



”DECARBONIZZAZIONE DEL SISTEMA PORTUALE SICILIANO – PORTO DI SIRACUSA”
CUP: G31B21004600001 – CIG: 95453120A7

PROGETTO ESECUTIVO

RESPONSABILE UNICO DEL PROCEDIMENTO	Ing. Marco Brandaleone	IL PRESIDENTE	On. Renato Schifani
IL DIRIGENTE GENERALE	Ing. Antonio Martini	IL SEGRETARIO GENERALE	Avv. Maria Mattarella
INCARICATO DELLA PROGETTAZIONE	Ing. Nicolò Faggioni	COORDINATORE SICUREZZA PROGETTAZIONE	Arch. Luciano Franchi

Progettista incaricato:



Azienda certificata **ISO 9001:2015**
RINA n.5923/01/S IQNet n.IT-19510

Sede legale:
Piazza Roma, 19
32045 S. Stefano di Cadore (BL)
tel +39.0422.693511

Sede secondaria:
Via Pietro Chiesa, 9
16149 Genova (GE)
tel +39.0422.693511

Raggruppamento temporaneo di imprese

Capogruppo:

Mandataria:



Responsabile di commessa:

Ing. Mario Corace

Responsabile di commessa:

Ing. Giuseppe Vito Moramarco

NOME FILE: 32016019PEOGENREL09R0 SCALA: – PAGINA: –

TITOLO
Relazione Tecnica – Parte Elettromagnetica ELABORATO
32016019
PEO GEN REL 09 R0

Rev.	Data	Descrizione	Redatto	Verificato	Approvato
0	Lug. 2025	Prima emissione	R. Rapallo	M. Visentin	N. Faggioni

 GEOMO 	<p>“Decarbonizzazione del sistema portuale siciliano - Elettrificazione banchine - Porto di Siracusa”</p> <p>CUP G31B21004600001 – CIG: 95453120A7</p> <p>PROGETTO ESECUTIVO</p>
 REGIONE SICILIANA	<p>RELAZIONE TECNICA - PARTE ELETTROMAGNETICA</p> <p>32016019PE0GENREL09R0</p> <p style="text-align: right;">Pag. 1 di 5</p>

INDICE

1	INTRODUZIONE GENERALE	2
2	INSERIMENTO DEL PROGETTO NEL TERRITORIO.....	3
2.1	AREA DELL'INTERVENTO	3
2.2	IL TERMINAL	4
3	ALLEGATI	5
3.1	VALUTAZIONE DI IMPATTO AMBIENTALE DELLE NUOVE CABINE ELETTRICHE DEL PORTO DI SIRACUSA	5
3.2	ALGORITMI DI CALCOLO DEL SOFTWARE MAGIC (<i>MAGNETIC INDUCTION CALCULATION</i>)	5

  	<p>“Decarbonizzazione del sistema portuale siciliano - Elettrificazione banchine - Porto di Siracusa”</p> <p>CUP G31B21004600001 – CIG: 95453120A7</p> <p>PROGETTO ESECUTIVO</p>
 REGIONE SICILIANA	<p>RELAZIONE TECNICA - PARTE ELETTROMAGNETICA</p> <p>32016019PE0GENREL09R0</p> <p style="text-align: right;">Pag. 2 di 5</p>

1 INTRODUZIONE GENERALE

Il presente documento costituisce la Relazione Tecnica – Parte Elettromagnetica. I principali interventi previsti a progetto sono:

- L'elettrificazione delle banchine del Porto Grande Siracusa per l'alimentazione da terra di navi da *Cruise* (di seguito anche *Cold Ironing*);
- La realizzazione di punti presa dedicate a rifornire le imbarcazioni da diporto di energia elettrica;
- La realizzazione di impianti fotovoltaici;
- L'ottimizzazione dell'illuminazione delle aree a progetto.

Nel suo complesso l'intervento si inserisce in un contesto di iniziative molto ampio promosso dalla Commissione Europea nell'ambito degli interventi tesi ad assicurare “Energia pulita nei trasporti”. Invito raccolto e sviluppato dal Governo italiano che, nell'ambito degli interventi previsti dal PNRR ha riservato importanti risorse su questo tema. Un'attenzione crescente è infatti posta a livello nazionale ed europeo sugli aspetti ambientali connessi all'attività portuale. La riduzione dei consumi energetici delle aree portuali e soprattutto la riduzione delle emissioni inquinanti in atmosfera, sono perseguiti grazie a molteplici iniziative che portano ognuna il suo contributo.

Tra queste vi è l'elettrificazione delle banchine, anche nota sotto altri nomi quali: *Cold Ironing*, *shore to ship power*, *Alternative Maritime Power (AMP)*, *High Voltage Shore Connection (HVSC)*, etc.

L'apporto del traffico marittimo all'emissione globale di gas serra è stimato prossimo al 2,8% e quindi presenta una incidenza doppia, ad esempio, rispetto al traffico aereo; il tema acquista ancora maggiore rilevanza considerando che le previsioni di crescita dei volumi di merci spedite via nave stimano un aumento che varia dal 50% al 250% entro il 2050.

Anche il settore crocieristico è interessato ad una ripresa dei volumi, infatti, in base alle analisi della *Cruise Lines International Association* (CILA), il 2023 ha fatto registrare un incremento del 6% del numero di passeggeri rispetto ai dati pre-pandemia mentre, lato armatori, si prevede una crescita ancora maggiore nei prossimi anni. Sono previsti infatti investimenti sulle flotte, sia per quanto riguarda il *retrofitting* dei sistemi propulsori, sia per quanto riguarda la possibilità di ricevere energia elettrica da terra nonché per la realizzazione di nuove imbarcazioni. Dal 2023 al 2028, tra le compagnie che hanno reso noti i dati a CILA, è prevista la consegna di 44 nuove imbarcazioni da crociera con l'obiettivo di aumentare la capacità di trasporto arrivando a 746.000 posti letto.

Questi dati esplicano il contributo che l'industria dei trasporti marittimi da all'inquinamento globale e rendono altresì evidente l'interesse degli Enti, che gestiscono queste infrastrutture, nell'introduzione di soluzioni che consentano di ridurre tale contributo inquinante. Rispetto ad altri accorgimenti che vengono utilizzati per raggiungere gli obiettivi di riduzione dei consumi energetici, il *Cold Ironing* consiste nel fornire direttamente energia elettrica alle navi in ormeggio in maniera tale da consentire alle stesse di spegnere i propri generatori diesel che hanno l'effetto di contribuire all'inquinamento locale in modo significativo. Il *Cold Ironing* si pone quindi l'obiettivo di annullare integralmente le emissioni locali durante l'ormeggio ed è particolarmente efficace per i porti prossimi ad aree urbane.

  	<p>“Decarbonizzazione del sistema portuale siciliano - Elettrificazione banchine - Porto di Siracusa”</p> <p>CUP G31B21004600001 – CIG: 95453120A7</p> <p>PROGETTO ESECUTIVO</p>
 REGIONE SICILIANA	<p>RELAZIONE TECNICA - PARTE ELETTROMAGNETICA</p> <p>32016019PE0GENREL09R0</p> <p style="text-align: right;">Pag. 3 di 5</p>

2 INSERIMENTO DEL PROGETTO NEL TERRITORIO

2.1 AREA DELL'INTERVENTO

L'area di intervento è localizzata nel settore costiero della Sicilia, nell'area urbana di Siracusa.



Figura 1: Inquadramento territoriale del porto di Siracusa

Il Porto di Siracusa è situato nel sud-est della Sicilia, nella zona orientale, proprio di fronte all'omonima città. La sua posizione strategica sul Mar Ionio lo rende un punto d'accesso importante per le rotte commerciali e turistiche che collegano la Sicilia con la Calabria, l'Italia continentale e anche con destinazioni internazionali. Sebbene sia corretto indicare la struttura portuale di Siracusa come porto unico, va specificato che essa si compone in realtà di tre distinte aree portuali di competenza dell'autorità marittima del comune di Siracusa. Due di queste sono il porto Grande e il porto Marmoreo (detto anche Lakkios o Piccolo), esse si trovano nei due opposti versanti dell'isola di Ortigia, dichiarata Patrimonio dell'umanità UNESCO, ma comunicano tra loro grazie ad un canale sormontato da due ponti.

La terza area si trova invece a nord della città, oltre capo Santa Panagia, nella rada omonima, ed è costituito dal porto Rifugio e dal pontile di attracco per le attività petrolchimiche; qui ha sede la Sezione Staccata Santa Panagia della capitaineria di porto di Siracusa, la cui sede centrale si trova nel Piazzale IV Novembre, all'imboccatura del porto Grande.

  	<p>“Decarbonizzazione del sistema portuale siciliano - Elettrificazione banchine - Porto di Siracusa”</p> <p>CUP G31B21004600001 – CIG: 95453120A7</p> <p>PROGETTO ESECUTIVO</p>
 REGIONE SICILIANA	<p>RELAZIONE TECNICA - PARTE ELETTROMAGNETICA</p> <p>32016019PE0GENREL09R0</p> <p style="text-align: right;">Pag. 4 di 5</p>

Il complesso portuale della città di Siracusa oltre ad annoverare uno dei più importanti pontili industriali d'Europa, può ospitare nelle sue due e comunicanti aree portuali circa 1000 imbarcazioni di diversa taglia, e questo fa di Siracusa uno dei più ampi porti della nautica da diporto.

Essendo l'intera area comunale affacciata sul mare, al di là dei tre approdi maggiori ve ne sono altri di minore entità siti in periferia che fanno parte del sistema portuale del comune e vengono gestiti dal circondario marittimo di Siracusa: essi sono il porticciolo di Ognina, sito nell'omonima baia, e il porticciolo di Fontane Bianche; entrambi siti a sud della città, nei pressi di Cassibile.

2.2 IL TERMINAL

Il ruolo del terminal del porto di Siracusa è fondamentale per la gestione delle attività marittime e logistiche della città, poiché il porto di Siracusa è uno dei principali punti di accesso per il commercio e il trasporto nella zona orientale della Sicilia. Il terminal portuale è ben collegato alla rete stradale siciliana, con facile accesso alla SS114, la strada che collega Siracusa ad altre città siciliane. Questo rende il porto accessibile sia per il traffico commerciale che per il turismo. La vicinanza con l'aeroporto di Catania Fontanarossa, a circa 50 km, favorisce inoltre i collegamenti per merci e passeggeri. Le funzioni principali del terminal includono:

- **Trasporto merci e passeggeri:** Il terminal facilita l'arrivo e la partenza di navi merci e traghetti, gestendo il carico e scarico di merci come prodotti industriali, materie prime, container, e anche il trasporto di passeggeri tramite traghetti per destinazioni regionali.
- **Infrastrutture logistiche:** Il terminal è dotato di strutture adeguate all'imbarco e lo sbarco di merci, tra cui banchine, gru, magazzini, e container terminal. Ciò permette una gestione efficiente dei flussi di merci sia nazionali che internazionali.
- **Attività industriali e petroliere:** Siracusa ha una forte vocazione industriale, in particolare nel settore chimico e petrolchimico. Il porto, grazie alle sue strutture e alla sua vicinanza con le raffinerie e gli impianti industriali, è essenziale per il trasporto di materie prime, prodotti petroliferi e chimici.
- **Rifornimento e manutenzione navale:** Il porto di Siracusa ospita anche attività di rifornimento di carburante e manutenzione per le navi che transitano nel Mar Ionio.
- **Turismo crocieristico:** Sebbene non sia uno dei porti più grandi per le crociere, il terminal portuale di Siracusa gestisce anche il traffico crocieristico, attirando turisti grazie alla sua posizione storica e alla vicinanza alle attrazioni culturali della città, come il Parco Archeologico della Neapolis.

L'esigenza di un utilizzo diportistico e crocieristico del Porto Grande si è manifestata sin da quando la città, negli anni 2000, si è aperta maggiormente alla sua vocazione turistica. Per questa ragione, negli ultimi anni, sono stati fatti investimenti per modernizzare il terminal e aumentarne la capacità operativa, per far fronte alla crescita del traffico commerciale e passeggeri.

Il Terminal del Porto di Siracusa è dunque una struttura vitale per l'economia locale e per la logistica regionale, con un ruolo che spazia dal supporto al trasporto commerciale alla promozione del turismo marittimo. La sua posizione strategica, unita a infrastrutture moderne e a una gestione efficiente, lo rende un punto di riferimento importante nel panorama portuale siciliano.

 GEIMO 	<p>“Decarbonizzazione del sistema portuale siciliano - Elettrificazione banchine - Porto di Siracusa”</p> <p>CUP G31B21004600001 – CIG: 95453120A7</p> <hr/> <p>PROGETTO ESECUTIVO</p>
 REGIONE SICILIANA	<p>RELAZIONE TECNICA - PARTE ELETTROMAGNETICA</p> <p>32016019PE0GENREL09R0</p> <p style="text-align: right;">Pag. 5 di 5</p>

3 ALLEGATI

Nel contesto dell'intervento in oggetto, è stato effettuato uno studio sulle emissioni elettromagnetiche (EM), al fine di valutare i potenziali impatti derivanti dalle sorgenti interne alla cabina sia nell'area esterna ad essa sia all'interno dei locali adibiti al controllo e monitoraggio del sistema di *Cold Ironing*.

L'analisi ha considerato la conformità ai limiti previsti dalla normativa vigente in materia di esposizione ai campi elettromagnetici, con particolare attenzione alla tutela della salute e al benessere del personale operativo, nel contesto specifico della cabina CEB.

A seguito delle valutazioni condotte, è stata prevista, ove necessario, l'adozione di adeguate misure di mitigazione, quali schermature e ottimizzazione della disposizione degli impianti. Tali accorgimenti hanno lo scopo di ridurre l'esposizione a livelli compatibili con i principi di precauzione e assicurare condizioni ottimali di sicurezza e *comfort* per gli operatori.

Dai risultati dell'analisi condotta e dagli accorgimenti previsti nella presente fase progettuale, quali le succitate schermature delle pareti della CEB, esternamente alle cabine elettriche il campo magnetico risulterà inferiore ai 3 µT permettendo lo stazionamento di persone senza alcun limite di tempo.

Si precisa, tuttavia, che tale limite sarà superato nel Locale Supervisione della Cabina Elettrica di Banchina. In tale stanza, quindi, il personale tecnico non professionalmente esposto potrà permanere per un limite massimo di quattro ore giornaliere. Tale limitazione sarà verificata e monitorata mediante il controllo accessi previsto; infatti, il personale che accederà al locale in questione dovrà essere munito di *badge* di riconoscimento che ne assicura l'idoneità lavorativa o il rispetto del limite temporale imposto dalla normativa vigente.

Per un maggior grado di dettaglio in merito all'argomento si rimanda agli allegati che seguono.

3.1 VALUTAZIONE DI IMPATTO AMBIENTALE DELLE NUOVE CABINE ELETTRICHE DEL PORTO DI SIRACUSA

3.2 ALGORITMI DI CALCOLO DEL SOFTWARE MAGIC (*MAGNETIC INDUCTION CALCULATION*)



BESHIELDING

Valutazione di Impatto Ambientale delle nuove cabine elettriche del porto di Siracusa

Rifer.: 20241016 Porto di Siracusa - Cold Ironing

Richiedente:

DBA SpA

Via Pietro Chiesa, 9
16149 - Genova

N° di pagine totali: 19

Protocollo: SPT/25/264

Del: 11/07/2025

Sommario

1.	Premessa:.....	1
2.	CABINA ELETTRICA COLD IRONING:.....	3
2.1.	Layout architettonico.....	3
2.2.	Definizione dei limiti di esposizione nei locali circostanti	5
2.3.	Analisi MAGIC.....	6
2.4.	Conclusioni.....	9
2.5.	Area schermatura.....	10
2.6.	Situazione a seguito della mitigazione.....	11
3.	CABINA ENEL e CONSEGNA UTENTE:.....	12
3.1.	Layout architettonico.....	12
3.2.	Definizione dei limiti di esposizione nei locali circostanti	13
3.3.	Analisi MAGIC.....	14
3.4.	Conclusioni.....	17
3.5.	Area schermatura.....	18
3.6.	Situazione a seguito della mitigazione.....	19

1. Premessa:

La presente relazione riporta lo studio di induzione magnetica, generata dall'insieme di infrastrutture elettriche presenti all'interno delle nuove Cabine Elettriche del porto di Siracusa legate al progetto Cold Ironing.

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 µT** esposizione **istantanea**, valore imposto dal DPCM 8 Luglio 2003 – Art. 3;
- **3,78 µT** per locali con presenza di **apparecchiature elettroniche sensibili**, valore indicato dalla norma tecnica CEI EN 61000-4:8;
- **3 µT**, 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 committente una ulteriore riduzione del valore limite imposto dall'obiettivo di qualità per scopi cautelativi.

Per ogni Cabina Elettrica, 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 (**n.1 Layout architettonico**) + (**n.2 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 (**n.3 Analisi MAGIC**) corredata da commenti conclusivi sui valori di campo magnetico dedotti dalle simulazioni (**n.4 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 (**n.5 Area schermatura**) e termina con una rappresentazione dell'effetto schermante del sistema di mitigazione (**n.6 Situazione a seguito della mitigazione**).

2. CABINA ELETTRICA COLD IRONING:

2.1. Layout architettonico

Nella Figura 1 si riporta la pianta della Cabina Elettrica Cold Ironing al piano terra con indicazione della disposizione dei componenti elettrici presenti all'interno della stessa.

Vengono definiti anche i punti cardinali di riferimento per questa specifica relazione, senza che gli stessi debbano coincidere con i reali punti cardinali terrestri.

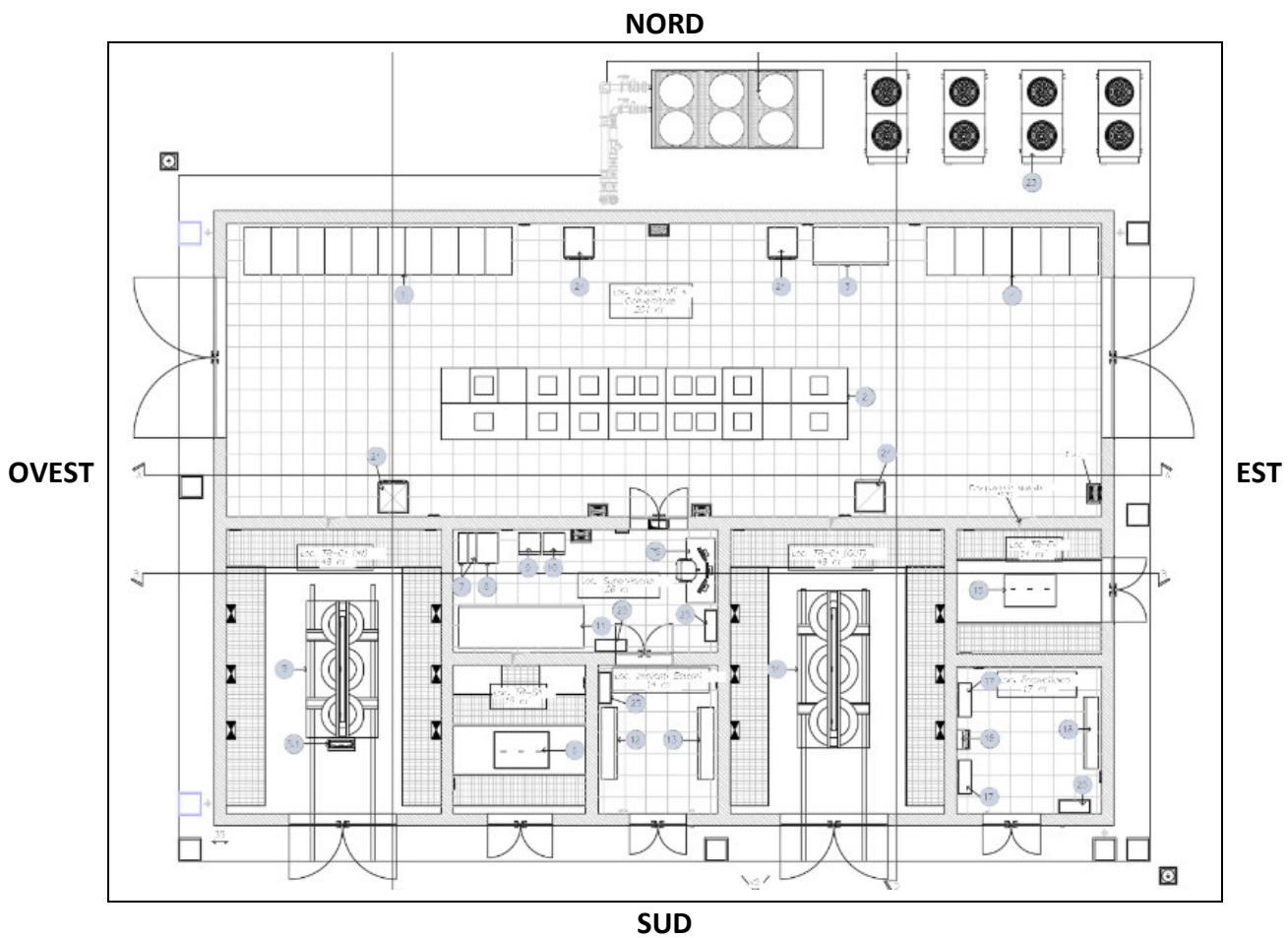


Figura 1 Pianta della Cabina Elettrica di Cold Ironing al piano terra

La Cabina Elettrica di Cold Ironing è situata al piano terra 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 20 MVA 20/3 kV isolato in resina;
- n.1 Trasformatore a doppio secondario 20 MVA 3,25/11-6 kV isolato in resina;
- n.1 Trasformatore MT/BT da 1 MVA 20/0,4 kV isolato in resina;
- n.1 Trasformatore MT/BT da 630 kVA 20/0,4 kV isolato in resina;
- n.2 Quadro generale di media tensione 20kV e Quadro generale di media tensione 11-6 kV;

- n.2 Quadro BT Power Center servizi ausiliari e Quadro BT Power Center Fotovoltaico;
- n.1 Quadro Convertitore 3/3,25 kV
- n.6 Linea MT di collegamento tra quadro di media tensione e trasformatore 20MVA 20/3 kV, trasformatore da 1MVA e da 630 kVA, in uscita dal TR a 3kV verso il convertitore, in uscita dal convertitore al Trasformatore 20MVA 3,25/11-6kV ed in uscita dal Trasformatore al quadro di media tensione 11-6kV;
- n.2 Linea BT di collegamento tra trasformatore 1MVA e quadro BT servizi ausiliari e dal trasformatore 630kV al quadro fotovoltaico.

2.2. Definizione dei limiti di esposizione nei locali circostanti

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

➤ Cabina Elettrica Cold Ironing

- **Piano della cabina (piano terra):**
 - ❖ **NORD, SUD, EST, OVEST**
Area esterna di passaggio, pertanto dovranno essere garantiti valori di induzione magnetica al di sotto del limite di 100 µT all'esterno della cabina;
- **Piano sovrastante la cabina (primo copertura):**
Non risultano locali sovrastanti la cabina (copertura);
- **Piano sottostante la cabina (piano interrato):**
Non risultano locali sottostanti la cabina (terrapieno).

2.3. Analisi MAGIC

Nelle Figure 2 e 3 viene presentato il layout della cabina elettrica 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.

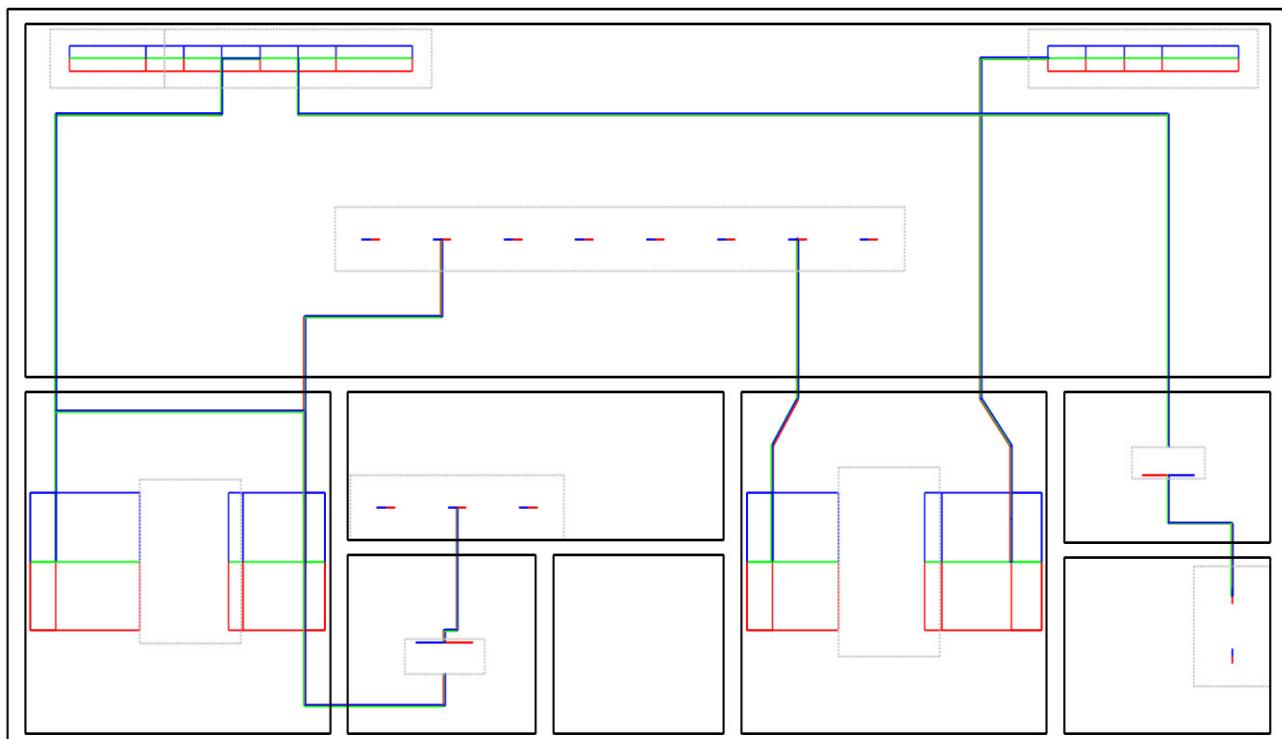


Figura 2 Layout della Cabina Elettrica Cold Ironing– vista in pianta

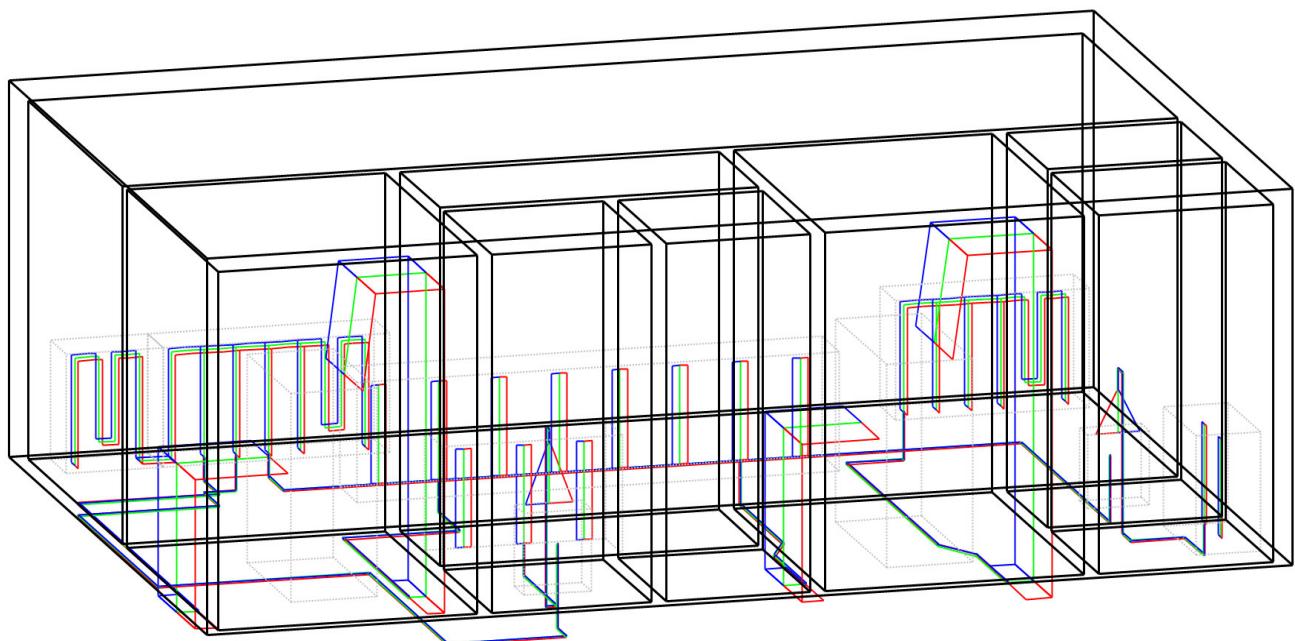


Figura 3 Layout della Cabina Elettrica Cold Ironing – vista 3D

Di seguito vengono analizzati i valori di induzione magnetica generati dalla Cabina Elettrica Cold Ironing, in assenza di schermatura, nei locali attigui la stessa.

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) per le seguenti quote:

- $Z = 0,5 \text{ m}$ corrispondente ad una quota di 0,5 metri a partire dal pavimento della cabina (Figura 4);
- $Z = 1,0 \text{ m}$ corrispondente ad una quota di 1,0 metro a partire dal pavimento della cabina (Figura 5);
- $Z = 1,5 \text{ m}$ corrispondente ad una quota di 1,5 metri a partire dal pavimento della cabina (Figura 6);

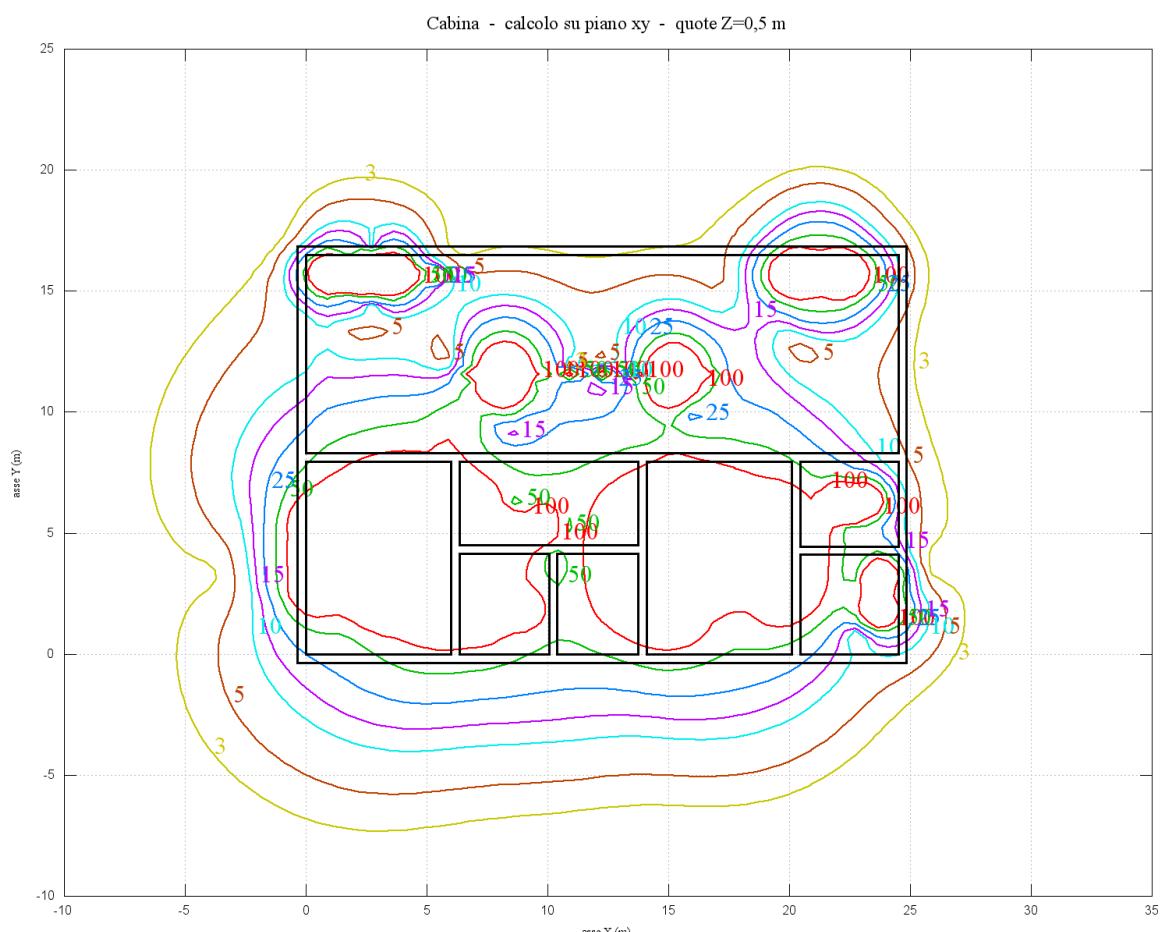


Figura 4 Curve isolivello d'induzione magnetica calcolate su un piano XY per z = 0,5 m

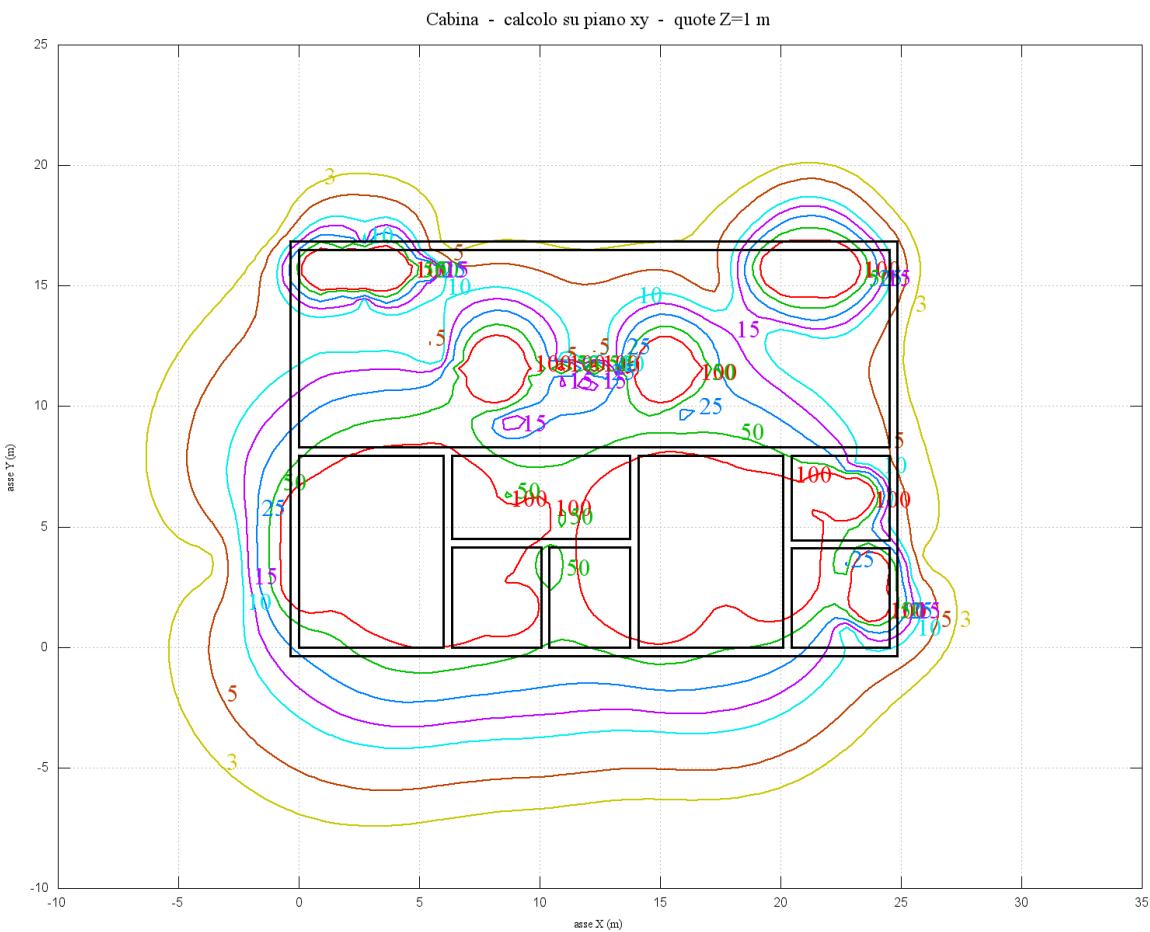


Figura 5 Curve isolivello d'induzione magnetica calcolate su un piano XY per z = 1,0 m

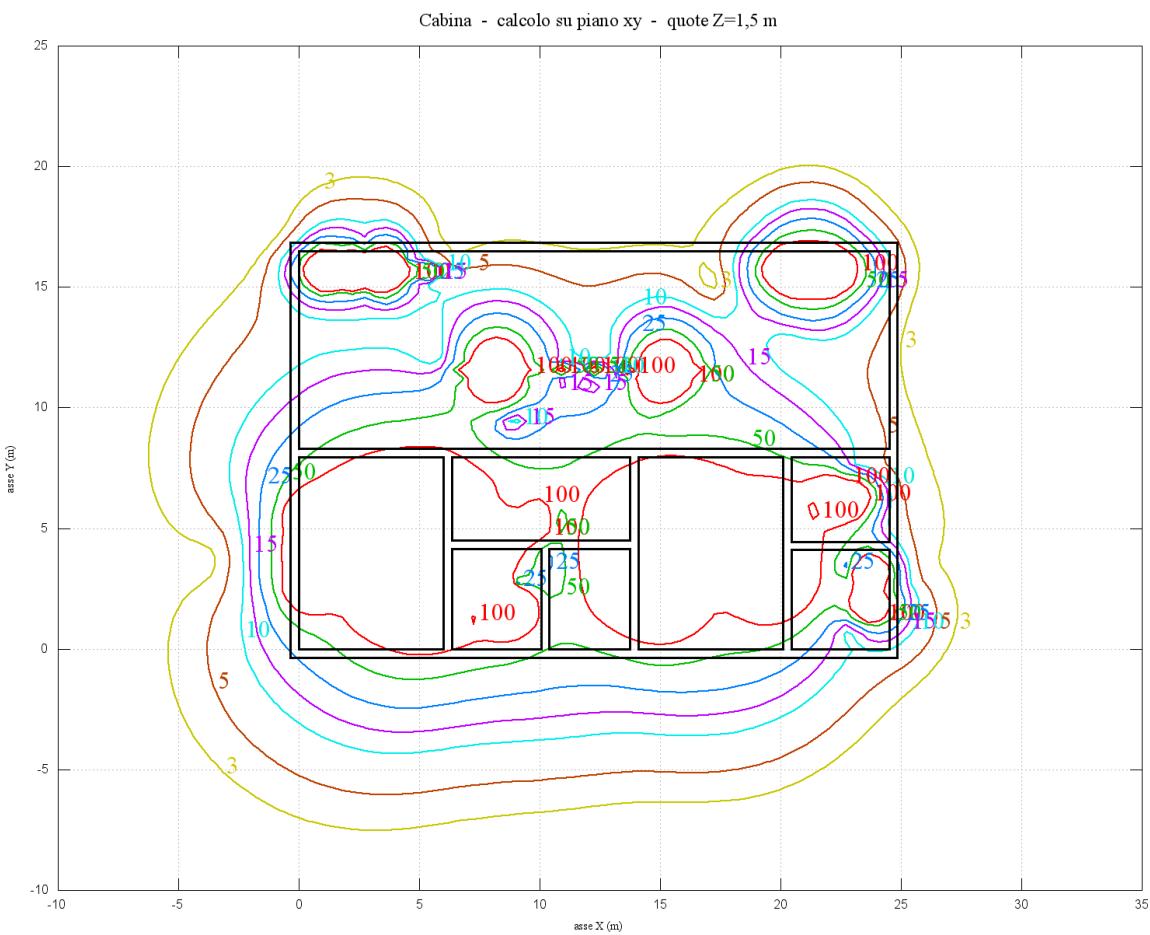


Figura 6 Curve isolivello d'induzione magnetica calcolate su un piano XY per z = 1,5 m

2.4. Conclusioni

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

- In prossimità della cabina, sul medesimo piano della stessa, vi sono dei livelli di induzione magnetica superiori ai 100 µT che invadono le aree di passaggio in direzione Nord ed Ovest.
Risulta quindi necessario prevedere opere di mitigazione in tali direzioni.

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 scrivente ditta **BEShielding S.r.l.**, tipologia **WPL/PLT** con i relativi accessori.

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

- ***Schermatura di parte delle pareti all'interno della cabina con opportune appendici, ove necessario.***

Il sistema schermante previsto dovrà essere installato con appositi fissaggi.

Le opere di schermatura previste tramite l'apposizione di piastre BEShielding di tipo WPL/PLT si dovranno realizzare con lo strato di materiale ad elevata conducibilità posto a vista.

La continuità elettrica tra le piastre schermanti sarà ottenuta mediante saldatura non strutturale.

Il sistema schermante è progettato per ridurre i valori di induzione magnetica al di sotto del limite 100uT nelle adiacenti la Cabina.

A valle di tali considerazioni, qualsiasi violazione dei vincoli precedentemente elencati o variazione di caratteristiche elettriche e/o geometriche potrebbe determinare una variazione dei risultati ottenuti dalle simulazioni.

Questa valutazione di impatto ambientale fa riferimento esclusivamente alle apparecchiature presenti all'interno della cabina elettrica, senza considerare le dorsali MT in ingresso e le dorsali BT in uscita dalla stessa.

2.5. Area schermatura

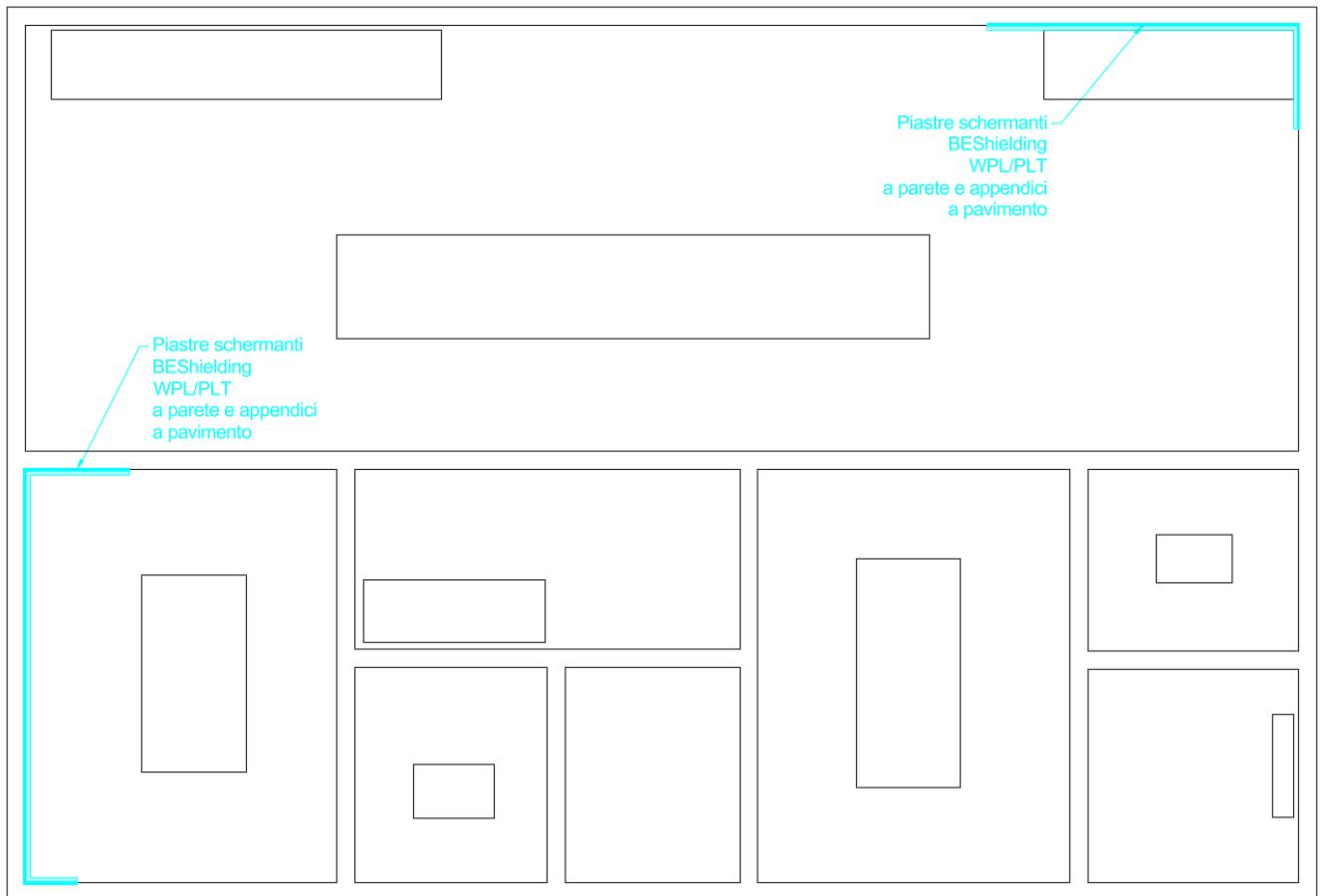
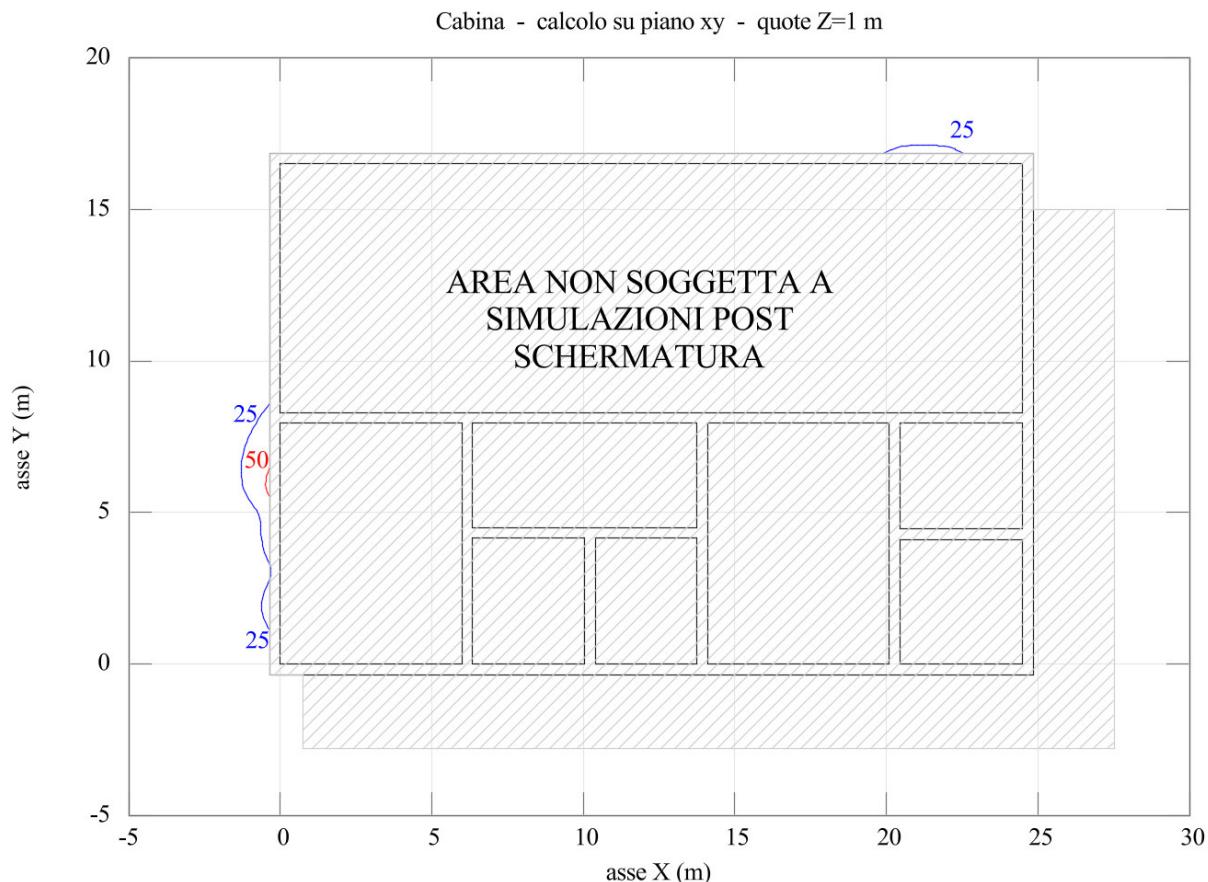


Figura 7 Layout di schermatura

2.6. 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.



Come visibile dall'immagine sopra riportata, il limite di esposizione dei $100\mu\text{T}$ istantanei, risulta rispettato nelle aree adiacenti, a seguito delle opere di mitigazione.

3. CABINA ENEL e CONSEGNA UTENTE:

3.1. Layout architettonico

Nella Figura 9 si riporta la pianta dei locali Cabina Elettrica Enel e Cabina di consegna utente al piano terra con indicazione della disposizione dei componenti elettrici presenti all'interno della stessa.

Vengono definiti anche i punti cardinali di riferimento per questa specifica relazione, senza che gli stessi debbano coincidere con i reali punti cardinali terrestri.

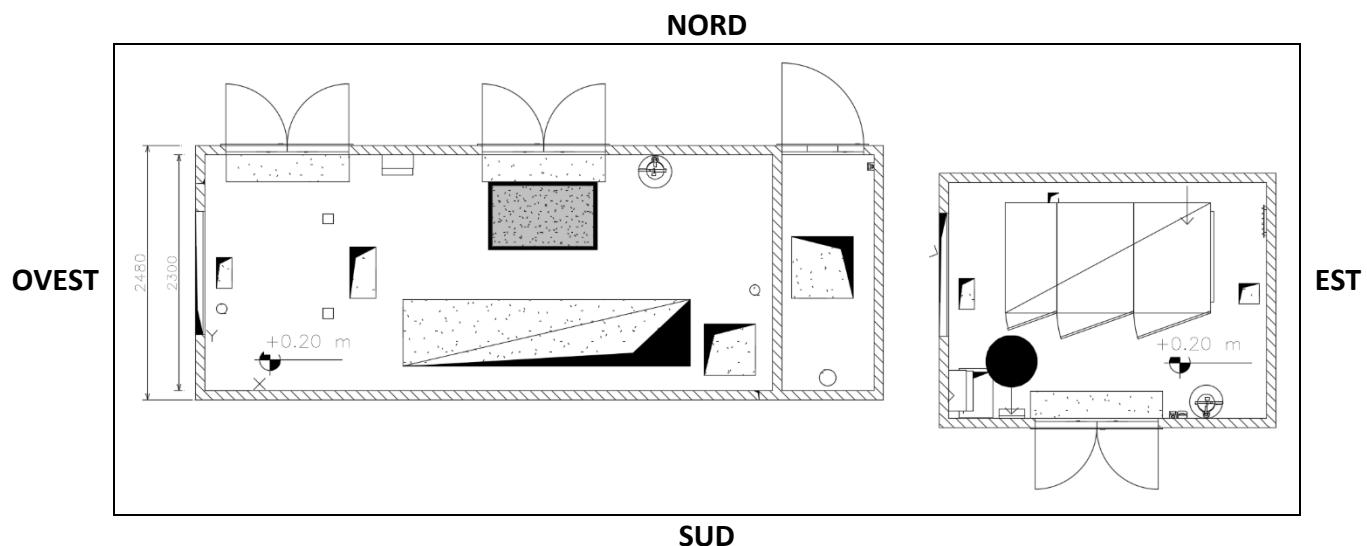


Figura 9 Pianta del locale Cabina MT/BT al piano terra

La cabina MT/BT Enel è situata al piano terra 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 MT/BT da 630 kVA isolato in olio;
- n.2 Quadro generale di media tensione, facente parte di un anello ipotizzato di 200A e quadro MT utente;
- n.1 Quadro BT di distribuzione;
- n.2 Linea MT di collegamento tra quadro di media tensione e trasformatore e in uscita dal quadro MT di distribuzione verso il locale Utente di consegna;
- n.1 Linea BT di collegamento tra trasformatore e quadro BT di distribuzione.

3.2. Definizione dei limiti di esposizione nei locali circostanti

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

➤ Cabina Enel MT/BT e locale Utente

- **Piano della cabina (piano terra):**
 - ❖ ***NORD, SUD, EST, OVEST***
Area esterna di passaggio, pertanto dovranno essere garantiti valori di induzione magnetica al di sotto del limite di 100 µT all'esterno della cabina;
- **Piano sovrastante la cabina (primo copertura):**
Non risultano locali sovrastanti la cabina (copertura);
- **Piano sottostante la cabina (piano interrato):**
Non risultano locali sottostanti la cabina (terrapieno).

3.3. Analisi MAGIC

Nelle Figure 10 e 11 viene presentato il layout della cabina elettrica 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.

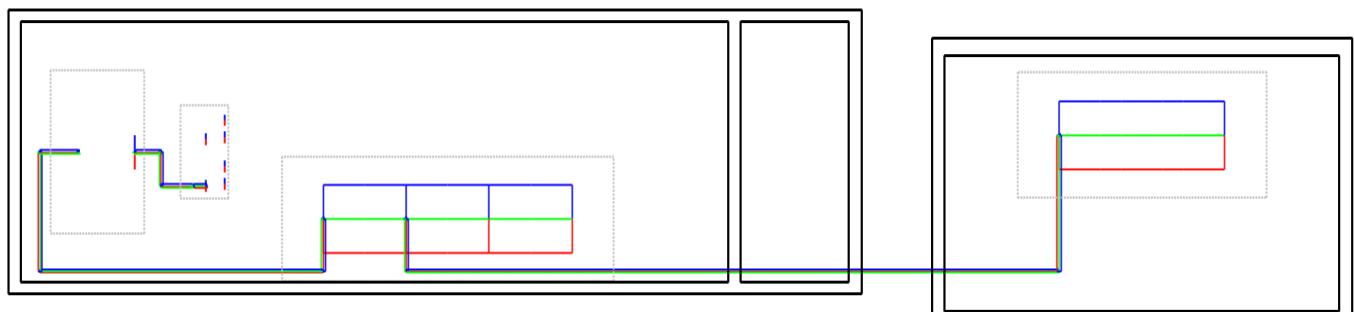


Figura 10 Layout della Cabina Enel e locale consegna – vista in pianta

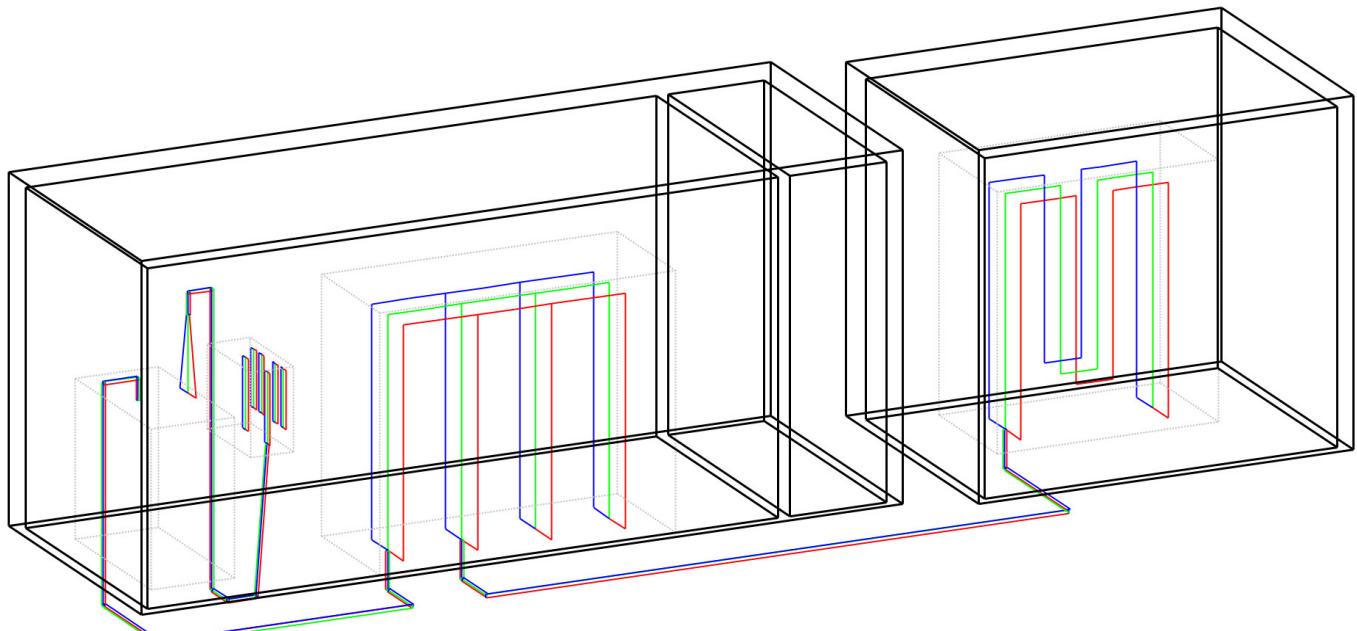


Figura 11 Layout della Cabina Enel e locale consegna – vista 3D

Di seguito vengono analizzati i valori di induzione magnetica generati dalle cabine elettriche, in assenza di schermatura, nei locali attigui la stessa.

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 MT/BT) per le seguenti quote:

- $z = 0,5 \text{ m}$ corrispondente ad una quota di 0,5 metri a partire dal pavimento della cabina (Figura 12);
- $z = 1,0 \text{ m}$ corrispondente ad una quota di 1,0 metro a partire dal pavimento della cabina (Figura 13);
- $z = 1,5 \text{ m}$ corrispondente ad una quota di 1,5 metri a partire dal pavimento della cabina (Figura 14);

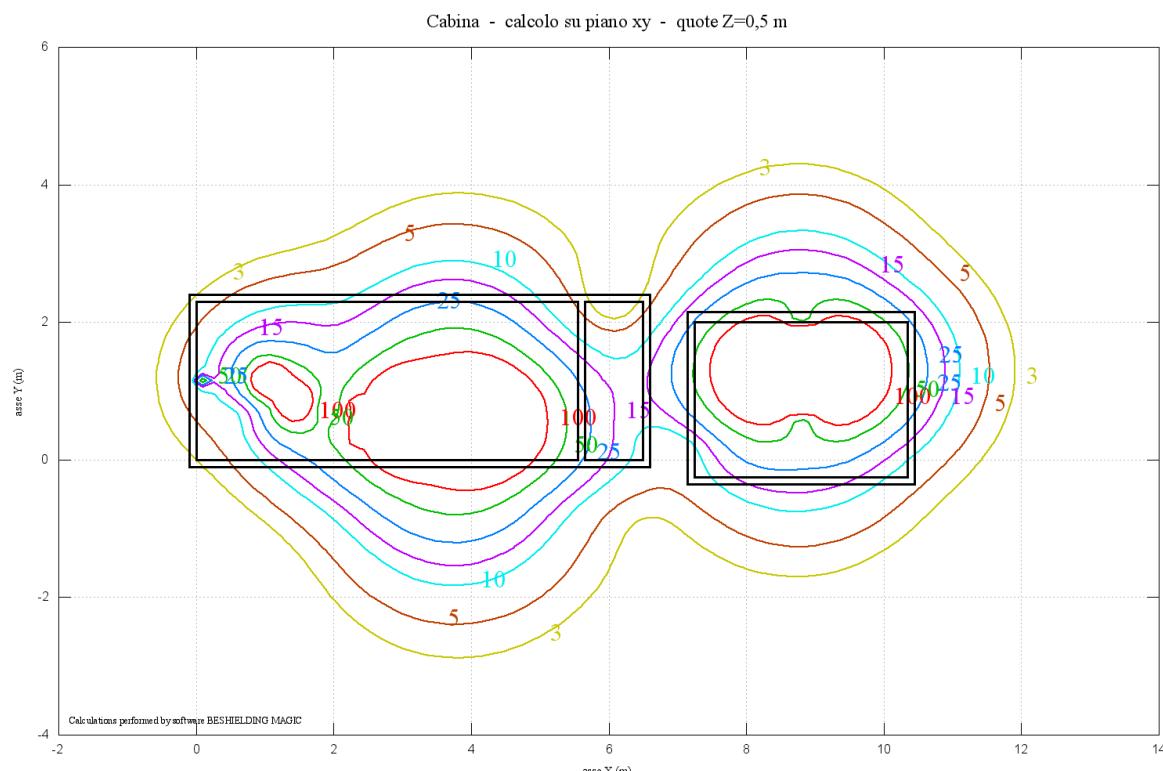
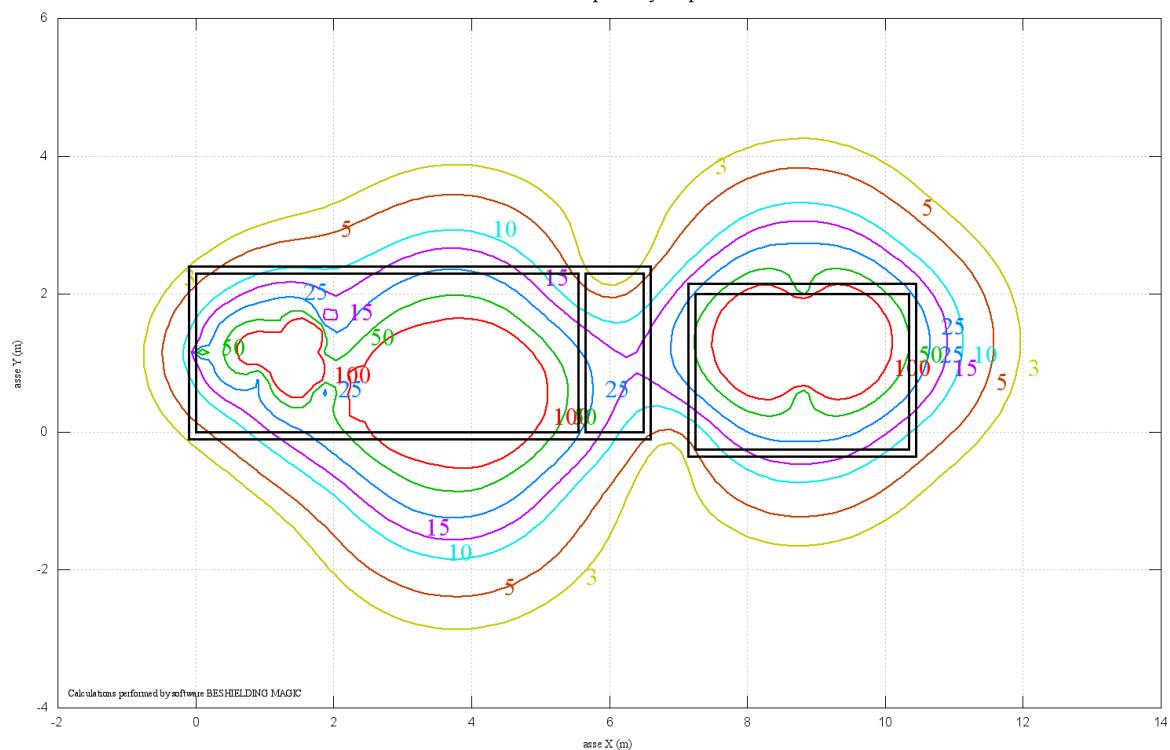
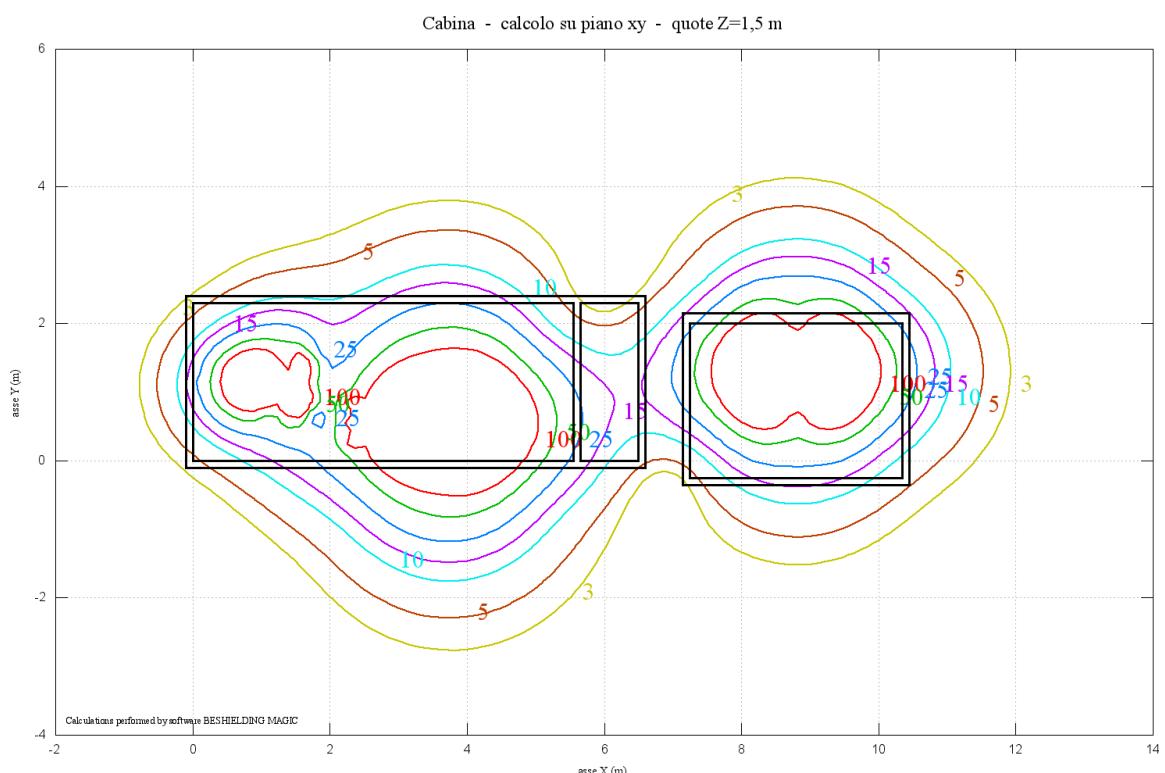


Figura 12 Curve isolivello d'induzione magnetica calcolate su un piano XY per $z = 0,5 \text{ m}$

Cabina - calcolo su piano xy - quote Z=1 m


Figura 13 Curve isolivello d'induzione magnetica calcolate su un piano XY per z = 1,0 m

Figura 14 Curve isolivello d'induzione magnetica calcolate su un piano XY per z = 1,5 m

3.4. Conclusioni

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

- In prossimità della cabina enel, sul medesimo piano della stessa, vi sono dei livelli di induzione magnetica superiori ai 100 μT che invadono le aree di passaggio in direzione Sud. Risulta quindi necessario prevedere opere di mitigazione in tali direzioni.
- In prossimità del locale di consegna Utente, sul medesimo piano della stessa, vi sono dei livelli di induzione magnetica superiori ai 100 μT che invadono le aree di passaggio in direzione Nord. Risulta quindi necessario prevedere opere di mitigazione in tali direzioni.

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 scrivente ditta **BEShielding S.r.l.**, tipologia **WPL/PLT** con i relativi accessori.

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

- ***Schermatura di parte delle pareti all'interno delle cabine con opportune appendici, ove necessario.***

Il sistema schermante previsto dovrà essere installato con appositi fissaggi.

Le opere di schermatura previste tramite l'apposizione di piastre BEShielding di tipo WPL/PLT si dovranno realizzare con lo strato di materiale ad elevata conducibilità posto a vista.

La continuità elettrica tra le piastre schermanti sarà ottenuta mediante saldatura non strutturale.

Il sistema schermante è progettato per ridurre i valori di induzione magnetica al di sotto del limite 100uT nelle adiacenti la Cabina.

A valle di tali considerazioni, qualsiasi violazione dei vincoli precedentemente elencati o variazione di caratteristiche elettriche e/o geometriche potrebbe determinare una variazione dei risultati ottenuti dalle simulazioni.

Questa valutazione di impatto ambientale fa riferimento esclusivamente alle apparecchiature presenti all'interno della cabina elettrica, senza considerare le dorsali MT in ingresso e le dorsali BT in uscita dalla stessa.

3.5. Area schermatura

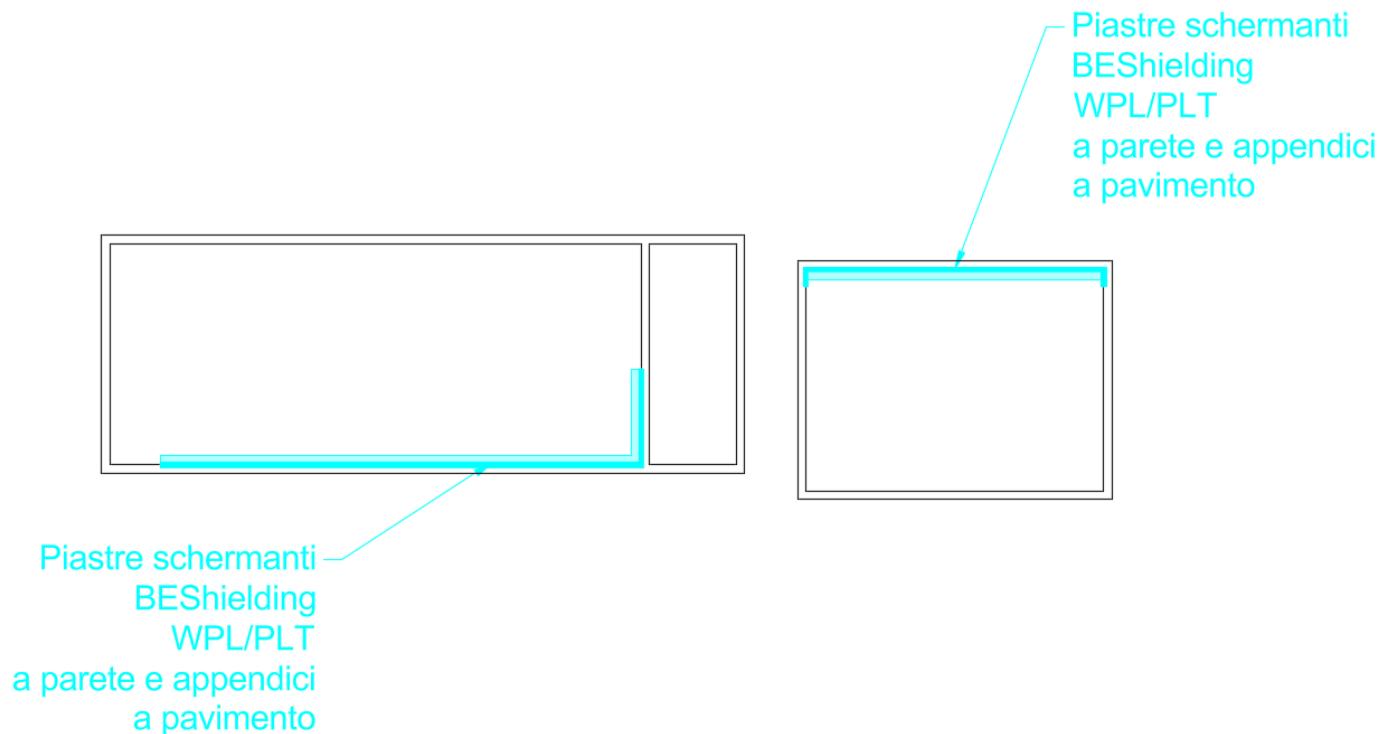


Figura 15 Layout di schermatura

3.6. 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.

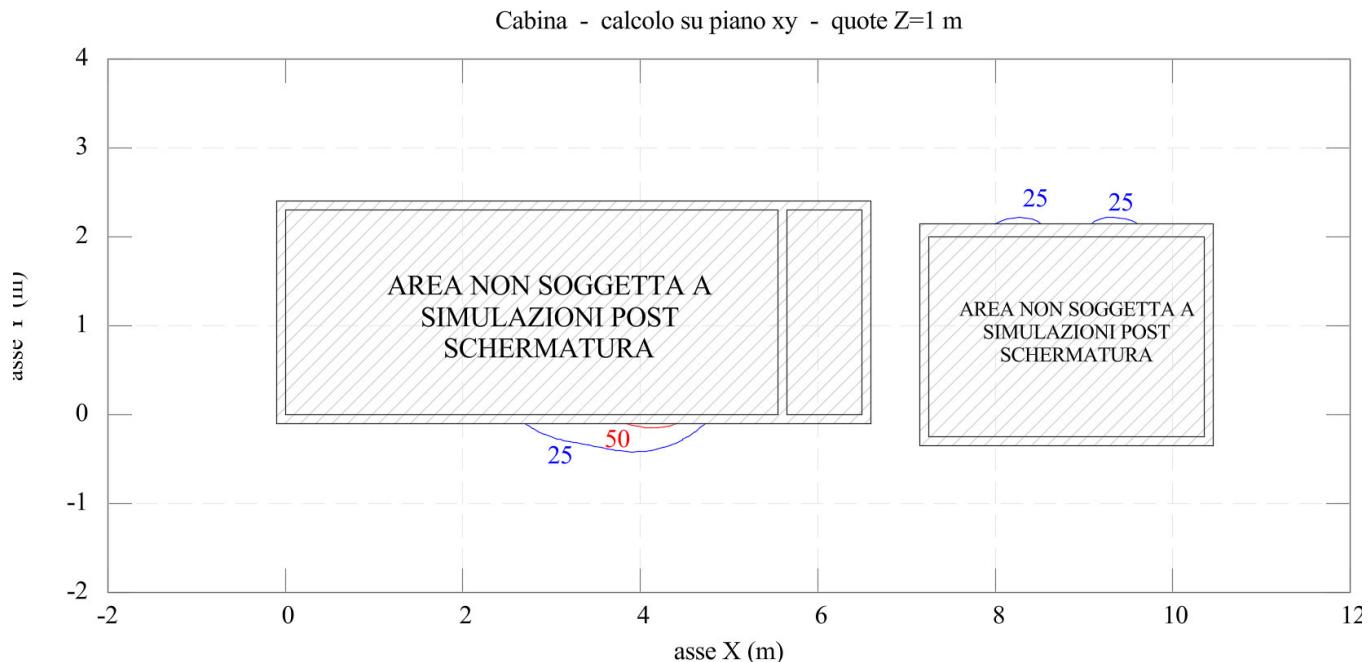
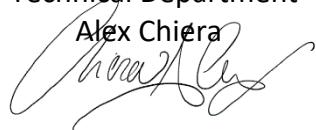
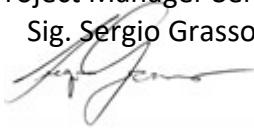


Figura 16 Curve isolivello d'induzione magnetica post schermatura z=1,0 m

Come visibile dall'immagine sopra riportata, il limite di esposizione dei $100\mu\text{T}$ istantanei, risulta rispettato nelle aree adiacenti, a seguito delle opere di mitigazione.

BEShielding Srl
 Technical Department
 Alex Chiera


BEShielding Srl
 Project Manager Senior
 Sig. Sergio Grasso


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.



BESHIELDING

Documento di Validazione

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

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 bidimesionale 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 le 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:

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

in cui N è il numero dei conduttori, d è la distanza tra il conduttore k -esimo e il punto di calcolo; i versori \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.

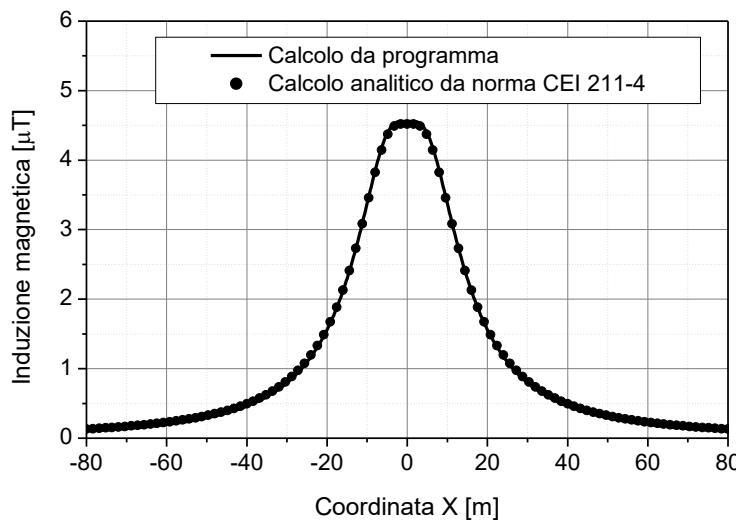


Figure 1 Induzione magnetica al suolo in prossimità di una linea aerea a doppia terna su semplice palificazione con corrente di 310: confronto tra MAGIC® e formula analitica CEI 211-4

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 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

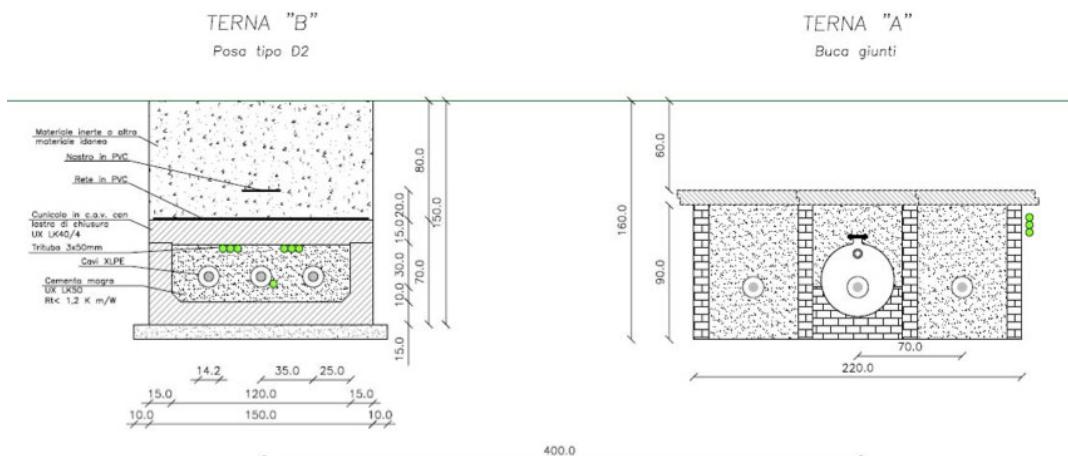


Figure 2 Affiancamento tra due linee interrate AT

Condizioni di carico e relazioni di fase:

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

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

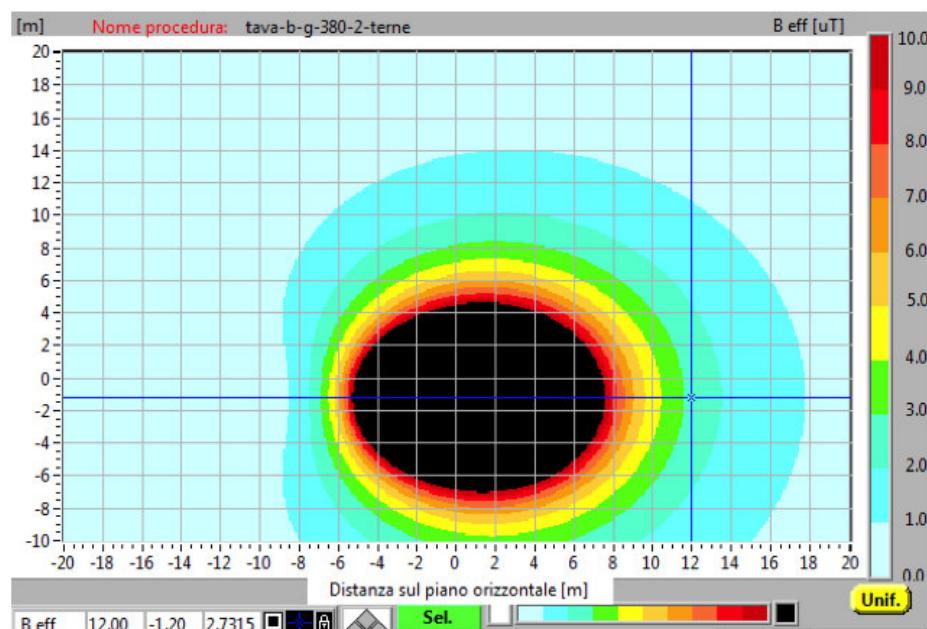


Figure 3 Mappa cromatica delle induzioni magnetiche calcolata mediante software CESI

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.

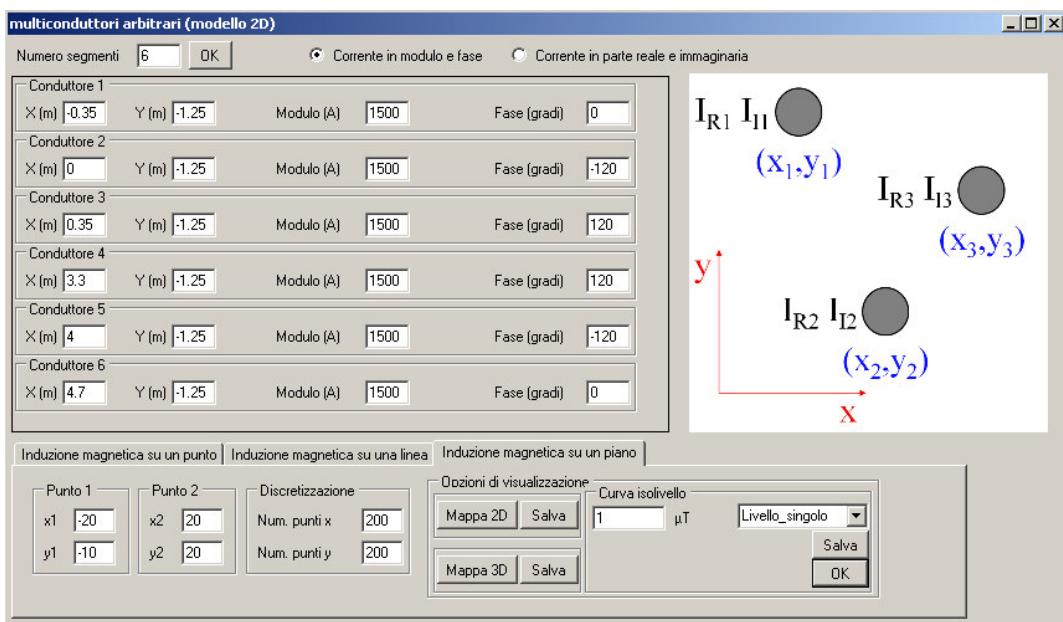


Figure 4 Schermata di ingresso modulo “multiconduttori arbitrari (modello 2D)”: dati definizione geometria e sorgenti

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

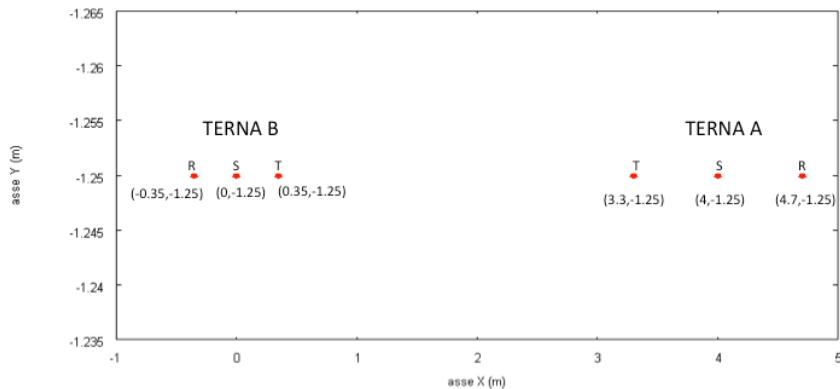


Figure 5 Geometria sorgenti

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

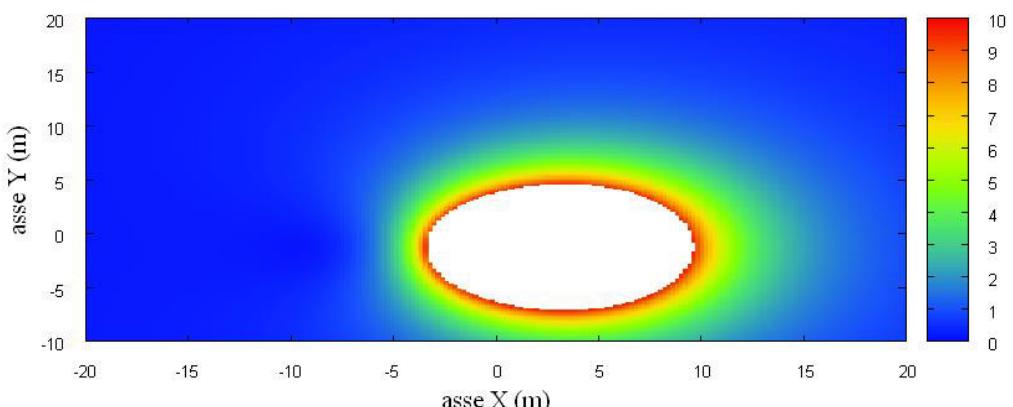


Figure 6 Mappa cromatica dell’induzione magnetica ottenuta dal software MAGIC® (valori in microT):

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

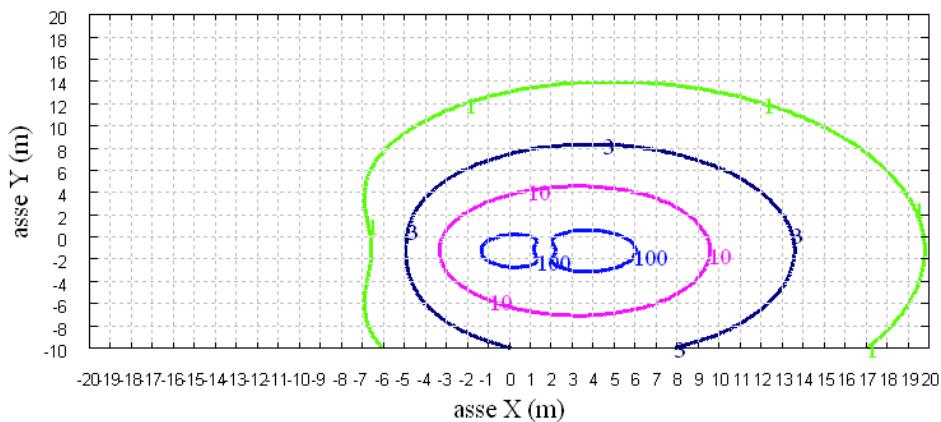


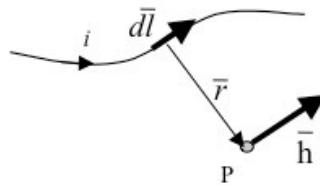
Figure 7 Linee isolivello dell'induzione magnetica (1, 3, 10, 100 microT) da software MAGIC®

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.

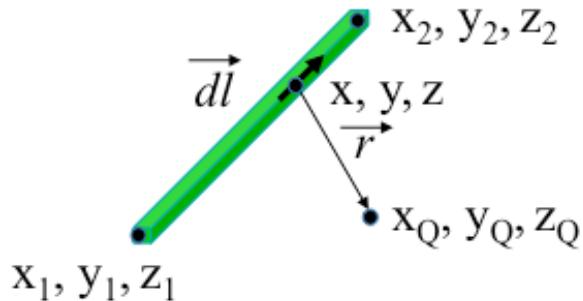


Figure 8 Modello del segmento.

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:

$$\begin{aligned} \vec{r} &= (x_Q + x)\vec{a}_x + (y_Q + y)\vec{a}_y + (z_Q + z)\vec{a}_z \\ \vec{dl} &= dx\vec{a}_x + dy\vec{a}_y + dz\vec{a}_z \end{aligned}$$

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

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.

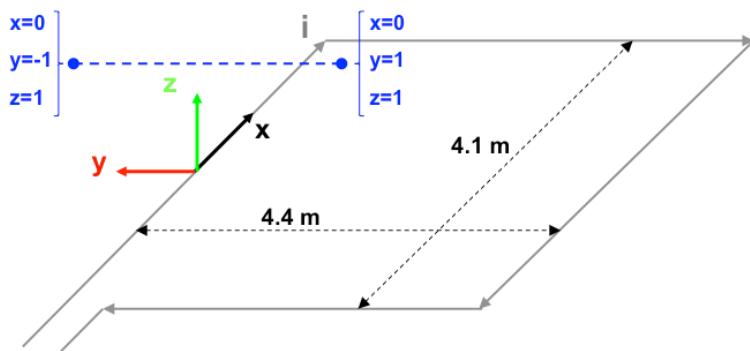


Figure 9 Schema di spira quadrata.

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.

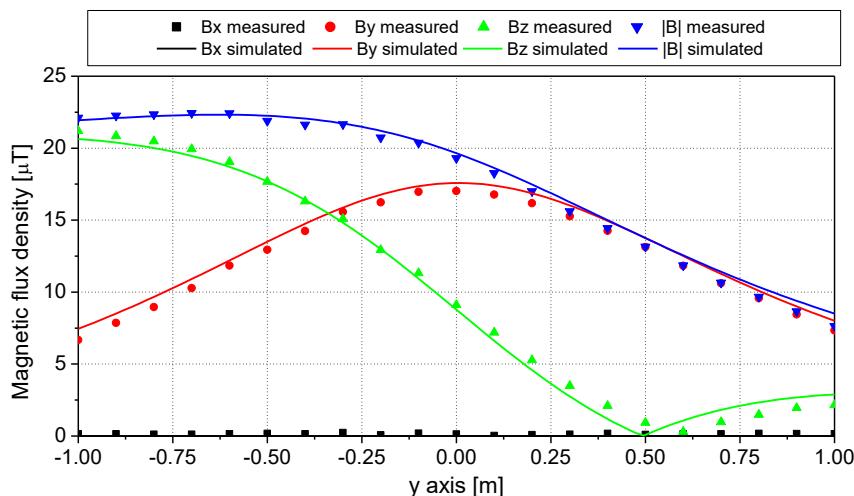


Figure 10 Induzione magnetica misurata e calcolata mediante software MAGIC®.

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 in resina e l'indicazione delle linee di calcolo.

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

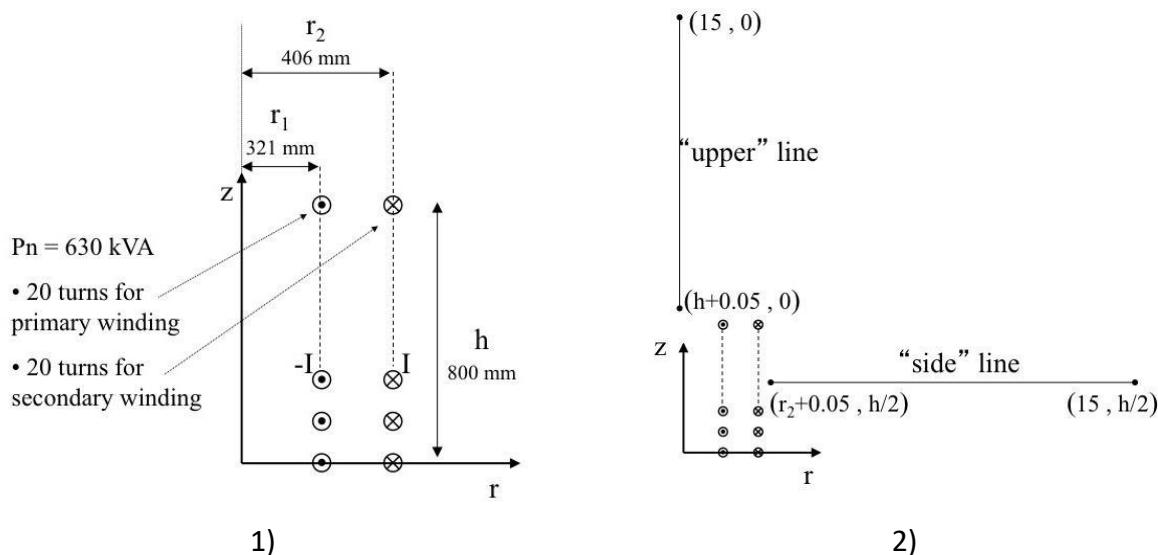


Figure 11 Geometria del sistema (1) e linee di calcolo (2)

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 cortocircuito del trasformatore. 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).

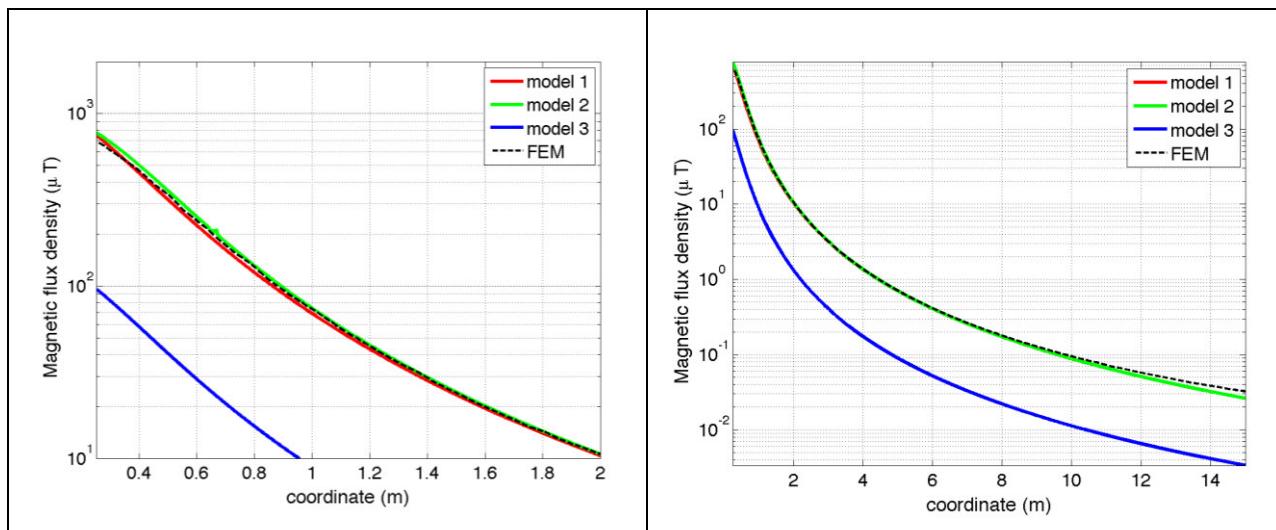


Figure 12 Induzione magnetica lungo la linea laterale

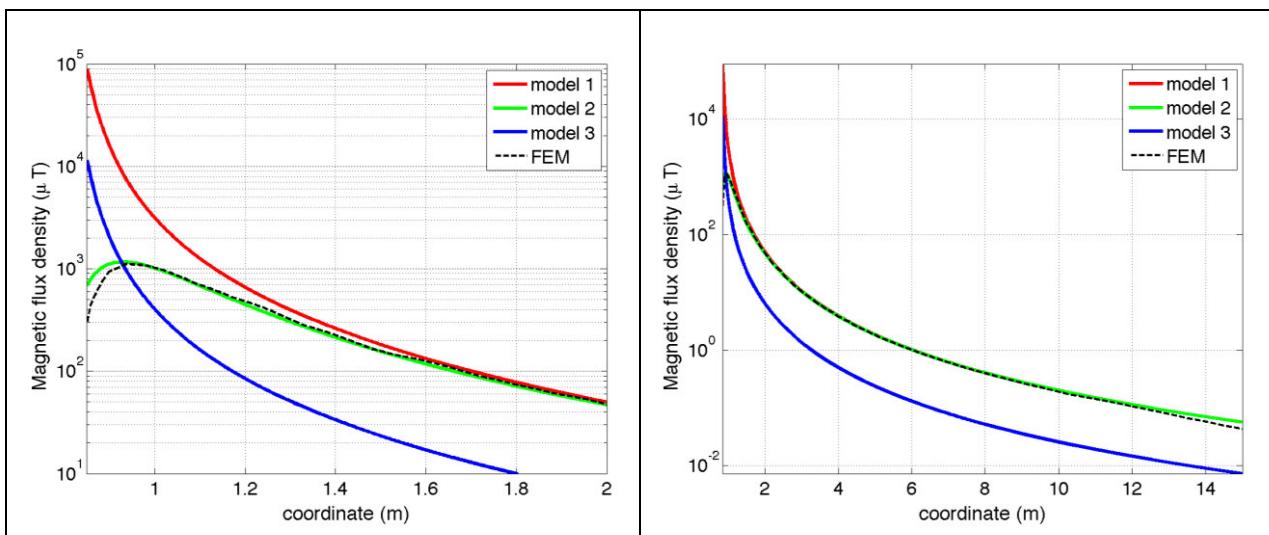


Figure 13 Induzione magnetica lungo la linea superiore

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. È 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 addizionali 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.

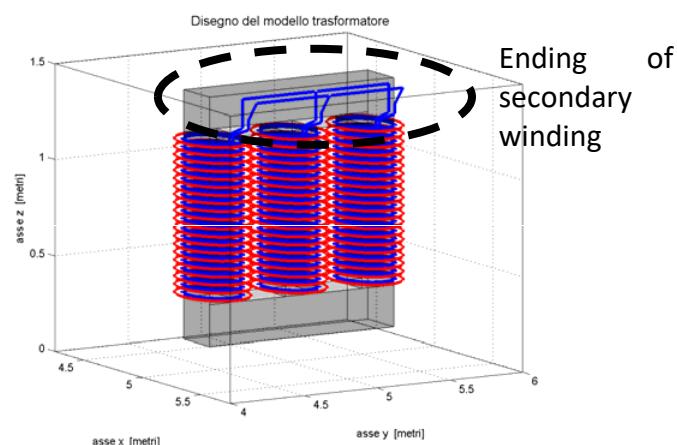


Figure 14 Connessioni elettriche considerate ai lati BT.

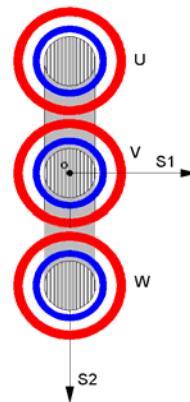


Figure 15 Linee di calcolo S1 ed S2

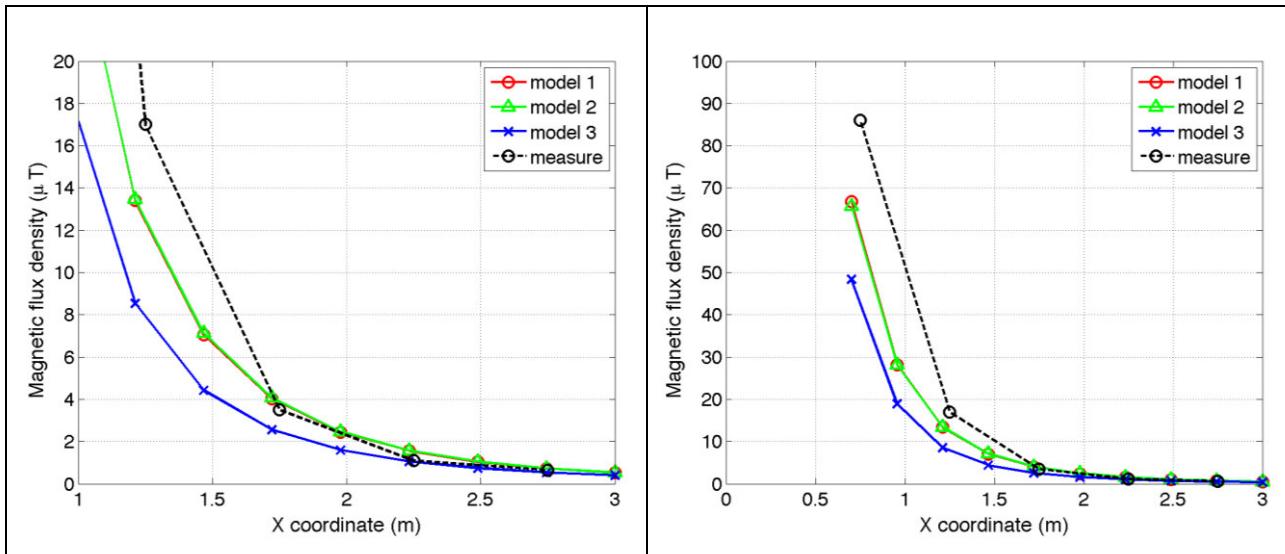


Figure 16 Confronto tra misure modelli lungo la linea S1

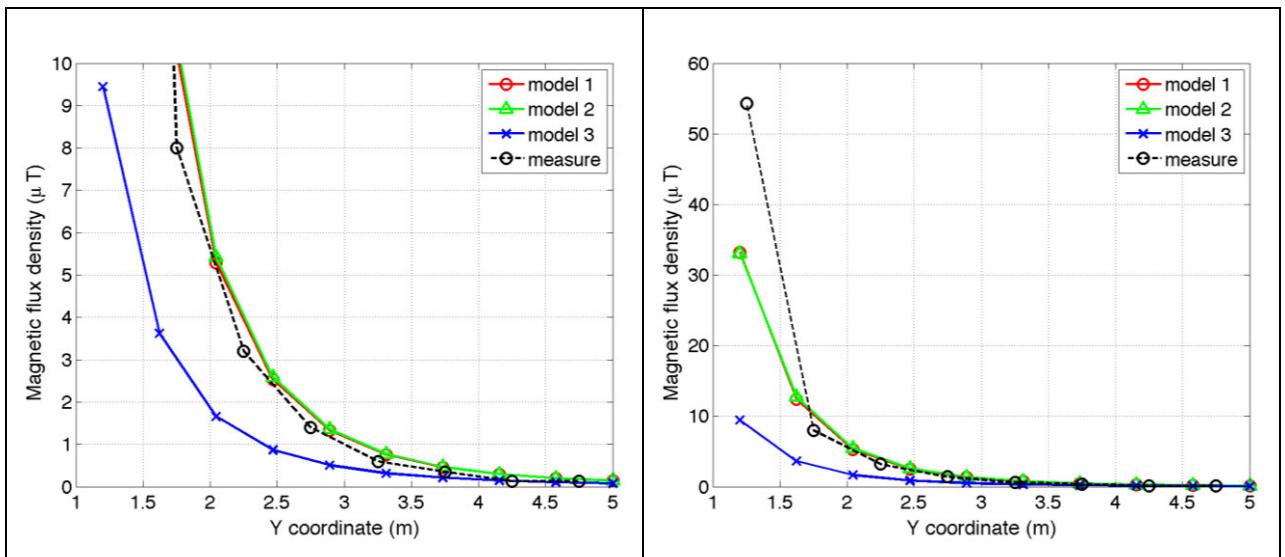


Figure 17 Confronto tra misure modelli lungo la linea S2

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 (sovraposizione 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.