




Flavio Bongiorno

| | | | | | |
|---|----------------------|------------------------------|------------------|--------------------------------------|---|
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | <i>Brulli</i> | <i>Bongiorno</i> | <i>Bongiorno</i> | |
| A | 20.6.2025 | 101 | 013 | 093 | Emissione per autorizzazione |
| REVISIONE | DATA | ELABORATO | VERIFICATO | APPROVATO | DESCRIZIONE |
| CODICE PRATICA CAPOFILA C.P. 202201461 | | | | | TIPOLOGIA IMPIANTO CAPOFILA / POTENZA IN IMMISSIONE IMPIANTO FOTOVOLTAICO 56 MW |
| CAPOFILA Bondeno Srl Via Mike Bongiorno, 13 20124 - Milano Partita IVA 05496160283 | | | | | SE 132/36 kV BONDENO |
| INGEGNERIA & COSTRUZIONI BRULLI [trasmissione] | | | | | TITOLO RELAZIONE CAMPI ELETTRICI E MAGNETICI |
| SCALA - | FORMATO A4 | FOGLIO / DI 1 / 30 | | N. DOCUMENTO 5 1 6 4 0 4 A | |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---------------|---|---|------------------------|---|---|-------------------------------|---|---|------------------------------|---|-----|----------------------------------|---|-------|---------------------------|----|-----|-----------------|----|---|------------------|----|
|  Reggio nell'Emilia - ITALIA | Progetto SE 132/36 kV BONDENO Relazione campi elettrici e magnetici | Documento e revisione 516404A 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>SOMMARIO</p> <table><tr><td>1</td><td>PREMESSA.....</td><td>3</td></tr><tr><td>2</td><td>QUADRO NORMATIVO</td><td>4</td></tr><tr><td>3</td><td>DESCRIZIONE DEL PROGETTO.....</td><td>5</td></tr><tr><td>4</td><td>METODOLOGIA DI CALCOLO</td><td>6</td></tr><tr><td>4.1</td><td>Calcolo del Campo Magnetico.....</td><td>6</td></tr><tr><td>4.1.1</td><td>Correnti di calcolo</td><td>10</td></tr><tr><td>4.2</td><td>Risultati</td><td>11</td></tr><tr><td>5</td><td>CONCLUSIONI.....</td><td>15</td></tr></table> | | | 1 | PREMESSA..... | 3 | 2 | QUADRO NORMATIVO | 4 | 3 | DESCRIZIONE DEL PROGETTO..... | 5 | 4 | METODOLOGIA DI CALCOLO | 6 | 4.1 | Calcolo del Campo Magnetico..... | 6 | 4.1.1 | Correnti di calcolo | 10 | 4.2 | Risultati | 11 | 5 | CONCLUSIONI..... | 15 |
| 1 | PREMESSA..... | 3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | QUADRO NORMATIVO | 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | DESCRIZIONE DEL PROGETTO..... | 5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | METODOLOGIA DI CALCOLO | 6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4.1 | Calcolo del Campo Magnetico..... | 6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4.1.1 | Correnti di calcolo | 10 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4.2 | Risultati | 11 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | CONCLUSIONI..... | 15 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

1 PREMESSA

L'oggetto della presente relazione è il calcolo dei campi elettrici e magnetici generati dalla nuova stazione elettrica RTN 132/36 kV Bondeno, ubicata nel Comune di Bondeno (provincia di Ferrara).

La realizzazione della nuova stazione elettrica "Bondeno" si rende necessaria per consentire principalmente la connessione alla rete elettrica nazionale di impianti di produzione di energia da fonte rinnovabile. I produttori, convocati al tavolo tecnico da Terna, hanno eletto la società Bondeno srl (CP 202201461) come capofila del tavolo tecnico per la progettazione delle opere richieste da Terna in sede di STMG.

Nelle STMG delle società sopra menzionate, Terna - Rete Elettrica Nazionale SpA, ha previsto ed indicato di realizzare le seguenti opere RTN:

- potenziamento/rifacimento della linea RTN a 132 kV "Bondeno – Finale Emilia";
- realizzazione di un nuovo elettrodotto RTN a 132 kV tra la nuova SE suddetta e la futura sezione a 132 kV dell'esistente SE RTN a 380 kV denominata "Ferrara Nord", prevista dall'intervento 318-P del Piano di Sviluppo Terna;
- realizzazione dei nuovi elettrodotti a 132 kV "Ferrara Cassana – Ferrara Nord" e "Ferrara Nord – Ferrara ZI", previsti dall'intervento 318-P del Piano di Sviluppo Terna

Come detto il presente documento tratta della sola nuova stazione "SE 132/36 kV Bondeno", i relativi raccordi a 132 kV alla esistente "CP Bondeno" e alle linee esistenti nell'area sono trattati nell'apposita relazione, documento 516704.

Per una maggiore delucidazione dell'opera, si riporta uno stralcio del documento No. 516433 – Inquadramento su Ortofoto, nel quale si possono individuare le opere proposte.

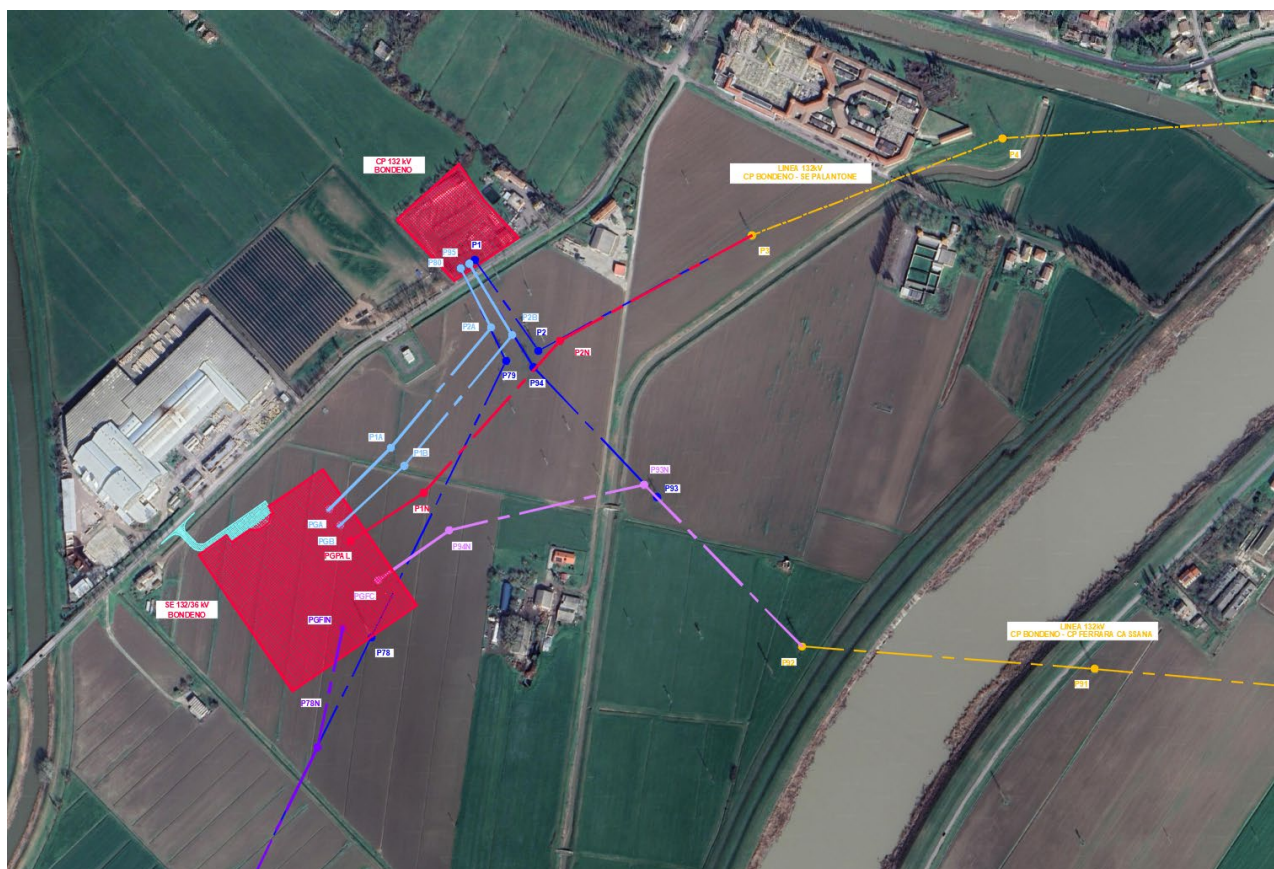


Figura 1 – Inquadramento su Ortofoto

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 (μT) | 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 DM LLP 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 DESCRIZIONE DEL PROGETTO

La nuova stazione elettrica sarà quindi composta da una sezione a 132 kV e da due sezioni a 36 kV. Il layout è stato studiato prendendo a base i requisiti delle stazioni 132/36 kV come da planimetria unificata documento EG13-0012_01 rev. 00, e schema unifilare EG13-0012_02 rev. 00.). Di seguito si elenca la configurazione proposta della stazione.

La sezione a 132 kV della nuova SE 132/36 kV Bondeno sarà del tipo unificato TERNA con isolamento in aria, e sarà costituita, nella sua massima estensione, da:

- No. 1 sistema a doppia sbarra;
- No. 1 stallo per la linea esistente a 132 kV verso Finale Emilia;
- No. 1 stallo per la linea esistente a 132 kV verso Ferrara Cassana;
- No. 1 stallo per la linea esistente a 132 kV verso Palantone-Pilastresi;
- No. 1 stallo per la linea futura a 132 kV verso Ferrara Nord;
- No. 2 stalli per parallelo sbarre;
- No. 2 stalli per ricollegamento CP Bondeno in doppia antenna;
- No. 2 stalli per i trasformatori 132/36 kV (125 MVA);
- No. 2 passi sbarra disponibili per sviluppi futuri.

I macchinari previsti consisteranno, nella loro massima estensione, in:

- No. 2 trasformatori 132/36 kV, per una potenza complessiva di 250 MVA.

Le linee aeree 132 kV, afferenti alla stazione, si attesteranno su sostegni di amarro di altezza nominale pari a 15 m e massima 18,5 m; mentre l'altezza massima delle altre parti attive d'impianto (sbarre di sorpasso strada trasformatori 132/36 kV) sarà di 12 m.

L'area occupata dalla stazione è di circa 32.900 m². In Figura 2 è rappresentata la planimetria della stazione, estratta dal documento No. 516452 – Planimetria reparto AT.

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.

In generale per poter meglio valutare a priori il valore dell'induzione magnetica sul confine della SE, si è schematizzata la stazione con una griglia di conduttori rettilinei, percorsi da correnti differenti a seconda della sorgente collegata a ogni tratto di linea.

Si possono osservare che gli elementi attivi oggetto di questa analisi, ossia quelle parti percorse da corrente che inducono le linee di campo, sono costituiti dagli stalli linea, dal parallelo sbarre e dalle sbarre. Tali elementi sono evidenziati nella planimetria riportata in Figura 3 mentre nelle sezioni estratte dal documento 516453, riportate in Figura 4, sono evincibili le altezze di tali elementi.

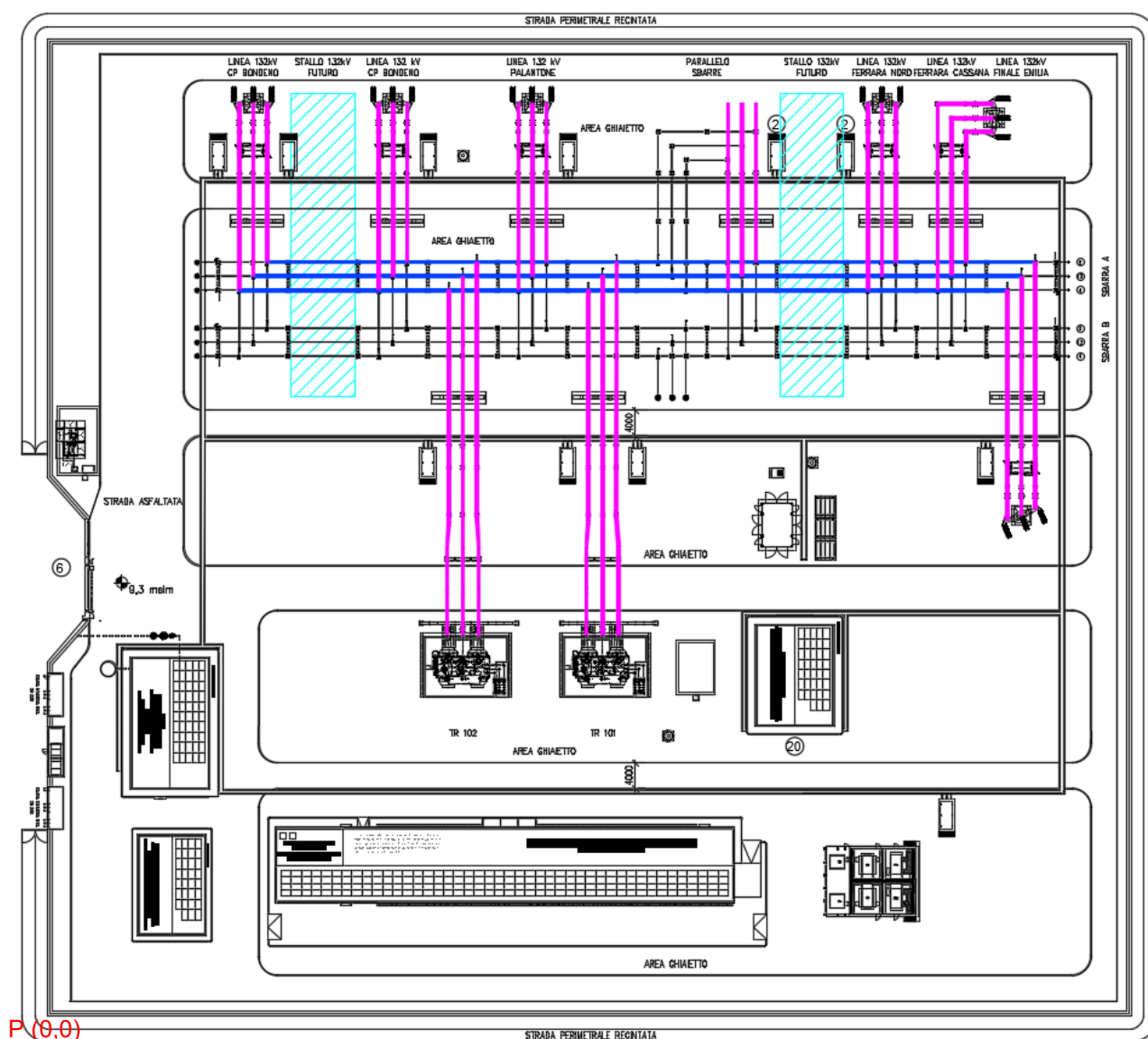
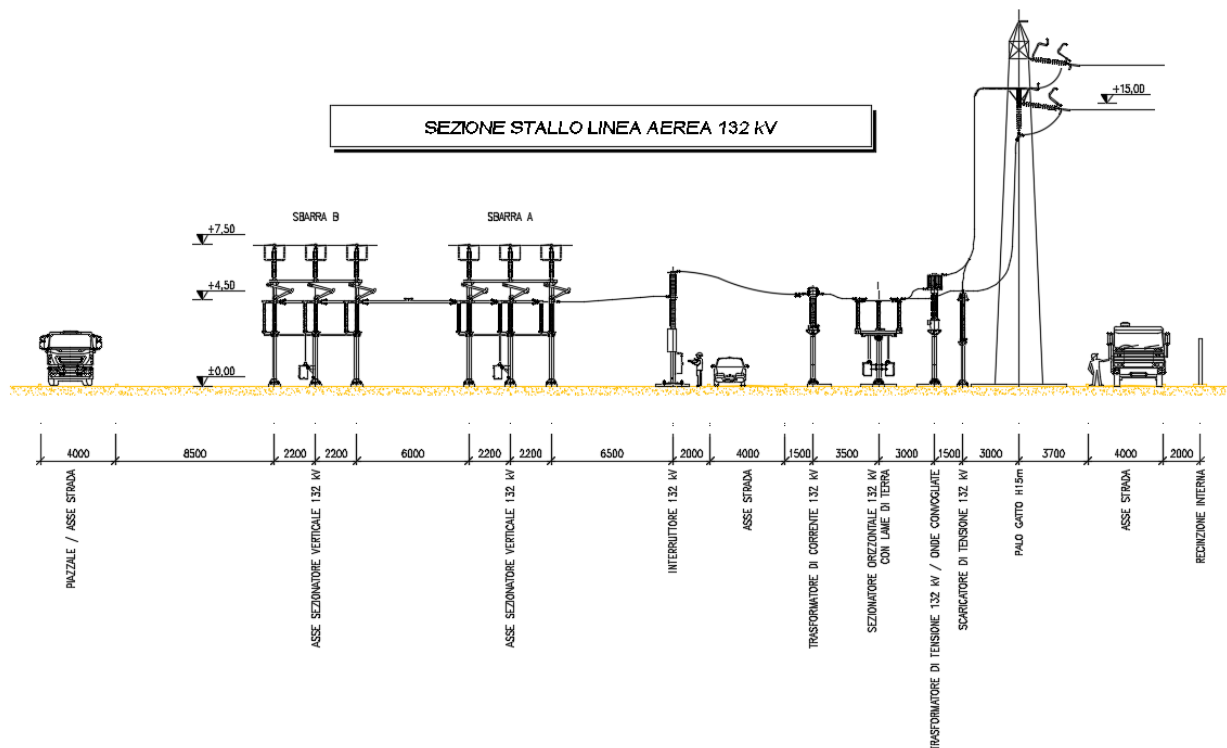
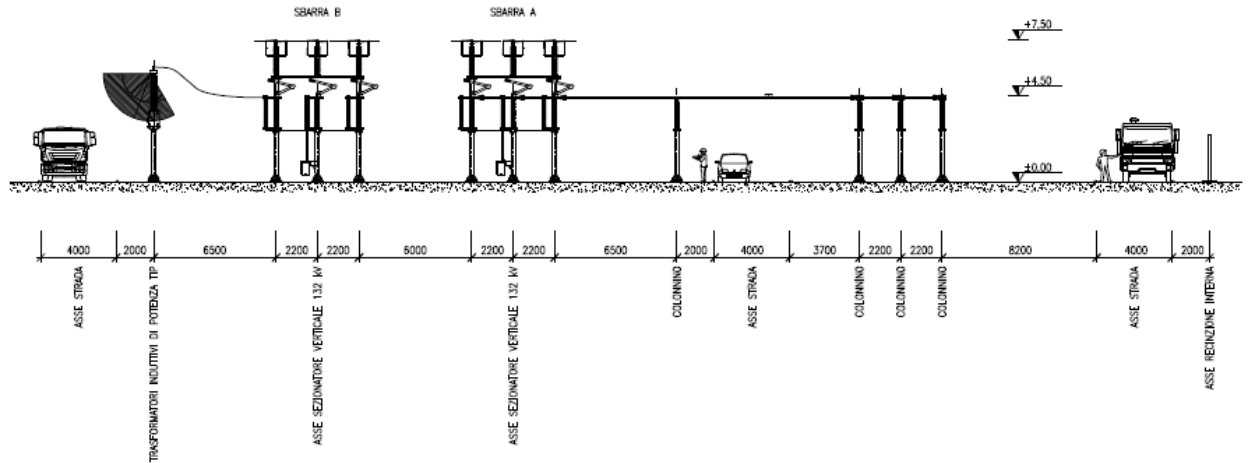


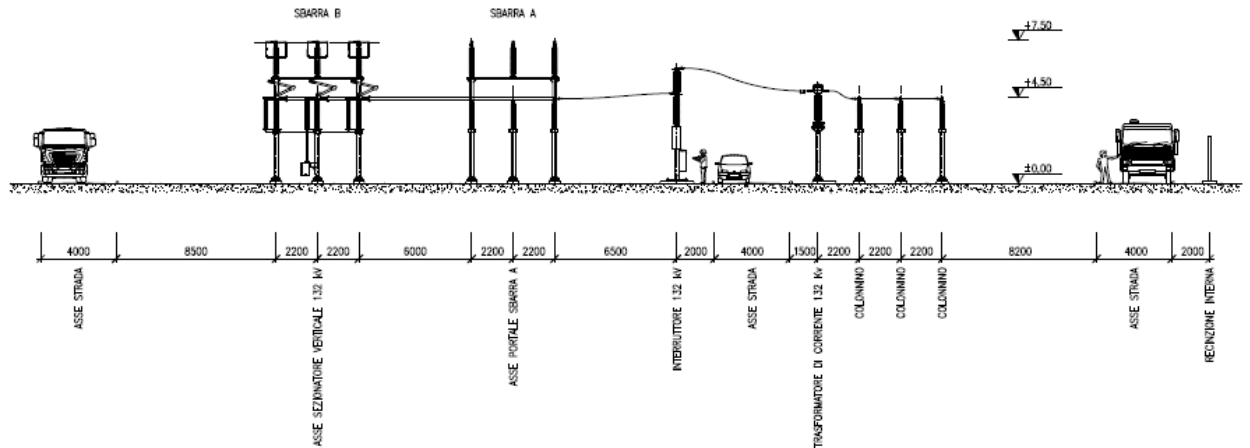
Figura 3 – Planimetria con individuazione degli elementi attivi



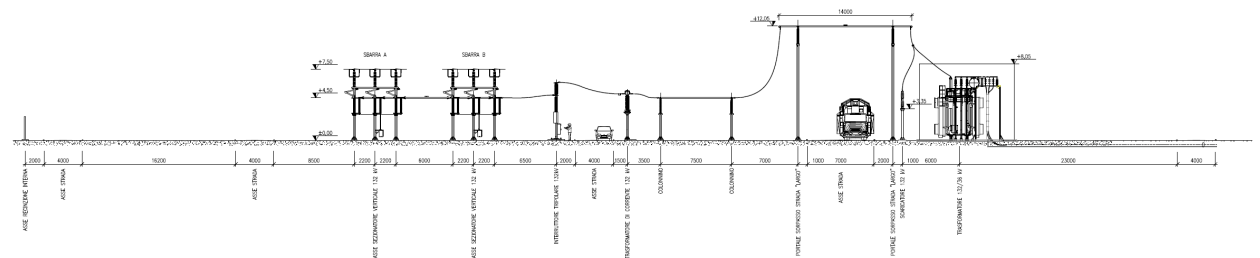
SEZIONE PARALLELO SBARRE 132 kV SBARRA A & TIP



SEZIONE PARALLELO SBARRE 132 kV SBARRA B



SEZIONE STALLO TR 132/36 kV



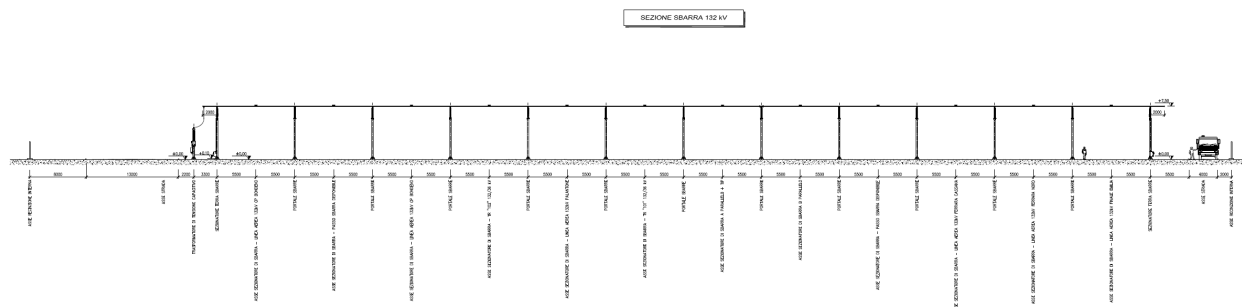


Figura 4 – Sezione della SE 132/36 kV Bondeno

Data la complessità della struttura della stazione in oggetto e le molteplici configurazioni di esercizio possibili, si è scelto cautelativamente di schematizzare la stazione considerando in funzione solo la sbarra più vicina alla recinzione, il parallelo sbarre e tutte le linee afferenti alla stazione; utilizzando le correnti per come definite nel capitolo seguente.

Si è riportata in Figura 5 la schematizzazione della geometria della stazione all'interno del programma di calcolo, avendo posto in basso a sinistra il punto di riferimento.

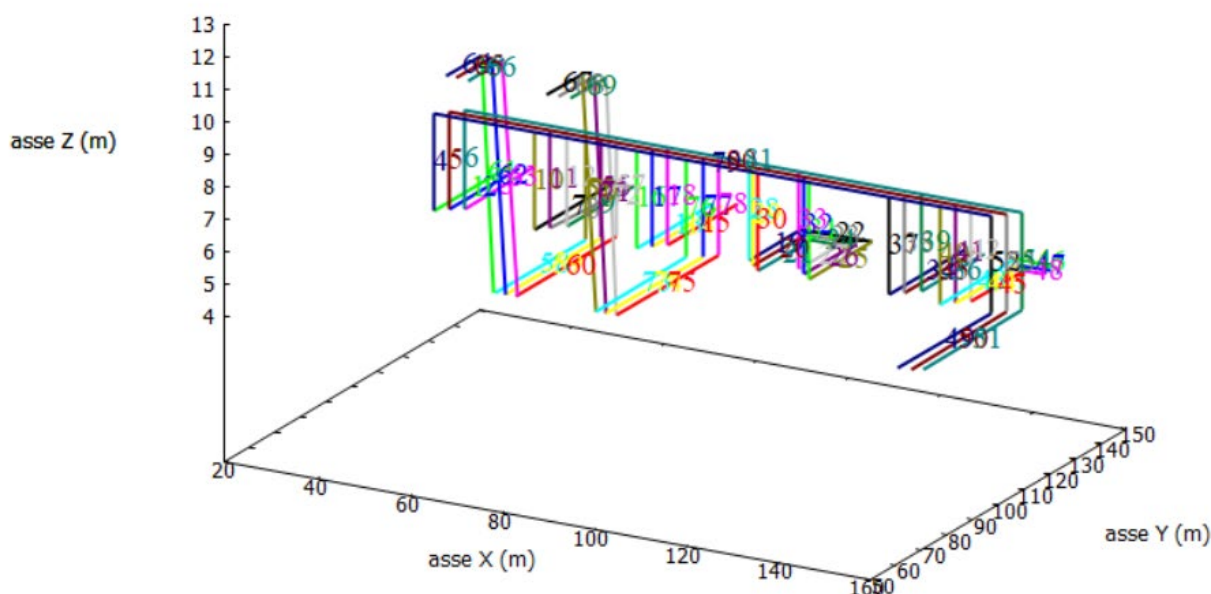


Figura 5 – Schematizzazione degli elementi attivi della stazione all'interno del programma di calcolo

4.1.1 Correnti di calcolo

La SE 132/36 kV Bondeno sarà costruita secondo gli standard Terna come descritto nel §3 precedente. Essa sarà connessa in doppia antenna tramite raccordi a 132 kV in linea aerea alla CP 132/15 kV Bondeno (e-distribuzione) e collegata agli stalli delle linee 132 kV esistenti “Bondeno – Ferrara Cassana” e “Bondeno – Finale Emilia”, che a loro volta saranno attestate su stalli dedicati in SE 132/36 kV Bondeno, oltre che alla linea 132 kV “Bondeno – Palantone con deriv. Pilastresi All.” la quale sarà a sua volta intercettata ed attestata anch’essa nella SE in progetto. Infine, sarà realizzato un ulteriore collegamento a 132 kV in linea aerea tra la SE 132/36 kV Bondeno in progetto ed il futuro ampliamento di sezione a 132 kV dell’esistente SE 380 kV Ferrara Nord.

Le sbarre della sezione 132 kV sono dimensionate per una corrente nominale pari a **2.000 A**, come da All.3 del CdR. Cautelativamente è stato considerato che sulla sbarra più vicina alla recinzione Est circoli tale corrente, allo stesso modo, la medesima corrente è stata imposta anche per il parallelo sbarre.

In base al medesimo allegato del Codice di Rete, gli stalli della sezione a 132 kV sono dimensionati per una corrente di **1.250 A**. In mancanza di informazioni relative agli sviluppi futuri dell'elettrodotto esistente si considera cautelativamente tale corrente sugli stalli di collegamento alle linee aeree.

| Elementi Attivi | Corrente di calcolo [A] |
|---------------------|-------------------------|
| Stallo linea 150 kV | 1250 |
| Parallelo Sbarre | 2000 |
| Sbarra | 2000 |

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

La sezione a 36 kV, invece, è collegata alla sezione 132 kV tramite 2 trasformatori monofase suddivisi in 2 stalli. Per ogni stallo la potenza risulta essere di 125 MVA; pertanto, sul lato a 132 kV può circolare al massimo una corrente di **550 A**.

4.2 Risultati

Nelle Figura 6, Figura 7, Figura 8, Figura 9 si riportano le curve di isolivello del campo magnetico generate sul piano XY in riferimento alla nuova SE di Bondeno, ad una altezza dal suolo di 1, 5, 7 e 10 metri nell'ipotesi che le correnti fluiscano come descritto nel capitolo precedente.

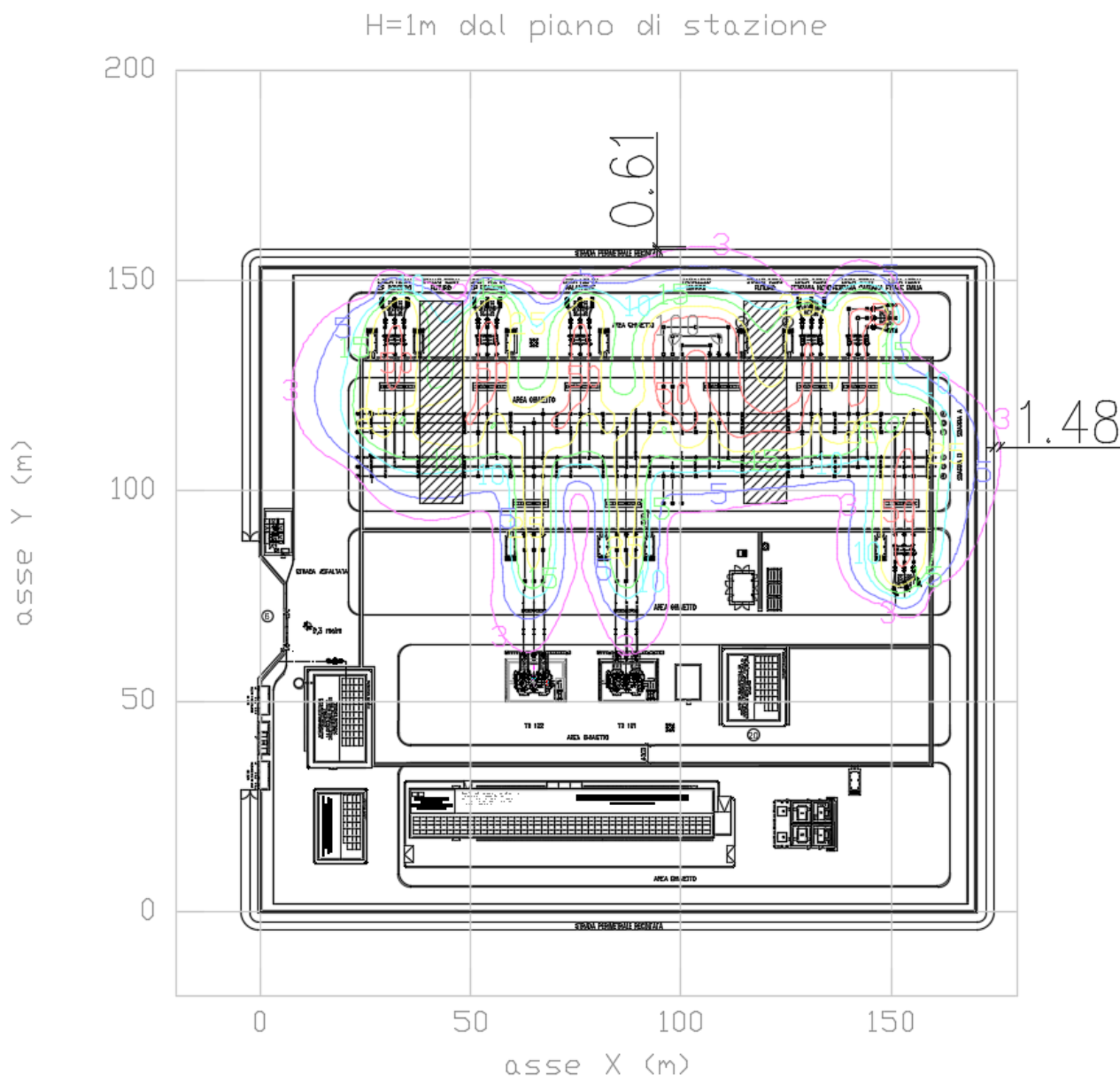


Figura 6 –Curve di isolivello del campo magnetico a 1 m dal piano di calpestio

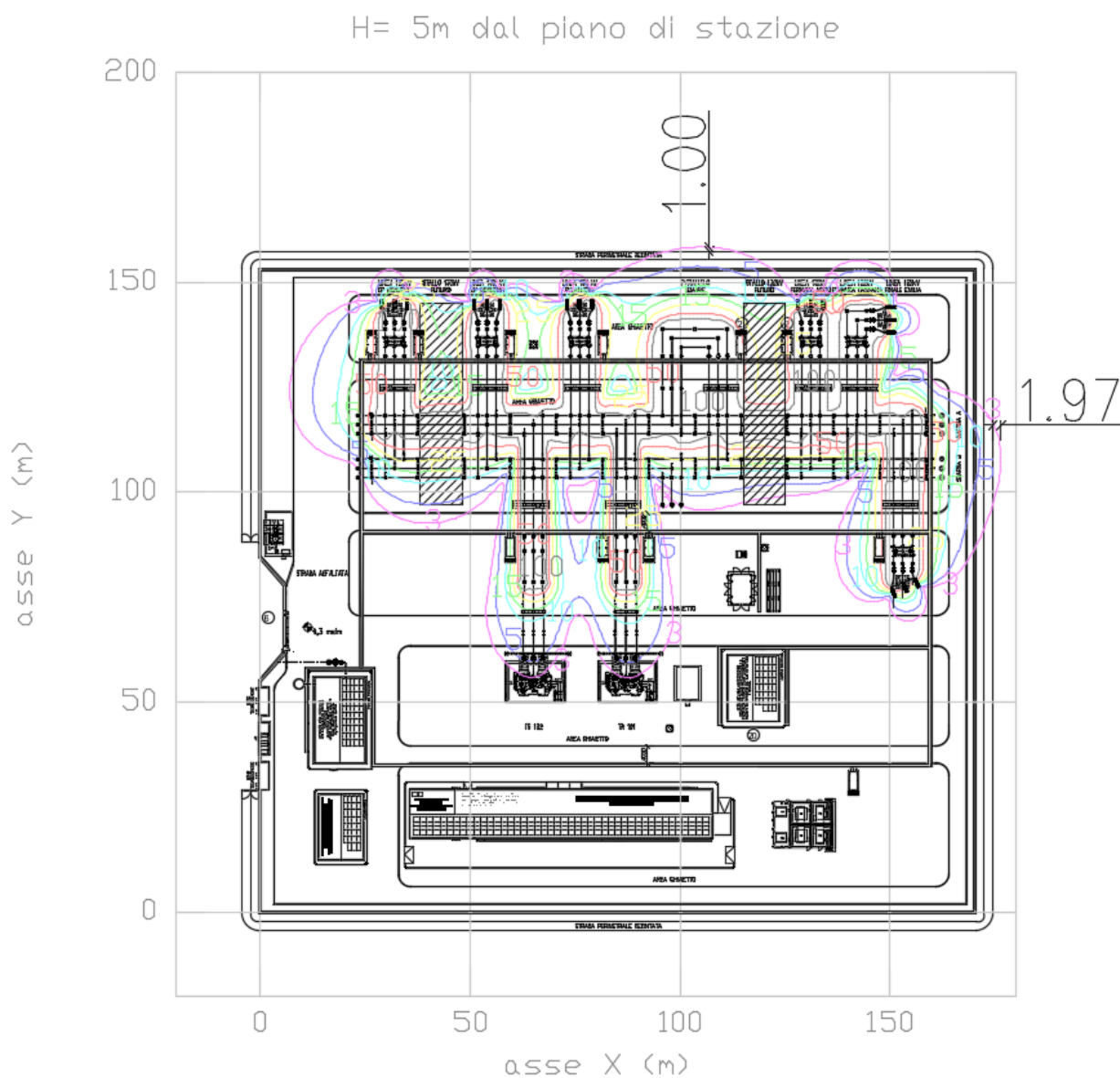


Figura 7 –Curve di isolivello del campo magnetico a 5 m dal piano di calpestio

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 più esterna della Stazione Elettrica il campo magnetico è sempre inferiore al valore di qualità di $3 \mu\text{T}$, ad eccezione del lato sud ed est dove il rispetto del valore di qualità di $3 \mu\text{T}$ si raggiunge, rispettivamente, ad una distanza massima di 1,97 m e 1 m. Occorre, pertanto, applicare nel lato sud una DPA di 2 m e nel lato est una DPA di 1 m.

Figura 10 - Planimetria con DPA

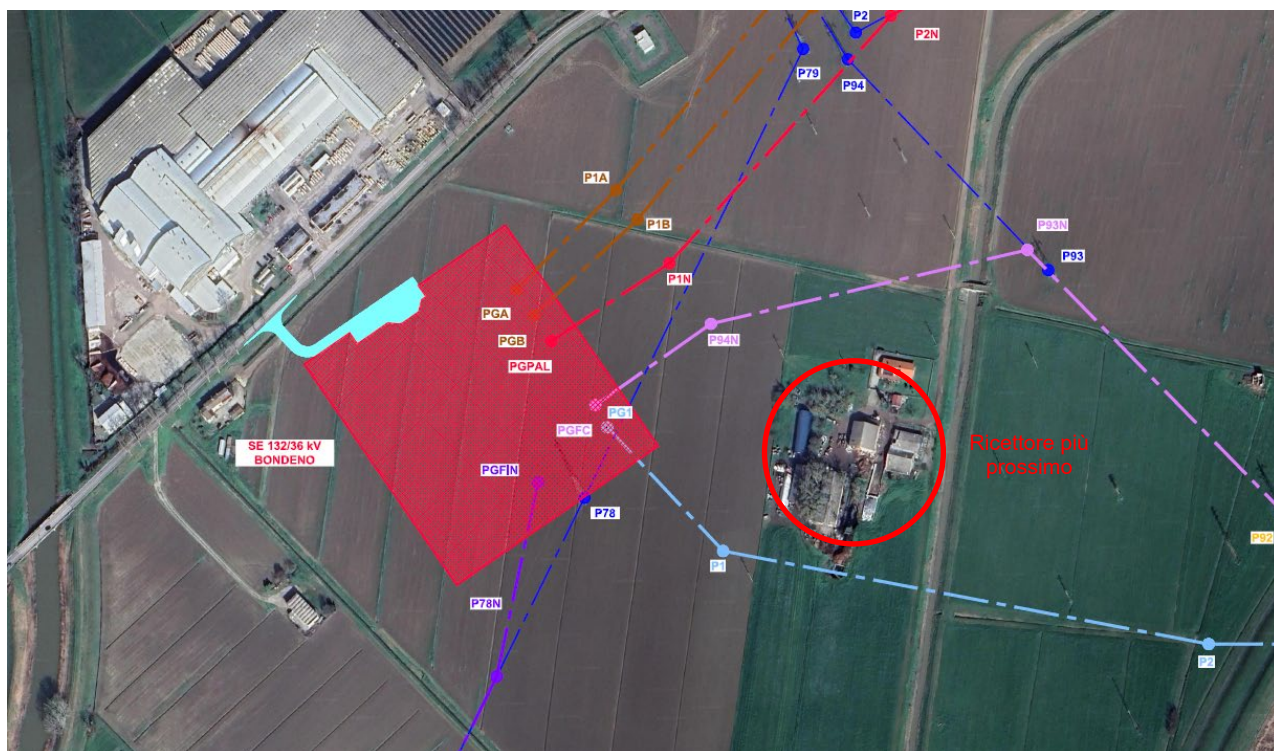


Figura 11



Gianluca Bruggnoni

| | | | | | |
|-------------------------------|----------|------------------|------------------|------------------|--------------------------------------|
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | <i>Bruggnoni</i> | <i>Bruggnoni</i> | <i>Bruggnoni</i> | |
| A | 4.7.2025 | 101 | 013 | 093 | Emissione per autorizzazione |
| REVISIONE | DATA | ELABORATO | VERIFICATO | APPROVATO | DESCRIZIONE |
| INGEGNERIA & COSTRUZIONI | | | | | IMPIANTO |
| BRULLI trasmissione | | | | | PUNTO DI RACCOLTA 150 kV URURI |
| | | | | | TITOLO |
| | | | | | RELAZIONE CAMPI ELETTRICI E MAGNEICI |
| SCALA | FORMATO | FOGLIO / DI | | N. DOCUMENTO | |
| - | A4 | 1 / 25 | | 5 0 9 3 0 4 A | |

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.

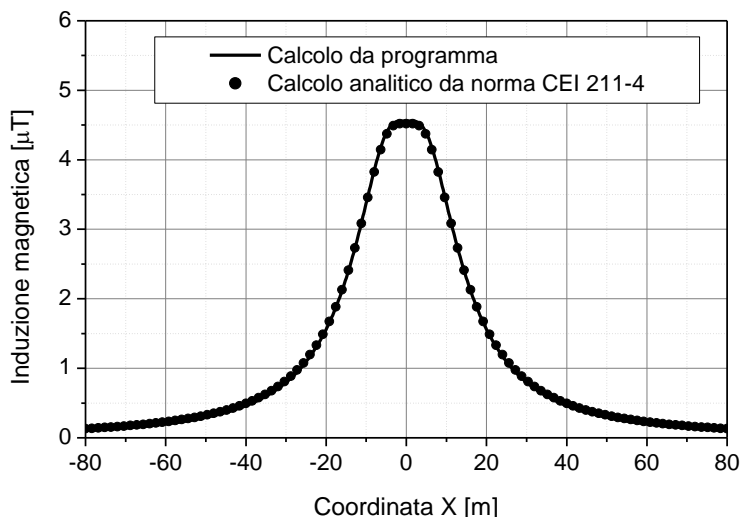


Figura 1: Induzione magnetica al suolo in prossimità di una linea aerea a doppia terna su semplice palificazione con corrente di 310: confronto tra MAGIC® e formula analitica CEI 211-4

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

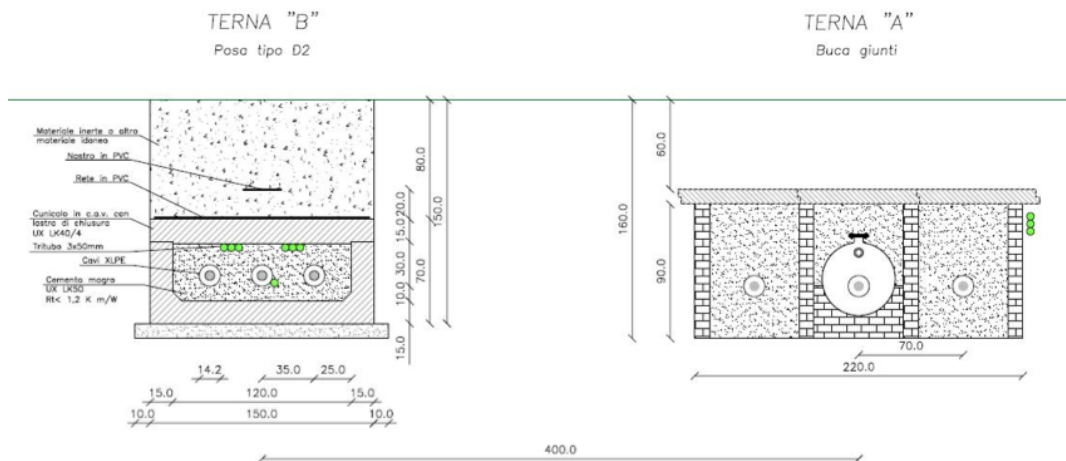


Figura 2: Affiancamento tra due linee interrate AT

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.

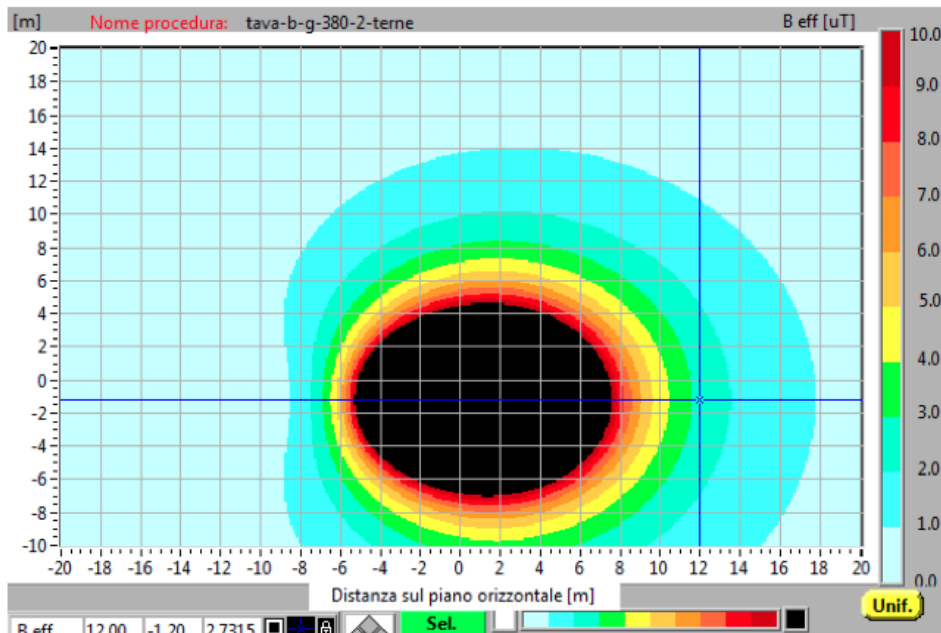


Figura 3: Mappa cromatica delle induzioni magnetiche calcolata mediante software CESI

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.

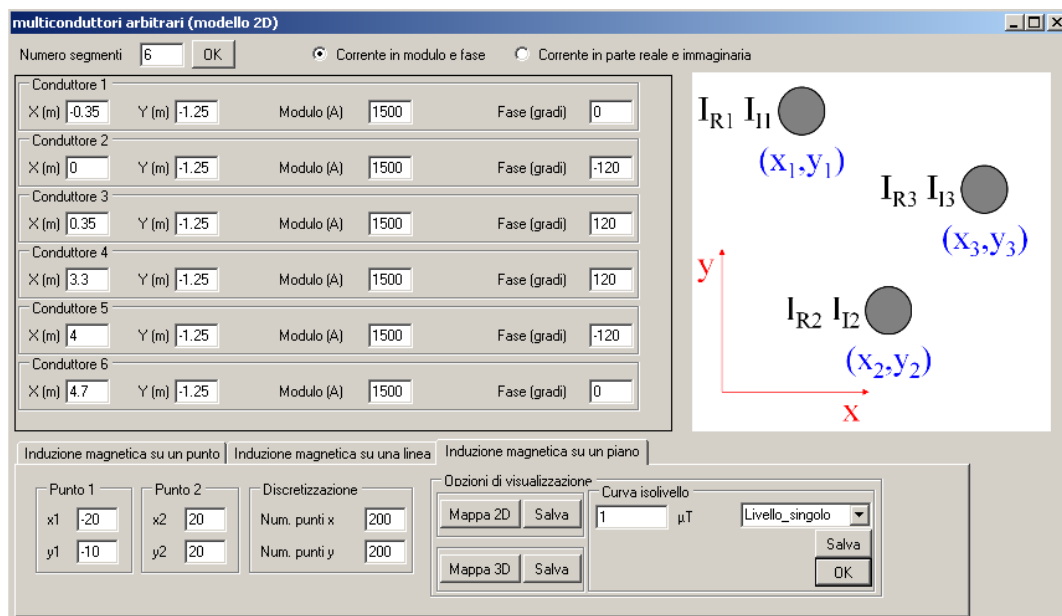


Figura 4:Schermata di ingresso modulo “multiconduttori arbitrari (modello 2D)””: dati definizione geometria e sorgenti

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

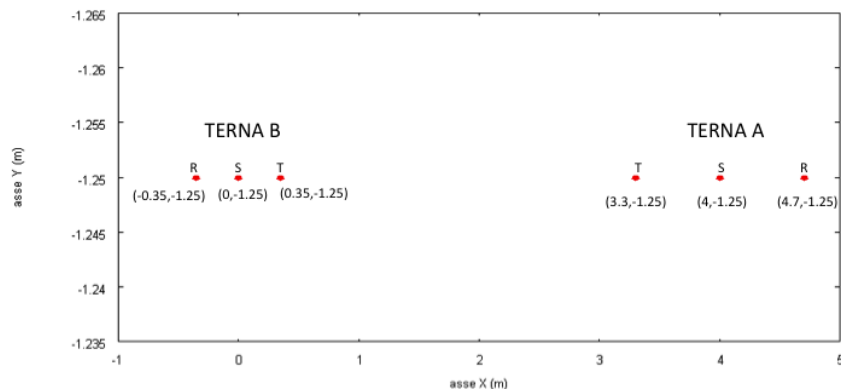


Figura 5: Geometria sorgenti

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

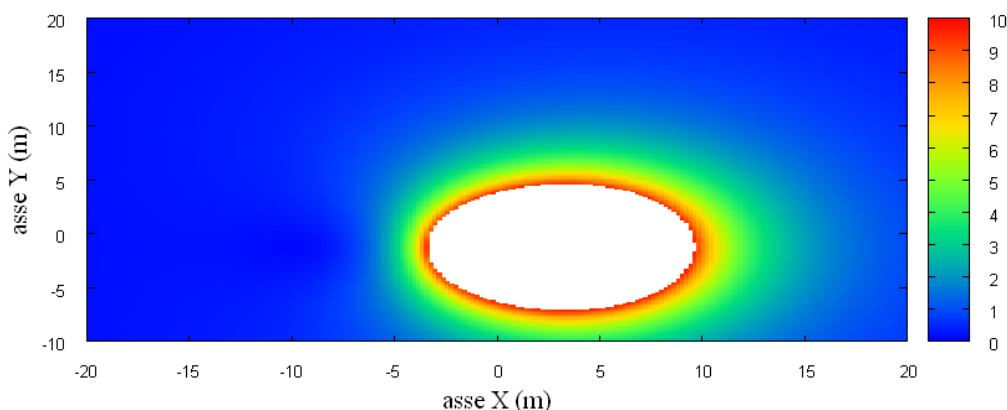


Fig. 6: Mappa cromatica dell’induzione magnetica ottenuta dal software MAGIC® (valori in microT):

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

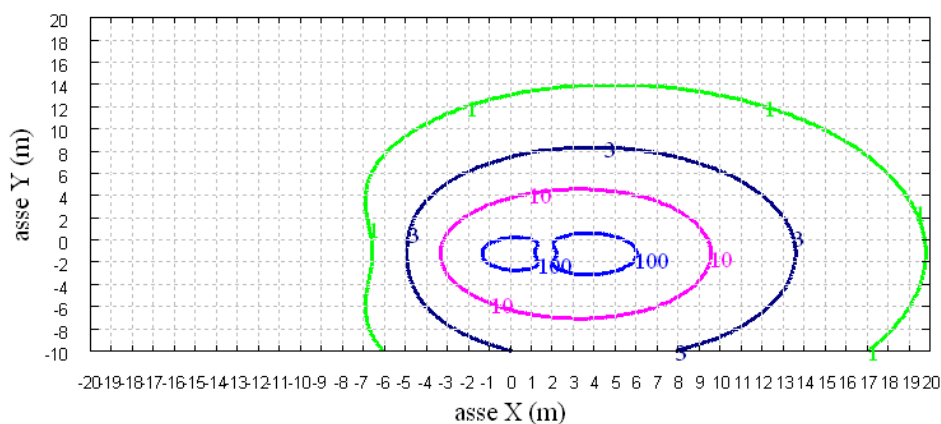


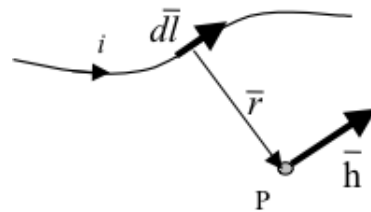
Fig. 7 Linee isolivello dell’induzione magnetica (1, 3, 10, 100 microT) da software MAGIC®.

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:

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



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.

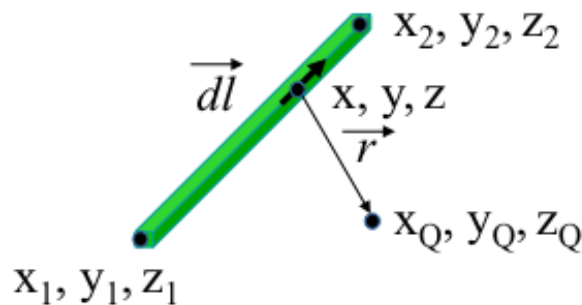


Fig. 8: Modello del segmento.

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

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

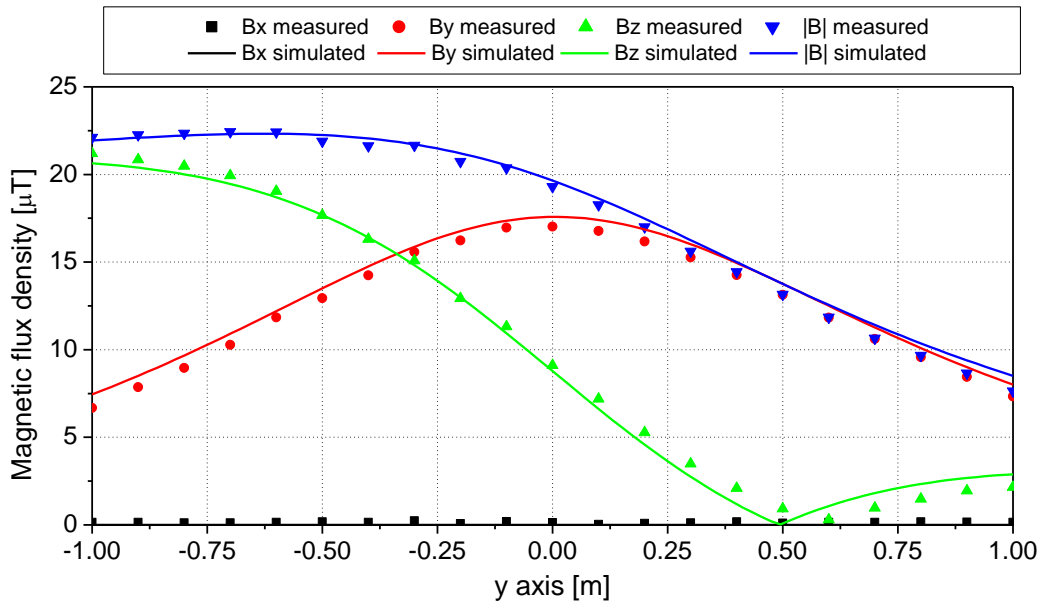


Fig. 10: Induzione magnetica misurata e calcolata mediante software MAGIC®.

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.

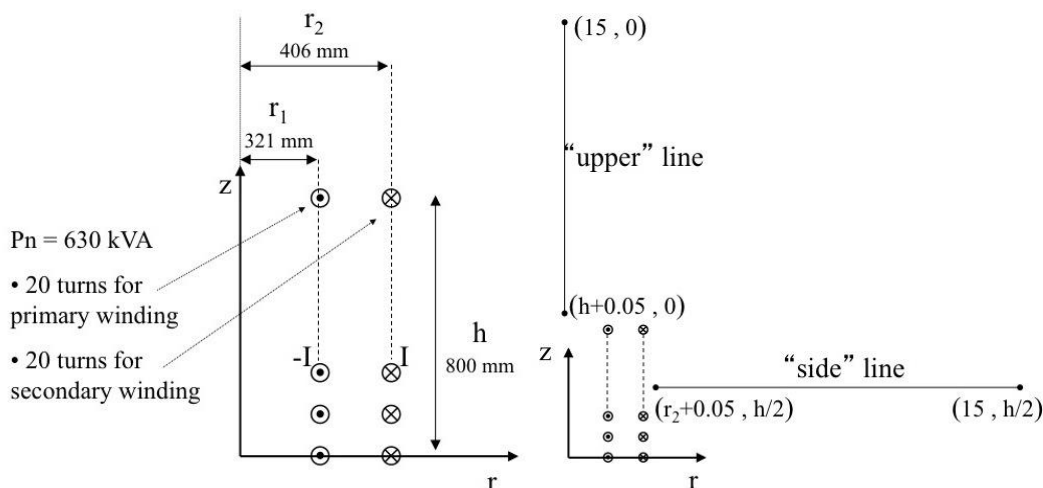


Fig. 11. Geometria del sistema (1) e linee di calcolo (2)

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).

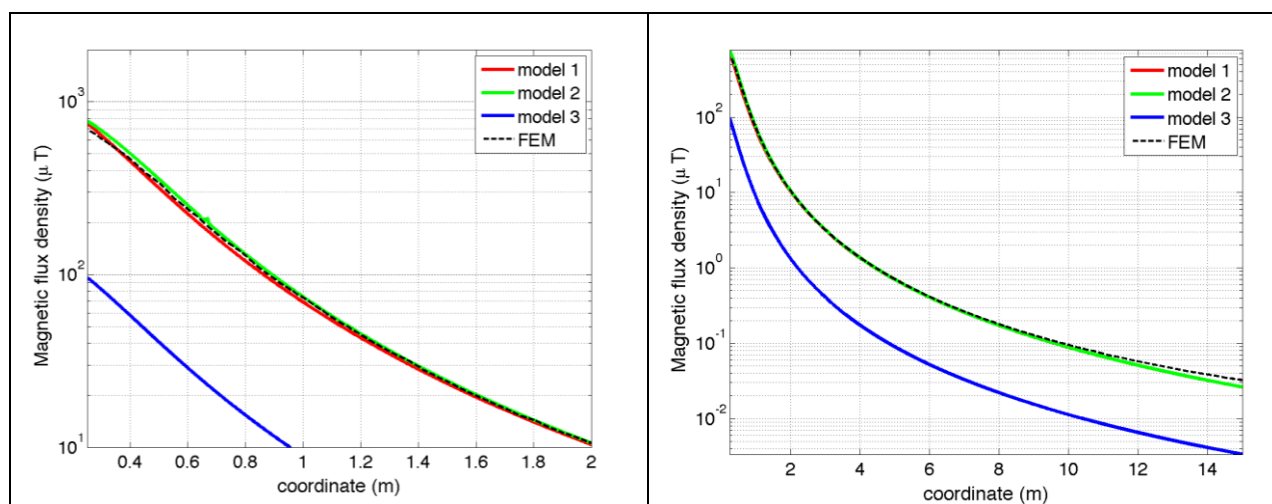


Fig. 12. Induzione magnetica lungo la linea laterale

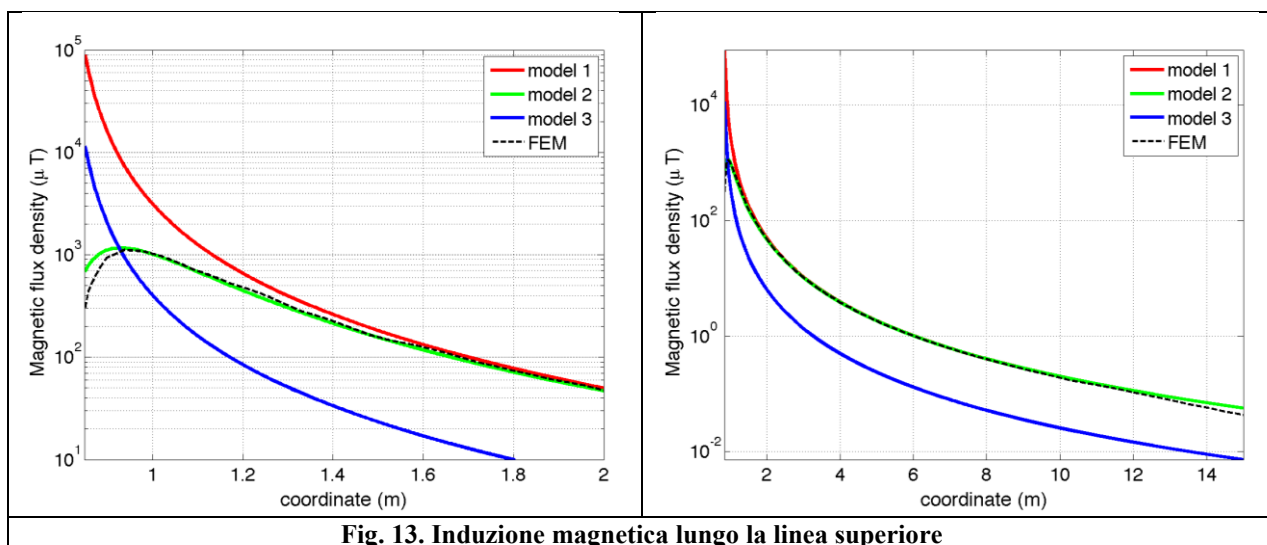


Fig. 13. Induzione magnetica lungo la linea superiore

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 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.

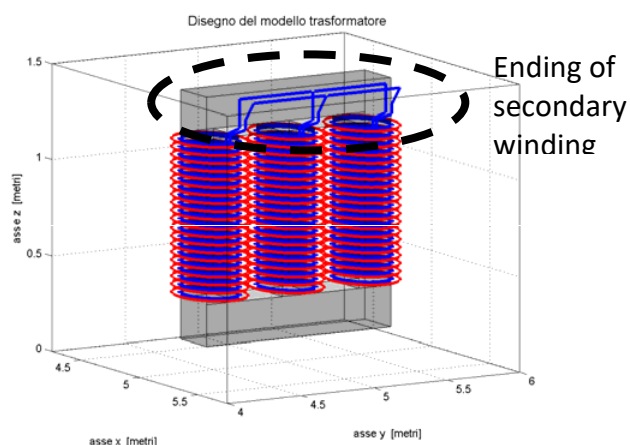


Fig. 14: Connessioni elettriche considerate al lati BT.

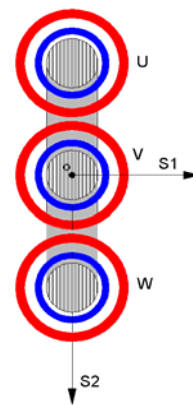


Fig. 15: Linee di calcolo S1 ed S2

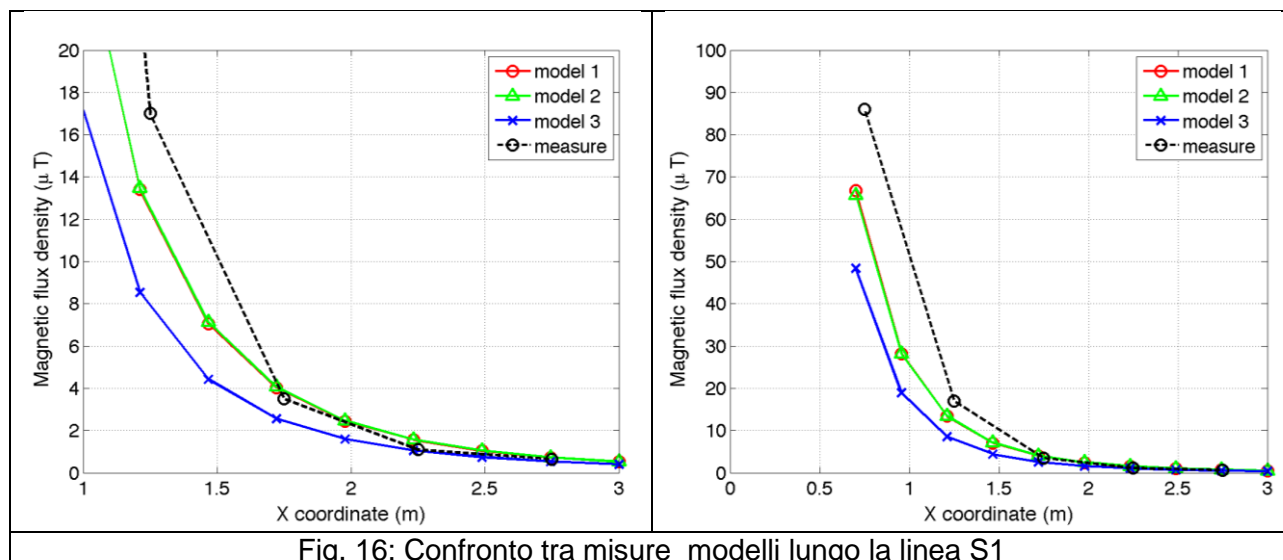
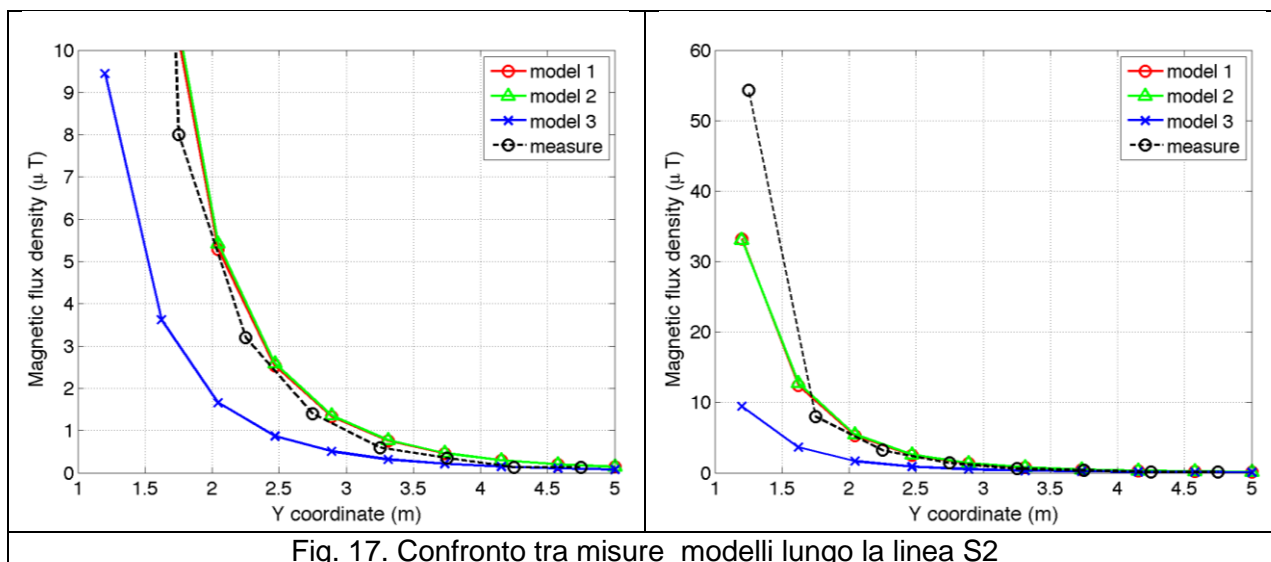


Fig. 16: Confronto tra misure modelli lungo la linea S1



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.