

# TRAPANI SOLAR PARK S.R.L.

Via Giovanni Campolo, 92 - 90145 Palermo  
P.IVA 07109750823

## REGIONE SICILIA PROVINCIA DI TRAPANI COMUNE DI TRAPANI E COMUNE DI MARSALA

PROGETTO DI UN IMPIANTO AGROVOLTAICO CON POTENZA NOMINALE DI 98 MW  
DA REALIZZARE NEL COMUNE DI TRAPANI (TP)  
E NEL COMUNE DI MARSALA (TP)  
DENOMINATO "TRAPANI SOLAR PARK"

### REL.CEM

Relazione sull'esposizione ai Campi ElettroMagnetici generati da linee ed apparecchiature BT ed MT

	<p><b>REL.CEM</b> Relazione sull'esposizione ai Campi ElettroMagnetici generati da linee ed apparecchiature BT ed MT</p>				
<p>Progettista</p>	 <p>Soluzioni Tecniche Multidisciplinari Via Giovanni Campolo, 92 90145 - Palermo</p> <p><u>TEAM di Progettazione:</u> Ing. Davide Baldini Ing. Giovanni Termini Arch. Ilenia Zunino Dott. Enrico Lepre Dott. Arch. Claudio Piazza</p> <p>Progettista Ing. Giuseppe Meli Ordine degli Ingegneri della Provincia di Palermo N. 5355</p>  			 <p>TecSolis S.r.l. via Baraggino snc (Ex Cav) 10034 - Chivasso (TO)</p> <p><u>TEAM di Consulenza:</u> Ing. V. Chiarelli Ing. A. Garramone R. Foschi</p>	
<p>Collaborazione Scientifica</p>	 <p>UNIVERSITÀ degli STUDI di CATANIA Via Valdisavoia, 5 95123 Catania</p> <p><u>TEAM di Collaborazione:</u> Prof. Paolo Guarnaccia Dipartimento di Agricoltura, Alimentazione e Ambiente (Di3A) Sezione Scienze Agronomiche</p>		<p>Consulenze Specialistiche</p>	 <p>E-Prima S.r.l. Via Manganelli 20/G Nicolosi (CT)</p> <p><u>TEAM di Consulenza:</u> Marco Laudani (Business Development) Maria Celeste Chiavetta (Architetto)</p>	
<p>Ente</p>				 <p>BeShielding S.r.l. Via Monviso 9 Villarbasce (TO)</p> <p><u>TEAM di Consulenza:</u> Lorenzo Barlassina (Project Engineer) Sergio Grasso (Project Manager Senior)</p>	
<p>Rev.</p>	<p>Data</p>	<p>Descrizione</p>	<p>Preparato</p>	<p>Controllato</p>	<p>Approvato</p>
<p>0</p>	<p>05/07/2024</p>	<p>Prima emissione per iter autorizzativo</p>	<p>BeShielding</p>	<p>V. Chiarelli</p>	<p>G. Meli</p>



**Relazione Esposizione Campi Elettromagnetici  
del Parco Agrivoltaico con potenza nominale di 98 MW  
denominato "Trapani Solar Park"  
sito nel comune di Trapani e nel comune di Marsala (TP)**

**Rifer.: 20240415 Trapani Solar Park**

**Tecsolis S.p.A.**  
Via Baraggino, snc  
10034 – Chivasso (TO)

*N° di pagine totali: 33*

**Protocollo: SPT/24/151**

**Del: 05/07/2024**

# Sommario

## Premessa 1

1.	Cabina di sottocampo allestite con un solo TR.....	3
1.1.	Layout architettonico.....	3
1.2.	Definizione dei limiti di esposizione nei locali circostanti.....	4
1.3.	Analisi MAGIC.....	5
1.3.1.	Modello.....	5
1.4.	Osservazioni.....	8
2.	Cabina di sottocampo allestite con due TR.....	9
2.1.	Layout architettonico.....	9
2.2.	Definizione dei limiti di esposizione nei locali circostanti.....	10
2.3.	Analisi MAGIC.....	11
2.3.1.	Modello.....	11
2.4.	Osservazioni.....	14
3.	Cabina SSE Utente e Storage.....	15
3.1.	Layout architettonico.....	15
3.2.	Definizione dei limiti di esposizione nei locali circostanti.....	16
3.3.	Analisi MAGIC.....	17
3.3.1.	Modello.....	17
3.4.	Osservazioni.....	21
4.	Stallo SSE Terna.....	22
4.1.	Layout architettonico.....	22
4.2.	Definizione dei limiti di esposizione nei locali circostanti.....	23
4.3.	Analisi MAGIC.....	24
4.3.1.	Modello.....	24
4.4.	Osservazioni.....	26
5.	Dorsali MT.....	27
5.1.	Definizione delle sorgenti.....	27
5.2.	Analisi delle linee MT in assenza di opere di mitigazione.....	29
5.2.1.	CS1 – SSE.....	29
5.2.2.	CS2 – SSE.....	30
5.2.3.	CS3 – SSE.....	30
5.2.4.	SSE – Storage.....	31
5.2.5.	Cabina di sottocampo con singolo TR – CS <sub>n</sub> .....	31
5.2.6.	Cabina di sottocampo con doppio TR – CS <sub>n</sub> .....	32
5.3.	Osservazioni.....	33

## Premessa

La presente relazione riporta lo **studio preliminare** dell'induzione magnetica, generata dalle principali infrastrutture elettriche presenti all'interno del Parco Agrivoltaico chiamato "Solar Park" a Trapani (TP):

- Cabine di sottocampo allestite con un solo trasformatore MT/BT;
- Cabine di sottocampo allestite con due trasformatori MT/BT;
- Cabina SSE Utente e Storage (solo Trasformatori);
- Stallo SSE Terna;
- Dorsali MT.

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  $\mu\text{T}$**  esposizione **istantanea**, valore imposto dal DPCM 8 Luglio 2003 – Art. 3;
- **3,78  $\mu\text{T}$**  per locali con presenza di **apparecchiature elettroniche sensibili**, valore indicato dalla norma tecnica CEI EN 61000-4:8;
- **3  $\mu\text{T}$** , 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 i valori limiti sopra citati (***Layout architettonico***) + (***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 (***Modello MAGIC***) corredata da commenti conclusivi sui valori di campo magnetico dedotti dalle simulazioni (***Osservazioni***).

# 1. Cabina di sottocampo allestite con un solo TR

## 1.1. Layout architettonico

Nelle Figura 1 si riporta la pianta della Cabine di trasformazione allestite con un solo trasformatore 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.

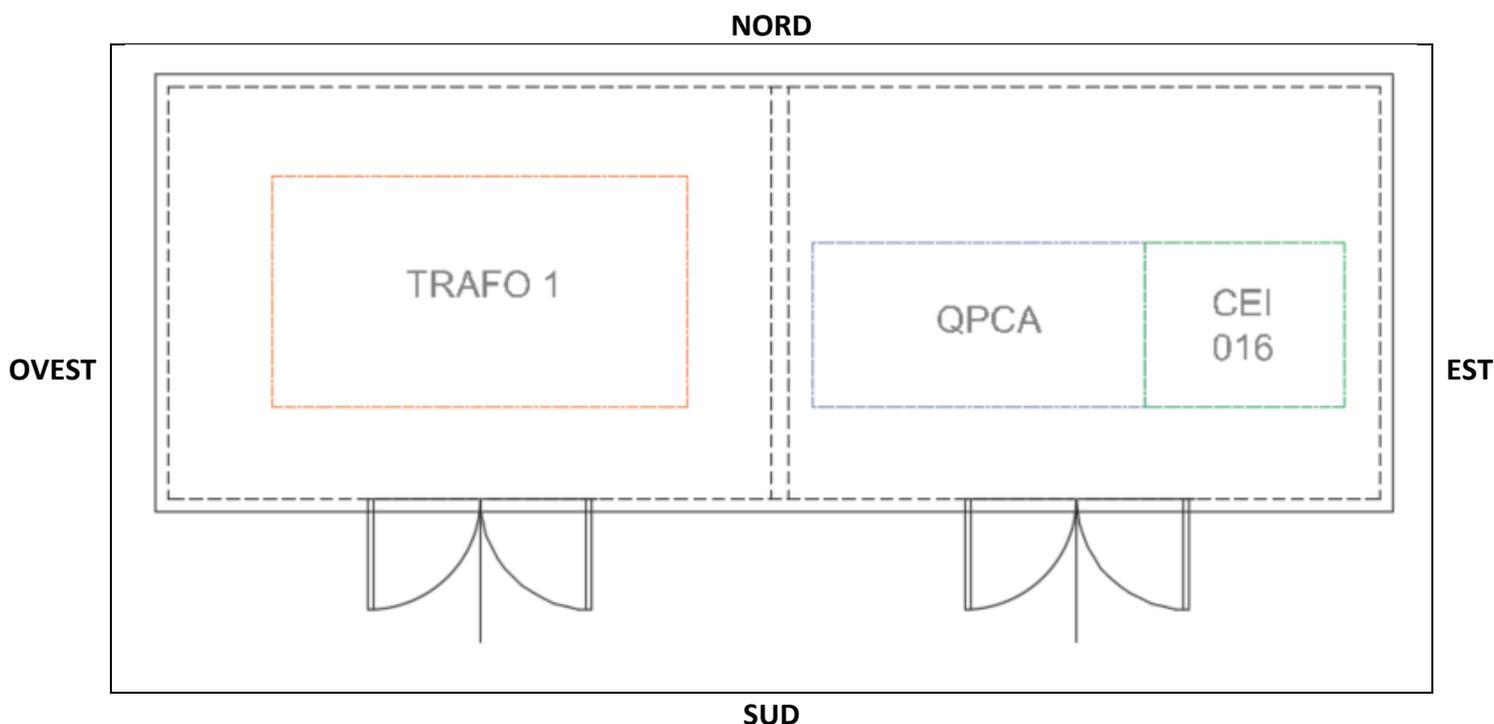


Figura 1 Pianta del locale Cabina di trasformazione di Sottocampo, modello con un Trasformatore

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

- n.1 Trasformatore MT/BT da 3750kVA 30/0,8kV isolato in resina;
- n.1 Quadro generale di media tensione CEI 016;
- n.1 Quadro BT QPCA;
- n.1 Linea MT di collegamento tra trasformatore e quadro di media tensione;
- n.1 Linea BT di collegamento tra quadro di bassa tensione e trasformatore.

**NOTA: Come richiesto dalla committenza il modello della cabina con un solo trasformatore (3750kVA) oggetto del seguente studio sarà di riferimento per tutte le cabine di trasformazione di Sottocampo allestite con un solo trasformatore, in quanto risulta essere la versione di cabina elettrica mono-trasformatore, più cautelativa.**

## 1.2. Definizione dei limiti di esposizione nei locali circostanti

In riferimento alla normativa vigente dovranno essere valutati i seguenti limiti:

○ **Oltre il confine di proprietà:**

- **100  $\mu$ T esposizione istantanea**, valore imposto dal DPCM 8 Luglio 2003 – Art. 3;
- **3  $\mu$ T obiettivo di qualità** imposto dal DPCM 8 Luglio 2003 – Art. 4 nella progettazione di nuovi elettrodotti in corrispondenza di aree gioco per l'infanzia, di ambienti abitativi, di ambienti scolastici e di luoghi adibiti a permanenze non inferiori a quattro ore e nella progettazione dei nuovi insediamenti e delle nuove aree di cui sopra in prossimità di linee ed installazioni elettriche già presenti nel territorio, ai fini della progressiva minimizzazione dell'esposizione ai campi elettrici e magnetici generati dagli elettrodotti operanti alla frequenza di 50 Hz negli ambienti ad esposizione prolungata di persone (superiore alle quattro ore giornaliere).

Nota: il limite pari all'obiettivo di qualità dovrà essere rispettato anche oltre l'eventuale confine di proprietà. Quanto esposto non risulta indicato esplicitamente su nessun articolo del DPCM 8 Luglio 2003, ma viene implicitamente applicato come vincolo, nel caso di terreno edificabile limitrofo. Il non rispetto del limite genererebbe un vincolo alla costruzione nella proprietà altrui.

○ **All'interno del Parco Agrivoltaico e della stessa proprietà:**

Solitamente, all'interno dei parchi fotovoltaici sono ammessi unicamente lavoratori professionalmente esposti nell'esercizio della loro funzione, pertanto i limiti di esposizione, i valori di attenzione e gli obiettivi di qualità fissati dal DPCM 8 luglio 2003 non si applicano a tali lavoratori.

**Dalle informazioni ricevute dalla committenza, invece, esistono aree interne alla proprietà accessibili anche a lavoratori non professionalmente esposti. In particolare, essendo un Parco Agrivoltaico, le aree/campi sono utilizzabili da contadini, motivo per cui all'interno di tali zone il limite da rispettare risulterà sia quello istantaneo, sia l'obiettivo di qualità 3  $\mu$ T relativo ad aree con permanenza di lavoratori per più di 4 ore consecutive.**

## 1.3. Analisi MAGIC

### 1.3.1. Modello

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.

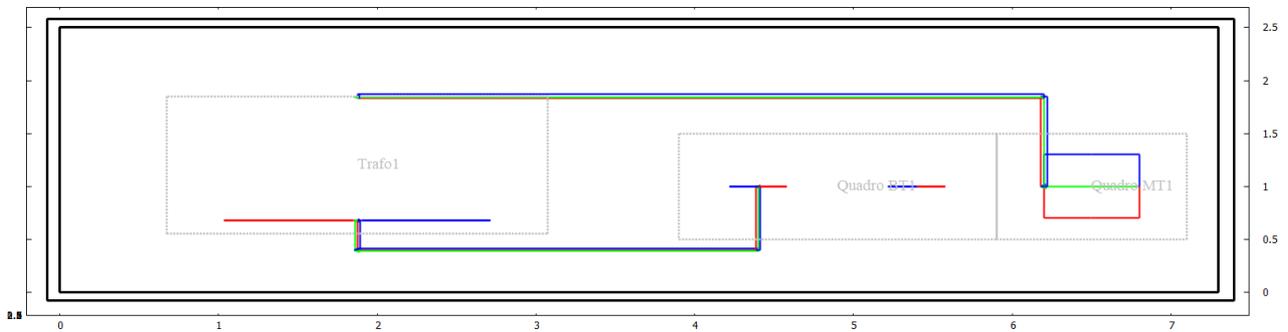


Figura 2 Layout del locale Cabina con un solo TR– vista in pianta

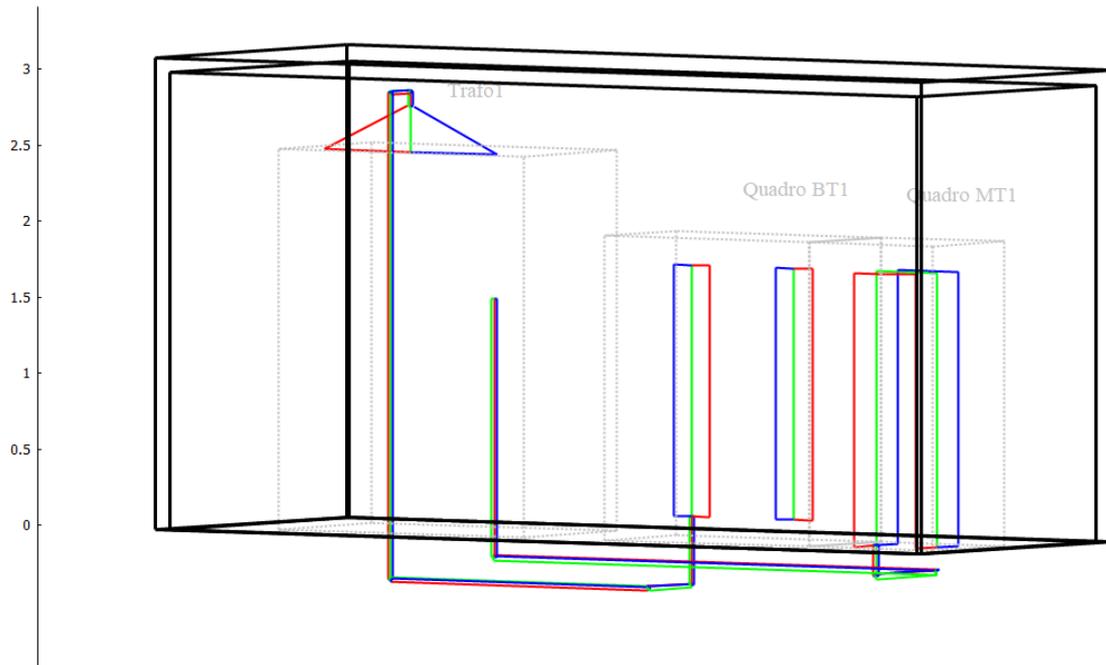
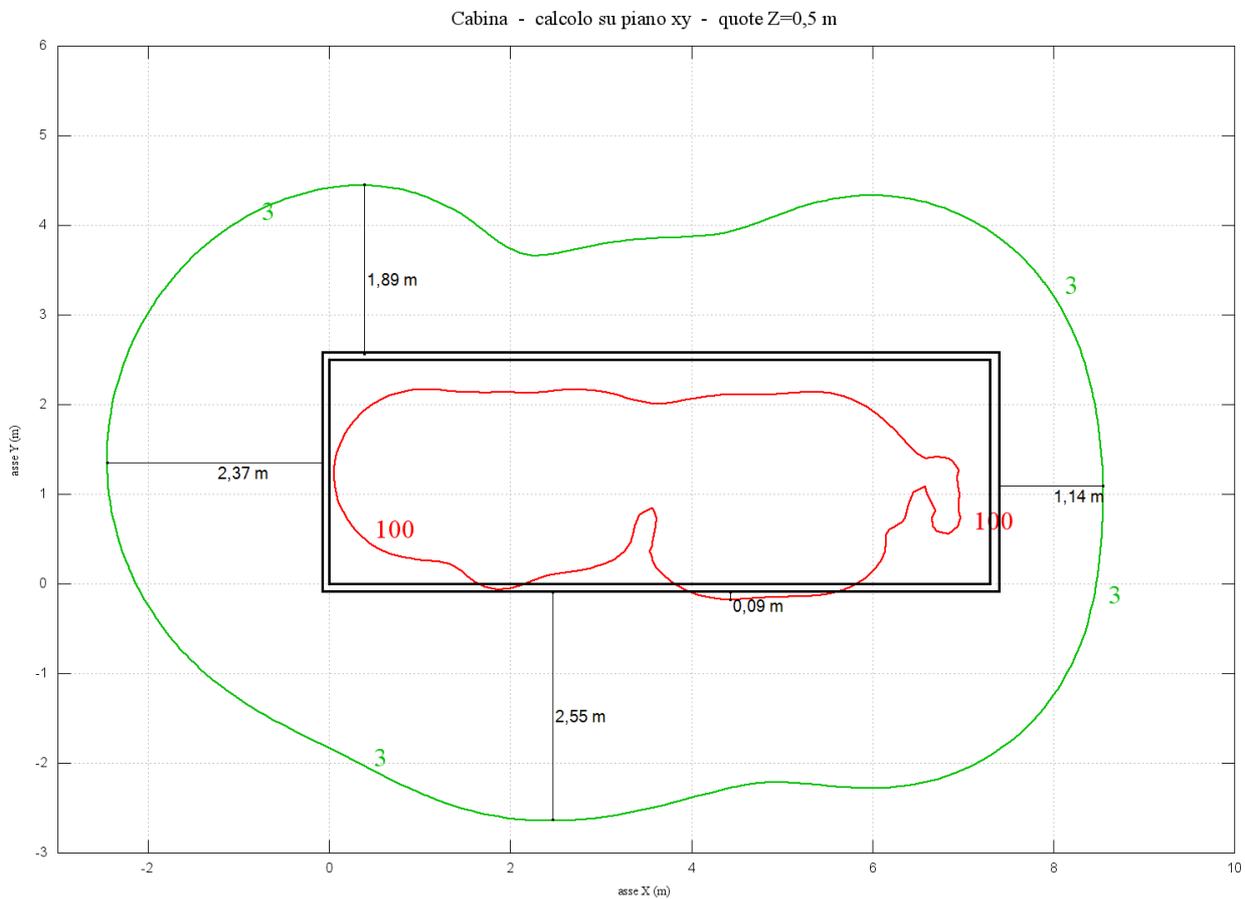


Figura 3 Layout del locale Cabina con un solo TR– vista 3D

Di seguito vengono analizzati i valori di induzione magnetica generati dalla cabina elettrica in assenza di schermatura con quote utili alla determinazione delle DPA, nelle aree attigue la stessa.

Nelle successive Figure vengono presentate le curve isolivello che riportano i valori di induzione magnetica, in  $\mu\text{T}$ , calcolati su diversi piani XY (paralleli al pavimento del locale Cabina MT/BT) 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).



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

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

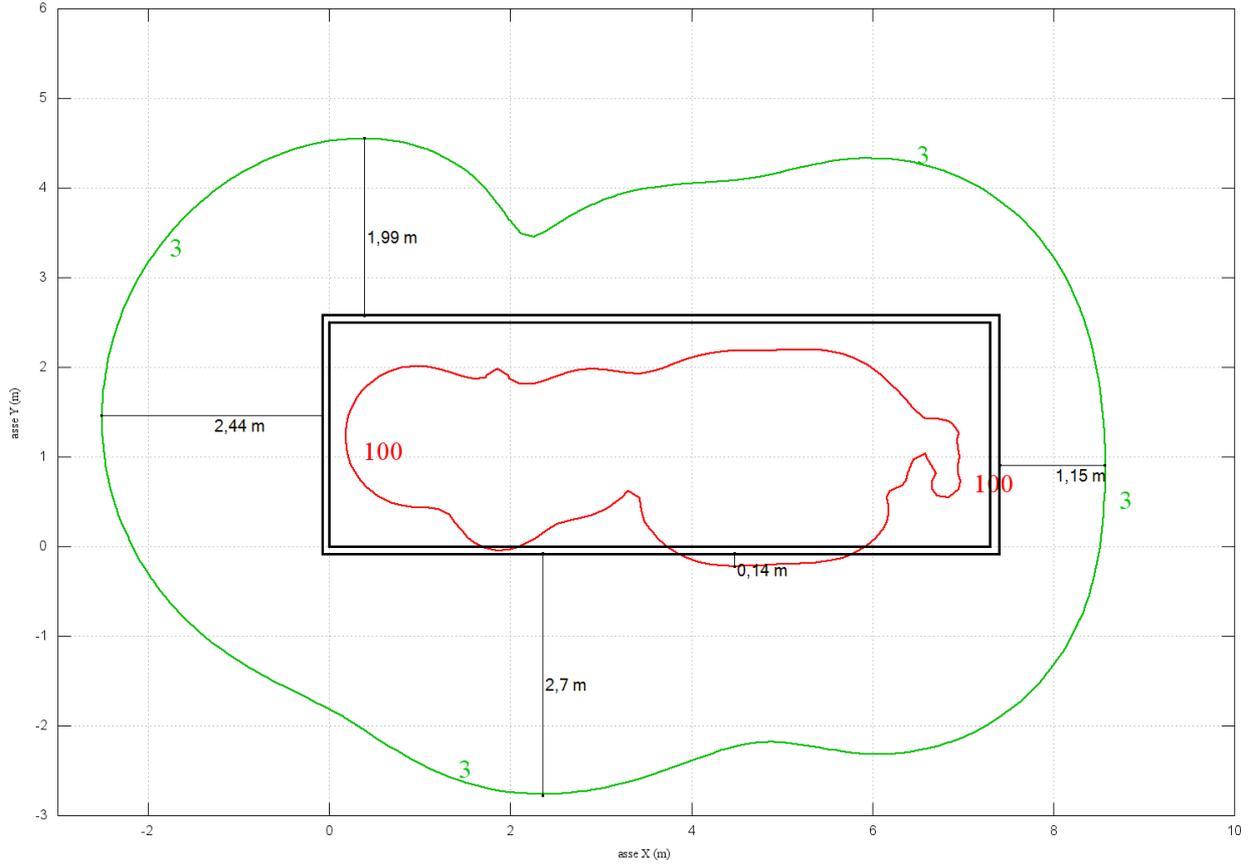


Figura 5 Curve isolivello d'induzione magnetica calcolate su un piano XY per  $z = 1,0$  m

Cabina - calcolo su piano xy - quote Z=1,5 m

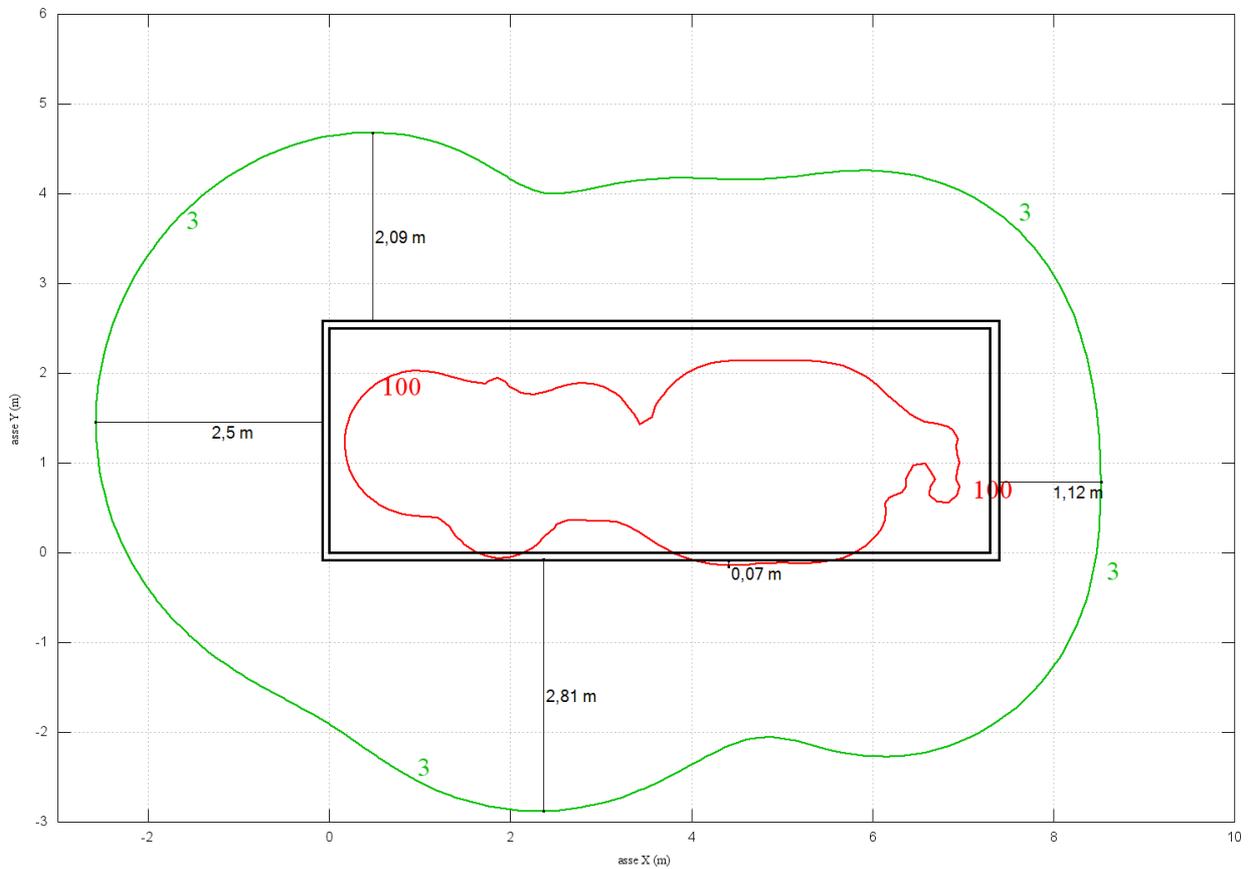


Figura 6 Curve isolivello d'induzione magnetica calcolate su un piano XY per  $z = 1,5$  m



Nella Tabella 1 vengono riportate le DPA di Parete approssimate al mezzo metro successivo, relativa alla quota Z.

Tabella 1 DPA – Cabina MT/BT con un solo trasformatore

Cabina	TR [kVA]	Curva isolivello [ $\mu$ T]	DPA Parete Nord [m]	DPA Parete Est [m]	DPA Parete Sud [m]	DPA Parete Est [m]
con un solo TR	3750	3	2,5	1,5	3,0	3,0
		100	N.C.	N.C.	0,5	N.C.

## 1.4. Osservazioni

In una fase più avanzata del progetto, a seguito della definizione spaziale delle cabine elettriche, oltre alle opere di mitigazione per il rispetto del limite istantaneo 100  $\mu$ T, si dovranno verificare le eventuali interferenze delle DPA con aree sensibili e/o accessibili ai contadini.

Si potrà quindi procedere alla progettazione di una soluzione schermante relativa al solo limite istantaneo oppure di una soluzione schermante che contenga i valori di campo magnetico al di sotto di entrambi i limiti.

In alternativa alla soluzione schermante si potrebbe progettare un'opera di limitazione fisica di avvicinamento alle aree sensibili, tale da renderle inaccessibili alla popolazione e/o ai lavoratori non professionalmente esposti (contadini).

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 uscita e le dorsali BT in ingresso dalla stessa.

Le dorsali MT, in uscita dalle cabine elettriche saranno trattate in un apposito paragrafo dedicato.

## 2. Cabina di sottocampo allestite con due TR

### 2.1. Layout architettonico

Nelle Figura 7 si riporta la pianta della Cabine di trasformazione allestite con due trasformatori 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.

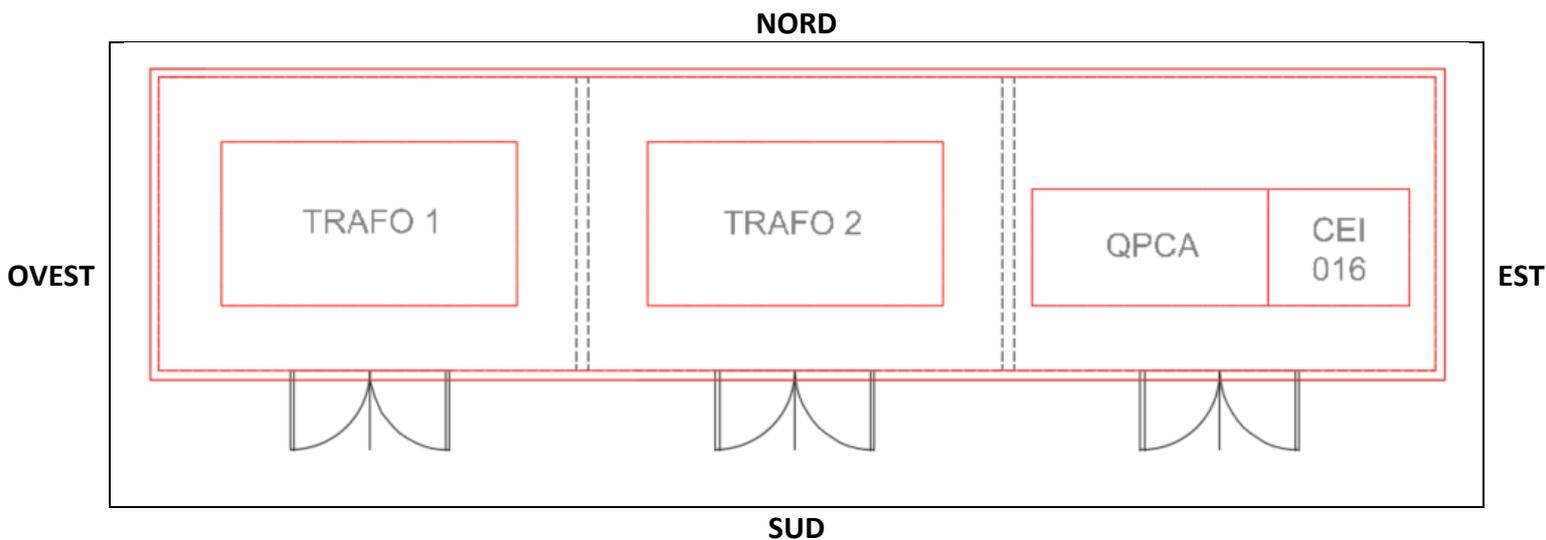


Figura 7 Pianta del locale Cabina di Distribuzione di Sottocampo, modello con due Trasformatori

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

- n.2 Trasformatori MT/BT da 3750kVA 30/0,8kV isolato in resina;
- n.1 Quadro generale di media tensione CEI 016;
- n.1 Quadro BT QPCA;
- n.2 Linee MT di collegamento tra trasformatori e quadro di media tensione;
- n.2 Linee BT di collegamento tra quadro di bassa tensione e trasformatori.

**NOTA: Come richiesto dalla committenza il modello della cabina con due trasformatori (3750kVA+3750kVA) oggetto del seguente studio sarà di riferimento per tutte le cabine di trasformazione di Sottocampo allestite con il doppio trasformatore, in quanto risulta essere la versione di cabina elettrica doppio-trasformatore, più cautelativa.**

## 2.2. Definizione dei limiti di esposizione nei locali circostanti

In riferimento alla normativa vigente dovranno essere valutati i seguenti limiti:

○ **Oltre il confine di proprietà:**

- **100  $\mu$ T esposizione istantanea**, valore imposto dal DPCM 8 Luglio 2003 – Art. 3;
- **3  $\mu$ T obiettivo di qualità** imposto dal DPCM 8 Luglio 2003 – Art. 4 nella progettazione di nuovi elettrodotti in corrispondenza di aree gioco per l'infanzia, di ambienti abitativi, di ambienti scolastici e di luoghi adibiti a permanenze non inferiori a quattro ore e nella progettazione dei nuovi insediamenti e delle nuove aree di cui sopra in prossimità di linee ed installazioni elettriche già presenti nel territorio, ai fini della progressiva minimizzazione dell'esposizione ai campi elettrici e magnetici generati dagli elettrodotti operanti alla frequenza di 50 Hz negli ambienti ad esposizione prolungata di persone (superiore alle quattro ore giornaliere).

Nota: il limite pari all'obiettivo di qualità dovrà essere rispettato anche oltre l'eventuale confine di proprietà. Quanto esposto non risulta indicato esplicitamente su nessun articolo del DPCM 8 Luglio 2003, ma viene implicitamente applicato come vincolo, nel caso di terreno edificabile limitrofo. Il non rispetto del limite genererebbe un vincolo alla costruzione nella proprietà altrui.

○ **All'interno del Parco Agrivoltaico e della stessa proprietà:**

Solitamente, all'interno dei parchi fotovoltaici sono ammessi unicamente lavoratori professionalmente esposti nell'esercizio della loro funzione, pertanto i limiti di esposizione, i valori di attenzione e gli obiettivi di qualità fissati dal DPCM 8 luglio 2003 non si applicano a tali lavoratori.

**Dalle informazioni ricevute dalla committenza, invece, esistono aree interne alla proprietà accessibili anche a lavoratori non professionalmente esposti. In particolare, essendo un Parco Agrivoltaico, le aree/campi sono utilizzabili da contadini, motivo per cui all'interno di tali zone il limite da rispettare risulterà sia quello istantaneo, sia l'obiettivo di qualità 3  $\mu$ T relativo ad aree con permanenza di lavoratori per più di 4 ore consecutive.**

## 2.3. Analisi MAGIC

### 2.3.1. Modello

Nelle Figure 8 e 9 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.

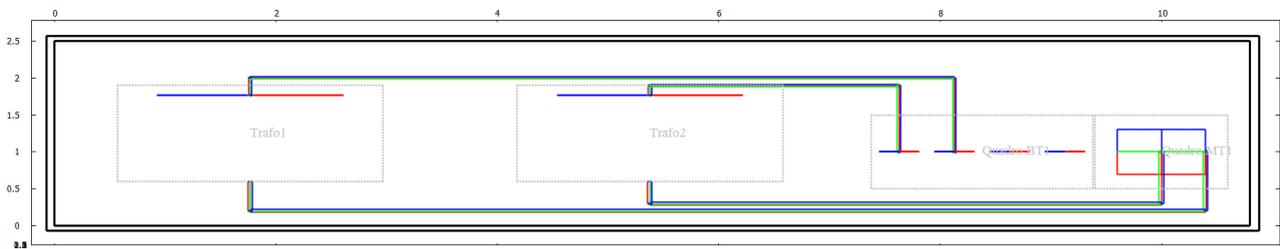


Figura 8 Layout del locale Cabina con due TR – vista in pianta

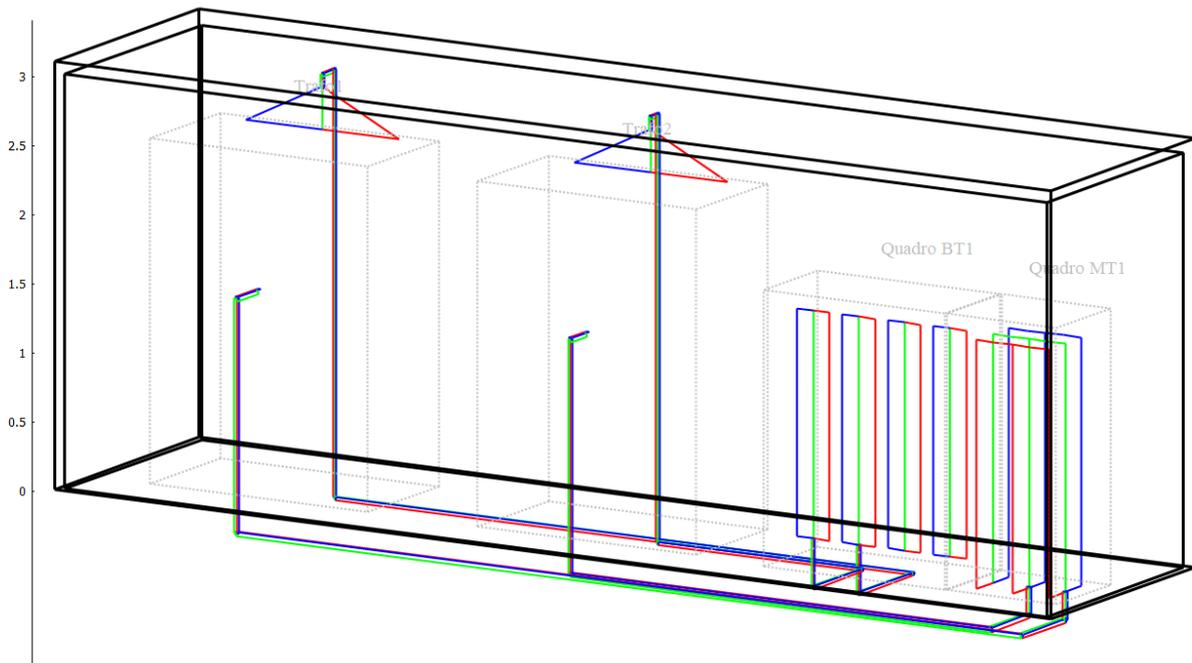


Figura 9 Layout del locale Cabina con due TR – vista 3D

Di seguito vengono analizzati i valori di induzione magnetica generati dalla cabina elettrica 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  $\mu\text{T}$ , calcolati su diversi piani XY (paralleli al pavimento del locale Cabina MT/BT) per le seguenti quote:

- $z = 0,5$  corrispondente ad una quota di 0,5 metri a partire dal pavimento della cabina (Figura 10);
- $z = 1,0$  corrispondente ad una quota di 1,0 metro a partire dal pavimento della cabina (Figura 11);
- $z = 1,5$  corrispondente ad una quota di 1,5 metri a partire dal pavimento della cabina (Figura 12).

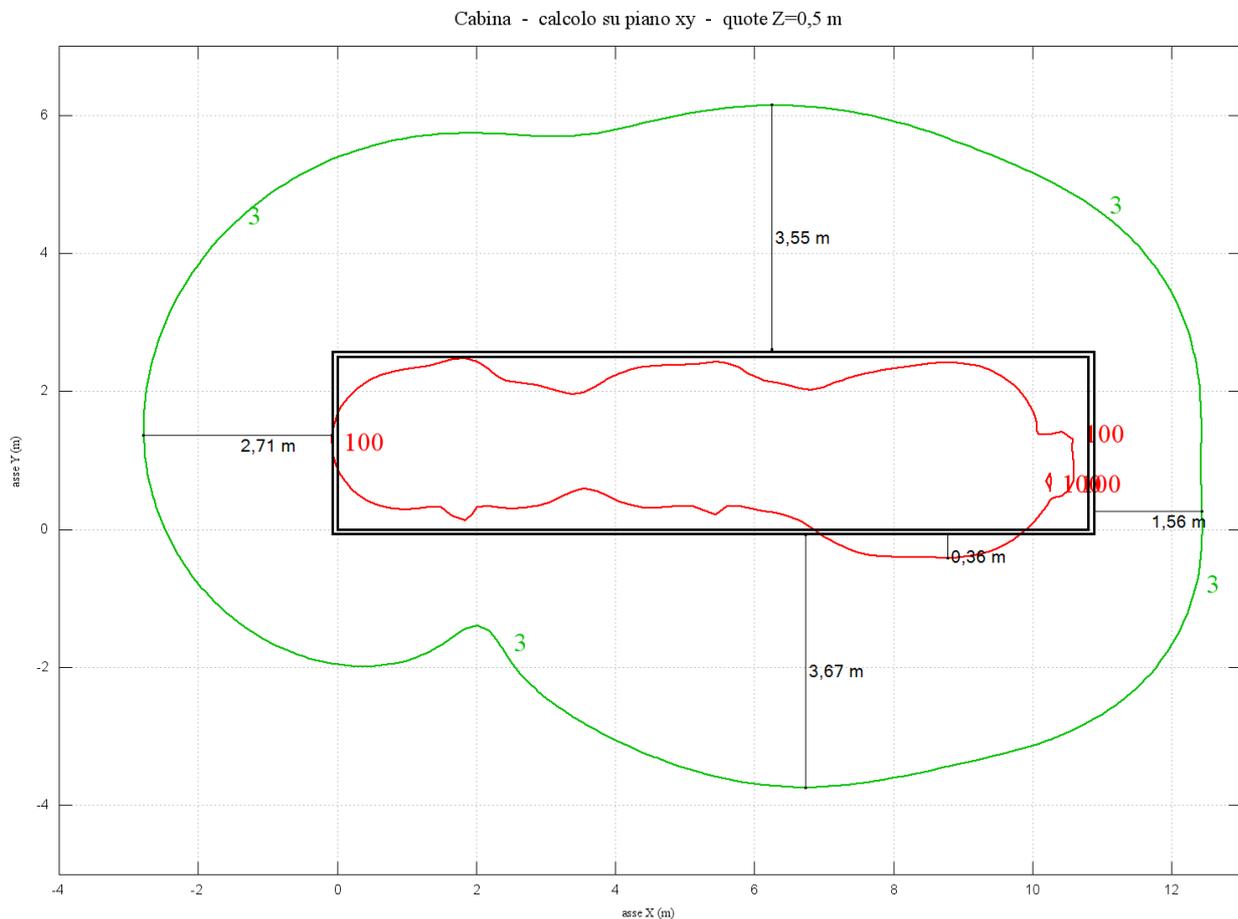


Figura 10 Curve isolivello d'induzione magnetica calcolate su un piano XY per  $z = 0,5$  m

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

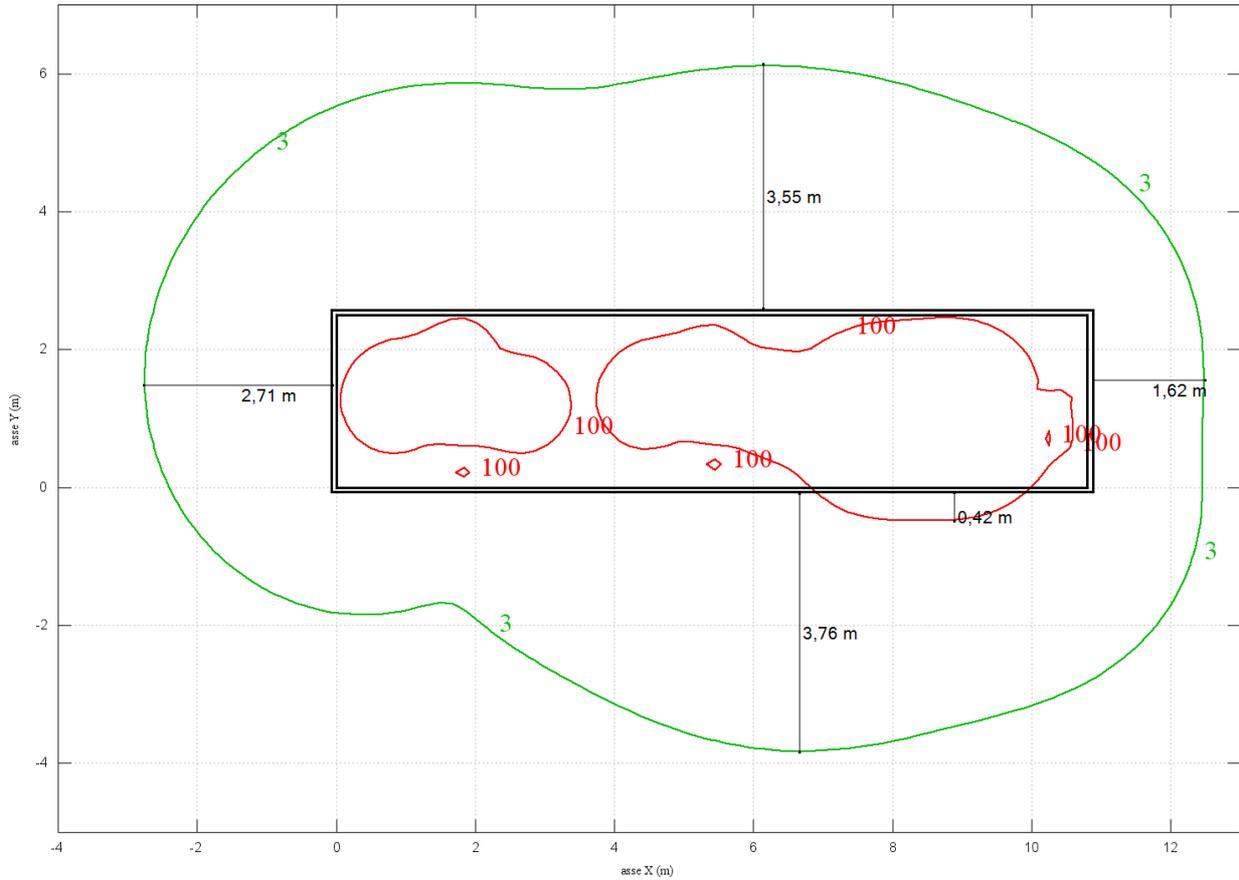


Figura 11 Curve isolivello d'induzione magnetica calcolate su un piano XY per  $z = 1,0$  m

Cabina - calcolo su piano xy - quote Z=1,5 m

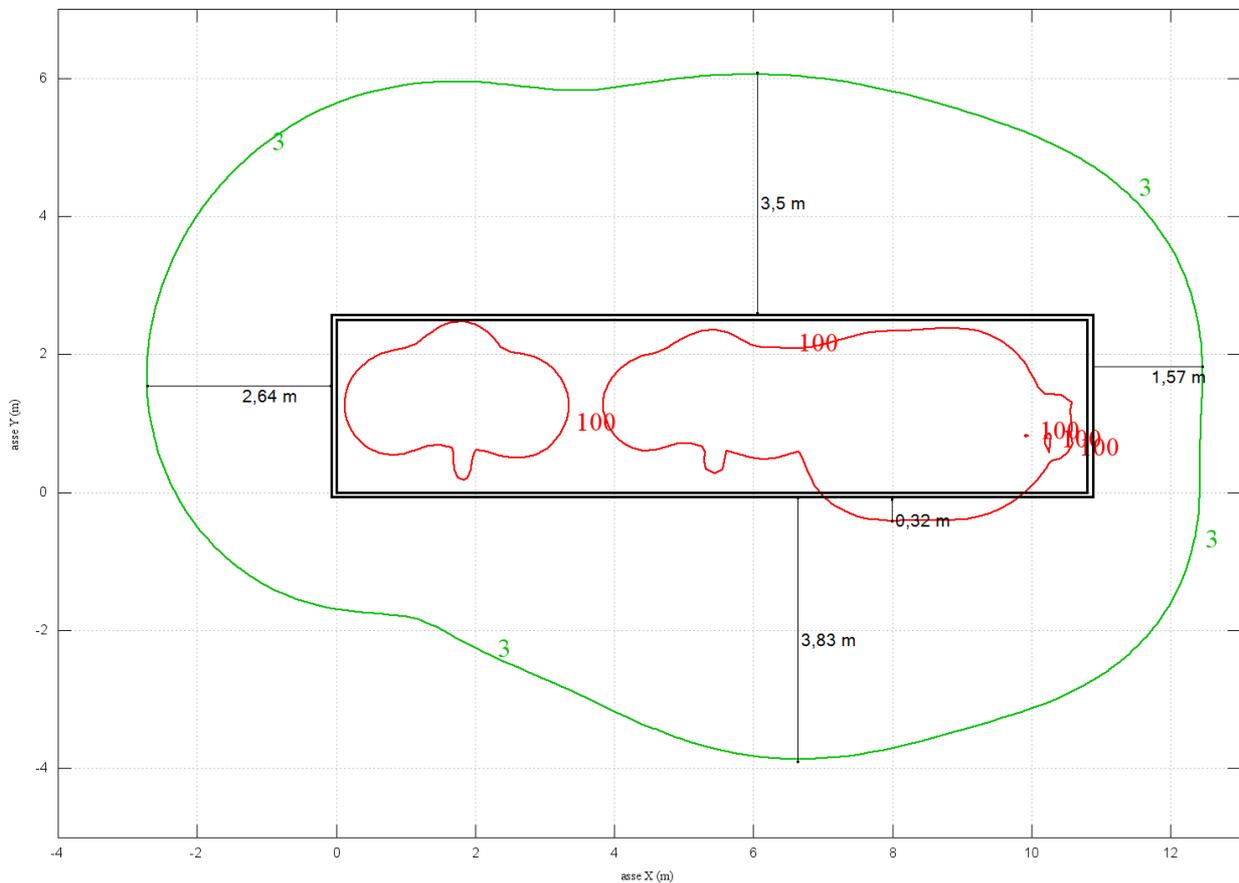


Figura 12 Curve isolivello d'induzione magnetica calcolate su un piano XY per  $z = 1,5$  m



Nella Tabella 2 vengono riportate le DPA di Parete approssimate al mezzo metro successivo, relativa alla quota Z.

Tabella 2 DPA – Cabina MT/BT con un solo trasformatore

Cabina	TR x2 [kVA]	Curva isolivello [ $\mu$ T]	DPA Parete Nord [m]	DPA Parete Est [m]	DPA Parete Sud [m]	DPA Parete Est [m]
con due TR	2x3750	3	4,0	2,0	4,0	3,0
		100	N.C.	N.C.	0,5	N.C.

## 2.4. Osservazioni

In una fase più avanzata del progetto, a seguito della definizione spaziale delle cabine elettriche, oltre alle opere di mitigazione per il rispetto del limite istantaneo 100  $\mu$ T, si dovranno verificare le eventuali interferenze delle DPA con aree sensibili e/o accessibili ai contadini.

Si potrà quindi procedere alla progettazione di una soluzione schermante relativa al solo limite istantaneo oppure di una soluzione schermante che contenga i valori di campo magnetico al di sotto di entrambi i limiti.

In alternativa alla soluzione schermante si potrebbe progettare un'opera di limitazione fisica di avvicinamento alle aree sensibili, tale da renderle inaccessibili alla popolazione e/o ai lavoratori non professionalmente esposti (contadini).

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 uscita e le dorsali BT in ingresso dalla stessa.

Le dorsali MT, in uscita dalle cabine elettriche saranno trattate in un apposito paragrafo dedicato.



### 3. Cabina SSE Utente e Storage

#### 3.1. Layout architettonico

Nella Figura 13 si riporta la pianta dell'area della Cabina SSE Utente e l'area Storage 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.

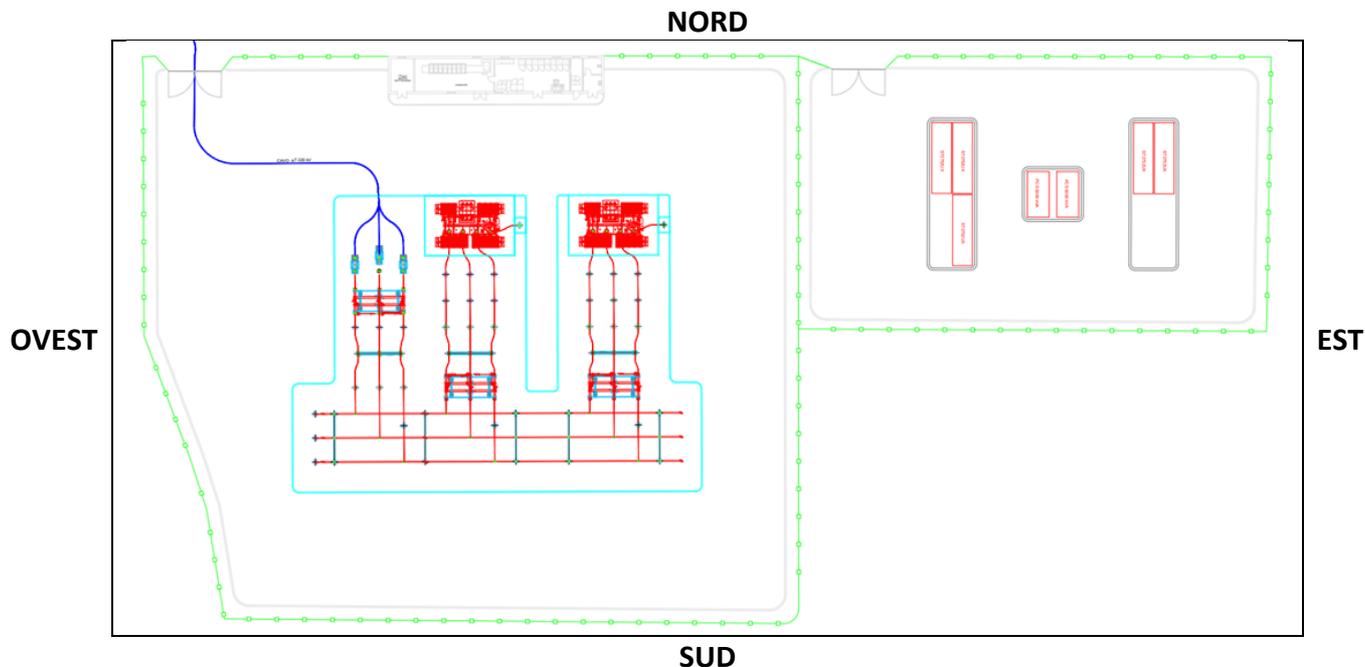


Figura 13 Pianta dell'area Cabina SSE Utente e Storage

Essendo il progetto in fase preliminare, con i dati ad oggi forniti dalla committenza e senza ulteriori informazioni, possiamo definire che le apparecchiature elettriche, presenti nell'impianto, caratterizzate da valori di corrente non trascurabili ai fini delle valutazioni del campo magnetico, sono:

- N.1 Linea interrata AT 220kV in uscita verso la Stazione SSE Terna. In mancanza di informazioni viene ipotizzato uno schema di posa a trifoglio ad una profondità di 1,60m considerando una corrente massima di circa 242A;
- N.2 Trasformatori innalzatori MT/AT di taglia 50MVA 30/220kV, per ciascuno dei quali sono state considerate una corrente assorbita lato MT di circa 886A e una corrente erogata lato AT pari a circa 121A;
- N.2 Trasformatori MT/BT di taglia 8MVA 30/0,9kV, per ciascuno dei quali sono state considerate una corrente assorbita lato MT di circa 145A e una corrente erogata lato BT pari a circa 4824A;
- N.1 Quadro Generale MT 30kV posto al piano terra in un locale dedicato, nel quale viene gestito l'arrivo dei tre centri stella (rispettivamente con correnti di 509 A, 497 A e 497 A fornite dal committente), le partenze verso i due trasformatori innalzatori MT/AT, i due trasformatori MT/BT;
- N.4 Barrature AT di collegamento tra i trasformatori e l'uscita in cavo interrato AT in direzione della Stazione di Terna;
- N.2 Dorsali MT, di collegamento tra il quadro MT ed i trasformatori MT/AT con passaggio cavi interrati ed una posa ipotizzata a trifoglio;
- N.2 Linee MT, di collegamento tra il quadro MT e i Trasformatori MT/BT con passaggio cavi interrati ed una posa ipotizzata a trifoglio.

## 3.2. Definizione dei limiti di esposizione nei locali circostanti

In riferimento alla normativa vigente dovranno essere valutati i seguenti limiti:

○ **Oltre il confine di proprietà:**

- **100  $\mu$ T esposizione istantanea**, valore imposto dal DPCM 8 Luglio 2003 – Art. 3;
- **3  $\mu$ T obiettivo di qualità** imposto dal DPCM 8 Luglio 2003 – Art. 4 nella progettazione di nuovi elettrodotti in corrispondenza di aree gioco per l'infanzia, di ambienti abitativi, di ambienti scolastici e di luoghi adibiti a permanenze non inferiori a quattro ore e nella progettazione dei nuovi insediamenti e delle nuove aree di cui sopra in prossimità di linee ed installazioni elettriche già presenti nel territorio, ai fini della progressiva minimizzazione dell'esposizione ai campi elettrici e magnetici generati dagli elettrodotti operanti alla frequenza di 50 Hz negli ambienti ad esposizione prolungata di persone (superiore alle quattro ore giornaliere).

Nota: il limite pari all'obiettivo di qualità dovrà essere rispettato anche oltre l'eventuale confine di proprietà. Quanto esposto non risulta indicato esplicitamente su nessun articolo del DPCM 8 Luglio 2003, ma viene implicitamente applicato come vincolo, nel caso di terreno edificabile limitrofo. Il non rispetto del limite genererebbe un vincolo alla costruzione nella proprietà altrui.

○ **All'interno della Cabina SSE Utente, dello Storage e della stessa proprietà:**

All'interno delle Cabine SSE sono ammessi unicamente lavoratori professionalmente esposti nell'esercizio della loro funzione, pertanto i limiti di esposizione, i valori di attenzione e gli obiettivi di qualità fissati dal DPCM 8 luglio 2003 non si applicano a tali lavoratori.

### 3.3. Analisi MAGIC

#### 3.3.1. Modello

Nelle Figure 14 e 15 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.

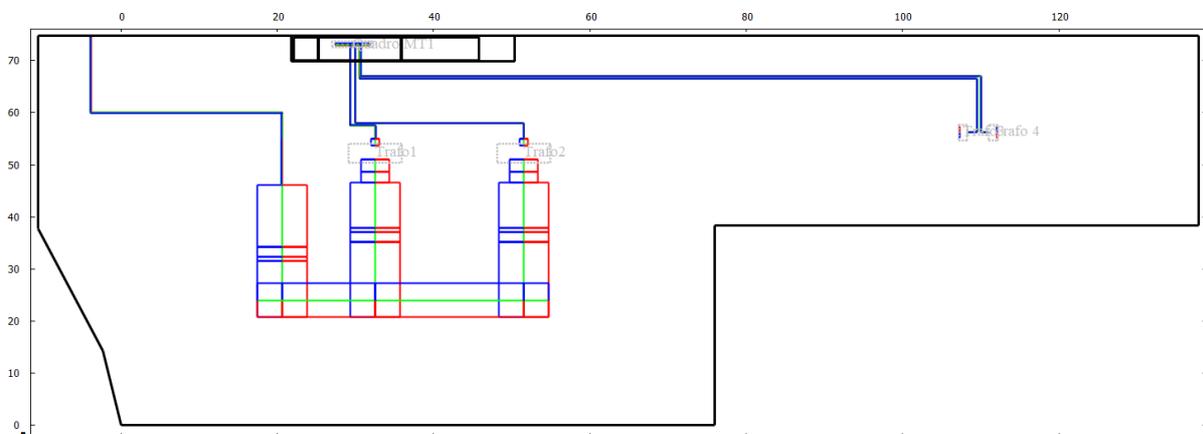


Figura 14 Layout della SSE Utente e dello Storage – vista in pianta

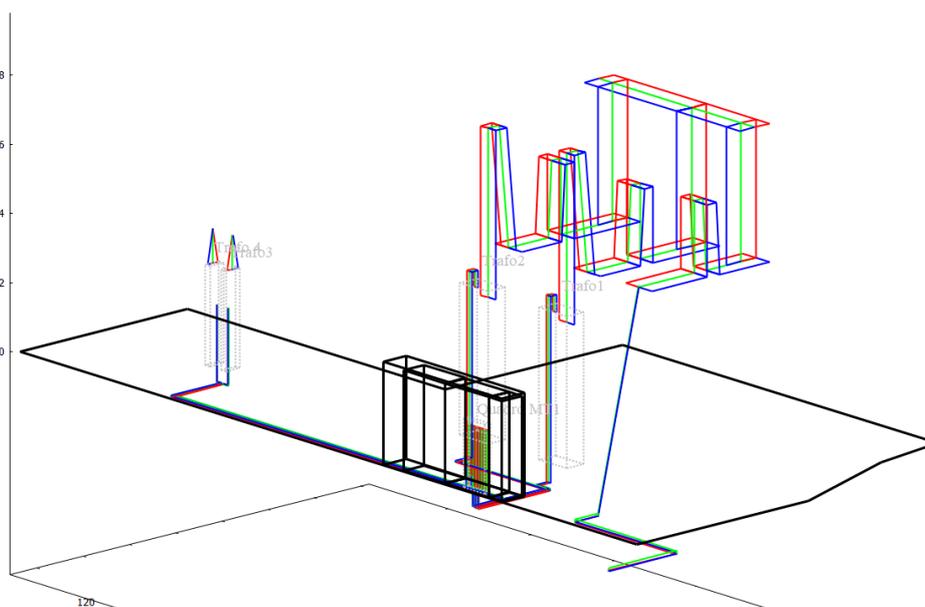


Figura 15 Layout della SSE Utente e dello Storage – vista 3D



Di seguito vengono analizzati i valori di induzione magnetica generati dalla SSE Utente e dallo Storage, in assenza di schermatura con quote utili alla determinazione delle DPA, nelle aree attigue la stessa.

Nelle successive Figure vengono presentate le curve isolivello che riportano i valori di induzione magnetica, in  $\mu\text{T}$ , calcolati su diversi piani XY (paralleli al suolo) per le seguenti quote:

- $z = 0,5$  corrispondente ad una quota di 0,5 metri a partire dal suolo della SSE Utente e dallo Storage (Figura 16 e 17);
- $z = 1,0$  corrispondente ad una quota di 1,0 metro a partire dal suolo della SSE Utente e dallo Storage (Figura 18 e 19);
- $z = 1,5$  corrispondente ad una quota di 1,5 metri a partire dal suolo della SSE Utente e dallo Storage (Figura 20 e 21).

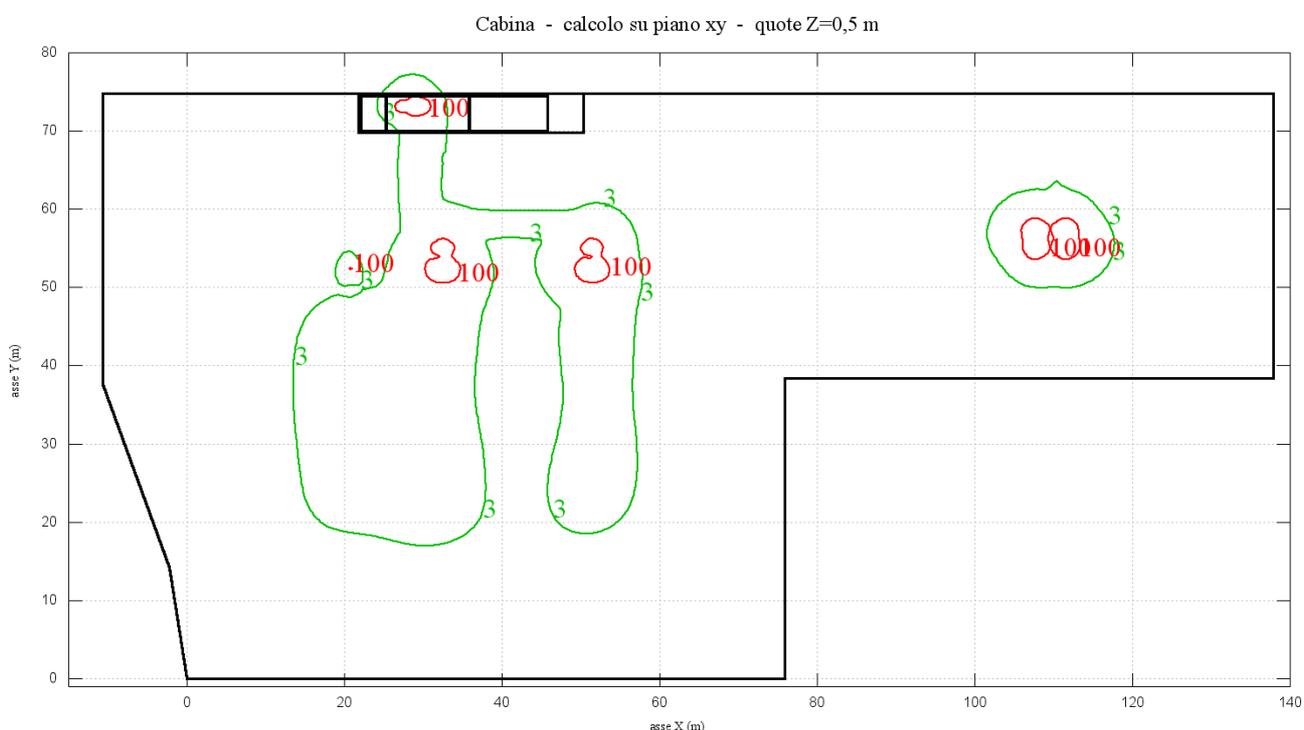
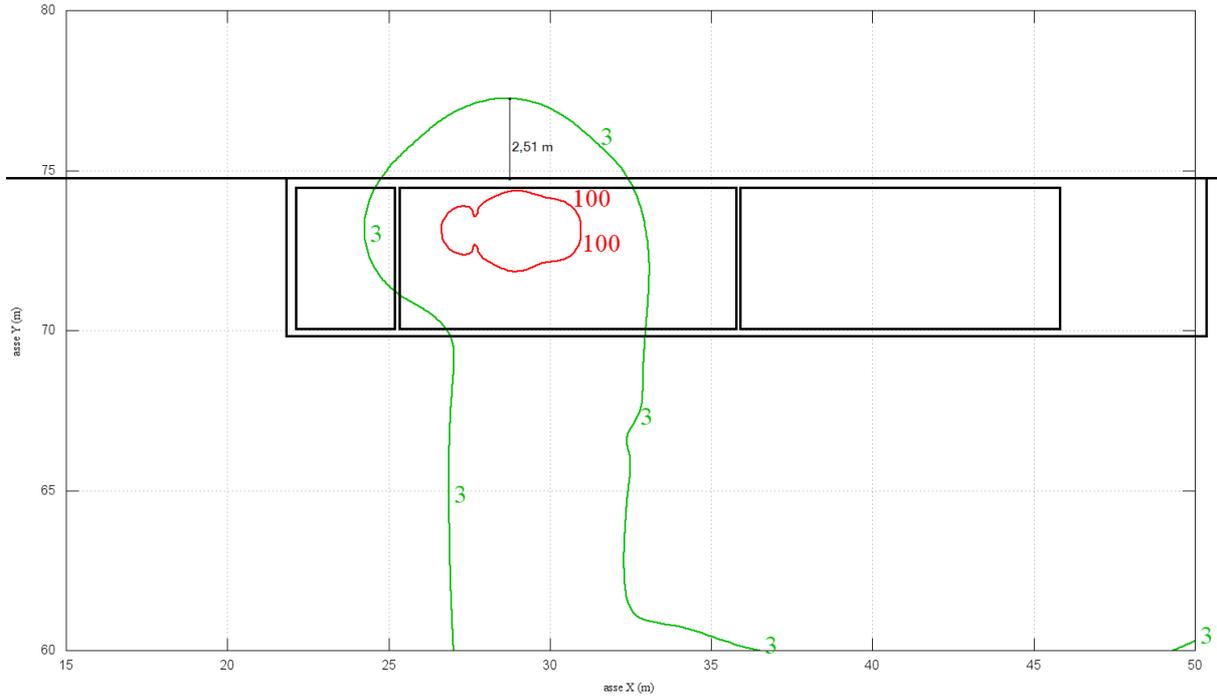


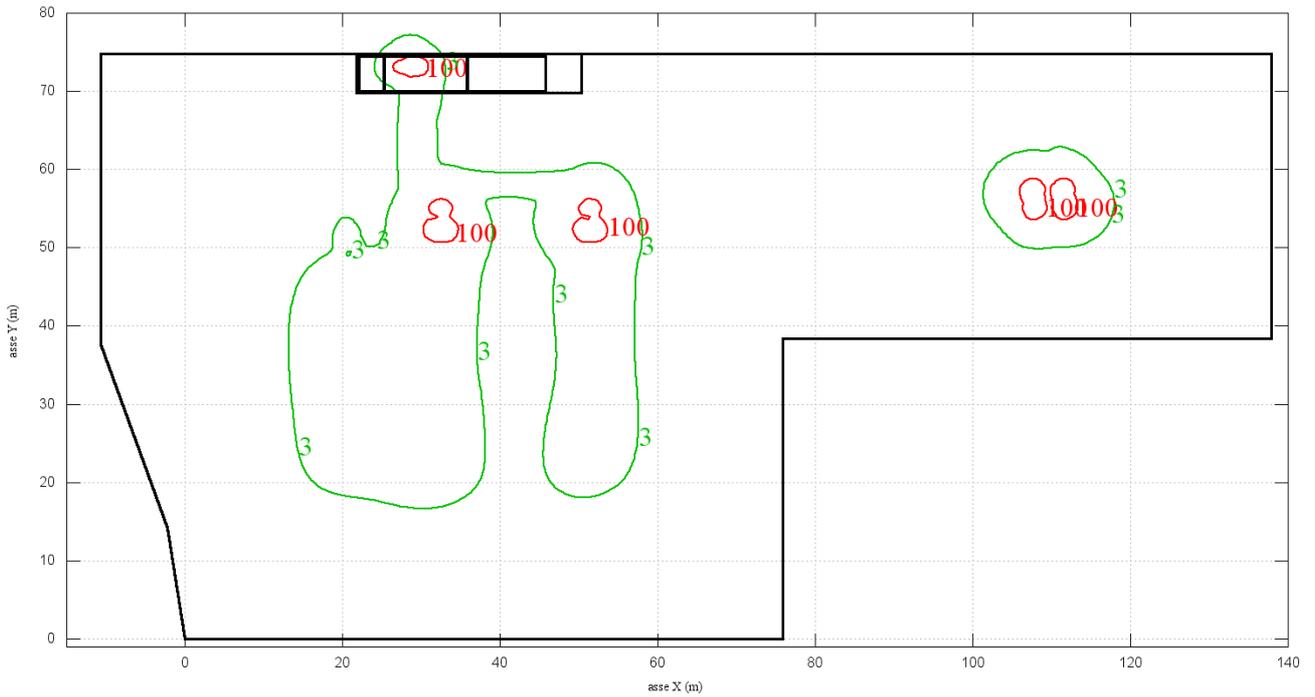
Figura 16 Curve isolivello d'induzione magnetica calcolate su un piano XY per  $z = 0,5$  m

Cabina - calcolo su piano xy - quote Z=0,5 m



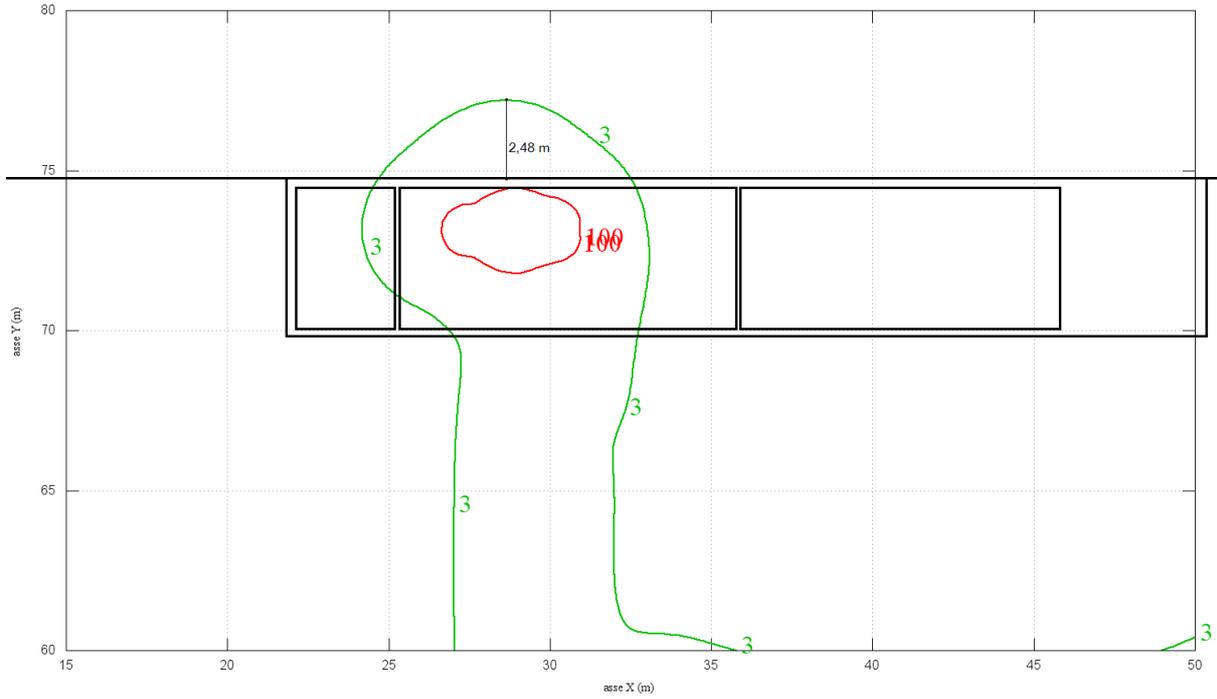
**Figura 17** Curve isolivello d'induzione magnetica calcolate su un piano XY per  $z = 0,5$  m (Particolare DPA)

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



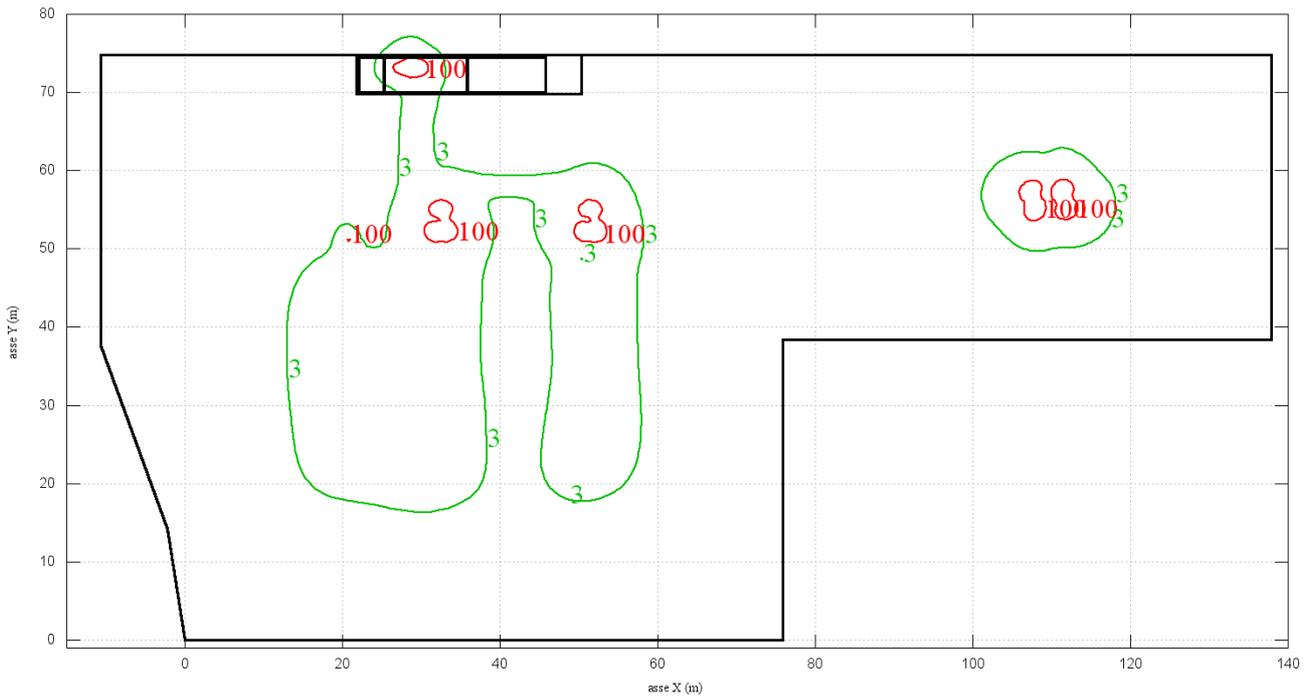
**Figura 18** Curve isolivello d'induzione magnetica calcolate su un piano XY per  $z = 1,0$  m

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

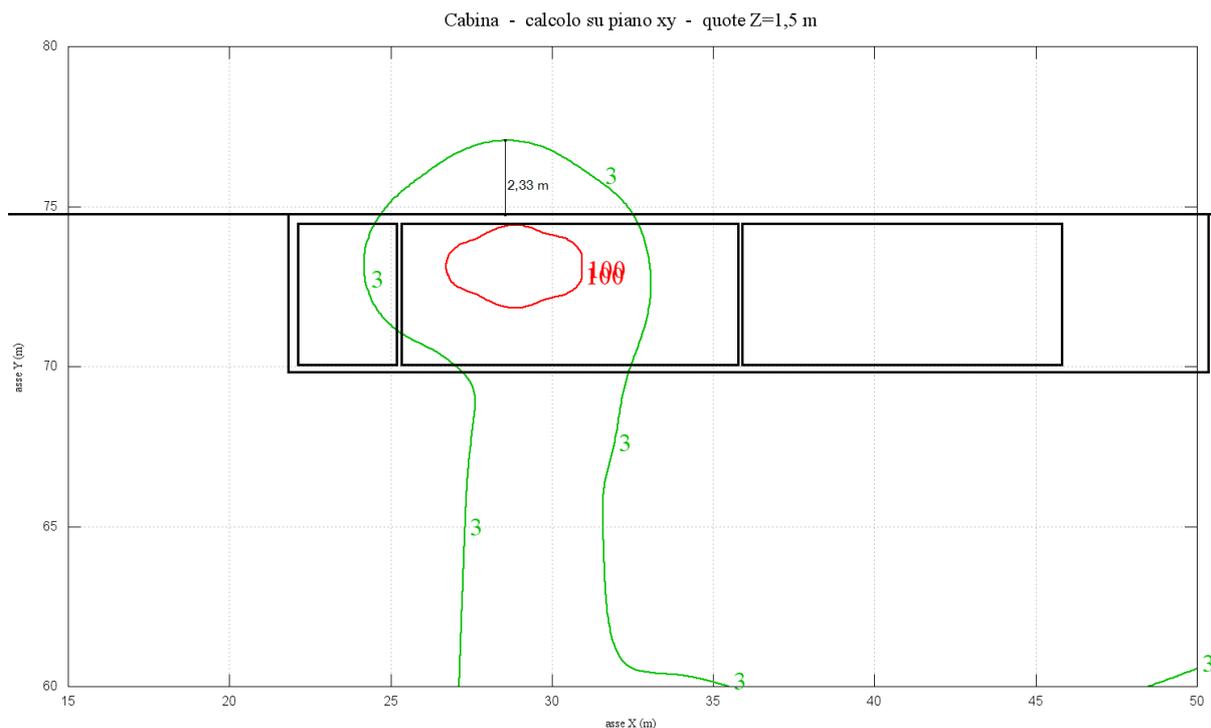


**Figura 19** Curve isolivello d'induzione magnetica calcolate su un piano XY per  $z = 1,0$  m (Particolare DPA)

Cabina - calcolo su piano xy - quote Z=1,5 m



**Figura 20** Curve isolivello d'induzione magnetica calcolate su un piano XY per  $z = 1,5$  m



**Figura 21** Curve isolivello d'induzione magnetica calcolate su un piano XY per z = 1,5 m (Particolare DPA)

Nella Tabella 3 vengono riportate le DPA di Parete/Recinto approssimate al mezzo metro successivo, relativa alla quota Z.

**Tabella 3 DPA – SSE Utente e Storage**

Cabina	Curva isolivello [µT]	DPA Parete Nord [m]	DPA Parete Est [m]	DPA Parete Sud [m]	DPA Parete Est [m]
SSE Utente e Storage	3	3,0	N.C.	N.C.	N.C.
	100	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.

### 3.4. Osservazioni

In una fase più avanzata del progetto, a seguito della definizione spaziale delle cabine elettriche, oltre alle opere di mitigazione per il rispetto del limite istantaneo 100µT, si dovranno verificare le eventuali interferenze delle DPA con aree sensibili. Si potrà quindi procedere alla progettazione di una soluzione schermante relativa al solo limite istantaneo oppure al rispetto dell'obiettivo di qualità.

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 AT in uscita dalla stessa.

## 4. Stallo SSE Terna

### 4.1. Layout architettonico

Nella Figura 22 si riporta la pianta dell'area dello Stallo di consegna Utente nella Stazione SSE Terna con indicazione della disposizione dei componenti elettrici presenti all'interno della stessa.

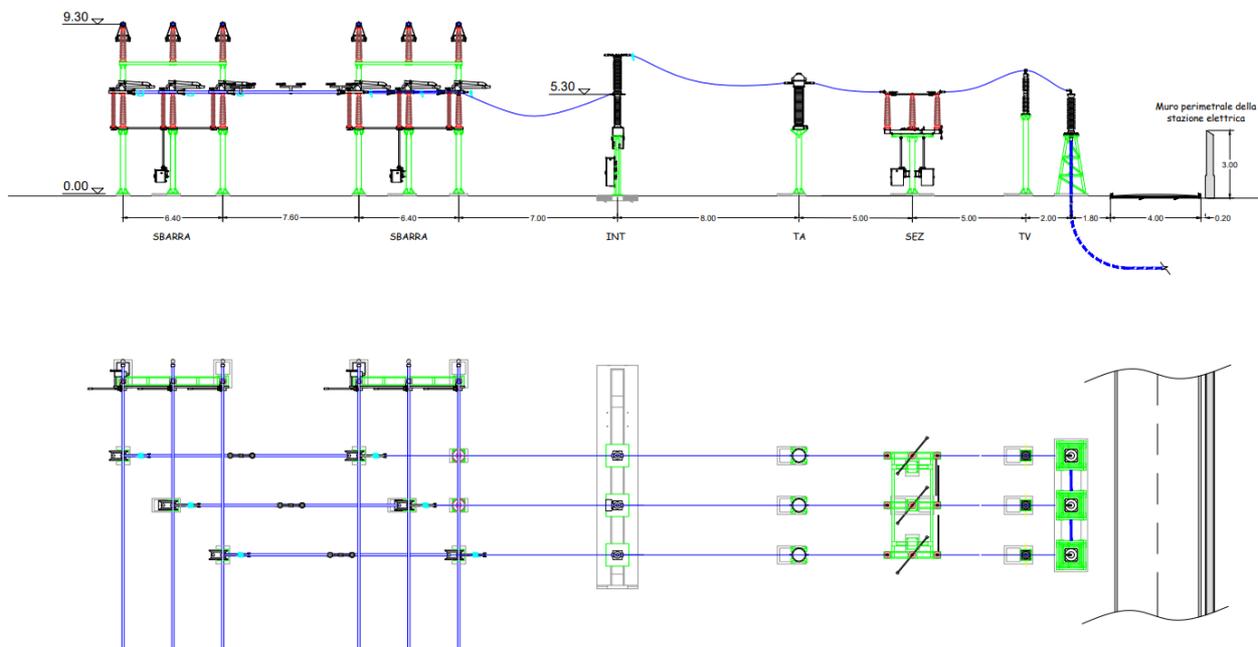


Figura 22 Pianta dell'area dello Stallo di consegna Utente nella Cabina SSE Terna

Essendo il progetto in fase preliminare, con i dati ad oggi forniti dalla committenza e senza ulteriori informazioni, si è convenuto di simulare per la Stazione Terna il solo Stallo di consegna Utente in essa:

- N.1 Cavo AT interrato di collegamento tra la Cabina SEE Utente e lo Stallo AT Terna con una corrente massima di circa 242A interrato ad una profondità di 1,60m e con posa a trifoglio;
- N.1 Barratura AT di collegamento tra il cavo interrato AT e le barrature AT di Terna con una corrente circolante massima di circa 242A.

## 4.2. Definizione dei limiti di esposizione nei locali circostanti

In riferimento alla normativa vigente dovranno essere valutati i seguenti limiti:

○ **Oltre il confine di proprietà:**

- **100  $\mu$ T esposizione istantanea**, valore imposto dal DPCM 8 Luglio 2003 – Art. 3;
- **3  $\mu$ T obiettivo di qualità** imposto dal DPCM 8 Luglio 2003 – Art. 4 nella progettazione di nuovi elettrodotti in corrispondenza di aree gioco per l'infanzia, di ambienti abitativi, di ambienti scolastici e di luoghi adibiti a permanenze non inferiori a quattro ore e nella progettazione dei nuovi insediamenti e delle nuove aree di cui sopra in prossimità di linee ed installazioni elettriche già presenti nel territorio, ai fini della progressiva minimizzazione dell'esposizione ai campi elettrici e magnetici generati dagli elettrodotti operanti alla frequenza di 50 Hz negli ambienti ad esposizione prolungata di persone (superiore alle quattro ore giornaliere).

Nota: il limite pari all'obiettivo di qualità dovrà essere rispettato anche oltre l'eventuale confine di proprietà. Quanto esposto non risulta indicato esplicitamente su nessun articolo del DPCM 8 Luglio 2003, ma viene implicitamente applicato come vincolo, nel caso di terreno edificabile limitrofo. Il non rispetto del limite genererebbe un vincolo alla costruzione nella proprietà altrui.

○ **All'interno della Stazione SSE Terna e della stessa proprietà:**

All'interno delle Cabine SSE Terna sono ammessi unicamente lavoratori professionalmente esposti nell'esercizio della loro funzione, pertanto i limiti di esposizione, i valori di attenzione e gli obiettivi di qualità fissati dal DPCM 8 luglio 2003 non si applicano a tali lavoratori.

## 4.3. Analisi MAGIC

### 4.3.1. Modello

Nelle Figure 23 e 24 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.

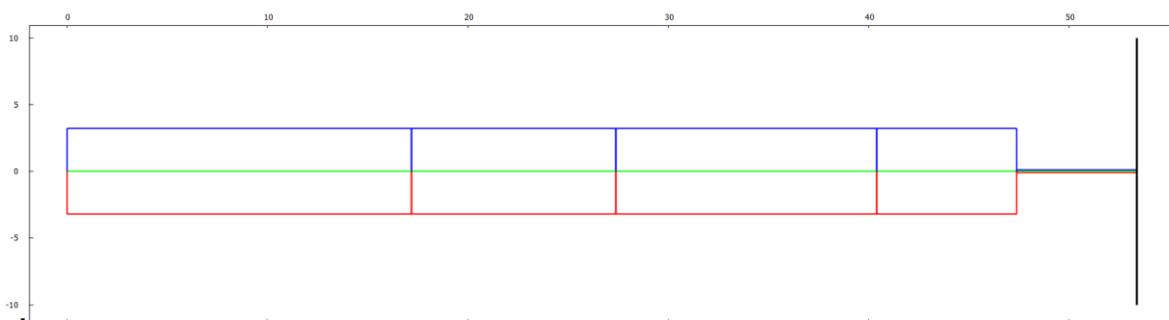


Figura 23 Layout dello Stallo di consegna Utente nella Cabina SEE Terna – vista in pianta

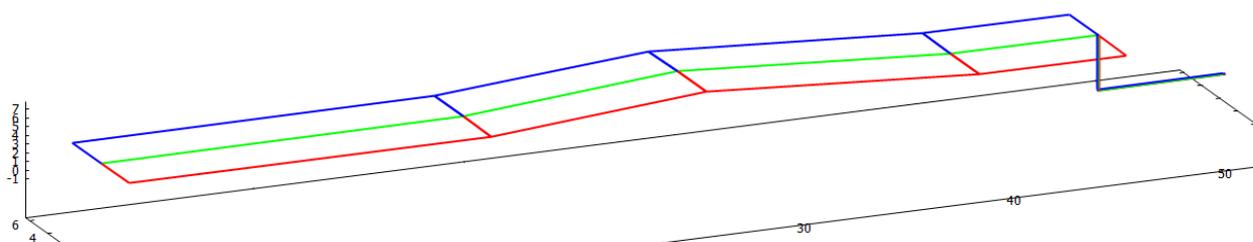


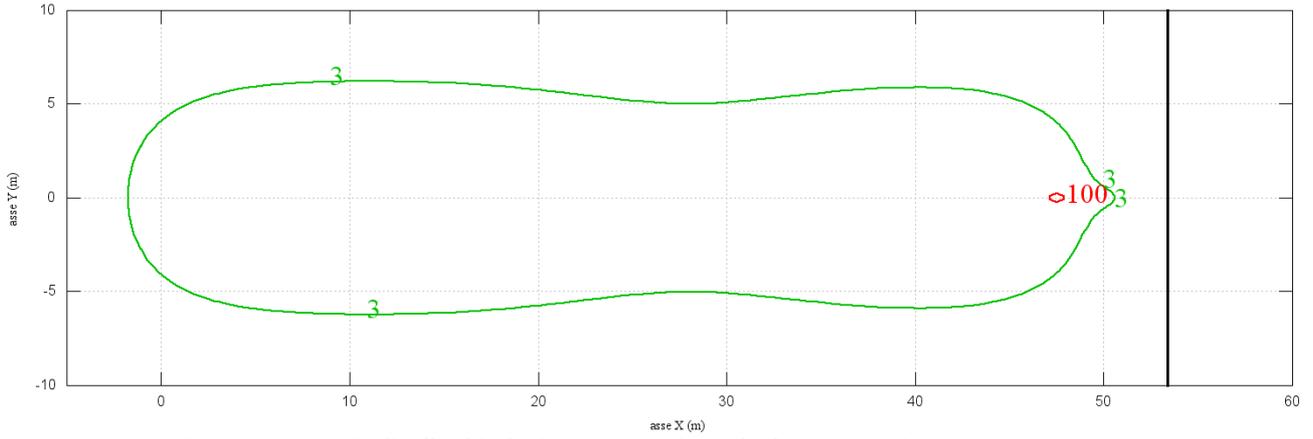
Figura 24 Layout dello Stallo di consegna Utente nella Cabina SEE Terna – vista 3D

Di seguito vengono analizzati i valori di induzione magnetica generati dal solo Stallo di consegna Utente nella Stazione SEE Terna, in assenza di schermatura con quote utili alla determinazione delle DPA, nelle aree attigue la stessa.

Nelle successive Figure vengono presentate le curve isolivello che riportano i valori di induzione magnetica, in  $\mu\text{T}$ , calcolati su diversi piani XY (paralleli al suolo) per le seguenti quote:

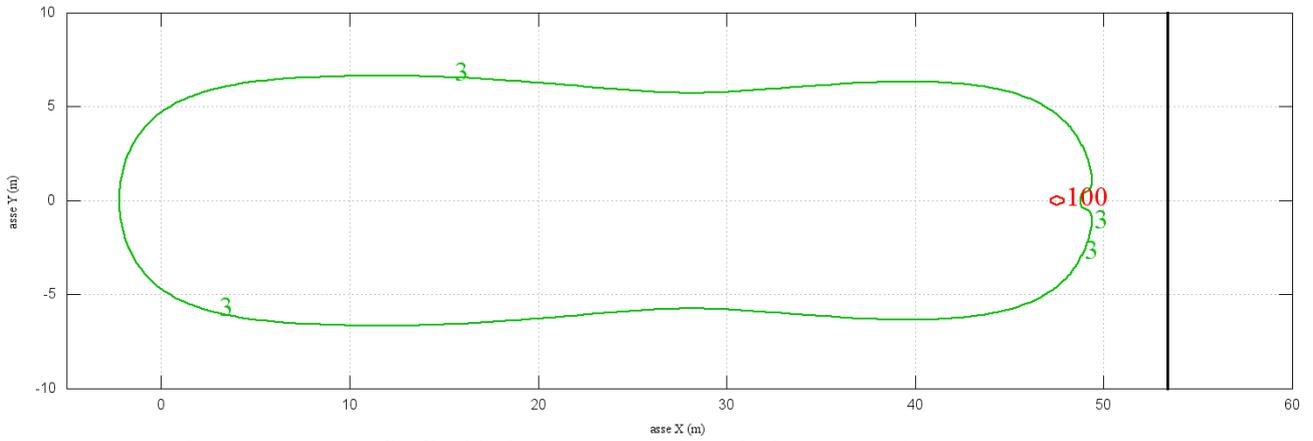
- $z = 0,5$  corrispondente ad una quota di 0,5 metri a partire dal suolo (Figura 25);
- $z = 1,0$  corrispondente ad una quota di 1,0 metro a partire dal suolo (Figura 26);
- $z = 1,5$  corrispondente ad una quota di 1,5 metri a partire dal suolo (Figura 27).

Cabina - calcolo su piano xy - quote Z=0,5 m



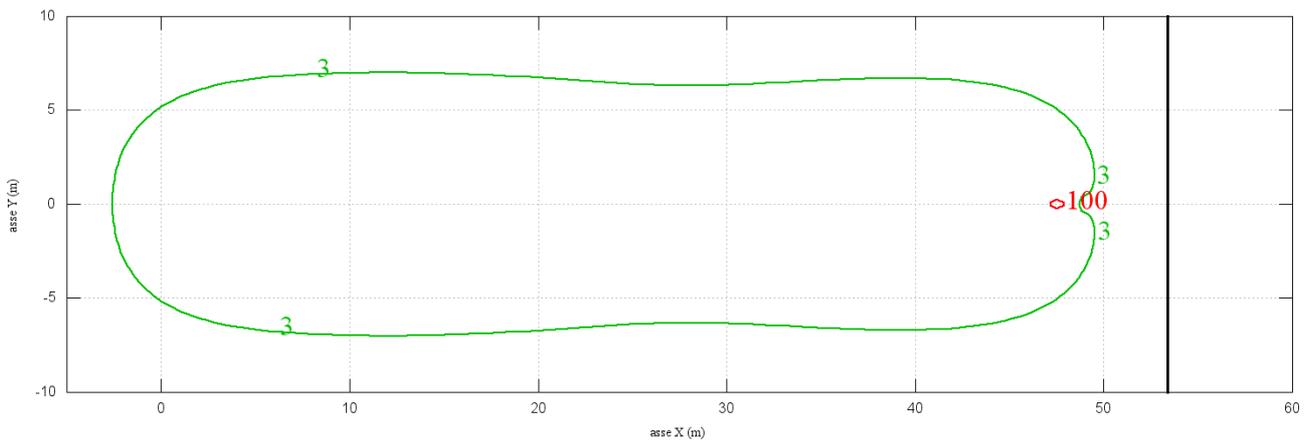
**Figura 25** Curve isolivello d'induzione magnetica calcolate su un piano XY per  $z = 0,5$  m

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



**Figura 26** Curve isolivello d'induzione magnetica calcolate su un piano XY per  $z = 1,0$  m

Cabina - calcolo su piano xy - quote Z=1,5 m



**Figura 27** Curve isolivello d'induzione magnetica calcolate su un piano XY per  $z = 1,5$  m

Nella Tabella 4 vengono riportate le DPA approssimate al mezzo metro successivo.

Tabella 4 DPA – SSE Terna

Cabina	Curva isolivello [ $\mu$ T]	DPA [m]
SSE Terna	3	N.C.
	100	N.C.

Come riportato sopra da un'analisi preliminare non risultano interferenze della DPA a carico dello Stallo di consegna Utente con il confine di proprietà della Stazione Terna.

#### 4.4. Osservazioni

In una fase più avanzata del progetto, a seguito della definizione spaziale delle cabine elettriche, oltre alle opere di mitigazione per il rispetto del limite istantaneo 100 $\mu$ T, si dovranno verificare le eventuali interferenze delle DPA con aree sensibili. Si potrà quindi procedere alla progettazione di una soluzione schermante relativa al solo limite istantaneo oppure al rispetto dell'obiettivo di qualità.

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.

## 5. Dorsali MT

### 5.1. Definizione delle sorgenti

Come da indicazioni fornite dalla committenza, nel seguente paragrafo verranno analizzate le induzioni magnetiche delle varie dorsali MT presenti all'interno del Parco Agrivoltaico:

- **CS1 – SSE:** dorsale MT con cavo ARP1H5(AR)E 18/30kV 3x1x400 con corrente di impiego pari a 509A;
- **CS2 – SSE:** dorsale MT con cavo ARP1H5(AR)E 18/30kV 3x1x400 con corrente di impiego pari a 497A;
- **CS3 – SSE:** dorsale MT con cavo ARP1H5(AR)E 18/30kV 3x1x400 con corrente di impiego pari a 497A;
- **SSE – Storage:** dorsale MT con cavo ARP1H5(AR)E 18/30kV 3x1x150 con corrente di impiego pari a 289A;
- **Cabina di sottocampo con singolo TR – CS<sub>n</sub>:** dorsale MT con cavo ARP1H5(AR)E 18/30kV 3x1x70 con corrente di impiego pari a 72A;
- **Cabina di sottocampo con doppio TR – CS<sub>n</sub>:** dorsale MT con cavo ARP1H5(AR)E 18/30kV 3x1x70 con corrente di impiego pari a 144A.

In accordi con la committenza, come per l'analisi delle cabine di sottocampo, si è deciso di studiare le induzioni magnetiche delle sole dorsali MT di collegamento tra Cabina di sottocampo con singolo TR e CS<sub>n</sub> e di collegamento tra Cabina di sottocampo con doppio TR e CS<sub>n</sub> caratterizzate dalle correnti dei trasformatori di taglia più elevata previsti.

In questa fase del progetto non conoscendo l'effettiva caratteristica di posa delle Dorsali MT, si è ritenuto opportuno analizzarle con posa a trifoglio.

Si riporta di seguito la definizione di DPA relativa ad un elettrodotto.

Per **Distanza di Prima Approssimazione (DPA)** si intende la distanza, in pianta sul livello del suolo, dalla proiezione del centro linea che garantisce che ogni punto la cui proiezione al suolo disti, dalla proiezione del centro linea più della DPA si trovi all'esterno delle fasce di rispetto.

Lo strumento di analisi (software MAGIC) utilizzato per la determinazione dei campi magnetici indotti delle linee interrate consente di plottare graficamente le curve isolivello relative all'induzione magnetica. Plottando la curva isolivello dei  $3\mu\text{T}$  e  $100\mu\text{T}$  si potranno valutare le DPA.

In riferimento alla normativa vigente dovranno essere valutati i seguenti limiti:

○ **Oltre il confine di proprietà:**

- **100  $\mu\text{T}$  esposizione istantanea**, valore imposto dal DPCM 8 Luglio 2003 – Art. 3;
- **3  $\mu\text{T}$  obiettivo di qualità** imposto dal DPCM 8 Luglio 2003 – Art. 4 nella progettazione di nuovi elettrodotti in corrispondenza di aree gioco per l'infanzia, di ambienti abitativi, di ambienti scolastici e di luoghi adibiti a permanenze non inferiori a quattro ore e nella progettazione dei nuovi insediamenti e delle nuove aree di cui sopra in prossimità di linee ed installazioni elettriche già presenti nel territorio, ai fini della progressiva minimizzazione dell'esposizione ai campi elettrici e magnetici generati dagli elettrodotti operanti alla frequenza di 50 Hz negli ambienti ad esposizione prolungata di persone (superiore alle quattro ore giornaliere).

Nota: il limite pari all'obiettivo di qualità dovrà essere rispettato anche oltre l'eventuale confine di proprietà. Quanto esposto non risulta indicato esplicitamente su nessun articolo del DPCM 8 Luglio 2003, ma viene implicitamente applicato come vincolo, nel caso di terreno edificabile limitrofo. Il non rispetto del limite genererebbe un vincolo alla costruzione nella proprietà altrui.

○ **All'interno del Parco Agrivoltaico, della SSE Utente, dello Storage e della stessa proprietà:**

Solitamente, all'interno dei parchi fotovoltaici sono ammessi unicamente lavoratori professionalmente esposti nell'esercizio della loro funzione, pertanto i limiti di esposizione, i valori di attenzione e gli obiettivi di qualità fissati dal DPCM 8 luglio 2003 non si applicano a tali lavoratori.

**Dalle informazioni ricevute dalla committenza, invece, esistono aree interne alla proprietà accessibili anche a lavoratori non professionalmente esposti. In particolare, essendo un Parco Agrivoltaico, le aree/campi sono utilizzabili da contadini, motivo per cui all'interno di tali zone il limite da rispettare risulterà sia quello istantaneo, sia l'obiettivo di qualità 3  $\mu\text{T}$  relativo ad aree con permanenza di lavoratori per più di 4 ore consecutive.**

## 5.2. Analisi delle linee MT in assenza di opere di mitigazione

Verrà rappresentata ogni tipologia delle Dorsali MT citate sopra mediante il software di calcolo tridimensionale MAGIC®, utilizzato per valutare l'induzione magnetica generata dalle stesse. Il software permette di effettuare delle simulazioni considerando la tridimensionalità delle singole sorgenti elettriche ed una sovrapposizione dei loro effetti in termini di induzione magnetica. In allegato alla presente relazione si fornisce il documento di validazione del software attraverso un confronto con software già esistenti e con rilievi sperimentali.

Attraverso il software MAGIC® si ottengono le curve isolivello dell'induzione magnetica delle Linee MT in studio con vista in sezione sul piano XY. Le quote riportate in figura rappresentano la DPA con centro linea x=0 (ossia il centro del cavidotto).

### 5.2.1. CS1 – SSE

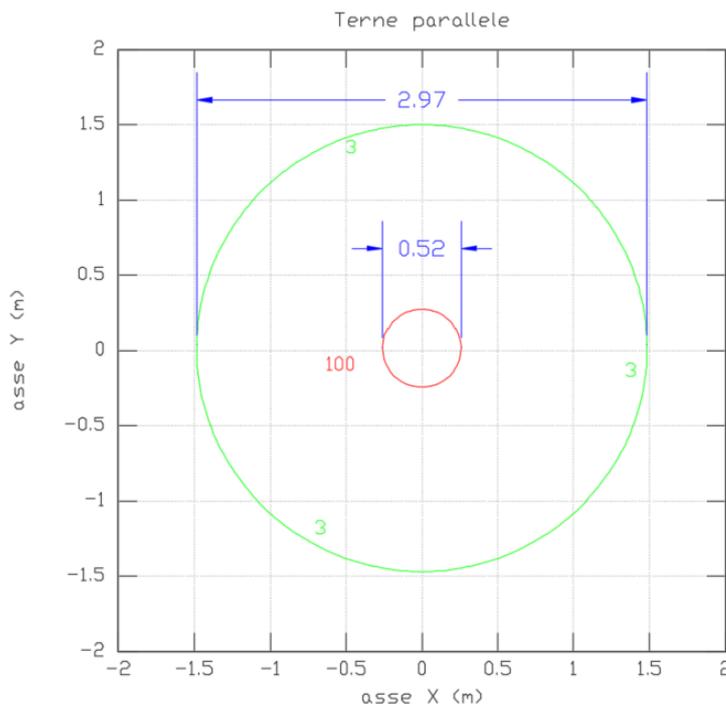


Figura 28 Curve isolivello Terna singola CS1 – SSE

### 5.2.2. CS2 – SSE

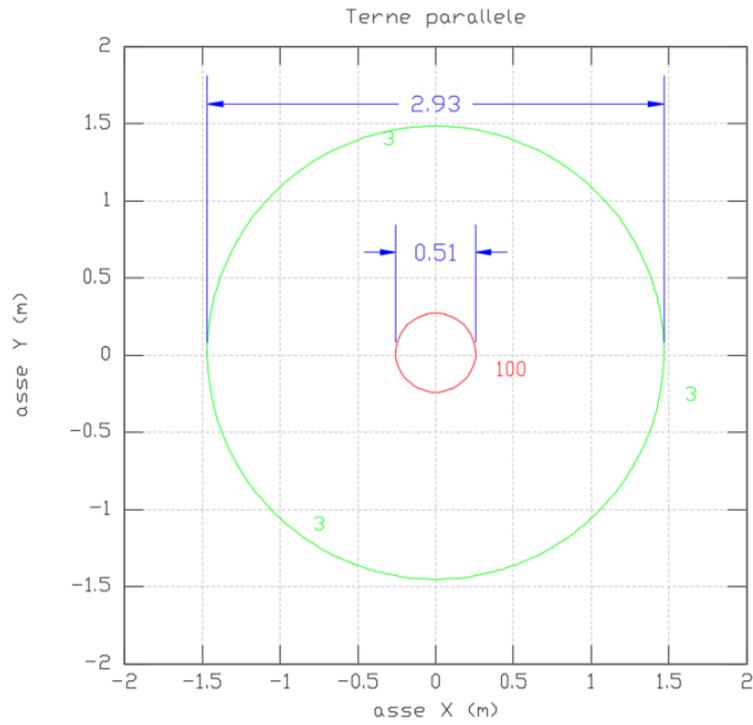


Figura 29 Curve isolivello Terna singola CS2 – SSE

### 5.2.3. CS3 – SSE

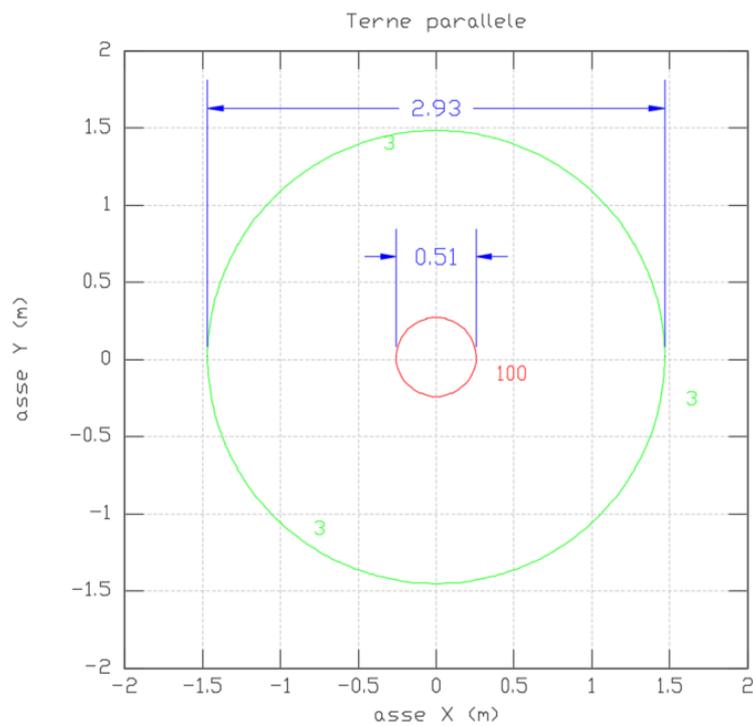


Figura 30 Curve isolivello Terna singola SSE – Storage

### 5.2.4. SSE – Storage

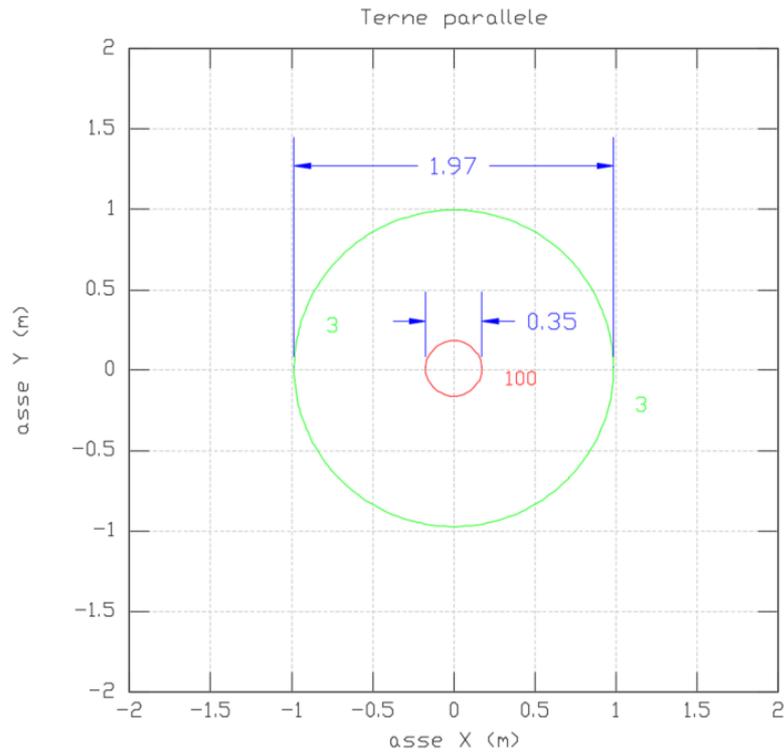


Figura 31 Curve isolivello Terna singola SSE – Storage

### 5.2.5. Cabina di sottocampo con singolo TR – CS<sub>n</sub>

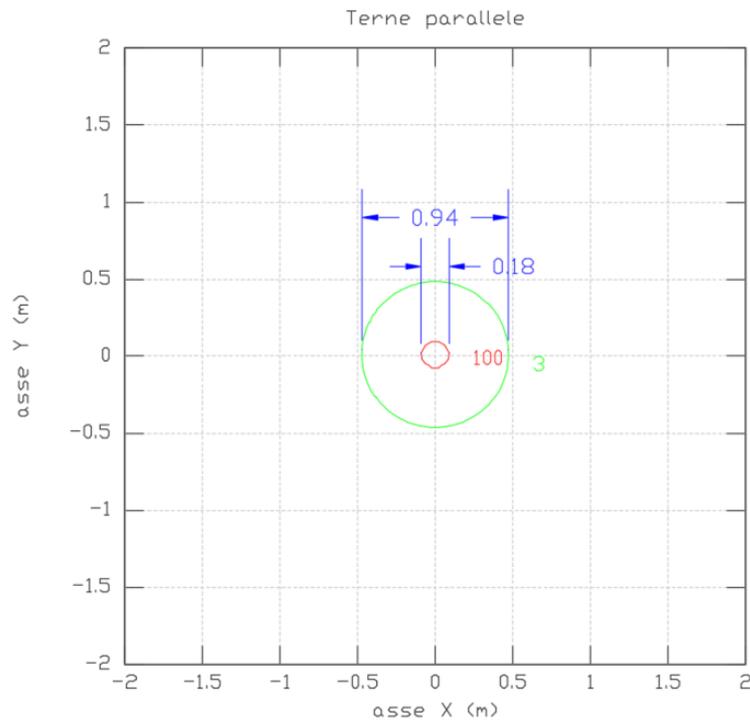


Figura 32 Curve isolivello Terna singola Cabina di sottocampo con singolo TR – CS<sub>n</sub>

## 5.2.6. Cabina di sottocampo con doppio TR – CS<sub>n</sub>

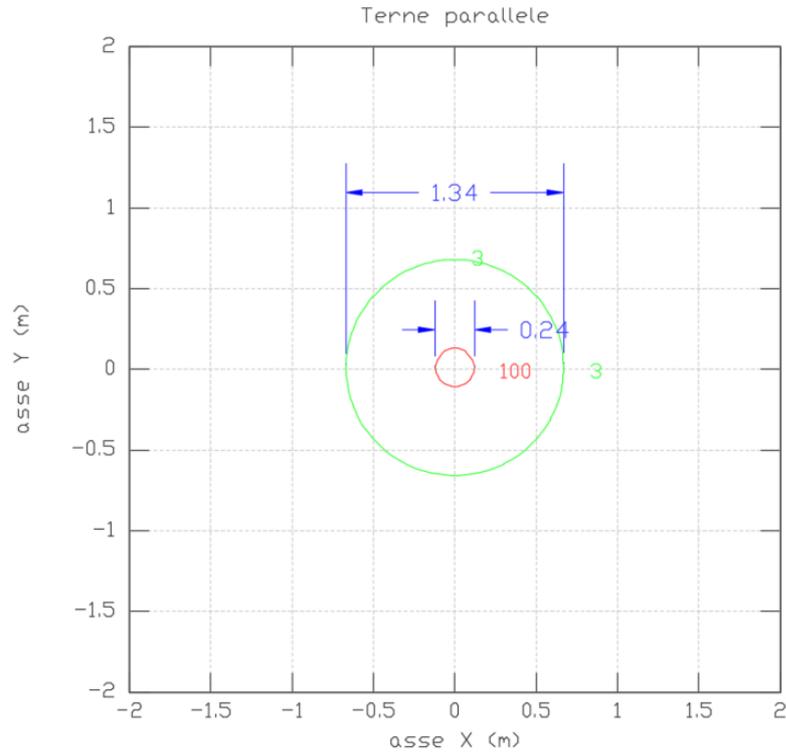


Figura 33 Curve isolivello Terna singola Cabina di sottocampo con doppio TR – CS<sub>n</sub>

Nella Tabella 5 vengono riportate le DPA approssimate al mezzo metro successivo.

Tabella 5. DPA – Dorsali MT

Dorsale MT	Corrente [A]	Curva isolivello [μT]	DPA [m]
CS1-SSE	509	3	3,00
		100	1,00
CS2-SSE	497	3	3,00
		100	1,00
CS3-SSE	497	3	3,00
		100	1,0
Storage-SSE	289	3	2,00
		100	0,50
Cabina di sottocampo con singolo TR – CS <sub>n</sub>	72	3	1,00
		100	0,50
Cabina di sottocampo con doppio TR – CS <sub>n</sub>	144	3	1,50
		100	0,50

### 5.3. Osservazioni

In una fase più avanzata del progetto se le DPA interferiranno con aree sensibili, si potrà procedere alla progettazione di una soluzione schermante. Tale soluzione porterà al rispetto dei limiti normativi vigenti.

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.

BEShielding S.r.l.  
Project Engineer  
Lorenzo Barlassina  


BEShielding S.r.l.  
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® (**MAG**netic **I**nduction **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 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 vettori  $\bar{u}_l$  e  $\bar{u}_r$  indicano, rispettivamente, il verso della corrente e della relativa normale;  $\times$  indica il prodotto vettoriale.

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

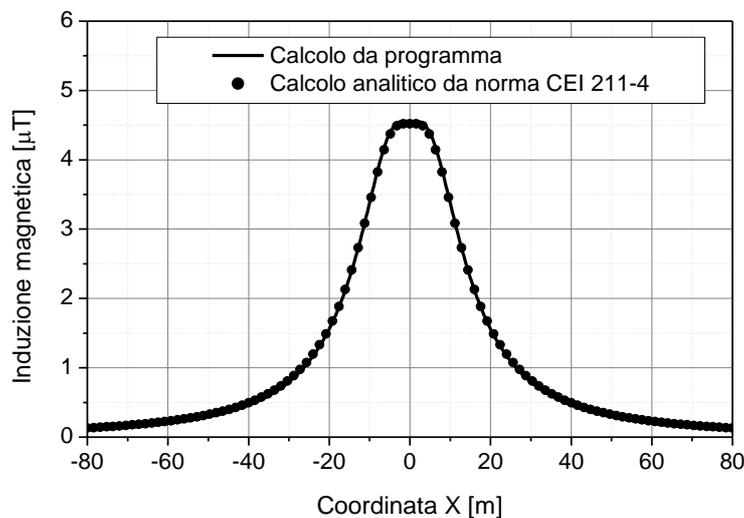


Figure 1 Induzione magnetica al suolo in prossimità di una linea aerea a doppia terna su semplice palificazione con corrente di 310: confronto tra MAGIC® e formula analitica CEI 211-4

***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

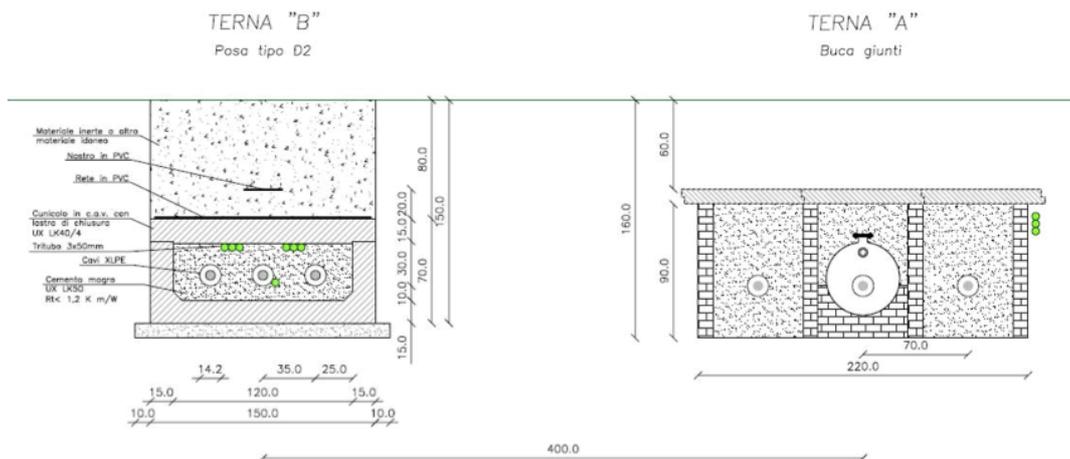


Figure 2 Affiancamento tra due linee interrate AT

Condizioni di carico e relazioni di fase:

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

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

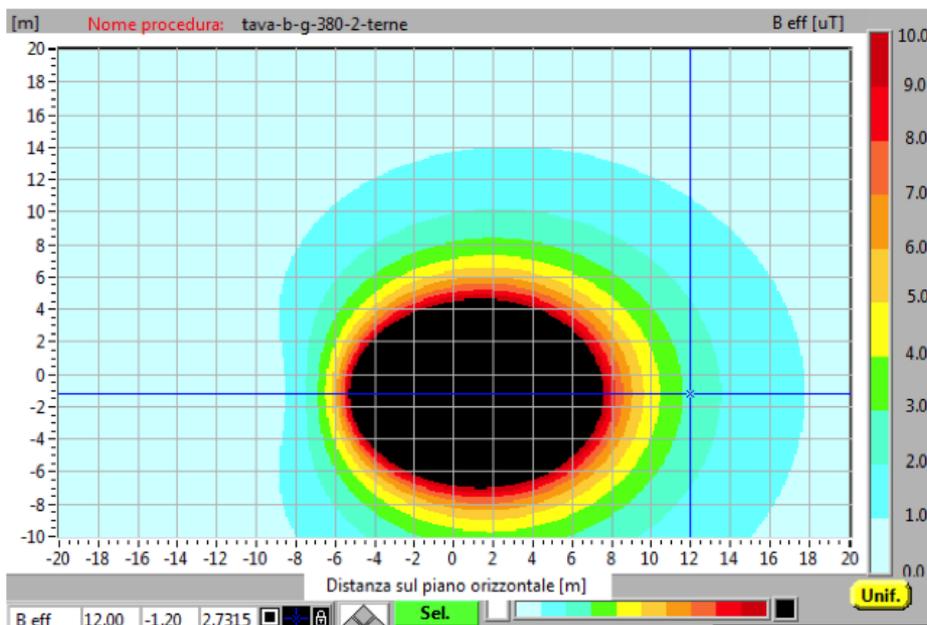


Figure 3 Mappa cromatica delle induzioni magnetiche calcolata mediante software CESI

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.

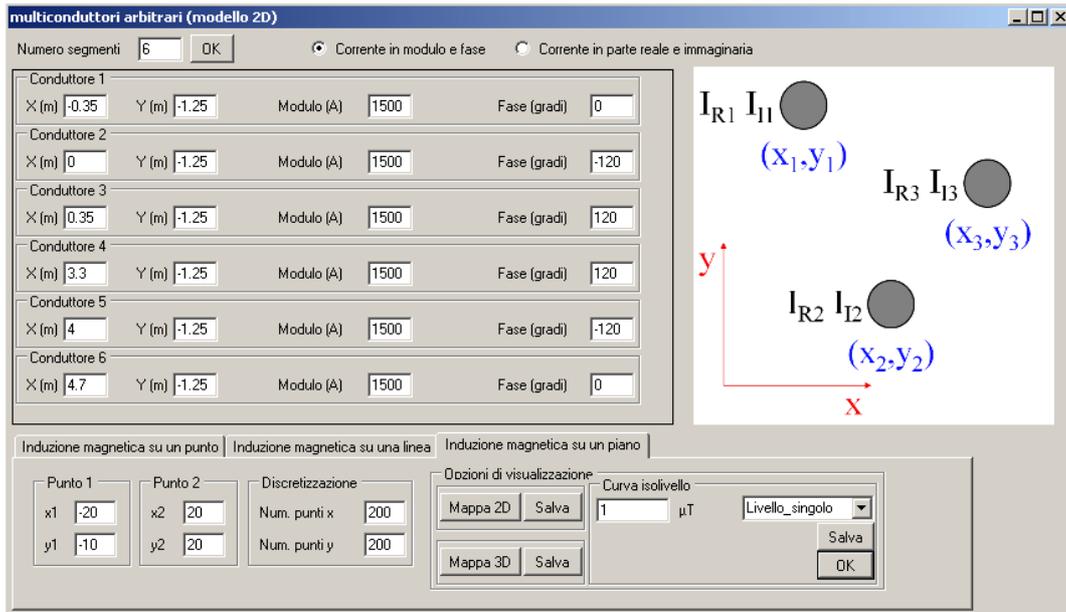


Figure 4 Schermata di ingresso modulo “multiconduttori arbitrari (modello 2D)”: dati definizione geometria e sorgenti

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

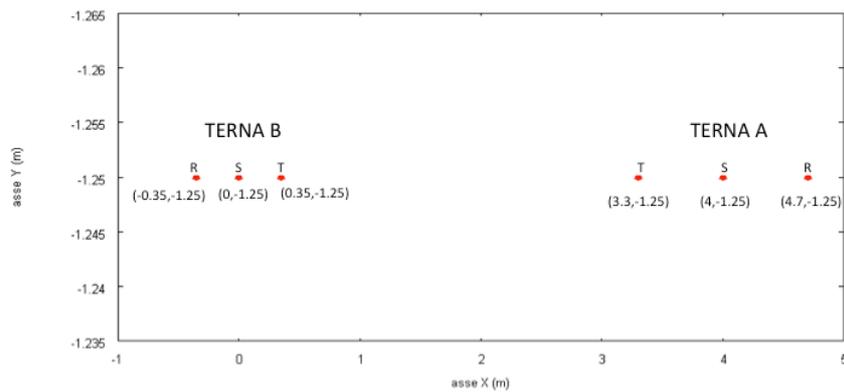


Figure 5 Geometria sorgenti

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

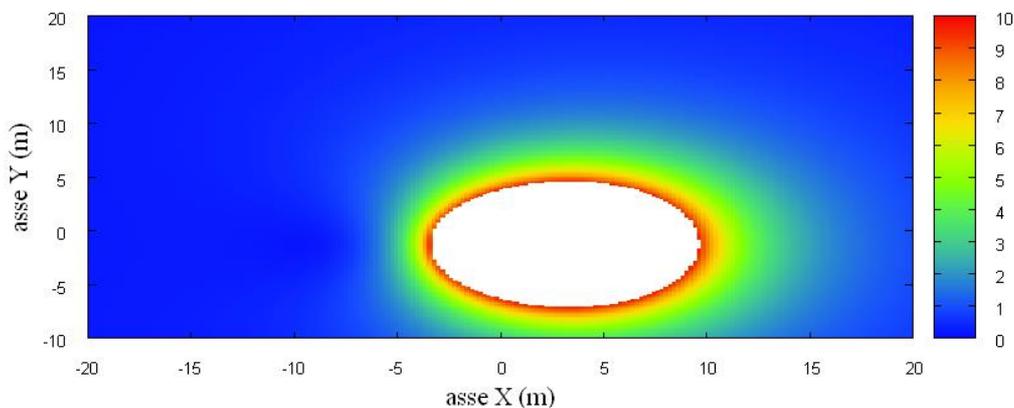


Figure 6 Mappa cromatica dell’induzione magnetica ottenuta dal software MAGIC® (valori in microT):

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

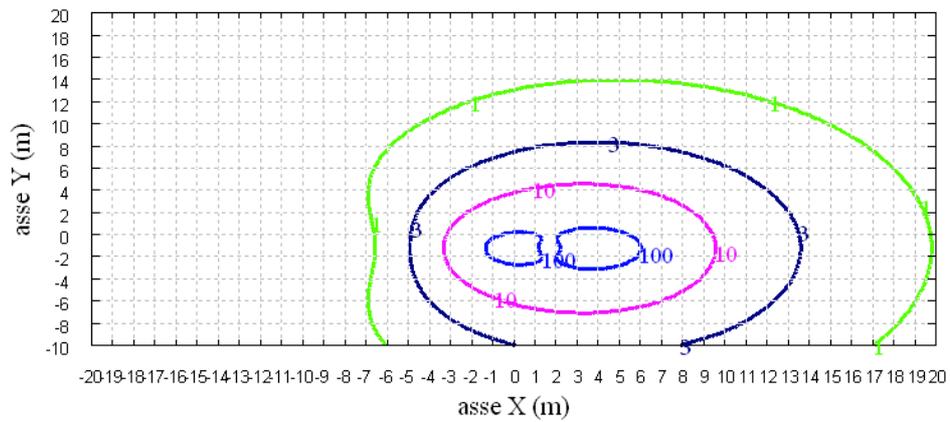


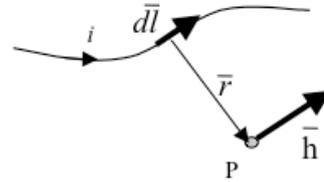
Figure 7 Linee isolivello dell'induzione magnetica (1, 3, 10, 100 microT) da software MAGIC®

*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.

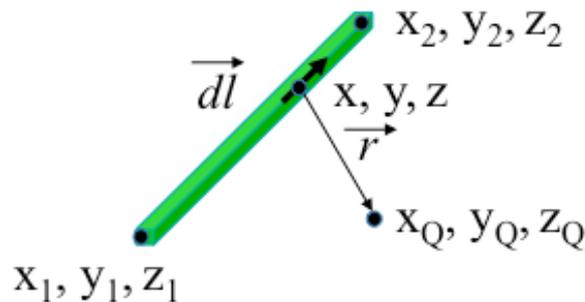


Figure 8 Modello del segmento.

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:

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

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

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 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.

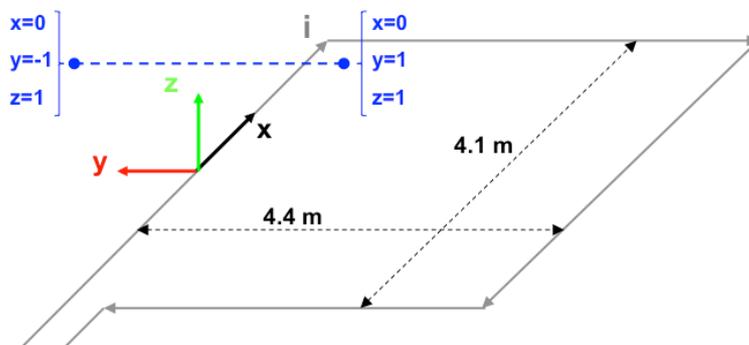


Figure 9 Schema di spira quadrata.

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

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

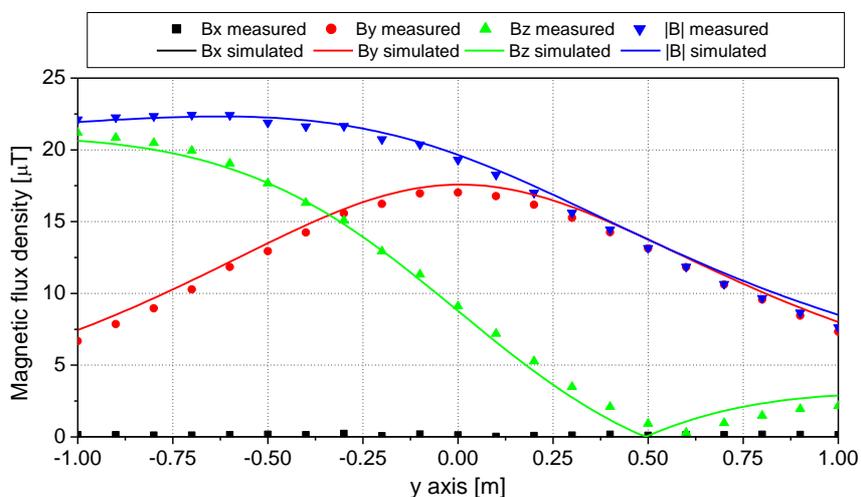


Figure 10 Induzione magnetica misurata e calcolata mediante software MAGIC®.

**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 ( $N_1 \cdot I_1 = N_2 \cdot I_2$ ) e verranno considerate, come sorgenti, le correnti nominali.

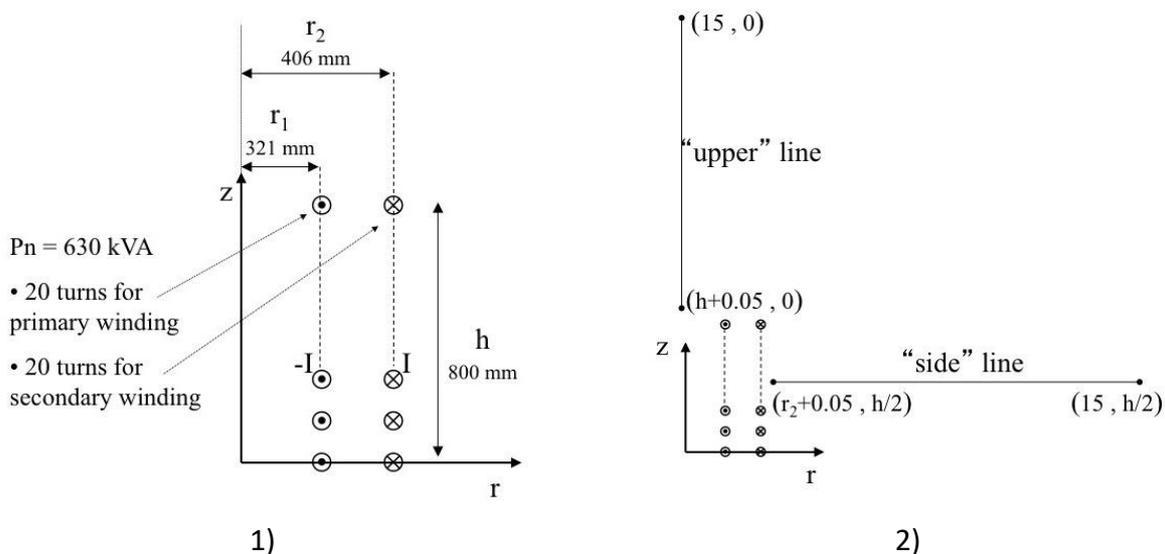


Figure 11 Geometria del sistema (1) e linee di calcolo (2)

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  $N_2$ ).

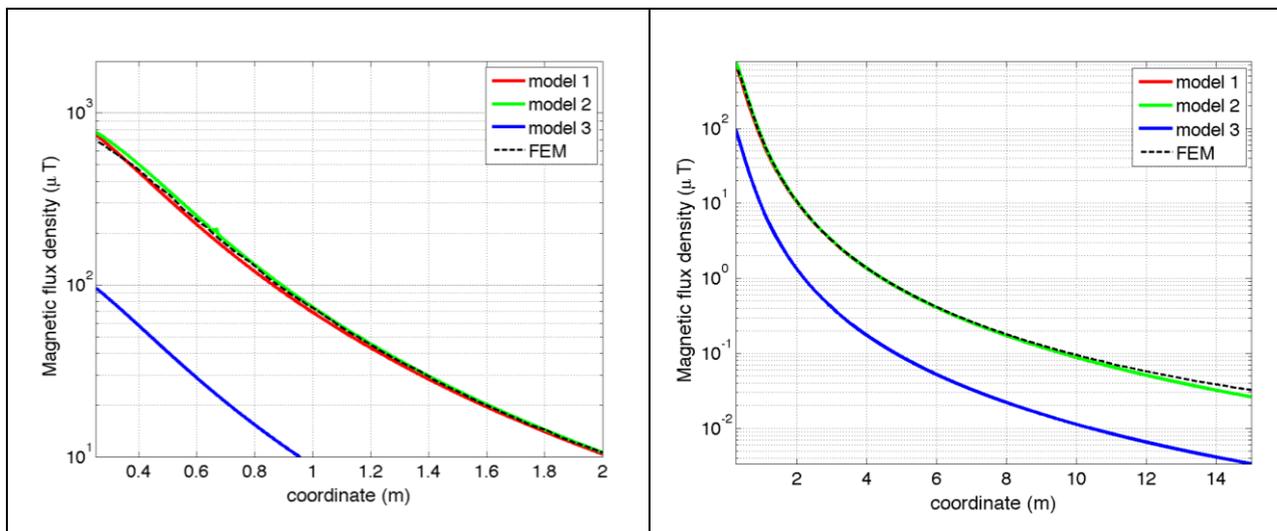


Figure 12 Induzione magnetica lungo la linea laterale

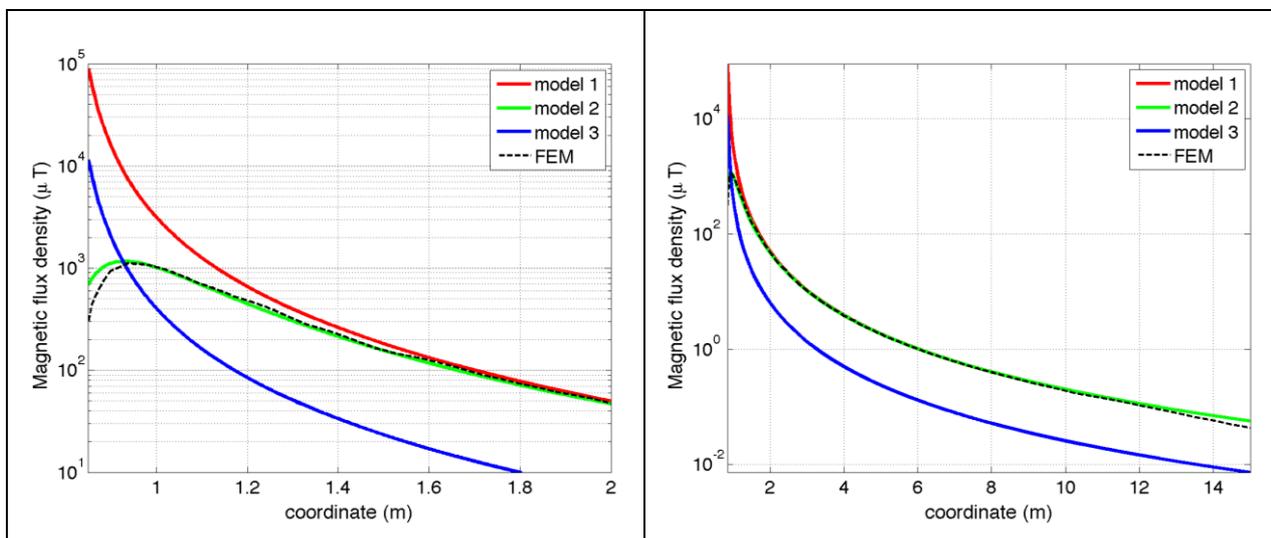


Figure 13 Induzione magnetica lungo la linea superiore

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

Le linee di calcolo S1 ed S2 (Fig. 15) sono poste ad 1.5m dal piano di appoggio del trasformatore. E' importante sottolineare che il contributo dei terminali di BT influisce significativamente 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.**

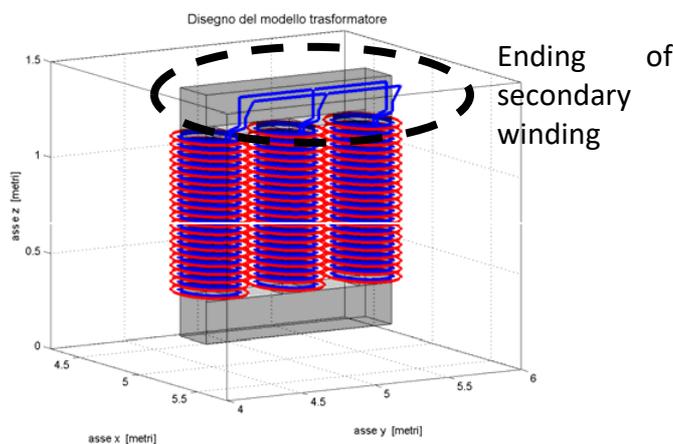


Figure 14 Connessioni elettriche considerate ai lati BT.

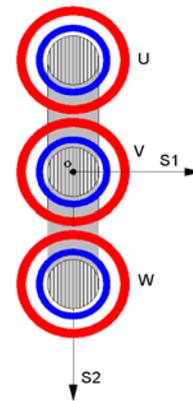
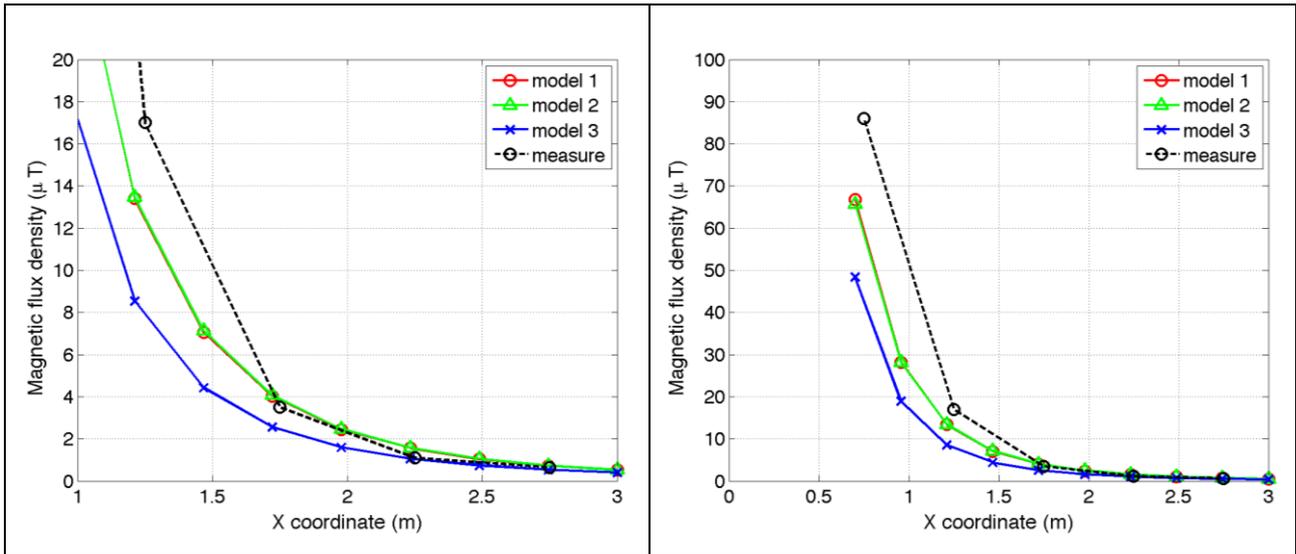
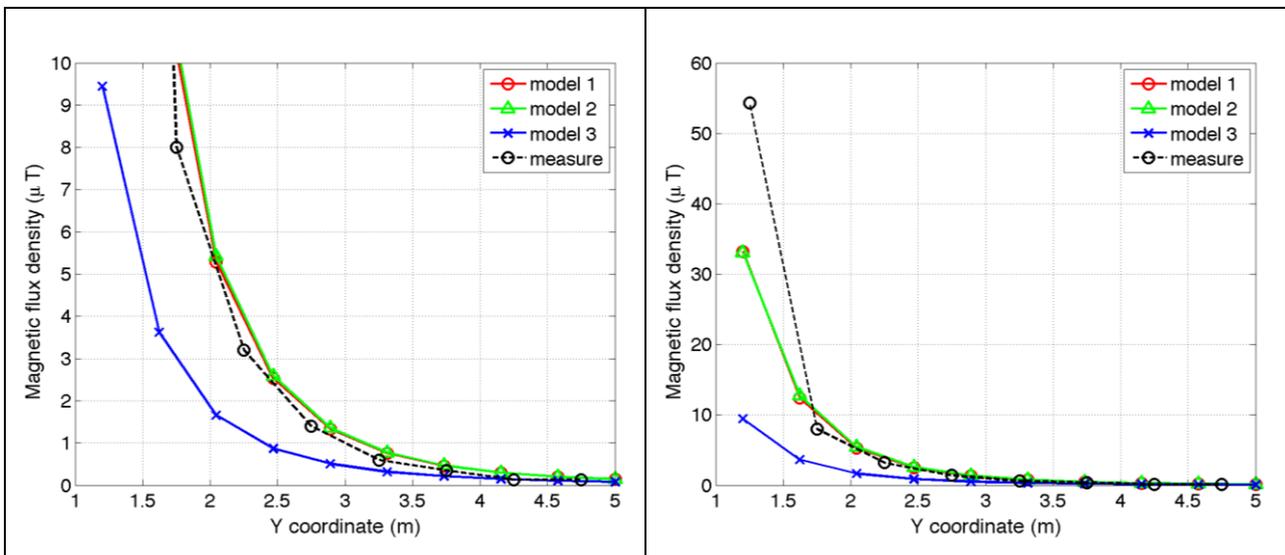


Figure 15 Linee di calcolo S1 ed S2



**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 (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.