

Valutazione di Campi Elettromagnetici Impianto Idroelettrico “Santa Rosa” – Firenze

Rifer.: 99-2024 Centrale Idroelettrica Firenze Santa Rosa

Dott. Per. Ind. Renato Ricci

Viale Bologna, 273

47121 – Forlì (FC)



Data: 18/12/2024

Sommario

1. Premessa	3
2. Layout architettonico.....	5
3. Definizione dei limiti di esposizione nei locali circostanti la cabina elettrica.....	6
4. Analisi MAGIC.....	7
5. Conclusioni	11
6. Area schermatura.....	12
7. Situazione a seguito della mitigazione.....	13
8. Dorsale MT	14
9. Collegamento alla linea MT esistente.....	15

1. Premessa

La presente relazione redatta dal sottoscritto Dott. Per. Ind. Renato Ricci iscritto all'Ordine dei Periti Industriali di Forlì-Cesena al n° 589 riporta lo studio di induzione magnetica, generata dall'insieme di infrastrutture elettriche presenti all'interno dell'impianto di una nuova centrale idroelettrica ad acqua fluente ubicata nel comune di Firenze in Provincia di Firenze, in corrispondenza della traversa "Pescaia di Santa Rosa".

Lo scopo del seguente è di verificare il rispetto delle specifiche contenute nel quadro normativo di riferimento:

- **Legge n° 36 del 22/2/2001**, "Legge quadro sulla protezione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici" (Legge che rimanda l'applicazione ai decreti applicativi: DPCM 8 luglio 2003);
- **Guida CEI 211-6 (2001)**, "Guida per la misura e per la valutazione dei campi elettrici e magnetici nell'intervallo di frequenza 0 Hz - 10 kHz, con riferimento all'esposizione umana";
- **DPCM 8 luglio 2003**, "Fissazione dei limiti di esposizione, dei valori di attenzione e degli obiettivi di qualità per la protezione della popolazione dalle esposizioni ai campi elettrici e magnetici alla frequenza di rete (50Hz) generati da elettrodotti;
- **Guida CEI 106-11: (2006)**, "Guida per la determinazione delle fasce di rispetto per gli elettrodotti secondo le disposizioni del DPCM 8 luglio 2003 (Art. 6) – Parte 1: Linee elettriche aeree e in cavo";
- **Guida CEI 106-12 (2006)**, "Guida pratica ai metodi e criteri di riduzione dei campi magnetici prodotti dalle cabine elettriche MT/BT";
- **CEI 14-35 (2008)**, in merito alla valutazione dei campi elettromagnetici attorno ai trasformatori di potenza aventi una gamma di potenza compresa fra 5 kVA e 1000 kVA;
- **DM 29 Maggio 2008**, "Approvazione della metodologia di calcolo per la determinazione delle fasce di rispetto per gli elettrodotti";
- **Supplemento ordinario n.160 alla Gazzetta ufficiale 5 luglio 2008 n. 156**, Metodologia di calcolo per la determinazione delle fasce di rispetto per gli elettrodotti (allegato APAT);
- **Guida CEI 211-4 (2008)**, "Guida ai metodi di calcolo dei campi elettrici e magnetici generati da linee e da stazioni elettriche";
- **D.Lgs n. 81 del 9 aprile 2008**, "Attuazione dell'articolo 1 della legge 3 agosto 2007, n. 123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro", nello specifico: Titolo VIII Capo IV;
- **Raccomandazione del Consiglio dell'Unione Europea 1999/519/CE**, 12 luglio 2009, relativa alla limitazione dell'esposizione della popolazione ai campi elettromagnetici da 0 Hz a 300 GHz;
- **Norma CEI EN 61000-4-8:2010**, Compatibilità elettromagnetica (EMC);
- **Norma CEI EN 62110: 2012-11 (CEI 106-27)**, Livelli di campo elettrico e magnetico generati da sistemi di potenza in c.a.: Procedure di misura con riferimento all'esposizione umana;
- **D.Lgs n. 159 del 01 agosto 2016**, "Attuazione della direttiva 2013/35/UE sulle disposizioni minime di sicurezza e di salute relative all'esposizione dei lavoratori ai rischi derivanti dagli agenti fisici (campi elettromagnetici) e che abroga la direttiva 2004/40/CE.";
- **DM 11 Ottobre 2017** "Inquinamento elettromagnetico indoor", per dimostrare la conformità al criterio 2.3.5.4 è necessario presentare una relazione tecnica, con relativi elaborati grafici, stato ante operam, interventi previsti, risultati raggiungibili e stato post operam;
- **Guida CEI 106-45 (gennaio 2021)**, Guida CEM – Guida alla valutazione dei rischi per la salute e la sicurezza derivante dall'esposizione ai campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici (CEM) fra 0 Hz e 300 GHz nei luoghi di lavoro.

In particolare, i **valori limite massimi** in materia di esposizione a campi magnetici prodotti da sorgenti elettriche di bassa frequenza previsti dalla normativa citata sono fissati a:

- **100 μ T** esposizione **istantanea**, valore imposto dal DPCM 8 Luglio 2003 – Art. 3;
- **3,78 μ T** per locali con presenza di **apparecchiature elettroniche sensibili**, valore indicato dalla norma tecnica CEI EN 61000-4:8;
- **3 μ T**, obiettivo di qualità negli ambienti ad esposizione prolungata di persone (superiore alle quattro ore giornaliere), valore imposto dal DPCM 8 Luglio 2003 – Art. 4.

In presenza di ambienti particolarmente sensibili, potrebbe essere esplicitamente richiesto dalla committenza una ulteriore riduzione del valore limite imposto dall'obiettivo di qualità per scopi cautelativi.

Lo studio inizia da una descrizione generale del problema con individuazione delle aree sensibili e delle sorgenti principali di campo magnetico, per le quali è necessario effettuare una valutazione dell'induzione magnetica, secondo gli obiettivi di qualità sopra citati (**2 Layout architettonico**) + (**3 Definizione dei limiti di esposizione nei locali circostanti la cabina elettrica**).

Lo studio prosegue con la modellizzazione dei dispositivi elettrici mediante software MAGIC® per la valutazione dell'induzione magnetica generata dagli stessi (**4 Analisi MAGIC**) corredata da commenti conclusivi sui valori di campo magnetico dedotti dalle simulazioni (**5 Conclusioni**).

Completa lo studio l'eventuale layout esecutivo del sistema di schermatura adottato per il contenimento dei valori di campo magnetico nei termini di legge (**6 Area schermatura**) e termina con una rappresentazione dell'effetto schermante del sistema di mitigazione (**7 Situazione a seguito della mitigazione**).

2. Layout architettonico

Nella Figura 1 si riporta la pianta della cabina elettrica con indicazione della disposizione dei componenti elettrici presenti all'interno della stessa. Vengono definiti anche i punti cardinali di riferimento.

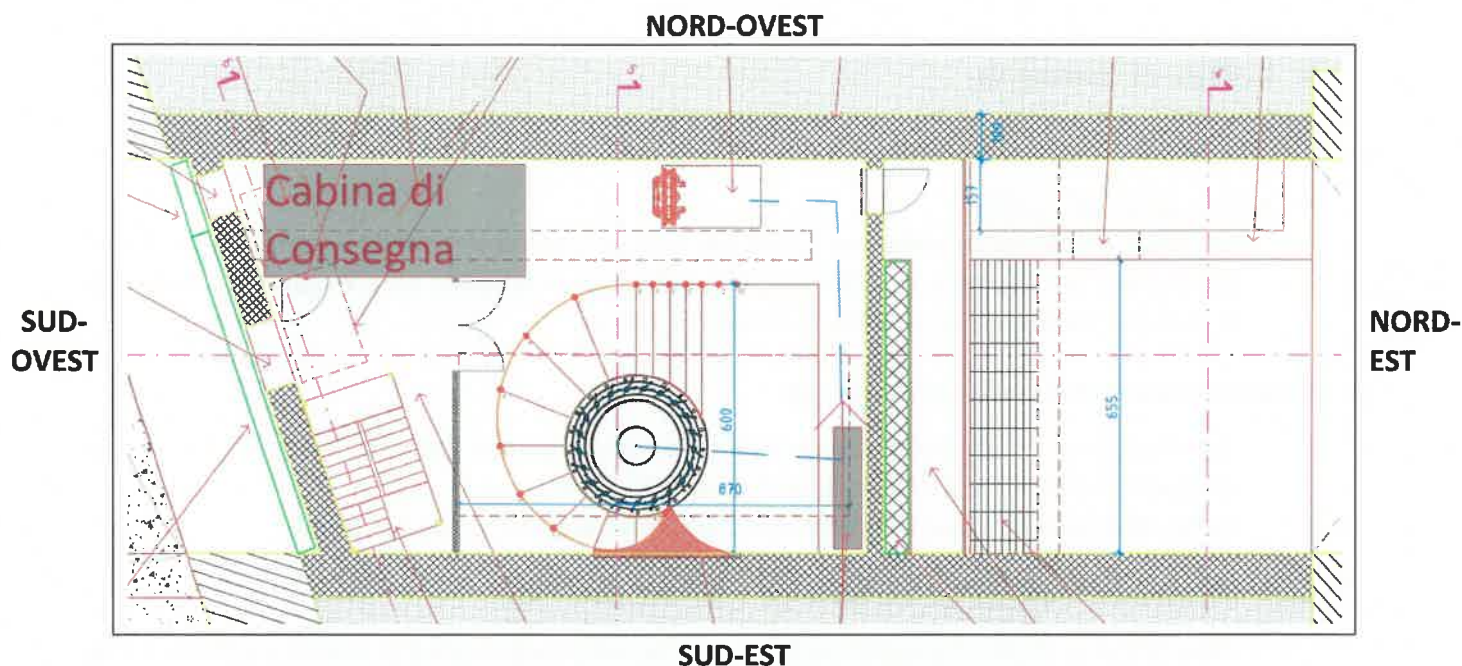


Figura 1 Pianta del locale Cabina Elettrica al piano interrato

La cabina elettrica è situata al piano interrato in locale dedicato.

Le apparecchiature elettriche presenti nella medesima, caratterizzate da valori di corrente non trascurabili ai fini delle valutazioni del campo magnetico, sono:

- n.1 Trasformatore BT/MT da 1000 kVA isolato in resina;
- n.1 Quadro generale di media tensione ente distributore per l'immissione in rete, quadro generale di media tensione utente per la consegna e l'immissione sul quadro ente distributore;
- n.1 Quadro BT di tipo power center;
- n.2 Linee BT in uscita dal generatore (di taglia 900kVA 720kW, tensione 400V) e tra QBT e trasformatore;
- n.2 Linea MT di collegamento tra trasformatore e QMT Utente e tra QMT Utente ed Ente distributore;

3. Definizione dei limiti di esposizione nei locali circostanti la Centrale Idroelettrica

Seguendo le informazioni contenute nella documentazione fornita dal committente, si evidenzia che i locali confinanti con la medesima rappresentano:

➤ Cabina di consegna

○ Piano della cabina (piano interrato):

❖ *NORD, SUD, EST, OVEST*

Non esistono locali caratterizzati dalla permanenza continuativa di persone oltre le 4 ore giornaliere (terrapieno e locali tecnici), pertanto dovranno essere garantiti valori di induzione magnetica al di sotto del limite di 100 μ T;

○ Piano sovrastante la cabina (piano terra):

Parcheggio e strada pubblica, pertanto dovranno essere garantiti valori di induzione magnetica al di sotto dell'obiettivo di qualità di 3 μ T;

Nelle simulazioni seguenti il piano stradale assume quota Z pari a 5,56mt.

○ Piano sottostante la cabina (piano secondo interrato interrato):

Non esistono locali caratterizzati dalla permanenza continuativa di persone oltre le 4 ore giornaliere (terrapieno e locali tecnici), pertanto dovranno essere garantiti valori di induzione magnetica al di sotto del limite di 100 μ T.

4. Analisi MAGIC

Nelle Figure 2 e 3 viene presentato il layout della cabina elettrica e del locale elettrico di centrale mediante il software di calcolo tridimensionale MAGIC®, utilizzato per valutare l'induzione magnetica generata dai componenti elettrici, presenti nel locale oggetto di analisi. Il software permette di effettuare delle simulazioni considerando la tridimensionalità dei singoli dispositivi elettrici ed una sovrapposizione dei loro effetti in termini di induzione magnetica. La tipologia di apparecchiature utilizzate nella simulazione MAGIC® sarà la più vicina possibile alla conformazione delle sorgenti reali, partendo dagli elementi standard modellabili all'interno del software stesso. In allegato alla presente relazione si fornisce il documento di validazione del software attraverso un confronto con software già esistenti e con rilievi sperimentali.

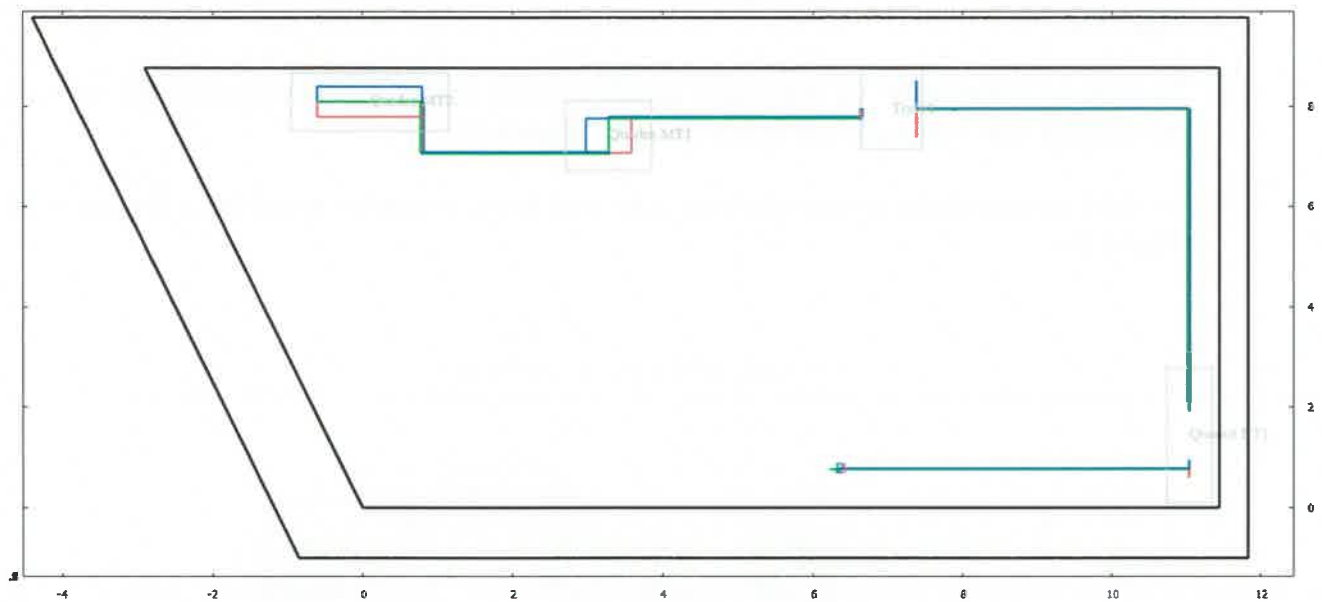


Figura 2 Layout – vista in pianta

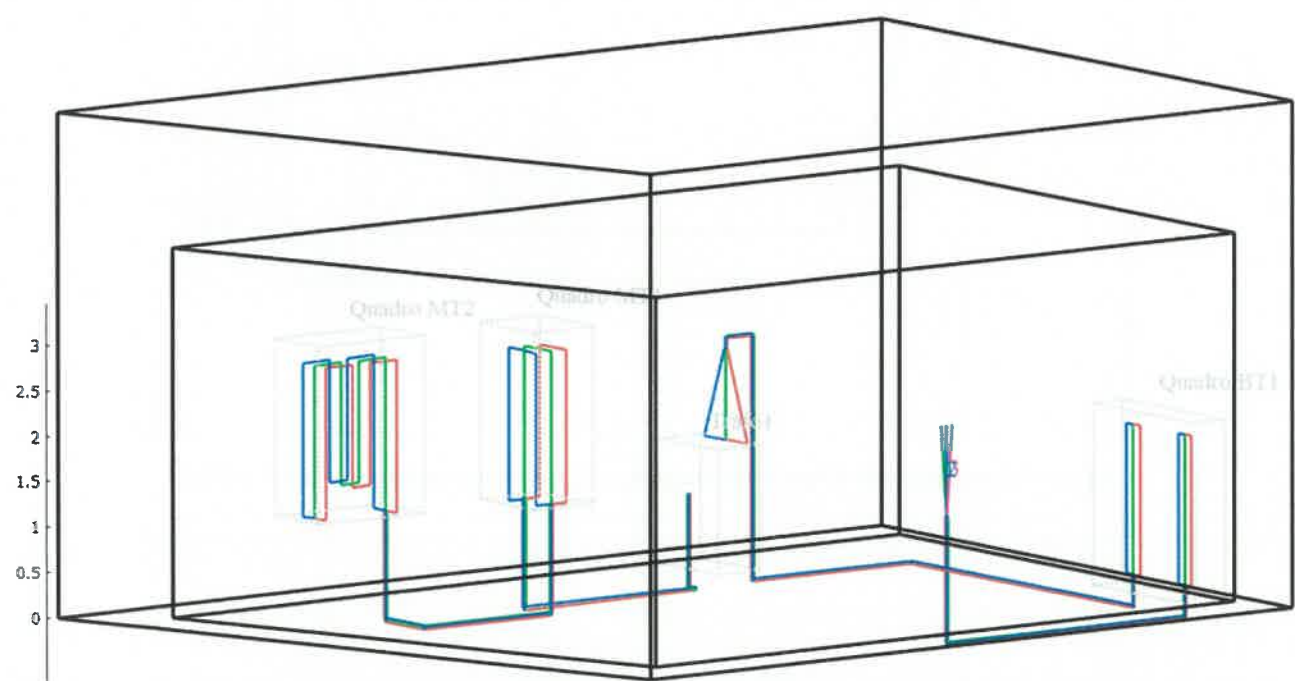


Figura 3 Layout – vista 3D

Di seguito vengono analizzati i valori di induzione magnetica generati, in assenza di schermatura.

Nelle successive Figure vengono presentate le curve isolivello che riportano i valori di induzione magnetica, in μT , calcolati su diversi piani XY (paralleli al pavimento del locale Cabina Elettrica) per le seguenti quote:

- $Z = 0,5$ corrispondente ad una quota di 0,5 metri a partire dal pavimento della cabina (Figura 4);
- $Z = 1,0$ corrispondente ad una quota di 1,0 metro a partire dal pavimento della cabina (Figura 5);
- $Z = 1,5$ corrispondente ad una quota di 1,5 metri a partire dal pavimento della cabina (Figura 6);
- $Z = 5,56$ corrispondente ad una quota di 5,56 metri a partire dal pavimento della cabina e coincidente con il calpestio del piano stradale. (Figura 7);
- $Y = 0,50$ sezione della cabina elettrica, passante lungo il quadro macchine e il quadro BT (Figura 8).

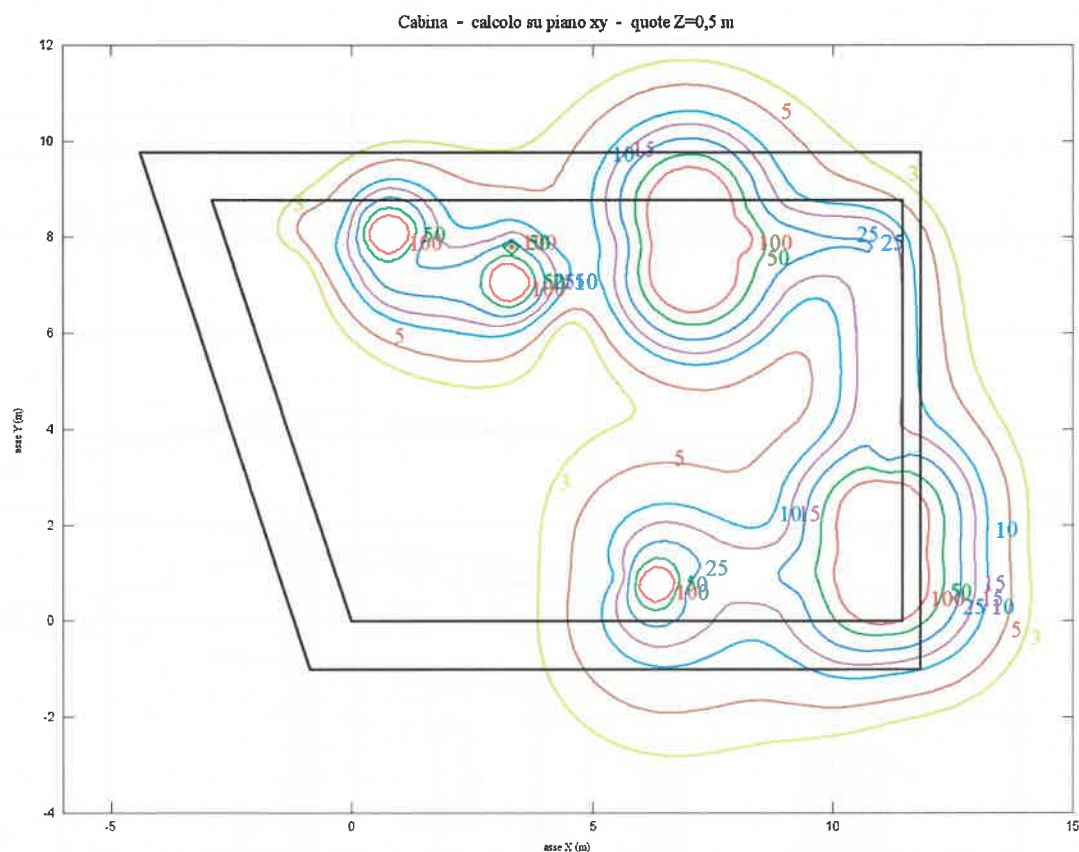


Figura 4 Curve isolivello d'induzione magnetica calcolate su un piano XY per $Z = 0,5$ m

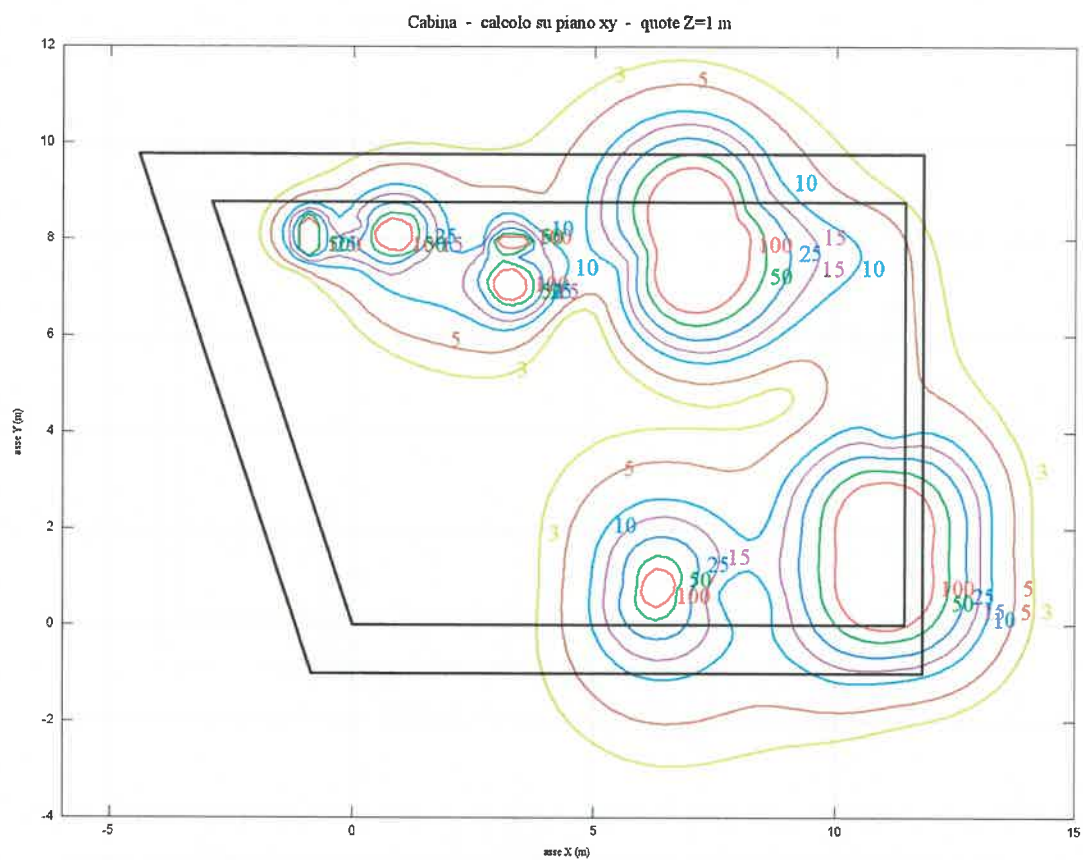


Figura 5 Curve isolivello d'induzione magnetica calcolate su un piano XY per Z = 1,0 m

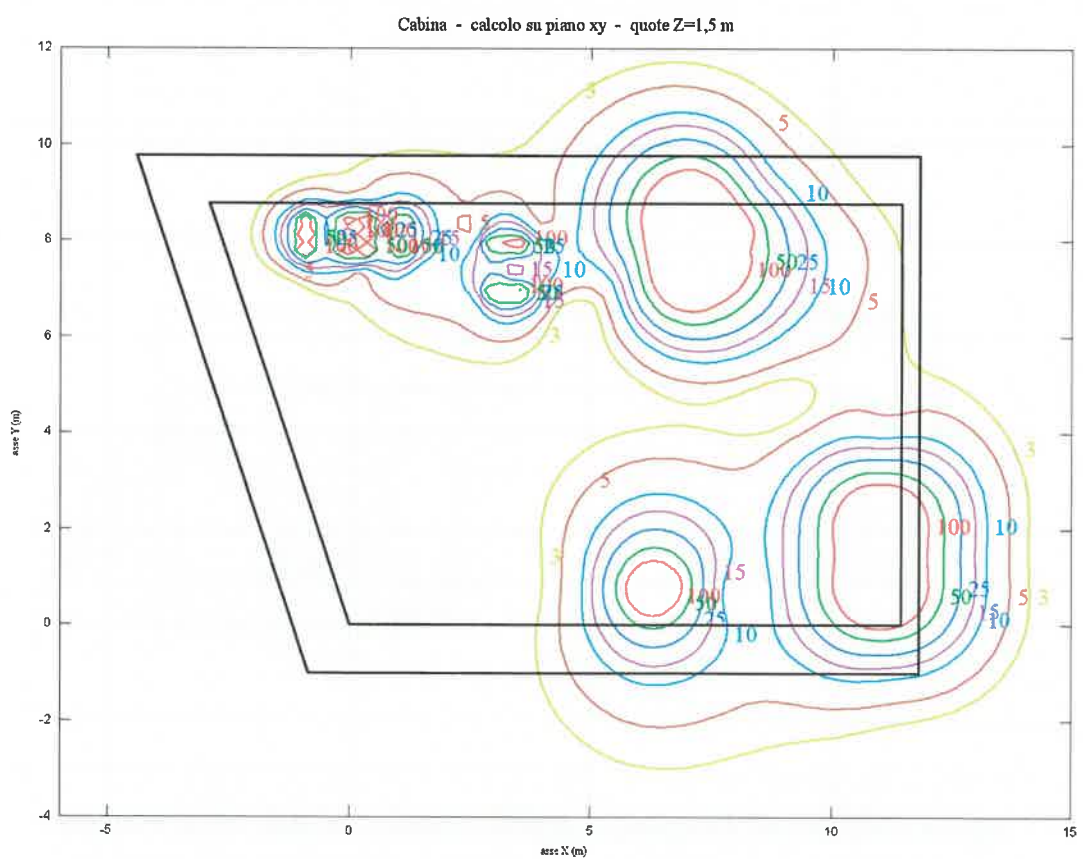


Figura 6 Curve isolivello d'induzione magnetica calcolate su un piano XY per Z = 1,5 m

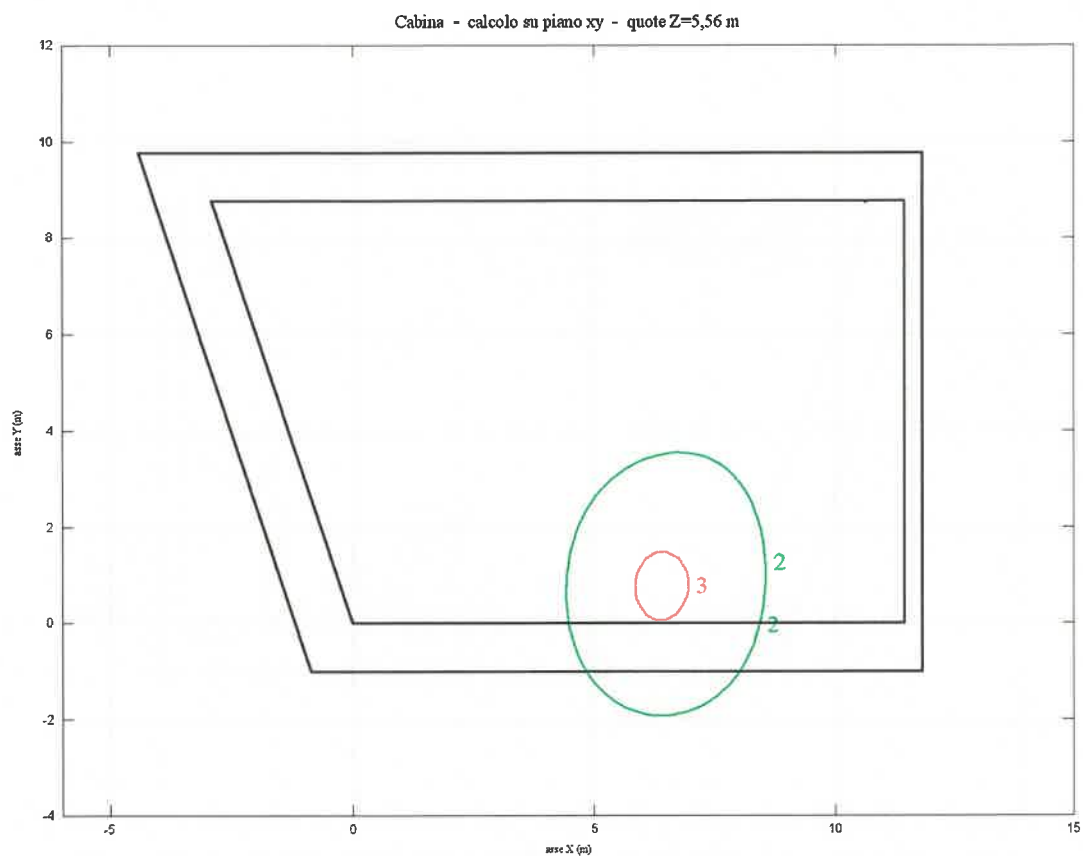


Figura 7 Curve isolivello d'induzione magnetica calcolate su un piano XY per Z = 5,56 m

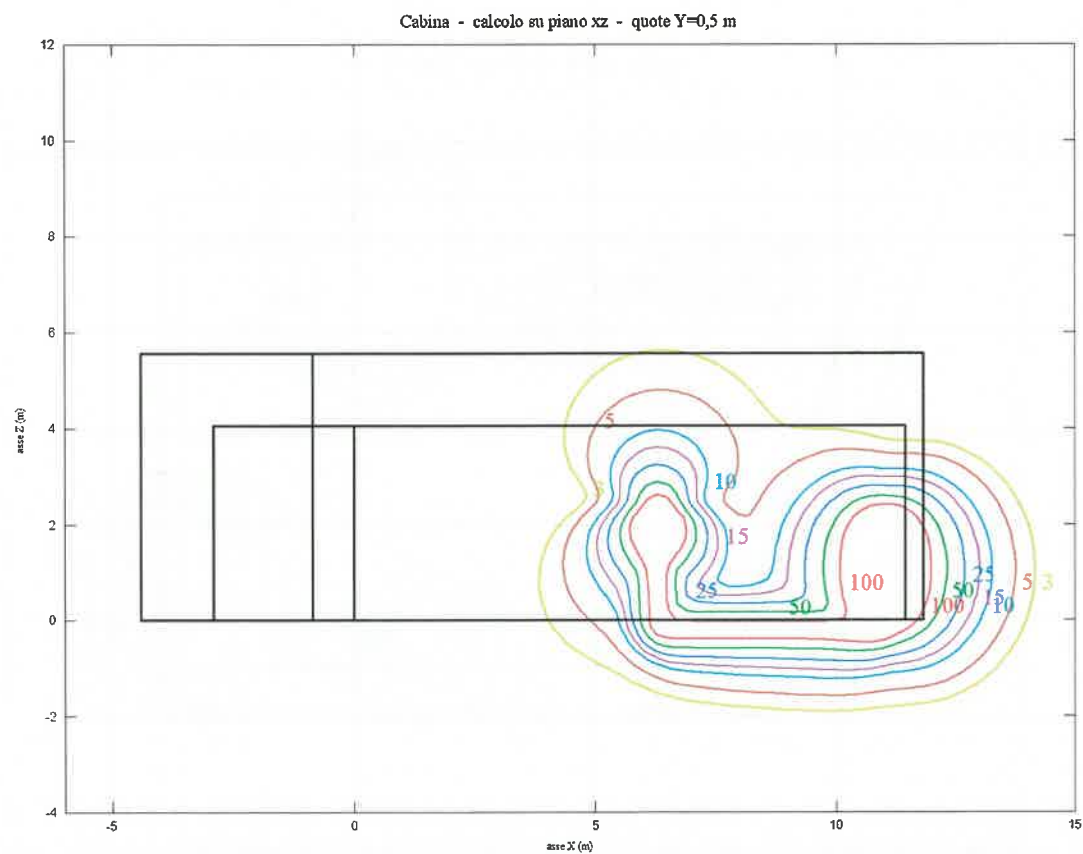


Figura 8 Curve isolivello d'induzione magnetica calcolate su un piano XY per Y = 0,50 m

5. Conclusioni

Sulla base dei risultati delle simulazioni di campo magnetico, è possibile notare che:

- Il piano stradale soprastante la centrale è caratterizzato da livelli di induzione magnetica localizzati di poco superiori ai 3 μ T. Cautelativamente si prevedono opere di mitigazione in tale zona.

Visti i risultati ottenuti dall'analisi di impatto ambientale, è stata prevista l'adozione di un'opera di mitigazione in grado di abbattere i valori di campo magnetico generati dalla sovrapposizione delle sorgenti precedentemente descritte. Tale sistema di mitigazione è stato identificato nella linea di prodotti schermanti della ditta **BEShielding S.r.l.**, tipologia **WHCM-A/HCM-A** o similari ed equivalenti, con i relativi accessori.

In particolare, sono state previste le seguenti opere di mitigazione:

- **Schermatura su parte del soffitto**
- **Schermatura di parte delle pareti della cabina elettrica con opportune appendici, ove necessario.**

Il sistema schermante previsto dovrà essere installato con appositi fissaggi.

La continuità elettrica tra le piastre schermanti sarà ottenuta mediante opportune giunzioni.

Il sistema schermante è progettato per ridurre i valori di induzione magnetica al di sotto del limite 3 μ T negli ambienti potenzialmente sensibili sovrastanti e attigui alla centrale.

Tale simulazione è stata effettuata sulla base del progetto preliminare ad oggi disponibile, si prescrive sin da ora che dovrà essere effettuata nuova simulazione sulla scorta del progetto definitivo al fine di confermare, prima dell'avvio dei lavori di costruzione, la validità dei risultati della presente simulazione.

1. In ogni caso come da prescrizione ricevuta dal Comune di Firenze con lettera prot. 0567928 del 30/10/2024 successivamente alla realizzazione dell'opera, verrà effettuata ulteriore analisi di impatto elettromagnetico Post Operam per valutare la reale intensità dei campi elettromagnetici.

Area schermatura

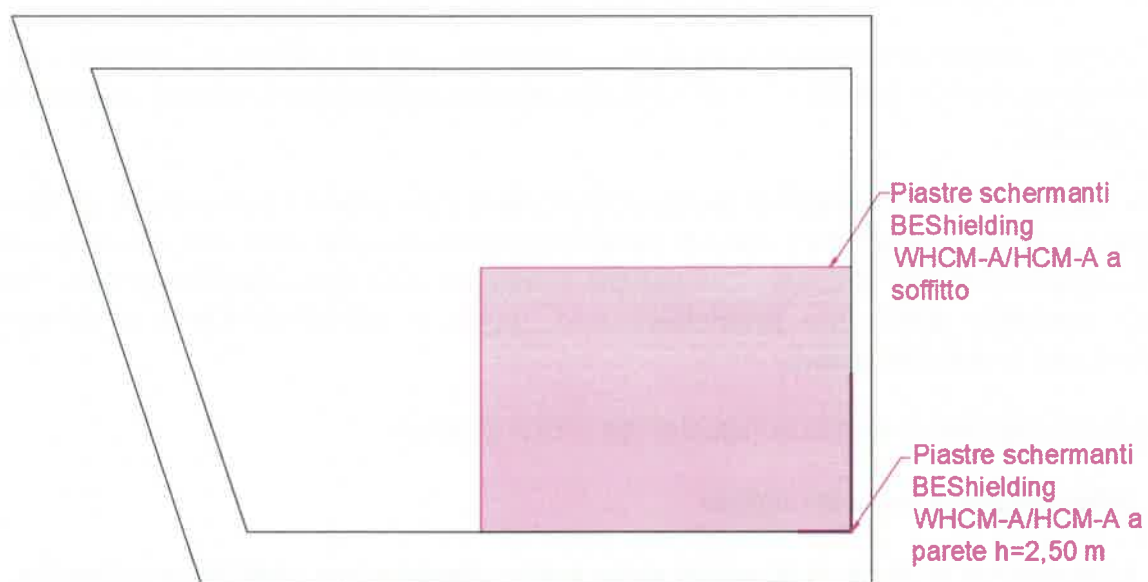


Figura 9 Layout di schermatura

6. Situazione a seguito della mitigazione

Nelle immagini di seguito riportate, sono rappresentate le curve isolivello, relative a quanto presumibilmente accadrà a seguito delle opere di mitigazione.

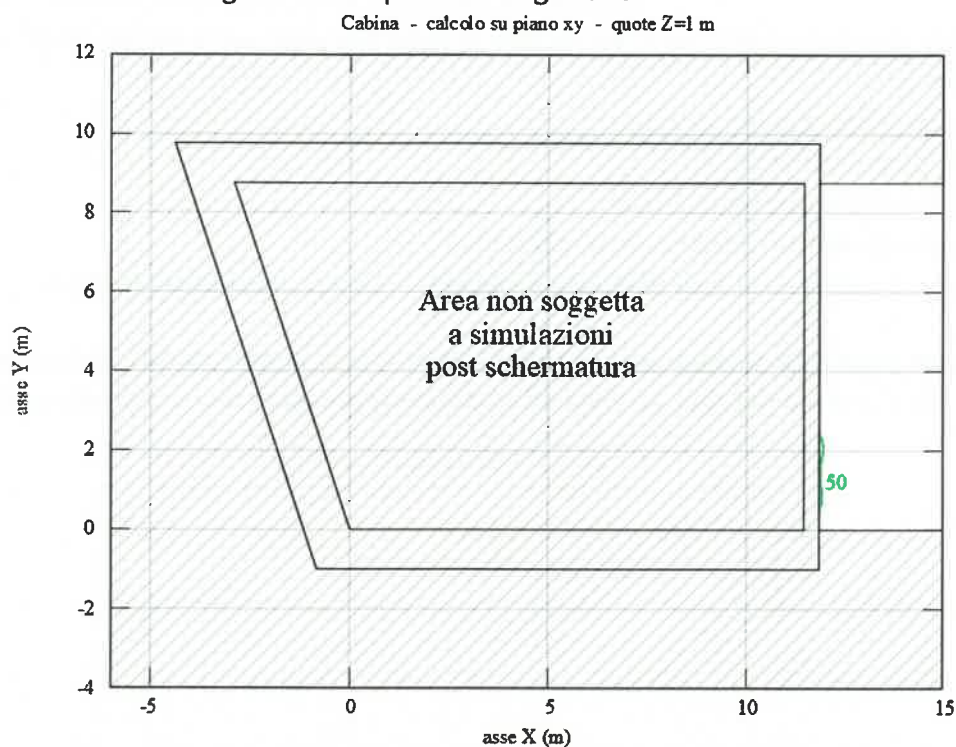


Figura 10 Curve isolivello d'induzione magnetica post schermatura Z=1,0 m

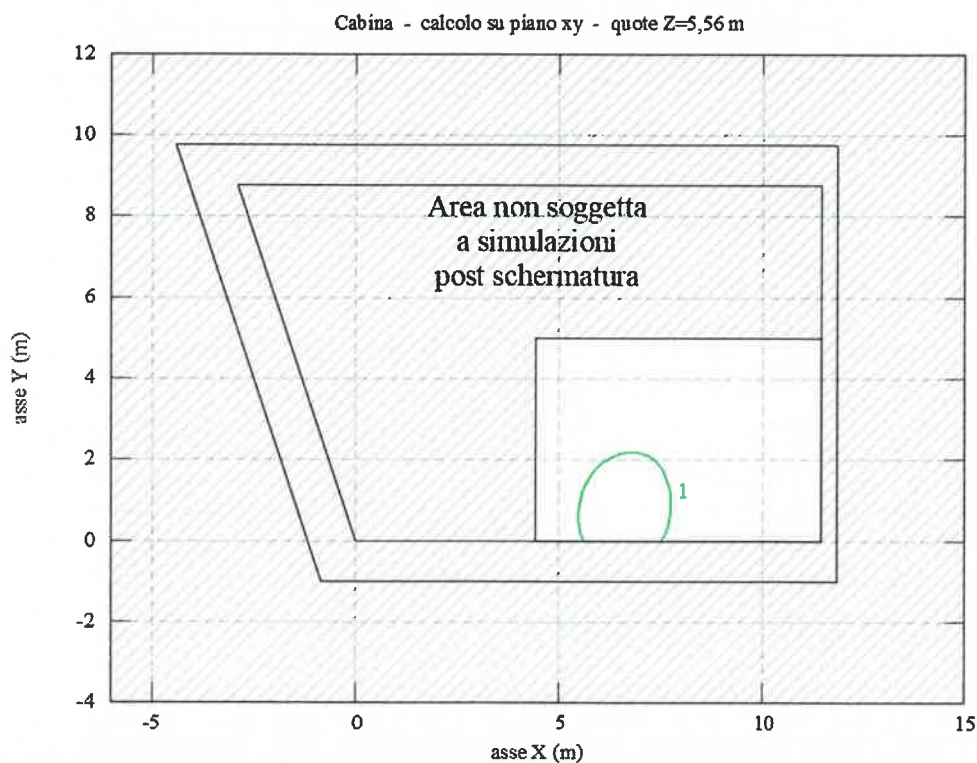


Figura 11 Curve isolivello d'induzione magnetica post schermatura Z=5,56 m

Come visibile dall'immagine sopra riportata, i valori limite dell'obiettivo di qualità e il limite di esposizione, risultano sempre rispettati, a seguito delle opere di mitigazione.

7. Dorsale MT

In uscita dalla Centrale Idroelettrica è previsto un cavidotto interrato che andrà verso una linea esistente.

La dorsale MT che sarà realizzata in entra-esce è stata simulata per il tratto esterno della Cabina considerando:

- interramento minimo di 1,2m;
- posa elicordata dei cavi;
- distanza tra le due linee 20cm
- sezione conduttori $3 \times 185 \text{ mm}^2$ in alluminio;
- Corrente massima di fase 35A valore alla massima potenza del generatore.

Nella seguente Figura 12 si riportano le curve isolivello per la dorsale MT, calcolate su un piano ortogonale alla direzione dei cavi. La linea orizzontale rappresenta il piano di calpestio.

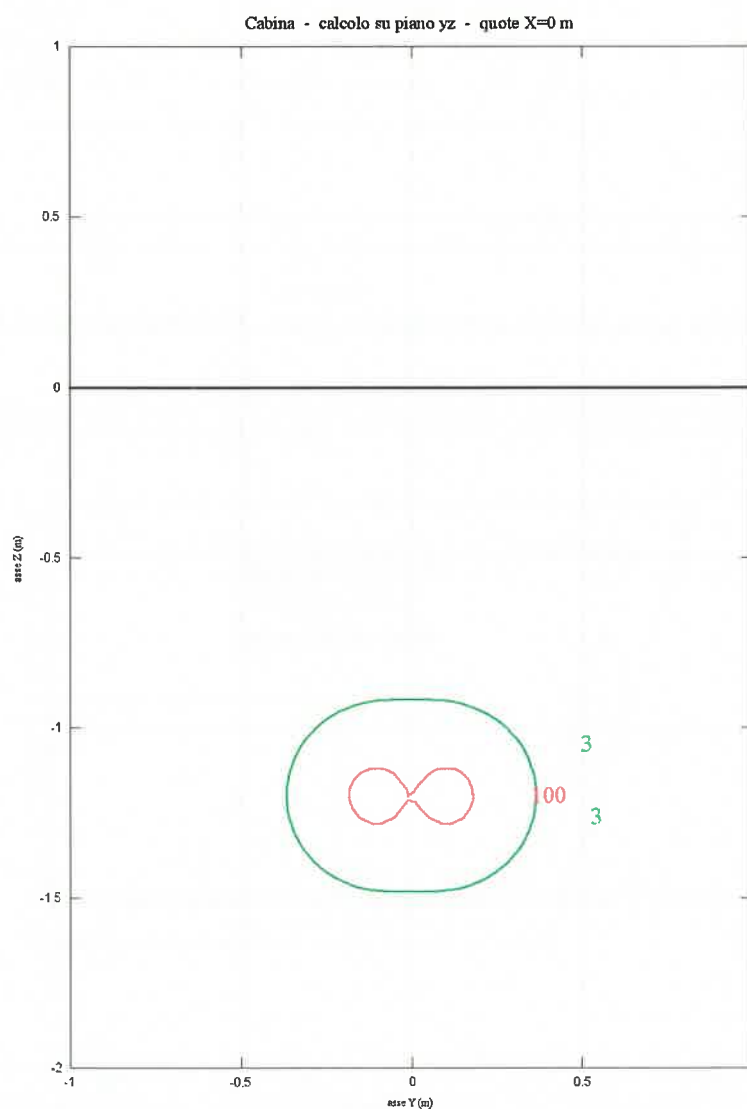


Figura 12 Curve isolivello d'induzione magnetica calcolate su un piano ortogonale alla dorsale MT

Dalla Figura 12 precedente, si può osservare che la curva isolivello dei $3 \mu\text{T}$ è interamente contenuta al di sotto del piano di calpestio, pertanto non risultano necessarie opere di mitigazione.

8. Collegamento alla linea MT esistente

La linea sarà collegata a dorsale Esistente MT mediante la realizzazione di giunti alla rete MT esistente a buca che sarà realizzata intercettando i cavi esistenti ed effettuando i giunti ad una profondità di circa 1,2mt, per poi re-interrare i cavi giuntati con lo stesso terreno di scavo, non è prevista la realizzazione di pozzetti di ispezione o similari.

Nella realizzazione dei giunti dei cavi sarà ripristinata mantenuta continua, le schermatura esistente del Cavo per tanto i valori di induzione magnetica sono equivalenti a quelli che del Cavo come sopra esposto.

Nota:

In allegato alla presente e come parte integrante della stessa, è stato inserito il documento di validazione del software MAGIC, utilizzato per le simulazioni dei campi magnetici indotti, presenti in questa relazione.



Documento di Validazione

Algoritmi di calcolo del software MAGIC® (**MAG**netic Induction **C**alculation)

Revisione	Data	Elaborato	Approvato
06	29/06/2021	F.M.M.	S.G.
00 Emissione	07/01/2014	D.B.	M.M.

Sommario

1. Premessa	1
2. Verifica del modulo bidimensionale.....	2
2.1. Confronto con CEI 211-04.....	2
2.2. Confronto con codice CESI.....	2
3. Verifica del modulo tridimensionale	6
3.1. Campo prodotto da un segmento finito arbitrariamente orientato	6
3.2. Validazione sperimentale del modulo tridimensionale	7
4. Verifica del modulo tridimensionale:trasformatore di potenza	8
4.1. Verifica del modello MAGIC® della singola colonna del trasformatore con modello FEM (Finite Element Method).....	8
4.2. Verifica del modello MAGIC® del trasformatore completo con misure sperimentali.....	10
5. Conclusioni	12

1. 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).

2. 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.

2.1. 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 B è data dall'espressione:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_{k=1}^N \frac{\vec{I}_k}{d_k} \vec{u}_I \times \vec{u}_r$$

in cui N è il numero dei conduttori, d è la distanza tra il conduttore k -esimo e il punto di calcolo; i vettori \vec{u}_I e \vec{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.

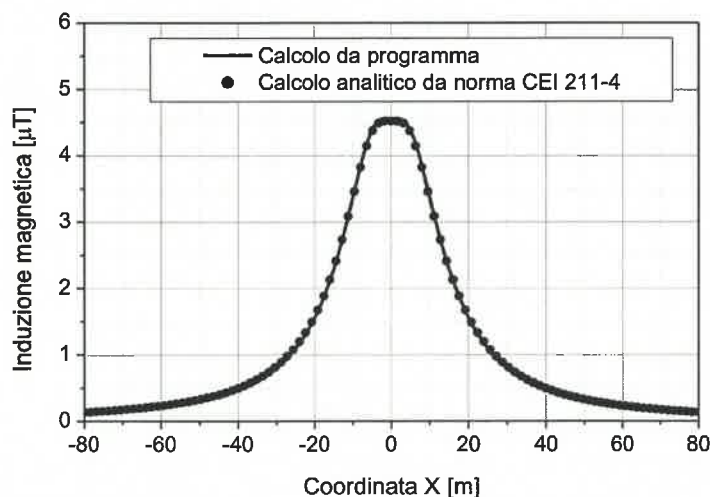


Figure 1 Induzione magnetica al suolo in prossimità di una linea aerea a doppia terna su semplice palificazione con corrente di 310: confronto tra MAGIC® e formula analitica CEI 211-4

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.

2.2. 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 interrimento pari a 1.25 m)
- Formazione piana (interasse 35 cm e livello di interrimento pari a 1.25 m)
- Distanza tra le due terne: 4m



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

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

- 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.

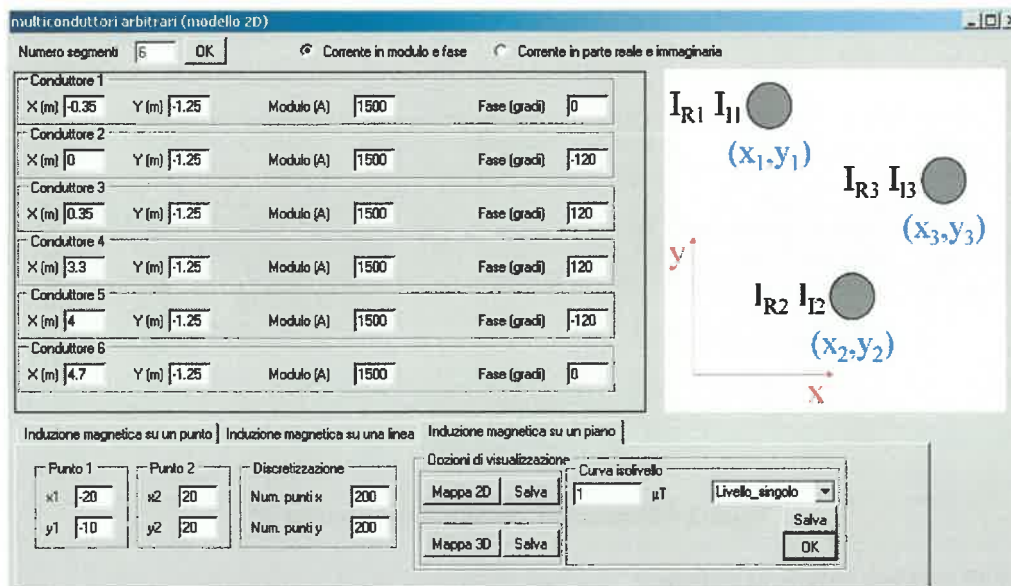


Figure 4 Schermata di ingresso modulo “multiconduttori arbitrari (modello 2D)”: dati definizione geometria e sorgenti

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

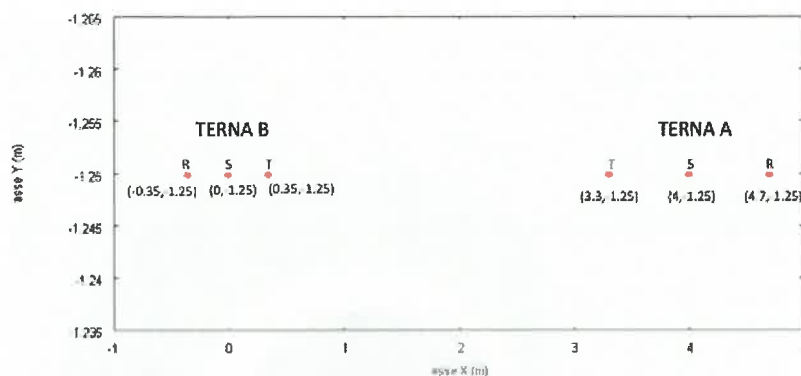


Figure 5 Geometria sorgenti

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

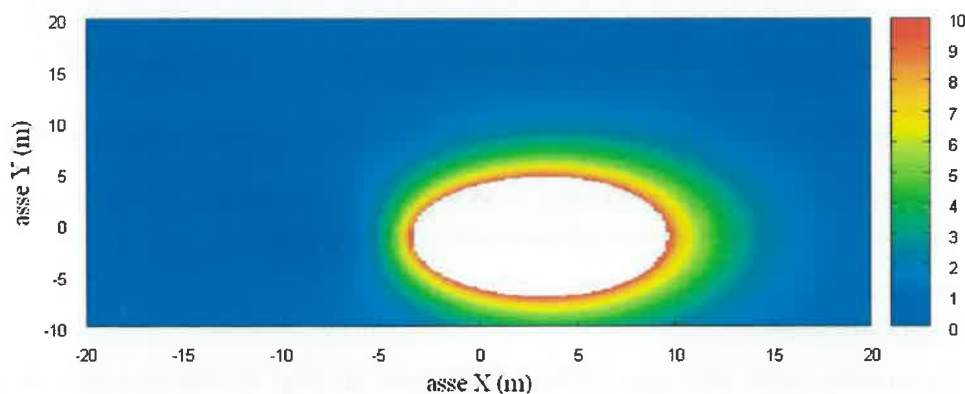


Figure 6 Mappa cromatica dell’induzione magnetica ottenuta dal software MAGIC® (valori in microT):

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

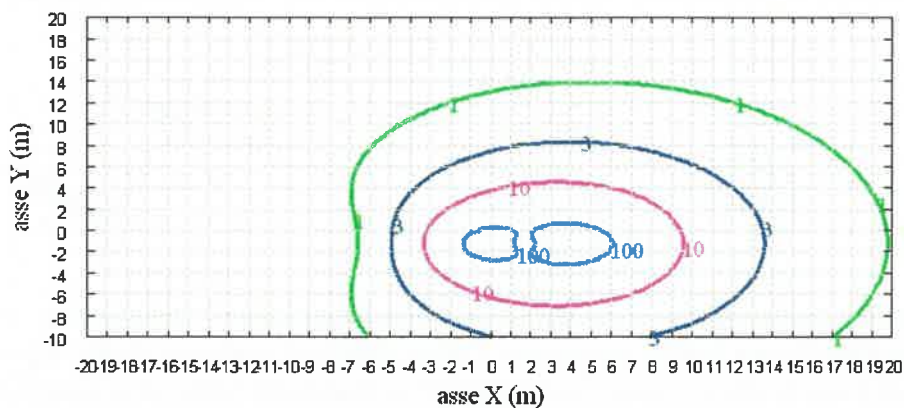


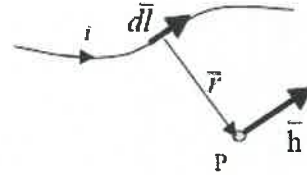
Figure 7 Linee isolivello dell'induzione magnetica (1, 3, 10, 100 microT) da software MAGIC®

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

3. Verifica del modulo tridimensionale

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

$$\vec{h} = \int \frac{i \vec{dl} \wedge \vec{r}}{4\pi r^2}$$



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.

3.1. Campo prodotto da un segmento finito arbitrariamente orientato

Si consideri il segmento rappresentato nella Fig. 8.

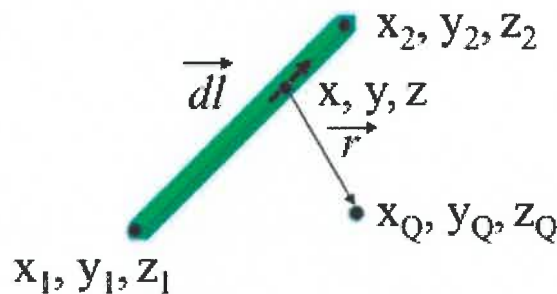


Figure 8 Modello del segmento.

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

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

Si consideri inoltre che:

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

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

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 referencia:

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

3.2. 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.

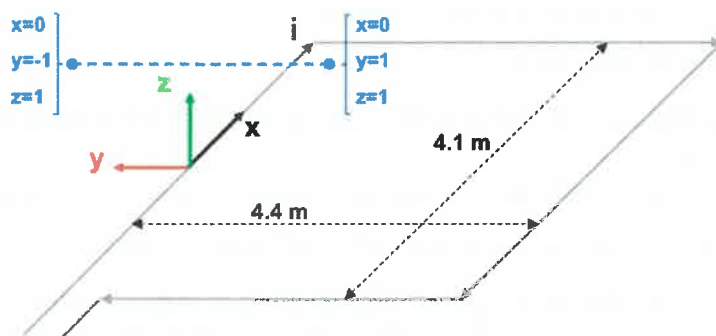


Figure 9 Schema di spira quadrata.

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.

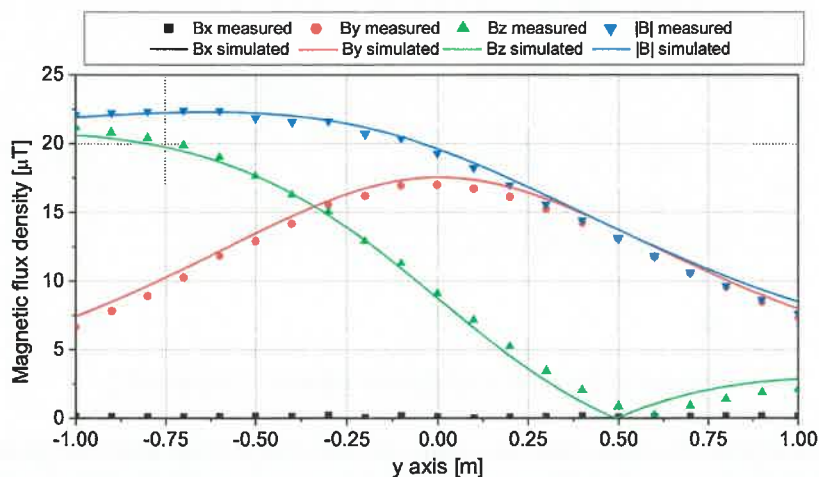


Figure 10 Induzione magnetica misurata e calcolata mediante software MAGIC®.

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

4. 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.

4.1. 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 e l'indicazione delle linee di calcolo.

Nei calcoli che seguono i due avvolgimenti sono caratterizzati dalle stesse amperspire in opposizione ($N_1 \cdot I_1 = N_2 \cdot I_2$) e verranno considerate, come sorgenti, le correnti nominali.

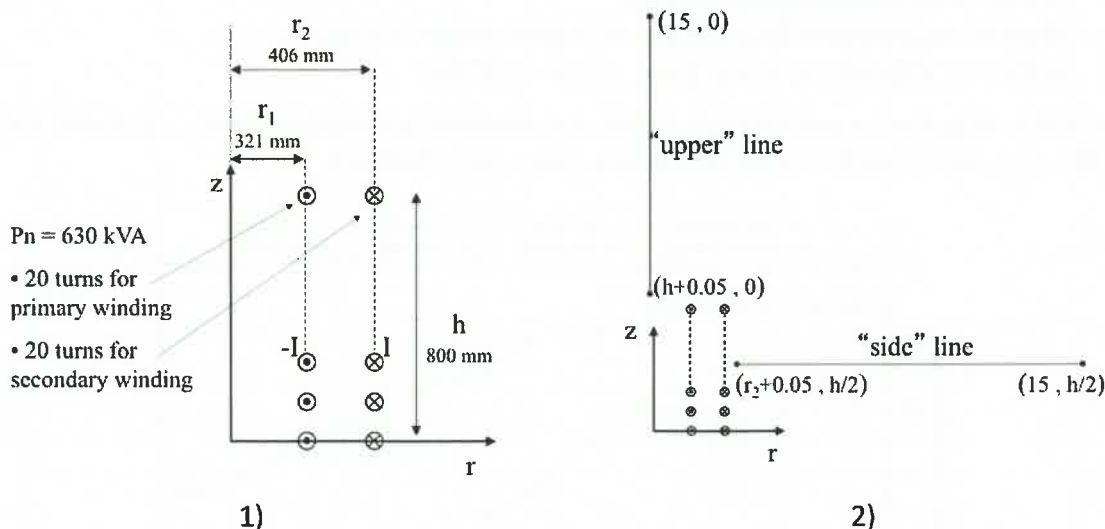


Figure 11 Geometria del sistema (1) e linee di calcolo (2)

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:

$$I = I_R \cdot \frac{V_{SC}\%}{100}$$

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).

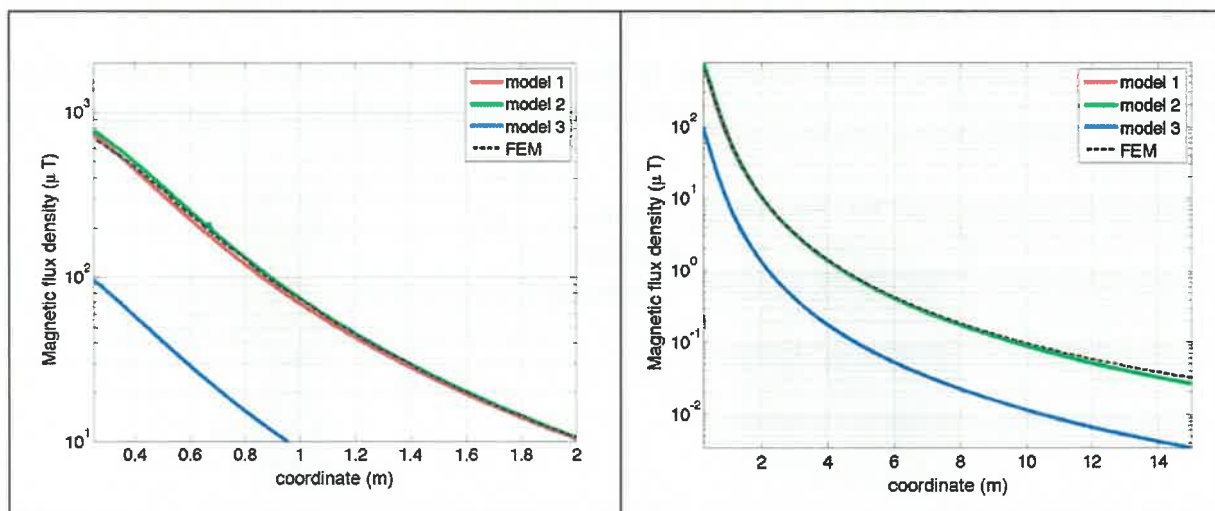


Figure 12 Induzione magnetica lungo la linea laterale

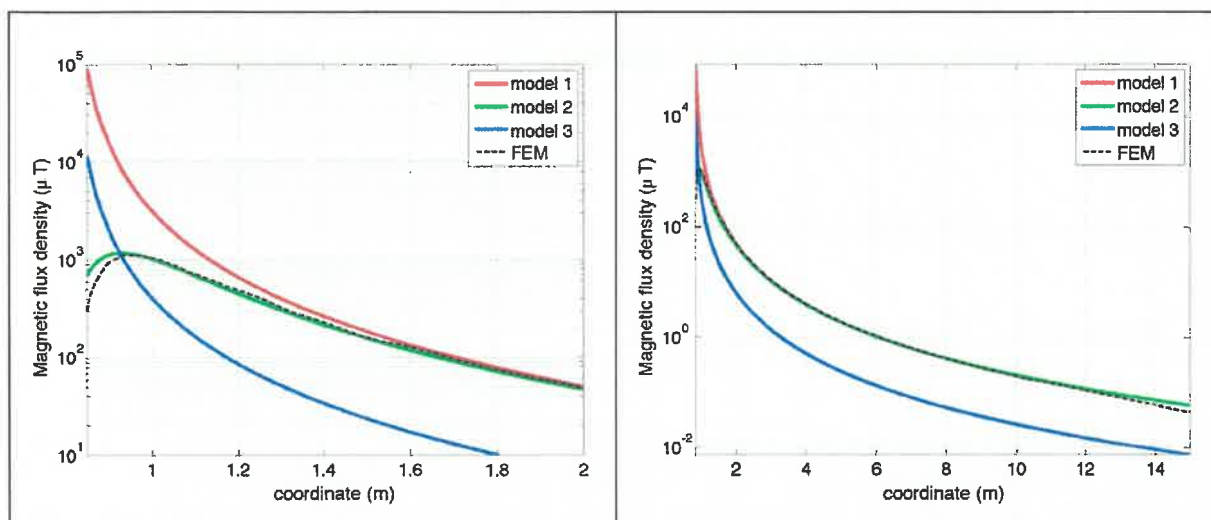


Figure 13 Induzione magnetica lungo la linea superiore

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.

4.2. 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 sul 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.

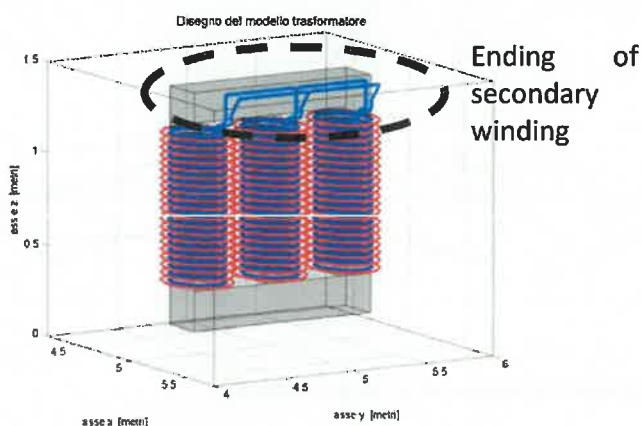


Figure 14 Connessioni elettriche considerate ai lati BT.

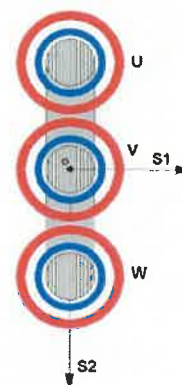


Figure 15 Linee di calcolo S1 ed S2

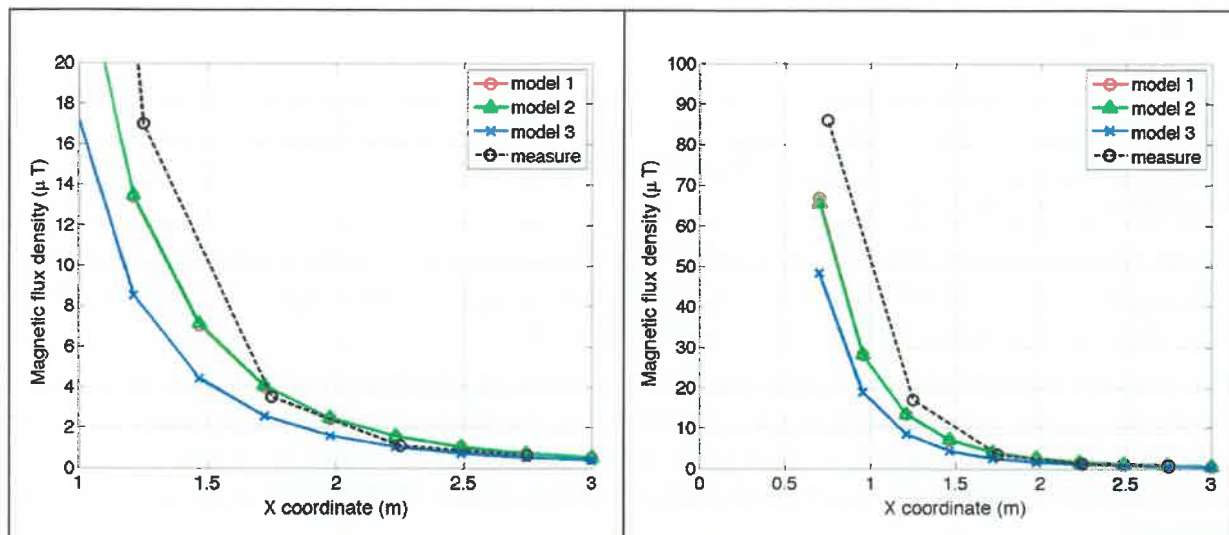


Figure 16 Confronto tra misure modelli lungo la linea S1

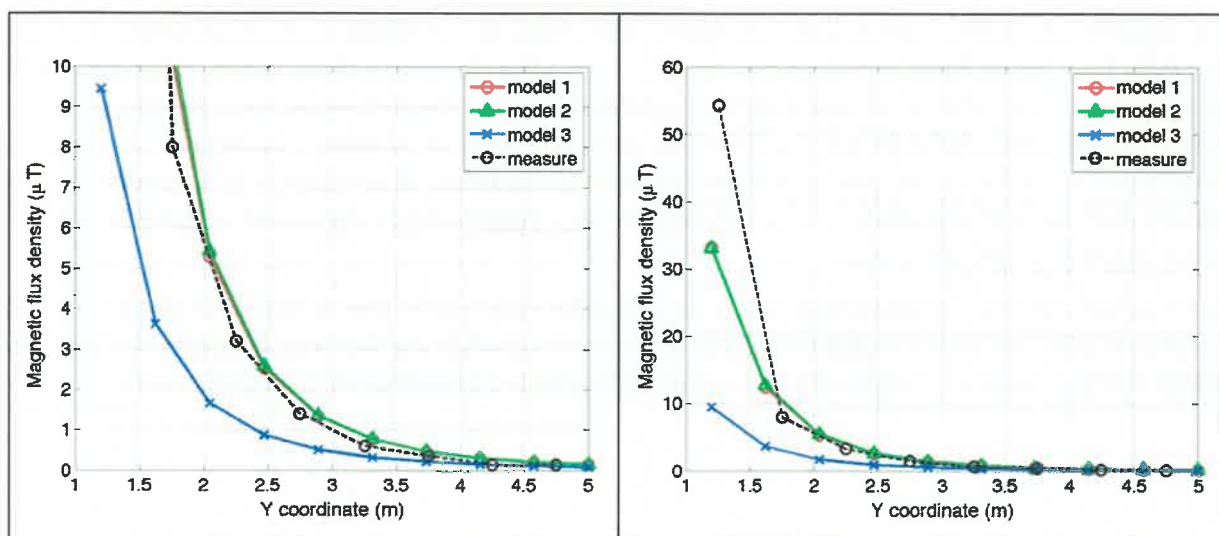


Figure 17 Confronto tra misure modelli lungo la linea S2

5. 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.