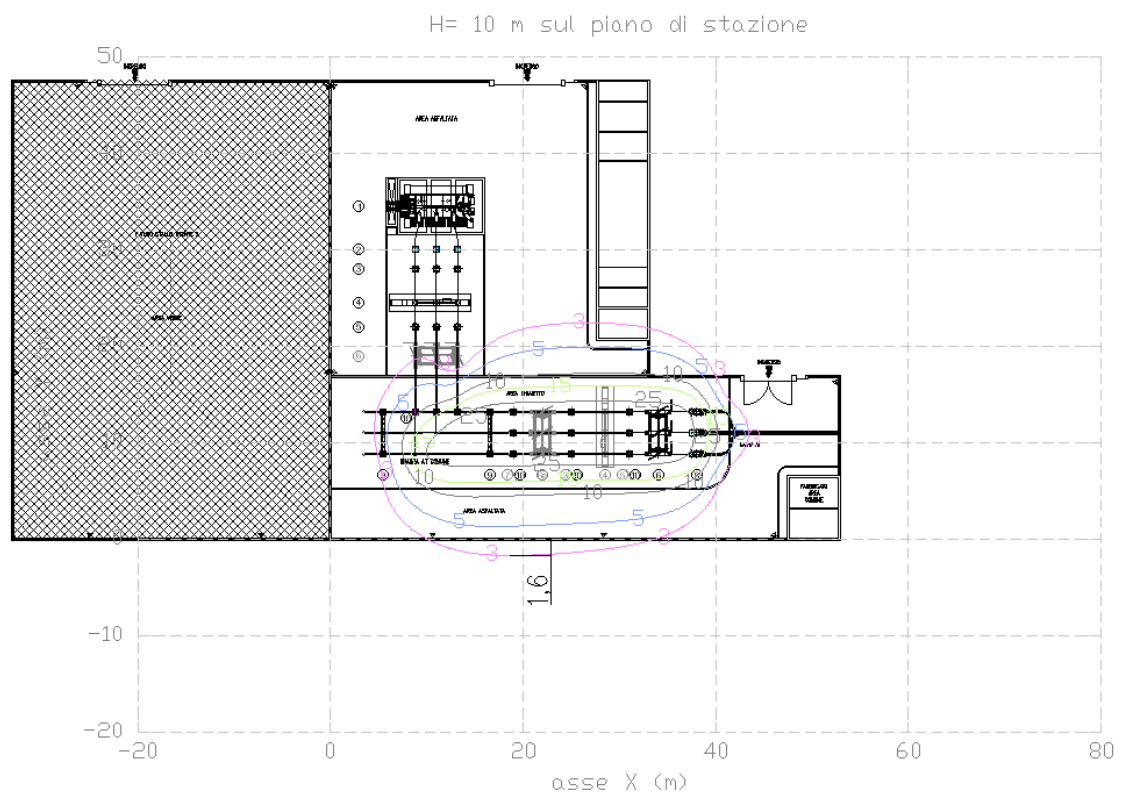


Figura 8 – Curve di isolivello del campo magnetico a 10 m dal piano di calpestio

Dai risultati delle simulazioni sopra riportate, si evince che esternamente alla recinzione esterna della Cabina utente il valore di qualità di  $3 \mu\text{T}$  è sempre rispettato tranne che sul lato adiacente alla sbarra del cavo AT, dove il rispetto si ha al massimo a 1,9 m dalla recinzione. Si applica quindi una DPA di 2 m da applicare solo su questo lato sud est della CU.

Dalle simulazioni sopra riportate si evince che esternamente alla recinzione esterna della Cabina Utente CU 132/30 kV “Jolanda Zardi” il campo magnetico supera il valore di qualità di  $3 \mu\text{T}$  solamente sul lato sud est in prossimità della sbarra del cavo AT, dove occorre applicare una DPA di 2 m. Allo stesso modo in prossimità del cavo AT occorre applicare una DPA di 2 metri dall'asse dello scavo.

**Allegato 1: Documento di Validazione**



## Documento di Validazione

### Algoritmi di calcolo del software **MAGIC<sup>®</sup>** (**MAG**netic Induction **C**alculation)

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

## Sommario

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



## Premessa

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

Il confronto si sviluppa in tre parti:

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

Le principali caratteristiche del software MAGIC® sono:

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

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

## 1 Verifica del modulo bidimensionale

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

### 1.1 Confronto con CEI 211-04

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

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

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

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

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

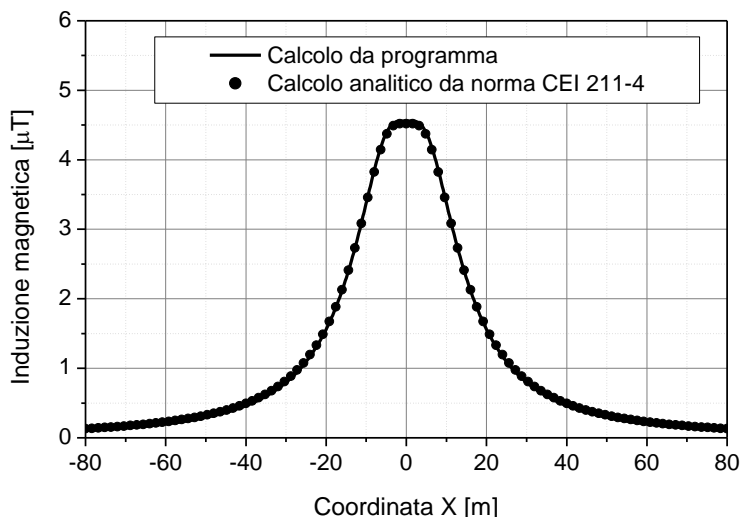


Figura 1: Induzione magnetica al suolo in prossimità di una linea aerea a doppia terna su semplice palificazione con corrente di 310: confronto tra MAGIC® e formula analitica CEI 211-4

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

## 1.2 Confronto con codice CESI

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

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

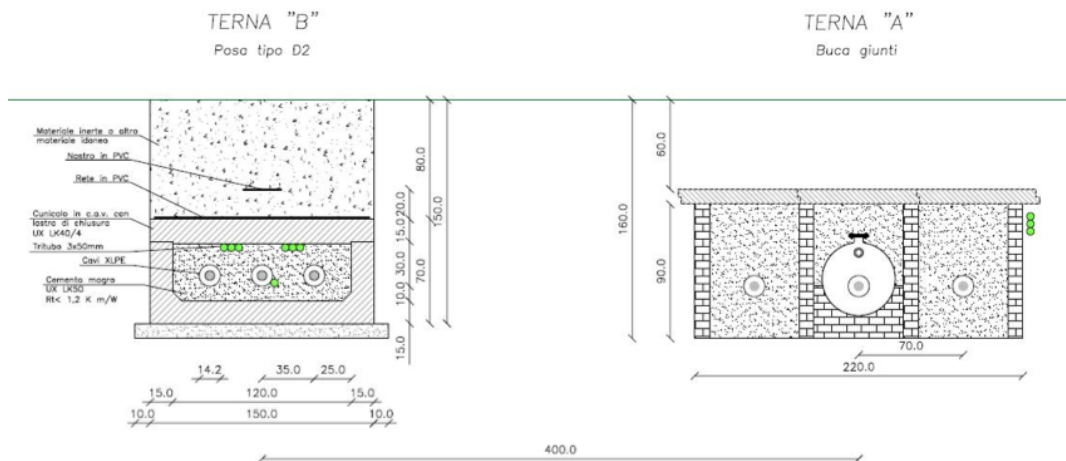


Figura 2: Affiancamento tra due linee interrate AT

Condizioni di carico e relazioni di fase:

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

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

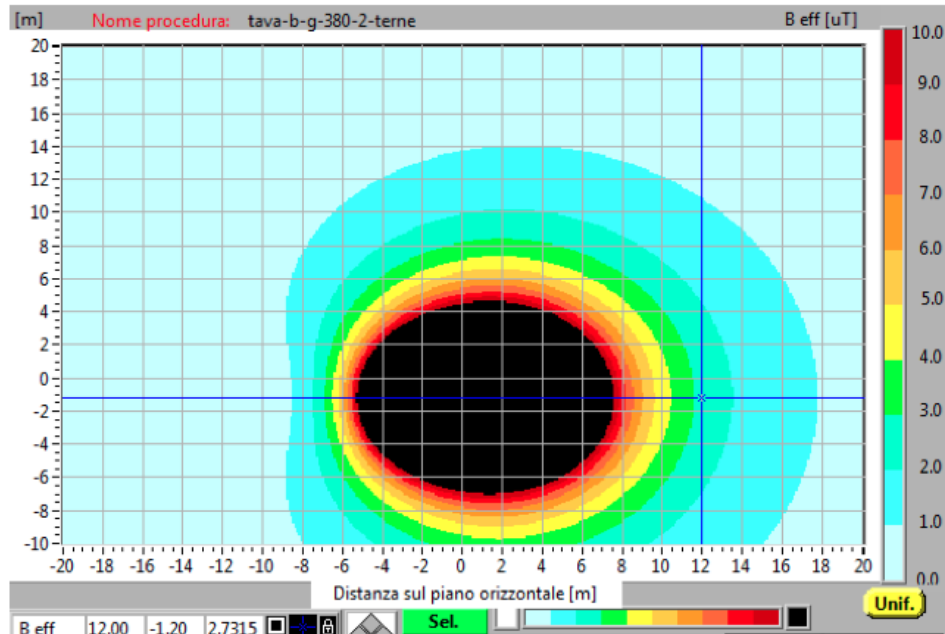
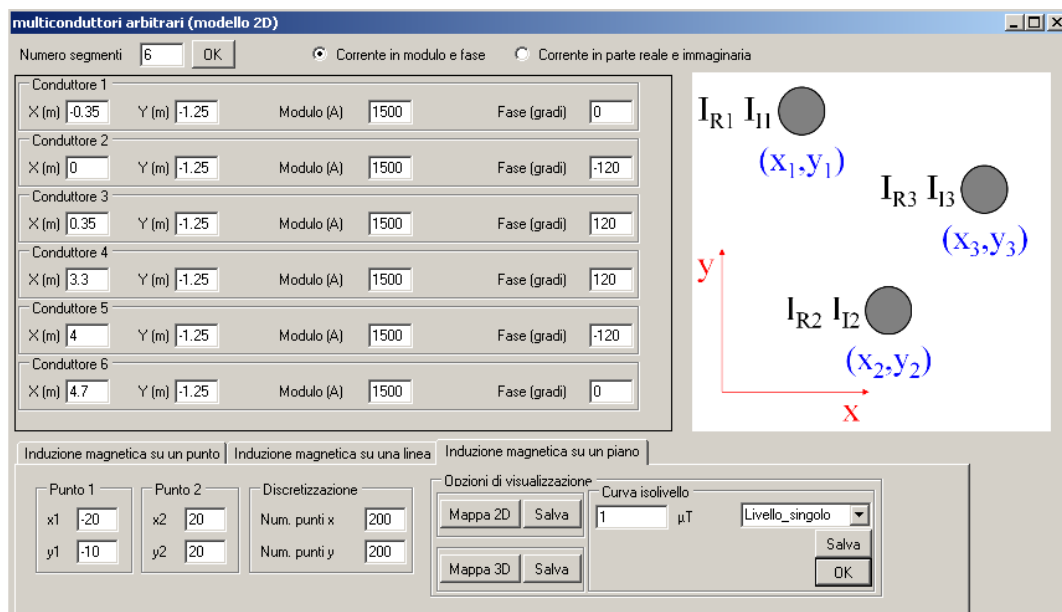


Figura 3: Mappa cromatica delle induzioni magnetiche calcolata mediante software CESI

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

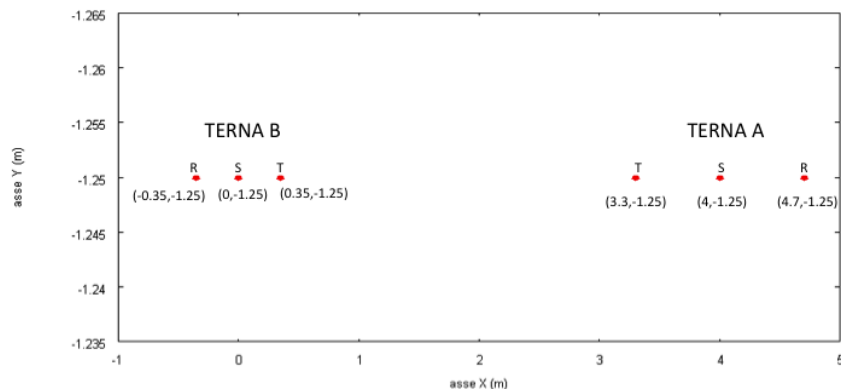
- Terne parallele
- Multiconduttori 2D

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



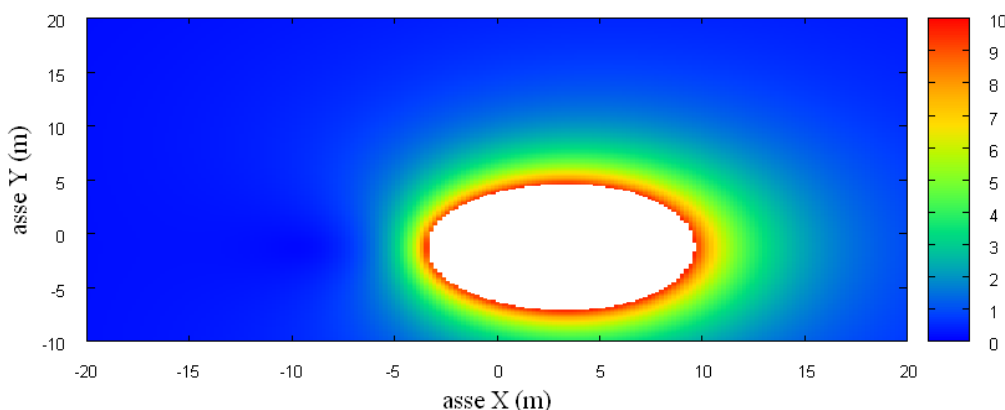
**Figura 4:**Schermata di ingresso modulo “multiconduttori arbitrari (modello 2D)””: dati definizione geometria e sorgenti

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



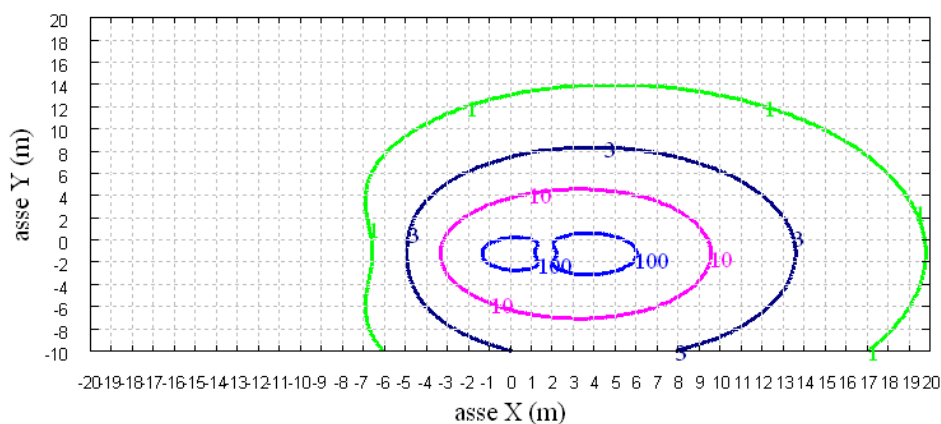
**Figura 5:** Geometria sorgenti

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



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

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



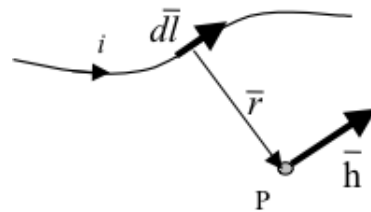
**Fig. 7** Linee isolivello dell’induzione magnetica (1, 3, 10, 100 microT) da software MAGIC®.

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

## 2 Verifica del modulo tridimensionale

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

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



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

### 2.1 Campo prodotto da un segmento finito arbitrariamente orientato

Si consideri il segmento rappresentato nella Fig. 8.

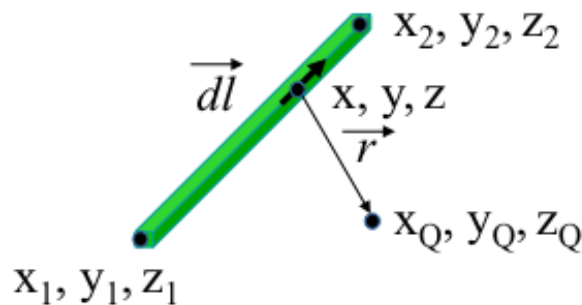


Fig. 8: Modello del segmento.

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

$$\begin{cases} x = x_1 + (x_2 - x_1)t \\ y = y_1 + (y_2 - y_1)t \\ z = z_1 + (z_2 - z_1)t \end{cases}$$

$$\begin{cases} x = x_1 + (x_2 - x_1)t \\ y = y_1 + (y_2 - y_1)t \\ z = z_1 + (z_2 - z_1)t \end{cases}$$

$$\begin{cases} x = x_1 + (x_2 - x_1)t \\ y = y_1 + (y_2 - y_1)t \\ z = z_1 + (z_2 - z_1)t \end{cases}$$

Si consideri inoltre che:

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

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

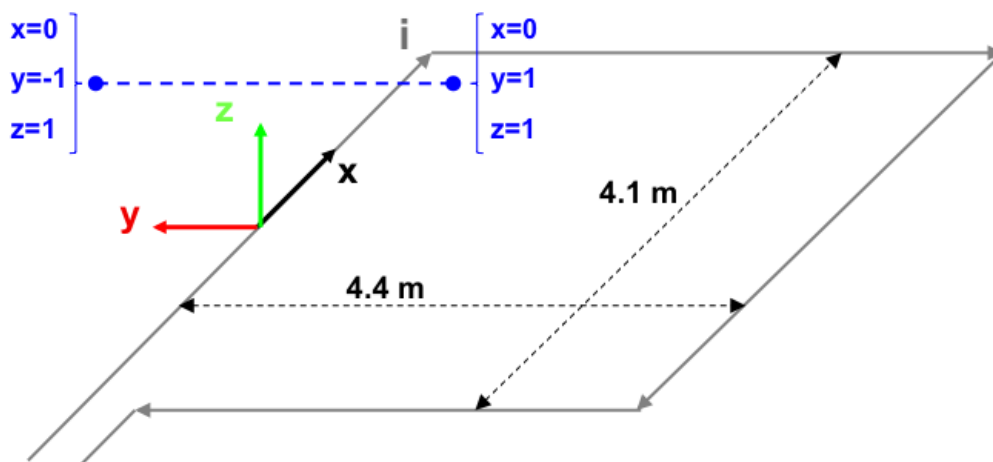
Facendo le opportune sostituzioni, la formula di Biot-Savart può essere risolta conducendo ad una formula chiusa per il calcolo delle tre componenti di campo  $H_x$ ,  $H_y$  e  $H_z$  (ovvero  $B_x$ ,  $B_y$  e  $B_z$ ). L'integrazione, sebbene sia macchinosa e porti ad espressioni analitiche poco compatte,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

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



## 2.2 Validazione sperimentale del modulo tridimensionale

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



**Fig. 9: Schema di spira quadrata.**

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

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

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.

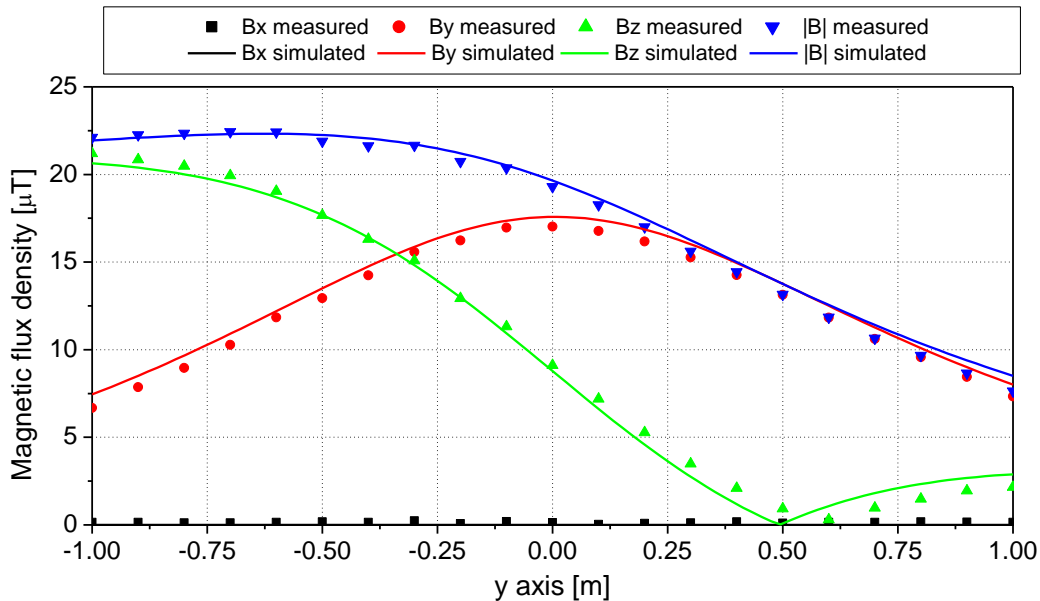


Fig. 10: Induzione magnetica misurata e calcolata mediante software MAGIC®.

***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.

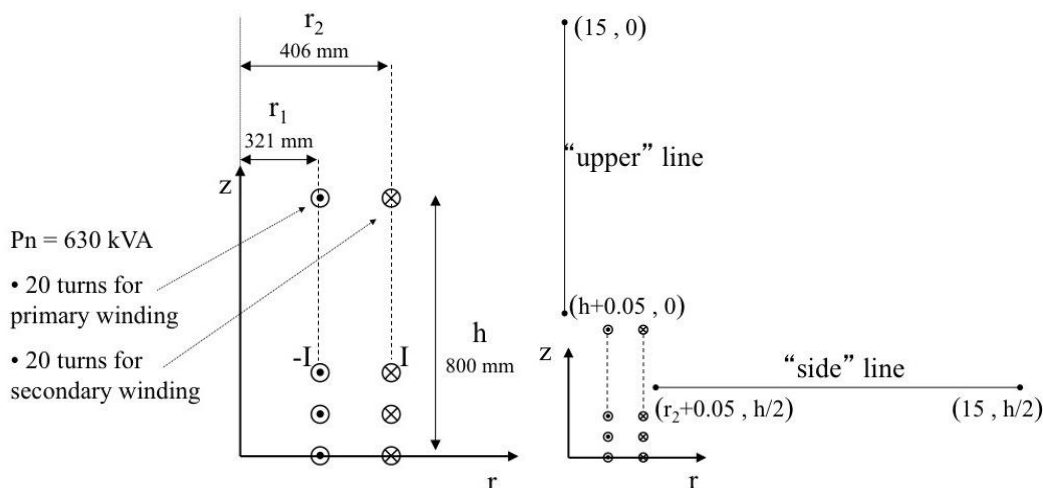


Fig. 11. Geometria del sistema (1) e linee di calcolo (2)

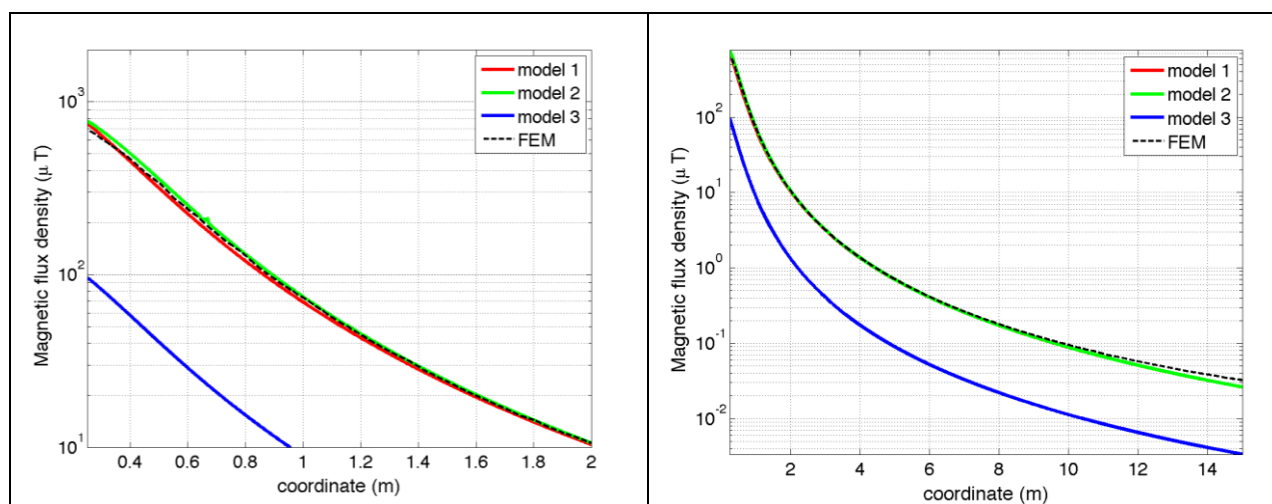
Le Fig. 12 e 13 mostrano, rispettivamente, i valori di induzione magnetica lungo la linea ad 1m dal lato degli avvolgimenti e lungo la linea ad 1.5 m sopra gli avvolgimenti. Le figure mettono a confronto il “modello 1 e 2” ed il calcolo, assunto come riferimento, effettuato mediante codice FEM.

**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).**

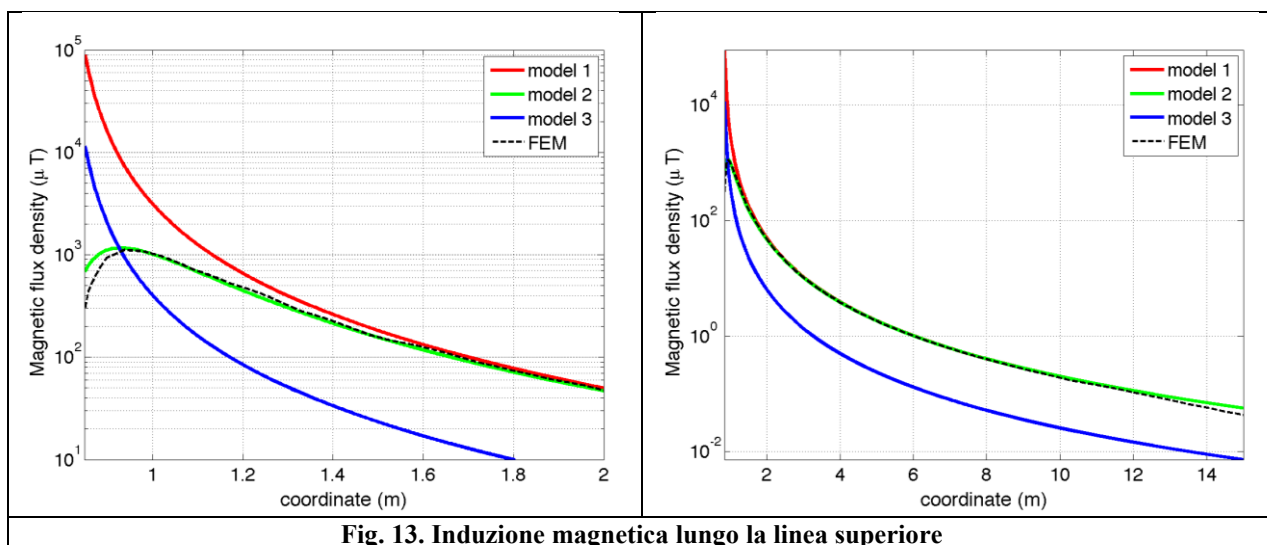
I modelli inseriti nel MAGIC® sono inoltre confrontati con il modello proposto da un altro software commerciale (EFC-400) che verrà denominato “Modello 3”. Tale modello è basato sull’ipotesi che il campo magnetico disperso, essendo correlato con la reattanza di dispersione del trasformatore, risulta 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.**

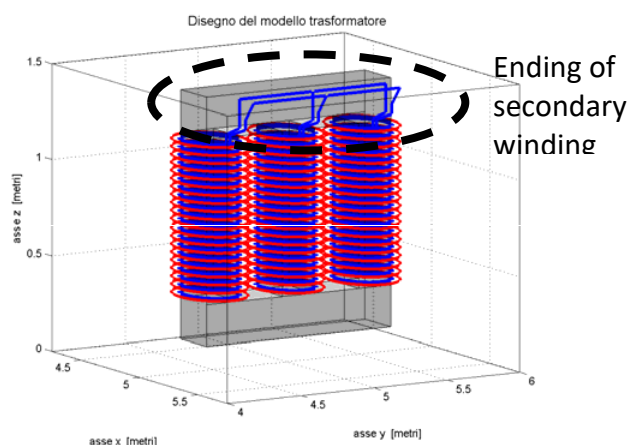


Fig. 14: Connessioni elettriche considerate al lati BT.

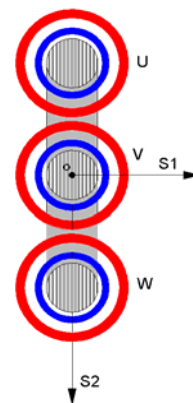


Fig. 15: Linee di calcolo S1 ed S2

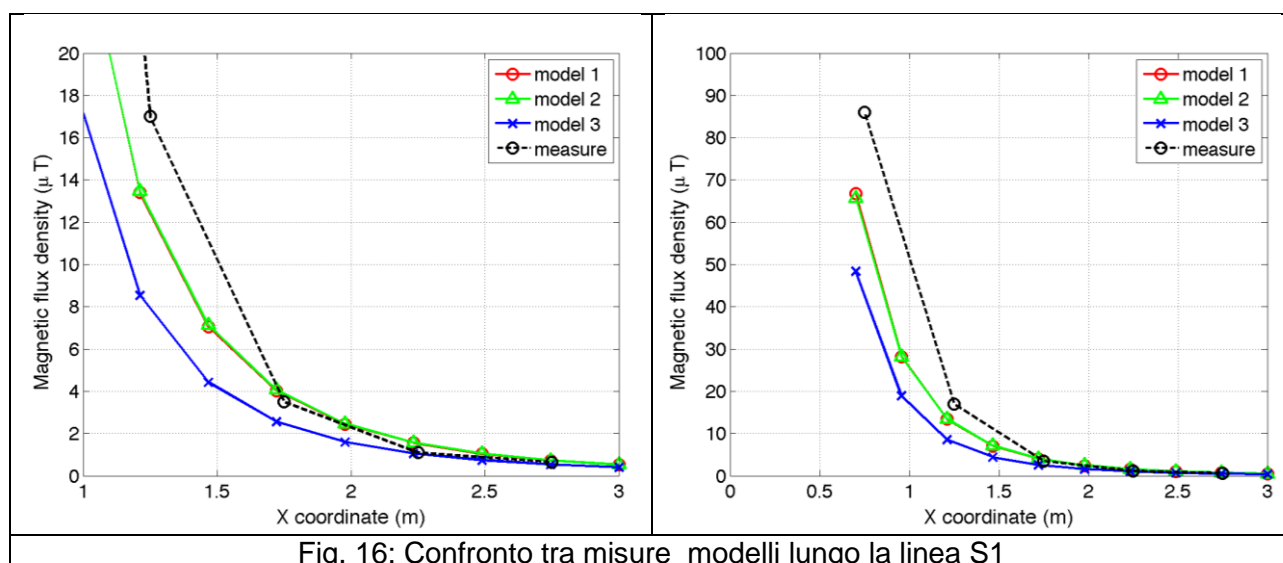


Fig. 16: Confronto tra misure modelli lungo la linea S1



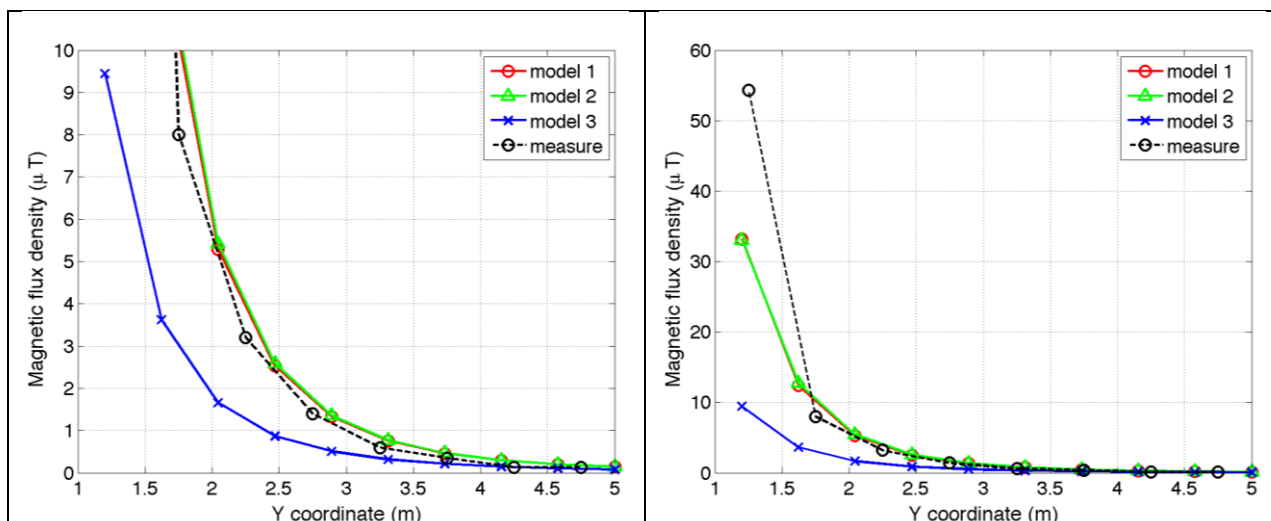


Fig. 17. Confronto tra misure e modelli lungo la linea S2

## Conclusioni

Il presente documento si propone di fornire alle autorità competenti tutti gli elementi necessari affinché il software MAGIC® possa essere validato secondo quanto richiesto dal Decreto Ministeriale (160) del 29/05/2008 “Approvazione della metodologia di calcolo per la determinazione delle fasce di rispetto per gli elettrodotti”.

Come indicato nell’art. 5.1.2 (Calcolo delle fasce di rispetto per linee elettriche) del decreto del 29/05/2008, i modelli tridimensionali non sono ancora standardizzati, tuttavia un software in cui i modelli soddisfino ai seguenti requisiti indicati nel decreto:

“...i modelli utilizzati devono essere descritti in termini di algoritmi implementati, condizioni al contorno e approssimazioni attuate. Essi devono essere validati attraverso misure o per confronto con modelli che abbiano subito analogo processo di verifica. La documentazione esplicativa e comprovante i criteri di cui sopra deve essere resa disponibile alle autorità competenti ai fini dei controlli”, può essere ritenuto idoneo allo scopo e, a tal fine, è stato redatto il presente documento.

Per quanto concerne in particolare le cabine elettriche, la complessità delle sorgenti in esame richiede una valutazione accurata che tenga conto principalmente della tridimensionalità delle singole sorgenti e l’effetto prodotto dalla combinazione delle stesse (sovrapposizione degli effetti). Nelle analisi precedentemente svolte sono stati analizzati e validati i principali componenti costituenti le cabine quali linee elettriche di connessione (tratti di conduttori di lunghezza finita), quadri elettrici (tratti conduttori di lunghezza finita) e trasformatori (elementi toroidali e tratti di conduttore di lunghezza finita).

***Dai risultati ottenuti e presentati è quindi possibile concludere che il Software MAGIC® ha le caratteristiche per essere rispondente alle indicazioni richieste dal Decreto Ministeriale (160) del 29/05/2008, lasciando ovviamente alle autorità competenti la verifica ed il giudizio finale.***